



MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E INOVAÇÕES



sid.inpe.br/mtc-m21c/2021/05.04.16.16-TDI

**ESTUDO E OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE
SOLDAGEM DE INTERCONECTORES ÀS CÉLULAS
DE PAINÉIS SOLARES EMPREGADOS EM SATÉLITES
ARTIFICIAIS APLICANDO PROJETO E ANÁLISE DE
EXPERIMENTOS**

Graziela Fernanda de Souza Maia

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Engenharia e Gerenciamento de Sistemas Espaciais, orientada pelos Drs. Marcelo Lopes de Oliveira e Souza, e Alírio Cavalcanti de Brito, aprovada em 11 de maio de 2021.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/44KK4GS>>

INPE
São José dos Campos
2021

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Coordenação de Ensino, Pesquisa e Extensão (COEPE)
Divisão de Biblioteca (DIBIB)
CEP 12.227-010
São José dos Campos - SP - Brasil
Tel.:(012) 3208-6923/7348
E-mail: pubtc@inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE - CEPPII (PORTARIA Nº 176/2018/SEI-INPE):

Presidente:

Dra. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Coordenação-Geral de Ciências da Terra (CGCT)

Membros:

Dra. Ieda Del Arco Sanches - Conselho de Pós-Graduação (CPG)
Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação-Geral de Engenharia, Tecnologia e Ciência Espaciais (CGCE)
Dr. Rafael Duarte Coelho dos Santos - Coordenação-Geral de Infraestrutura e Pesquisas Aplicadas (CGIP)
Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon
Clayton Martins Pereira - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Divisão de Biblioteca (DIBIB)
André Luis Dias Fernandes - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Ivone Martins - Divisão de Biblioteca (DIBIB)
André Luis Dias Fernandes - Divisão de Biblioteca (DIBIB)



MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E INOVAÇÕES



sid.inpe.br/mtc-m21c/2021/05.04.16.16-TDI

**ESTUDO E OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE
SOLDAGEM DE INTERCONECTORES ÀS CÉLULAS
DE PAINÉIS SOLARES EMPREGADOS EM SATÉLITES
ARTIFICIAIS APLICANDO PROJETO E ANÁLISE DE
EXPERIMENTOS**

Graziela Fernanda de Souza Maia

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Engenharia e Gerenciamento de Sistemas Espaciais, orientada pelos Drs. Marcelo Lopes de Oliveira e Souza, e Alírio Cavalcanti de Brito, aprovada em 11 de maio de 2021.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/44KK4GS>>

INPE
São José dos Campos
2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Maia, Graziela Fernanda de Souza.

Ma28e Estudo e otimização do processo de soldagem de interconectores às células de painéis solares empregados em satélites artificiais aplicando projeto e análise de experimentos / Graziela Fernanda de Souza Maia. – São José dos Campos : INPE, 2021.

xl + 283 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21c/2021/05.04.16.16-TDI)

Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Engenharia e Gerenciamento de Sistemas Espaciais) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2021.

Orientadores : Drs. Marcelo Lopes de Oliveira e Souza, e Alírio Cavalcanti de Brito.

1. Interconector. 2. Célula solar. 3. Projeto e análise de experimentos. 4. Soldagem por resistência elétrica com eletrodos paralelos. I.Título.

CDU 629.78:621.316.34:621.791



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E INOVAÇÕES**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**
Serviço de Pós-Graduação - SEPGR**DEFESA FINAL DE DISSERTAÇÃO DE GRAZIELA FERNANDA DE SOUZA MAIA**
BANCA Nº 084/2021, REG 141216/2018

No dia 11 de maio de 2021, às 10h00min, por teleconferência, o(a) aluno(a) mencionado(a) acima defendeu seu trabalho final (apresentação oral seguida de arguição) perante uma Banca Examinadora, cujos membros estão listados abaixo. O(A) aluno(a) foi APROVADO(A) pela Banca Examinadora por unanimidade, em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do Título de Mestra em Engenharia e Tecnologia Espaciais / Engenharia e Gerenciamento de Sistemas Espaciais. O trabalho precisa da incorporação das correções sugeridas pela Banca Examinadora e revisão final pelo(s) orientador(es).

Título: "ESTUDO E OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE SOLDAGEM DE INTERCONECTORES ÀS CÉLULAS DE PAINÉIS SOLARES EMPREGADOS EM SATÉLITES ARTIFICIAIS APLICANDO PROJETO E ANÁLISE DE EXPERIMENTOS"

Eu, Silvio Manea, Presidente da Banca Examinadora, assino esta ATA, em nome de todos os membros, com o consentimento dos mesmos.

Membros da Banca

Dr. Silvio Manea – Presidente – INPE
Dr. Marcelo Lopes de Oliveira e Souza – Orientador – INPE
Dr. Alírio Cavalcanti de Brito – Orientador – INPE
Dra. Ana Paula de Sá Santos Rabello – Membro Interno – INPE
Dr. Célio da Costa Vaz – Membro Externo – Orbital Engenharia



Documento assinado eletronicamente por **Silvio Manea, Tecnologista**, em 12/05/2021, às 17:10 (horário oficial de Brasília), com fundamento no art. 6º do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [http:// sei.mcc. gov.br/verifica.html](http://sei.mcc.gov.br/verifica.html), informando o código verificador **7193970** e o código CRC **A0A3FFE5**.

"Se pude ver mais longe foi porque me apoiei em ombros de outros gigantes."

Isaac Newton

Dedico este trabalho à minha família.

AGRADECIMENTOS

Ao nosso Deus acima de tudo, motivo de todas as coisas.

À minha mãe, Silvia, e ao meu pai, Raimundo, pelo seu amor incondicional.

Ao meu esposo, Felipe Maia, pelo enorme carinho, apoio e, sobretudo, paciência com que me ajudou a superar os momentos mais críticos que encarei nesta jornada.

Aos meus orientadores, Dr. Marcelo Lopes de Oliveira e Souza e Dr. Alírio Cavalcanti de Brito, pelos ensinamentos compartilhados, pela disposição em recomeçar inúmeras vezes e tolerância pelos erros cometidos durante o desenvolvimento desta dissertação e por não terem deixado que eu abandonasse esse caminho.

À Tereza Brito que me auxiliou nas referências bibliográficas e me animou em momentos difíceis.

À Orbital Engenharia pelo fornecimento dos recursos (humanos e materiais), além do uso do laboratório para soldagem dos interconectores às células solares, tornando possível a realização desta pesquisa. À M.Sc. Jaqueline Vaz Maiolino e ao Dr. Célio Costa Vaz pelos conhecimentos compartilhados e por sempre estarem dispostos a contribuir com esta pesquisa. Aos funcionários da Orbital (Vinicius, Alex e William) que executaram os experimentos, os testes e compartilharam suas experiências.

Ao professor Dr. Alírio Cavalcanti de Brito por ceder a licença do software estatístico MINITAB 17®, para que os dados pudessem ser analisados com maior facilidade.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE e seu Curso de Pós Graduação em ETE pela infraestrutura e oportunidade da realização deste trabalho. E também aos coordenadores e toda a equipe do Serviço de Pós-Graduação do INPE, em especial à Edleusa Ferreira e Juliana Lira, e aos

representantes do corpo discente, pela disponibilidade e apoio em todos os momentos em que precisei.

Aos membros da Banca Examinadora Dr. Célio Costa Vaz, Dra. Ana Paula Rabello e ao Dr. Silvio Manea pelas valiosas contribuições no texto dessa Dissertação.

À todos os professores do Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia Espaciais – Opção Engenharia e Gerenciamento de Sistemas Espaciais – ETE/CSE, pelos conhecimentos compartilhados.

Aos amigos do grupo de orientação Paula Renata, Roberta Porto, Ana Paula Rabello, Sérgio Penna, Carlos Eduardo, Daniel Rondon e Márcia Alvarenga que, entre uma conversa e outra, sempre me animaram e apoiaram.

Aos amigos do Curso de Pós-Graduação do INPE, em especial à Elaine Ferreira que compartilhou muitas alegrias e decepções durante a trajetória desta etapa na minha vida.

Aos colegas do prédio do Satélite no INPE (antiga DEA) que me apoiaram e contribuíram com conversas descontraídas; em especial ao Luiz Celso Gomes Torres que me incentivou a entrar no mestrado e sempre que possível me auxiliou durante todas as fases dessa jornada, além de compartilhar informações e conhecimento.

À minha grande amiga de infância, Camila Abe que sempre me incentivou a estudar e me deu dicas valiosas durante toda a minha jornada no mestrado.

À Simone Del Ducca, da biblioteca, pela paciência e prontidão em me atender nas correções dessa Dissertação.

À Fernando Ferraz Amaral, Engenheiro de Controle e Automação e Mestre em Engenharia de Produção pela UNIFEI, que forneceu dados do processo de soldagem a ponto por resistência elétrica de chapas metálicas utilizadas no setor automotivo, para que as primeiras análises fossem realizadas, além da familiarização com o MINITAB.

E a todos que diretamente ou indiretamente colaboraram na realização desse trabalho.

RESUMO

O processo de soldagem das interconexões às células solares é um dos mais críticos na fabricação de painéis solares. Durante a soldagem do interconector, a célula solar sofre um certo nível de degradação. Por isso, é importante determinar quais parâmetros do processo são importantes e quais são seus níveis adequados, sem que ocorra muita degradação da célula solar. A variação na qualidade da soldagem a ponto por resistência elétrica com eletrodos paralelos pode afetar o desempenho e a confiabilidade dos produtos. Assim, esta Dissertação apresenta um estudo, análise e otimização do processo de soldagem de interconexões entre células solares de painéis solares empregados em satélites artificiais aplicando projeto de experimentos. A técnica utilizada para isso foi o Projeto e a Análise de Experimentos. Para este planejamento de experimentos estabeleceram-se o número mínimo (3) de parâmetros e o número mínimo (2) de seus níveis. Os parâmetros de soldagem considerados para esta análise foram a tensão de soldagem, o deslocamento dos eletrodos até a peça (que caracteriza a pressão dos eletrodos sobre as peças) e o tempo de soldagem. Buscaram-se os melhores valores para os parâmetros de soldagem. Para isso, a qualidade do ponto de solda foi verificada por meio de um *pull test* (teste de arrancamento). Os resultados sugerem que essa qualidade pode ser melhorada pelos níveis revelados por tal projeto e análise. Por fim, os parâmetros ótimos são determinados, a fim de se obter um melhor desempenho da qualidade do ponto de solda.

Palavras-chave: Interconector. Célula Solar. Projeto e Análise de Experimentos. Soldagem a ponto por resistência elétrica com eletrodos paralelos.

STUDY, ANALYSIS AND OPTIMIZATION OF THE WELDING PROCESS OF SPACE SOLAR CELLS INTERCONNECTIONS APPLYING IN ARTIFICIAL SATELLITES USING DESIGN OF EXPERIMENTS

ABSTRACT

The process of welding interconnections to solar cells is one of the most critical in the manufacture of solar panels. During the welding of the interconnector, the solar cell undergoes a certain level of degradation. For this reason, it is important to determine which process parameters are important and what are their appropriate levels, without much degradation of the solar cell. Variations in the quality of electrical resistance spot welding with parallel electrodes can affect the performance and reliability of products. Thus, this Dissertation presents a study, analysis and optimization of the process of welding interconnections to solar cells of solar panels employed in artificial satellites applying design of experiments. The technique used for this was the Design and Analysis of Experiments. For this design of experiments, the minimum number (3) of parameters and the minimum number (2) of their levels were established. The welding parameters considered for this analysis were the welding voltage, the displacement of the electrodes to the part (which characterizes the pressure of the electrodes on the parts) and the welding time. The best values for the welding parameters were sought. For this, the quality of the weld spot was verified by means of a pull test. The results suggest that this quality can be improved by the levels revealed by such a project and analysis. Finally, the optimal parameters are determined in order to obtain a better performance of the quality of the weld point.

Keywords: Interconnector. Solar Cell. Design and Analysis of Experiments. Parallel-gap electrical resistance spot welding.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 1.1 – Relação entre as duas grandes áreas envolvidas na pesquisa.	4
Figura 1.2 – Relação os segredos industriais e os dados que podem ser divulgados.	4
Figura 2.1 – Satélite de Coleta de Dados 1- SCD-1.	10
Figura 2.2 – Satélite CBERS-3 e 4	11
Figura 2.3 – Satélite Amazonia-1	11
Figura 2.4 – Imagem do painel estendido do CBERS-3 e 4.	12
Figura 2.5 – Formação de um <i>string</i>	13
Figura 2.6 – SCA com vista de topo e os elementos que a compõem.	14
Figura 2.7 – SCA com os elementos que a compõem.	15
Figura 2.8 – Célula solar de tripla junção.	18
Figura 2.9 – Eficiência de conversão das células solares.	20
Figura 2.10 – Seção transversal esquemática do dispositivo de quatro junções IMM.	22
Figura 2.11 – Evolução para o desenvolvimento de células multijunção.	22
Figura 2.12 – Classificação das células solares.	24
Figura 2.13 – Diferenças entre m-Si e p-Si.	25
Figura 2.14 – Interconectores soldados ao barramento da célula solar.	28
Figura 2.15 – Diagrama elétrico com os módulos solares ligados em série, formando os <i>strings</i> ligados ao diodo de bloqueio.	29
Figura 2.16 – Face traseira do cupom de testes dos painéis solares do SCD1 mostrando os diodos.	30
Figura 2.17 – Cobertura de vidro.	31
Figura 2.18 – Configuração do painel solar.	32
Figura 2.19 – Módulo solar com duas células solares.	33
Figura 2.20 – Módulo solar do painel solar do satélite Amazonia-1.	33
Figura 2.21 – Estrutura do painel com células solares já montadas.	35
Figura 2.22 – Exemplos de configuração dos eletrodos soldagem a ponto por resistência elétrica.	40

Figura 2.23 – Distribuição de temperaturas no processo de soldagem por resistência elétrica.....	42
Figura 2.24 – Comportamento da resistência de contato em função da força aplicada.....	44
Figura 2.25 – Interconector conformado e soldado a célula solar. Aumento de 50X.....	46
Figura 2.26 – Processo de soldagem por resistência elétrica com eletrodos paralelos.....	48
Figura 2.27 – Interconector moldado.....	49
Figura 2.28 – Cablagem do painel solar do satélite Amazonia-1.....	51
Figura 2.29 – Formação de um painel solar por camadas.....	52
Figura 2.30 – Estrutura típica de um painel solar.....	53
Figura 2.31 – Curva I x V de um módulo fotovoltaico, medida em condições padrão.....	54
Figura 2.32 – Fator de preenchimento da célula solar utilizada no gerador solar dos satélites CBERS 1&2.....	55
Figura 2.33 – Teste de desempenho elétrico da célula solar antes e depois da soldagem do interconector.....	56
Figura 2.34 – Corpo de prova depois do teste de resistência à tração.....	57
Figura 2.35 – Teste de eletroluminescência aplicado a diferentes painéis.....	59
Figura 2.36 – Mecanismos de degradação em órbitas baixas da Terra.....	63
Figura 2.37 – Concentração de elementos em diversas altitudes.....	65
Figura 2.38 – Efeito do Oxigênio atômico na superfície de <i>Kapton</i> [®] antes e depois do voo STS 5.....	67
Figura 2.39 – Efeito do da radiação UV.....	68
Figura 2.40 – Impacto de micrometeoróide em uma célula solar.....	72
Figura 3.1 – Interconector utilizado em célula solar espacial.....	82
Figura 3.2 – Trinca do interconector e a fratura do Silício ocorrida devido às baixas temperaturas.....	87
Figura 3.3 – Seção transversal de uma junta de solda de célula solar de aplicação terrestre.....	90
Figura 3.4 – Efeito do Oxigênio atômico em interconector.....	92

Figura 3.5 – Interconector de Prata recuperado da EURECA.	93
Figura 4.1 – <i>Framework</i> com as abordagens para solução do problema proposto.	98
Figura 4.2 – Modelo de processo genérico mostrando as entradas e saídas, além dos fatores envolvidos que podem ser controláveis ou não controláveis.	100
Figura 4.3 – Modelo do processo de soldagem por resistência elétrica com eletrodos paralelos, mostrando as entradas e saídas, além dos fatores envolvidos que podem ser controláveis ou não controláveis.	101
Figura 5.1 – Etapas do método Projeto e Análise de Experimentos.	103
Figura 6.1 – Célula Solar de tripla junção (InGaP/GaAs/Ge).	112
Figura 6.2 – Interconector de 30 μm	113
Figura 7.1 – Exemplo de interconector soldado a célula solar (aumento de 20X).....	121
Figura 7.2 – Barramento de uma célula solar após a realização do <i>pull test</i> (aumento de 20X).....	122
Figura 7.3 – Gráfico de Pareto.	136
Figura 7.4 – Gráfico Normal de Efeitos Padronizados.	137
Figura 7.5 – Gráfico <i>Half</i> Normal de Efeitos Padronizados.	139
Figura 7.6 – Histograma Frequência <i>versus</i> Resíduos.	140
Figura 7.7 – Gráfico de Probabilidade Normal.	141
Figura 7.8 – Gráfico de Resíduos x Valor Ajustado.....	142
Figura 7.9 – Gráfico de Resíduos <i>versus</i> Ordem de Observação.	143
Figura 7.10 – Gráfico de Efeitos Principais para Teste de Tração.	144
Figura 7.11 Gráficos de interações entre dois parâmetros de soldagem em relação ao <i>pull test</i>	145
Figura 7.12 – Gráfico de Contorno para os valores do <i>pull test versus</i> tensão de soldagem e deslocamento dos eletrodos.	147
Figura 7.13 – Gráfico de Contorno para os valores do <i>pull test versus</i> tempo de soldagem e deslocamento dos eletrodos.	148
Figura 7.14 – Gráfico de Contorno para os valores do <i>pull test versus</i> corrente efetiva de soldagem e deslocamento dos eletrodos.....	149

Figura 7.15 – Gráfico de Contorno para os valores do <i>pull test versus</i> tempo de soldagem e tensão de soldagem.....	150
Figura 7.16 – Gráfico de Contorno para os valores do <i>pull test versus</i> corrente efetiva de soldagem e tensão de soldagem.	151
Figura 7.17 – Gráfico de Contorno para os valores do <i>pull test versus</i> corrente efetiva de soldagem e tempo de soldagem.....	152
Figura 7.18 – Curva I x V antes do processo de soldagem dos interconectores..	153
Figura 7.19 – Curva I x V após 4 pontos de solda.....	154
Figura 7.20 – Comparação das curvas I x V antes e após os quatro pontos de solda.....	155
Figura 7.21 – Curva I x V após oito pontos de solda.....	156
Figura 7.22 – Comparação das curvas I x V antes e após oito pontos de solda..	156
Figura 7.23 – Curva I x V após doze pontos de solda.....	157
Figura 7.24 – Comparação das curvas I x V antes e após doze pontos de solda.	158
Figura 7.25 – Curva I x V após 16 pontos de solda.....	159
Figura 7.26 – Comparação das curvas I x V antes e após 16 pontos de solda....	159
Figura 7.27 – Gráfico de Otimização baseado no experimento de 32 tratamentos.	161
Figura 7.28 – Interconector soldado ao barramento da célula solar com expulsão da fase líquida.....	165
Figura 7.29 – Curva de Soldabilidade.	166
Figura 7.30 – Detalhe na célula solar mostrando como a pressão do eletrodo pode ocasionar danos.	167
Figura 8.1 – Processo de soldagem a ponto por resistência elétrica.	172
Figura 8.2 – Gráfico Normal dos Efeitos Padronizados.....	177
Figura 8.3 – Gráfico de Pareto.	178
Figura 8.4 – Gráficos de Resíduos.....	179
Figura 8.5 – Gráfico de Efeitos Principais para a Força de Tração.....	180

Figura 8.6 – Gráfico de Interações para a força máxima de resistência à tração. 181	
Figura 8.7 – Gráfico de contorno da força máxima de resistência à tração versus o tempo de soldagem e a corrente de soldagem.	182
Figura 8.8 – Gráfico de contorno da força máxima de resistência à tração versus a pressão e a corrente de soldagem.....	183
Figura 8.9 – Gráfico de contorno da força máxima de resistência à tração versus o tempo de pré-aquecimento e a corrente de soldagem.....	184
Figura 8.10 – Gráfico de contorno da força máxima de resistência à tração versus a pressão e o tempo de soldagem.....	185
Figura 8.11 – Gráfico de contorno da força máxima de resistência à tração versus o tempo de pré-aquecimento e o tempo de soldagem.....	186
Figura 8.12 – Gráfico de contorno da força máxima de resistência à tração versus o tempo de pré-aquecimento e a pressão.	187
Figura 8.13 – Gráfico de otimização da resposta.	188
Figura 9.1 – <i>Framework</i> de parceria entre INPE x Orbital x Pós Graduação do INPE (aluna).....	197
Figura B.1 – Etapas do Projeto e Análise de Experimentos.....	249
Figura B.2 – Representação geométrica de 3 fatores.....	254
Figura B.3 – Comparação experimento fatorial completo e experimento fatorial fracionado pela metade.	256
Figura B.4 – Superfície de resposta mostrando a expectativa de resposta (η) em função da temperatura (x_1) e pressão (x_2).....	258
Figura B.5 – Gráfico de contorno para a superfície de resposta.	259
Figura C.1 – Curva I x V mostrando a calibração do simulador solar antes do início do processo.	261
Figura C.2 – Curva I x V antes do processo de soldagem do interconector...	262
Figura C.3 – Curva I x V após o processo de soldagem (quatro pontos de solda).	263
Figura C.4 – Curva I x V comparativo antes e depois do processo de soldagem (quatro pontos de solda).	264

Figura C.5 – Curva I x V mostrando a calibração do simulador solar – 2º dia de experimentação.....	265
Figura C.6 – Curva I x V após o processo de soldagem (total de oito pontos de solda).	265
Figura C.7 – Curva I x V comparativo antes e depois o processo de soldagem (oito pontos de solda).....	266
Figura C.8 – Curva I x V após o processo de soldagem (total de 12 pontos de solda).	267
Figura C.9 – Curva I x V comparativo antes e depois do processo de soldagem (doze pontos de solda).....	267
Figura C.10 – Curva I x V após o processo de soldagem (total de 16 pontos de solda).	268
Figura C.11 – Curva I x V comparativo antes e após o processo de soldagem (dezesesseis pontos de solda).....	269
Figura C.12 – Curva I x V mostrando a calibração do simulador solar – 3º dia de experimentação.....	270
Figura C.13 – Curva I x V antes do processo de soldagem do interconector. 270	
Figura C.14 – Curva I x V após o processo de soldagem (total de 20 pontos de solda).	271
Figura C.15 – Curva I x V comparativo antes e após o processo de soldagem. ...	272
Figura C.16 – Curva I x V após o processo de soldagem (total de 24 pontos de solda).	273
Figura C.17 – Curva I x V comparativo antes e após o processo de soldagem. ...	273
Figura C.18 – Curva I x V após o processo de soldagem (total de 28 pontos de solda).	274
Figura C.19 – Curva I x V comparativo antes e após o processo de soldagem. ...	275
Figura C.20 – Curva I x V antes do processo de soldagem do interconector. 276	
Figura C.21 – Curva I x V após o processo de soldagem (total de 32 pontos de solda).	276

Figura C.22 – Curva I x V comparativo antes e após o processo de soldagem. ...
..... 277

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 2.1 – Comparação entre <i>Welding x Brazing x Soldering</i>	37
Tabela 2.2 — Breve descrição das publicações referindo-se a interconectores aplicados à células solares de uso comercial e espacial.	74
Tabela 3.1 – Composição química do <i>Kovar</i> e <i>Invar</i> por % de peso.	84
Tabela 3.2 – Condutividade elétrica dos materiais metálicos.	86
Tabela 3.3 – Propriedades dos materiais de alguns interconectores.	86
Tabela 5.1 – Fatores considerados no estudo do processo de soldagem a ponto por resistência elétrica.	104
Tabela 5.2 – Parâmetros de soldagem considerados para o Projeto e Análise de Experimentos.	107
Tabela 5.3 – Transformação de variáveis físicas para variáveis reduzidas. ..	110
Tabela 6.1 – Etapas para a determinação dos parâmetros de soldagem e processamento das amostras.	115
Tabela 6.2 – Parâmetros de soldagem com níveis codificados.	119
Tabela 7.1 – <i>Pull test</i> e carga elétrica dos tratamentos.	123
Tabela 7.2 – Análise de Variância dos dados.	126
Tabela 7.3 – Coeficientes da ANOVA.	127
Tabela 7.4 – Valores para FIV.	128
Tabela 7.5 – Valores de FIV da ANOVA.	128
Tabela 7.6 – Fórmulas para construção da ANOVA.	130
Tabela 7.7 – Resumo do Modelo apresentado na ANOVA.	134
Tabela 7.8 – Predição para máximo valor de <i>pull test</i>	162
Tabela 7.9 – Comparativos entre valores de <i>pull test</i> obtidos no experimento <i>versus</i> valor de <i>pull test</i> estimado.	163
Tabela 8.1 – Níveis dos parâmetros de soldagem a ponto.	172
Tabela 8.2 – Dados de soldagem a ponto, variável de resposta e tipo de rompimento.	173
Tabela 8.3 – Análise de Variância (ANOVA).	174
Tabela 8.4 – Coeficientes da ANOVA.	175

Tabela 8.5 – Resumo do modelo.	176
Tabela 8.5 – Predição para a força máxima de resistência à tração.	189
Tabela A.1 — Publicações avaliando os interconectores aplicados a células solares.	225
Tabela B.1 – Matriz experimental de um delineamento fatorial 2 ³	254
Tabela C.1 – Distribuição F [P (F>F0) = 0,05].	282
Tabela D.1 – Distribuição t de Student [P (-t0<t< t0) = 1-α]	283

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

<i>AMO</i>	<i>Air Mass Zero</i>
AMZ1	Satélite Amazonia-1
ANCOVA	Análise de Covariância
ANOVA	Análise de Variância
ATOX	Oxigênio atômico
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
AWS	<i>American Welding Society</i>
<i>BOL</i>	<i>Begin Of Life</i>
CA	Corrente Alternada
<i>CBERS</i>	<i>China-Brazil Earth Resources Satellite</i>
CC	Corrente Contínua
CET	Coeficiente de expansão térmica
CIC	<i>Coverglass Interconnect Cell</i>
CIS	Disseleneto de Cobre e Índio
CIGS	Cobre-Índio-Gálio-Selênio
<i>CQI</i>	<i>Continuous Quality Improvement</i>
CRESSEB	Centro de Referência para Energia Solar e Eólica
<i>CTE</i>	<i>Coefficient of Thermal Expansion</i>
<i>DC</i>	<i>Direct Current</i>
<i>DoE</i>	<i>Design of Experiments</i>
<i>DSSC</i>	<i>Dye Sensitized Solar Cells</i>
<i>ECSS</i>	<i>European Cooperation for Space Standardization</i>
EDS	Espectroscopia por Dispersão de Elétrons
EL	Eletroluminescência
<i>EOL</i>	<i>End Of Life</i>
<i>EURECA</i>	<i>European Retrievable Carrier</i>

<i>FF</i>	<i>Fill Factor</i>
<i>GEO</i>	<i>Geosynchronous Earth Orbit</i>
<i>GL</i>	Graus de Liberdade
<i>GPS</i>	<i>Global Positioning System</i>
<i>INPE</i>	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
<i>ISS</i>	<i>International Space Station</i>
<i>LEO</i>	<i>Low Earth Orbit</i>
<i>MECB</i>	Missão Espacial Completa Brasileira
<i>MEO</i>	<i>Medium Earth Orbit</i>
<i>MEV</i>	Microscópio Eletrônico De Varredura
<i>MSR</i>	Metodologia de Superfície de Resposta
<i>MTC</i>	<i>Mass Termination Connector</i>
<i>MTTF</i>	<i>Mean Time To Failure</i>
<i>NIR</i>	<i>Near Infrared</i>
<i>NREL</i>	<i>National Renewable Energy Laboratory</i>
<i>OFHC</i>	<i>Oxygen Free High Conductivity</i>
<i>OSCI</i>	<i>Organic Solar Cell</i>
<i>PMM</i>	Plataforma MultiMissão
<i>PV</i>	Fotovoltaico
<i>QM (Aj.)</i>	Quadrados Médios
<i>R²</i>	R-quadrado
<i>R²(Aj)</i>	R-quadrado ajustado
<i>R² pred</i>	R-quadrado predito
<i>Rc</i>	Resistência de contato
<i>RPD</i>	<i>Robust Parameter Design</i>
<i>RSM</i>	<i>Response Surface Methodology</i>
<i>S</i>	Erro aleatório
<i>SCA</i>	<i>Solar Cell Assembly</i>
<i>SCD</i>	Satélite de Coleta de Dados

SCD-BSC	<i>Source Control Drawing for Bare Solar Cell</i>
SID	Serviço de Informação e Documentação
SPG	Serviço de Pós-Graduação
SQ(Aj.)	Soma de Quadrados
TDI	Teses e Dissertações Internas
TQM	<i>Total Quality Management</i>
UNIFEI	Universidade Federal de Itajubá
UV	Ultravioleta
Valor F	Estatística de teste, F
ZTA	Zona Termicamente Afetada

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Argônio
A	Ampére
a-Si	Silício amorfo
Ag	Prata
Al	Alumínio
AlGaP	Alumínio-Gálio-Fósforo
AlGaInAs	Alumínio-Gálio-Índio-Arsênio
AlGaInP	Alumínio-Gálio-Índio-Fósforo
As	Arsênio
AsGa	Arseniato de Gálio
átomos/cm ²	Resistência ao Oxigênio atômico
Au	Ouro
bar	Unidade métrica de pressão
Be	Berílio
cal/g ^o K	Unidade métrica de calor específico
C	Carbono
CdS	Sulfeto de Cádmio
CdTe	Telureto de Cádmio
CeO ₂	Dióxido de Cério
cm	Centímetro
Co	Cobalto
Cu	Cobre
CuInSe ₂	Disseleneto de Cobre e Índio
Cu(InGa)Se ₂	Disseleneto de Cobre, Gálio e Índio
Fe	Ferro
g/cm ³	Unidade métrica de densidade relativa
Ga	Gálio
GaInNAs	Gálio-Índio-Nitrogênio-Arsênio
Ge	Germânio
Ge Sub	Substrato de Germânio

H	Hidrogênio
h	Constante de Planck
He	Hélio
I	Corrente
I x V	Gráfico corrente <i>versus</i> tensão da célula solar
I _{mp}	Corrente de máxima potência
I _R	Corrente reversa
I _{sc}	Corrente de curto-circuito
k	Número de variáveis independentes
keV	Quilo elétron-Volt
km	Quilômetro
km/s	Quilômetros por segundo
m-Si	Silício monocristalino
MeV	Mega elétron-Volt
mm	Milímetro
mm/min	Milímetros por minuto
Mn	Manganês
Mo	Molibdênio
ms	Milisegundo
mV	MiliVolt
n	Número de réplicas aplicadas no estudo
N	Número de corridas ou tratamentos
N	Newton, unidade de medida de força
N ₂	Nitrogênio
Ni	Níquel
nm	Nanômetro
N/mm ²	Unidade métrica de Módulo de elasticidade
N/mm ²	Resistência à tração
O ₂	Oxigênio
P	Fósforo
p-Si	Silício policristalino
P _{mp}	Potência máxima de saída
ppm	Partes por milhão
<i>psi</i>	Unidade técnica de pressão, <i>pound force per square inch</i>

R	Resistência elétrica, dada em Ω
rad	Medida de absorção de radiação
S	Enxofre
Si	Silício
SnPbAg	Liga de Estanho, Chumbo e Prata
t	Tempo de soldagem
TiO ₂	Dióxido de Titânio
μm	Micrômetro
$\mu\Omega\text{cm}$	Unidade métrica de resistividade
V	Unidade métrica de tensão elétrica
v	Frequência de radiação
V _{mp}	Tensão de máxima potência
V _{oc}	Tensão de circuito aberto
°C	Temperatura em graus Celsius
°F	Temperatura em graus Fahrenheit
Q	Calor gerado (em Joules)
W	Unidade métrica de potência de soldagem em Watts
W/m ²	Unidade métrica de Irradiância em Watts por metro quadrado
W/cm ⁰ K	Unidade métrica de condutividade térmica
x	Parâmetros
y	Resposta de interesse
α	Nível de significância
β	Coefficiente de regressão
B ₀	Coefficiente de inserção no plano
ϵ	Erro associado
η	Expectativa de resposta
σ ($\Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$)	Unidade métrica de condutividade elétrica
$10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	Unidade métrica de coeficiente de expansão térmica

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Contexto	1
1.2 Motivações.....	3
1.3 Objetivo.....	5
1.4 Generalidade	5
1.5 Utilidade.....	6
1.6 Organização do trabalho.....	6
2 CONCEITOS BÁSICOS E REVISÃO DA LITERATURA	9
2.1 Objetivo.....	9
2.2 Painel Solar e seus componentes	9
2.2.1 Circuito elétrico	13
2.2.2 Célula Solar Montada / <i>Solar Cell Assembly</i> (SCA)	14
2.2.2.1 Células solares	15
2.2.2.2 Interconexões	27
2.2.2.3 Diodos de bloqueio	28
2.2.2.4 Cobertura de proteção (<i>Coverglass</i>).....	30
2.2.2.5 Configuração de célula solar montada no painel solar	31
2.2.3 Módulos solares	32
2.2.4 Circuito de potência.....	34
2.2.5 Isolamento elétrico	34
2.2.6 Circuito de sinais	34
2.2.7 Estrutura.....	34
2.3 Processo de Soldagem.....	35
2.3.1 Conceito de Soldagem	35
2.3.2 Soldagem a ponto por resistência elétrica	39
2.3.2.1 Princípio do processo de soldagem a ponto por resistência elétrica	41
2.3.2.2 Corrente de soldagem	42
2.3.2.3 Tempo de soldagem	43
2.3.2.4 Força ou pressão de aplicação do eletrodo	44

2.4 Principais processos empregados na fabricação de painéis solares	45
2.4.1 Processo de Fabricação dos interconectores	45
2.4.2 Processo de Soldagem dos interconectores	46
2.4.3 Processo de colagem das células	49
2.4.3.1 Processo de colagem da cobertura de vidro	49
2.4.3.2 Processo de colagem das células solares no painel.....	50
2.4.4 Processo de fabricação da cablagem	50
2.4.5 Processo de isolamento elétrico da estrutura	51
2.4.6 Processo de fabricação do painel	52
2.5 Inspeções e testes aplicados no processo de fabricação de painéis solares	53
2.5.1 Inspeção da curva I x V	53
2.5.2 Teste de arrancamento (<i>Pull Test</i>)	57
2.5.3 Eletroluminescência	58
2.6 Projeto e Análise de Experimentos	59
2.7 Confiabilidade	60
2.8 Otimização	61
2.9 Comportamento dos materiais no ambiente espacial	61
2.9.1 Efeito do Oxigênio atômico	63
2.9.2 Efeito da radiação nos materiais	67
2.9.2.1 Efeito da radiação nas células solares.....	68
2.9.3 Efeito do vácuo	70
2.9.4 Efeito da ciclagem térmica	70
2.9.5 Danos causados por detritos espaciais.....	71
2.10 Levantamento na literatura dos estudos sobre interconexões de células solares	73
3 INTERCONEXÕES DE CÉLULAS SOLARES.....	81
3.1 Objetivo.....	81
3.2 Interconector	81
3.3 Materiais de interconexões de células solares	82
3.4 Degradação dos interconectores em órbita	86
3.4.1 Modos de falha dos interconectores.....	87

3.4.2	Fadiga nos interconectores	87
3.4.3	Falhas nas juntas soldadas dos interconectores.....	89
3.4.4	Ação do Oxigênio atômico nos interconectores	91
3.4.5	Fatores de projeto que afetam a confiabilidade	94
4	FORMULAÇÃO DO PROBLEMA E ABORDAGENS PARA A SUA SOLUÇÃO.....	96
4.1	Objetivo.....	96
4.2	Formulação do problema	96
4.3	Solução proposta	99
5	PROJETO E ANÁLISE DE EXPERIMENTOS	103
5.1	Objetivo.....	103
5.2	Planejamento.....	103
5.2.1	Definição dos objetivos do experimento (Etapa 1)	103
5.2.2	Definição dos fatores de controle do experimento (Etapa 2 e 3).....	104
5.2.3	Seleção da variável de resposta (Etapa 2).....	108
5.2.4	Seleção dos níveis dos fatores de controle (Etapa 3)	108
5.2.5	Seleção da matriz experimental (Etapa 4)	108
5.2.6	Processamento das amostras (Etapa 5)	110
5.2.7	Análise dos dados (Etapa 6)	110
5.2.8	Interpretação dos resultados (Etapa 7)	111
6	PREPARAÇÃO E REALIZAÇÃO DO EXPERIMENTO.....	112
6.1	Objetivo.....	112
6.2	Materiais utilizados	112
6.3	Fases desta pesquisa	113
6.4	Processamento das amostras	114
6.5	Determinação dos parâmetros de soldagem	118
7	RESULTADOS E ANÁLISES DOS DADOS	120
7.1	Objetivo.....	120
7.2	Análise dos dados	120
7.3	Resposta da Matriz Experimental	122
7.3.1	Análise de Variância – ANOVA	125
7.3.2	Resumo do modelo	132

7.3.3	Gráficos dos Efeitos e Resíduos	135
7.3.4	Gráficos de contorno	146
7.3.5	Resultado das Curvas I x V	152
7.3.6	Otimização da resposta.....	160
7.4	Comentários sobre os resultados e as análises sobre a soldagem dos interconectores às células solares.	163
8	ESTUDO DE CASO: APLICAÇÃO DO PLANEJAMENTO E ANÁLISE DE EXPERIMENTOS NA SOLDAGEM DE CHAPAS METÁLICAS UTILIZADAS NA INDÚSTRIA AUTOMOBILÍSTICA	171
8.1	Objetivo.....	171
8.2	Estudo de Caso	171
8.3	Análise de Variância	174
8.4	Gráficos dos Efeitos e resíduos	176
8.5	Gráficos de contorno.....	181
8.6	Otimização da resposta	187
8.7	Comentários sobre o estudo de caso da indústria automobilística	189
9	CONCLUSÃO	191
9.1	Dificuldades encontradas.....	194
9.2	Contribuições deste trabalho	196
9.3	Sugestões de trabalhos futuros	197
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	199
	GLOSSÁRIO	218
	APÊNDICE A – LEVANTAMENTO DAS REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS EM RELAÇÃO AO USO DE INTERCONECTORES EM CÉLULAS SOLARES... ..	224
	APÊNDICE B – MÉTODOS ESTATÍSTICOS.....	242
B.1	Análise de Variância (ANOVA)	243
B.2	Análise de Regressão Linear Múltipla.....	243
B.3	Correlação	245
B.4	Análise de Covariância	245
B.5	Projeto e Análise de Experimentos	246
B.5.1	Breve histórico sobre Projeto e Análise de Experimentos.....	246

B.5.2 Definições de Projeto e Análise de Experimentos	247
B.5.3 Etapas para conduzir o Projeto e Análise de Experimentos	248
B.5.3.1 Estudo e declaração ou detalhamento do problema	249
B.5.3.2 Seleção da variável de resposta	250
B.5.3.3 Seleção dos fatores, seus níveis e faixas	250
B.5.3.4 Seleção do planejamento (ou matriz) experimental	251
B.5.3.5 Execução dos experimentos	251
B.5.3.6 Análise estatística dos dados.....	251
B.5.3.7 Conclusões e recomendações.....	252
B.6 Técnicas de Projeto e Análise de Experimentos.....	252
B.6.1 Planejamento Fatorial	252
B.6.2 Planejamento Fatorial Fracionado	255
B.7 Método de Taguchi – Projeto Robusto.....	256
B.8 Método de Superfície de Resposta (MSR).....	257
APENDICE C – CURVAS I X V	261
C.1 – Curvas I x V	261
ANEXO A – <i>DATASHEET</i> DA CÉLULA SOLAR UTILIZADA NO EXPERIMENTO	278
ANEXO B – INFORMAÇÕES REFERENTES AO SIMULADOR SOLAR	280
ANEXO C – DISTRIBUIÇÃO F.....	282
ANEXO D – DISTRIBUIÇÃO t DE <i>STUDENT</i>	283

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contexto

Sistemas complexos e/ou altamente integrados como satélites, lançadores, aviões, automóveis entre outros, têm a necessidade de avaliação da sua confiabilidade durante todo o ciclo de vida. Entretanto, a predição da confiabilidade de equipamentos usados no meio espacial está se tornando complexa e difícil à medida que os sistemas espaciais estão se tornando cada vez mais complexos e/ou altamente integrados.

Os satélites, de maneira particular, operam em condições severas impostas pelo ambiente espacial e, praticamente, sem nenhuma manutenção durante sua fase operacional. Dentre os componentes que integram um satélite, os painéis solares são um dos que mais sofrem com a hostilidade do ambiente espacial, pois, estão diretamente expostos à radiação, ciclagem de temperatura, vácuo, ação de detritos espaciais, entre outros.

Os satélites artificiais possuem sistemas elétricos auto-suficientes que utilizam baterias para mantê-lo em funcionamento. Estas baterias, são carregadas pelos painéis solares que são responsáveis por converter a energia solar em energia elétrica. O painel solar é composto basicamente por células solares, dispostas em uma matriz, ou seja, colunas e linhas. A célula solar é, em última análise, o dispositivo responsável por essa conversão (VAZ, 1999 e VEISSID; VILELA; PASIN, 2018).

Em geral, as células solares são fontes primárias de energia para operar os equipamentos internos que constituem o satélite. Cada célula tem a função de gerar uma pequena quantidade de energia elétrica; e cabe à equipe de projeto calcular o número de células solares requeridas para suprir a energia necessária ao satélite durante sua vida útil (BARUEL, 2012).

Essas células solares são unidas por um componente denominado interconector. Essas interconexões presentes nos painéis solares são responsáveis pela condução da energia produzida pelas células solares para um ponto de

interligação do painel, e, em geral, falham em consequência da fadiga que ocorre nas juntas soldadas, principalmente, devido a esforços mecânicos que são induzidos pela ciclagem de temperatura no ambiente espacial. E esse tipo de falha afeta de forma direta a qualidade, sobretudo a confiabilidade, do painel solar em sua fase de operação.

Dentre os diversos processos envolvidos na fabricação de um painel solar, um dos processos mais críticos é a soldagem dos interconectores nas células solares. Por isso, se faz necessária a determinação dos parâmetros ótimos de soldagem que contribuem para um ponto de solda de boa qualidade, assegurando assim uma boa fusão entre as peças de trabalho (célula solar e interconector), sem que haja muita degradação do dispositivo semicondutor devido às tensões termomecânicas que ocorrem durante o processo de soldagem. Esta questão pode ser verificada por meio do teste de resistência à ruptura. Com este teste verifica-se a integridade da junta de solda, garantindo-se o contato elétrico e o desempenho da célula solar após o processo de soldagem (MAIA; BRITO; SOUZA, 2019).

A junção das interconexões às células solares é realizada pelo processo de soldagem por resistência elétrica com eletrodos paralelos. A energia envolvida no processo para a fusão das peças de trabalho (interconectores + células solares) tem sua origem de um pulso de corrente contínua (ajustada pelos parâmetros: tensão de soldagem; tempo de rampa de subida da tensão; tempo de patamar onde a tensão é constante; e tempo de rampa de descida da tensão) (VAZ; SINKA; VAZ, 2007).

A falha dos interconectores no espaço pode colocar em risco a missão, podendo prejudicar o desempenho ou até mesmo interromper a funcionalidade dos satélites ou naves espaciais e, eventualmente, acelerar o fim da vida útil desses sistemas. Estes, por sua vez, dependem do painel solar para fornecer a energia necessária, a fim de manter todos os subsistemas operantes.

O processo de soldagem a ponto por resistência elétrica é amplamente utilizado na indústria automotiva na soldagem de chapas metálicas. O princípio deste processo de soldagem é o mesmo empregado na junção das células solares aos

interconectores; o que difere um processo do outro é a disposição dos eletrodos e o pulso de corrente. Para a aplicação na indústria em geral, o pulso de corrente utilizado é de corrente alternada.

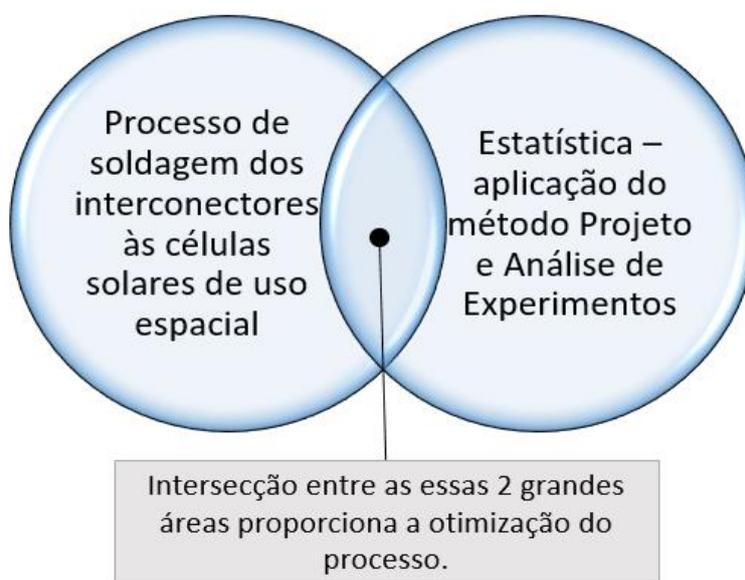
Desta forma, esta Dissertação de mestrado visa realizar o estudo e otimização do processo de soldagem de interconectores às células de painéis solares empregados em satélites artificiais aplicando o método de Projeto e Análise de Experimentos.

O primeiro estudo é o foco deste trabalho, ou seja, a aplicação do método de Projeto e Análise de Experimentos na soldagem dos interconectores às células solares, com 32 pontos de solda (32 tratamentos). A segunda aplicação do método é no processo de soldagem de chapas metálicas utilizadas na indústria automobilística (com 32 pontos de solda reais, dados estes, fornecidos pelo Mestre Fernando Ferraz Amaral). A fim de facilitar as análises dos dados, será utilizado o software estatístico MINITAB 17®.

1.2 Motivações

A 1ª motivação é analisar, estudar e recomendar uma melhoria do processo de soldagem de interconexões entre células solares utilizadas em painéis solares em aplicações espaciais, uma vez que, esta é uma das etapas críticas envolvidas na sua fabricação, conforme levantamento bibliográfico. A melhoria do processo será alcançada com a aplicação do método de Projeto e Análise de Experimentos para otimizar os parâmetros de soldagem. Esta motivação engloba duas grandes áreas (processo de soldagem e a análise estatística dos dados) conforme ilustrado na Figura 1.1.

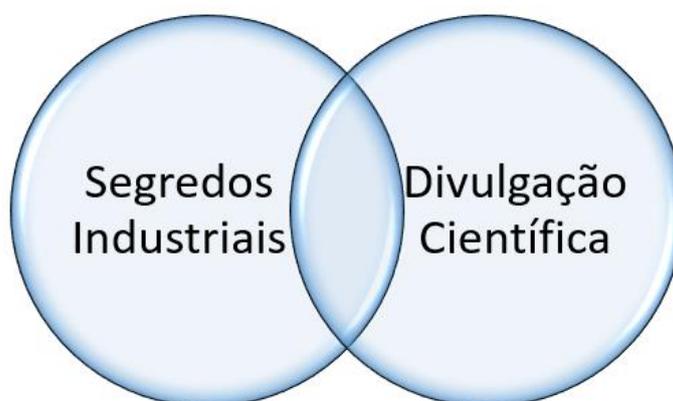
Figura 1.1 – Relação entre as duas grandes áreas envolvidas na pesquisa.



Fonte: Produção da autora.

A 2ª motivação é disponibilizar informações sobre o processo que possam ser utilizadas pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. Disponibilizar dados e informações sobre o processo de soldagem para a Orbital Engenharia que realiza a fabricação dos painéis solares, possibilitando tomadas de decisão mais assertivas ainda nas fases iniciais do projeto e da fabricação. A Figura 1.2 ilustra a relação entre os segredos industriais (dados sobre a configuração dos parâmetros do processo de soldagem) e as informações que este documento apresenta.

Figura 1.2 – Relação os segredos industriais e os dados que podem ser divulgados.



Fonte: Produção da autora.

A 3ª motivação é aumentar o desempenho, a vida útil dos painéis solares e, indiretamente, a sua confiabilidade, por meio de pontos de soldas de melhor qualidade, ou seja, pontos de solda mais resistentes à hostilidade do ambiente espacial.

A 4ª Motivação é exercitar a aplicação do método de Projeto e Análise de Experimentos. Devido a isto, foi adicionado o estudo de caso de soldagem a ponto por resistência elétrica utilizado na indústria automobilística. Para a aplicação do método de Projeto e Análise de Experimentos em ambos os casos (espacial e automobilístico), será utilizada a ferramenta de análise estatística MINITAB 17®.

1.3 Objetivo

Este trabalho tem como objetivo o estudo e otimização do processo de soldagem de interconectores às células de painéis solares empregados em satélites artificiais aplicando Projeto e Análise de Experimentos. Para alcançar este objetivo conforme mencionado será aplicado o método de Projeto e Análise de Experimentos a fim de compreender como os parâmetros do processo de soldagem influenciam na qualidade do ponto de solda.

1.4 Generalidade

A generalidade deste trabalho advém de mostrar que todo processo pode ser investigado quanto à melhoria da sua qualidade e desempenho; com isso, esse estudo poderá colaborar com as atividades do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Engenharia de Produto e Garantia do Produto) e da Orbital Engenharia que está viabilizando a análise do processo; proporcionando a melhoria nos processos de fabricação e montagem de painéis solares. A melhoria do processo de soldagem apresentada aqui visa, inicialmente, ser aplicada na fabricação de painéis solares empregados em sistemas espaciais, mas a análise e o estudo de otimização do referido processo podem ser

adaptados para outras aplicações, igualmente, em aplicações que exigem alta confiabilidade.

1.5 Utilidade

A utilidade deste trabalho advém de apresentar um método de análise e de otimização do processo de soldagem do tipo “*welding*” de interconexão de células e/ou módulos de células solares em projetos de painéis solares de satélites de pequeno e médio porte, assim como em outros projetos espaciais que utilizam este tipo de processo de soldagem a ponto por resistência elétrica, conforme mencionado anteriormente.

Havendo necessidade de se otimizar o processo de soldagem a ponto por resistência elétrica, este trabalho poderá ser empregado como referência.

1.6 Organização do trabalho

Esta Dissertação está dividida em 8 partes, a saber:

O Capítulo 1 apresenta o tema a ser abordado e sua relevância para a fabricação e, conseqüentemente, para a qualidade e a confiabilidade do painel solar dentro do segmento espacial, assim como as motivações, os objetivos, a generalidade e a utilidade do trabalho.

O Capítulo 2 apresenta os conceitos básicos necessários para a compreensão dos tópicos do trabalho e a revisão sistemática da literatura disponível. Neste capítulo são descritos os elementos que compõem o painel solar; as características do processo de soldagem; os processos envolvidos na fabricação do painel solar; e, de forma breve, o comportamento dos materiais no espaço. No final deste capítulo são apresentados três estudos encontrados na literatura até o presente momento, que abordam técnicas de melhorias envolvendo interconexões de células solares.

O Capítulo 3 apresenta as interconexões utilizadas em células solares; os materiais mais comuns utilizados na fabricação dos interconectores; a fadiga destes componentes no espaço e juntas soldadas.

O Capítulo 4 apresenta a abordagem do problema em estudo, a solução proposta e uma breve explicação sobre o método estatístico utilizado nesta Dissertação.

O Capítulo 5 demonstra a metodologia aplicada para alcançar o objetivo desta Dissertação.

O Capítulo 6 apresenta o *setup* dos testes, os materiais utilizados e a realização do experimento com 32 pontos de solda.

O Capítulo 7 apresenta os resultados e as discussões baseadas na análise do experimento realizado com 32 tratamentos, com diversos gráficos que corroboram as análises desenvolvidas. Os gráficos das curvas I x V iniciais são apresentados. A otimização da resposta é realizada baseada nos dados do planejamento experimental desta Dissertação. Por fim, são apresentadas algumas considerações/observações sobre as análises e o processo de soldagem.

O Capítulo 8 ilustra uma aplicação do método de Projeto e Análise de Experimentos, com dados de soldagem a ponto por resistência elétrica, aplicada a chapas metálicas utilizadas no setor automotivo. Esses dados foram fornecidos pelo Mestre Fernando Ferraz Amaral (Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI). Este capítulo foi adicionado para atender à 4ª motivação – Exercitar a aplicação do método.

O Capítulo 9 conclui o trabalho com as recomendações e as principais conclusões. Apresenta, também, as dificuldades encontradas, propostas de estudos futuros e contribuições desta Dissertação.

A seção final apresenta todas as referências bibliográficas consultadas para o desenvolvimento desta Dissertação.

O Apêndice A traz um levantamento de referências bibliográficas realizado sobre estudos que tratam de células solares e interconexões, tanto de uso espacial quanto de uso comercial de forma mais detalhada.

No Apêndice B os métodos estatísticos são apresentados de forma mais detalhada que o Capítulo 4.

O Apêndice C traz todas as curvas I x V levantadas durante todo o planejamento do experimento, realizadas antes e depois do processo de soldagem a cada 4 tratamentos (ponto de solda), além das curvas de calibração do simulador solar. A porcentagem de degradação causada pelo processo de soldagem na célula solar também foi calculada.

O Anexo A apresenta a folha de dados (*datasheet*) da célula solar utilizada nesta Dissertação.

O Anexo B apresenta todas as informações referentes ao simulador solar utilizado nas medições das curvas I x V.

No Anexo C é apresentada a tabela de distribuição da estatística F de Fischer utilizada nas análises do Capítulo 7 e 8.

O Anexo D apresenta a tabela de distribuição da estatística t de *Student* utilizada nas análises do Capítulo 7 e 8.

2 CONCEITOS BÁSICOS E REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Objetivo

Esta seção apresenta os conceitos básicos relevantes sobre painéis solares e os elementos que o compõem.

2.2 Painel Solar e seus componentes

Painéis solares podem ser definidos 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).

Os painéis solares têm a função de gerar a energia elétrica de bordo necessária para manter todos os subsistemas elétricos do satélite em operação, dentro das faixas de consumo especificadas, durante todas as fases da missão, da vida útil e sob condições orbitais para os quais foram projetados (VAZ, 1999).

Os painéis solares, assim como os demais subsistemas que compõem um satélite, são de suma importância para a missão para a qual o sistema foi projetado. Estando, geralmente, instalados na parte externa junto ou próximo ao corpo do satélite, apontados ou orientados para Sol, os painéis solares estão permanentemente expostos ao ambiente mais hostil, diferentemente dos demais componentes do satélite que se encontram alojados no interior do satélite (BARUEL, 2012).

Um exemplo de painel solar instalado junto ao corpo na parte externa do satélite é apresentado na Figura 2.1. Neste exemplo, foram utilizados oito painéis laterais e mais dois instalados nas bases.

Figura 2.1 – Satélite de Coleta de Dados 1- SCD-1¹.

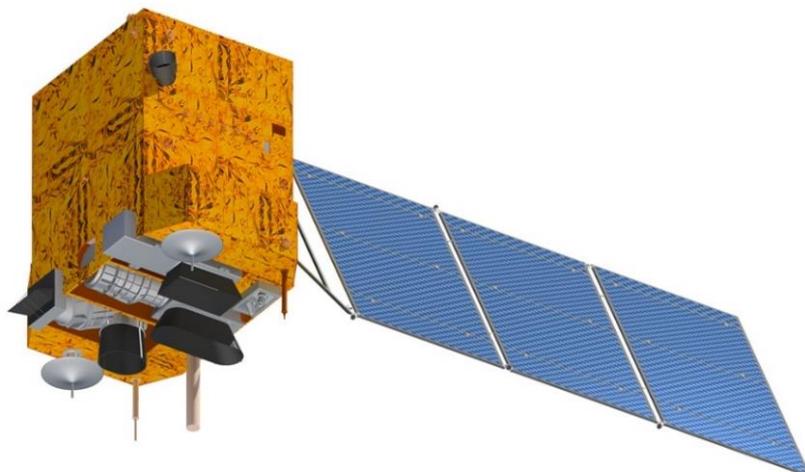


Fonte: INPE (2020).

Já os satélites do programa Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres (do inglês *China-Brazil Earth Resources Satellite - CBERS*) resultados da parceria entre Brasil e China no setor técnico-científico espacial, possuem os painéis solares em asa única composta por três painéis e orientados para o Sol quando em órbita (INPE, 2020). A Figura 2.2 mostra o satélite do programa CBERS com o painel solar na configuração orbital com a asa já estendida.

¹ SCD 1- Satélite de Coleta de Dados 1 da Missão Espacial Completa Brasileira (MECB), lançado em 9 de fevereiro de 1993.

Figura 2.2 – Satélite CBERS-3 e 4².



Fonte: CBERS/INPE – Divulgação (2019).

A Figura 2.3 mostra o satélite do programa Amazonia-1 com o painel solar na configuração orbital com as asas já estendidas.

Figura 2.3 – Satélite Amazonia-1³.



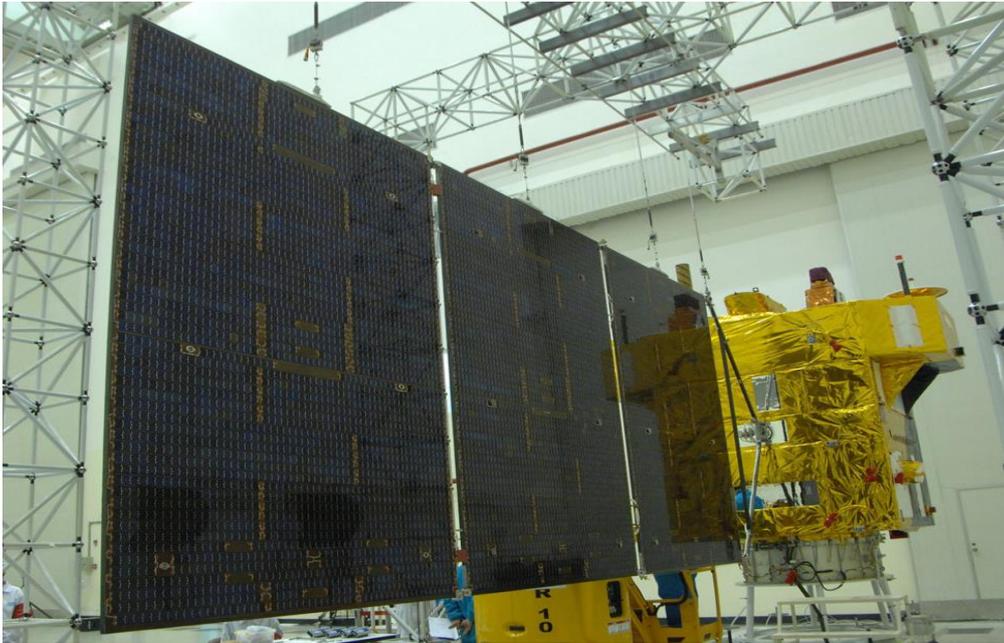
Fonte: INPE (2020).

²CBERS- 3 e 4- *China Brazilian Earth Resources Satellite* série 3 e 4 lançados respectivamente em 2013 e 2014.

³Satélite Amazonia-1, o primeiro satélite de observação da Terra totalmente projetado, integrado, testado e operado pelo Brasil, lançado no dia 28 de fevereiro de 2021.

Na Figura 2.4 é possível observar o painel solar na posição estendida durante os testes no laboratório, ou seja, em um suporte de abertura do painel em uma configuração idêntica à encontrada durante a operação no espaço. Nesta figura é possível ver as células solares que compõem o painel.

Figura 2.4 – Imagem do painel estendido do CBERS-3 e 4.



Fonte: CBERS/INPE (2019).

Os painéis solares, geralmente, são constituídos pelos seguintes elementos:

- circuito elétrico pertinente ao painel solar;
- célula solar montada, do Inglês, *Solar Cell Assembly– SCA*;
- módulos solares;
- circuito de potência;
- isolamento elétrica;
- circuito de sinal;
- estruturas;
- dispositivos pirotécnicos, presentes em painéis que não são instalados junto ao corpo do satélite.

Cada um dos elementos citados acima será brevemente descrito nos itens a seguir.

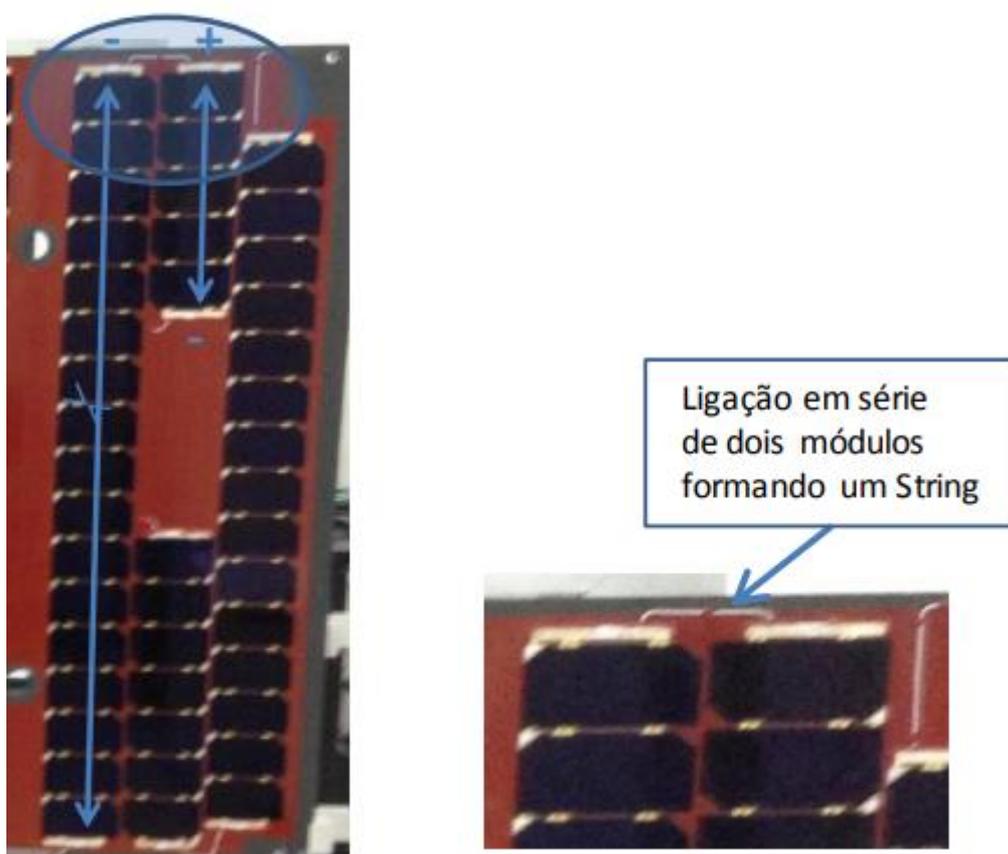
2.2.1 Circuito elétrico

O circuito elétrico é resultado da composição entre os *strings*, o diodo de bloqueio e os terminais de conexão (VAZ, 1999).

De acordo com Rauschenbach (1980), uma série de células solares conectadas em paralelo formam um módulo, e uma série de módulos em série que fornecem energia diretamente para o barramento é chamada de *string*.

Na Figura 2.5 é apresentada a formação de um *string* do painel solar utilizado no satélite Amazonia-1.

Figura 2.5 – Formação de um *string*.



Fonte: Orbital Engenharia (2021).

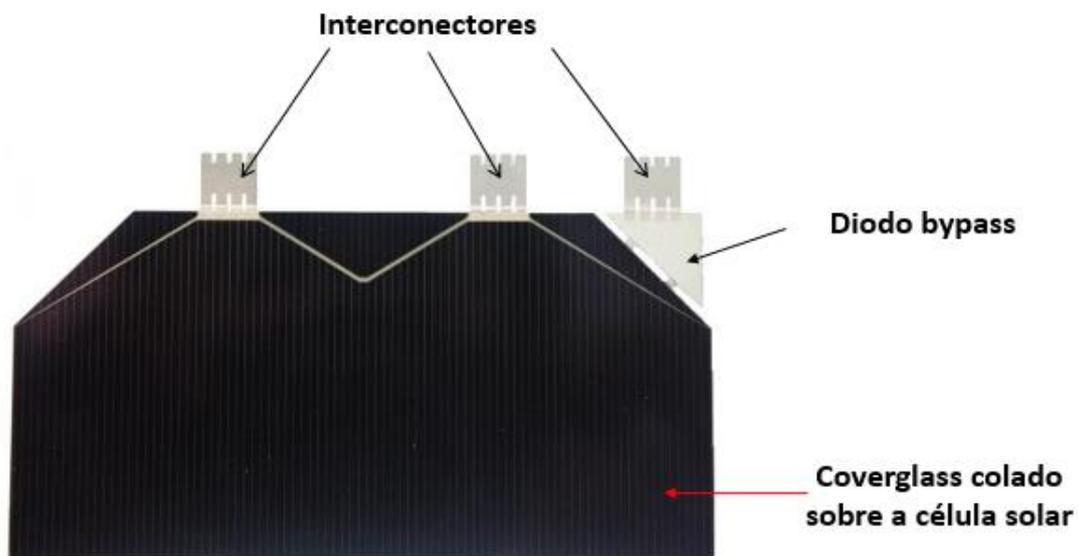
A Figura 2.5 à esquerda mostra o dois módulos e à direita tem-se a ligação em serie destes dois módulos resultando na formação do *string*. Os *strings* do Amazonia-1 são formados por dois módulos ligados em série, totalizando sempre 22 células solares ligadas em série.

2.2.2 Célula Solar Montada / *Solar Cell Assembly (SCA)*

Quando o texto é referido a uma célula solar de uso espacial, é comum utilizar a denominação SCA.

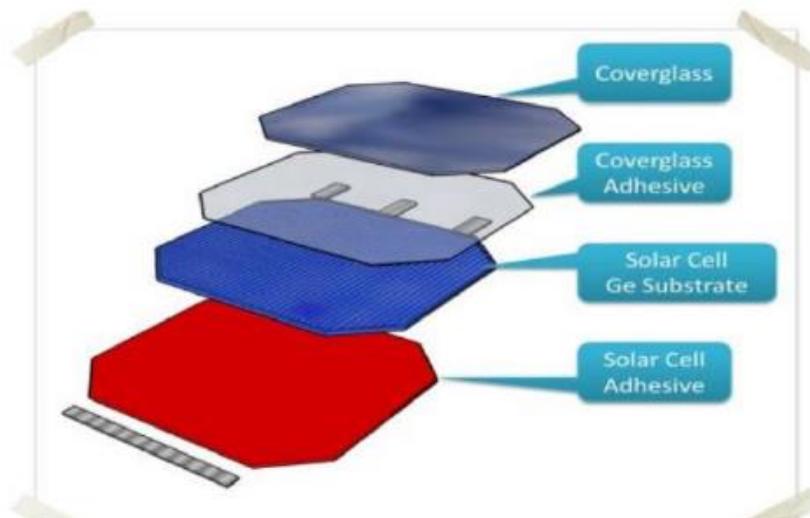
O SCA é composto pela célula solar em si, interconexões, um diodo de *bypass* e uma cobertura de proteção (do Inglês *coverglass*). As células de múltiplas junções podem possuir ou não um diodo de *bypass* integrado (TORRES, 2012; VAZ, 1999). As células solares que possuem esse diodo de *bypass* não necessitam de um diodo externo. As Figuras 2.6 e 2.7 ilustram um SCA e os elementos que a compõem.

Figura 2.6 – SCA com vista de topo e os elementos que a compõem.



Fonte: Adaptado de AZUR (2018).

Figura 2.7 – SCA com os elementos que a compõem.



Fonte: Maiolino (2021).

A seguir, são apresentadas as definições e exemplificações de cada uma das partes que compõem o SCA.

2.2.2.1 Células solares

As células solares, também conhecidas como células fotovoltaicas, são dispositivos semicondutores capazes de converter a energia solar diretamente em energia elétrica (RAUSCHENBACH, 1980).

Os materiais semicondutores utilizados para a fabricação das células solares são determinantes para a maioria das propriedades importantes destas, incluindo a saída elétrica (em geral, classificada pela eficiência de conversão), a tecnologia aplicável que controla o desempenho da célula e os custos de fabricação (ILES, 2001).

As células solares de uso espacial devem funcionar com alta confiabilidade, uma vez que o sucesso da missão do satélite depende criticamente da energia fornecida pelas células. As missões espaciais são as principais aplicações fotovoltaicas remotas; e, até o momento, a substituição e/ou o reparo delas não são viáveis. Como os custos gerais de um satélite são altos, os custos

relacionados à célula solar não são o fator mais importante, quando o comparamos com a confiabilidade e o desempenho (ILES, 2001).

A alta confiabilidade das células solares é garantida por meio de testes de ciclos térmicos, vácuo, aceleração, choques mecânico, radiação por partículas, teste de resistência à umidade (devido à estocagem), inspeção visual, caracterização da curva de corrente *versus* tensão, testes de aderência da metalização e da camada anti-refletora (BARUEL, 2012).

A alta eficiência de conversão de energia das células solares é o fator mais importante para se produzir alta potência no espaço (TAKAMOTO *et al.* , 2006).

I. Evolução das células solares espaciais

Em 1954, as células solares foram reconhecidas como a fonte de energia elétrica mais eficaz para as naves espaciais, logo após o anúncio de que os Laboratórios Bell haviam aumentado de forma significativa a produção de células solares de Silício (Si) (ILES, 2001).

Na década de 60, as células de Silício eram as melhores disponíveis, e foram realizados avanços no entendimento crescente dos parâmetros de materiais e projeto de células de Silício e da resistência à radiação (ILES, 2001).

No período dos anos 70, houve desenvolvimentos significativos em células produzidas a partir de semicondutores III-V; o mais importante foi a obtenção de células com eficiências de 16 a 18% utilizando o GaAs (Arsenieto de Gálio).

Nos anos 80, foram utilizadas células Silício de alta eficiência (em torno de 17.5% de eficiência) em missões com baixa exposição à radiação. Neste período a eficiência das células GaAs / Ge (Germânio) foi aumentada para 18–19% na produção, podendo chegar a 21% nas melhores células (ILES, 2001).

As células solares de Arsenieto de Gálio foram desenvolvidas para as missões que requeriam um baixo consumo de potência e uma maior resistência à degradação por radiação (BARUEL, 2012).

As células solares de uso espacial têm sido dominadas pelas células solares de multijunção baseadas em Fosfeto de Índio e Gálio InGaP/GaAs/Ge desde o final dos anos 90. A célula solar de Silício foi substituída pela célula de multijunção porque requer menos potência na área limitada dos painéis solares, ou seja, as células multijunção conseguem alcançar uma maior potência na mesma área de uma célula de Silício, desta forma, para gerar a mesma potência que um painel de células de Silício, a área requerida é menor. (TAKAMOTO *et al.* 2006).

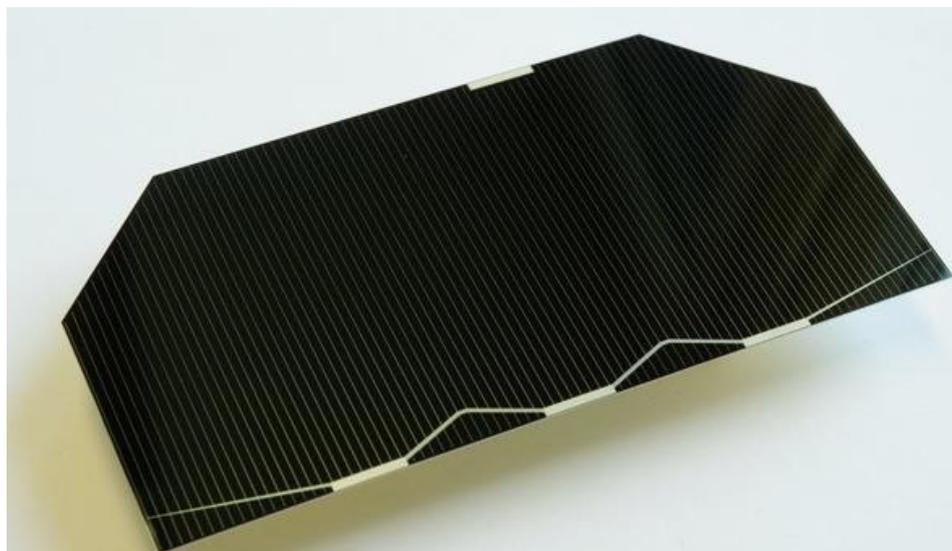
Ainda, de acordo com Iles (2001), o esforço intenso na década de 90 entre a NREL⁴ e as empresas de células para uso espacial, desaguou no desenvolvimento, qualificação e entrega de células de dupla junção (GaInP2 / GaAs, com eficiência em torno de 21 a 22%) e células de tripla junção (GaInP2 / GaAs / Ge, com eficiência de 24%). No fim da década, essas células foram refinadas com aumento da resistência à radiação e, conseqüentemente, uma menor degradação na maioria dos casos.

Os satélites mais recentes têm utilizado as células solares de tripla junção com base de Germânio, que atenua o problema da perda de energia quando um fóton de energia maior do que a energia do semicondutor é absorvida pela célula solar de uma junção. No passado, quando se usavam células de mono junção, havia uma perda de energia que era convertida em calor, o que diminuía a eficiência da célula (BARUEL, 2012).

A Figura 2.8 ilustra uma célula solar para aplicação espacial de tripla junção.

⁴ *National Renewable Energy Laboratory*

Figura 2.8 – Célula solar de tripla junção.



Fonte: ESA (2019).

As células solares de tripla junção possuem cada junção funcionando como uma “janela”, que absorve parte do espectro e deixa passar as remanescentes para as outras duas junções, assim, esse espectro é melhor aproveitado (VAZ, 1999; BARUEL, 2012).

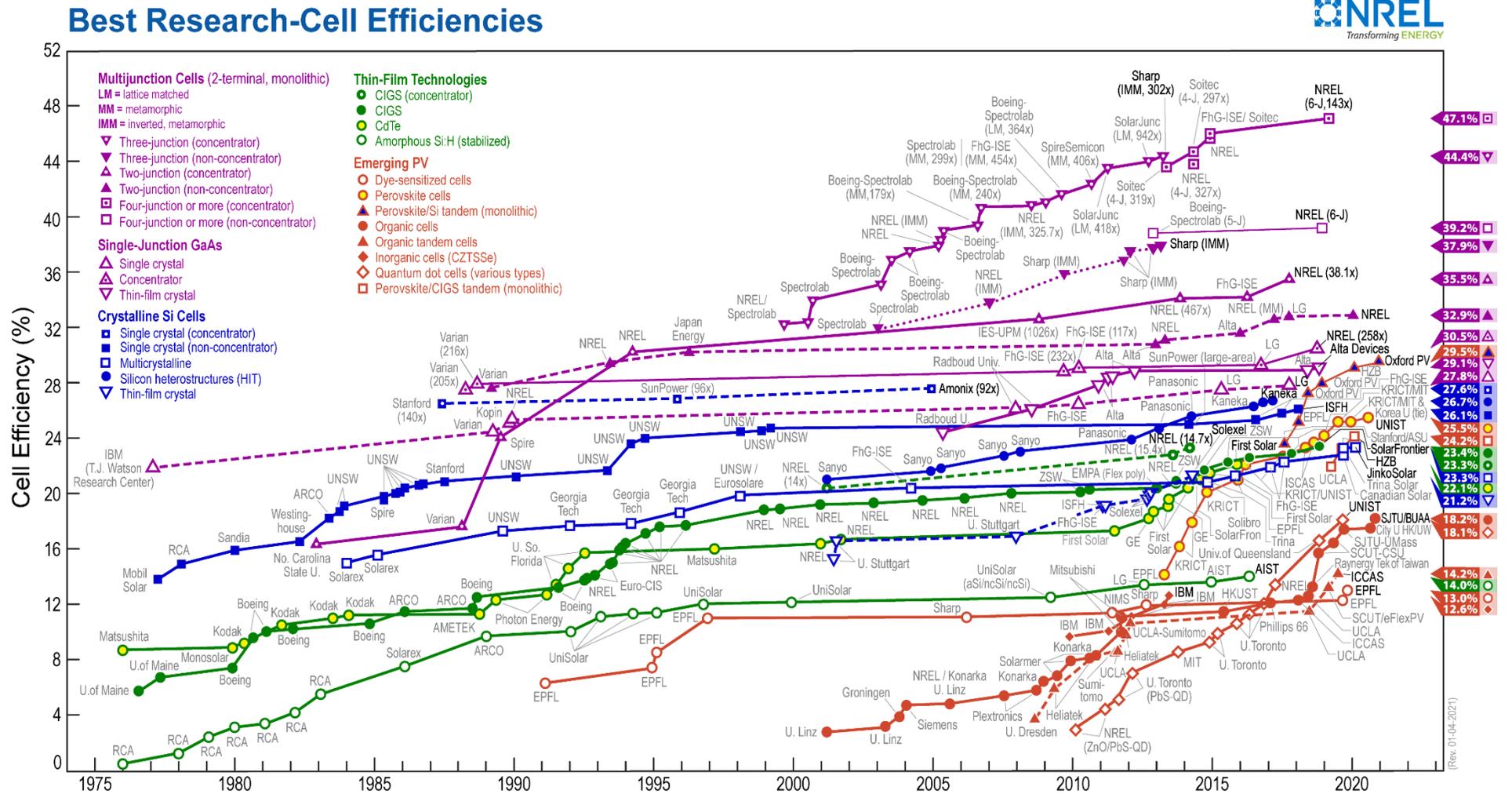
A Figura 2.9 apresenta a evolução da eficiência de conversão das melhores células solares pesquisadas desde 1976 pela NREL para diversas tecnologias fotovoltaicas, em condições controladas em laboratório. Na mesma figura estão destacadas as seguintes tecnologias: células multijunção, as células de Silício cristalino, as tecnologias de filmes finos e as tecnologias fotovoltaicas emergentes.

No gráfico da Figura 2.9 é possível observar que nos anos 70 as células solares de junção simples de Arsenieto de Gálio possuíam uma eficiência em torno de 22%.

Em 2019, o recorde mundial de eficiência de células solares de 47,1% foi alcançado pelo uso de células solares de múltiplas junções (com concentrador), desenvolvidas no NREL. Esses recordes são possíveis, pois estas células estão em condições controladas. A eficiência destas células solares de uso espacial

são medidas em condições padrão específicas, isto é, com iluminação padrão definida na norma ECSS-E-ST-20-08C (ECSS, 2012) e temperatura de 25°C.

Figura 2.9 – Eficiência de conversão das células solares.



Fonte: NREL (2021).

Nos últimos anos, tem-se realizado testes em laboratório com células solares com mais de três junções. E essas células solares mais eficientes já estão disponíveis no mercado.

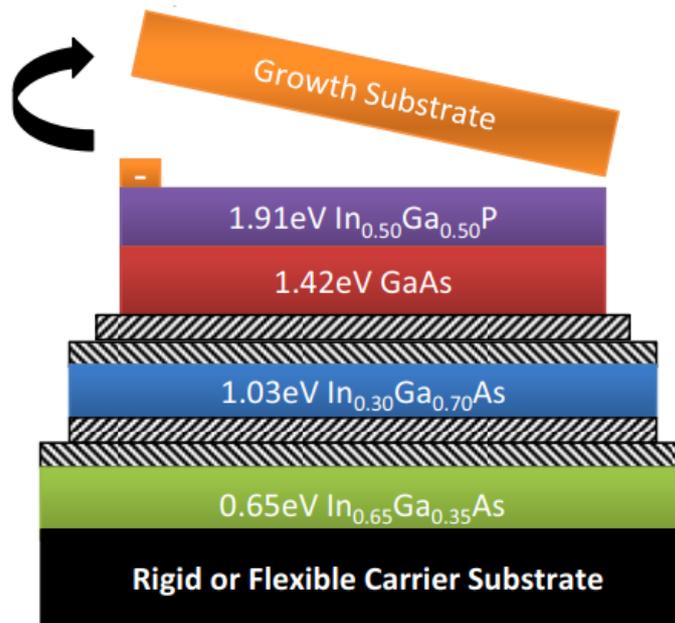
Existem ainda as células solares Multijunção Metamórfica Invertida (do Inglês, *Inverted Metamorphic Multijunction – IMM*). A célula solar IMM é produzida de invertendo o processo de crescimento dos elementos em relação as células solares de multijunção convencionais. O dispositivo é crescido de forma invertida, com correspondência de rede (*lattice-matched*⁵) de junções alto *bandgap* crescem primeiro, seguidas por duas junções incompatíveis de rede (*lattice-mismatched*⁶). Em seguida a estrutura é então invertida, montada em um suporte e o substrato de crescimento é removido. Esse processo de fabricação especial produz uma célula ultraleve e flexível que também converte energia solar com alta eficiência (SHARPS *et al.* 2017; DIAS, 2017).

A célula espacial IMM apresentada na Figura 2.10 tem sido estudada desde meados de 2007 (SHARPS *et al.* 2017).

⁵ “*lattice-matched*” é a correspondência de estruturas de rede entre dois materiais semicondutores diferentes permite que uma região de mudança de intervalo de banda seja formada em um material sem introduzir uma mudança na estrutura do cristal.

⁶ “*lattice-mismatched*” denominação atribuída à situação em que dois materiais com diferentes e incompatíveis constantes de rede são agrupados pela deposição de um material sobre o outro. Essa incompatibilidade de rede impedirá o crescimento de película epitaxial desprovida de defeito.

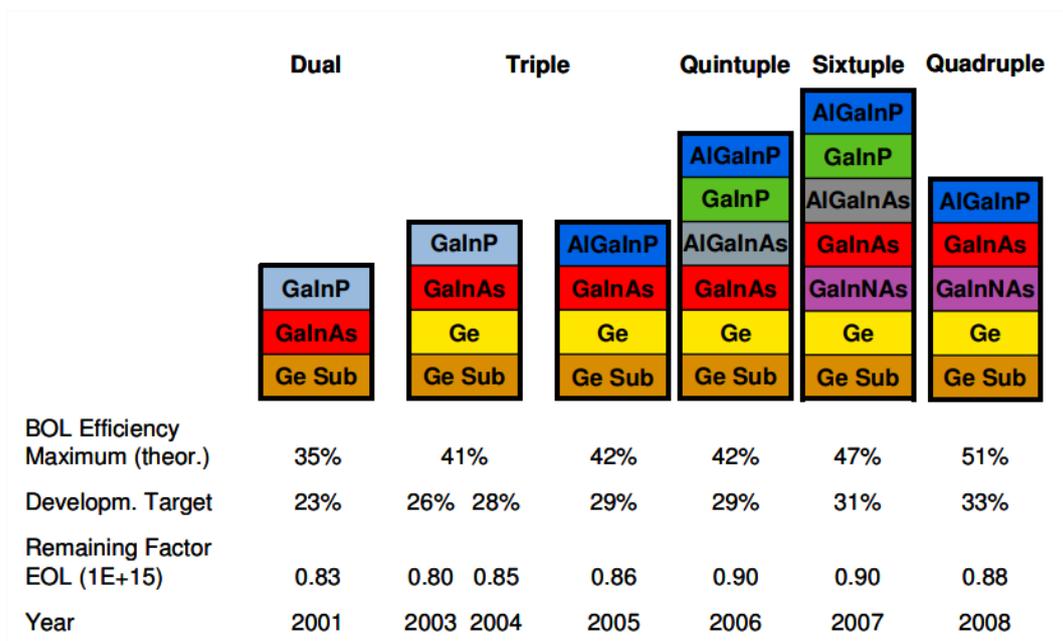
Figura 2.10 – Seção transversal esquemática do dispositivo de quatro junções IMM.



Fonte: Sharps *et al.* (2017).

A Figura 2.11 apresenta a evolução do desenvolvimento das células solares multijunção nos EUA publicado em um estudo de Strobl *et al.* (2005). Nesta imagem, é possível ver diversos tipos de células solares com a técnica de multijunção, desde duas até seis junções.

Figura 2.11 – Evolução para o desenvolvimento de células multijunção.



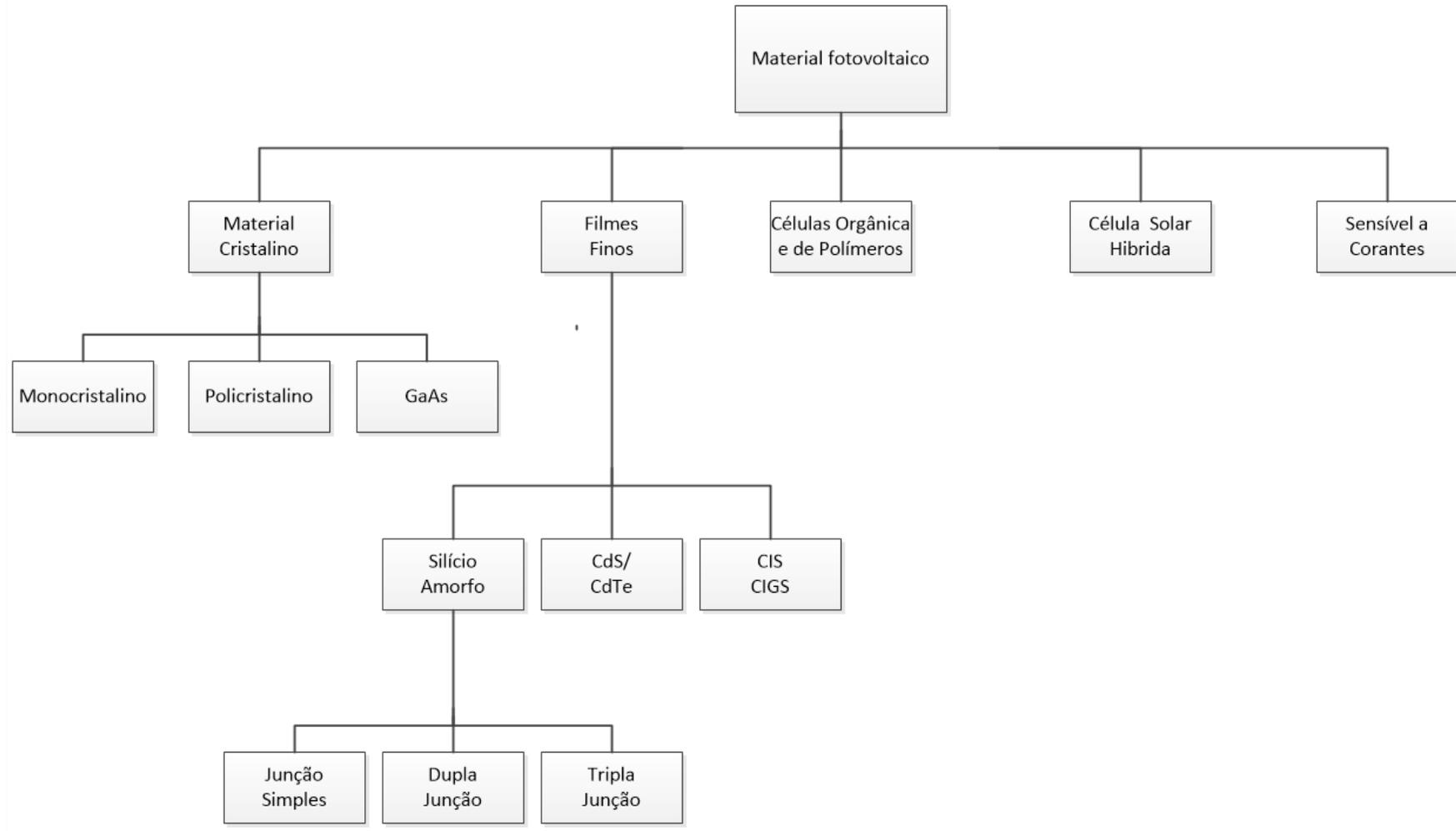
Fonte: Extraído de Strobl *et al.* (2005).

Na Figura 2.11 são apresentadas: a composição das diferentes células, a eficiência teórica máxima no início de vida (*BOL – Begin Of Life*), a meta de desenvolvimento, e o fator remanescente no fim da vida (*EOL – End Of Life*).

II. Classificação das células solares

As células solares podem ser classificadas com base nos materiais utilizados para sua fabricação. A Figura 2.12 apresenta a classificação das células solares com base no material fotovoltaico utilizado. De acordo com a Figura 2.12, podemos destacar as células de Silício cristalino, filmes finos, orgânicas e poliméricas, células híbridas e células solares sensibilizadas por corante (SAFYANU; ABDULLAH; OMAR, 2019).

Figura 2.12 – Classificação das células solares.



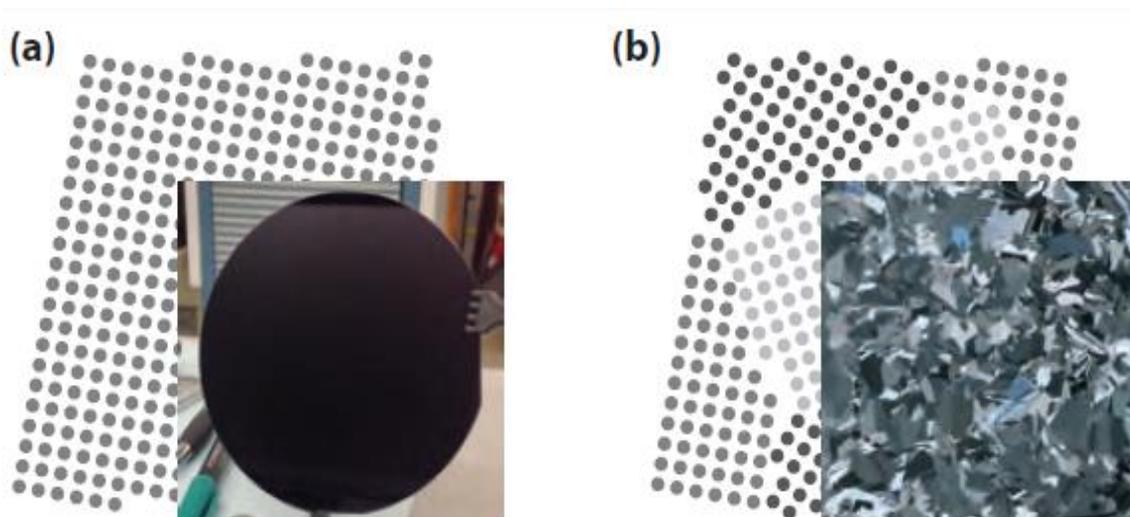
Fonte: Adaptada de Safyanu, Abdullah e Omar (2019).

De acordo com Safyanu, Abdullah e Omar (2019), as células solares de material cristalino estão distribuídas em Silício monocristalino, Silício policristalino e Arsenieto de gálio. Cada um desses materiais é descrito a seguir de forma sucinta.

- I. Células de **Silício monocristalino** (m-Si) Possuem uma estrutura única e formato uniforme a partir de um cristal único. Em aplicações comerciais são as mais eficientes.
- II. Células de **Silício policristalino** (p-Si) Consistem de diversos grãos menores de cristais que formam a estrutura molecular, criando também limites entre eles. Elas são de baixo custo de fabricação comparadas com o Silício monocristalino.

A Figura 2.13 mostra duas amostras de células de Silício: monocristalino e policristalino. A amostra de Silício monocristalino (a) possui uma cor uniforme, já o Silício policristalino (b), os vários grãos são facilmente visíveis a olho nu.

Figura 2.13 – Diferenças entre m-Si e p-Si.



Fonte: Jäper *et al.* (2014).

O **Arsenieto de Gálio** é um material semiconductor formado por meio da combinação de Gálio (Ga) e o Arsênico (As), gerando uma estrutura semelhante à do Silício. As células solares de Arsenieto de Gálio possuem maior eficiência e espessura menor, porém são mais caras quando comparadas a células com base de Silício.

Ainda de acordo com Safyanu, Abdullah e Omar, (2019), as células de **filmes finos** possuem um processo de fabricação mais acessível, pois o material fotovoltaico (uma camada semicondutora de filme fino) é pulverizado ou impresso em um substrato de vidro ou metal. São exemplos de células solares de filmes finos:

- I. **Telureto de Cádmio** (CdTe) ou **Sulfeto de Cádmio** (CdS) – produzida através de uma fina camada de CdS que evapora em substrato de vidro condutor; em seguida, uma camada espessa de CdTe é evaporada; e, por último, uma camada de metal é depositada.
- II. **Silício amorfo** (a-Si) é uma estrutura de filme fino com extrato de Silício, mas não cristalina. Absorve 40 vezes mais a luz do que o Silício cristalino. De acordo com Safyanu, Abdullah e Omar (2019), a vantagem das células de Silício amorfo é que elas podem ser estampadas em vários tipos de materiais baratos, tanto substratos flexíveis quanto rígidos, de polímeros, metais finos, plásticos a vidros coloridos. Porém possuem uma baixa eficiência.
- III. **Disseleneto de Cobre e Índio** (CuInSe₂, ou, simplesmente, CIS) e Disseleneto de Cobre, Gálio e Índio (Cu(InGa)Se₂), ou, simplesmente, CIGS). A eficiência do CIGS / CIS pode chegar a 13% para um módulo e 20% para a célula.

Existem ainda células solares do tipo orgânica. A **célula solar orgânica** (do inglês *Organic Solar Cell - OSC*), ou célula solar de plástico, é um tipo de energia fotovoltaica que usa a eletrônica orgânica, um ramo da eletrônica que lida com polímeros orgânicos condutores ou pequenas moléculas orgânicas, para absorção de luz e transporte de carga para produzir eletricidade da luz solar pelo efeito fotovoltaico (AMERI *et al.* , 2009). A maioria das células fotovoltaicas orgânicas são células solares de polímero.

Essas células podem ser classificadas como uma tecnologia nova quando comparada às anteriormente citadas, que tem atraído pesquisadores devido a flexibilidade física, material descartável e baixo custo de acordo com Safyanu, Abdullah e Omar (2019).

A célula solar **híbrida** é formada pela fusão de Silício cristalino com Silício não cristalino; essa integração entre os dois elementos produz uma alta taxa de desempenho de acordo com Safyanu, Abdullah e Omar (2019).

Já as células solares **sensibilizadas por corante** (do Inglês *Dye-Sensitized Solar Cells – DSSC*) são células orgânicas que se baseiam no processo de fotossíntese nas plantas. A absorção de luz nas células orgânicas é feita pelo corante que substitui o Silício nas células convencionais. Essa luz faz com que as moléculas do corante se excitem e liberem elétrons que são convertidos em energia elétrica. O uso de produtos químicos chamados corantes para o processo de conversão levou as células orgânicas também a serem conhecidas como células solares sensibilizadas por corantes (BHATIA, 2014).

A absorção da luz ocorre em moléculas de corante que estão presentes em um filme altamente poroso de Dióxido de Titânio (TiO_2); assim, o elétron é injetado no TiO_2 e é conduzido até a camada de óxido condutor transparente (BHATIA, 2014). Este tipo de célula solar é uma tecnologia útil em comparação com as existentes de acordo com Safyanu, Abdullah e Omar (2019).

2.2.2.2 Interconexões

As interconexões presentes entre as células solares são responsáveis por conduzirem 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 (RAUSCHENBACH, 1980; VAZ e VAZ, 2007). As interconexões são detalhadas no Capítulo 3. Na Figura 2.14 são ilustrados interconectores soldados à célula solar.

Figura 2.14 – Interconectores soldados ao barramento da célula solar.



Fonte: Strobl *et al.* (2014).

2.2.2.3 Diodos de bloqueio

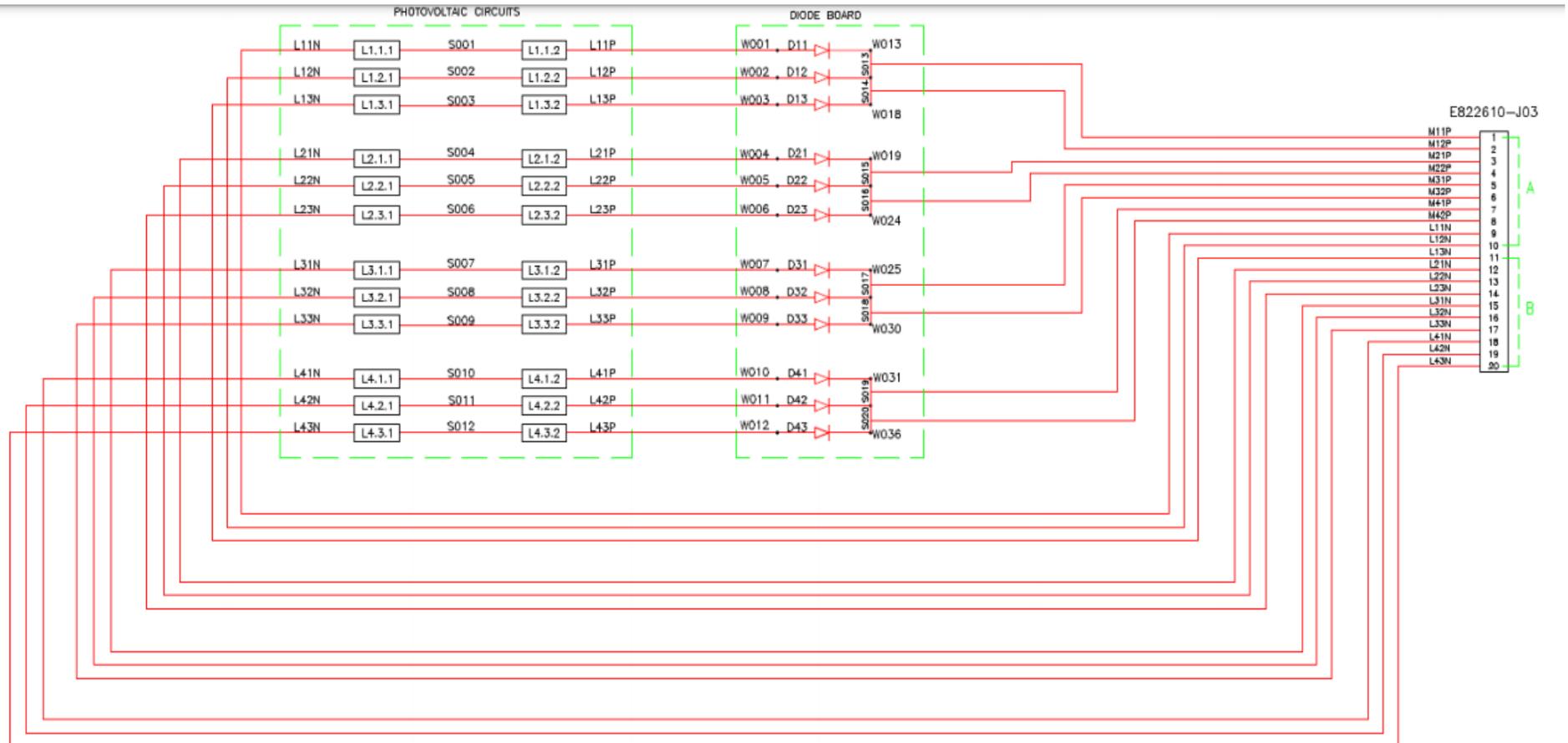
Os diodos de bloqueio são instalados em cada saída de tensão do *string* com a função de evitar a corrente reversa das baterias no período em que ocorre o eclipse; ou, ainda, danos causados devido à baixa tensão entre os *strings* (MAIOLINO e VAZ, 2016; CRESSEB, 2019).

Na Figura 2.15 é apresentado um diagrama elétrico mostrando os módulos solares ligados em série, formando os *strings*. Cada um dos *strings* é ligado a um diodo de bloqueio, que estão localizados na parte traseira do painel (quadro de diodos).

Neste diagrama elétrico, os *strings* são ligados (3 a 3) em paralelo formando assim as linhas de potência. Essas linhas de potência ligadas em paralelo por sua vez representam um circuito de potência do circuito fotovoltaico de potência.

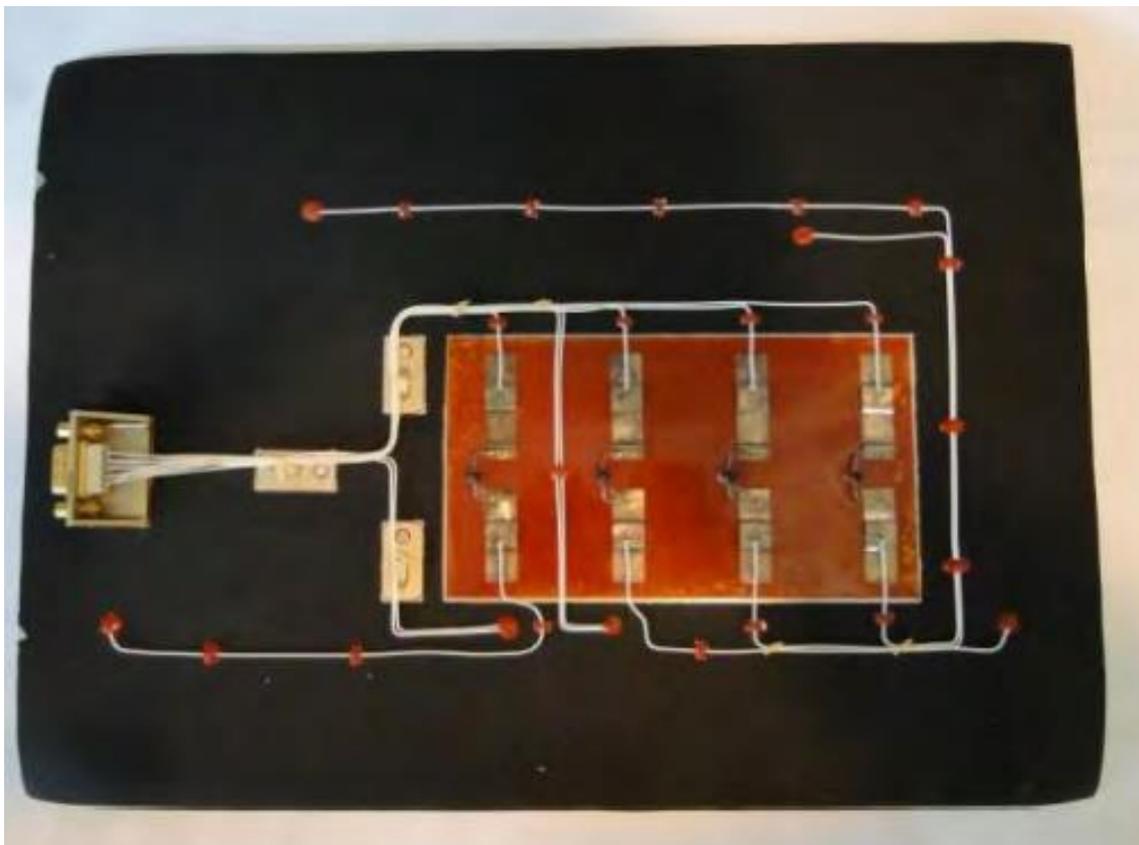
A Figura 2.16 ilustra os diodos na parte traseira do cupom de teste utilizado para a qualificação dos painéis solares do SCD1.

Figura 2.15 – Diagrama elétrico com os módulos solares ligados em série, formando os *strings* ligados ao diodo de bloqueio.



Fonte: Orbital Engenharia (2021).

Figura 2.16 – Face traseira do cupom de testes dos painéis solares do SCD1 mostrando os diodos.



Fonte: Baruel (2012).

2.2.2.4 Cobertura de proteção (*Coverglass*)

A cobertura de vidro ou cobertura de proteção é uma lâmina transparente de vidro Boro Silicato, dopadas com Dióxido de Cério (CeO_2), que previne a formação de centro de cores. A espessura dessa lâmina pode variar de 50 μm a 500 μm (VAZ, 1999) dependendo das especificações e requisitos do projeto.

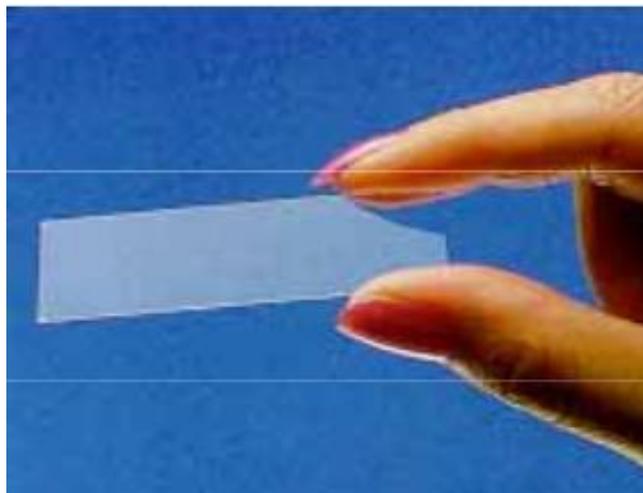
Os autores Vaz (1999) e Rauschenbach (1980) destacam as principais funções que a cobertura de vidro desempenha sobre as células solares, a saber:

- proteger as células solares contra a ação da incidência de partículas (ou seja, prótons e elétrons) existentes no ambiente espacial;
- proteger as células solares contra o Oxigênio monoatômico que está presente de forma abundante em órbitas baixas;

- bloquear a radiação ultravioleta, que causa a degradação do adesivo empregado na colagem da célula;
- diminuir as perdas por reflexão da radiação solar incidente;
- diminuir a absorbância e melhorar a emitância das células a fim de controlar a temperatura de operação a qual estão expostas.

Na Figura 2.17 é apresentado um exemplo de cobertura de vidro utilizada em células solares espaciais.

Figura 2.17 – Cobertura de vidro.



Fonte: Torres (2012).

2.2.2.5 Configuração de célula solar montada no painel solar

A configuração da montagem de SCA em um painel solar pode ser vista na Figura 2.18.

Figura 2.18 – Configuração do painel solar.

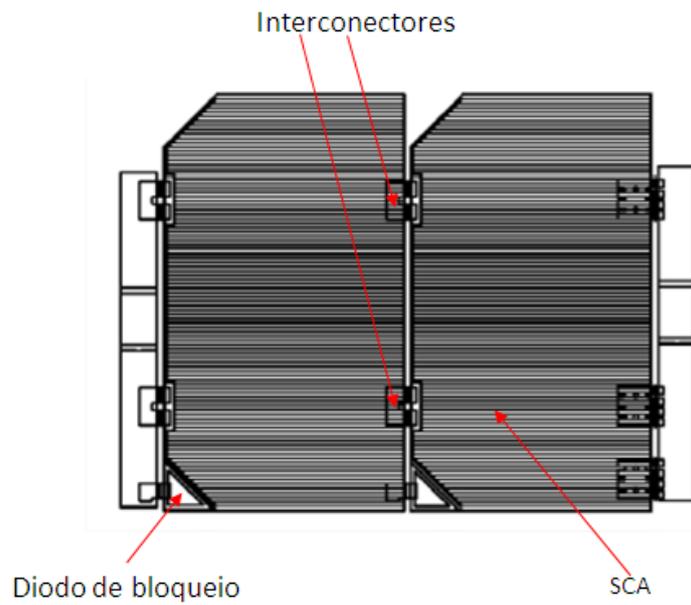


Fonte: Orbital Engenharia (2021).

2.2.3 Módulos solares

Módulos solares são vários conjuntos de células solares montadas e conectadas eletricamente em série. A Figura 2.19 mostra um módulo solar com duas células ligadas em série entre dois terminais de contato.

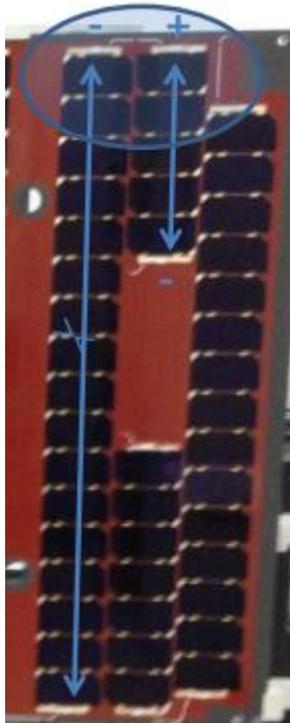
Figura 2.19 – Módulo solar com duas células solares.



Fonte: Adaptado de Maiolino e Vaz (2016).

A Figura 2.20 destaca dois módulos (através das setas indicadas em azul) do painel solar do satélite Amazonia-1.

Figura 2.20 – Módulo solar do painel solar do satélite Amazonia-1.



Fonte: Orbital Engenharia (2021).

2.2.4 Circuito de potência

O circuito de potência tem a função de conectar os módulos solares e disponibilizar conexão elétrica às fontes de energia que alimentam o satélite (MAIOLINO e VAZ, 2016).

Eles devem ser desenvolvidos para atender aos requisitos de potência estabelecidos através das especificações do subsistema de suprimento de energia de um satélite (VAZ, 1999).

Os circuitos de potência do painel solar são formados pela ligação dos *strings* em paralelo, conforme ilustrado no diagrama elétrico da Figura 2.15.

2.2.5 Isolamento elétrico

O isolamento elétrico tem a função de promover isolamento entre a estrutura do painel e os SCAs (MAIOLINO e VAZ, 2016).

2.2.6 Circuito de sinais

O circuito de sinais provém o monitoramento da temperatura e de outros sensores instalados nos painéis, necessários ao funcionamento e desempenho correto do painel solar (MAIOLINO e VAZ, 2016).

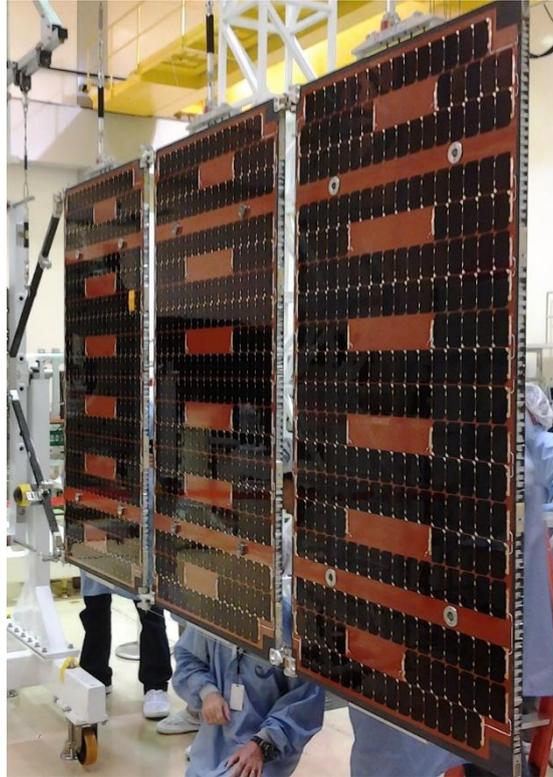
O circuito de sinais deve, ainda, ser desenvolvido para atender aos requisitos de aterramento elétrico e de interfaces de sinais elétricos dos sensores instalados no painel solar (VAZ, 1999).

2.2.7 Estrutura

A estrutura, além de condicionar e/ou apoiar os componentes da parte elétrica, atua na proteção parcial contra a radiação de partículas (MAIOLINO e VAZ, 2016).

A Figura 2.21 ilustra a estrutura do painel solar, com as células solares já montadas.

Figura 2.21 – Estrutura do painel com células solares já montadas.



Fonte: Engenharia Espacial INPE: Missão Amazonia-1 (2019).

2.3 Processo de Soldagem

Esta seção tem como objetivo apresentar os conceitos referentes ao processo de soldagem. Apresenta ainda a diferença entre os termos *brazing*, *soldering* e *welding*, além do processo de soldagem a ponto por resistência elétrica e os parâmetros que envolvem este processo.

2.3.1 Conceito de Soldagem

De acordo com Callister (2008), soldagem pode ser descrita como uma técnica de processo de fabricação, utilizada para a união de metais onde ocorre uma verdadeira fusão das partes a serem unidas, na vizinhança da ligação. Para facilitar esse tipo de processo podem ser usados materiais de adição de diferentes metais.

A soldagem pode ser definida como uma "operação que visa obter a união de duas ou mais peças, assegurando, na junta soldada, a continuidade de propriedades físicas, químicas e metalúrgicas" (MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2006).

Segundo a *American Welding Society (AWS)*, "soldagem é a operação que visa obter a coalescência localizada produzida pelo aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem a aplicação de pressão e de metal de adição" (AWS, 2020).

Na literatura técnica da língua inglesa existem três tipos de denominação para soldagem: *brazing* (brasagem), *soldering* (comumente chamada de solda branda) e *welding*.

Segundo a AWS o termo *brazing* pode ser definido como:

"Um grupo de processos de soldagem em estado líquido-sólido em que o material de enchimento é aquecido a um estado fundido acima de 450 °C (840 °F), mas o material de base permanece como um sólido e não se funde ou se mistura. O metal de adição se distribui na fresta formada pelas superfícies das juntas após fundir-se por capilaridade" (AWS, 2020).

No processo de brasagem, o material de adição é diferente do material base; ou seja, o material de adição sempre terá a temperatura de fusão menor do que a temperatura de fusão do material base. Esse tipo de processo pode ser facilmente desfeito através do aquecimento do local da solda.

Segundo a AWS, o termo *soldering* pode ser definido como:

"Um grupo de processos de união que produz coalescência de materiais, aquecendo-os até a temperatura de soldagem e usando um metal de adição com uma fase líquida que não exceda a 450 °C (840°F) e abaixo da fase sólida para o metal de base. O metal de adição se distribui na fresta formada pelas superfícies das juntas após fundir-se por capilaridade ou por molhagem das superfícies das peças." (AWS, 2020).

Soldering segundo Larry (2017) é o processo de soldagem que ocorre em temperaturas abaixo de 450°C. Este processo de soldagem pode ou não usar ação capilar para puxar a solda para dentro da junta. Quando a ação capilar ocorre, assim como a brasagem, a força da junta se torna várias vezes maior que a da própria solda.

Já o termo *welding* pode ser definido, segundo Larry (2017) e AWS (2020), como sendo o processo de união que produz coalescência de materiais, aquecendo-os até a temperatura de soldagem, com ou sem a aplicação de pressão ou apenas com a aplicação de pressão e com ou sem o uso de metal de adição.

A Tabela 2.1 resume as principais diferenças entre os tipos processos de soldagem citados anteriormente.

Tabela 2.1 – Comparação entre *Welding* x *Brazing* x *Soldering*.

Características	<i>Welding</i>	<i>Brazing</i>	<i>Soldering</i>
Material de base	Semelhante ao material soldado	Semelhante ou diferente	Semelhante ou diferente
Temperatura do Processo	A fusão ocorre acima de 450°C	Acima de 450°C	Abaixo de 450°C
Resistência da Junta soldada	Muito resistente	Alta resistência	Baixa (usado para conexões elétricas)
Material de adição	Requerido ou não	Requerido	Requerido

Continua

Tabela 2.1 – Conclusão.

Características	<i>Welding</i>	<i>Brazing</i>	<i>Soldering</i>
Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> • Custo-benefício; • A remoção de resíduos não é necessária em algumas aplicações <p>União de grandes seções.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Não requer a fusão do material de base; • Produz uma junta limpa sem a necessidade de processamento secundário; • Pode unir metais diferentes e não metais; • Custo-benefício para montagens complexas e com várias peças. 	<ul style="list-style-type: none"> • Não requer a fusão do material de base; • Envolve uma baixa temperatura do processo. Materiais diferentes e peças de paredes finas podem ser unidas.
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none"> • Pode ser mais caro; • O processo pode ter efeitos nocivos como a luz ofuscante, a radiação, a fumaça tóxica, altas temperaturas; • As alterações nas características da estrutura do material de base podem resultar em tensões internas ou distorções na área de solda. 	<ul style="list-style-type: none"> • Não é possível união de grandes seções; • A força da junta não é tão forte quanto a produzida pelo <i>welding</i>; • Juntas soldadas podem ser danificadas em altas temperaturas; • A cor da junta geralmente é uma cor diferente da cor do material de base; • Fluxos e materiais de adição podem conter componentes tóxicos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Não é utilizado para unir grandes seções; • Não é utilizado para aplicações de alta temperatura; • As juntas são de baixa resistência; • Os fluxos contêm componentes tóxicos.

Fonte: AWS (2020); Larry (2017).

2.3.2 Soldagem a ponto por resistência elétrica

O processo de soldagem a ponto por resistência elétrica teve sua origem por volta de 1877, com o inventor e engenheiro eletricitista inglês Elihu Thomson. Ele desenvolveu e patenteou o primeiro processo de soldagem elétrica nos Estados Unidos. No ano de 1879, foi realizada a primeira demonstração prática de soldagem por resistência. Em seguida, em 1886, foi produzida a primeira máquina de solda a ponto (ANDERSSON, 2013).

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; FERNANDES; MIRANDA, 2013).

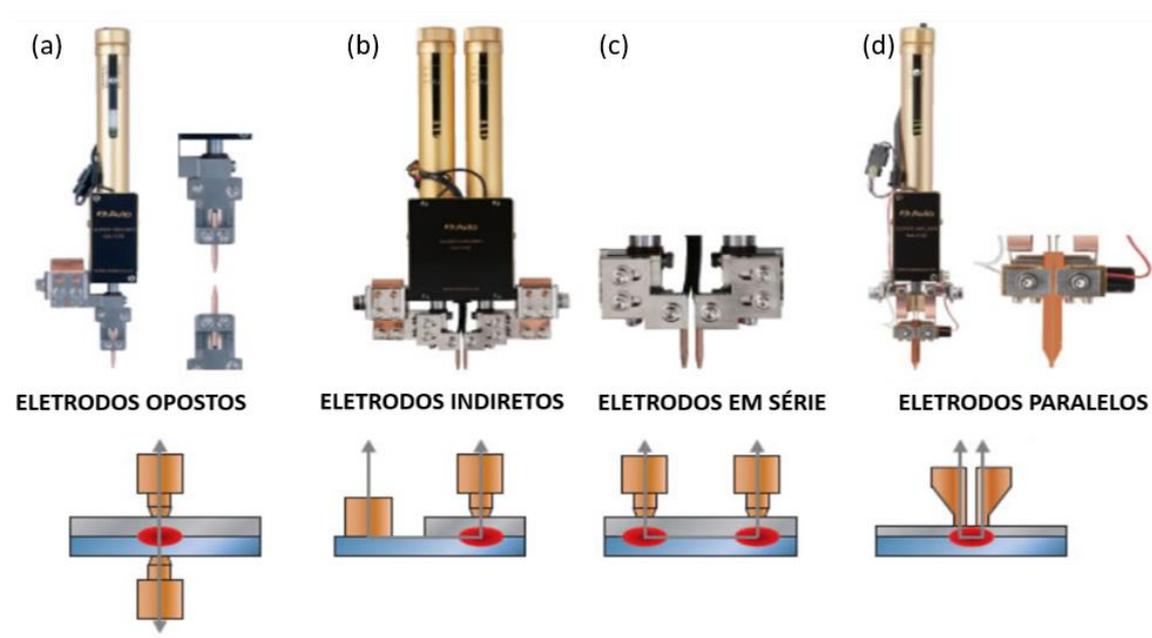
O processo de soldagem a ponto por resistência elétrica é um método de soldagem moderno que é comumente encontrado na indústria de produtos aeroespaciais, de eletrodomésticos e no setor automotivo (SOUZA; FERNANDES; MIRANDA, 2013; e LIU, 2017).

No segmento automotivo, este processo de soldagem se destaca devido a: alta produtividade; baixa exigência de experiência do operador; baixo custo operacional; adaptabilidade para automação em montagem de linhas de fabricação, quando equiparado a outros processos de união; não há metal de adição, pois o ponto é gerado por meio da fusão das peças, não agregando peso ao produto; facilidade de soldar formas complexas; menor Zona Termicamente Afetada – ZTA em relação a outros processos de soldagem (ÁVILA e BRACARENSE, 2017).

No setor automotivo, o processo de soldagem a ponto por resistência elétrica é amplamente utilizado em veículos mais novos que possuem cerca de 2000 a 5000 pontos de solda na sua construção (ÁVILA e BRACARENSE, 2017).

Existem diversas configurações de eletrodos utilizadas na soldagem a ponto por resistência elétrica, conforme ilustrado na Figura 2.22.

Figura 2.22 – Exemplos de configuração dos eletrodos soldagem a ponto por resistência elétrica.



Adaptado de AVIO (2020).

A Figura 2.22 (a) mostra os eletrodos opostos. Nesta configuração, a corrente passa por um eletrodo e através de ambas as peças de trabalho, retornando pelo eletrodo oposto. Esta aplicação é comumente encontrada na indústria automobilística para a soldagem de chapas.

A Figura 2.22 (b) mostra os eletrodos indiretos. Esta configuração é aplicada quando as peças de trabalho são configuradas de forma que apenas um lado da peça de trabalho esteja acessível com um eletrodo ou haja um grande desequilíbrio térmico. A corrente de soldagem flui do primeiro eletrodo, através da primeira peça de trabalho, da área de soldagem, da segunda peça de trabalho e para o outro eletrodo (AMADA, 2015).

A Figura 2.22 (c) mostra os eletrodos em série. Esta configuração também é utilizada quando não se possui acesso ao lado oposto da peça a ser soldada. Esta configuração de soldagem tem a vantagem de produzir dois pontos de solda (ou lente de solda) ao mesmo tempo (AMADA, 2015).

A Figura 2.22 (d) mostra os eletrodos paralelos. Esta configuração é a utilizada no processo de soldagem dos interconectores nas células solares. Este processo de soldagem é descrito na Seção 2.4.2.

2.3.2.1 Princípio do processo de soldagem a ponto por resistência elétrica

No processo de soldagem a ponto por resistência elétrica, duas ou três chapas sobrepostas são soldadas com o resultado do calor criado entre essas chapas para formar uma junção. Por meio do controle de parâmetros como a corrente de soldagem, o tempo de soldagem e a força do eletrodo na peça, formas semelhantes e tamanhos de pontos de solda com as mesmas propriedades podem ser alcançados com alta velocidade de produção (SREENU *et al.*, 2014).

Ainda conforme Sreenu *et al.* (2014), neste tipo de processo a geração de calor está ligada a três parâmetros: corrente de soldagem, tempo de soldagem e resistência dos materiais a serem soldados. A fórmula para a geração de calor é dada pela Equação 2.1:

$$Q = C * I^2 * R * \Delta t \quad (2.1)$$

onde:

Q = calor gerado, dado em J;

I = corrente, dada em A;

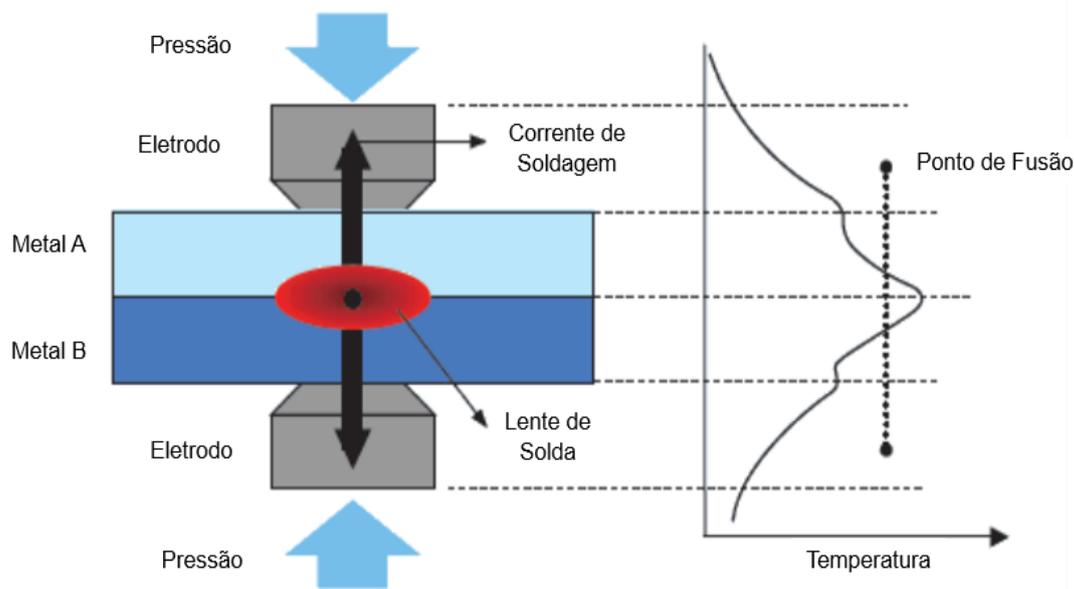
R = é a resistência do trabalho, dada em Ω ;

Δt = é a duração da aplicação da corrente, dado em s;

C = fator relativo às perdas.

A distribuição de temperaturas envolvida neste tipo de processo de soldagem pode ser observada na Figura 2.23.

Figura 2.23 – Distribuição de temperaturas no processo de soldagem por resistência elétrica.



Adaptado de AVIO (2020).

2.3.2.2 Corrente de soldagem

Neste tipo de soldagem, pode ser usada tanto a corrente contínua (CC) como a corrente alternada (CA). Este parâmetro possui um valor adequado compreendido entre um limite mínimo e máximo que vai depender do material das peças, da espessura, além da área de contato entre os eletrodos e a peça (SANTOS, 2013).

Uma corrente 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 pelo calor, além do aquecimento demais da região da solda, que pode acarretar em deformação plástica das peças a serem trabalhadas e penetração exagerada dos eletrodos (SANTOS, 2013).

No processo de soldagem das interconexões às células solares, é aplicado um pulso de corrente contínua. A energia necessária para a fusão dos materiais advém desse pulso de corrente contínua que tem como 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.

2.3.2.3 Tempo de soldagem

O tempo de soldagem é o intervalo de tempo da aplicação de corrente de soldagem para que se possa produzir o ponto de solda.

A rampa de subida da tensão só é iniciada depois que os eletrodos tocam as peças de trabalho; sendo assim, é iniciada no momento em que a corrente é acionada. De acordo com Aslanlar *et al.*, (2008), este tempo de rampa de subida da tensão é necessário antes do pulso de corrente para que os eletrodos alcancem determinada pressão sobre as peças de trabalho.

O tempo da rampa de descida da tensão é iniciado no momento em que a corrente de soldagem é interrompida. Neste momento, a lente de solda é formada, se resfria e se solidifica sob uma pressão constante (HASHEMI; PASHAZADEH; HAMED, 2012).

Um tempo curto de soldagem requer uma corrente de soldagem mais elevada, a fim de alcançar o calor necessário para a fusão do material (AURES, 2006). Um tempo muito curto de soldagem pode não fundir o material, além de não produzir uma solda de boa qualidade, o que torna crítico o controle apropriado do tempo de soldagem.

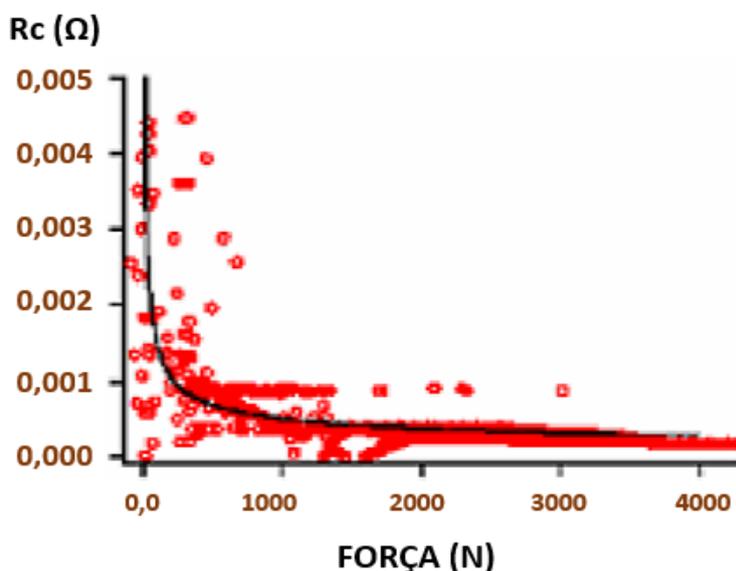
Em contrapartida, um tempo de soldagem elevado pode produzir a saída do metal fundido da junta soldada, ou seja; expulsando o líquido; diminuindo a seção transversal da junta e resultando em uma solda descontínua fragilizada, além do aquecimento demasiado do metal de base provocando a sua ebulição; gerando 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).

2.3.2.4 Força ou pressão de aplicação do eletrodo

A força ou pressão 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 a força, menor será a resistência de contato (R_c dada em Ω), gerando um calor insuficiente para a soldagem, conforme ilustrado na Figura 2.24 (BRANCO, 2004).

Figura 2.24 – Comportamento da resistência de contato em função da força aplicada.



Fonte: Adaptado de Branco (2004).

Um excesso de pressão do eletrodo na peça a ser soldada pode ocasionar fratura da solda, desgaste das peças de trabalho devido à penetração dos eletrodos, deformação dos eletrodos (DIAS, 2011).

Esse parâmetro de soldagem, assim como os demais, tem grande influência no processo de soldagem das interconexões em células solares. Desta forma, uma pressão excessiva dos eletrodos sobre as peças de trabalho (interconector + célula solar) pode produzir danos elétricos ou mecânicos (deformação dos elementos), trincas e até mesmo a quebra das células solares.

2.4 Principais processos empregados na fabricação de painéis solares

Esta seção descreve, sucintamente, os processos envolvidos na fabricação de painéis solares:

- ✓ processo de fabricação dos interconectores;
- ✓ processo de soldagem dos interconectores;
- ✓ processo de colagem da cobertura de vidro nas células solares;
- ✓ processo de colagem das células solares nos painéis;
- ✓ processo de fabricação da cablagem;
- ✓ processo de isolamento elétrico da estrutura; e
- ✓ processo de fabricação da estrutura do painel.

2.4.1 Processo de Fabricação dos interconectores

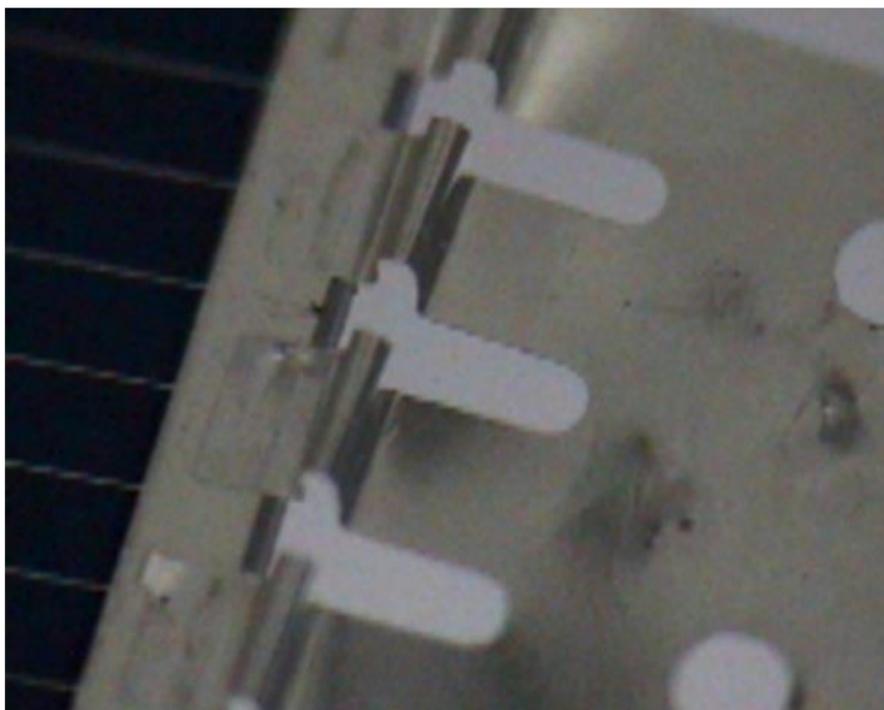
O processo de fabricação dos interconectores pode ser dividido em duas partes: corte e conformação das fitas metálicas, conforme apresentado a seguir.

As fitas metálicas são adquiridas de acordo com a espessura determinada pela equipe que desenvolve o projeto dos interconectores; e, segundo Rauschenbach (1980) e Vaz (1999), eles devem atender aos requisitos de boa condutividade; ser soldáveis, ter uma boa repetibilidade de processo; flexibilidade e resistência à fadiga e baixa tensão termomecânica nas juntas soldadas.

O corte do interconector é realizado por uma ferramenta que possui o perfil desejado do produto como se fosse um estampo de corte.

Após o corte do interconector, ele é conformado de acordo com a forma mostrada na Figura 2.25. A conformação do interconector promove o alívio de tensão termomecânica para o mesmo no espaço. A conformação da alça de alívio termomecânico do interconector é fora do plano do interconector (*out of plane*).

Figura 2.25 – Interconector conformado e soldado a célula solar. Aumento de 50X.



Fonte: Vaz e Vaz (2007).

2.4.2 Processo de Soldagem dos interconectores

A etapa de soldagem dos interconectores na célula solar é considerada crítica, pois muitas células solares se trincam ou até mesmo se quebram durante o processo. Problemas de confiabilidade do painel solar poderão surgir durante a sua fase operacional devido a juntas de solda de qualidade inferior (GIERTH; REBENKLAU; MICHAELIS, 2012; WIESE; MEIER; KRAEMER, 2010; MEIER et al., 2011)

A soldagem por resistência elétrica com eletrodos paralelos é o único processo prático de soldagem para células solares segundo Rauschenbach (1980).

Mas existe também o processo de soldagem por ultrassom para a união de interconectores às células solares. O INPE possui uma máquina de soldagem

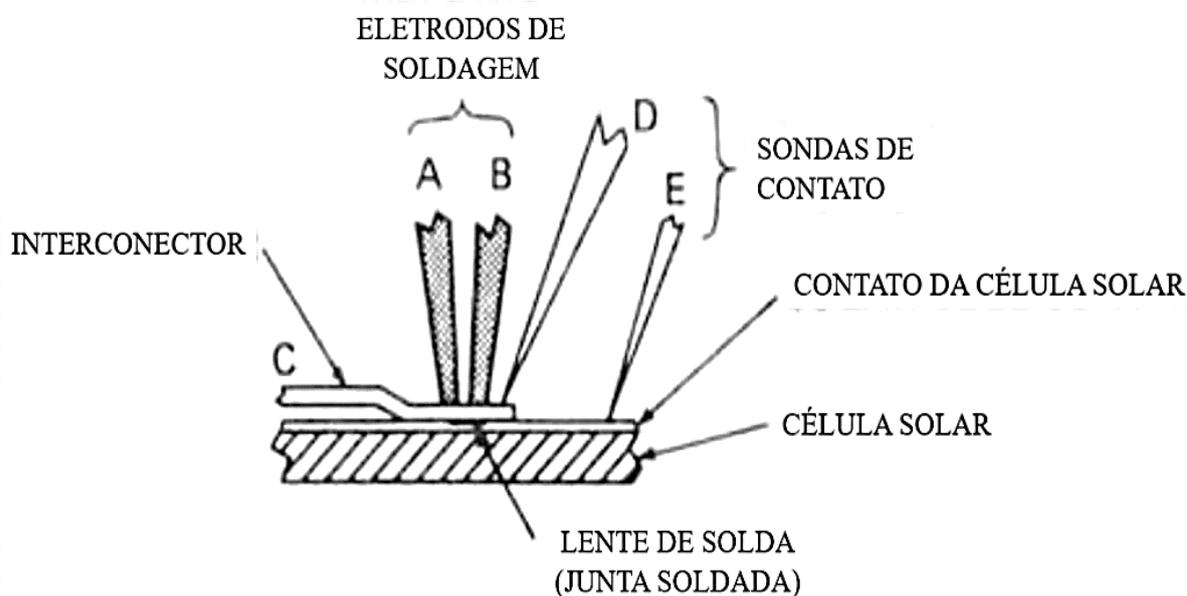
por ultrassom, que utiliza sonotrodo⁷. Os painéis solares do satélite SACI foram fabricados utilizando este tipo de processo de soldagem por ultrassom.

O processo de soldagem por resistência elétrica com eletrodos paralelos consiste em: um par de eletrodos espaçados por uma distância pré-determinada que entra em contato com a peça (interconector da célula solar); a corrente elétrica flui através dos eletrodos e por 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 (RAUSCHENBACH, 1980; STEINMEIER, 2010).

Rauschenbach (1980) destaca que este é o único processo de soldagem prático para interconexões de células solares, conforme apresentado na Figura 2.26.

⁷ O sonotrodo ultrassom é uma ferramenta de solda muito utilizada em processos de soldagem com essa técnica, tem como principal função transmitir vibrações axiais de alta frequência para a peça que será soldada, garantindo uma fusão instantânea entre as interfaces. Dessa forma, o sonotrodo ultrassom consiste em um condutor de energia vibratória, que é transferida para a peça a ser soldada.

Figura 2.26 – Processo de soldagem por resistência elétrica com eletrodos paralelos.

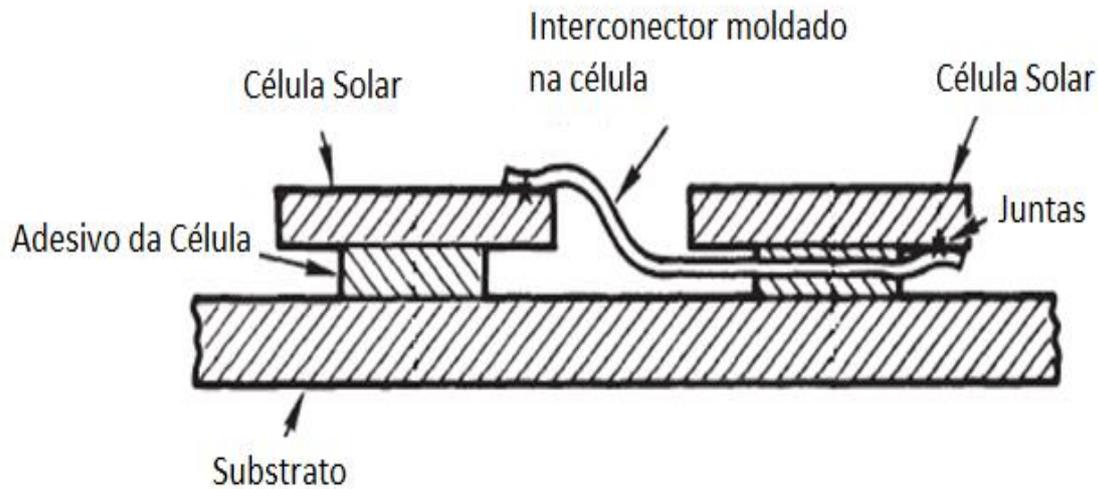


Fonte: Adaptada de Rauschenbach (1980).

Os eletrodos são presos em dispositivos ajustáveis. A largura da abertura entre eles depende do material usado e varia de 0,025 a 1,00 mm. A corrente de soldagem varia entre 100 a 1000 A. O tempo de soldagem tem uma faixa de 1 a 100 ms. E a força do eletrodo sobre as peças a serem soldadas varia de 0,2 a 100 N (GROTE e ANTONSSON, 2009).

O interconector é soldado no barramento frontal de uma célula solar; e, subsequentemente, ao lado posterior da célula solar adjacente, conforme ilustrado na Figura 2.27.

Figura 2.27 – Interconector moldado.



Fonte: Adaptado de Rauschenbach (1980).

Nesse processo de soldagem é fundamental que se atendam aos rigorosos requisitos da garantia da qualidade, a fim de evitar a degradação elétrica e/ou a ruptura da célula solar e, ainda, as imperfeições mecânicas na interconexão (VAZ e VAZ, 2007).

2.4.3 Processo de colagem das células

O processo de colagem das células pode ser dividido em duas etapas: a colagem da cobertura de vidro em cada célula solar de forma individual e a colagem das células no substrato do painel (DURAN *et al.*, 2002).

2.4.3.1 Processo de colagem da cobertura de vidro

Conforme mencionado anteriormente, a cobertura de vidro tem a função de proteger as células solares de efeitos nocivos do ambiente espacial.

Segundo Vaz e Vaz (2007), o processo de colagem da cobertura de vidro (*Coverglass*) consiste, basicamente, em colar uma cobertura de proteção utilizando uma camada de adesivo de silicone de aproximadamente 20 microns, sobre a superfície da célula solar já com o interconector soldado. Assim como no processo de soldagem, a colagem deve considerar os critérios de garantia da qualidade, a fim de evitar defeitos na camada formada pelo adesivo, tais como:

- bolhas;
- trincas e mau posicionamento na cobertura de vidro;
- inversão do lado externo do protetor;
- saliência do adesivo na lateral;
- opacidade do adesivo, entre outros defeitos.

Os autores citam ainda que outro fator importante a se levar em consideração é que o adesivo utilizado na colagem da cobertura de vidro é relativamente caro.

2.4.3.2 Processo de colagem das células solares no painel

As células solares são montadas na superfície do painel com auxílio de um adesivo. Em geral, as células solares são isoladas da estrutura do painel por meio de folha de *Kapton*®, kevlar ou fibra de vidro (LARSON e WERTZ, 1999).

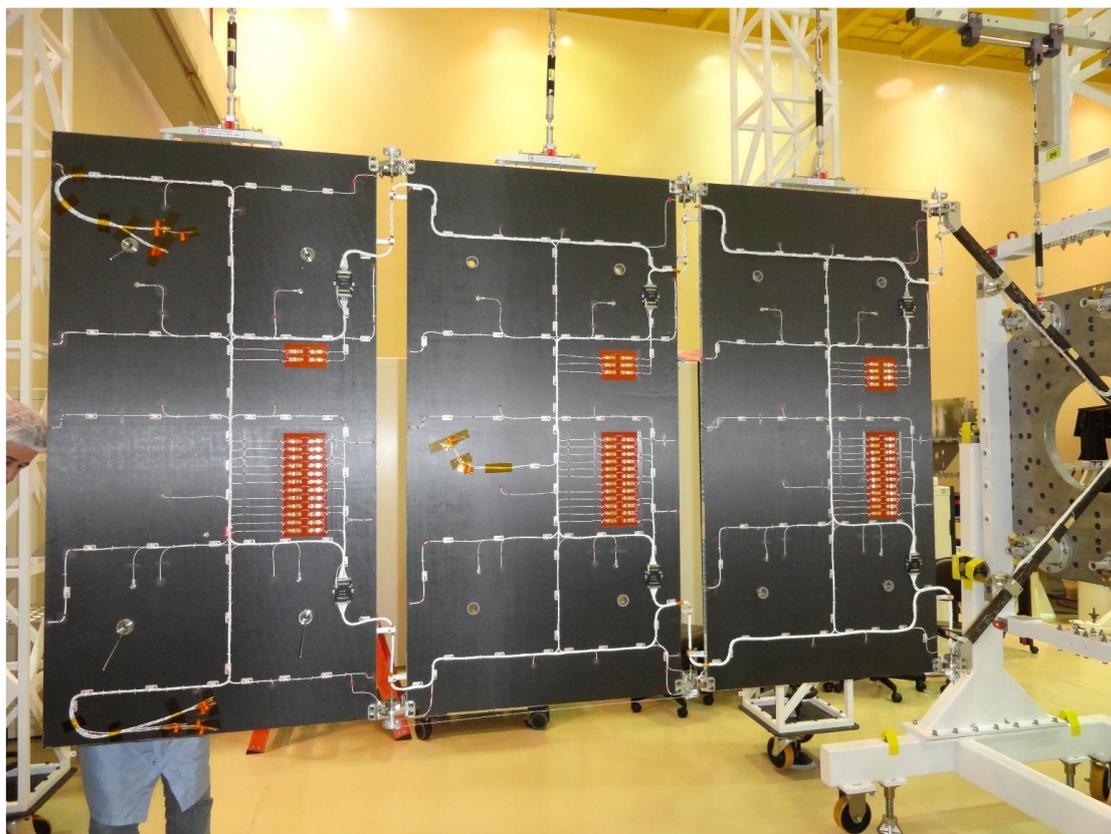
2.4.4 Processo de fabricação da cablagem

A cablagem do painel solar é fabricada utilizando: eletrodos opostos, o processo de soldagem por resistência DC para cabeamento de juntas elétricas, placas de diodos e resistores e conectores do tipo MTC⁸ soldados. Após a fabricação, todos os cabos são submetidos a testes de continuidade elétrica e isolamento elétrico, além de inspeção visual realizada em toda a cablagem (VAZ e VAZ, 2007).

Na Figura 2.28, pode ser observada a cablagem do painel solar utilizado no satélite Amazonia-1, lançado em 28 de fevereiro de 2021.

⁸ MTC *Mass Termination Connector*.

Figura 2.28 – Cablagem do painel solar do satélite Amazonia-1.

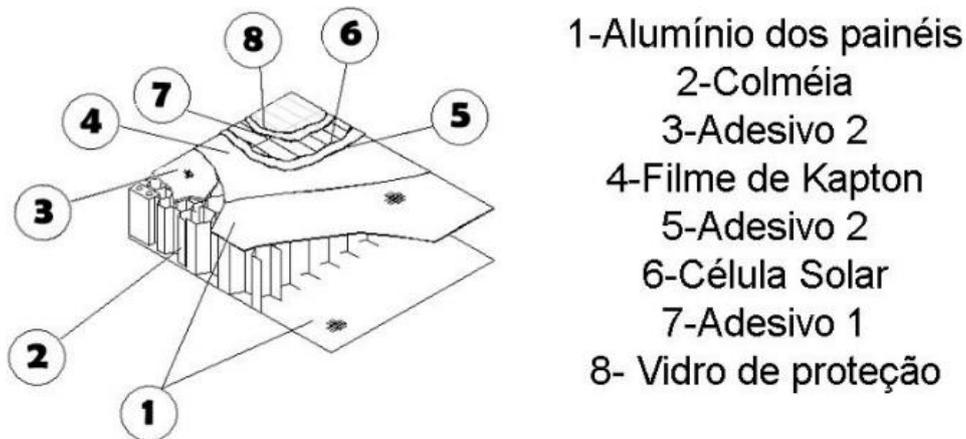


Fonte: Maiolino (2021).

2.4.5 Processo de isolamento elétrico da estrutura

O processo de isolamento elétrico da estrutura é realizado entre as células solares e a estrutura de alumínio, onde é colocada uma fina camada de filme de Kapton® a fim de prover o isolamento elétrico do gerador solar para a estrutura de alumínio dos painéis (BARUEL e VEISSID, 2012). Na Figura 2.29 esse filme de Kapton® é representado pelo item 4.

Figura 2.29 – Formação de um painel solar por camadas.



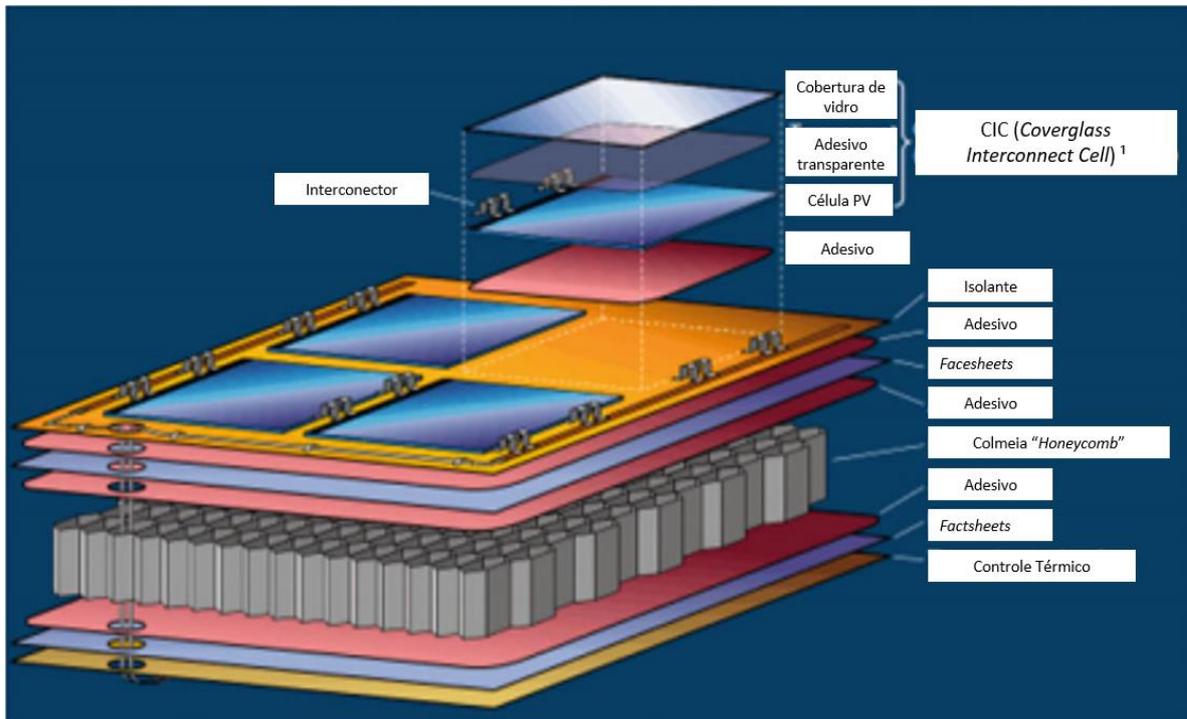
Fonte: Baruel (2012).

2.4.6 Processo de fabricação do painel

A estrutura do painel solar, geralmente, é do tipo sanduíche com núcleo de colmeia de alumínio (*aluminum honeycomb*) e folhas de face (*face sheets*) em material compósito (material em cuja composição entram dois ou mais tipos de materiais diferentes, como metais e polímeros, metais e cerâmica ou polímeros e fibras orgânicas e inorgânicas), à base de fibra de Carbono e resina epóxi. As células solares são coladas na estrutura do painel com adesivo de silicone. Tanto para o painel quanto para as células solares, uma camada de filme de poliimida, é colada para isolar os eletrodos da célula solar e o substrato condutor (KLEIMAN, 2017).

A estrutura típica de um painel solar com todas as partes que o compõem é apresentada na Figura 2.30.

Figura 2.30 – Estrutura típica de um painel solar.



¹ CIC (Coverglass Interconnect Cell) é o nome dado ao conjunto: célula solar, interconector e cobertura de vidro.

Fonte: Adaptado de Kleiman (2017).

2.5 Inspeções e testes aplicados no processo de fabricação de painéis solares

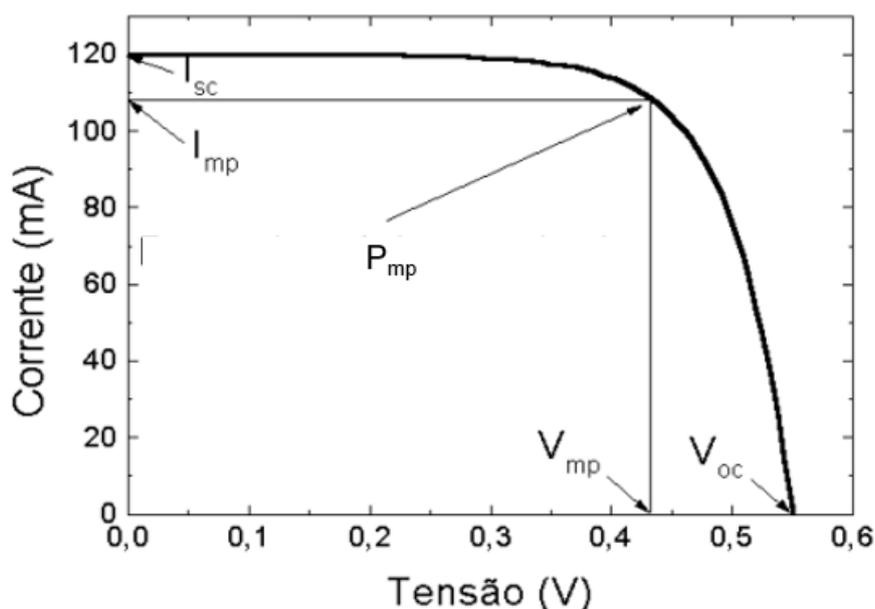
Nesta seção são descritas algumas das inspeções e testes realizados no processo de fabricação de painéis solares com aplicação espacial.

2.5.1 Inspeção da curva I x V

O comportamento elétrico da célula solar pode ser representado pela sua curva corrente *versus* tensão (I x V), na qual se mede a capacidade de geração do módulo fotovoltaico ao fazê-lo fornecer energia a uma carga enquanto se mede a dinâmica de corrente e tensão do dispositivo.

A Figura 2.31 mostra uma curva I x V típica de um módulo fotovoltaico medida em condições padrão; ou seja, com irradiância de 1367W/m^2 , espectro solar AM0 e temperatura do módulo ou da célula fotovoltaica em 25°C , lembrando que essas condições são para painéis solares de uso espacial.

Figura 2.31 – Curva I x V de um módulo fotovoltaico, medida em condições padrão.



Fonte: Adaptada de Baruel (2012).

Na curva acima, tem-se as seguintes informações sobre os parâmetros elétricos que caracterizam o módulo: a tensão de circuito aberto (V_{OC}), a corrente de curto-circuito (I_{SC}), a potência máxima fornecida pela célula (P_{MP}) e a corrente elétrica (I_{MP}) e a tensão elétrica (V_{MP}) no ponto de máxima potência.

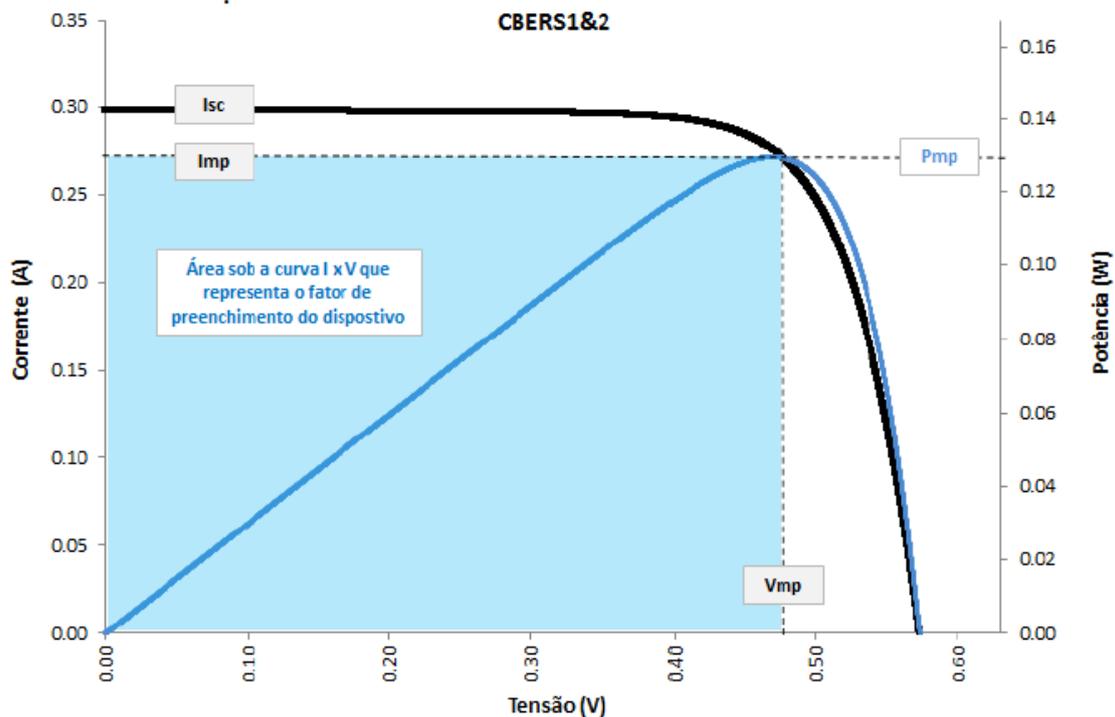
A curva I x V pode trazer diversas informações sobre as células solares como as diferentes condições de insolação, temperatura e carga sob às quais está exposta. O formato da curva é resultado da tecnologia utilizada na célula; assim, quanto mais quadrado for seu formato, maior o rendimento.

Em função dos parâmetros fornecidos pela curva I x V, podemos obter dois parâmetros que identificam a qualidade das células solares: fator de preenchimento (*Fill Factor – FF*) e eficiência.

Em termos gráficos o fator de preenchimento representa uma área sob a curva I x V da célula ou dispositivo fotovoltaico. Idealmente o preenchimento total desta referida área indica FF = 1 (TORRES, 2014). A fórmula para o FF é dada pela Equação 2.2 e a Figura 2.32 representa o conceito do FF.

$$FF = \frac{V_{mp} * I_{mp}}{V_{oc} * I_{sc}} \quad (2.2)$$

Figura 2.32 – Fator de preenchimento da célula solar utilizada no gerador solar dos satélites CBERS 1&2.



Fonte: Torres (2014).

De acordo com Rauschenbach (1980) e Torres (2014), o FF pode ser utilizado na comparação de células solares de diferentes fabricantes, desde que sejam submetidas às mesmas condições ambientais; em geral, as células solares têm esse parâmetro variando de 0,75 e 0,80.

Quanto maior a capacidade da célula solar de transformar a energia solar em energia elétrica, maior a eficiência do dispositivo. A eficiência é dada pela Equação 2.3:

$$\eta = \frac{P_{mp}}{P_{in}} = \frac{V_{mp} * I_{mp}}{A * G} \quad (2.3)$$

Onde:

η – eficiência

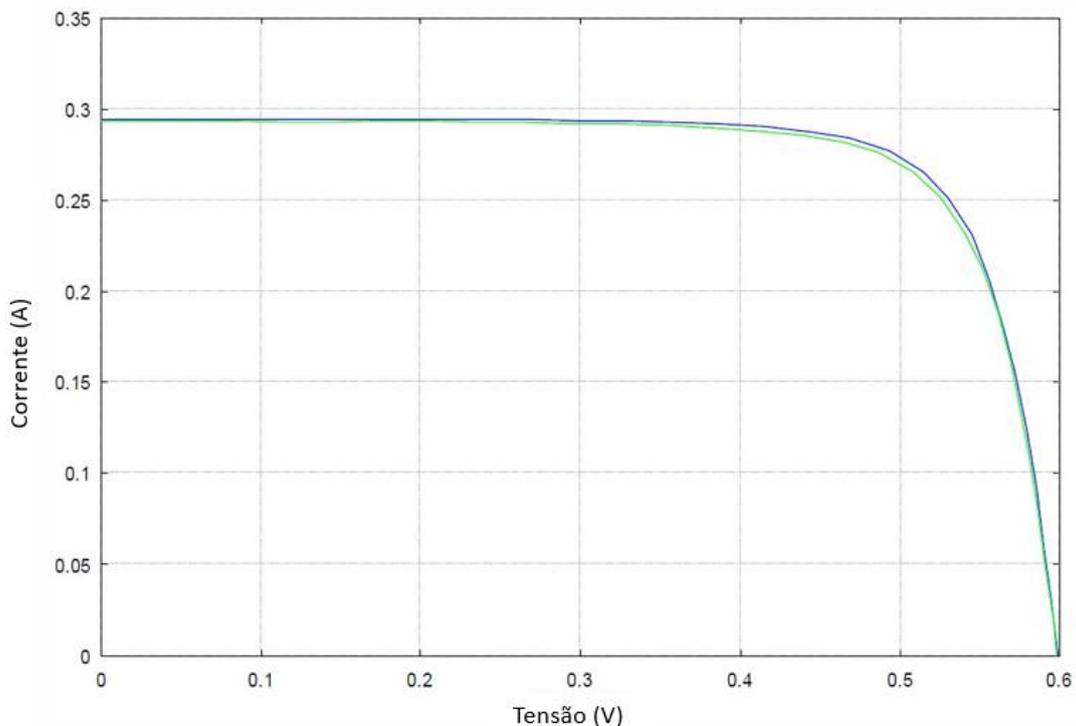
P_{in} – é a potência máxima que chega ao módulo (W);

A – área do dispositivo fotovoltaico (m²);

G – irradiância incidente (W/m²).

Durante a fase de soldagem do interconector na célula solar, é realizado um teste de desempenho elétrico antes e depois do processo de soldagem, que tem por objetivo verificar se a junção da interconexão na célula solar não degradou a corrente de curto-circuito da célula solar em mais de 2%. A Figura 2.33 mostra um teste de desempenho elétrico típico para célula solar, antes e depois da soldagem do interconector.

Figura 2.33 – Teste de desempenho elétrico da célula solar antes e depois da soldagem do interconector.



Fonte: Adaptado de Vaz e Vaz (2005).

A linha azul (acima) representa o teste elétrico antes do processo de soldagem do interconector na célula solar; já a linha verde (abaixo) representa o mesmo teste após a soldagem do interconector.

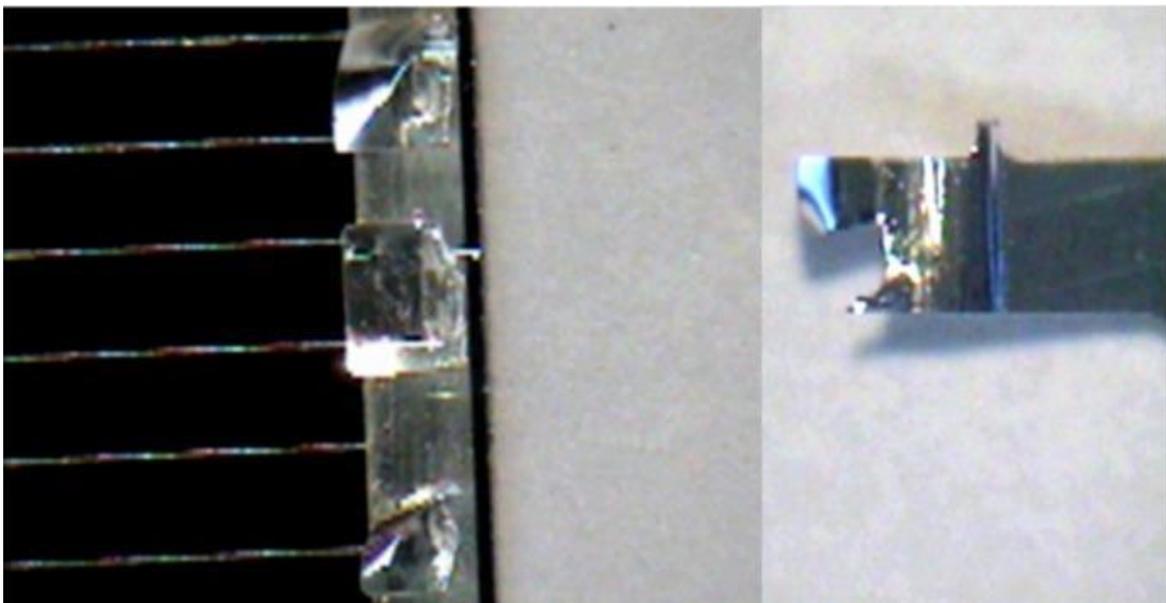
2.5.2 Teste de arrancamento (*Pull Test*)

O objetivo do teste de arrancamento (do Inglês, *pull test*) é verificar a resistência mecânica da união dos contatos de ambas as faces da célula solar sob tensão mecânica e ambiental.

O processo para realização desse teste destrutivo, segundo a ECSS (2012), é realizado aplicando uma força gradual crescente sobre as guias da interconexão. A direção pode ser de 0°, 45° ou 90° de aplicação da força e a uma velocidade de tração conforme estabelecido no SCD-BSC (*Source Control Drawing for Bare Solar Cell*). O SCD-BSC é o documento de controle interno de célula solar isolada; ou seja, sem nenhum item integrado a ela, que contém todas as informações sobre os requisitos específicos do projeto.

A Figura 2.34 mostra um corpo de prova após a realização do *pull test* com aumento de 50x.

Figura 2.34 – Corpo de prova depois do teste de resistência à tração.



Fonte: Vaz e Vaz (2005).

Na imagem, é possível ver que parte do corpo de prova ficou soldado no barramento da célula solar. Ou seja, a interconexão cisalhou, mas o ponto de solda manteve a junção dos elementos.

2.5.3 Eletroluminescência

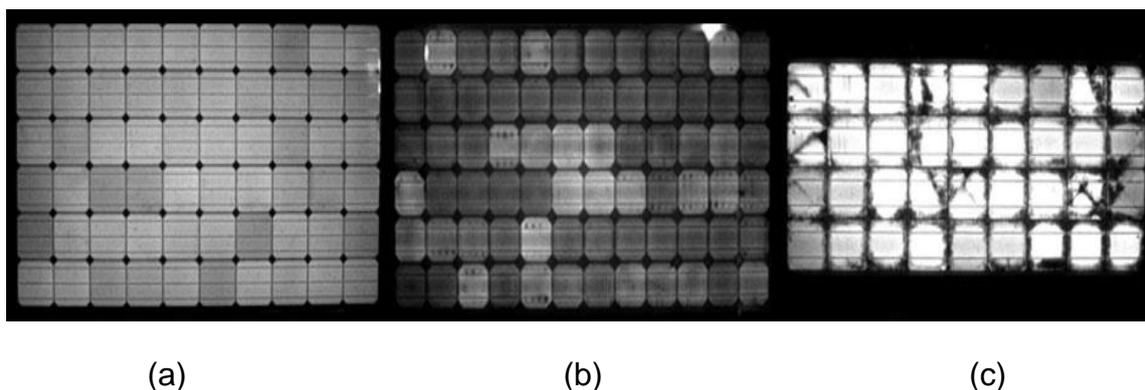
A inspeção por eletroluminescência (EL) caracteriza-se como uma técnica de análise não destrutiva que permite a identificação de defeitos em células e módulos solares de maneira rápida, (FONSECA, 2018). No entanto, a radiação emitida por dispositivos fotovoltaicos não se encontra na faixa visível do espectro eletromagnético, mas na faixa do infravermelho, com comprimentos de onda que variam de 900 nm a 1300 nm. Esta região é conhecida como *Near Infrared* (NIR). Sendo assim, não é possível observá-las a olho nu (FIGUEIREDO *et al.*, 2018).

De uma forma simplificada, a técnica de eletroluminescência corresponde ao processo inverso do funcionamento típico da célula solar, ao invés de converter radiação visível em energia elétrica, ela emite radiação quando é percorrida por uma corrente elétrica (FRAZÃO, 2016).

Fonseca (2018) cita que, por meio de uma análise visual das fotografias das células e/ou módulos é possível identificar vários defeitos e degradações. As imagens se caracterizam por zonas mais escurecidas que correspondem a áreas com sinal de eletroluminescência fraco. Segundo Fonseca (2018), alguns dos defeitos e degradações que podem ser identificados são: fissuras e microfissuras, dedos (*fingers*) partidos e células em curto-circuito.

A Figura 2.37 apresenta fotos referentes à técnica de eletroluminescência aplicada a um painel solar de uso terrestre. A mesma técnica e interpretação das imagens podem ser aplicadas em painéis para uso espacial.

Figura 2.35 – Teste de eletroluminescência aplicado a diferentes painéis.



Fonte: Portal Solar (2020).

A Figura 2.35 (a) apresenta um painel com boa qualidade das células, ou seja, sem microfissuras e uma boa combinação de células. A Figura 2.35 (b) apresenta um painel com algumas células boas, outras ruins e algumas microfissuras. A Figura 2.35 (c) mostra um painel com células ruins e com microfissuras ao longo da área útil.

A inspeção por eletroluminescência pode ser realizada após o processo de soldagem dos interconectores nas células solares e tem por objetivo identificar possíveis degradações causadas pelo processo de soldagem em si na junção de solda dos componentes.

2.6 Projeto e Análise de Experimentos

O método de Projeto e Análise de Experimentos pode ser definido como um método experimental utilizado para manipular as entradas de um processo, a fim de entender melhor seus efeitos na saída do processo (DYADEM PRESS, 2003).

O método de Projeto e Análise de Experimentos consiste em um 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).

Para esta Dissertação, o método de Projeto e Análise de Experimentos será aplicado para avaliar o comportamento da variável resposta (teste de arrancamento), quando as variáveis de entrada (parâmetros de soldagem: tensão de soldagem, tempo de soldagem, deslocamento dos eletrodos até a peça) são alteradas de um nível mínimo para um nível máximo.

No Capítulo 4, o método de Projeto e Análise de Experimentos é apresentado como a solução proposta. O Apêndice B detalha melhor o passo a passo deste método.

2.7 Confiabilidade

Segundo a norma da ECSS-S-ST-00-01C (2012), a Confiabilidade pode ser definida como sendo a probabilidade de um item executar uma função requerida com sucesso, sob determinadas condições e em um determinado intervalo de tempo.

Para Souza e Carvalho (2005), a Confiabilidade pode ser definida como “a probabilidade de que um dispositivo ou sistema irá exercer uma função requerida, sob condições especificadas, por um período de tempo determinado”.

Para esta Dissertação, a preocupação inicial é a otimização do processo de soldagem. Sendo assim, a confiabilidade, a taxa e a distribuição das falhas das juntas soldadas não foram avaliadas. Para isto seria necessário estabelecer uma determinada quantidade de amostras de células solares soldadas aos interconectores (cupom de testes) tendo estas sido soldadas com os parâmetros de soldagem determinados no processo de otimização. Todas as células precisariam ser soldadas nas mesmas condições (ou seja, com os mesmos parâmetros de soldagem), para posterior submissão a testes acelerados idênticos às condições espaciais às quais seriam expostas quando em operação. Estes testes acelerados revelariam a sequência e o número de ocorrência de falhas no decorrer do tempo. Devido a isto, a confiabilidade das juntas não foi avaliada, pois, conforme a definição de confiabilidade, não foram atendidas: 1) a quantidade mínima requerida de amostras (pelo menos 36), 2) as mesmas condições do processo de soldagem e 3) avaliação do comportamento das juntas

ao longo do tempo. Este estudo de otimização do processo de soldagem é uma etapa anterior a esta fase de determinação da confiabilidade das juntas soldadas.

2.8 Otimização

A palavra “otimização” pode ser definida como “ato ou efeito de otimizar”; ou “processo que consiste em determinar as condições em que certas grandezas podem atingir seus valores mais elevados” (MICHAELIS, 2000).

Para esta Dissertação, a otimização será atingida determinando os valores para os parâmetros de soldagem (tensão, tempo e deslocamento do eletrodo); com o objetivo de obter valores no *pull test* superiores a 160 gramas-força, dentro da amostra analisada. O valor de 160 gramas-força vem do *data package* da célula solar.

Assim, buscou-se a otimização a partir da força mínima de 160 gramas-força com a menor degradação possível da célula solar, lembrando que a maior degradação admissível é de 2% da eficiência da célula, isto pode ser observado por meio um teste de desempenho elétrico conforme apresentado no item 2.5.1.

Para encontrar os valores ótimos dos parâmetros de soldagem será utilizado o método de *Desirability*. Este método multicritério permite avaliar várias respostas de forma simultânea, permitindo a determinação de uma combinação de condições mais próximas aos requisitos desejados.

2.9 Comportamento dos materiais no ambiente espacial

Nesta seção são descritos alguns efeitos do ambiente espacial em alguns materiais empregados em sistemas espaciais como a ação do Oxigênio atômico, efeito da radiação, efeito do vácuo, ciclagem térmica e danos causados por impacto de detritos espaciais.

Os materiais empregados em satélites e veículos espaciais tripulados precisam resistir à exposição de longo prazo a um ambiente espacial hostil; por isso,

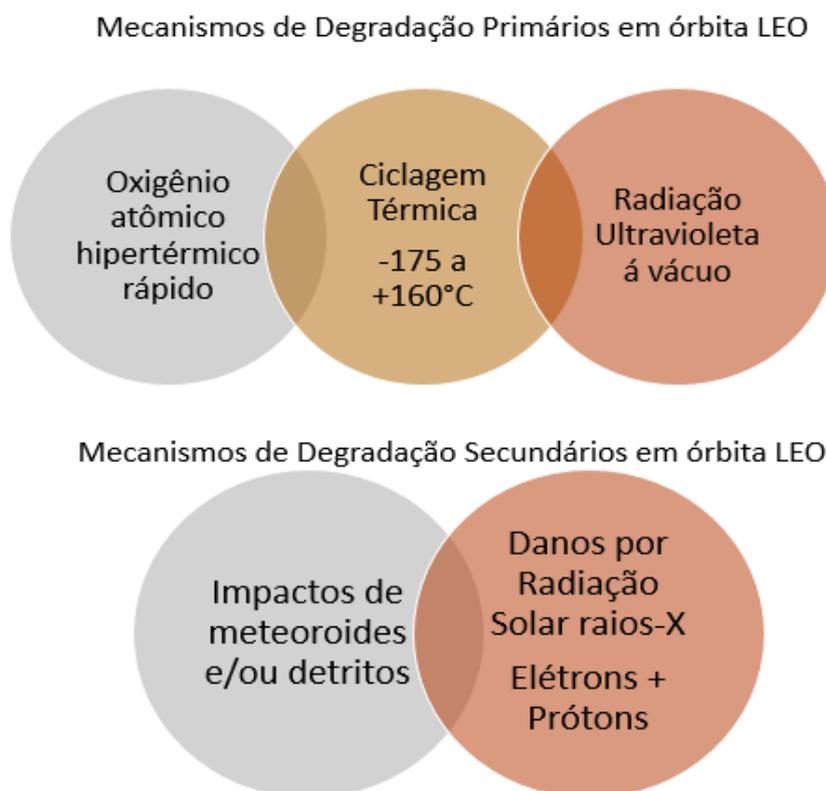
engenheiros e cientistas buscam desenvolver materiais mais avançados que possam explorar o espaço de forma segura e confiável. Materiais destinados a esse tipo de aplicação estão expostos a vácuo, ciclos térmicos, radiação UV, radiação de partículas ionizantes (prótons / elétrons), impactos de micro meteoróides e detritos (YANG e GROH, 2010).

As diferentes órbitas em que os satélites operam têm suas características, aplicações e peculiaridades a qual estão expostos. De forma sucinta, elas são apresentadas a seguir:

- órbita geoestacionária da Terra (em Inglês *Geostationary Earth Orbit*– GEO) tem altitude de aproximadamente 36000 km, tem sua principal utilização voltada para satélite de comunicações. Nesta órbita a descarga eletrostática é mais preocupante do que em outras órbitas;
- órbitas médias da Terra (em Inglês *Medium Earth Orbits* – MEO) situadas entre as órbitas GEO e LEO são utilizadas para satélites de navegação, como o Sistema de Posicionamento Global (em Inglês *Global Positioning System* – GPS). Estas órbitas têm níveis de radiação de partículas mais elevadas próximo ao Cinturão de Van Allen;
- órbitas baixas da Terra (em Inglês *Low Earth Orbits*), conforme mencionado anteriormente estão localizadas entre 200 e 1000 km, são aplicadas para observação da Terra para fins científicos ou militares, bem como para veículos espaciais tripulados, como a *International Space Station* – ISS. Uma das maiores preocupações nestas órbitas é com o Oxigênio Atômico (ATOX) encontrado somente nesta faixa de altitude.

A Figura 2.36 ilustra os mecanismos de degradação primários e secundários presentes nas órbitas LEO.

Figura 2.36 – Mecanismos de degradação em órbitas baixas da Terra.

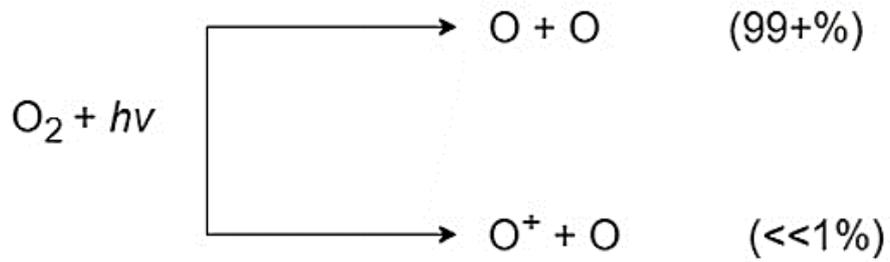


Fonte: Adaptado de Yang e Groh (2010).

2.9.1 Efeito do Oxigênio atômico

O Oxigênio atômico é um dos principais constituintes da atmosfera em Órbitas Baixas da Terra, além de ser a espécie gasosa predominante e mais reativa nesta altitude (ROOIJ, 2010; VEST, 1991; ROOY, 1985). É tipicamente abundante nas altitudes que variam de 180 a 650 km (BANKS; GROH; MILLER, 2004).

De acordo com Vest (1991), ele se forma na ionosfera através da dissociação de O_2 pela radiação ultravioleta nos comprimentos de onda de 100 a 200 nm:



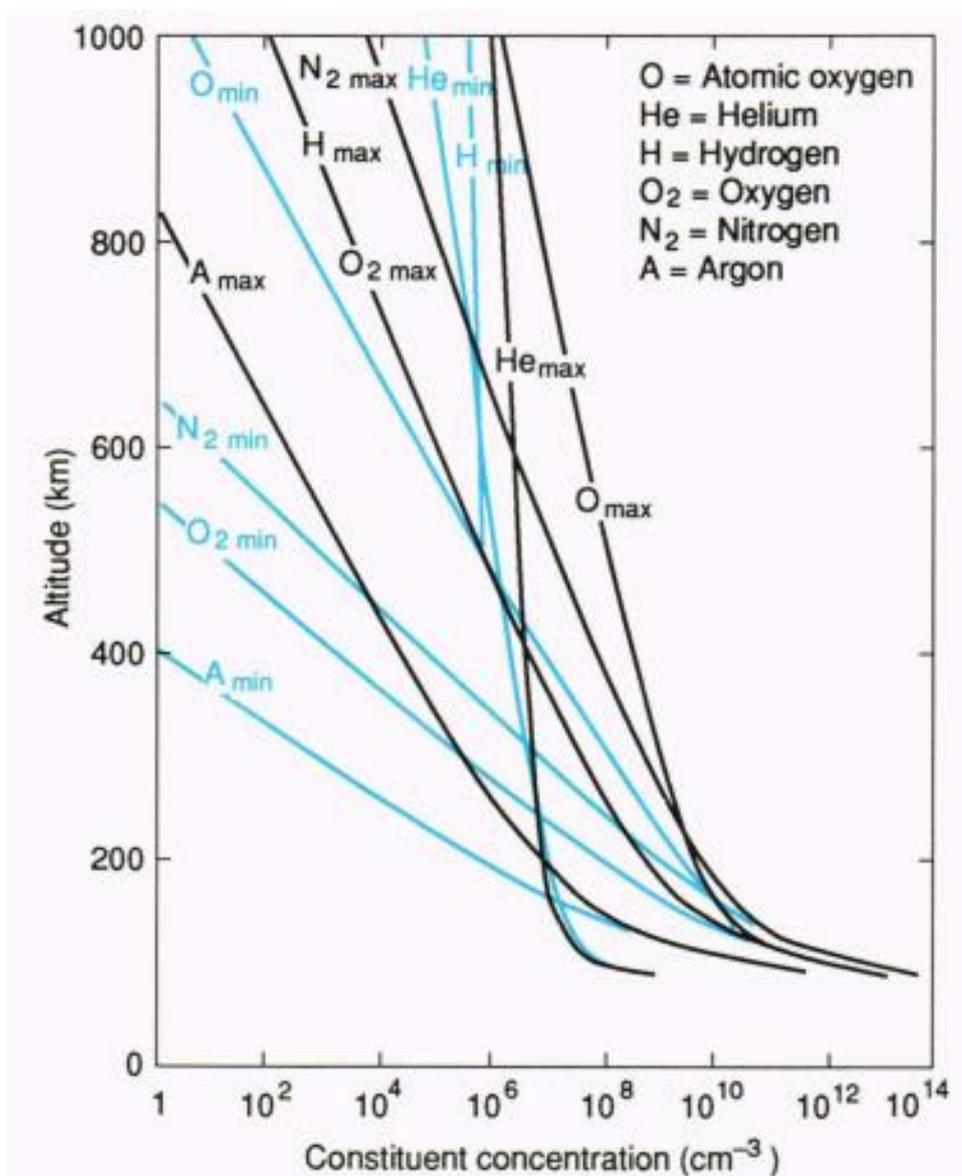
Onde:

h é a constante de Planck; e

ν é a frequência de radiação.

A densidade do Oxigênio atômico varia de acordo com a altitude; ele é mais denso no intervalo de 150 a 500 km (1×10^{10} a 1×10^7 átomos / cm^3), já em altitudes acima desse intervalo (a 1000 km, a densidade é de 1×10^2 a 1×10^6 átomos / cm^3), conforme pode ser observado na Figura 2.37 (VEST, 1991).

Figura 2.37 – Concentração de elementos em diversas altitudes.



Fonte: Vest (1991).

O Oxigênio atômico possui um dos efeitos mais nocivos que os materiais com aplicações espaciais podem enfrentar (ROOIJ, 2010). O grande problema é a degradação e a erosão dos materiais externos expostos ao Oxigênio atômico (DUNN, 2016).

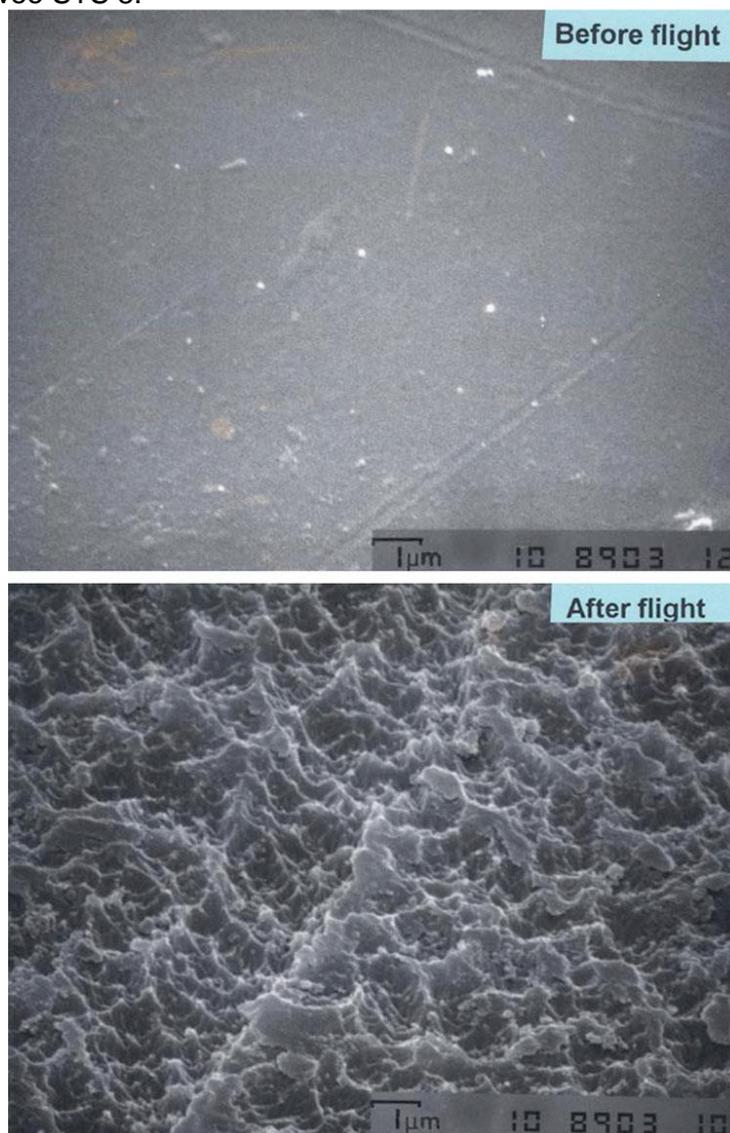
Os materiais altamente suscetíveis ao Oxigênio atômico são *Kapton*[®] (uma poliimida), polietileno e a Prata pura (LEY; WITTMANN; HALLMANN, 2009). Assim, a grande quantidade de Prata encontrada nas interconexões dos painéis solares que servem como o caminho condutor entre as células solares deve ser

protegida do fluxo direto de Oxigênio (LEY; WITTMANN; HALLMANN, 2009); (ROOY, 1985).

Dunn (2016) destaca que muitos materiais poliméricos orgânicos foram severamente degradados após apenas 40 horas de exposição. Isso é evidente nas amostras de Kapton® observadas após o voo do STS 5⁹. A Figura 2.38 ilustra o efeito do Oxigênio atômico na superfície de *Kapton*® antes e depois do voo STS 5. Dunn (2016) afirma que a degradação ocorreu por perda de massa e texturização da superfície, conforme se observa na segunda imagem.

⁹ A STS 5 foi a primeira missão operacional do Ônibus Espacial e a primeira missão com uma tripulação de quatro pessoas, incluindo especialistas em missão.

Figura 2.38 – Efeito do Oxigênio atômico na superfície de *Kapton*® antes e depois do voo STS 5.



Fonte: Dunn (2016).

2.9.2 Efeito da radiação nos materiais

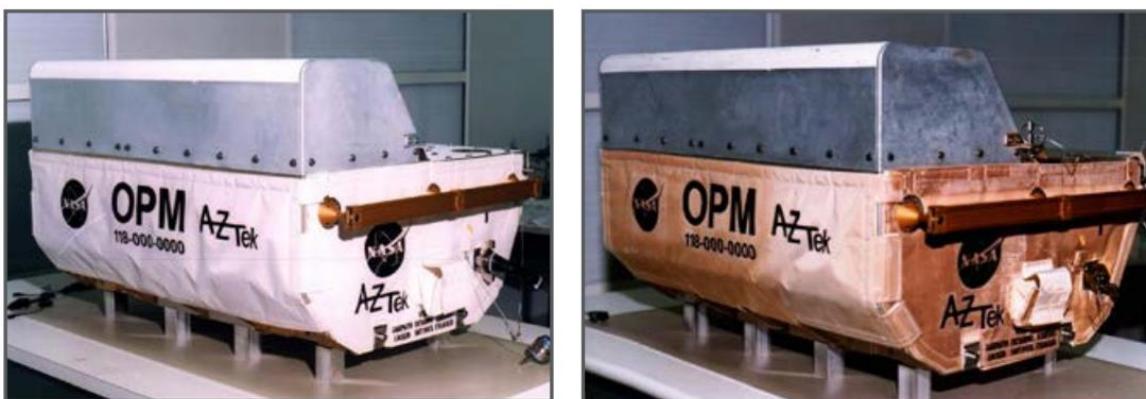
Os níveis de radiação do espaço (em torno de 10^7 rads/ano) e até mesmo doses maiores que se encontram no cinturão de Van Allen não alteram as propriedades dos metais. O autor cita ainda que os adesivos, resinas termoplásticas e os lubrificantes de uso espacial não sofrem danos devidos à radiação, pois estão alojados dentro de caixas eletrônicas ou envoltos por folhas metálicas; já os vidros inorgânicos perdem a sua transparência com cerca de 10^3 rad em algumas faixas de comprimento de onda; lentes de plástico e revestimentos de

silicone, opticamente transparentes, também sofrem danos durante exposição à radiação solar que causa um "amarelamento" da superfície (DUNN, 2016).

De acordo com Finckenor e Groh (2015), a radiação UV danifica os polímeros por reticulação (endurecimento) ou por meio de cisão da cadeia (enfraquecimento). O UV sob alto vácuo também pode criar vacâncias de Oxigênio em óxidos, o que causa mudanças significativas de cor.

Na Figura 2.39 são apresentadas imagens do monitor de propriedades ópticas com isolamento escurecido por ultravioleta.

Figura 2.39 – Efeito do da radiação UV.



Fonte: Finckenor e Groh (2015).

A Figura 2.39 mostra, à esquerda, o monitor de propriedades ópticas antes do vôo; e à direita, o mesmo após o voo, depois de ter sido exposto por nove meses à ação de raios UV na Estação Espacial Mir.

2.9.2.1 Efeito da radiação nas células solares

Quando as células solares estão no espaço, elas são expostas a um ambiente de radiação que contém elétrons e prótons com uma vasta variedade de energias. Os prótons e elétrons causam degradação através da radiação no desempenho de saída (isto pode ser verificado através da Curva $I \times V$) das células solares. Para proteger as células dos efeitos da radiação no espaço, elas são recobertas com uma fina camada protetora de vidro (*coverglass*). Assim, na fase de projeto de painéis solares com esse tipo de aplicação, se faz necessário

levar em consideração essa redução na potência de saída (IMAIZUMI *et al.*, 2011).

Os elétrons de baixa energia (até 300 keV) não produzem números significativos de defeitos relacionados à radiação (IMAIZUMI *et al.*, 2011).

Segundo Dunn (2016), os materiais de semicondutores microeletrônicos também podem ser danificados pela radiação de partículas solares. Eles são em geral divididos em duas categorias: 1) efeitos cumulativos devido à exposição prolongada à radiação; e 2) efeitos de evento único causados por altos níveis transitórios de exposição cósmica ou de prótons de alta energia que podem acarretar em danos maiores aos dispositivos eletrônicos embarcados.

De forma particular, as células solares (dispositivos semicondutores) estão sujeitas à degradação elétrica quando exposta à radiação solar. Tal degradação pode ser observada através da perda de eficiência que o dispositivo sofre após determinado período exposto a hostilidade do ambiente espacial.

Devido ao posicionamento externo dos painéis em relação ao corpo do satélite (para a grande maioria dos satélites, como a série CBERS, e o Amazonia-1), ele é o equipamento do subsistema de potência mais afetado pela radiação solar.

Um artigo publicado por Elfiky *et al.* (2010), mostrou células GaAs / Ge analisadas após serem irradiadas por prótons com diferentes energias (50 keV, 200 keV, 1 MeV e 9,5 MeV). A pesquisa destacou que a degradação da tensão em circuito aberto nas células solares foi mais alta para radiação de prótons de baixa energia em comparação com a radiação de prótons de alta energia.

A alta exposição à radiação nas órbitas GEO requer células solares com maior estabilidade à radiação. Nesse caso, as células solares baseadas em InP fornecem a energia mais alta em mais de 30% em comparação com as células solares baseadas em GaAs (TORCHYNSKA; POLUPAN, 2004).

2.9.3 Efeito do vácuo

Segundo Ley, Wittmann e Hallmann (2009), o alto vácuo a qual o satélite ou o veículo espacial estão submetidos no espaço causam diversos mecanismos e/ou processos físicos nos materiais, dentre os quais os autores destacam:

- **Desgaseificação / sublimação:** processo que se refere aos gases ou partículas que escapam da superfície de um material, implicando a perda de massa e alteração nas propriedades da superfície dos materiais envolvidos no processo. O produto gerado por esse processo pode trazer perigo a componentes sensíveis (instrumentos ópticos, revestimentos térmicos e dispositivos de alta tensão).
- **Convecção natural perdida:** a transferência de calor entre veículo espacial (ou satélite) e o ambiente espacial ocorre quase exclusivamente pelo calor radiante. A energia térmica interna é trocada por radiação e condução, que caracteriza um grande desafio no projeto do sistema de controle térmico, principalmente nos veículos espaciais que precisam dissipar o calor excessivo.
- **Alteração das propriedades do material:** em geral ocorrem mudanças na resistência mecânica e vida útil / fadiga do material devido ao alto vácuo que esses materiais estão submetidos.
- **Soldagem a frio:** as partes metálicas que possuam propriedades semelhantes quanto à sua composição e estão próximas umas das outras, podem sofrer o processo de soldagem a frio, isso se deve a fuga da camada de gás intermitente que há na Terra. Para as peças metálicas móveis este efeito é considerado crítico.

2.9.4 Efeito da ciclagem térmica

A principal ciclagem térmica a qual um veículo espacial experimenta durante sua vida útil é quando passa repetidas vezes da luz solar para o eclipse durante o curso de uma órbita (DUNN, 2016).

Um fator que a equipe de projeto do sistema de controle térmico precisa levar em consideração é a expansão linear dos materiais que constituem o satélite ou veículo espacial, pois este é um parâmetro crítico, devido aos gradientes de temperatura extremos que existem entre os lados voltados para o Sol e aqueles que estão sob o eclipse (LEY; WITTMANN; HALLMANN, 2009).

O efeito da ciclagem térmica nos interconectores das células solares presentes nos painéis está descrito no item 3.3.

2.9.5 Danos causados por detritos espaciais

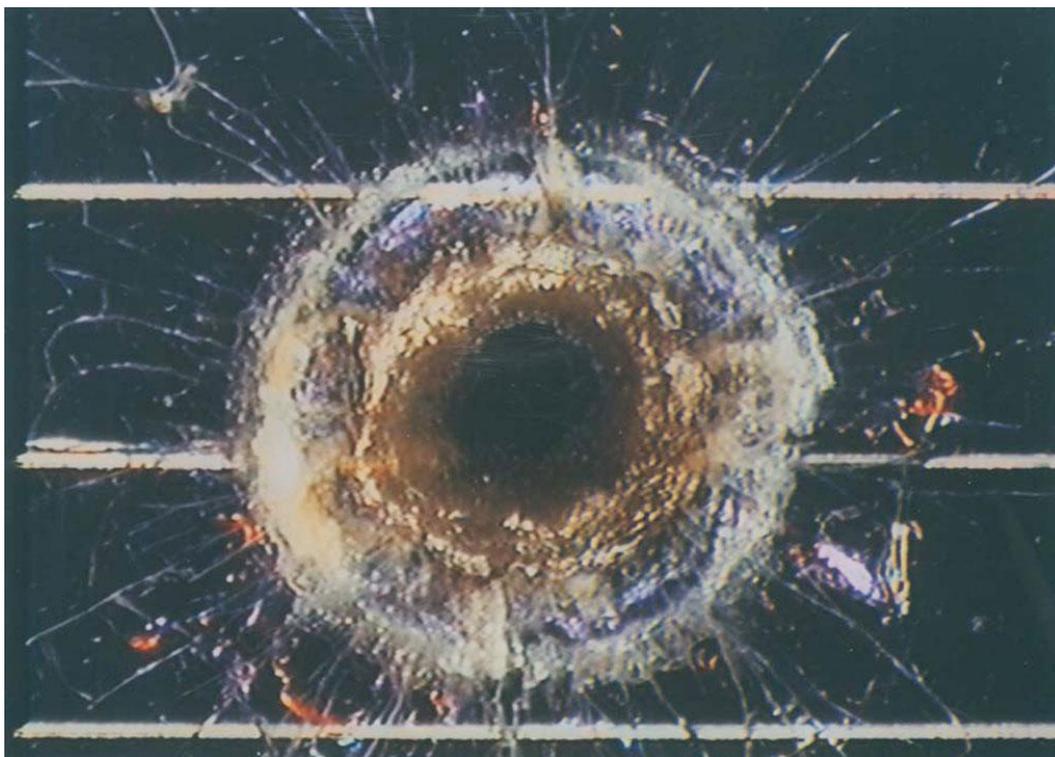
Os detritos espaciais também podem contribuir para danificar o material ou equipamento que está em órbita.

Os detritos podem estar na órbita da Terra ou no espaço interplanetário; podem ser naturais, como os meteoróides, micrometeoróides, cometas, asteróides e poeira que estão na órbita da Terra; ou artificiais como os satélites desativados, estágios de foguetes (de explosões parciais) e fragmentos, ferramentas perdidas durante passeios espaciais, partículas de tinta entre outros materiais (LEY; WITTMANN; HALLMANN, 2009).

Na Figura 2.40 é mostrado um dano provocado por um micrometeoróide¹⁰ num painel solar, em particular em uma célula solar.

¹⁰ Meteoróide é a matéria que gira ao redor do sol ou qualquer objeto no espaço interplanetário que seja muito pequeno para ser chamado asteróide ou cometa. Um meteorito é um meteoróide que alcança a superfície da Terra sem ser vaporizado completamente. Micrometeoróide são partículas menores ou grãos de pó cósmicos.

Figura 2.40 – Impacto de micrometeoróide em uma célula solar.



Fonte: Dunn (2016).

A probabilidade de um veículo espacial ou um satélite ser atingido por um objeto natural é pequena, exceto pelas chuvas de meteoros que ocorrem de forma cíclica; já os objetos artificiais representam uma ameaça muito maior, pois são muitos no espaço. Felizmente, os que possuem mais de 10 cm de tamanho podem ser rastreados por estações de radar (LEY; WITTMANN; HALLMANN, 2009).

Segundo Dunn (2016), as partículas mais prováveis de causar danos, devido à sua distribuição estatística, variam em diâmetro de 1 μm a 5 mm. Por isso, há um grande esforço no desenvolvimento de mecanismos de blindagem de múltiplas camadas, com base na fragmentação de objetos e conversão de energia cinética em térmica, já que as partículas minúsculas podem causar danos graves que atingem um veículo espacial à velocidade superior a 10 km/s (LEY; WITTMANN; HALLMANN, 2009).

2.10 Levantamento na literatura dos estudos sobre interconexões de células solares

Dentre os artigos encontrados na literatura técnica sobre interconexões de células solares três são destacados e apresentados a seguir:

O primeiro foi uma investigação experimental dos efeitos de confiabilidade do ciclo térmico em interconexões para a célula solar de GaAs de junção única sobre substrato de Germânio. Os pontos de solda foram feitos entre a metalização de Prata na célula solar e uma interconexão de Molibdênio banhado a Prata. Três técnicas experimentais foram usadas para avaliação da soldagem. A ciclagem ocorreu na faixa de -125 á 65 °C; e, de acordo com os autores, a modelagem indicou que 790 ciclos na câmara térmica equivaleriam a 5 anos de vida útil em órbita. Não foram encontradas degradações, mas concluiu-se que a técnica de seção transversal é bem precisa, mas exige um trabalho muito intensivo para sua realização. A geração de imagens térmicas não detecta trincas ou soldas ruins, mas é útil para localizar curtos elétricos e caminhos de fuga. As imagens acústicas com ultrassom são uma maneira rápida e conveniente de avaliar a integridade da solda de interconexão e as trincas nas células solares (FERRO *et al.*, 1997).

O segundo estudo escolhido apresentou um procedimento a fim de determinar os parâmetros de soldagem ideais para células solares de Silício monocristalino (utilizada no CBERS 2B) e de tripla junção (utilizada na PMM – Plataforma Multimissão) aplicadas em satélites LEO. Para esse experimento, foram utilizados interconectores de Prata com 12 µm de espessura e interconectores de Kovar com 50 µm de espessura. Assim, concluiu-se que a tensão nominal ideal para os interconectores de Prata deve ser superior a 480 mV e inferior a 540 mV, com o tempo de soldagem total de 390 ms. Já para o interconector de Kovar, a tensão nominal ideal deve estar acima de 370 mV com o tempo total de soldagem de 390 ms (VAZ; SINKA; VAZ, 2007).

O terceiro foi um estudo sobre a confiabilidade das juntas entre interconexões de Prata banhadas a ouro e eletrodos de Prata de células solares de base Germânio de um satélite de órbita baixa, ou seja, a otimização do processo de

soldagem e a avaliação da confiabilidade. Os três principais parâmetros de soldagem (Pressão do eletrodo na peça, potência de soldagem e tempo de soldagem) foram cuidadosamente ajustados para investigar seus efeitos na propriedade das juntas. Este estudo concluiu que os elementos das camadas em interconexões e eletrodos difundem muito bem com a pressão de 8,89 N, a potência de soldagem de 65 W e o tempo de soldagem de 50 ms. O modo de fratura da articulação é principalmente fratura dúctil e fratura intergranular (AN; XU; WANG, 2014).

A Tabela 2.2 apresenta o levantamento das referências bibliográficas de forma sucinta.

Tabela 2.2 — Breve descrição das publicações referindo-se a interconectores aplicados à células solares de uso comercial e espacial.

Autor (es) e Ano	Breve descrição
Chu and Iles (1988)	Estudo sobre a distribuição de temperatura durante a soldagem de células de Silício e GaAs. A modelagem revelou que as trincas podem ser causadas pela dissipação insuficiente do calor gerado pela corrente de soldagem. Estas trincas podem ser eliminadas modificando os parâmetros de soldagem, que resultaram em um melhor desempenho.
Brennan <i>et al.</i> (1994)	Interconexões de <i>Invar</i> revestidas com Prata e interconexões de Prata, foram cicladas em temperatura similar as de operação em órbita. As interconexões de <i>Invar</i> revestidas com Prata obtiveram maior sucesso após a ciclagem de temperatura, quando comparadas às interconexões de Prata, que apresentaram algumas falhas, pois revelaram menor deformação térmica e de forma inerente melhor qualidade na solda. Aplicação em painel solar de uso espacial.

Continua

Tabela 2.2 – Continuação.

<p>La Roche, Oxynos-Lauschke e Wehner (1994)</p>	<p>Interconectores de Ouro (12,5 µm), foram montados em Cupom de testes com células de Silício; que foram ciclados entre -110 à +110 °C. Conduziram-se 27.500 ciclos equivalente à 5 anos em órbita LEO; não houve degradação elétrica mensurável. Ocorreram algumas falhas mecânicas (13 trincas no <i>coverglass</i>; 2 trincas em terminações de <i>strings</i>; e 6 trincas no fio de isolamento), sem impacto nas características elétricas da célula. Aplicação em painel solar de uso espacial.</p>
<p>Rooij e Collins (1995)</p>	<p>Estudo de células solares de um painel que retornou a Terra depois de 1315 dias em órbita LEO (~ 21.000 ciclos térmicos variando entre -100 e +90 °C). Neste programa, foram avaliadas soldas no início da vida útil e após 15000 e 30000 ciclos térmicos rápidos entre -100 °C e +100 °C. Na maioria dos casos, foi observada uma diminuição no tamanho do ponto de solda, após a ciclagem. Essa redução no tamanho do ponto de solda também foi observada durante o programa de qualificação. Aplicação em painel solar de uso espacial.</p>
<p>Ferro <i>et al.</i> (1997)</p>	<p>Investigação experimental dos efeitos dos ciclos térmicos sobre a confiabilidade em interconexões (de Molibdênio banhado a Prata) para a célula solar de GaAs de junção única sobre substrato de Ge. Ciclagem de -125 a +65 °C, onde 790 ciclos na câmara térmica equivalem a 5 anos de vida útil em órbita. Foram utilizadas 3 técnicas para avaliação dos efeitos térmicos sobre a confiabilidade, a saber: seccionamento cruzado; imagens térmicas; e imagens acústicas com ultrassom. Aplicação em painel solar de uso espacial.</p>

Continua

Tabela 2.2 – Continuação.

<p>Vaz, Sinka e Vaz (2007)</p>	<p>Procedimento para determinar os parâmetros de soldagem para células solares de Silício monocristalino e de tripla junção, aplicadas em satélites LEO. Foram utilizados interconectores de Prata (12 µm de espessura) e interconectores de <i>Kovar</i> (50 µm). Aplicação em painel solar de uso espacial.</p>
<p>Wiese <i>et al.</i> (2009)</p>	<p>Estudo sobre o comportamento constitutivo das fitas de Cobre, a fim de reduzir a quebra após a soldagem de células solares. Foram avaliados por elementos finitos o comportamento mecânico de fitas de Cobre e de Cobre policristalino.</p>
<p>Wendt <i>et al.</i> (2010)</p>	<p>Apresenta a importância de um procedimento de teste de tração reproduzível para fornecer uma referência clara para soldabilidade e qualidade das interconexões. O estudo defende que os testes de tração devem ser realizados não apenas com a interconexão sendo puxada e a célula mantida fixa, mas aplicando uma força oposta na faixa de opções no ponto de aplicação da carga de teste.</p>
<p>Wiese, Meier e Kraemer (2010)</p>	<p>O artigo apresenta os resultados dos testes mecânicos em interconexões de Cobre, a fim de explicar o comportamento sob fadiga do material, além de fornecer uma correlação com as microestruturas relevantes. Os autores supõem que mecanismos de localização de deformação foram seguidos de recristalização e crescimento de trincas.</p>
<p>Zemen <i>et al.</i> (2010)</p>	<p>Foram construídos módulos com diferentes fitas; diferentes forças de escoamento; e diferentes técnicas de interconexão. Distintos métodos, como a aplicação de adesivo condutor elétrico em vez de solda; fita com baixo coeficiente de expansão térmica; e fixação apenas mecânica.</p>

Continua

Tabela 2.2 – Continuação.

<p>Meier <i>et al.</i> (2010)</p>	<p>Criar uma estimativa quantitativa da deformação termomecânica induzida em fitas de Cobre durante a operação. Na 1ª parte, montou-se um módulo que foi filmado durante a ciclagem térmica; e posteriormente as imagens foram analisadas por técnicas de correlação de imagens, o deslocamento das células foi medido.</p> <p>A 2ª parte mostrou um método de como o modelo pode ser usado para gerar condições de carga, para testes de fadiga relacionados ao dispositivo mecânico da fita.</p>
<p>Klengel <i>et al.</i> (2011)</p>	<p>Desenvolvimento de um equipamento de teste de resistência a tração em que a célula solar não fica fixada e o interconector é puxado. Após diversos experimentos, o equipamento desenvolvido fornece um método reproduzível, rápido e fácil de manusear, que pode ser utilizado independentemente da geometria da célula solar, condição dos materiais de contato, tecnologia de solda ou fabricante.</p>
<p>Meier <i>et al.</i> (2011)</p>	<p>Os detalhes da microestrutura da fita de Cobre foram analisados, e correlacionados com o comportamento do material mecânico. Com o resultado dessas investigações, o processo de recozimento da fita foi otimizado em escala de laboratório para obter propriedades de material altamente ajustado. Por fim, o benefício foi verificado por simulação numérica do processo de solda.</p>

Continua

Tabela 2.2 – Continuação.

<p>Pander <i>et al.</i> (2013)</p>	<p>Dados de materiais experimentais derivados de todos os componentes do módulo (Silício, vidro, encapsulante, folha traseira); formularam um modelo numérico que descreve os cenários de carga, bem como o comportamento à fadiga da fita. Este modelo pode ser usado para estimar a vida útil da fita (ciclos a falha) dentro de um módulo fotovoltaico sob carga mecânica e termomecânica cíclica com simulação de elemento finito.</p>
<p>An, Xu e Wang (2014)</p>	<p>Otimização do processo de soldagem (interconexões de Prata banhadas a Ouro em células solares de base Ge utilizadas em órbita LEO), e a avaliação da confiabilidade das juntas soldadas. A pressão do eletrodo na peça, a potência de soldagem e o tempo de soldagem, foram analisados para investigar seus efeitos nas propriedades das juntas. Os parâmetros de soldagem ótimos foram encontrados. O modo de fratura da articulação é, principalmente, fratura dúctil e fratura intergranular. Aplicação em painel solar de uso espacial.</p>
<p>Zarmai <i>et al.</i> (2015)</p>	<p>O estudo recomenda que o uso da tecnologia de soldagem a laser para união interconexões com maior confiabilidade, quando comparada à tecnologia de solda convencional, tende a melhorar o desempenho e, conseqüentemente, estender o MTTF dos módulos fotovoltaicos em geral, e particularmente, aqueles que operam nos trópicos. Isto, permitirá melhorar a confiabilidade dos módulos fotovoltaicos para geração sustentável de energia. Aplicação em painel solar de uso terrestre.</p>

Continua

Tabela 2.2 – Conclusão.

<p>Ji <i>et al.</i> (2016)</p>	<p>Estudo sobre a microestrutura de sistemas de interconexão (incluindo as juntas entre interconexões de Prata banhadas a ouro e eletrodos de Germânio prateados, as junções entre cabos de cobre prateados e cabos de Cobre prateados, e as junções entre banhados a Prata cabos de Cobre e interligações de Molibdênio banhados a Prata / Prata banhados a Ouro) nas células solares de órbita LEO. Todas as juntas foram fabricadas por soldagem por resistência com diferentes parâmetros de soldagem. Aplicação em painel solar de uso espacial.</p>
<p>Meier (2018)</p>	<p>3 métodos ultrassônicos para caracterizar interconectores de cobre, a saber: 1) Determinação de constantes elásticas por análise de dispersão ultrassônica; 2) Análise microestrutural acústico-elástica; 3) Determinação do tamanho médio dos grãos por análise de espalhamento ultrassônico. O estudo conclui que os métodos recém-desenvolvidos e os resultados alcançados indicam um enorme potencial para a caracterização de fitas em escala industrial e se encaixam bem no conceito de Indústria 4.0.</p>

Fonte: Produção da Autora.

De acordo com o levantamento bibliográfico apresentado na Tabela 2.2, foi verificado que existem diversas pesquisas envolvendo o estudo dos interconectores utilizados em células solares (tanto de aplicação espacial quanto de aplicação terrestre); porém, foram identificados apenas três artigos (Ferro *et al.*, 1997; Vaz, Sinka e Vaz, 2007 e An, Xu e Wang, 2014) com estudos que podem ser úteis como referências para o presente trabalho.

O primeiro artigo (Ferro *et al.*, 1997) ilustra o passo seguinte a etapa desta Dissertação, ou seja, a análise de confiabilidade das juntas soldadas, com parâmetros de soldagem já definidos. O segundo (Vaz, Sinka e Vaz, 2007) é o que apresenta maior proximidade com o foco deste estudo, ou seja, determinar

os parâmetros ideais para soldar interconectores às células solares, sem que ocorra a degradação da célula, a diferença principal está na forma com a análise será conduzida. Já o terceiro artigo (An, Xu e Wang, 2014), ilustra uma determinação dos parâmetros ideais de soldagem, e uma avaliação da confiabilidade das juntas soldadas, mas o método e quantas amostras foram analisados não são revelados.

Na Tabela A.1, do Apêndice A, os artigos relacionados na Tabela 2.2 possuem mais informações e comentários.

3 INTERCONEXÕES DE CÉLULAS SOLARES

3.1 Objetivo

Este capítulo apresenta os conceitos referentes às interconexões utilizadas em células solares; os materiais das quais podem ser feitas; os modos de falhas mais comuns; processo de degradação e a ação do Oxigênio atômico.

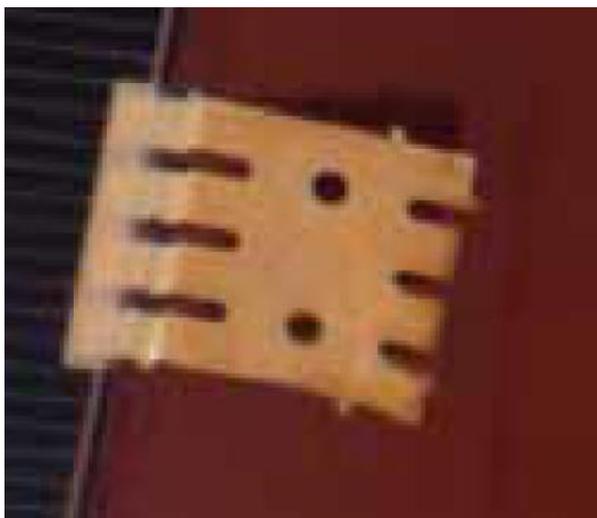
3.2 Interconector

Durante o processo de fabricação de painéis solares, as células solares são conectadas umas às outras por meio de um interconector, que pode ser encontrado tanto no formato de fitas metálicas como na forma de fios, que são soldados em cada uma das células solares, formando assim os módulos solares.

As interconexões, de acordo com a definição anterior, 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. Elas podem ser constituídas simplesmente por fios, mas são tipicamente encontradas no formato de fitas de metal moldadas com espessuras bem finas, podendo chegar a 12 μm (RAUSCHENBACH, 1980; VAZ e VAZ, 2007).

A Figura 3.1 ilustra um tipo de interconector utilizado em células solares de uso espacial, que realiza o contato elétrico entre duas células solares adjacentes.

Figura 3.1 – Interconector utilizado em célula solar espacial.



Fonte: Torres (2012).

Em satélites de órbita baixa, tem-se um grande desafio no que diz respeito à confiabilidade das interconexões de células solares, devido à ciclagem térmica à qual estes componentes estão expostos durante o período de operação no espaço (JI, 2016).

Um satélite de órbita baixa tem sua altitude variando de 200 a 1000 km, fazendo com que seu período de órbita seja curto, em torno de 100 minutos.

A oscilação de temperatura para um satélite do tipo CBERS, por exemplo, está entre -80°C a $+80^{\circ}\text{C}$ (VAZ, 1999; BARUEL, 2012), este satélite opera a 780 km de altitude. Assim, um satélite nesta órbita experimenta, aproximadamente, mais de 5500 ciclos térmicos por ano.

3.3 Materiais de interconexões de células solares

Esta seção apresenta os diversos materiais disponíveis para utilização em interconectores de células solares, suas principais características e propriedades.

De acordo com Rauschenbach (1980), dentre os materiais disponíveis para os interconectores apresentam-se alguns metais e revestimentos considerados

adequados e que atendem o requisito de ciclo de vida longo ou temperaturas severas de operação. Os metais são os seguintes:

A) Cobre (Cu)

O Cobre possui diversas classes comerciais; mas, para o uso como interconector de células solares, o aceitável é o Cobre alta condutividade isento de Oxigênio (do Inglês *Oxygen Free High Conductivity* - OFHC). A ausência do Oxigênio no Cobre retarda as trincas durante a curvatura; já a falta de outras impurezas eleva a ductilidade e a condutividade elétrica do material. O Cobre OFHC é macio e altamente dúctil; por isso, é prontamente trabalhado e revestido pela maioria dos processos comerciais disponíveis, pois é de fácil soldabilidade. Este material não é muito utilizado nas aplicações espaciais, pois apresenta problemas de oxidação. Cobre puro não é de fácil utilização.

B) Prata (Ag)

A Prata para uso em interconectores é especificada como Prata fina (comercialmente conhecida como Prata pura) pois, dentre os metais, é a que possui as condutividades elétrica e térmica mais altas; e a ductilidade e maleabilidade só perdem para o Ouro. A absorção de Oxigênio na Prata quando está sendo processada em altas temperaturas leva à fragilização do material ou das juntas soldadas. Ela deve ser desoxidada antes da soldagem e protegida durante este processo por atmosferas inertes ou redutoras (os gases mais utilizados são Argônio ou Nitrogênio). A Prata se oxida no ar, a sua reação é catalisada pela incidência de UV; desta forma deve ser armazenada protegida da luz.

C) Kovar

O *Kovar* é uma liga que possui baixo coeficiente de expansão térmica, semelhante ao do Silício, o que o torna um interessante material para interconectores de células solares. Pode ser banhado diretamente por imersão; no entanto, a superfície de *Kovar* é "passivada" por uma fina camada de Níquel,

seguida de um revestimento de Cobre ou Prata (para melhorar a condutividade elétrica).

D) Invar

O *Invar* é uma liga de Ferro-Níquel com baixas propriedades de expansão térmica. Antes e durante processo de soldagem as peças devem estar isentas de óxidos, óleo e substâncias contendo Enxofre. Os interconectores de *Invar* são revestidos com um metal mais favorável eletricamente.

A Tabela 3.1 mostra a composição química dos materiais *Kovar* e *Invar* respectivamente.

Tabela 3.1 – Composição química do *Kovar* e *Invar* por % de peso.

Elemento químico	<i>Kovar</i>	<i>Invar</i>
Níquel (Ni)	29,0	36,0
Cobalto (Co)	17,0	-
Magnésio (Mg)	0,45	0,35
Silício (Si)	0,10	0,12 a 0,30
Alumínio (Al)	-	0,1
Carbono (C)	0,02	0,04 a 0,12
Fósforo (P)	-	0,015
Ferro (Fe)	Balanceado	Balanceado

Fonte: Rauschenbach (1980).

E) Alumínio (Al)

O Alumínio possui diversas classes comerciais; porém, apenas a forma industrialmente pura, designada como A1100, é totalmente recozida e utilizada como interconectores de células solares. O A1100 é macio e bastante dúctil, pode ser revestido com Prata ou outros metais para facilitar a união (solda), possui características para ser soldado e unido por meio ultrassônico.

F) Molibdênio (Mo)

O Molibdênio foi desenvolvido inicialmente para aplicações de alta resistência e alta temperatura, seu baixo coeficiente de expansão térmica o torna desejável para interconectores de células solares. O Molibdênio puro é frágil à temperatura ambiente e abaixo dela e acima de 1000 ° C. As fitas de Molibdênio podem ser revestidas por deposição a vácuo de um revestimento de passivação de Titânio ou Paládio, seguido por uma camada de Prata.

G) Cobre-Berílio

O Cobre-Berílio é uma liga que consiste principalmente de Cobre e no geral com menos de 3% de Cobalto, menos de 2% de Níquel e menos de 1% de Berílio; possui um alto grau de condutividade, é uma alternativa ao Cobre, pois é mais resistente. Pode ser facilmente trabalhado, revestido e soldado.

H) Ouro (Au)

O Ouro é um material considerado adequado para aplicações como interconexões de células solares empregadas em satélites que possuem órbitas baixas. Quando colocados em contato com barramento de Prata das células solares possuem as seguintes vantagens: é resistente ao Oxigênio atômico; Ouro e Prata são miscíveis em qualquer temperatura; tem boa soldabilidade pelo processo de soldagem por resistência elétrica; o coeficiente de difusão do ouro na Prata é semelhante à Prata com Prata (LA ROCHE *et al.*, 1994).

Para cada um desses materiais citados anteriormente, é necessário especificar a pureza química, têmpera, tolerâncias de espessura e o acabamento superficial desejado (RAUSCHENBACH, 1980).

Na Tabela 3.2 é apresentada a condutividade elétrica de alguns dos materiais empregados na fabricação de interconectores de células solares.

Tabela 3.2 – Condutividade elétrica dos materiais metálicos.

Material	Condutividade elétrica σ ($\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$)
Alumínio	$35,36 \times 10^6$
Cobre	$58,00 \times 10^6$
Ouro	$41,0 \times 10^6$
Prata (99,78%)	$62,9 \times 10^6$
Molibdênio	$19,2 \times 10^6$

Fonte: Calister (2008); Shackelford (2008).

Na Tabela 3.3 são apresentadas as propriedades gerais dos materiais mais utilizados na fabricação de interconectores de célula solares, segundo La Roche *et al.*, 1994.

Tabela 3.3 – Propriedades dos materiais de alguns interconectores.

Propriedades	Ouro	Prata	Molibdênio
Resistividade ($\mu\Omega\text{cm}$)	2,9	1,8	5,17
Temperatura de Fusão ($^{\circ}\text{C}$)	1063	961	2617
Condutividade térmica ($\text{W}/\text{cm}^{\circ}\text{K}$)	3,12	4,19	1,4
Coefficiente de expansão térmica ($10^6/^{\circ}\text{C}$)	15,3	20,5	5,0
Calor específico ($\text{cal}/\text{g}^{\circ}\text{K}$)	0,0308	0,0566	0,06
Densidade relativa (g/cm^3)	19,3	10,5	10,2
Resistência a tração (N/mm^2)	>393	>336	>718
Módulo de elasticidade (N/mm^2)	78000	80000	250000
Resistência ao AO (átomos/ cm^2)	> 7×10^{19}	-	> 10^{20}

Fonte: La Roche *et al.* (1994).

3.4 Degradação dos interconectores em órbita

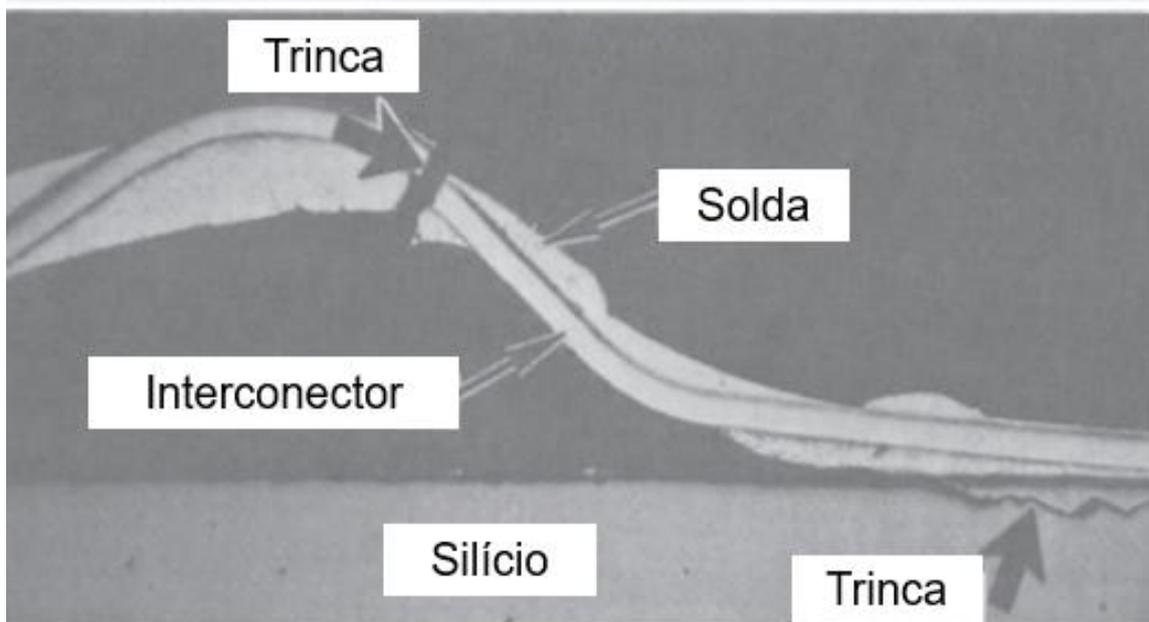
Esta seção tem como objetivo apresentar as degradações que os interconectores de células solares espaciais sofrem em órbita, dentre as quais se destacam: falha por fadiga, falhas em juntas soldadas; ação do Oxigênio atômico.

3.4.1 Modos de falha dos interconectores

Os painéis solares no ambiente espacial estão expostos a diversos mecanismos de falhas principalmente relacionados à ciclagem de temperatura. Assim, o interconector pode apresentar falhas por fadiga, devido à ciclagem de temperatura à qual estão expostos na fase operacional.

A Figura 3.2 apresenta um modo de falha típico que ocorre em temperaturas extremamente baixas. Com o passar do tempo, esse tipo de falha pode ocasionar a degradação nos sinais elétricos das células solares.

Figura 3.2 – Trinca do interconector e a fratura do Silício ocorrida devido às baixas temperaturas.



Fonte: Adaptada de Rauschenbach (1980).

Na Figura 3.2 acima é possível verificar a trinca produzida no interconector e a fratura no substrato de Silício devidas às baixas temperaturas, em geral, abaixo dos $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$.

3.4.2 Fadiga nos interconectores

Esta seção tem como objetivo apresentar o conceito de fadiga e como ela ocorre nos interconectores de uso espacial.

De acordo com Dunn (2016), a fadiga pode ser definida como:

Fatigue is the phenomenon leading to fracture under repeated or fluctuating stresses having a maximum value less than the tensile strength of the material.

Nossa tradução dessa definição é: a fadiga é o fenômeno que leva à fratura sob tensões repetidas ou flutuantes, com um valor máximo menor que o limite de escoamento do material.

Ainda de acordo com Dunn (2016), a falha por fadiga pode ser definida como:

Fatigue failure is a Failure that occurs when a specimen undergoing fatigue completely fractures into two parts, or has softened, or been otherwise significantly reduced in stiffness by thermal heating or cracking. Fatigue failure generally occurs at loads, which, if applied statically, would produce little perceptible effect. Fatigue failures are progressive, beginning as minute cracks that grow under the action of the fluctuating stress (Dunn, 2016).

Nossa tradução dessa definição é: a falha por fadiga é uma falha que ocorre quando um espécime submetido à fadiga se fratura completamente em duas partes, ou se tornou dúctil ou foi significativamente reduzido em rigidez devido ao aquecimento térmico ou trincas. A falha por fadiga geralmente ocorre em cargas que, se aplicadas estaticamente, produzem pouco efeito perceptível. As falhas por fadiga são progressivas, começando como pequenas trincas que crescem sob a ação das tensões cíclicas.

O termo fadiga, dentro do contexto de comportamento de materiais de engenharia, segundo Figueiredo (2006) *apud* ASTM E 1150 refere-se a:

Fadiga se refere ao processo gradual de mudança estrutural localizada permanente em um material sujeito a condições que produzem tensões e deformações cíclicas em algum ponto (ou pontos) e que pode culminar em trincas ou em fratura, depois de um número suficiente de ciclagens.

O termo “fadiga térmica” ou “fadiga por estresse térmico” é usado quando as tensões em um componente se desenvolvem em ciclo térmico sem a ação de

uma carga externa. A fadiga térmica pode ser causada por gradientes de temperatura acentuados em um componente ou em uma seção. Esse processo pode ocorrer em materiais isotrópicos¹¹ perfeitamente homogêneos (*METALS HANDBOOK*, 1996).

A fadiga térmica nos interconectores ocorre devido à variação de temperatura a qual estão expostos, ou seja, ao surgimento de trincas na superfície do material devidas a tensões cíclicas térmicas do ambiente espacial. Por isso, a alça de alívio térmico é produzida nos interconectores, para mitigar esse modo de falha.

Meier *et al.* (2016) destacam em seu estudo que a fadiga de interconectores de células solares é um dos principais modos de falha no painel solar, em especial quando estão presentes em ambientes com temperaturas extremas. Os mesmos modos de falhas ocorrem em temperaturas extremas como as encontradas em ambientes espaciais.

3.4.3 Falhas nas juntas soldadas dos interconectores

No processo de fabricação de painéis solares, as células solares são conectadas umas às outras por meio de um interconector, que pode ser no formato de fitas metálicas ou como fio, que é soldado em cada uma das células, formando os módulos solares.

A vida útil do painel solar é determinada pelo comportamento à fadiga dos interconectores das células, as ciclagens de temperatura às quais estes componentes estão expostos. Eles os induzem a tensões termomecânicas, devidas à sua incompatibilidade termomecânica (MEIER *et al.* , 2010). A vida útil das células solares, e, conseqüentemente dos painéis solares também são reduzidas devido à degradação por radiação de partículas, que reduzem a sua eficiência.

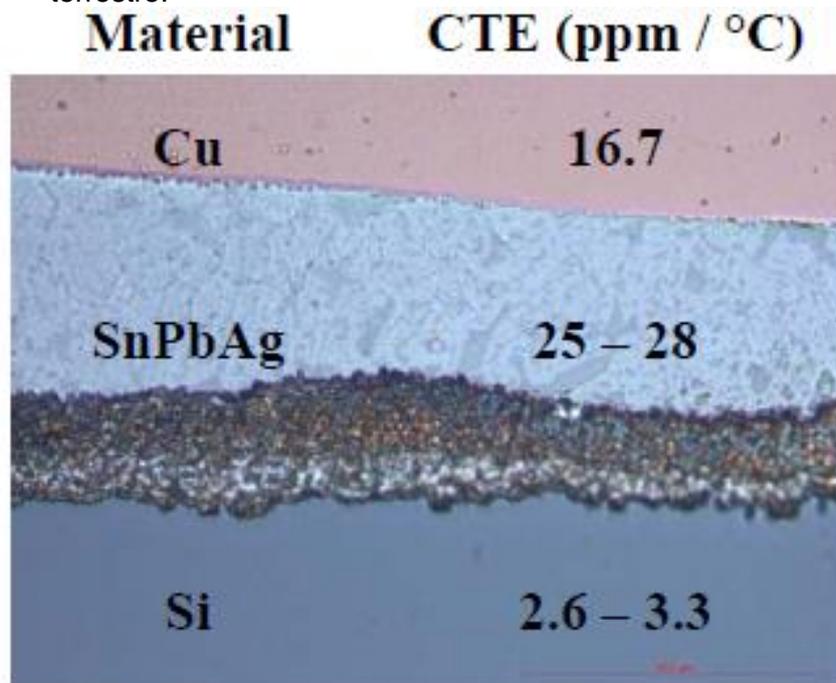
¹¹O material é chamado de isotrópico quando suas propriedades mecânicas e térmicas são as mesmas em todas as direções, podem ter suas estruturas microscópicas homogêneas ou não homogêneas.

Um dos principais fatores das falhas que ocorrem em órbita é devido à expansão / contração térmica que ocorre entre o material da célula solar e da interconexão entre elas (PANDER *et al.* 2013).

Devido a diversos materiais que compõem o painel solar, e a diversos coeficientes de expansão térmica (CET, ou do Inglês *Coefficient of Thermal Expansion - CTE*) de cada um destes materiais; o painel solar desenvolve problemas de confiabilidade de natureza termomecânica, ou seja, causado por essas diferenças de coeficientes de expansão térmica dos materiais. A temperatura do painel solar varia de acordo com a temperatura em órbita, que por sua vez afeta a taxa de degradação da interconexão da solda (ZARMAI *et al.*, 2015).

Como intuito de ilustrar a Figura 3.3 mostra a seção transversal de uma junta de solda de uma célula solar de Silício e a interconexão de Cobre, no caso de uma aplicação terrestre, juntamente com seus respectivos coeficientes de expansão térmica. A diferença é que na aplicação espacial não se usa a liga Estanho-Chumbo em painéis solares.

Figura 3.3 – Seção transversal de uma junta de solda de célula solar de aplicação terrestre.



Fonte: Gierth; Rebenklau e Michaelis (2012).

As falhas que ocorrem nas juntas soldadas das interconexões presentes entre células solares, podem comprometer ou até mesmo incapacitar o painel solar de fornecer energia aos subsistemas que mantêm o satélite ou veículo espacial operacional (BRENNAN *et al.*, 1994).

As interconexões presentes entre as células solares, em geral, falham devido à fadiga que ocorre nas soldas, principalmente, devido a esforços mecânicos que são induzidos pela ciclagem de temperatura. Esses esforços são resultantes dos diferentes coeficientes de expansão e contração dos materiais que compõem o painel solar quando estão expostos ao ambiente espacial. Esse tipo de falha afeta de forma direta a qualidade, sobretudo a confiabilidade, do painel solar durante sua fase de operação (MAIA; BRITO; SOUZA, 2019 e FERRO *et al.*, 1997).

Cada ciclo térmico que ocorre em órbita resulta em expansão e contração dos componentes presentes no painel solar de acordo com seus coeficientes individuais de expansão térmica. Ainda segundo os autores, nas juntas soldadas das interconexões há uma grande concentração e ação de tensões térmicas que são decorrentes das diferenças no comportamento de expansão térmica dos materiais. Essas tensões, quando atuam sob condições cíclicas, podem forçar as juntas soldadas a falharem por efeito de um tipo de fadiga de ciclo baixo (SREENU *et al.*, 2014).

3.4.4 Ação do Oxigênio atômico nos interconectores

Esta seção tem como objetivo apresentar a ação do Oxigênio atômico nos interconectores de uso espacial.

Os interconectores, conforme mencionado anteriormente são o caminho condutor entre as células que compõem o painel solar. Como resultado das diferenças nos coeficientes de expansão térmica dos vários componentes do painel solar, altas tensões são encontradas nos interconectores. Assim, caso o desempenho desses interconectores sofram degradação por alguma ação, como consequência, será observada uma perda de energia elétrica (ROOIJ, 1985).

O Oxigênio atômico é o principal constituinte das órbitas baixas da Terra e é responsável por reações químicas nos materiais de sistemas espaciais (satélites ou naves espaciais) que orbitam a Terra nessas altitudes, podendo prejudicar o desempenho ou até mesmo interromper a utilidade deles e, eventualmente, acelerar o fim da vida útil desses sistemas espaciais (ROOIJ, 1995).

O Oxigênio atômico não ataca apenas as superfícies expostas, mas, também as que não estão diretamente expostas. (ROOIJ, 1995).

Na Figura 3.4 é mostrado o efeito do Oxigênio atômico em um interconector de Prata. Após a remoção das duas células nos dois lados deste interconector, o ataque à superfície de Prata, que anteriormente estava sob a célula, é visível como uma camada escura. Esse mesmo fenômeno ocorreu na parte traseira do interconector, em especial no local da alça de alívio de tensão. A quantidade de ataques nesses lados é responsável por aproximadamente 25-50% da perda de espessura de Prata. Todos os interconectores investigados por Rooij (1995) mostram esse mesmo tipo de ataque.

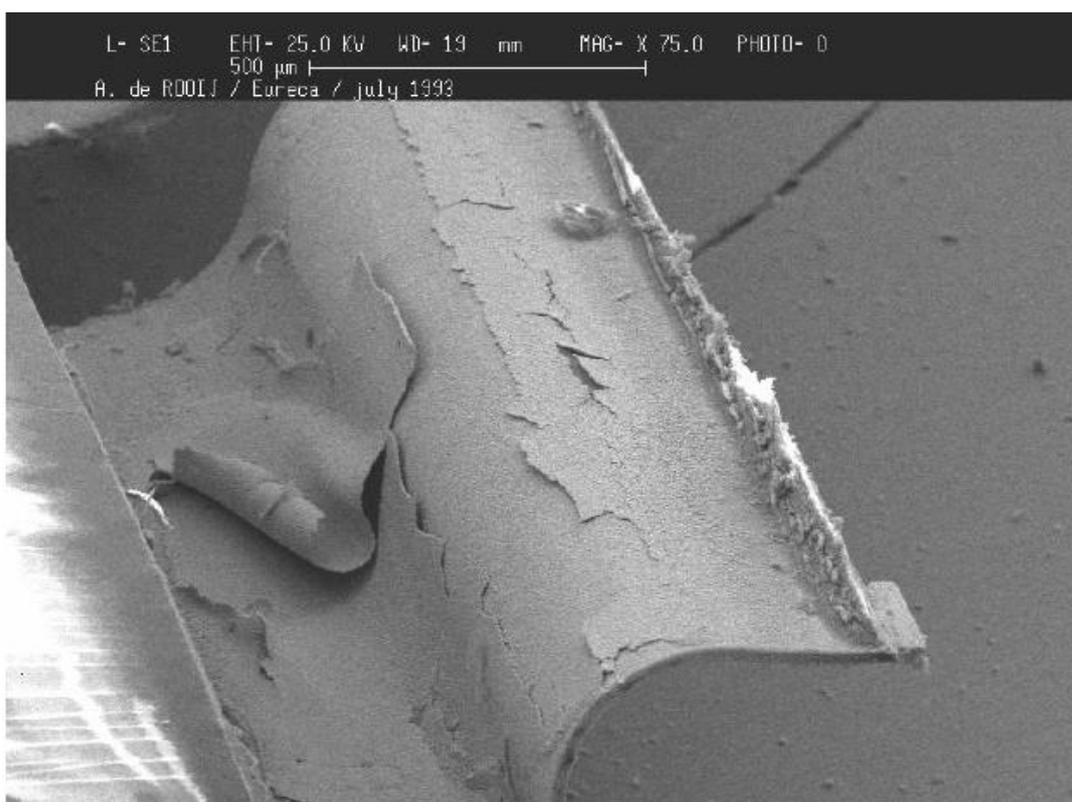
Figura 3.4 – Efeito do Oxigênio atômico em interconector.



Fonte: Rooij (1995).

A ação do Oxigênio atômico pode ser observada na Figura 3.5, onde um interconector de Prata com espessura de 34 μm , foi recuperado do satélite EURECA (*European Retrievable Carrier*). Nesta imagem é possível verificar que a Prata foi oxidada e descamada, expondo o material subjacente que novamente será oxidado (ROOIJ, 2010) até que a espessura da Prata totalmente perdida produzindo uma perda de desempenho elétrico do interconector.

Figura 3.5 – Interconector de Prata recuperado da EURECA.



Fonte: Rooij (2010).

Devido aos problemas que o Oxigênio atômico pode trazer aos materiais à base de Prata em ambientes agressivos que contenham o Oxigênio atômico, como as órbitas terrestres baixas, é recomendado que a oxidação química da Prata seja considerada como um importante processo de degradação junto com a erosão física, mesmo para um metal relativamente inerte como a Prata. Assim, um cuidado especial deve ser tomado ao considerar as condições térmicas às quais este material será exposto (ZHELUDKEVICH *et al.*, 2004).

3.4.5 Fatores de projeto que afetam a confiabilidade

Luft e Maiden (1969), observaram em estudo que o aparecimento de trincas nas juntas soldadas das interconexões, devido a ciclagem de temperaturas às quais estão expostas; forneceram um indicador muito sensível em relação à confiabilidade das interconexões de células solares. Os autores destacam que, embora determinados parâmetros do projeto dos módulos solares sejam em geral fixos, existem fatores que sofrem variações e afetam a integridade e a confiabilidade das interconexões, dentre os quais destacam-se: 1) o material de construção; 2) a espessura do interconector; e 3) material do substrato.

Esses fatores foram considerados importantes porque podem ser comprovados analiticamente que variações nesses parâmetros afetam as tensões térmicas e mecânicas sofridas pelos módulos solares durante o ciclo térmico.

A variação na espessura do interconector afeta de maneira semelhante as tensões mecânicas transmitidas à junta de solda do interconector durante o movimento relativo das células solares, à medida que são submetidas a ciclos de temperatura. O dimensionamento dos loops de alívio de tensão é importante para minimizar essas tensões. O coeficiente de expansão do material do substrato afeta o movimento relativo das células solares durante as ciclagens térmicas e, conseqüentemente, resulta em tensões mecânicas que são transmitidas através dos interconectores às juntas de solda. Essas tensões são sobrepostas às tensões térmicas à medida que os painéis solares são submetidos a um ciclo de temperatura. Existem ainda, outros fatores que influenciam significativamente a confiabilidade dos interconectores dos quais se destacam: 1) a qualidade das células solares (particularmente a metalização e o revestimento de solda); 2) o material adesivo e o padrão usado para ligar as células ao substrato; e, 3) o controle de materiais e processos desempenham uma grande influência sobre a qualidade e a confiabilidade do produto finalizado (LUFT E MAIDEN, 1969).

No presente trabalho, cujo objetivo é obter os parâmetros de soldagem do processo empregando Projeto e Análise de Experimentos; a preocupação com a confiabilidade estaria relacionada somente a falha produzida pelo referido

processo, o que estaria limitado somente a confecção da junta de solda produzida durante a aplicação do eletrodo às peças. Sendo uma junta de solda produzida por meio de uma fusão de metais, o seu produto final tem um comportamento característico dos metais, em que o modo de falha seria caracterizado por um rompimento da solda ocasionando uma desconexão elétrica no circuito. Para um levantamento da taxa de falha de uma conexão dessa natureza é preciso estabelecer, estatisticamente, uma amostragem mínima de quantidade de juntas de solda, obtida por meio do processo em análise, para obtenção de um grau mínimo de confiança. Esta amostragem seria submetida a um teste acelerado, por meio do qual seria possível obter uma taxa de falha e, conseqüentemente, uma figura de confiabilidade.

Em geral, os interconectores soldados às células solares apresentam mais de um ponto de solda que o une à célula, ou seja, redundâncias, o que assegura uma certa tolerância a falhas.

4 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA E ABORDAGENS PARA A SUA SOLUÇÃO

4.1 Objetivo

Neste capítulo é apresentada a formulação do problema e as abordagens para a sua solução. Isto inclui definir brevemente o método de Projeto e Análise de Experimentos, utilizado nesta pesquisa de mestrado. No Apêndice B, alguns métodos estatísticos são apresentados de forma mais detalhada.

4.2 Formulação do problema

Durante o processo de manufatura dos painéis solares, as células solares são conectadas umas às outras por meio de soldagem dos interconectores. Estes podem ser na forma de fitas metálicas ou fios (no nosso caso, fitas metálicas) em cada uma das células solares (MAIA; BRITO; SOUZA, 2019).

A soldagem dos interconectores às células solares é uma das etapas mais críticas da manufatura dos painéis solares (GIERTH *et al.* 2012, WIESE; MEIER. KRAEMER, 2010).

Em geral, as falhas que ocorrem nas juntas soldadas são devidas à fadiga, que estabelece o início e a propagação das trincas e, por consequência, a falha da junta soldada (BRITO, 2014).

A fadiga nos interconectores presentes nas células solares são uma das principais causas de falhas encontradas em painéis solares (GIERTH; REBENKLAU; MICHAELIS, 2012; FERRO *et al.*, 1997; PANDER *et al.*, 2013; MEIER *et al.*, 2016).

Os materiais que compõem o painel solar em sua fase operacional estão expostos à ação da ciclagem térmica, que ocasiona a expansão e contração dos elementos que o constituem, originando a fadiga; e, como resultado, falhas nas juntas dos interconectores, que podem ter materiais diferentes na interface da solda (FERRO *et al.*, 1997).

A expansão térmica entre o material da célula e o do interconector e a ciclagem de temperatura dos materiais das células são um dos principais fatores de falhas em órbita (FERRO *et al.*, 2012).

A vida útil do painel solar é determinada pelo comportamento à fadiga dos interconectores das células. As ciclagens de temperatura às quais estes componentes estão expostos os induzem a tensões termomecânicas, devidas à sua incompatibilidade termomecânica (MEIER *et al.*, 2010).

Falhas nos pontos de solda das interconexões afetam a confiabilidade do painel solar durante sua fase operacional, podendo incapacitar o painel de fornecer energia aos subsistemas do satélite (BRENNAN *et al.*, 1994), colocando em risco a missão para o qual foi projetado.

Assim, o problema que se quer estudar, analisar e otimizar é o processo de soldagem de interconexões entre células solares de painéis solares empregados em satélites artificiais. Tradicionalmente, há três abordagens para solucioná-lo:

- Teoria e Análise: aqui enfatizando modelos entrada-saída, estatísticos e multiparamétricos (como na Figura 4.1), e o método de Projeto e Análise de Experimentos.
- Modelagem e Simulação: aqui usando softwares como o MINITAB 17®.
- Observação e Experimentação: aqui usando 32 conjuntos de dados reais.

Nesta Dissertação as três abordagens acima destacadas serão utilizadas para alcançar o objetivo da pesquisa, conforme apresentado na Figura 4.1.

Figura 4.1 – *Framework* com as abordagens para solução do problema proposto.



Fonte: Produção da autora.

Isto, se traduz nos cinco requisitos apresentados a seguir:

1. Resistência mecânica: a força mínima de ruptura para interconectores utilizados nesta pesquisa deverá ser de 160 gramas-força (ou $\sim 1,6$ N), com força de tração aplicada a 180° na direção do terminal de contato.
2. Degradação elétrica: o processo de soldagem não deverá degradar a corrente elétrica fornecida pela célula solar, quando medida a tensão de máxima potência, em mais que 2%.
3. Aparência da solda: os pontos de solda não deverão apresentar evidências de áreas queimadas, delaminação da grade coletora da célula solar. Será verificado por meio de inspeção visual de todos os pontos de soldas realizados nos experimentos.
4. Força de contato dos eletrodos: deverá ser ajustável de forma que os eletrodos não danifiquem a superfície de contato da célula solar devido à pressão mecânica exercida durante a soldagem. As deformações devidas à pressão excessiva dos eletrodos não deverão ser aparentes.

5. Resistência à fadiga térmica: as interconexões após passarem pelo processo de soldagem deverão atender ao requisito de resistência mecânica após submissão a ciclagem de temperatura. Este item só será verificado se o tempo e as demais condições permitirem.

4.3 Solução proposta

A solução proposta para o problema formulado é verificar o comportamento de cada parâmetro de soldagem na qualidade do ponto de solda pela aplicação do método de Projeto e Análise de Experimentos (do Inglês, *Design and Analysis of Experiments - DoE*).

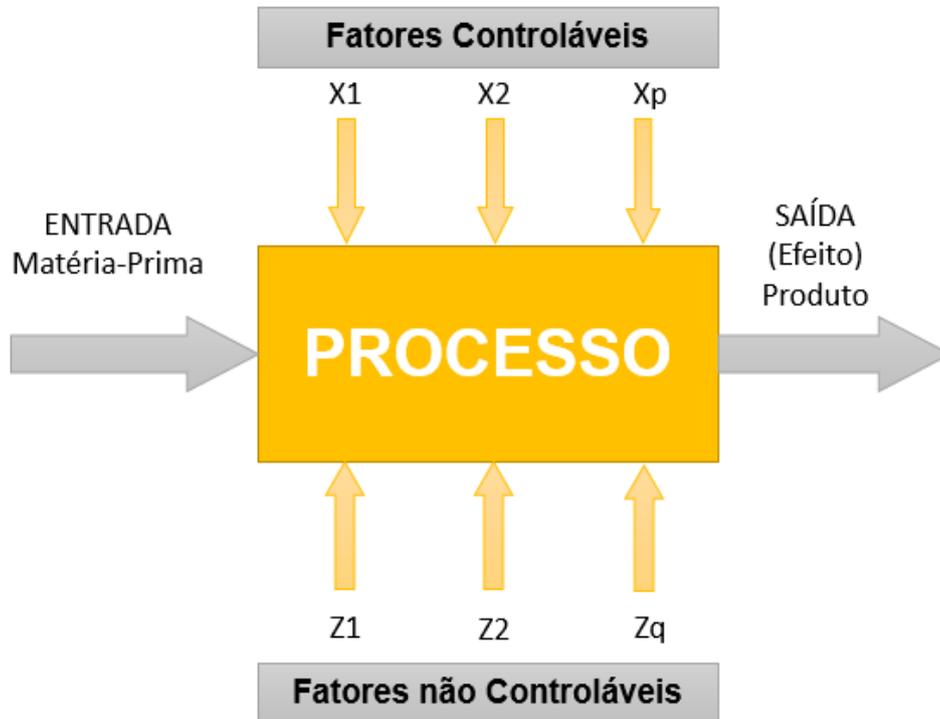
O método de Projeto e Análise de Experimentos consiste em um modo de planejar experimentos de forma que os dados adequados possam ser obtidos e analisados por meio de métodos estatísticos, que resultam em conclusões válidas e objetivas (MONTGOMERY, 2017).

Os experimentos planejados são compostos por uma série de ensaios, ou experimentos, nos quais as variáveis de entrada de um dado processo são alteradas de maneira simultânea e as respostas produzidas por estas variáveis são observadas.

A aplicação desta metodologia para aprimorar processos é muito mais eficiente que outros métodos que analisam “um fator por vez”, pois, resultados significativos podem ser obtidos de forma rápida, sobre a forma como os parâmetros de soldagem, por exemplo, influenciam na resposta. Neste caso, sem o correto planejamento dos experimentos, os efeitos das interações poderão ser negligenciados, ou seja, corre-se o risco de descartar interações importantes para o processo.

Na Figura 4.2 é apresentado o modelo de processo genérico, mostrando as entradas e saídas, além dos fatores envolvidos que podem ser controláveis ou não controláveis.

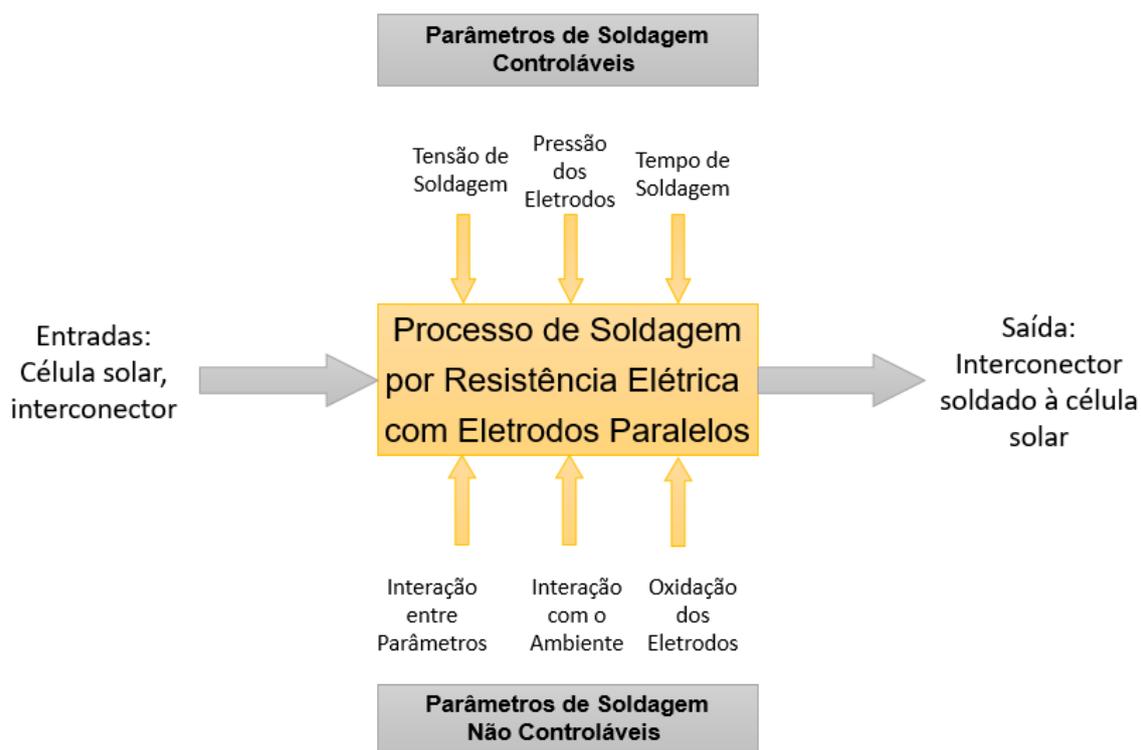
Figura 4.2 – Modelo de processo genérico mostrando as entradas e saídas, além dos fatores envolvidos que podem ser controláveis ou não controláveis.



Fonte: Maia, Brito e Souza (2019).

A Figura 4.3 ilustra um modelo do processo de soldagem por resistência elétrica com eletrodos paralelos com: 1) as entradas (célula solar e interconector separados), ou seja, a matéria prima; 2) a variável de reposta e a saída (um produto: neste caso a célula solar com o interconector soldado ao seu barramento); 3) os fatores controláveis (para este processo em estudo: a tensão de soldagem, a pressão do eletrodo sobre a peça e o tempo de soldagem); 4) fatores incontroláveis (interação entre os parâmetros de soldagem, interação com o ambiente, a carga elétrica envolvida no processo de soldagem) – esses são fatores que não podem ser controlados, apenas monitorados.

Figura 4.3 – Modelo do processo de soldagem por resistência elétrica com eletrodos paralelos, mostrando as entradas e saídas, além dos fatores envolvidos que podem ser controláveis ou não controláveis.



Fonte: Produção da autora.

A seguir, serão listados os passos que devem ser seguidos a fim de se obter sucesso com a aplicação do método de Projeto e Análise de Experimentos adotada nesta Dissertação:

- Reconhecimento e detalhamento do problema – apresentado neste Capítulo 4.
- Seleção da variável de resposta – apresentado no Capítulo 5.
- Seleção dos parâmetros de soldagem, níveis e faixas – apresentado no Capítulo 5.
- Seleção da matriz experimental – apresentada no Capítulo 5.
- Realização do experimento (com 32 pontos de solda) – apresentado no Capítulo 6.
- Análise estatística dos dados resultantes – apresentada no Capítulo 7.
- Recomendações e conclusões – apresentadas nos Capítulos 7 e 8.

As etapas apresentadas acima estão detalhadas no Apêndice B desta dissertação.

Tal método e suas etapas são usadas para:

- Determinar quais fatores têm efeito significativo em uma resposta.
- Identificar o efeito de uma interação entre duas variáveis.
- Otimizar o desempenho do processo.
- Reduzir o tempo de desenvolvimento de novos produtos.
- Reduzir a variação em um processo.
- Determinar a configuração ótima de fatores que otimizam todas as respostas, incluindo a segurança e o custo.

Assim, para esta Dissertação, o método de Projeto e Análise de Experimentos será aplicado para avaliar o comportamento da variável resposta (teste de arrancamento), quando as variáveis de entrada (parâmetros de soldagem: tensão de soldagem, tempo de soldagem, deslocamento dos eletrodos até a peça) são alteradas de um nível mínimo para um nível máximo. Para este presente estudo de caso são 32 tratamentos. O objetivo é de otimizar o processo de soldagem e, conseqüentemente, aumentar a confiabilidade do sistema (painel solar) como um todo.

O segundo estudo de caso tem o propósito de exercitar o método de Projeto e Análise de Experimentos em outra aplicação não espacial, em um processo de soldagem por resistência a ponto aplicado na indústria automobilística, também com 32 tratamentos, utilizando o método de Projeto e Análise de Experimentos.

5 PROJETO E ANÁLISE DE EXPERIMENTOS

5.1 Objetivo

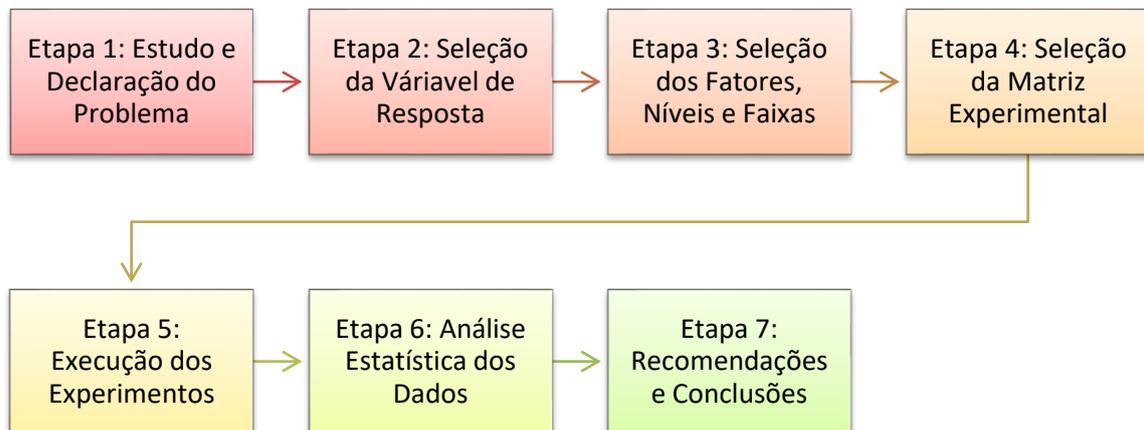
Este capítulo tem como objetivo apresentar o método de Projeto e Análise de Experimentos adotado nesta Dissertação.

5.2 Planejamento

O planejamento desta pesquisa experimental será realizado conforme recomendado por Haaland *et al.* (1993); Colombari (2004), Montgomery (2017).

Segundo os autores citados anteriormente, seguir as etapas desta técnica confere ao experimento uma maior organização, uma maior confiabilidade das informações obtidas e, como consequência, uma melhor análise dos dados. Nas seções seguintes serão descritas cada uma das etapas utilizadas nesta pesquisa, conforme ilustrado na Figura 5.1.

Figura 5.1 – Etapas do método Projeto e Análise de Experimentos.



Fonte: Adaptado de Montgomery (2017).

5.2.1 Definição dos objetivos do experimento (Etapa 1)

O objetivo desta primeira etapa da pesquisa é identificar quais são os fatores que mais influenciam o processo de soldagem por resistência elétrica com

eletrodos paralelos, utilizada para a junção de interconectores em células solares de uso espacial, que é caracterizado como um processo de pequena escala.

A correta identificação dos fatores que exercem maior influência sobre o processo, torna possível a otimização da soldagem entre os componentes da célula solar.

5.2.2 Definição dos fatores de controle do experimento (Etapa 2 e 3)

A segunda etapa consiste em fazer o levantamento dos fatores de controle (no caso os parâmetros de soldagem) do experimento com maior potencial de influenciar a variável de resposta utilizada para avaliar o processo. Este levantamento foi realizado baseado em uma busca na literatura, e está apresentado na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Fatores considerados no estudo do processo de soldagem a ponto por resistência elétrica.

Autor (es)	Ano	Parâmetros analisados	Variável de Resposta
Pattanaik <i>et al.</i>	2018	Corrente de soldagem, força do eletrodo e tempo de soldagem	Teste de resistência à tração e diâmetro da lente de solda
Amaral <i>et al.</i>	2018	Corrente de soldagem, força do eletrodo e tempo de soldagem	Indentação máxima do ponto de solda; força máxima de cisalhamento suportada pelo ponto de solda; caracterização do modo de falha das chapas soldadas após teste de cisalhamento.
Atashparva e Hamedi	2018	Corrente de soldagem, força do eletrodo e tempo de soldagem	Diâmetro da lente de solda
Safari <i>et al.</i>	2017	Corrente de soldagem, ciclo de resfriamento, força do eletrodo	Teste de resistência à tração
Valera <i>et al.</i>	2017	Corrente de soldagem e tempo de soldagem	Teste de resistência à tração

Continua

Tabela 5.1 - Continuação.

Autor (es)	Ano	Parâmetros analisados	Variável de Resposta
Vignesh <i>et al.</i>	2017	Diâmetro do eletrodo, corrente de soldagem e ciclo de aquecimento	Teste de resistência à tração
Yue <i>et al.</i>	2016	Corrente de soldagem, força do eletrodo e tempo de soldagem	Teste de resistência à tração
Mishra <i>et al.</i>	2016	Carga, tempo de espera e tempo de solda	Teste de resistência à tração e diâmetro da lente de solda
Abrahão <i>et al.</i>	2015	Corrente de soldagem, força do eletrodo e tempo de soldagem	Tensão de ruptura ao cisalhamento de juntas simples
Zhoe <i>et al.</i>	2014	Corrente de soldagem, força do eletrodo e tempo de soldagem	Energia de falha
Sreenu <i>et al.</i>	2014	Corrente de soldagem, força do eletrodo e tempo de soldagem	Teste de resistência à tração, diâmetro da lente de solda e ZTA
Souza, Fernandes e Miranda	2013	Corrente de soldagem, força de solda, tempo de soldagem e tempo de pré-soldagem	Teste de resistência à tração
Muhammand <i>et al.</i>	2012	Corrente de soldagem, tempo de soldagem e tempo de pré-soldagem	Raio da lente soldada e ZTA
Muhammand <i>et al.</i>	2012	Corrente de soldagem, tempo de soldagem e tempo de pré-soldagem	Raio da lente soldada e ZTA
Dias <i>et al.</i>	2010	Corrente de pico, o tempo de pico, a corrente de base e a frequência	Índice de convexidade, penetração, rendimento e deformação
Y. Luo <i>et al.</i>	2009	Corrente de soldagem, força do eletrodo, tempo de soldagem e corrente de pré-aquecimento.	Diâmetro da lente de solda, teste de resistência à tração e taxa de penetração

Continua

Tabela 5.1 - Conclusão.

Autor (es)	Ano	Parâmetros analisados	Variável de Resposta
Silva e Silva	2008	Força do Eletrodo e Intensidade de Corrente	Resistência da Solda, traduzida pela força de tração e a Espessura de Parede da Solda
Lin <i>et al.</i>	2007	Tamanho do eletrodo, corrente de soldagem, força do eletrodo e tempo de soldagem	Teste de resistência à tração
Kim <i>et al.</i>	2007	Corrente de soldagem, força do eletrodo e tempo de soldagem	Teste de resistência à tração e Indentação
Vaz, Sinka e Vaz	2007	Tensão de soldagem, tempo de subida, tempo de soldagem, tempo de descida, força do eletrodo	<i>Pull test</i>
Cho <i>et al.</i>	2006	Força do eletrodo, tempo de soldagem, tamanho do eletrodo, desalinhamento axial, desalinhamento angular.	-
Hefin Rowlands, Jiju Antony	2003	Distância do curso, tempo de solda, diâmetro do eletrodo, corrente de soldagem, força do eletrodo	Teste de resistência à tração das juntas soldadas

Fonte: Produção da autora.

A Tabela 5.1 revelou que os parâmetros de soldagem mais citados são respectivamente: a corrente de soldagem; a força de aplicação dos eletrodos na peça e o tempo de soldagem.

A resistência elétrica da peça a ser soldada é um item de extrema importância, pois é responsável pelo Efeito *Joule*; porém, esta não é considerada um parâmetro de soldagem (AURES, 2006), apenas uma propriedade que varia de

acordo com cada material. Ela também varia com o deslocamento do eletrodo até a peça, e será influenciada por este.

Considerar todos esses fatores que aparecem no levantamento bibliográfico seria inviável, pois isso exigiria um grande número de experimentos; e, à medida que o número de fatores cresce linearmente, o número de experimentos para esses fatores cresce de forma exponencial (JUNIOR, 2011). Há uma relação de compromisso entre o desempenho e o custo do experimento, que deve ser levada em conta no planejamento dos fatores a serem considerados na análise, garantindo que fatores relevantes não sejam excluídos e que não seja considerado um número grande de fatores, uma vez que a quantidade de experimentos necessários cresce exponencialmente com a quantidade de fatores escolhidos. Por isso se faz necessária a pré seleção dos fatores antes da execução dos experimentos (MONTEVECHI *et al.*, 2007; JUNIOR, 2011).

Desta forma, para esta pesquisa foram escolhidos quatro fatores de controle (parâmetros de soldagem), baseados em levantamento bibliográfico resumido na Tabela 5.1 e, principalmente na experiência adquirida na realização do processo de soldagem das interconexões, conforme apresentado na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Parâmetros de soldagem considerados para o Projeto e Análise de Experimentos.

Parâmetros de soldagem	Unidades
Tensão de Soldagem	mV
Tempo de soldagem	ms
Deslocamento do eletrodo até a peça	Nº de passos do motor
Corrente de efetiva de soldagem	A

Fonte: Produção da autora.

Os parâmetros de soldagem apresentados na Tabela 5.2 representam os parâmetros levantados na Tabela 5.1. A corrente de soldagem considerada neste estudo é controlada por meio da tensão de soldagem. O deslocamento do eletrodo até a peça irá gerar a força necessária para que as peças de trabalho

(interconector + célula solar) possam ser soldados. E influenciará a resistência elétrica do ponto de solda.

5.2.3 Seleção da variável de resposta (Etapa 2)

Segundo Yi *et al.* (2008) os valores de tensão máxima de ruptura são um importante índice utilizado na avaliação da qualidade do processo de soldagem a ponto por resistência elétrica, além de ser comumente aplicado na indústria para avaliação da solda.

A seleção da variável de resposta foi baseada na revisão da literatura e práticas realizadas neste tipo de processo de soldagem. Sendo assim, ela foi escolhida como sendo a resistência máxima a ruptura. Aqui o teste de resistência máxima a ruptura é realizado com corpos de prova para avaliar a qualidade da junta de solda. Na indústria e na literatura, esse tipo de teste é comumente chamado de teste de arrancamento (*pull test*).

5.2.4 Seleção dos níveis dos fatores de controle (Etapa 3)

A seleção dos níveis de cada um dos fatores escolhidos foi realizada com base na determinação experimental dos parâmetros do processo de soldagem e na experiência adquirida com a realização do processo. Desta forma, foram selecionados dois níveis para cada um dos fatores, um nível mínimo ou inferior e um nível máximo ou superior, aqui representados, por -1 e +1, respectivamente.

De forma a preservar os dados de processo da empresa colaboradora desta Dissertação, que são confidenciais, os valores dos níveis mínimos e máximos de cada um dos fatores utilizados não serão divulgados.

5.2.5 Seleção da matriz experimental (Etapa 4)

Antes de tratar da quinta etapa do Projeto e Análise de Experimentos, denominada seleção da matriz experimental, o termo replicação será descrito brevemente. Replicações podem ser definidas como a reprodução de ensaios experimentais com as mesmas definições de fatores (níveis). No glossário a

diferença entre replicação e repetição é explicada com exemplos para melhor entendimento.

A seleção da matriz experimental foi determinada em conjunto com os projetistas da empresa. Conforme mencionado anteriormente, os fatores controlados são tensão de soldagem, deslocamento do eletrodo até a peça, e tempo de soldagem. Foram escolhidos $k=4$ fatores de $b=2$ níveis aplicando um experimento fatorial completo, com $n=2$ réplicas, conforme apresentado na Equação 5.1:

$$N = n * b^k = 2 * 2^4 = 32 \text{ tratamentos} \quad (5.1)$$

onde:

N - número de tratamentos (ou corridas);

b - é o número de níveis para cada fator;

n - é o número de réplicas aplicadas no estudo;

k - é o número de fatores a serem analisados.

Assim, de forma a manter o sigilo dos dados de processo, para a realização do planejamento de experimentos foram utilizadas variáveis reduzidas (representadas por β) ao invés de variáveis físicas (ajustes reais) dos fatores investigados. Ou seja, os dados estão codificados.

A redução das variáveis foi calculada de acordo com Pimenta *et al.*, (2015) utilizando o valor físico (α) que se quer testar subtraído da média (μ) entre os valores mínimo e máximo dos ajustes dos fatores. Dividiu-se o resultado pela metade da amplitude (R) entre os valores mínimos e máximos dos ajustes dos fatores. Dessa forma, a dimensionalidade das variáveis reduzidas ficou restrita ao intervalo [-1 a 1], que concentra os valores mínimo e máximo, reduzidos dos ajustes dos fatores testados, conforme Equação 5.2 e Tabela 5.3.

$$\beta = \frac{\alpha - \mu}{\frac{R}{2}} \quad (5.2)$$

Tabela 5.3 – Transformação de variáveis físicas para variáveis reduzidas.

Variáveis de entrada	Valores (Unidades físicas)	Valores (Variáveis reduzidas)
Deslocamento do eletrodo	Mínimo / Máximo	-1 / 1
Tensão de soldagem	Mínimo / Máximo	-1 / 1
Tempo de soldagem	Mínimo / Máximo	-1 / 1
Corrente	Mínimo / Máximo	-1 / 1

Fonte: Produção da autora.

5.2.6 Processamento das amostras (Etapa 5)

O primeiro passo foi realizar a determinação dos parâmetros experimentais de soldagem, visto que as células solares utilizadas nesta pesquisa são aplicadas em órbita geoestacionária, que requer uma vida útil de missão maior que as células solares aplicadas em órbitas baixas.

Para isso foram conduzidos alguns testes experimentais, a fim de determinar os parâmetros de soldagem para esse tipo de aplicação. Os interconectores foram soldados diretamente no *busbar* (face frontal da célula solar), e em alguns casos foram utilizadas ambas as faces da célula, a fim de reduzir os custos do experimento. Vale ressaltar que ambas as faces da célula possuem o mesmo revestimento do *busbar*.

Com a determinação dos parâmetros experimentais de soldagem, o passo seguinte foi o experimento propriamente dito, de acordo com a matriz experimental apresentada na seção anterior, levando em consideração os parâmetros de soldagem obtidos na determinação experimental.

5.2.7 Análise dos dados (Etapa 6)

Nesta etapa todos os conceitos estatísticos são aplicados para discorrer qual o (s) efeito (s) dos fatores de controle na variável de resposta. Esta análise estatística dos dados permitirá a tomada de decisão em aceitar ou não as hipóteses formuladas nas etapas iniciais da experimentação.

Os cálculos estatísticos, gráficos e relatórios serão realizados em softwares como o MINITAB 17®, EXCEL® para a análise dos dados.

5.2.8 Interpretação dos resultados (Etapa 7)

Os resultados obtidos serão apresentados e discutidos. Esta etapa verifica se os resultados encontrados fazem sentido prático e físico.

Na análise dos dados será possível verificar:

- qual (is) parâmetro (s) de soldagem apresentaram maior influência no processo de soldagem das interconexões às células solares,
- qual (is) parâmetros de soldagem possuem maior interação entre si,
- qual (is) parâmetro(s) de soldagem que causam pouca influência na qualidade da solda.

Esta etapa está descrita no Capítulo 7 que trata dos Resultados, Análises e Discussões.

6 PREPARAÇÃO E REALIZAÇÃO DO EXPERIMENTO

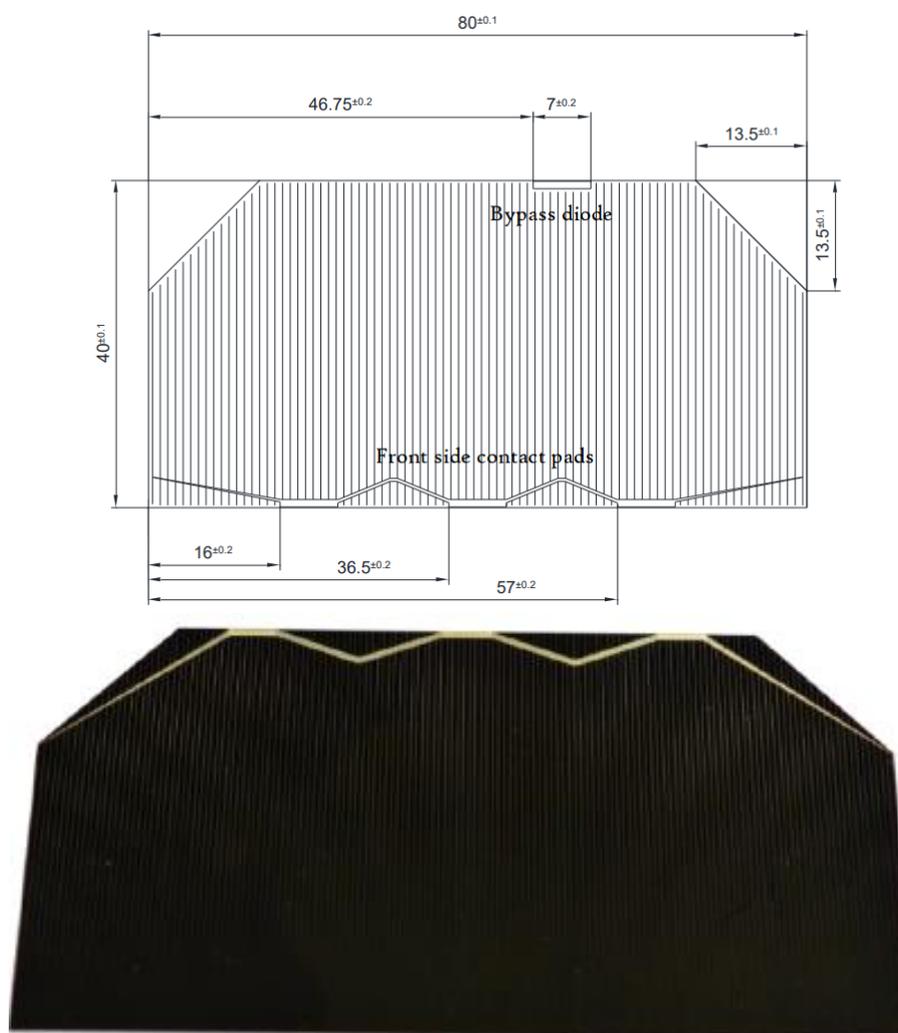
6.1 Objetivo

Este capítulo tem como objetivo apresentar a preparação e a realização do experimento com 32 pontos de solda utilizados na união de interconectores às células solares.

6.2 Materiais utilizados

A célula solar de tripla junção a ser utilizada neste trabalho está representada na Figura 6.1, por meio de desenho técnico e foto real da célula solar.

Figura 6.1 – Célula Solar de tripla junção (InGaP/GaAs/Ge).



Fonte: Datasheet AZUR (2016).

Outras informações sobre a célula solar utilizada podem ser encontradas na folha de especificação do fornecedor e está disponível no Anexo A.

O interconector utilizado para avaliar o processo de soldagem é de Prata e possui espessura de 30 μm , conforme Figura 6.2.

Figura 6.2 – Interconector de 30 μm .



Fonte: Orbital Engenharia (2021).

A temperatura do laboratório durante todos os dias de experimentação variou de 24 a 25 °C, e a umidade relativa do ar esteve entre 62 e 75%.

6.3 Fases desta pesquisa

Esta Dissertação contemplou três fases durante sua realização.

A primeira foi a análise dos parâmetros de soldagem baseada em um banco de dados da empresa. Esses dados foram utilizados para avaliar o comportamento dos parâmetros de soldagem, em relação à resposta (*pull test*). Este banco de dados continha diversos experimentos realizados pela empresa; com mais de um tipo de interconector, mais de uma célula solar e variação nos parâmetros de soldagem.

A segunda fase foi o primeiro passo descrito na Tabela 6.1, ou seja, a determinação dos parâmetros de soldagem a serem utilizados no planejamento experimental. Nesta etapa foram analisados se os valores mínimos e máximos não acarretariam em danos as propriedades da célula; tanto elétrica (quando os parâmetros de soldagem degradam a célula) quanto mecânica (esta pode ser verificada por inspeção visual, observando se não ocorreram deformações na célula; os mais comuns são o *hair line* – caracterizado por pequena trinca na célula (inspeção visual e testes de eletroluminescência); e pequenas deformações plásticas que são facilmente detectadas também por inspeção visual).

A terceira e última fase, foi o Projeto e Análise de Experimentos, propriamente descrito neste trabalho.

6.4 Processamento das amostras

Nesta seção são apresentados o processamento das amostras utilizadas nesta Dissertação, assim como, o passo-a-passo dos experimentos de como foi planejado, apresentado na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 – Etapas para a determinação dos parâmetros de soldagem e processamento das amostras.

Passo	Descrição	Comentários
1	Determinação dos parâmetros de soldagem a serem utilizados	Essa determinação foi baseada na experiência das pessoas envolvidas no processo. Primeiramente, foram realizados alguns experimentos a fim de garantir que os parâmetros escolhidos não seriam prejudiciais à célula, já que uma força do eletrodo demasiada poderia quebrar a célula; e, a falta dela, não une os elementos a serem soldados; assim como o excesso de tensão e um tempo de soldagem maior podem causar pontos de soldas “queimados”. Os dados estão apresentados na Tabela 6.2.
2	Inspeção visual da célula solar	Este passo tem por objetivo garantir que a célula solar está livre de trincas e danos visíveis a olho nu.
3	Inspeção elétrica	Este passo tem como finalidade verificar as propriedades elétricas da célula solar por meio de um simulador solar. Nesta etapa, são armazenadas todas as características elétricas que podem ser obtidas para posterior comparação com o passo 7.
4	Posicionamento do interconector	Por meio de um gabarito, o interconector é posicionado no barramento da célula solar. Esse gabarito permite o correto posicionamento do interconector na célula.
5	Soldagem	Nesta etapa, o interconector é soldado na célula solar com os parâmetros de soldagem determinados anteriormente.

Continua

Tabela 6.1 – Continuação.

Passo	Descrição	Comentários
6	Inspeção visual da célula solar	Esta etapa tem como objetivo garantir que não ocorreram trincas na célula solar durante o processo de soldagem. O ponto de solda também é inspecionado.
7	Inspeção elétrica	Novamente é realizada uma inspeção elétrica da célula solar por meio de um simulador solar, para assegurar que não ocorreram danos nas propriedades elétricas da célula durante o processo de soldagem. Após a soldagem, a célula solar não pode perder mais que 2% de degradação elétrica na tensão de máxima potência. Este passo é realizado a cada 4 tratamentos, visto que cada interconector permite 4 pontos de solda.
8	<i>Pull test</i> (teste de arrancamento)	Nesta etapa, a célula é posicionada em um dispositivo para realizar o <i>pull test</i> , ou seja, o arrancamento do interconector, com velocidade de puxamento controlada em 2 mm/min. A coleta da força necessária para arrancar o interconector foi medida com o auxílio de um dinamômetro, instalado ao dispositivo que faz o deslocamento do mesmo no sentido oposto ao ponto de solda. Para esta célula solar, o <i>pull test</i> deve apresentar valor maior ou igual à 160 gramas-força conforme orientação do fabricante da célula solar utilizada.

Continua

Tabela 6.1 – Conclusão.

Passo	Descrição	Comentários
9	Anotação dos dados	Os parâmetros de soldagem, dados de monitoramento e o valor do <i>pull test</i> são anotados para posterior análise.

Fonte: Produção da autora.

Durante o levantamento dos parâmetros de soldagem, foi possível monitorar através do painel da máquina de solda qual a carga elétrica envolvida em cada ponto de solda; com isso, é possível determinar qual o valor mínimo e máximo de carga elétrica para que o ponto de solda esteja dentro dos limites de *pull test* aceitáveis. Essa é mais uma forma de monitorar a qualidade do ponto de solda durante o processo de fabricação.

O passo a passo detalhado na Tabela 6.1 para a determinação dos parâmetros de soldagem serão os mesmos adotados para a realização dos experimentos. Apenas a inspeção elétrica por meio de um simulador solar será feita a cada quatro tratamentos, a fim de verificar se as propriedades elétricas da célula se mantêm dentro dos limites aceitáveis; desta forma, tornam os experimentos mais rápidos e menos custosos.

Considerações importantes:

- O valor para encostar os eletrodos nas peças de trabalho, denominado neste processo como deslocamento dos eletrodos até a peça, não deve ser demasiado, pois as células solares são dispositivos semicondutores muito frágeis.
- A carga elétrica envolvida no processo, assim como a corrente efetiva do processo são parâmetros que ajudam a controlar a qualidade da junta de solda, uma vez que são monitorados juntamente com os parâmetros controláveis. Assim, esses valores auxiliam a assegurar a qualidade da

junta soldada durante a fabricação, não sendo necessários inúmeros testes de arrancamento (*pull test*).

- A degradação elétrica da célula solar será monitorada a cada 4 pontos de solda, assim como a inspeção visual.
- É realizada também a inspeção visual com auxílio de um microscópio. Esse método permite verificar o ponto de solda antes e após a realização do *pull test*.

6.5 Determinação dos parâmetros de soldagem

A determinação dos parâmetros de soldagem partiu de soldagem de células solares do mesmo fabricante e interconectores com a mesma espessura; ou seja, célula solar da AZUR com 230 *mícrons* de espessura e interconexões de 30 *mícrons* de espessura.

A Tabela 6.2 apresenta os valores utilizados no planejamento experimental dos dados de acordo com o método recomendado por Montgomery (2017). A corrente efetiva do processo de soldagem foi colhida durante o experimento. Este parâmetro de soldagem é fortemente dependente da tensão de soldagem. O campo “tratamento” representa cada ponto de solda realizado. Lembrando que os valores da Tabela 6.2 estão codificados.

Tabela 6.2 – Parâmetros de soldagem com níveis codificados.

Tratamentos	Deslocamento do eletrodo (nº de passos do motor)	Tensão de soldagem (mV)	Tempo de soldagem (ms)	Corrente efetiva de soldagem (A)
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
17	-1	1	1	1
18	-1	1	-1	1
19	1	1	-1	1
20	1	1	1	1
21	-1	-1	1	-1
22	1	-1	1	-1
23	1	-1	-1	-1
24	-1	-1	-1	-1
25	-1	1	1	1
26	-1	1	-1	1
27	1	1	-1	1
28	1	1	1	1
29	-1	-1	1	-1
30	1	-1	1	-1
31	1	-1	-1	-1
32	-1	-1	-1	-1

Fonte: Produção da autora.

7 RESULTADOS E ANÁLISES DOS DADOS

7.1 Objetivo

Este capítulo apresenta os resultados e as análises estatísticas dos dados através da aplicação do método de Projeto e Análise de Experimentos.

7.2 Análise dos dados

Para esta análise foram utilizados os dados de soldagem de interconectores em células solares de uso espacial. O experimento foi realizado durante o segundo semestre de 2020. Para isto, foram realizados 32 tratamentos (cada tratamento equivale a um ponto de solda) combinando os quatro parâmetros: tensão de soldagem, tempo de soldagem, deslocamento do eletrodo até a peça e a corrente efetiva de soldagem. Também foram coletados outros parâmetros do processo, como a corrente efetiva de soldagem e a carga elétrica envolvida no processo de soldagem.

A determinação dos níveis dos parâmetros de soldagem a serem analisados partiu, principalmente, da experiência do pessoal envolvido no processo de soldagem dos interconectores.

A Figura 7.1 mostra o exemplo de um interconector soldado ao barramento da célula solar com um aumento de 20X. Tal foto foi obtida com auxílio de um microscópio.

Figura 7.1 – Exemplo de interconector soldado a célula solar (aumento de 20X).

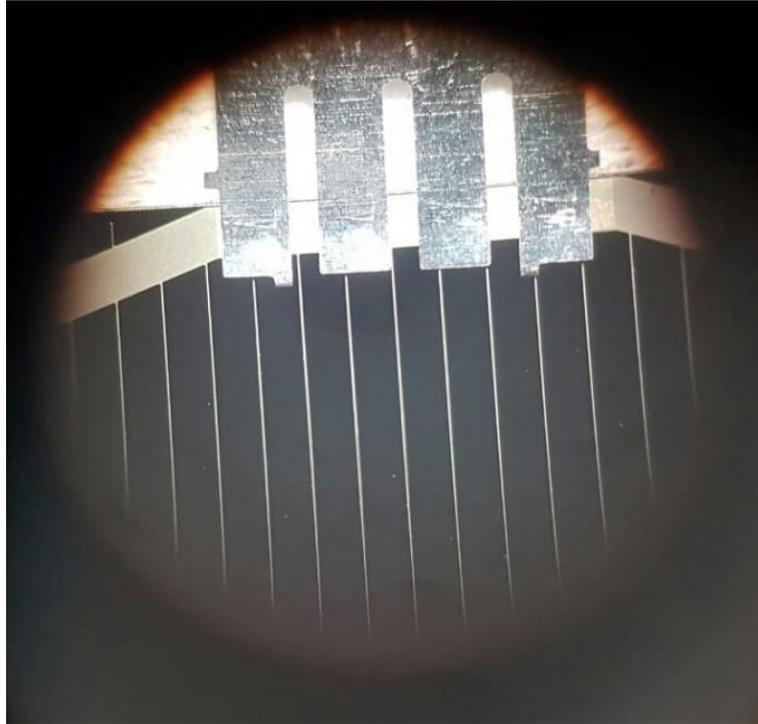


Foto da autora.

A Figura 7.2 mostra o barramento de uma célula solar após a realização do *pull test*, com aumento de 20 X. De acordo com a imagem, é possível verificar que em alguns casos, o ponto de solda não cisalhou, mas sim o corpo do interconector que se rompeu, o que sugere um ponto de solda de boa qualidade, pois suportou o teste de arrancamento.

Figura 7.2 – Barramento de uma célula solar após a realização do *pull test* (aumento de 20X).

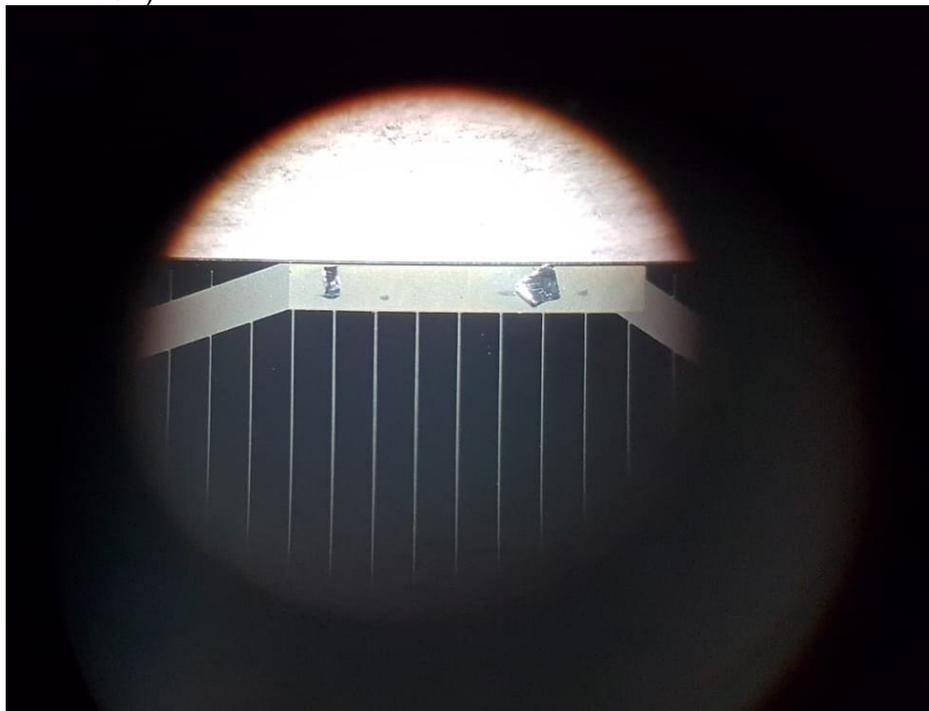


Foto da autora.

7.3 Resposta da Matriz Experimental

As variáveis de resposta (valor do *pull test*) dos 32 tratamentos realizados estão apresentados na Tabela 7.1. Além do valor do *pull test*, a carga elétrica envolvida no processo de soldagem (dada em Ampêre*segundos); este dado foi observado no painel da máquina de solda empregada) e coletado. O local do rompimento da amostra, para cada tratamento realizado de acordo com a matriz experimental apresentada na Tabela 6.1 foi observado e reportado.

O valor de *pull test* igual a 0 (zero), apresentado no tratamento 16, ocorreu durante a preparação da amostra para a realização do *pull test*, o interconector se rompeu do local onde estava soldado à célula solar.

Tabela 7.1 – *Pull test* e carga elétrica dos tratamentos.

Tratamento	Deslocamento do Eletrodo	Tensão de Soldagem	Tempo de Soldagem	Corrente Efetiva	<i>Pull Test</i> (Gramas-força)	Carga elétrica (As)	Local do Rompimento
1	-1	1	1	1	236	112,80	Corpo do interconector
2	-1	1	-1	1	191	117,30	Corpo do interconector
3	1	1	-1	1	190	118,20	Corpo do interconector
4	1	1	1	1	297	126,10	Corpo do interconector
5	-1	-1	1	-1	245	63,93	Corpo do interconector
6	1	-1	1	-1	224	64,42	Ponto de solda
7	1	-1	-1	-1	233	61,67	Ponto de solda
8	-1	-1	-1	-1	235	60,53	Ponto de solda
9	-1	1	1	1	218	63,41	Ponto de solda
10	-1	1	-1	1	173	63,56	Corpo do interconector
11	1	1	-1	1	219	66,81	Corpo do interconector
12	1	1	1	1	209	67,35	Ponto de solda
13	-1	-1	1	-1	215	59,41	Ponto de solda
14	1	-1	1	-1	222	61,81	Ponto de solda
15	1	-1	-1	-1	133	57,15	Ponto de solda
16	-1	-1	-1	-1	0	61,72	Ponto de solda

Continua

Tabela 7.1 – Conclusão.

Tratamento	Deslocamento do Eletrodo	Tensão de Soldagem	Tempo de Soldagem	Corrente Efetiva	<i>Pull Test</i> (Gramas-força)	Carga elétrica (As)	Local do Rompimento
17	-1	1	1	1	173	64,39	Ponto de solda
18	-1	1	-1	1	215	63,69	Ponto de solda
19	1	1	-1	1	190	62,70	Corpo do interconector
20	1	1	1	1	180	63,78	Corpo do interconector
21	-1	-1	1	-1	207	62,29	Corpo do interconector
22	1	-1	1	-1	190	62,86	Ponto de solda
23	1	-1	-1	-1	208	61,55	Corpo do interconector
24	-1	-1	-1	-1	233	60,49	Ponto de solda
25	-1	1	1	1	210	64,76	Corpo do interconector
26	-1	1	-1	1	245	63,93	Corpo do interconector
27	1	1	-1	1	251	63,58	Ponto de solda
28	1	1	1	1	235	66,87	Ponto de solda
29	-1	-1	1	-1	195	61,45	Ponto de solda
30	1	-1	1	-1	125	64,49	Ponto de solda
31	1	-1	-1	-1	162	62,16	Ponto de solda
32	-1	-1	-1	-1	137	62,53	Ponto de solda

Fonte: Produção da autora.

A média do valor do *pull test* para os 32 tratamentos foi de 203,3 gramas-força, ou seja, acima do valor mínimo de 160 gramas-força.

7.3.1 Análise de Variância – ANOVA

A ANOVA tem o objetivo de avaliar a importância de um ou mais fatores comparando as médias das variáveis de resposta nos diferentes níveis de fator. Desta forma, a hipótese nula afirma que todas as médias da população (médias do nível do fator) são iguais, enquanto a hipótese alternativa afirma que pelo menos uma é diferente.

A fim de compreender melhor a Análise de Variância (ANOVA) apresentada na Tabela 7.2, algumas siglas são definidas: GL – Graus de Liberdade; SQ – Soma dos Quadrados; QM – Quadrados Médios.

Os testes F têm o nome de sua estatística de teste, F. O valor F é simplesmente uma razão de duas variâncias. Variâncias são uma medida de dispersão, ou definem quão longe os dados estão espalhados da média. Assim, valores maiores representam maior dispersão. O Glossário e a Tabela 7.4 trazem mais informações sobre seu cálculo.

Em testes de significância estatística, o valor-p é a probabilidade de se obter uma estatística de teste pelo menos tão extrema quanto aquela que foi realmente observada, assumindo que a hipótese nula seja verdadeira. Assim, se o valor de p encontrado for menor que 0,05 ou 0,01, então têm-se respectivamente 5% ou 1% de chance de rejeitar a hipótese nula quando ela for verdadeira.

A análise de variância apresentada na Tabela 7.2, foi realizada com base nos seguintes parâmetros: deslocamento do eletrodo até a peça (representada pela letra A), tensão de soldagem (representada pela letra B), tempo total de soldagem (representado pela letra C) e corrente efetiva da soldagem (representada pela letra D).

Tabela 7.2 – Análise de Variância dos dados.

Análise de Variância - ANOVA					
Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-p
Modelo	15	61241,7	4082,8	3,11	0,015
Linear	4	23906,6	5976,7	4,55	0,012
Deslocamento [A]	1	9714,7	9714,7	7,39	0,015
Tensão de soldagem [B]	1	3641,5	3641,5	2,77	0,115
Tempo de soldagem [C]	1	8681,9	8681,9	6,61	0,021
Corrente efetiva [D]	1	399,7	399,7	0,30	0,589
Interação de 2 fatores	6	39995,8	6666,0	5,07	0,004
A*B	1	7273,2	7273,2	5,54	0,032
A*C	1	11805,6	11805,6	8,99	0,009
A*D	1	14266,5	14266,5	10,86	0,005
B*C	1	12428,3	12428,3	9,46	0,007
B*D	1	620,5	620,5	0,47	0,502
C*D	1	10221,3	10221,3	7,78	0,013
Interação de 3 fatores	4	35512,2	8878,1	6,76	0,002
A*B*C	1	12457,9	12457,9	9,48	0,007
A*B*D	1	13458,0	13458,0	10,24	0,006
A*C*D	1	12321,6	12321,6	9,38	0,007
B*C*D	1	8001,0	8001,0	6,09	0,025
Interação de 4 fatores	1	13147,4	13147,4	10,01	0,006
A*B*C*D	1	13147,4	13147,4	10,01	0,006
Erro	16	21021,8	1313,9		
Falta de ajuste	3	4345,1	1448,4	1,13	0,373
Erro puro	13	16676,7	1282,8		
Total	31	82263,5			

Fonte: Produção da Autora.

A análise acima foi obtida com auxílio do software estatístico MINITAB 17®.

Os coeficientes da ANOVA do modelo apresentado na Tabela 7.2 são apresentados na Tabela 7.3.

Tabela 7.3 – Coeficientes da ANOVA.

Termo	Efeito	Coeficiente	EP de Coeficiente	Valor-T	Valor-p	FIV
Constante		192,9	10,4	18,46	0,000	
Deslocamento [A]	56,8	28,4	10,4	2,7	0,015	2,66
Tensão de soldagem [B]	34,8	17,4	10,4	1,66	0,115	2,66
Tempo de soldagem [C]	53,7	26,9	10,4	2,57	0,021	2,66
Corrente efetiva [D]	-11,6	-5,8	10,5	-0,55	0,589	53,93
A*B	-49,6	-24,6	10,4	-2,35	0,032	2,66
A*C	-62,6	-31,3	10,4	-3,00	0,009	2,66
A*D	69,2	34,6	10,5	3,30	0,005	57,90
B*C	-64,3	-32,1	10,4	-3,08	0,007	2,66
B*D	14,4	7,2	10,5	0,69	0,502	47,52
C*D	58,5	29,3	10,5	2,79	0,013	57,92
A*B*C	64,4	32,2	10,4	3,08	0,007	2,66
A*B*D	-67,2	-33,6	10,5	-3,20	0,006	57,90
A*C*D	-64,3	-32,1	10,5	-3,06	0,007	57,92
B*C*D	-51,8	-25,9	10,5	-2,47	0,025	57,92
A*B*C*D	66,4	33,2	10,5	3,16	0,006	57,92

Fonte: Produção da Autora.

A análise acima foi obtida com auxílio do software estatístico MINITAB 17®.

EP – Erro Padrão do Coeficiente.

Os dados apresentados na Tabela 7.3 são importantes, pois, a partir deles, é possível determinar a equação de regressão do modelo.

O valor-T apresentado na Tabela 7.3 não é muito informativo por si só, mas é usado para determinar o valor-p.

O termo FIV significa Fator de Inflação da Variância (do Inglês *Variance Inflation Factor - VIF*). De acordo com Montgomery e Runger (2009) o FIV é uma maneira de medir o efeito da multicolinearidade¹² entre seus preditores. Os valores de FIV devem seguir a orientação apresentada na Tabela 7.4.

Tabela 7.4 – Valores para FIV

Valor de FIV	Status
=1	Os preditores não estão correlacionados
1<FIV<5	Preditores moderadamente correlacionados.
>5	Preditores altamente correlacionados.

Fonte: Suporte MINITAB 17®.

Analisando as informações da Tabela 7.4 e os dados da ANOVA (Tabela 7.3) é possível destacar o parâmetro e as interações entre parâmetros que apresentaram valores de FIV maiores que 5, conforme ressalta a Tabela 7.5.

Tabela 7.5 – Valores de FIV da ANOVA.

Termo	FIV
Corrente efetiva [D]	53,93
Deslocamento * Corrente efetiva [A*D]	57,90
Tensão * Corrente efetiva [B*D]	47,52
Tempo * Corrente efetiva [C*D]	57,92
Deslocamento * Tensão * Corrente efetiva [A*B*D]	57,90
Deslocamento * Tempo * Corrente efetiva [A*C*D]	57,92
Tensão * Tempo * Corrente efetiva [B*C*D]	57,92
Interação entre os quatro parâmetros [A*B*C*D]	57,92

Fonte: Produção da Autora.

A análise acima foi obtida com auxílio do software estatístico MINITAB 17®.

¹² Multicolinearidade é um termo usado para descrever quando dois ou mais preditores em sua regressão estão altamente correlacionados.

Um valor de FIV maior que 5 sugere que o coeficiente de regressão é mal estimado devido à multicolinearidade severa. Desta forma, para refinar ainda a equação de regressão do modelo é necessário realizar mais experimentos e avaliar os dados da ANOVA.

O Fator de Inflação da Variância pode ser calculado conforme a fórmula apresentada na Equação 7.1

$$FIV(\beta_j) = \frac{1}{(1-R_j^2)} \quad j = 1, 2, \dots, k \quad (7.1)$$

A Tabela 7.6 apresenta todas as fórmulas necessárias para a construção da análise de variância apresentada na Tabela 7.2.

Tabela 7.6 – Fórmulas para construção da ANOVA.

Fonte de variação	Soma dos Quadrados (SQ)	Graus de Liberdade (GL)	Quadrado Médio (QM)	Estatística de Teste (F)
Parâmetro A	$SQ_A = \frac{[\sum_{i=1}^{N/2} y_{A(+)} - \sum_{i=1}^{N/2} y_{A(-)}]^2}{n2^k}$	$GL_A = a - 1$	$QM_A = \frac{SQ_A}{GL_A}$	$F = \frac{QM_A}{QM_{erro}}$
Parâmetro B	$SQ_B = \frac{[\sum_{i=1}^{N/2} y_{B(+)} - \sum_{i=1}^{N/2} y_{B(-)}]^2}{n2^k}$	$GL_B = b - 1$	$QM_B = \frac{SQ_B}{GL_B}$	$F = \frac{QM_B}{QM_{erro}}$
Interação AB	$SQ_{AB} = \frac{[\sum_{i=1}^{N/2} y_{AB(+)} - \sum_{i=1}^{N/2} y_{AB(-)}]^2}{n2^k}$	$GL_{AB} = (a - 1)(b - 1)$	$QM_{AB} = \frac{SQ_{AB}}{GL_{AB}}$	$F = \frac{QM_{AB}}{QM_{erro}}$
Erro	$SQ_E = SS_T - SS_A - SS_B - SS_{AB}$	$GL_{erro} = ab(n - 1)$	$QM_{erro} = \frac{SQ_{erro}}{GL_{erro}}$	
Total	$SQ_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk}^2 - \frac{y_{...}^2}{n2^k}$	$abn - 1$		

Fonte: MINITAB 17®; Balestrassi e Paiva (2007).

A coluna “valor-p” é utilizada para determinar quais dos efeitos no modelo são estatisticamente significativos. Cada um desses valores deve ser comparado com o nível de significância (α).

Para este experimento, o valor do nível de significância adotado foi de $\alpha = 0,05$, logo o intervalo de confiança foi de 0,95. As hipóteses formuladas foram as seguintes:

- H_0 Hipótese nula: os fatores não produzem efeitos significativos no *pull test*;
- H_1 Hipótese alternativa: os fatores produzem efeitos significativos no *pull test*.

Então:

- Se o *valor – p* < 0,05, rejeita-se H_0 ;
- Se o *valor – p* > 0,05, aceita-se H_0 .

Desta forma:

- Se o valor-p for menor ou igual a α , o efeito é significativo, portanto, o efeito deve ser considerado.
- Se o valor-p for maior que α , o efeito não é significativo, portanto, o efeito pode ser desprezado.

Na Tabela 7.2 estão destacados na coluna “valor-p” em negrito todos os efeitos significativos baseado nas hipóteses acima. Observando os dados desta tabela, nota-se considerando o intervalo de confiança de 95% que os efeitos deslocamento do eletrodo e o tempo de soldagem se mostraram significativos na resposta do valor do *pull test*. Assim, analisando a afirmação do parágrafo anterior temos que:

- O deslocamento do eletrodo apresentou um valor-p = 0,015, ou seja, menor que o valor de α , fazendo deste parâmetro de soldagem significativo.

- O tempo de soldagem apresentou o valor-p = 0,021, ou seja, menor que o valor de α , fazendo deste parâmetro de soldagem significativo.
- A tensão de soldagem com valor-p = 0,115 e a corrente de soldagem com valor-p = 0,589 ou seja, maiores que o valor de α , tornando estes parâmetros não significativos para esta análise.

A mesma análise pode ser realizada para as interações entre parâmetros, que também foram destacadas em negrito na Tabela 7.2.

7.3.2 Resumo do modelo

Para melhor entendimento do resumo do modelo, é apresentada a equação de regressão genérica (Equação 7.2), considerando um fatorial completo 2^2 :

$$y + \omega = k + k_1x_1 + k_2x_2 + k_{1,2}x_1x_2 + \varepsilon \quad (7.2)$$

Em que:

y é a variável de resposta

ω é o erro associado aos fenômenos aleatórios da variável de resposta

k é a constante;

k_1 é o coeficiente do fator de controle x_1 ;

x_1 é o primeiro fator de controle;

k_2 é o coeficiente do fator de controle x_2 ;

x_2 é o segundo fator de controle;

$k_{1,2}$ é o coeficiente da interação entre os fatores x_1x_2 ;

x_1x_2 é a interação entre o primeiro e o segundo fator de controle.

ε : erro

A Equação 7.2 representa o modelo matemático tendo como os índices referidos acima.

O erro aleatório ou desvio padrão (representado por S), apresentado na Tabela 7.3, demonstra a variabilidade média sobre a linha de regressão. Assim, quanto mais próximo de zero é o seu valor, mais adequado é o modelo matemático obtido para a variável de resposta.

A Equação 7.3 apresenta como o S é calculado:

$$s = \sqrt{QM_{Erro}} \quad (7.3)$$

O valor de R² (R-quadrado) – Coeficiente de Determinação – apresentado na Tabela 7.5 descreve a quantidade de variação nas respostas observadas (no valor do *pull test*) que é explicada pela(s) preditor(a) (s)¹³. Ele sempre aumenta com preditoras adicionais. Por exemplo, o modelo com as melhores cinco preditoras sempre terá um R² maior que o modelo com as melhores quatro preditoras. Assim, R² é mais útil para comparar modelos do mesmo tamanho.

O R-quadrado é uma medida estatística que indica o quão próximo os dados estão da linha de regressão ajustada. Também é conhecido como coeficiente de determinação ou coeficiente de determinação múltipla para regressão múltipla.

A Equação 7.4 apresenta como o R² é calculado:

$$R^2 = \frac{SQ_T - SQ_E}{SQ_T} \quad (7.4)$$

O R² ajustado é um R² modificado que foi ajustado para o número de termos no modelo. Quando se inclui termos desnecessários, R² pode ficar artificialmente alto. Diferentemente de R², o R² ajustado pode ficar menor quando você adiciona termos ao modelo. Usa-se o R² ajustado para comparar modelos com diferentes quantidades de termos.

A Equação 7.5 apresenta como o R² ajustado é calculado:

¹³Preditoras podem ser definidas como a variável que tenta explicar o resultado de um estudo.

$$R^2_{Aj} = \left[1 - \left(\frac{\frac{SQ_{Erro}}{GL_{Erro}}}{\frac{SQ_{Total}}{GL_{Total}}} \right) \right] \quad (7.5)$$

Os valores encontrados para o erro aleatório (S), R² e R² ajustado são mostrados na Tabela 7.7.

Tabela 7.7 – Resumo do Modelo apresentado na ANOVA.

S	36,24 gramas força
R ²	74,45%
R ² (aj.)	50,49%

Fonte: Produção da Autora.

A análise acima foi obtida com auxílio do software estatístico MINITAB 17®.

O erro aleatório de 36,24 gramas força indica o quão errado o modelo de regressão está, em média, usando a variável de resposta; ou seja, a distância média que os valores observados distanciam da linha de regressão.

O valor de R² significa que 74,45% da variância no valor do *pull test* pode ser explicada por sua relação entre os termos que são significativos na análise de variância, mas, para não cometer erros é necessário analisar os gráficos de resíduos para afirmar que este valor está adequado. De uma forma mais simples podemos dizer que o valor de R² representa a porcentagem das variáveis x (independentes) que são explicadas pela variável y (dependente). Esse índice pode ser melhorado com a execução de novos experimentos, onde deve se observar na ANOVA os valores encontrados para o FIV, conforme mencionado anteriormente estes devem ser menores que 5.

R² ajustado de 50,49% é a porcentagem de variação na resposta que é explicada pelo modelo, ajustada para o número de preditoras do modelo em relação ao número de observações.

Para esta análise foi verificado que quando as interações de terceira e quarta ordem entre os parâmetros de soldagem (fatores) foram desconsideradas na análise de variância, o valor de R² ajustado e do R² reduziam; assim o valor do

erro aleatório (desvio padrão) aumentava. Por isto, decidiu-se realizar a análise considerando todas as interações entre fatores. Isto mostrou que existe uma forte interação entre os parâmetros de soldagem.

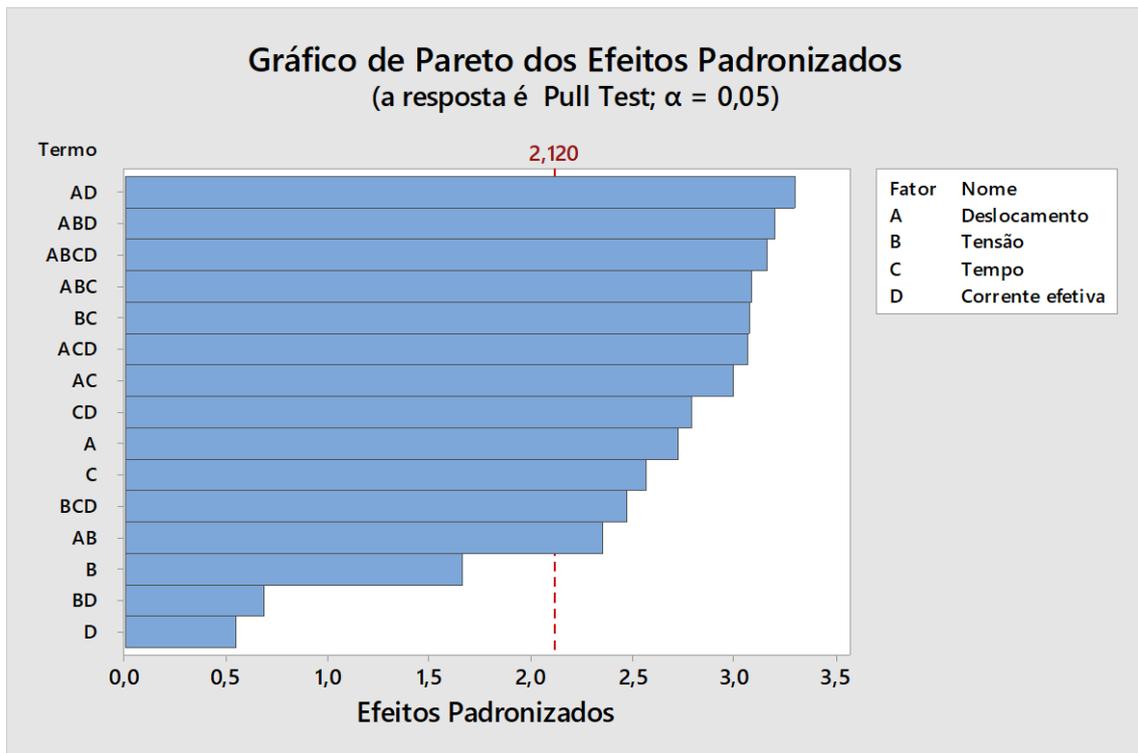
7.3.3 Gráficos dos Efeitos e Resíduos

Nos gráficos seguintes os parâmetros de soldagem estão codificados com letras, assim, o deslocamento do eletrodo até a peça está representado pela letra [A]; a tensão de soldagem está representada pela letra [B], o tempo de soldagem está representado pela letra [C], e a corrente efetiva da soldagem (representada pela letra D).

O gráfico de Pareto, apresentado na Figura 7.3, mostra os valores absolutos dos efeitos padronizados desde o maior efeito até o menor efeito. Os efeitos padronizados são estatísticas t que testam a hipótese nula de que o efeito não influencia no processo. O valor para a linha de referência é determinado pela estatística t, ou seja, obtém-se o valor com base nos graus de liberdade do erro (na Tabela 7.2, para o erro do modelo tem-se 16 graus de liberdade), sendo assim, para esta análise, este valor é de 2,120 (este valor para a linha de referência pode ser observado no Anexo C – distribuição estatística t). Quando os valores ultrapassam esta linha significa que o parâmetro ou interação entre parâmetros exerce influência sobre o processo, já os termos que estão inferiores a esta linha não influenciam no processo.

O gráfico da Figura 7.3 mostra os efeitos padronizados de termo do processo e quais contribuem para a maior parte da variabilidade na resposta.

Figura 7.3 – Gráfico de Pareto.



Fonte: Produção da Autora.

O gráfico acima foi obtido com auxílio do software estatístico MINITAB 17®.

Pode ser verificado no gráfico da Figura 7.3 que os parâmetros deslocamento dos eletrodos até a peça [A] e o tempo de soldagem [C], ultrapassam a linha de referência (tracejada em vermelho), sendo assim, são parâmetros que influenciam significativamente a variável de resposta (valor do *pull test*) na configuração dos experimentos planejados.

As interações de segunda ordem que se destacam são respectivamente AD (deslocamento*corrente efetiva), BC (tensão de soldagem*tempo de soldagem), AC (deslocamento*tempo de soldagem), CD (tempo de soldagem*corrente efetiva) e AB (deslocamento*tensão de soldagem). Essas são as interações que influenciam significativamente o valor do *pull test*.

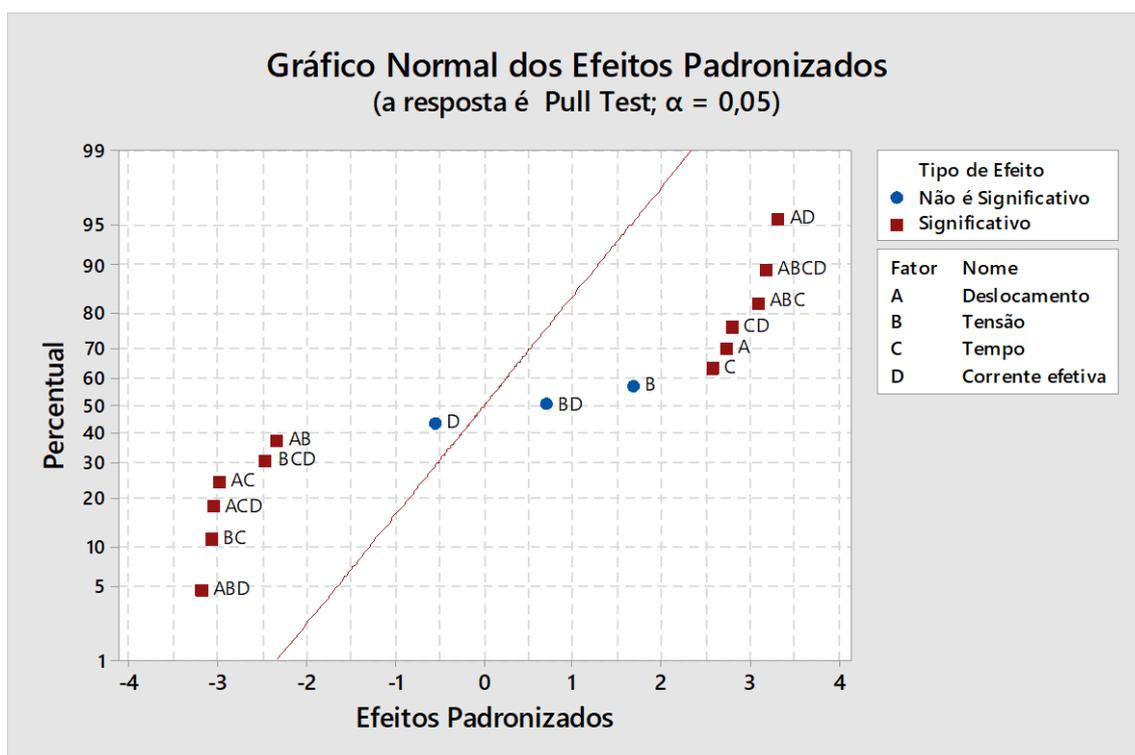
Já as interações de terceira ordem são respectivamente ABD, ABC, ACD, BCD. A interação ABCD, entre os quatro parâmetros de soldagem, também se mostrou significativa no gráfico de Pareto, conforme observado na Figura 7.3. Essas são

as interações entre os parâmetros que afetam significativamente o valor do *pull test*.

Como o gráfico de Pareto exibe o valor absoluto dos efeitos, é possível apenas determinar quais efeitos são grandes, porém não é possível determinar quais efeitos aumentam ou diminuem a resposta. Para examinar a magnitude e a direção dos efeitos no experimento é recomendado o gráfico normal dos efeitos padronizados.

Na Figura 7.4 é mostrado o Gráfico Normal de Efeitos padronizados, que compara a magnitude relativa e o significado estatístico dos efeitos principais e de interação.

Figura 7.4 – Gráfico Normal de Efeitos Padronizados.



Fonte: Produção da Autora.

O gráfico acima foi obtido com auxílio do software estatístico MINITAB 17®.

O MINITAB® desenha uma linha reta (a partir de um modelo de regressão de mínimos quadrados) para indicar onde os pontos seriam esperados, se todos os efeitos fossem zero. Pontos que não se situam perto da linha geralmente

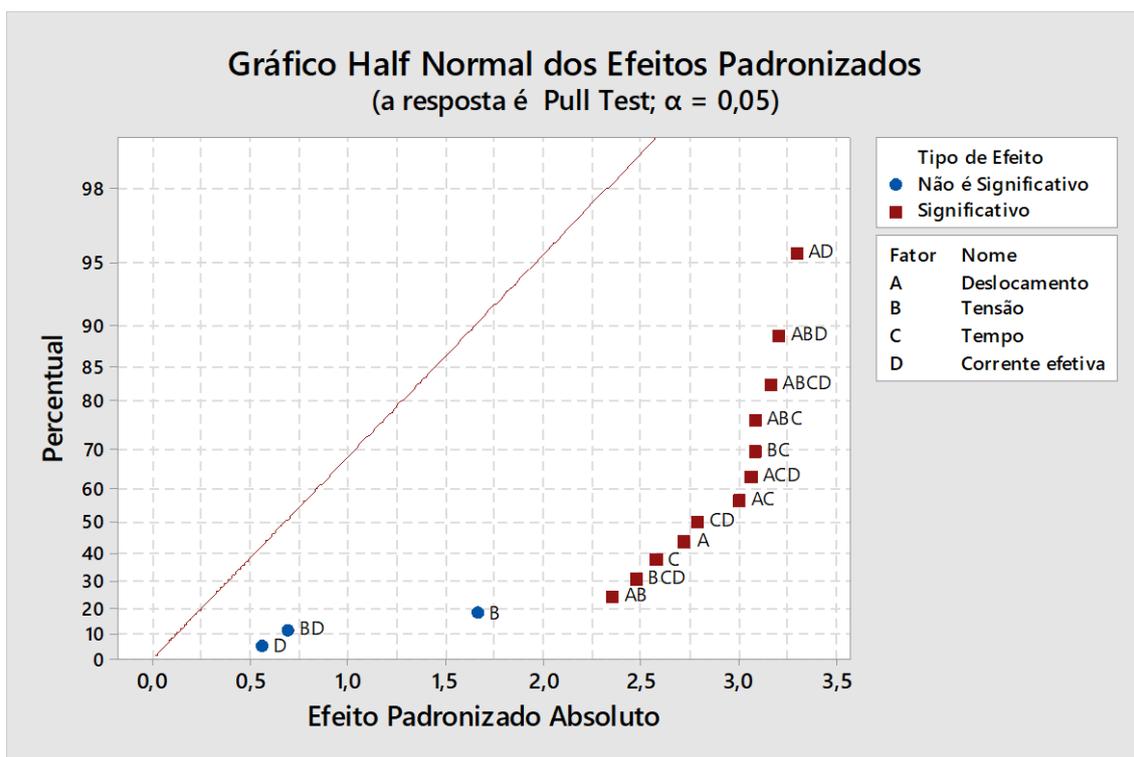
sinalizam efeitos significativos. Esses efeitos são maiores e, geralmente, estão mais longe da linha ajustada do que os efeitos sem importância.

No gráfico da Figura 7.4, é possível verificar a magnitude e direção dos efeitos. Assim, os efeitos significativos que estão do lado direito da linha de regressão possuem efeitos positivos; isso significa que quando o nível do parâmetro de soldagem muda de baixo para o alto, a resposta (valor do *pull test*) aumenta.

Já os efeitos que estão do lado esquerdo da linha de regressão possuem um efeito negativo, ou seja, isso significa que quando o nível do parâmetro de soldagem muda de baixo para alto, a resposta (valor do *pull test*) diminui.

O gráfico *half normal* dos efeitos padronizados, apresentado na Figura 7.5, determina a magnitude e a importância dos efeitos, assim, os efeitos que estão mais afastados da linha reta de referência, são estatisticamente significativos. A cor e a forma dos pontos diferem entre os efeitos estatisticamente significativos e estatisticamente não significativos. Este gráfico exibe o valor absoluto dos efeitos, sendo possível determinar quais efeitos são grandes, porém, não é possível determinar quais efeitos aumentam ou diminuem a resposta, por esta razão deve ser analisado em conjunto com o gráfico normal dos efeitos padronizados.

Figura 7.5 – Gráfico *Half Normal* de Efeitos Padronizados.



Fonte: Produção da Autora.

O gráfico acima foi obtido com auxílio do software estatístico MINITAB 17®.

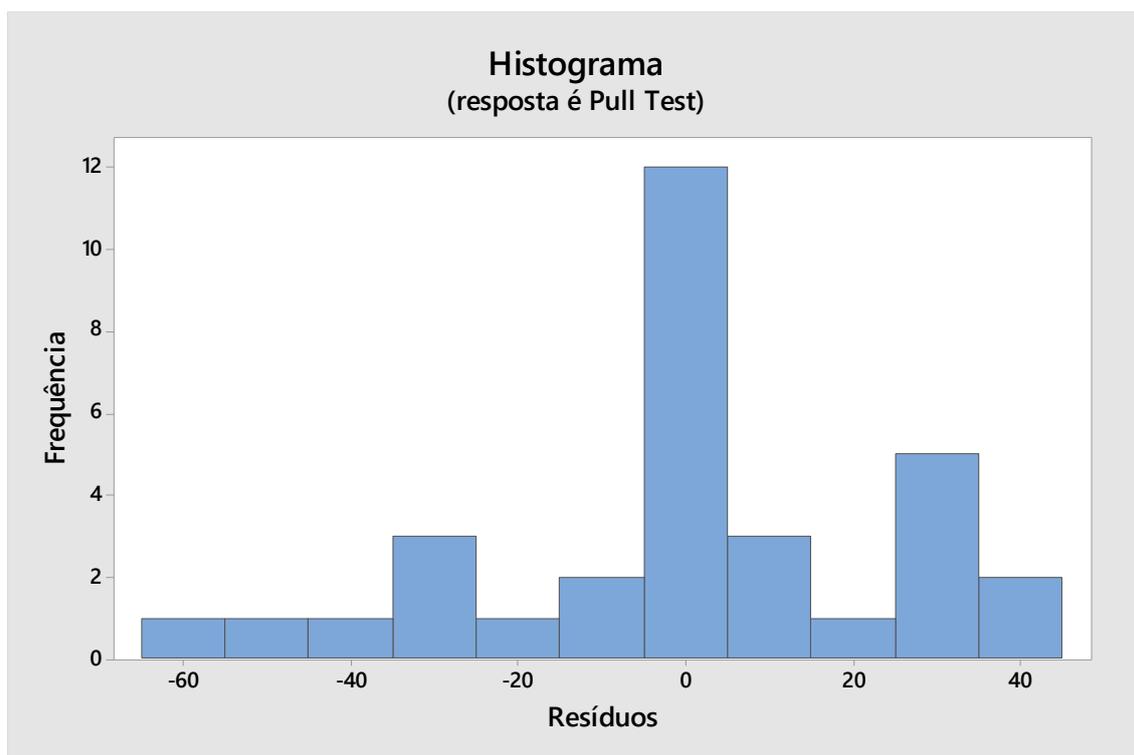
No gráfico da Figura 7.5, é possível notar que os mesmos parâmetros apresentados no gráfico de Pareto estão presentes no gráfico de *half normal* dos efeitos padronizados, conforme a Figura 7.3.

Já os gráficos de resíduos, representados nas Figuras 7.6 a 7.9 são usados para estudar a conformidade do modelo com relação aos pressupostos fundamentais, que incluem a linearidade, a normalidade, a variância constante e a independência.

Lembrando que, os resíduos correspondem a diferença entre o valor de resposta observado e o valor ajustado.

Na Figura 7.6 é apresentado o histograma com a frequência *versus* resíduos. O Gráfico de Histograma de Resíduos é usado para estudar a não normalidade do comportamento dos resíduos.

Figura 7.6 – Histograma Frequência versus Resíduos.



Fonte: Produção da Autora.

O gráfico acima foi obtido com auxílio do software estatístico MINITAB 17®.

Na Figura 7.6 é possível observar que o gráfico apresenta os resíduos com uma distribuição próxima de uma distribuição normal, destacando que a maior frequência dos resíduos estão centrados em zero.

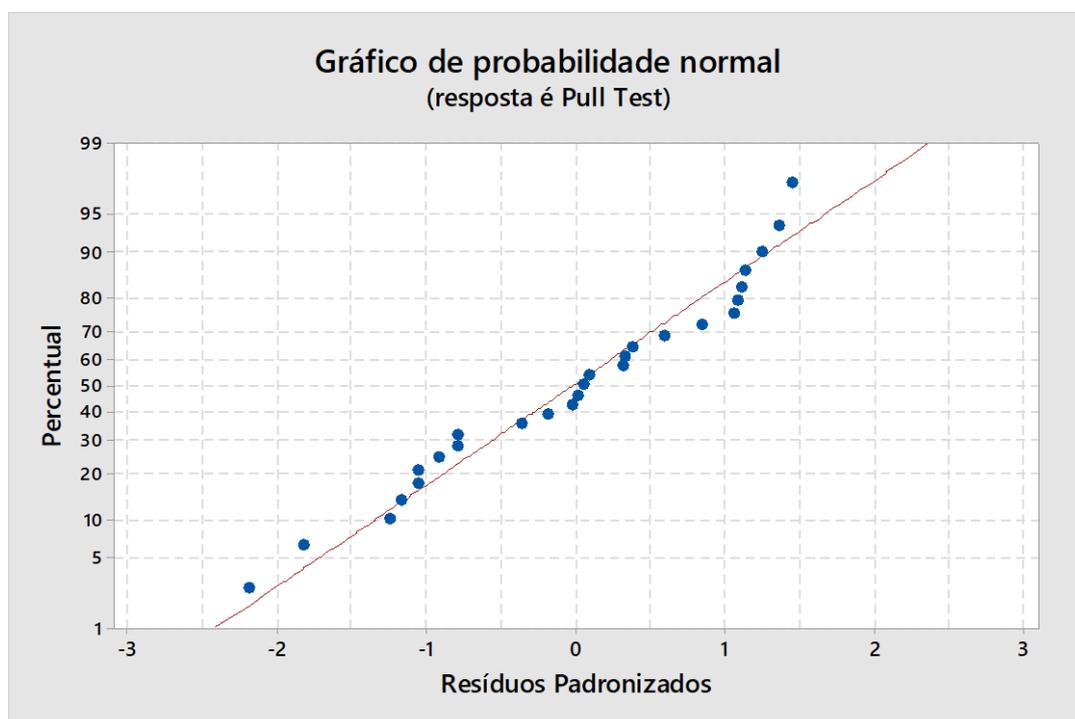
Nos gráficos apresentados nas Figuras 7.7, 7.8 e 7.9 é possível notar que os tratamentos 1, 5, 6, 7 e 16 não foram plotados, pois estes gráficos utilizam resíduos padronizados.

Lembrando que resíduo padronizado é a divisão do valor do resíduo pela estimativa do seu desvio padrão.

Os tratamentos (1, 5, 6, 7 e 16) mencionados anteriormente apresentaram resíduo igual a zero, sendo assim não foi possível calcular o resíduo padronizado, por isso não foram plotados nos referidos gráficos (Figuras 7.7, 7.8 e 7.9).

O gráfico de probabilidade normal permite avaliar se existe ou não um conjunto de dados que apresenta aderência à distribuição normal de probabilidades. Desta forma, para a construção do gráfico, os dados são plotados em gráfico cartesiano a fim de observar se os pontos formam uma reta aproximada, vale ressaltar que quanto mais distantes da reta, maior a fuga de normalidade dos dados (PADOVANI, 2014). Na Figura 7.7 é apresentado o gráfico de probabilidade normal que distribui os resíduos padronizados *versus* os valores esperados quando a distribuição é normal.

Figura 7.7 – Gráfico de Probabilidade Normal.



Fonte: Produção da Autora.

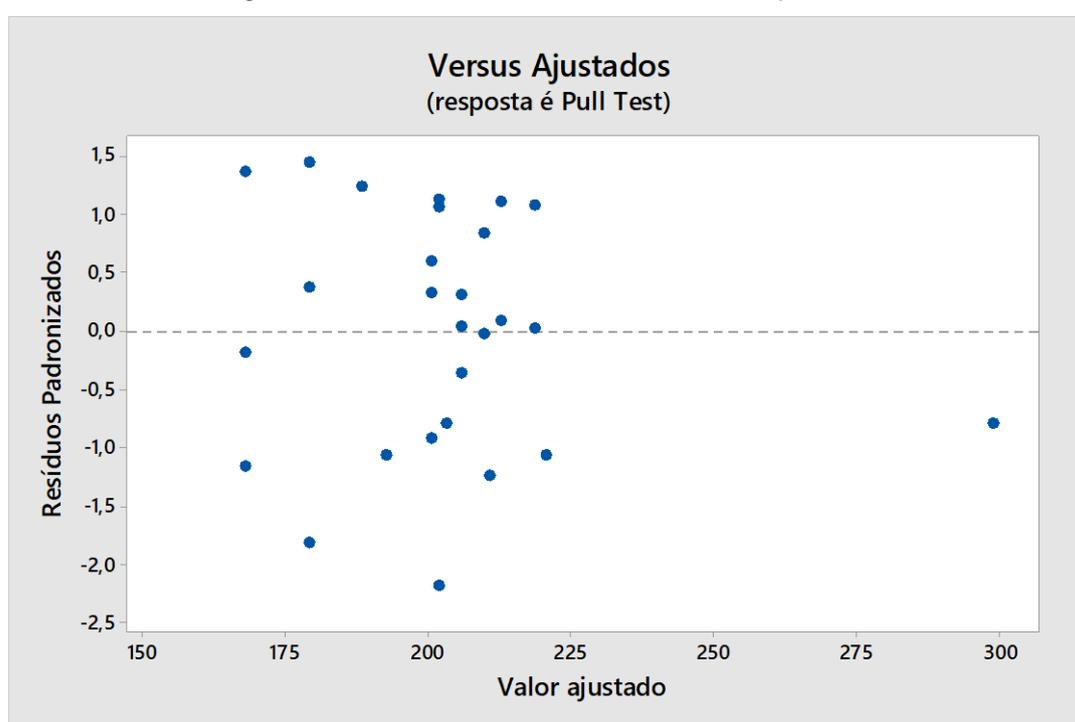
O gráfico acima foi obtido com auxílio do software estatístico MINITAB 17®.

De acordo com o gráfico da Figura 7.7 observa-se uma pequena variação em torno da linha reta mostrada no gráfico, indicando uma distribuição normal. Este gráfico também pode indicar a presença de *outliers*, ou seja, uma observação com um grande valor residual, ou seja, estes são pontos que estão longe dos demais no gráfico. Para este caso não foram observados *outliers* nos dados coletados.

Analisando o histograma da Figura 7.6 e o gráfico de probabilidade normal (Figura 7.7), é possível afirmar que os dois gráficos evidenciam a normalidade dos erros.

O Gráfico de resíduos padronizados *versus* valor ajustado, apresentado na Figura 7.8, mostra a distribuição dos resíduos *versus* os valores ajustados. Os resíduos devem estar dispersos aleatoriamente em torno de zero, é um gráfico de dispersão.

Figura 7.8 – Gráfico de Resíduos x Valor Ajustado.



Fonte: Produção da Autora.

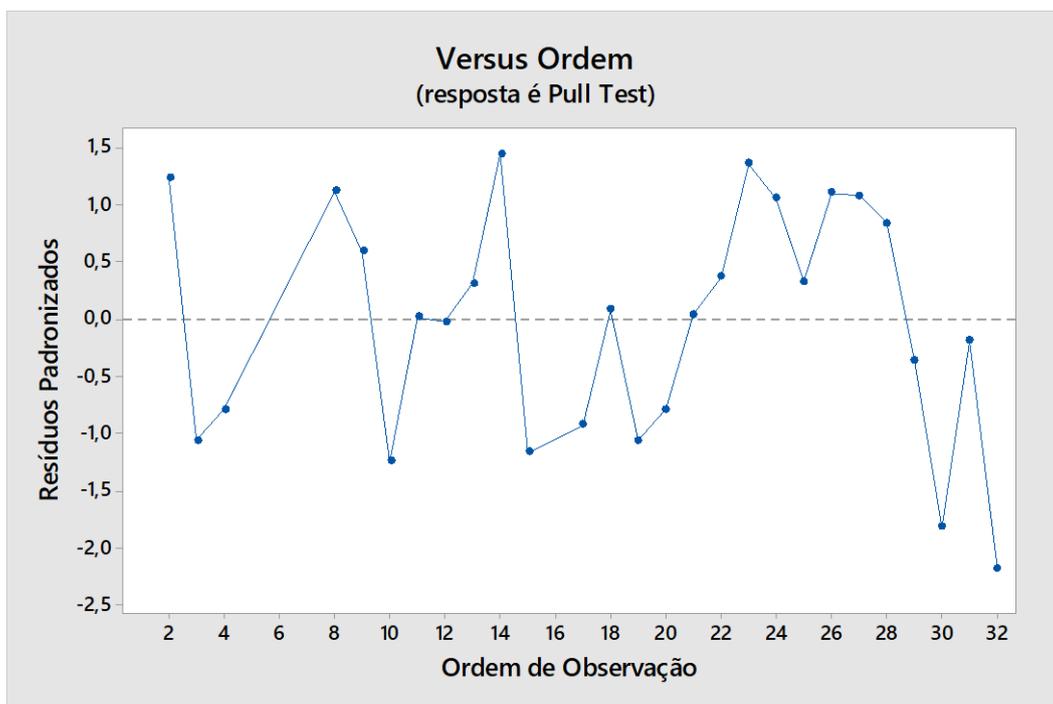
O gráfico acima foi obtido com auxílio do software estatístico MINITAB 17®.

Com base no gráfico da Figura 7.8, é possível observar que os resíduos estão dispersos aleatoriamente em torno de zero, que indica uma variância constante dos resíduos.

O gráfico de resíduos padronizados *versus* ordem de observação, apresentado na Figura 7.9, mostra todos os resíduos na ordem em que os dados foram coletados. O gráfico é útil quando a ordem das observações pode influenciar os resultados, o que pode ocorrer quando os dados são coletados em uma

sequência de tempo ou em alguma outra sequência. Uma correlação positiva é indicada por um amontoado de resíduos com o mesmo sinal. Uma correlação negativa é indicada por uma rápida mudança nos sinais de resíduos consecutivos.

Figura 7.9 – Gráfico de Resíduos *versus* Ordem de Observação.



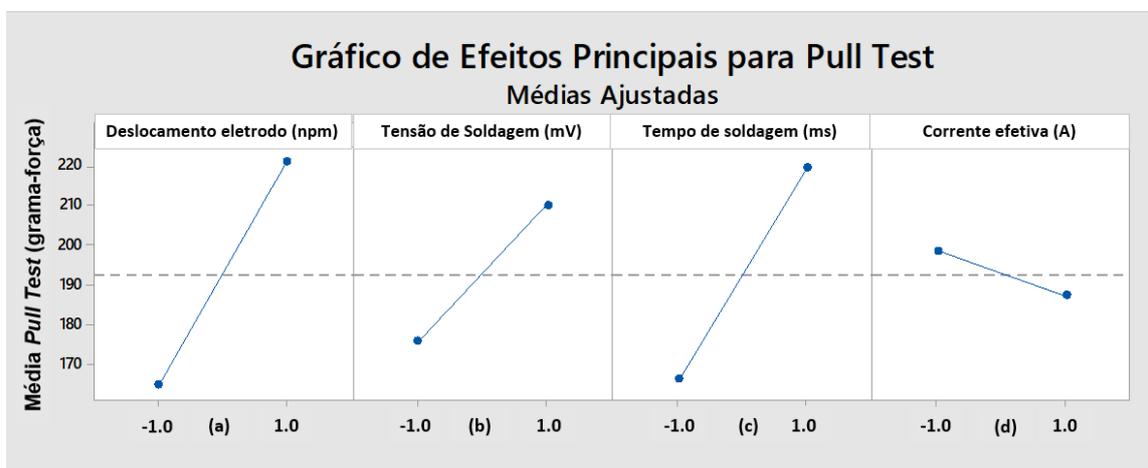
Fonte: Produção da Autora.

O gráfico acima foi obtido com auxílio do software estatístico MINITAB 17®.

No gráfico apresentado na Figura 7.9, os resíduos estão dispersos aleatoriamente em torno de zero, indicando uma variância constante dos resíduos. Os resíduos mostrados são independentes, pois não mostram tendências nem padrões, quando exibidos em ordem temporal. Sendo assim, não existe nenhuma evidência de que termos de erro estejam correlacionados entre si. O gráfico também não indica nenhum *outlier*.

A Figura 7.10 mostra os Gráficos dos Efeitos Principais para o *pull test*. Este gráfico analisa de forma isolada cada um dos parâmetros de soldagem, mantendo os demais constantes.

Figura 7.10 – Gráfico de Efeitos Principais para Teste de Tração.



Fonte: Produção da Autora.

O gráfico acima foi obtido com auxílio do software estatístico MINITAB 17®.

Analisando os quatro gráficos da Figura 7.10 observa-se que houve um efeito positivo para o deslocamento do eletrodo até a peça (Figura 7.10a), a tensão de soldagem (Figura 7.10b) e o tempo de soldagem (Figura 7.10c), ou seja, mantendo esses parâmetros em seus níveis máximos é possível maximizar a resposta do processo, obtendo valores maiores para o valor do *pull test*. Já a corrente efetiva de soldagem (Figura 7.10d) apresentou um efeito negativo, ou seja, quando o parâmetro é mantido em seu nível mínimo tem-se uma maior resposta de valor de *pull test*, para esta configuração experimental.

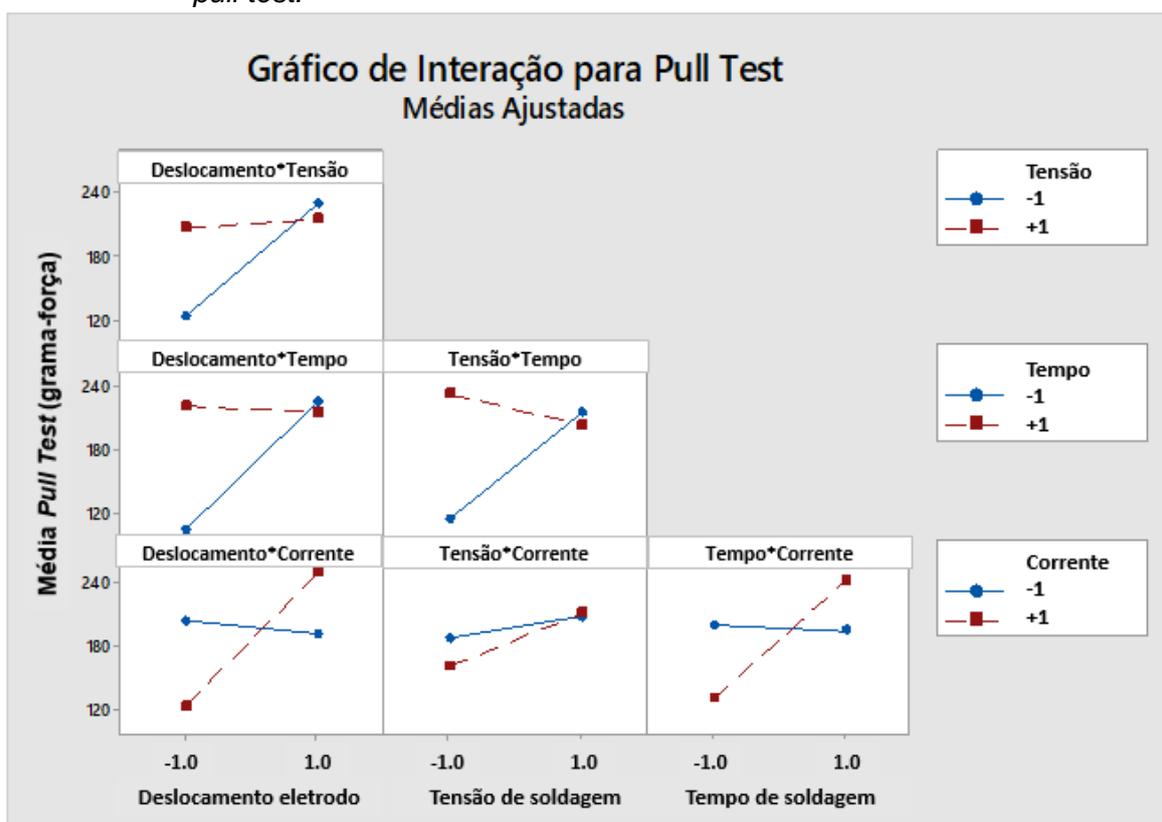
A leitura dos gráficos é feita com base na variação que a mudança do nível inferior para o superior da variável de entrada promove na variável de resposta; portanto, quanto maior for a variação na resposta, mais significativo será o fator em análise.

Para o deslocamento do eletrodo até a peça é possível observar que se ganha cerca de 60 gramas força quando este parâmetro se encontra no nível superior. Para o tempo de soldagem este ganho foi de 54 gramas força. Já para a tensão de soldagem, observou-se um ganho de 35 gramas força com o nível superior. A corrente efetiva de soldagem, apresentou uma variação de aproximadamente 10 gramas-força (a menos) quando se compara o nível superior com o nível inferior, conforme pode ser verificado na Figura 7.10.

O gráfico de interação em relação à variável de resposta é utilizado para avaliar interações entre 2 parâmetros. Para determinar se a interação é estatisticamente significativa, é preciso verificar o gráfico juntamente com o valor-p do termo de interação na análise da tabela de variância.

Os gráficos da Figura 7.11 trazem as interações entre os parâmetros de soldagem.

Figura 7.11 Gráficos de interações entre dois parâmetros de soldagem em relação ao *pull test*.



Fonte: Produção da Autora.

O gráfico acima foi obtido com auxílio do software estatístico MINITAB 17®.

Os gráficos de interação entre os parâmetros de soldagem em relação ao valor *pull test* apresentados na Figura 7.11 mostram as interações significativas entre os parâmetros de soldagem em relação ao valor de *pull test*, conforme análise de variância apresentada na Tabela 7.2. Desta forma, é possível verificar através destes gráficos que as interações importantes são: AB (deslocamento*tensão),

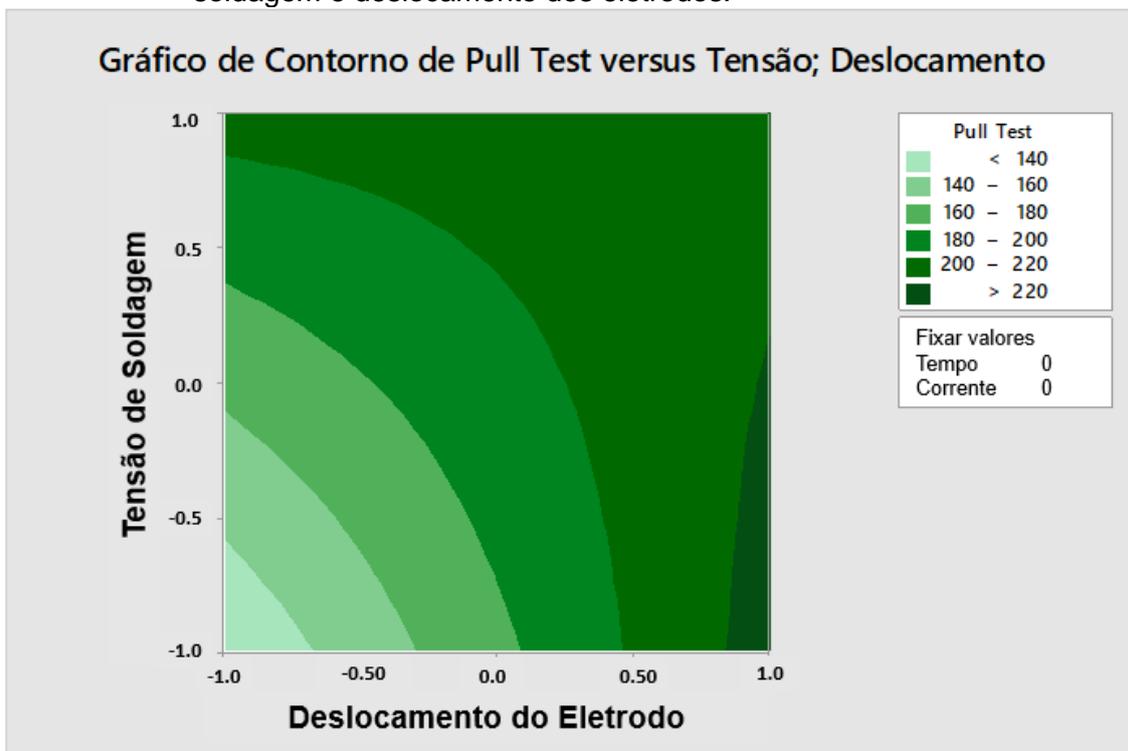
AC (deslocamento*tempo), BC (tensão*tempo), AD (deslocamento*corrente efetiva) e CD (tempo*corrente).

7.3.4 Gráficos de contorno

Os gráficos de contorno apresentados nas figuras seguintes são úteis para estabelecer valores de resposta e condições operacionais desejáveis. Estes gráficos ilustram como uma variável de resposta se relaciona com duas variáveis contínuas com base na equação do modelo, ou seja, representa em duas dimensões, a relação funcional entre a variável de respostas e as variáveis. Estes gráficos mostram apenas duas variáveis por vez, enquanto as demais variáveis que não aparecem nos gráficos são mantidas em um nível médio constante.

Para o gráfico de contorno (Figura 7.12) os valores do *pull test versus* tensão de soldagem e deslocamento dos eletrodos, o tempo de soldagem e a corrente efetiva de soldagem foram mantidos constantes em seus níveis médios.

Figura 7.12 – Gráfico de Contorno para os valores do *pull test* versus tensão de soldagem e deslocamento dos eletrodos.



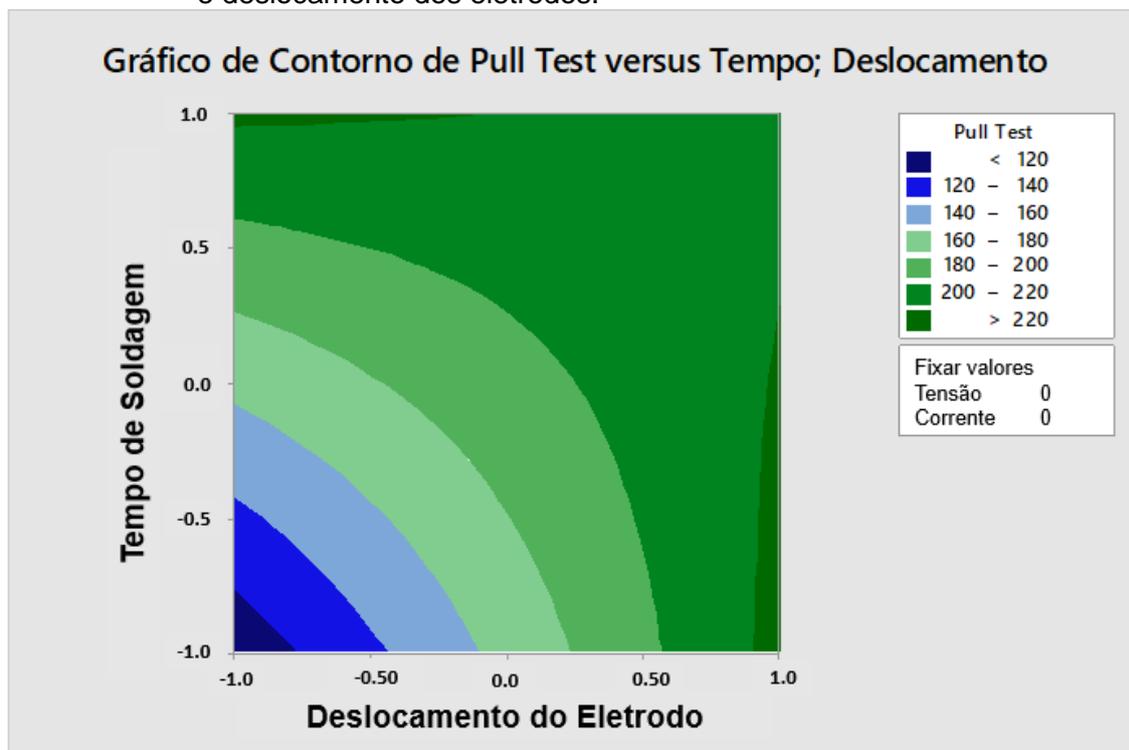
Fonte: Produção da Autora.

O gráfico acima foi obtido com auxílio do software estatístico MINITAB 17®.

Assim, para maximizar o valor do *pull test* é recomendado que a tensão de soldagem fique em seu nível médio, já o deslocamento dos eletrodos em seu nível máximo, alcançando desta forma, valores maiores para o valor do *pull test*. Esta região no gráfico é representada pela cor verde mais escura (localizada no canto inferior direito do gráfico).

Para o gráfico de contorno (Figura 7.13) os valores do *pull test* versus tempo de soldagem e deslocamento dos eletrodos, a tensão de soldagem e a corrente efetiva de soldagem foram mantidas constantes em seus níveis médios.

Figura 7.13 – Gráfico de Contorno para os valores do *pull test* versus tempo de soldagem e deslocamento dos eletrodos.



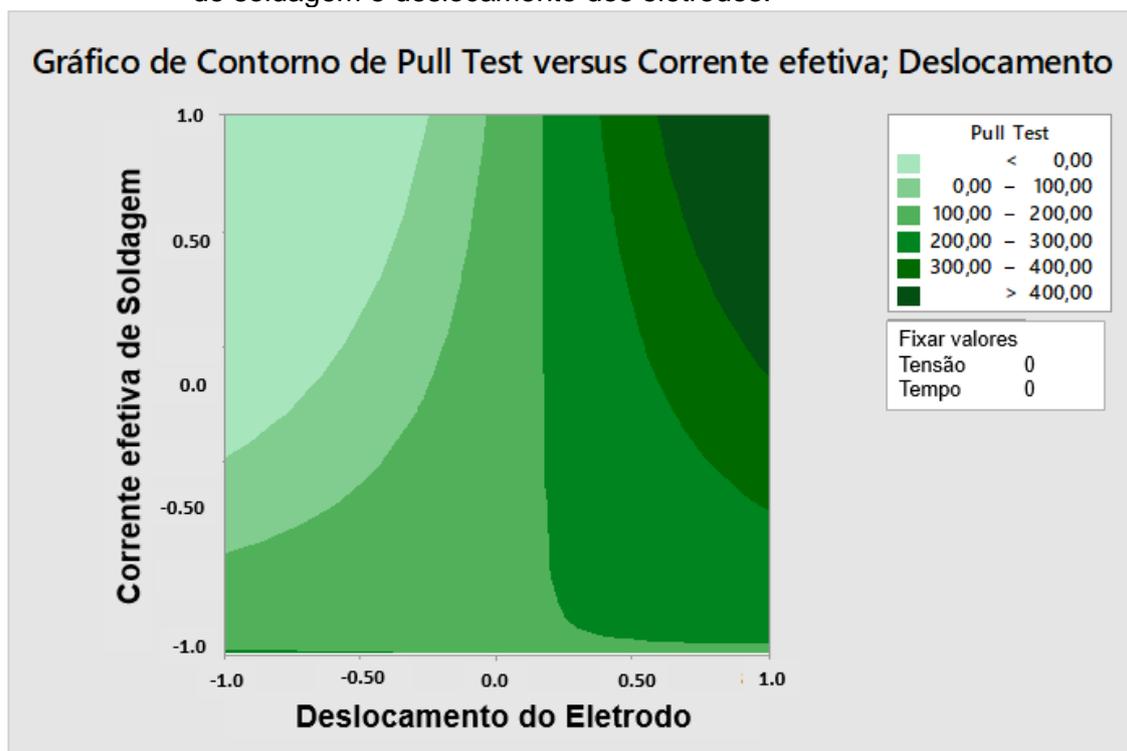
Fonte: Produção da Autora.

O gráfico acima foi obtido com auxílio do software estatístico MINITAB 17®.

Na Figura 7.13, para maximizar o valor do *pull test* é recomendado que o tempo de soldagem permaneça em seu nível máximo e o deslocamento dos eletrodos em seu nível mínimo, ou tempo de soldagem permaneça em seu nível mínimo e o deslocamento dos eletrodos em seu nível máximo. Desta forma, valores superiores a 220 gramas-força são encontrados no valor do *pull test*.

O gráfico de contorno (Figura 7.14) os valores do *pull test* versus corrente efetiva de soldagem e deslocamento dos eletrodos, a tensão de soldagem e o tempo de soldagem foram mantidas constantes em seus níveis médios.

Figura 7.14 – Gráfico de Contorno para os valores do *pull test* versus corrente efetiva de soldagem e deslocamento dos eletrodos.



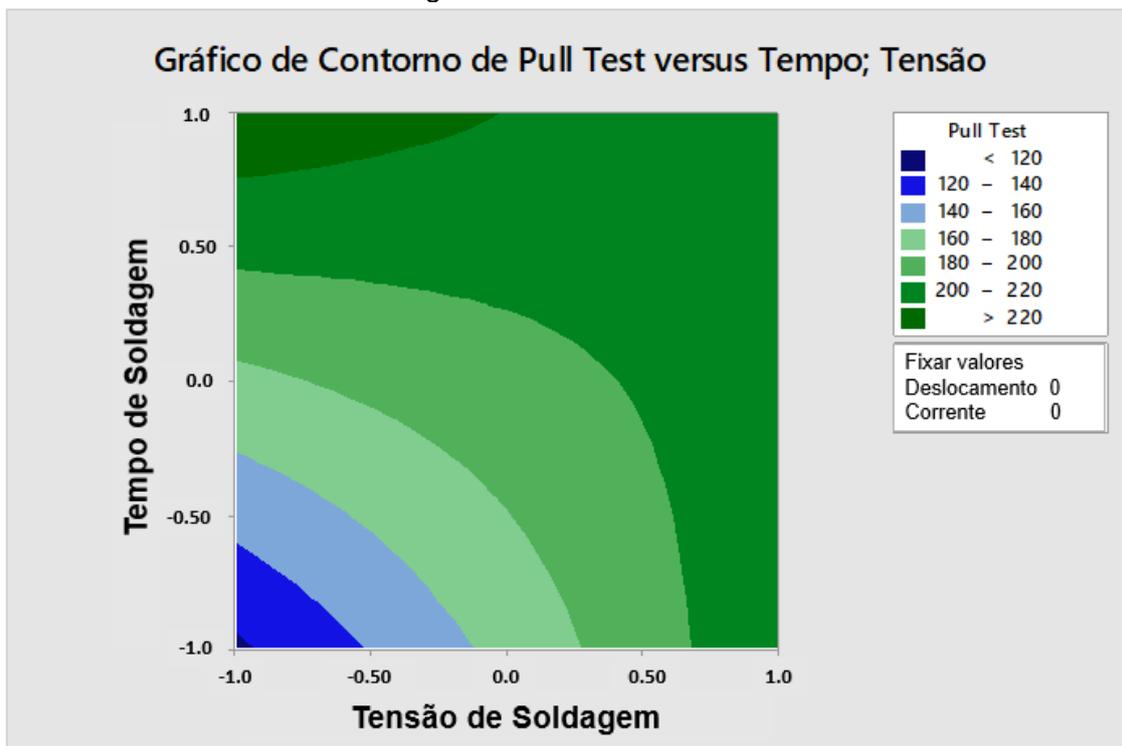
Fonte: Produção da Autora.

O gráfico acima foi obtido com auxílio do software estatístico MINITAB 17®.

Na Figura 7.14, para maximizar o valor do *pull test* é recomendado que corrente efetiva de soldagem e o deslocamento dos eletrodos permaneçam em seus níveis máximos, alcançando desta forma maiores valores para *pull test*. De acordo com o gráfico este valores podem alcançar mais de 400 gramas-força nesta combinação (corrente e deslocamento em seus níveis máximos), com a tensão e o tempo de soldagem fixos em níveis médios.

O gráfico de contorno da Figura 7.15 apresenta os valores do *pull test* versus tempo de soldagem e a tensão de soldagem, enquanto o deslocamento dos eletrodos e a corrente efetiva de soldagem foram mantidos em seus níveis médios.

Figura 7.15 – Gráfico de Contorno para os valores do *pull test* versus tempo de soldagem e tensão de soldagem.



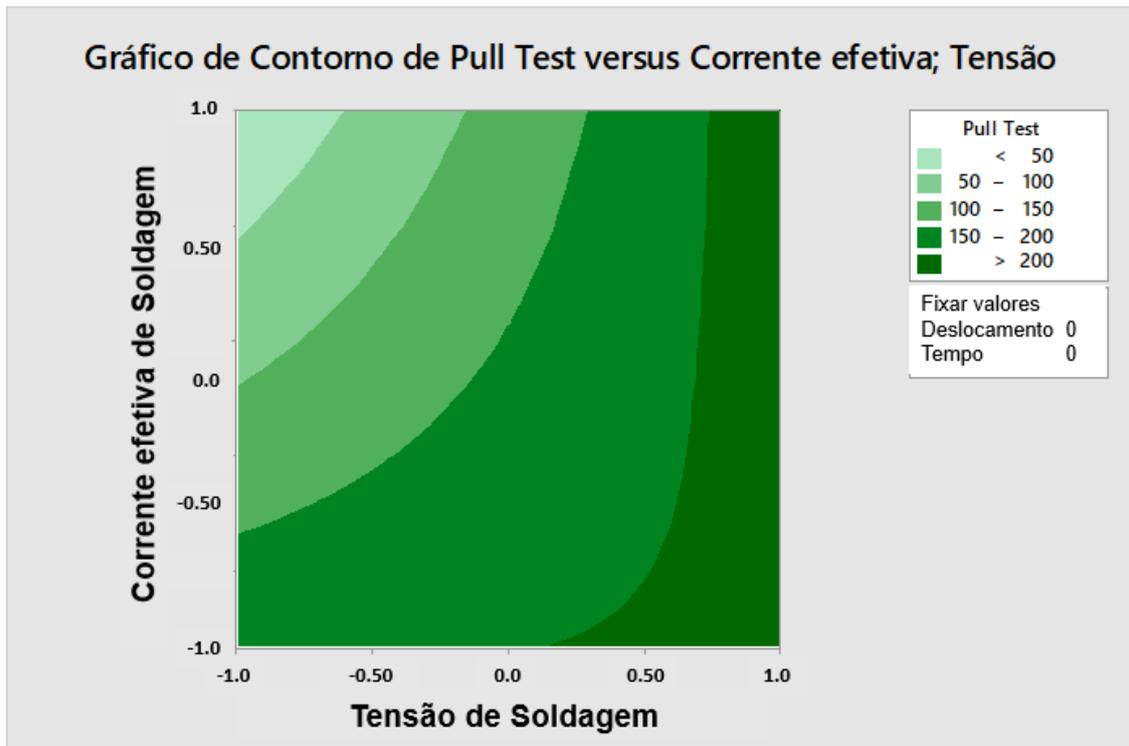
Fonte: Produção da Autora.

O gráfico acima foi obtido com auxílio do software estatístico MINITAB 17®.

Na Figura 7.15, para maximizar o valor do *pull test* é recomendado o tempo de soldagem permaneça em seu nível máximo e a tensão de soldagem variando entre seu nível mínimo e médio. Quando o tempo de soldagem e a tensão de soldagem são mantidos em seus níveis máximos o valor do *pull test* tem valores que variam de 200 a 220 gramas-força.

O gráfico de contorno da Figura 7.16 apresenta os valores do *pull test* versus corrente efetiva de soldagem e a tensão de soldagem, enquanto o deslocamento dos eletrodos e o tempo de soldagem foram mantidos em seus níveis médios.

Figura 7.16 – Gráfico de Contorno para os valores do *pull test* versus corrente efetiva de soldagem e tensão de soldagem.



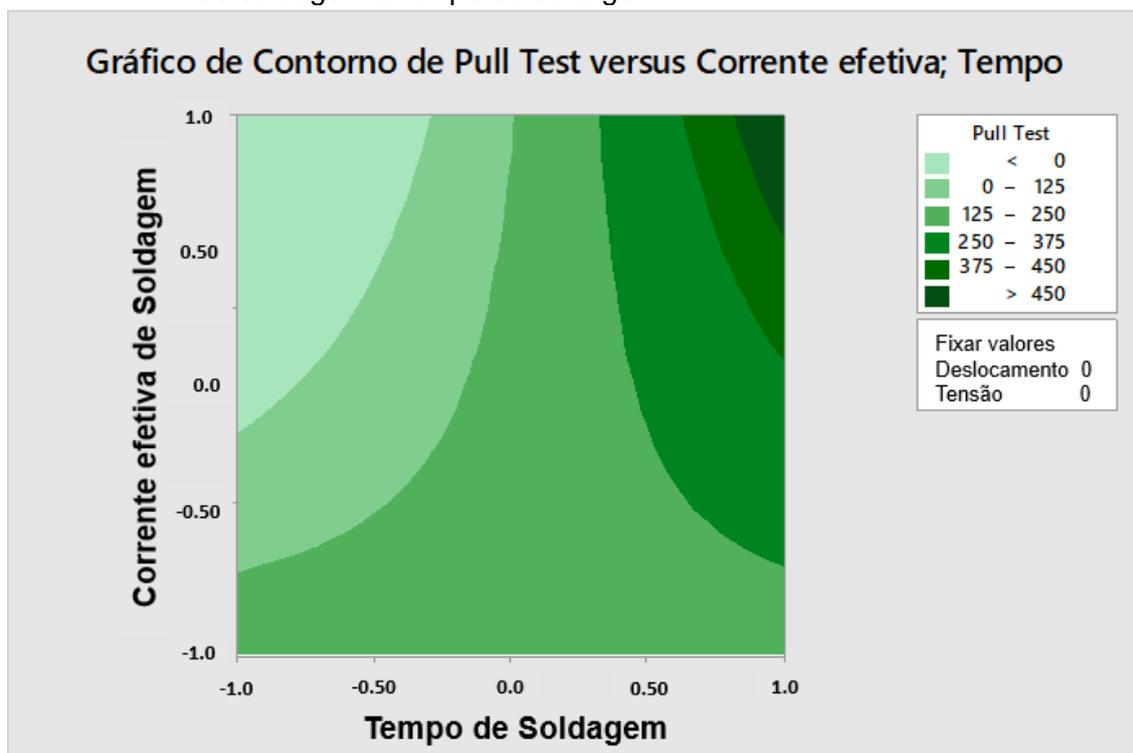
Fonte: Produção da Autora.

O gráfico acima foi obtido com auxílio do software estatístico MINITAB 17®.

De acordo com a Figura 7.16, para maximizar o valor do *pull test* a corrente de soldagem pode variar do nível mínimo ao máximo desde que a tensão de soldagem permaneça no nível máximo. Quando esta configuração é alcançada os valores de *pull test* estimados são maiores que 200 gramas-força, mantendo o deslocamento dos eletrodos e o tempo de soldagem em níveis médios.

O gráfico de contorno da Figura 7.17 apresenta os valores do *pull test* versus a corrente efetiva de soldagem e o tempo de soldagem, enquanto o deslocamento dos eletrodos e a tensão de soldagem foram mantidos em seus níveis médios.

Figura 7.17 – Gráfico de Contorno para os valores do *pull test* versus corrente efetiva de soldagem e tempo de soldagem.



Fonte: Produção da Autora.

O gráfico acima foi obtido com auxílio do software estatístico MINITAB 17®.

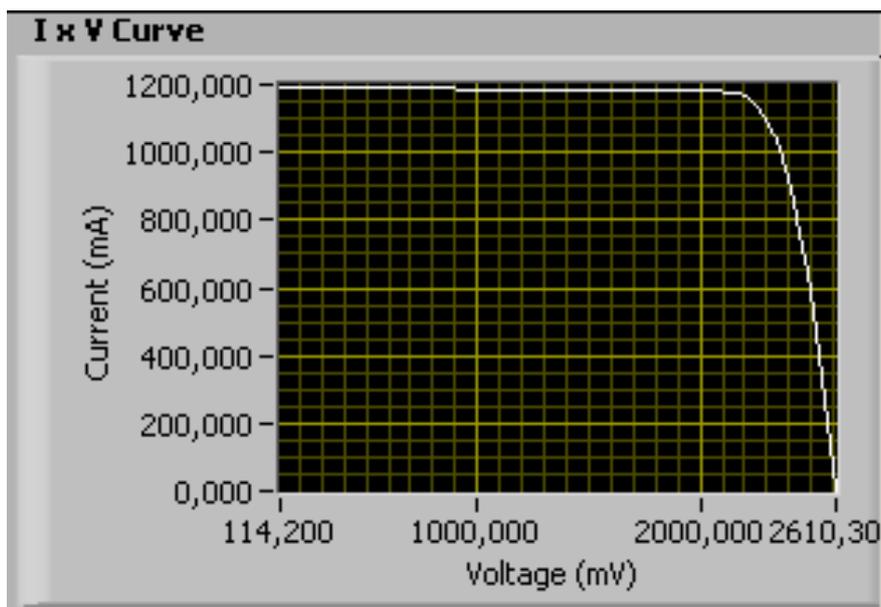
Analisando a Figura 7.17, para maximizar o valor do *pull test* é visto que a corrente efetiva de soldagem deve estar em seu nível máximo, assim como o tempo de soldagem, mantendo o deslocamento dos eletrodos e a tensão de soldagem constantes nos níveis médios. Com esta configuração os valores de *pull test* estimados são superiores a 450 gramas-força.

7.3.5 Resultado das Curvas I x V

Nas Figuras 7.18 - 7.30 a seguir são apresentados os gráficos com as curvas I x V (corrente x tensão) das células solares realizadas durante o experimento, através de um simulador solar. Lembrando que foi feito um levantamento da curva I x V antes do processo de soldagem; e as demais, após cada 4 tratamentos (quatro pontos de solda). A Figura 7.18 mostra a curva I x V da célula solar antes do processo de soldagem dos interconectores.

O simulador solar permite produzir em laboratório as condições de iluminação da natural da luz solar. As condições são basicamente: a intensidade, o espectro, a uniformidade e a estabilidade temporal. As informações pertinentes ao simulador utilizado para levantamento das curvas I x V apresentadas nesta Dissertação estão no Anexo B.

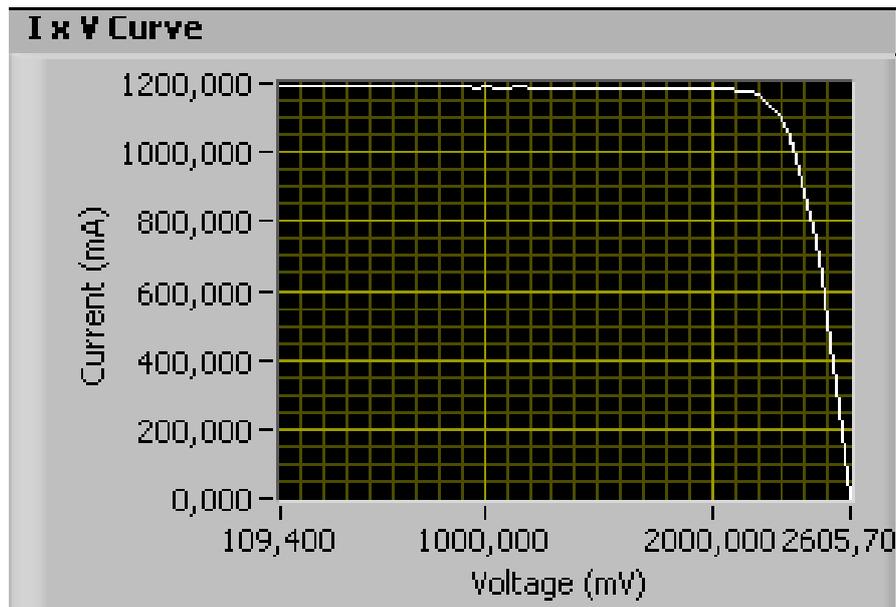
Figura 7.18 – Curva I x V antes do processo de soldagem dos interconectores.



Fonte: Orbital Engenharia (2021).

A Figura 7.19 mostra a curva I x V da célula solar após a soldagem dos quatro primeiros pontos de solda do processo de soldagem identificados na Tabela 6.2.

Figura 7.19 – Curva I x V após 4 pontos de solda.

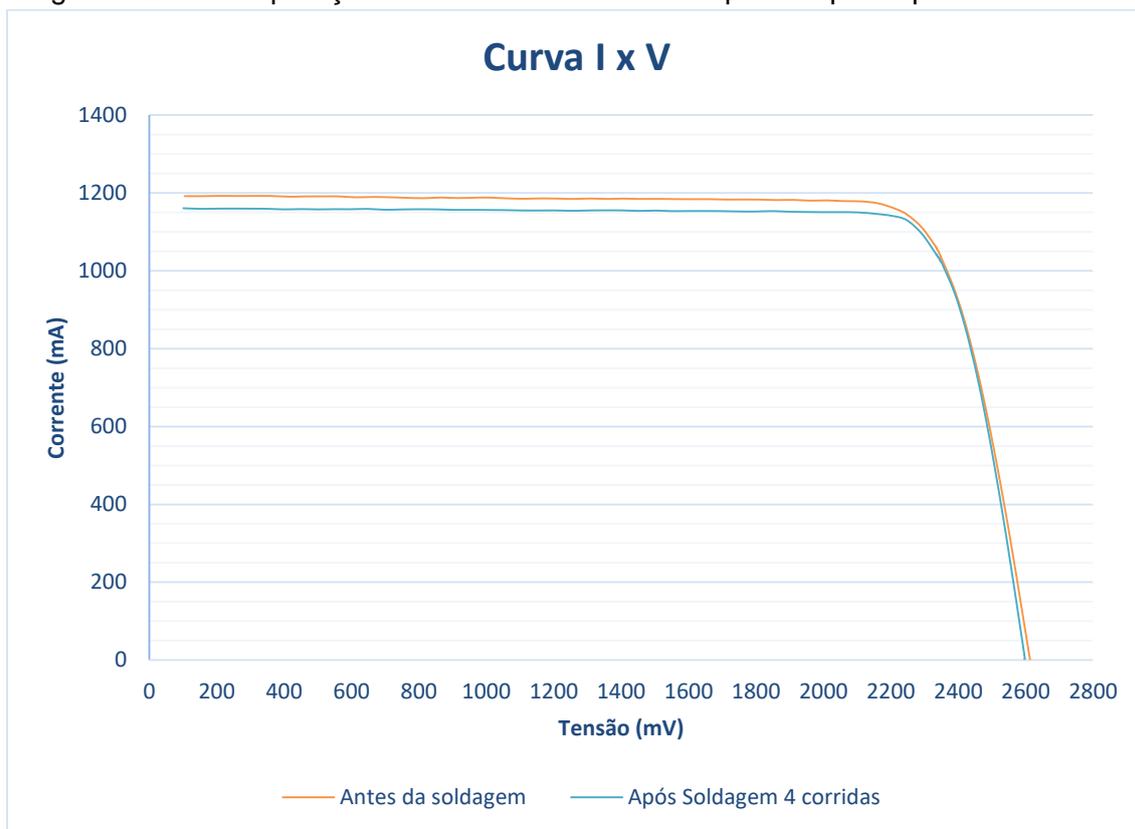


Fonte: Orbital Engenharia (2021).

O processo de soldagem não deve degradar a corrente elétrica fornecida pela célula solar, na tensão de máxima potência, em mais que 2% (variação na medida que pode ocorrer usando o simulador solar). Esta condição sendo atendida (variação menor que 2% antes e após o processo de soldagem), ela garante que os parâmetros de soldagem utilizados foram adequados e não causaram danos às propriedades elétricas das células.

A Figura 7.20 compara as curvas I x V (antes e após os 4 pontos de solda na mesma célula).

Figura 7.20 – Comparação das curvas I x V antes e após os quatro pontos de solda.



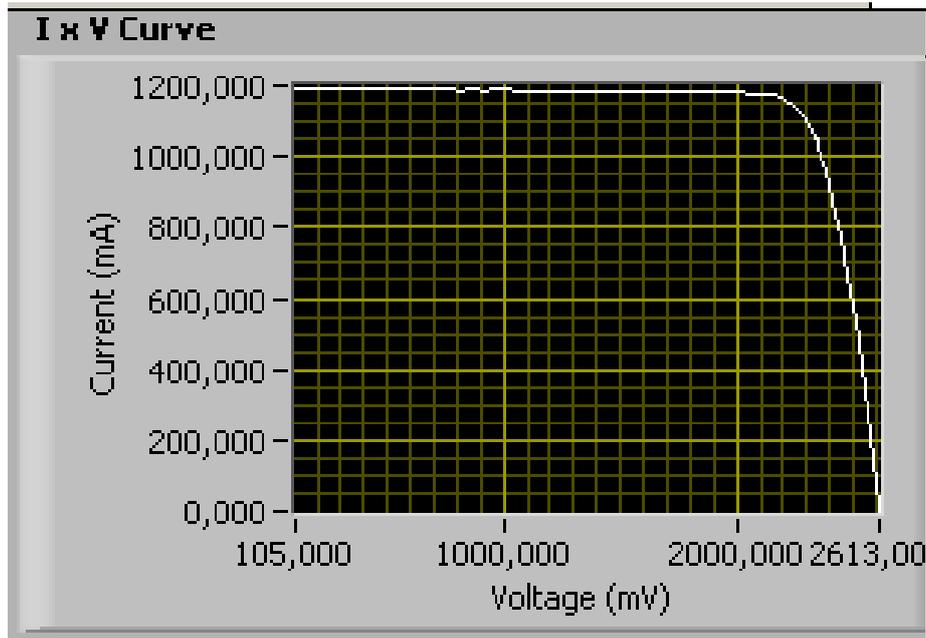
Fonte: Produção da autora.

Conforme observado no gráfico da Figura 7.20, as duas curvas mostradas, quando comparadas, demonstram que não ocorreram danos nas propriedades elétrica da célula solar após o processo de soldagem das interconexões, pois são aproximadamente iguais.

A tensão máxima de potência da célula solar antes do processo de soldagem foi de 2349,3 mV. Após a soldagem foi de 2349,5 mV. Sendo assim, a variação na tensão máxima de potência foi de 0,0085% para mais. Os dados de tensão máxima de potência foram obtidos através do software que controla o simulador solar.

A Figura 7.21 mostra a curva I x V da célula solar após mais quatro pontos de solda, totalizando 8 tratamentos.

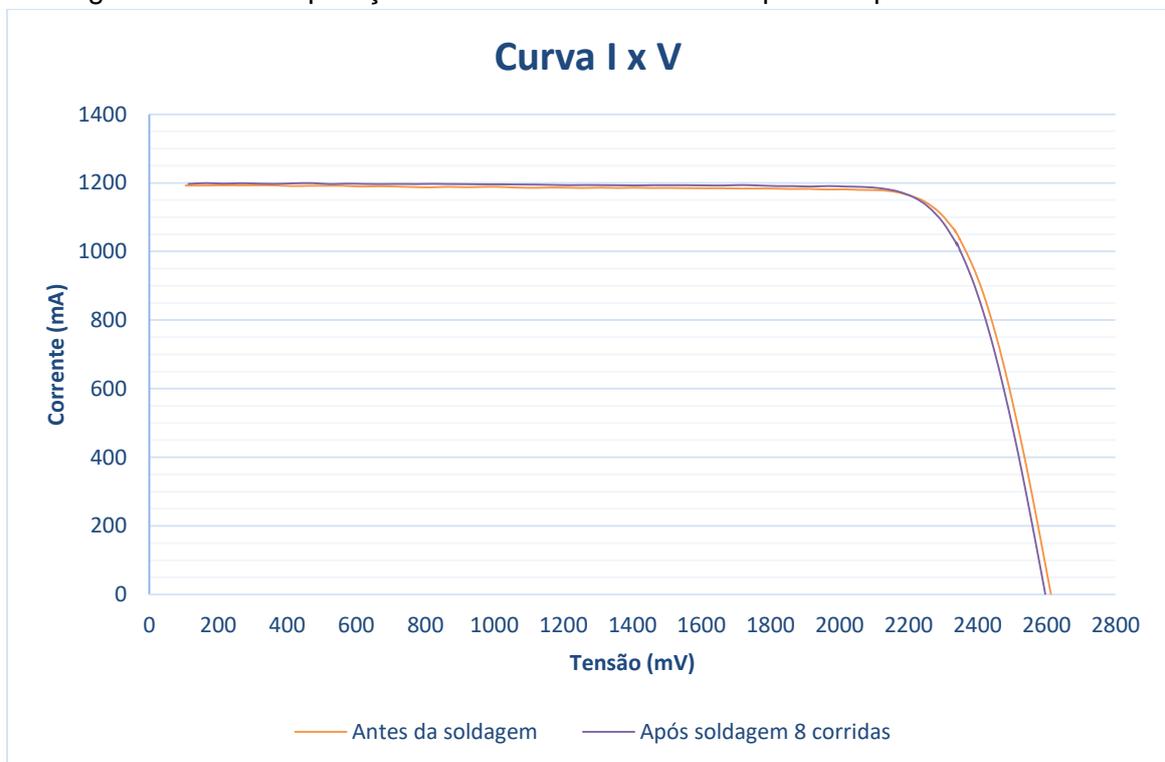
Figura 7.21 – Curva I x V após oito pontos de solda.



Fonte: Orbital Engenharia (2021).

A Figura 7.22 compara as curvas I x V antes e após 8 pontos de solda na mesma célula.

Figura 7.22 – Comparação das curvas I x V antes e após oito pontos de solda.



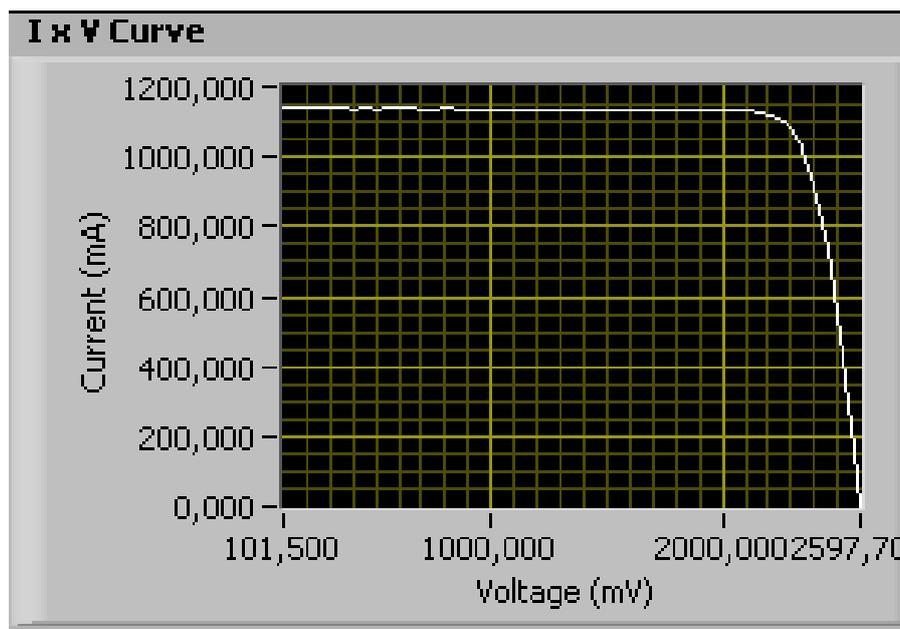
Fonte: Produção da autora.

Conforme observado no gráfico da Figura 7.22, as duas curvas mostradas demonstram que não ocorreram danos nas propriedades elétricas da célula solar após o processo de soldagem das interconexões, pois, são aproximadamente iguais quando comparadas.

A tensão máxima de potência da célula solar antes do processo de soldagem foi de 2349,3 mV. Após a soldagem foi de 2347,8 mV. Sendo assim, a variação na tensão máxima de potência foi de 0,0638 % para menos. Os dados de tensão máxima de potência foram obtidos através do software que controla o simulador solar.

A Figura 7.23 mostra a curva I x V da célula solar depois da soldagem de mais quatro pontos de solda, totalizando 12 tratamentos.

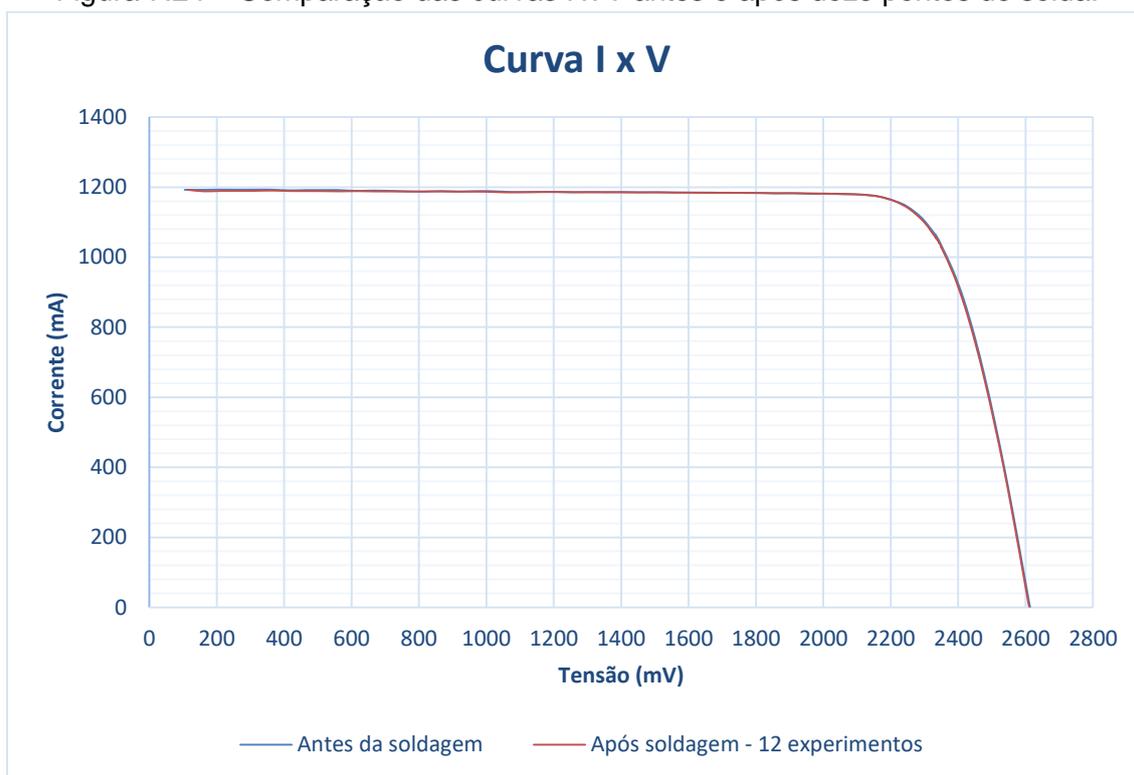
Figura 7.23 – Curva I x V após doze pontos de solda.



Fonte: Orbital Engenharia (2021).

A Figura 7.24 compara as curvas I x V antes e após 12 pontos de solda na mesma célula.

Figura 7.24 – Comparação das curvas I x V antes e após doze pontos de solda.



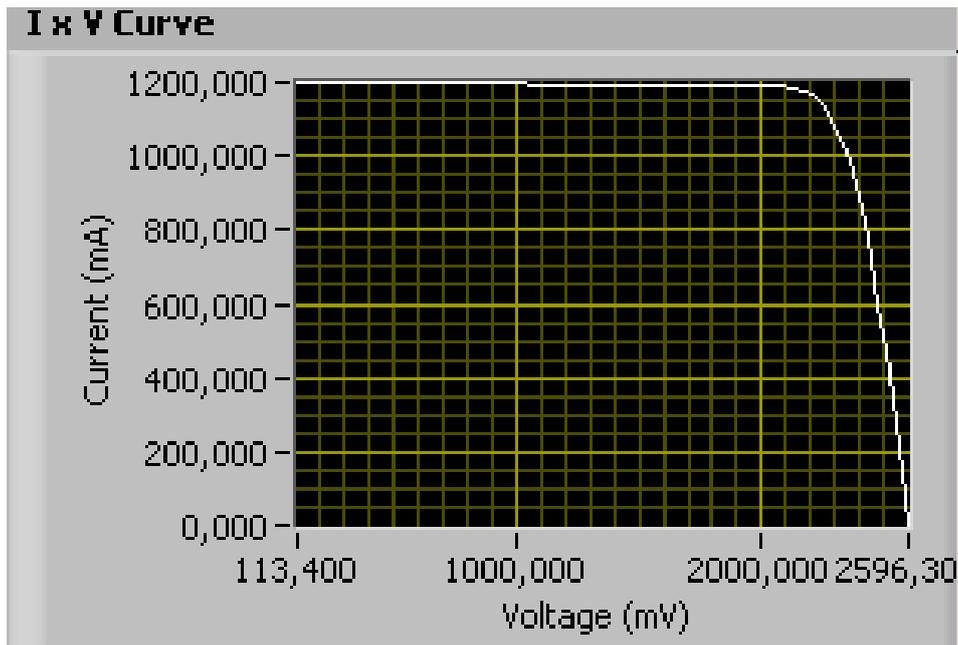
Fonte: Produção da autora.

Conforme observado no gráfico da Figura 7.24, as duas curvas mostradas demonstram que não ocorreram danos nas propriedades elétricas da célula solar após o processo de soldagem das interconexões, pois, são aproximadamente iguais quando comparadas.

A tensão máxima de potência da célula solar antes do processo de soldagem foi de 2349,3 mV. Após a soldagem foi de 2344,5 mV. Sendo assim, a variação na tensão máxima de potência foi de 0,2043 % para menos. Os dados de tensão máxima de potência foram obtidos através do software que controla o simulador solar.

A Figura 7.25 mostra a curva I x V da célula solar após mais quatro pontos de solda, totalizando 16 tratamentos.

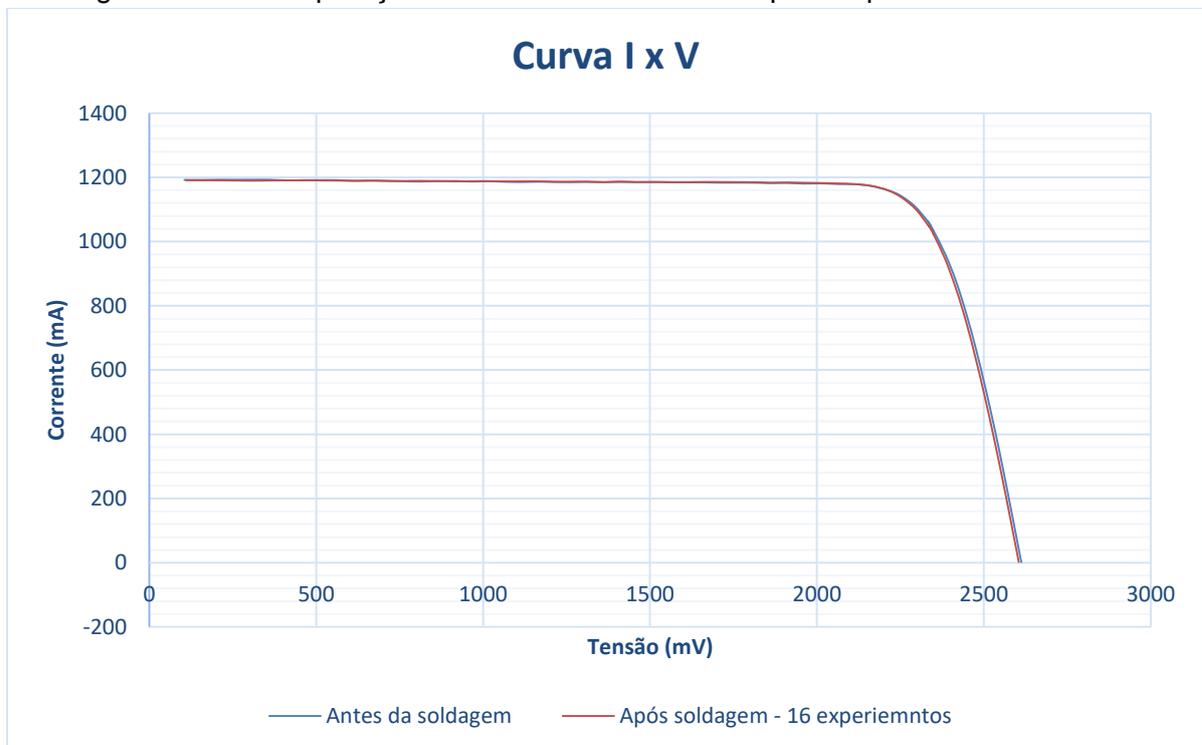
Figura 7.25 – Curva I x V após 16 pontos de solda.



Fonte: Orbital Engenharia (2021).

A Figura 7.26 compara as curvas I x V antes da soldagem e após 16 pontos de solda.

Figura 7.26 – Comparação das curvas I x V antes e após 16 pontos de solda.



Fonte: Produção da autora.

No gráfico da Figura 7.26, as duas curvas mostradas demonstraram que não ocorreram danos nas propriedades elétricas da célula solar após o processo de soldagem das interconexões, pois, são aproximadamente iguais quando comparadas.

A tensão máxima de potência da célula solar antes do processo de soldagem foi de 2349,3 mV. Após a soldagem foi de 2348,6 mV. Sendo assim, a variação na tensão máxima de potência foi de 0,0553 % para menos. Os dados de tensão máxima de potência foram obtidos através do software que controla o simulador solar.

Os demais gráficos referentes às curvas $I \times V$ realizadas durante os 32 tratamentos do experimento são apresentados no Apêndice C.

7.3.6 Otimização da resposta

A última análise a ser realizada foi procurar a combinação de parâmetros de soldagem que otimizasse a resposta, ou seja, a combinação que oferecesse um maior valor de *pull test*.

A *Desirability* (D) possui uma amplitude que varia de 0 a 1. O valor igual a 1 representa o caso ideal; já o valor 0 indica que uma ou mais respostas estão fora dos limites aceitáveis.

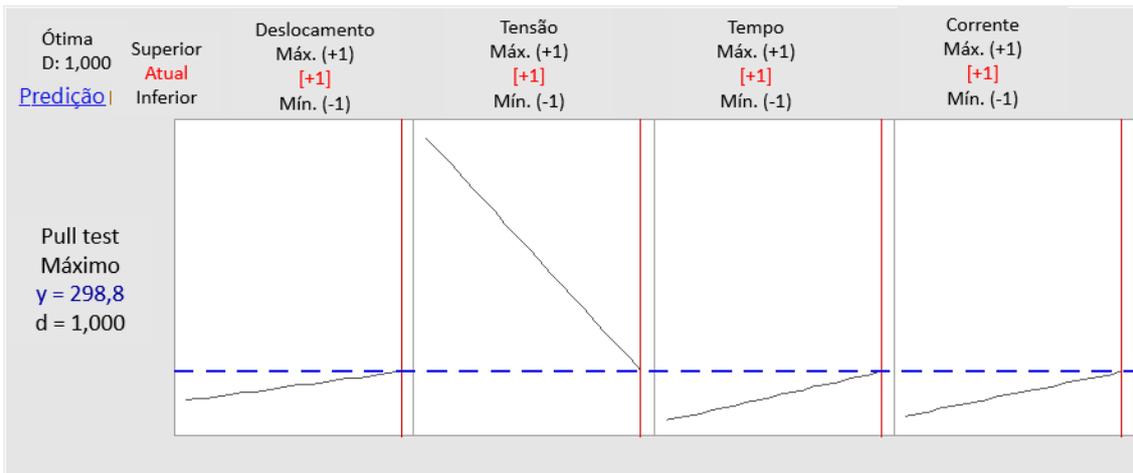
Para esta Dissertação, são obtidas a *Desirability* individual e composta.

No gráfico de otimização de resposta baseada nas 32 amostras (Figura 7.27), cada coluna do gráfico corresponde a uma variável; a linha superior do gráfico corresponde à *Desirability* composta, se mostrada. Cada linha restante corresponde a uma variável de resposta. Cada célula do gráfico mostra como a *Desirability* composta ou a variável de resposta correspondente muda como uma função de um dos fatores, enquanto todas as outras variáveis permanecem fixas. Os números exibidos na parte superior da coluna mostram as configurações atuais de variáveis (em vermelho) e as configurações alta e baixa de variáveis no projeto experimental. As linhas vermelhas verticais no gráfico representam as configurações atuais. As linhas horizontais azuis representam os valores de

resposta atuais. As regiões em cinza indicam onde a resposta correspondente tem *Desirability* igual a zero.

Na Figura 7.27 o gráfico de otimização é apresentado com base nos dados do experimento de 32 tratamentos.

Figura 7.27 – Gráfico de Otimização baseado no experimento de 32 tratamentos.



Fonte: Produção da Autora.

O gráfico acima foi obtido com auxílio do software estatístico MINITAB 17®.

A Figura 7.27 mostra a otimização da *Desirability* geral do *pull test* (D=1,000). Como só temos uma resposta, a *Desirability* geral é a mesma que a *Desirability* individual. No gráfico é possível observar que a otimização dos pontos de solda, com um *pull test* máximo de 299 gramas-força, pode ser alcançada com a configuração +1 para deslocamento dos eletrodos, +1 para tensão de soldagem e +1 para o tempo de soldagem. A corrente de soldagem que é depende da tensão de soldagem aplicada deve permanecer no seu nível +1.

A Tabela 7.8 ilustra de forma mais simples a resposta de otimização encontrada no gráfico de Figura 7.27.

Tabela 7.8 – Predição para máximo valor de *pull test*.

Predição para Pull Test

Predição de Múltiplas Respostas

Variável	Configuração
Deslocamento	+1
Tensão	+1
Tempo	+1
Corrente efetiva	+1

Resposta	Ajuste	EP do Ajustado	IC de 95%	IP de 95%
Pull Test	298,8	36,2	(222,1; 375,5)	(190,2; 407,3)

Fonte: Produção da Autora.

A tabela acima foi obtida com auxílio do software estatístico MINITAB 17®.

Da Tabela 7.8, temos:

- O intervalo de confiança (IC) de 95%, com a amplitude de valores que podem conter a resposta média para uma combinação selecionada de configurações de variável, que varia de 222,1 gramas força até 375,5 gramas força.
- O intervalo de predição (IP) também de 95%, com a amplitude de valores que pode conter uma única resposta futura para uma combinação selecionada de configurações de variável, que varia de 190,2 gramas força até 407,3 gramas força.

O intervalo de predição é sempre mais amplo do que o intervalo de confiança correspondente, devido à incerteza adicional envolvida na predição de um único valor de resposta *versus* a resposta média.

Vale ressaltar que esta configuração dos parâmetros de soldagem que obteve esta resposta de otimização é referente ao planejamento de experimentos executado para esta Dissertação, ou seja, baseada nas 32 amostras. Sendo assim, pode haver mais de uma área ótima.

A Tabela 7.9 apresenta a comparação entre o valor experimental do *pull test* obtido durante a fase de execução do experimento em relação ao valor estimado

do *pull test* por meio da resposta de otimização, as diferenças entre os valores estimados e experimentais e os valores relativos.

Tabela 7.9 – Comparativos entre valores de *pull test* obtidos no experimento *versus* valor de *pull test* estimado.

Tratamento	Valor exp. <i>Pull Test</i> (gf)	Valor est. <i>Pull Test</i> (gf)	Diferença entre estimado e experimental (gf)	Valor relativo
04	297	299	$299 - 297 = 2$	$\frac{299 - 297}{297} = 0,007$
12	209	299	$299 - 209 = 90$	$\frac{299 - 209}{209} = 0,431$
20	180	299	$299 - 180 = 119$	$\frac{299 - 180}{180} = 0,661$
28	235	299	$299 - 235 = 64$	$\frac{299 - 235}{235} = 0,272$

Fonte: Produção da Autora.

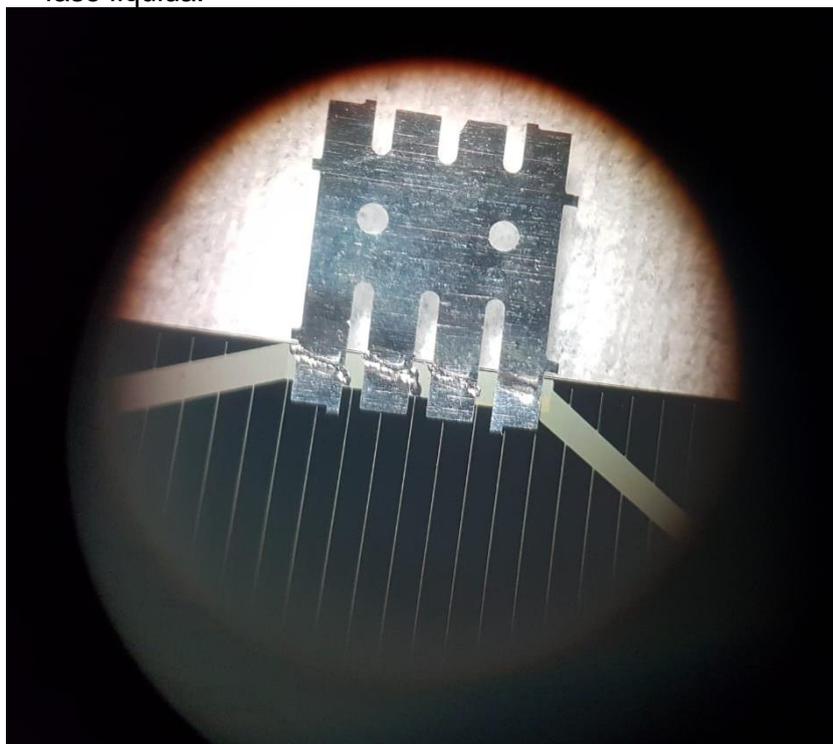
7.4 Comentários sobre os resultados e as análises sobre a soldagem dos interconectores às células solares.

1. Após as análises estatísticas, com diversos gráficos ilustrando o comportamento dos parâmetros de soldagem, foi possível observar que o método escolhido (Projeto e Análise de Experimentos) identificou um ponto de otimização com os parâmetros adequados para o processo considerando a amostra analisada.
2. Até o presente momento, não foram encontrados na literatura, estudos semelhantes que busquem avaliar as influências dos parâmetros de soldagem na qualidade do ponto de solda obtido, aplicando o método de Projeto e Análise de Experimentos. Na busca por referências na literatura que tratam do emprego do método de Projeto e Análise de Experimentos

não foi encontrada nenhuma referência aplicada para o problema proposto.

3. Por meio das análises estatísticas, foi possível identificar quais parâmetros de soldagem exercem uma grande influência na qualidade da solda na configuração deste experimento. Esse tipo de processo é bem delicado quando comparado aos demais processos de soldagem a ponto por resistência elétrica. Assim, pequenas variações na tensão e tempo de soldagem podem afetar de forma significativa o desempenho elétrico da célula solar, bem como um aumento do deslocamento do eletrodo, que resulta na pressão destes nas peças de trabalho, podendo ocasionar trincas. Isso ficou constatado durante a fase de determinação dos parâmetros de soldagem que seriam aplicados ao experimento.
4. Pequenas variações na tensão de soldagem, combinadas com tempo de soldagem, foram responsáveis por pontos de solda onde ocorreram “*spikes*” (nome dado ao fenômeno ocorrido), ou seja, o ponto de solda se formou, porém, foi possível verificar que na região da lente de solda ocorreu a expulsão de parte da fase líquida que se formou durante a soldagem propriamente dita.
5. Durante a fase de experimentação foi possível observar quando ocorreu a expulsão do material, pois, no momento que o eletrodo toca a peça e a corrente é liberada, ocorrem faíscas. Após a soldagem, é possível verificar que os pontos de solda ficam com aparência diferente dos pontos normais. Na Figura 7.28 são apresentados pontos de solda entre o interconector e da célula solar onde ocorreu a expulsão do material.

Figura 7.28 – Interconector soldado ao barramento da célula solar com expulsão da fase líquida.

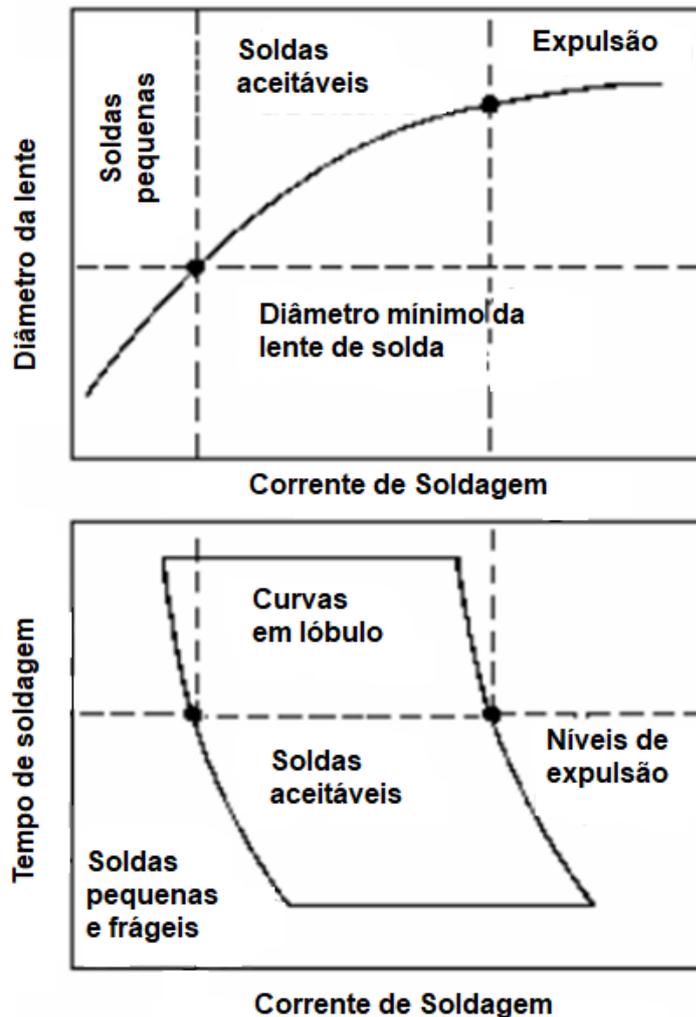


Fonte: Produção da autora.

6. A imagem da Figura 7.28 acima, com aumento de 20X, permite ver que a fase líquida foi expulsa durante a formação do ponto de solda. Esse fenômeno ocorre quando a corrente de soldagem excede um determinado nível, o que contribui para uma maior geração de calor no ponto de solda, expulsando a fase líquida.

A Figura 7.29 apresenta um gráfico da curva de Soldabilidade e os níveis de corrente de soldagem inferior e superior *versus* o diâmetro da lente de solda e o tempo de soldagem.

Figura 7.29 – Curva de Soldabilidade.



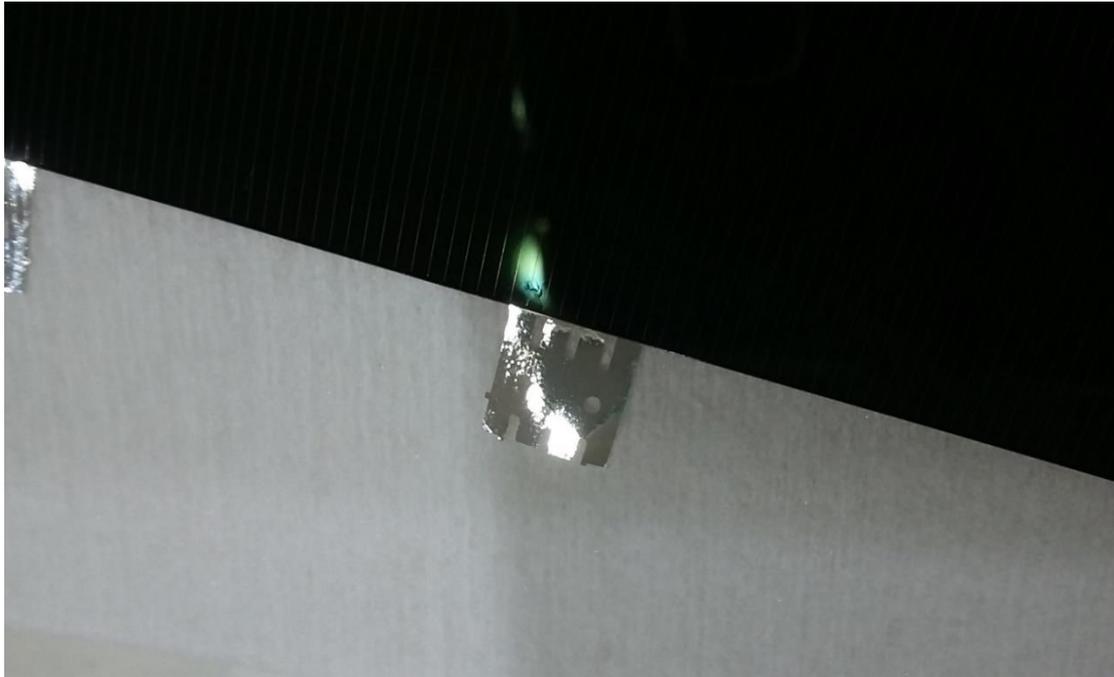
Fonte: Adaptado de *Metals Handbook* (1983).

No gráfico acima é possível verificar que conforme a corrente de soldagem tem seu nível aumentado, o diâmetro da lente de solda cresce. Com isto, pode ocorrer a expulsão do material.

Em alguns casos, quando existe a expulsão da fase líquida devido a uma alta corrente de soldagem, os eletrodos podem penetrar profundamente nas peças de trabalho causando a deformação plástica na região. Além da deformação plástica, esse fenômeno diminui a vida útil dos eletrodos, queima suas pontas e gerar pontos de solda de baixa qualidade. Já no caso de aplicação desta Dissertação, podem ocorrer danos elétricos, trincas ou até mesmo a quebra da célula solar.

7. A Figura 7.30, mostra como o deslocamento do eletrodo até a peça (caracterizado como pressão dos eletrodos) deve ser bem controlado durante o processo de soldagem. Caso contrário, poderá ocasionar danos à célula solar.

Figura 7.30 – Detalhe na célula solar mostrando como a pressão do eletrodo pode ocasionar danos.



Fonte: Produção da autora.

Na Figura 7.30, é possível verificar que houve a deformação da célula solar. Porém, após inspeção no simulador solar ficou constatado que foi apenas uma deformação mecânica, pois as propriedades elétricas da célula solar estavam íntegras. Esta deformação ocorreu na fase de determinação dos parâmetros de soldagem, não afetando o experimento desta pesquisa.

8. Baseada na experiência durante o levantamento dos parâmetros de soldagem, esse tipo de deformação poderia ter ocasionado trinca na célula solar, e, conseqüentemente, a sua inutilização.
9. Mesmo com a técnica de Projeto e Análise de Experimentos, tendo alcançado os resultados próximos aos esperados, foi possível conhecer o comportamento dos parâmetros de soldagem; e, por meio do monitoramento dos parâmetros não controláveis, estabelecer um controle

ou mesmo uma relação que pode avaliar a qualidade do ponto de solda de forma não destrutiva.

10. Um parâmetro que pode servir como base para avaliar a qualidade da solda é a carga elétrica envolvida no processo de soldagem. Notou-se que esta medida tem forte relação com os valores encontrados no *pull test*. Por exemplo:

- No primeiro dia de experimentação, para os quatro primeiros tratamentos observou-se que, quando a carga elétrica estava acima de 110 As, o valor do *pull test* apresentou um valor dentro do aceitável, ou seja, acima de 160 gramas força (~1,6 N). Isso também pôde ser constatado durante a determinação dos parâmetros considerados no experimento.
- No segundo dia de experimentação, foram conduzidos mais 12 tratamentos. Utilizando os mesmos parâmetros de soldagem estabelecidos no primeiro dia, notou-se que o valor da carga elétrica que resultava em um valor de *pull test* aceitável, era menor, ou seja, valores de carga elétrica acima de 59 As satisfaziam o requisito de força de arrancamento (ruptura) da solda maior que 160 gramas força ou ~1.6 N.
- No terceiro dia de experimentação, os demais tratamentos foram concluídos, porém dois pontos chamaram a atenção (tratamentos 30 e 32). Esses pontos mantiveram a carga elétrica envolvida no processo acima de 60 As, mas apresentaram valores de *pull test* inferiores ao requisito mínimo. Os quatro últimos tratamentos foram realizados em uma nova célula. Sendo assim, a espessura desta célula poderia ser alguns microns menor que a anterior; porém, como as células não foram medidas antes do experimento, essa hipótese não pôde ser confirmada.

Observando todos os dados coletados, é possível afirmar que existe uma relação entre a carga elétrica envolvida no processo e a resistência mecânica do ponto de solda. Desta forma, com o monitoramento deste parâmetro, é aceitável

afirmar que determinado ponto de solda que esteja acima de determinada carga elétrica de soldagem apresente uma boa resistência à tração. Mas essa afirmação só terá peso quando testes destrutivos forem realizados para assegurar que isso é válido.

11. Os gráficos de levantamento das curvas $I \times V$ revelaram que os parâmetros de soldagem aplicados no experimento foram adequados, visto que não ocorreram danos nas propriedades elétricas das células solares utilizadas durante o planejamento de experimentos.

12. Desta forma, esta Dissertação realizou a determinação dos parâmetros de soldagem para interconectores de células solares aplicados em órbita GEO, que atenderam aos quatro primeiros requisitos abaixo:

- Resistência mecânica: a força mínima de ruptura para interconectores utilizados nesta pesquisa foi na maioria dos tratamentos maior que 160 gramas-força (ou $\sim 1,6$ N), com força de tração aplicada a 180° na direção do terminal de contato;
- Degradação elétrica: o processo de soldagem não degradou a corrente elétrica fornecida pela célula solar, quando medida a tensão de máxima potência, em mais que 2%; conforme observados nos gráficos de comparação da curva $I \times V$ antes e depois da soldagem.
- Aparência da solda: os pontos de solda não apresentaram evidências de áreas queimadas, delaminação da grade coletora da célula solar. Nesta pesquisa este item foi verificado por meio de inspeção visual de todos os pontos de soldas realizados nos experimentos.
- Força de contato dos eletrodos: foi ajustável de forma que os eletrodos não danificassem a superfície de contato da célula solar devido à pressão mecânica exercida durante a soldagem. As deformações devidas à pressão excessiva dos eletrodos não foram aparentes no experimento realizado.
- Resistência à fadiga térmica: as interconexões após passarem pelo processo de soldagem devem atender ao requisito de resistência

mecânica após submissão a ciclagem de temperatura; porém, devido ao tempo necessário para obtenção desses dados, esta pesquisa de mestrado não contemplou este tipo de análise, apenas foi mencionada como um dos requisitos necessários para atender a órbita GEO.

8 ESTUDO DE CASO: APLICAÇÃO DO PLANEJAMENTO E ANÁLISE DE EXPERIMENTOS NA SOLDAGEM DE CHAPAS METÁLICAS UTILIZADAS NA INDÚSTRIA AUTOMOBILÍSTICA

8.1 Objetivo

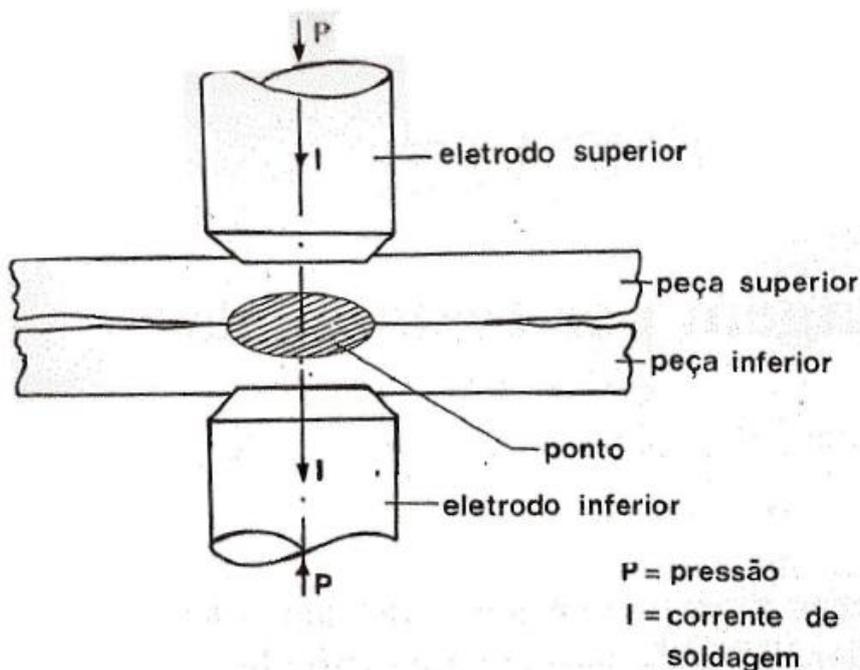
Este capítulo tem como objetivo aplicar o método de Projeto e Análise de Experimentos na soldagem a ponto por resistência elétrica utilizada para a união de chapas metálicas aplicadas na indústria automobilística. O capítulo está alinhado com a 4ª motivação – Exercitar a aplicação do método Projeto e Análise de Experimentos.

8.2 Estudo de Caso

Para a aplicação deste estudo de caso foram utilizados dados fornecidos pelo Sr. Fernando Ferraz Amaral, Mestre pela Universidade Federal de Itajubá. Os dados fornecidos são do processo de soldagem de chapas metálicas (espessura de 1 mm, de aço carbono galvanizado) utilizadas no setor automobilístico, por meio de soldagem a ponto por resistência elétrica.

A Figura 8.1, ilustra o processo de soldagem a ponto para a aplicação na área automotiva, onde os eletrodos são opostos. A resistência elétrica é dada pela junção de duas peças de trabalho sobrepostas. Essas peças são unidas por dois eletrodos, um inferior e outro superior; o calor é gerado através da passagem da corrente elétrica e da pressão exercida pelos eletrodos no ponto de soldagem. A fusão ocorre no ponto de contato entre as peças.

Figura 8.1 – Processo de soldagem a ponto por resistência elétrica.



Fonte: Turetta (2016).

A Tabela 8.1 apresenta os níveis de cada um dos parâmetros de soldagem a ponto fornecidos para esta análise.

Tabela 8.1 – Níveis dos parâmetros de soldagem a ponto.

Parâmetros	Nível inferior	Nível superior
Corrente de soldagem	86% (5,16kA)	88% (5,28kA)
Tempo de soldagem	10 ciclos	12 ciclos
Pressão de soldagem	3 bar	5 bar
Tempo de pré aquecimento	0	10c/50%

Fonte: Banco de dados fornecido pelo M.Sc. Fernando Ferraz Amaral.

Na Tabela 8.2, são apresentadas as combinações entre os parâmetros de soldagem apresentados na Tabela 8.1 anterior, com 32 tratamentos. A variável de resposta é a força máxima de resistência à tração, em Newtons.

Tabela 8.2 – Dados de soldagem a ponto, variável de resposta e tipo de rompimento.

Tratamento	Corrente	Tempo	Pressão	Pré aquec.	Força Máx. (N)	Tipo de Rompimento
1	86	10	3	0	3876	A
2	88	10	3	0	4059	A / R
3	86	12	3	0	4353	R
4	88	12	3	0	4364	A / R
5	86	10	5	0	3500	Interfacial
6	88	10	5	0	3935	A
7	86	12	5	0	4260	A / R
8	88	12	5	0	4232	A / R
9	86	10	3	2	4104	A
10	88	10	3	2	4186	R
11	86	12	3	2	4550	A / R
12	88	12	3	2	4424	A / R
13	86	10	5	2	3733	A
14	88	10	5	2	4100	A
15	86	12	5	2	4326	A / R
16	88	12	5	2	4350	A / R
17	86	10	3	0	3978	A
18	88	10	3	0	4286	A / R
19	86	12	3	0	4243	A / R
20	88	12	3	0	4142	A / R
21	86	10	5	0	3619	Interfacial
22	88	10	5	0	3932	R
23	86	12	5	0	4250	R
24	88	12	5	0	4294	A / R
25	86	10	3	2	4009	A / R
26	88	10	3	2	*	*
27	86	12	3	2	4379	A / R
28	88	12	3	2	4507	R
29	86	10	5	2	3489	A
30	88	10	5	2	4021	A
31	86	12	5	2	4367	A / R
32	88	12	5	2	4412	A / R

Legenda: A = arrancamento; R = rasgamento.
 Fonte: Amaral (2011).

8.3 Análise de Variância

Para a análise de variância foram consideradas apenas as interações até segunda ordem, visto que quando todos os termos foram considerados, interações de terceira e quarta ordem não se mostraram significativas.

A análise de variância apresentada na Tabela 8.3, foi realizada com base nos seguintes parâmetros: corrente de soldagem (representada pela letra A), tempo de soldagem (representada pela letra B), pressão dos eletrodos (representado pela letra C), e pré-aquecimento (representada pela letra D).

Tabela 8.3 – Análise de Variância (ANOVA).

ANOVA dos dados					
Fonte	GL	SQ (Aj)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	10	2170717	217072	28,06	0,000
Linear	4	1832050	458012	59,21	0,000
A	1	185725	185725	24,01	0,000
B	1	1198548	1198548	154,94	0,000
C	1	255601	255601	33,04	0,000
D	1	110106	110106	14,23	0,001
Interações de 2 fatores	6	343800	57300	7,41	0,000
A*B	1	186619	186619	24,12	0,000
A*C	1	27995	27995	3,62	0,072
A*D	1	814	814	0,11	0,749
B*C	1	117563	117563	15,20	0,001
B*D	1	5587	5587	0,72	0,405
C*D	1	4067	4067	0,53	0,477
Erro	20	154711	7736		
Falta de ajuste	5	25767	5153	0,60	0,701
Erro puro	15	128944	8596	*	*
Total	30	2325428			

Fonte: Produção da Autora.

A tabela acima foi obtida com auxílio do software estatístico MINITAB 17®.

Os coeficientes da ANOVA do modelo resultados da Tabela 8.3 são apresentados na Tabela 8.4.

Tabela 8.4 – Coeficientes da ANOVA.

Termo	Efeito	Coeficiente	EP do Coeficiente	Valor-T	Valor-p
Constante		4142,7	15,9	260,32	0,000
Corrente de soldagem [A]	156,0	78,0	15,9	4,90	0,000
Tempo de soldagem [B]	396,2	198,1	15,9	12,45	0,000
Pressão dos eletrodos [C]	-183,0	-91,5	15,9	-5,75	0,000
Tempo de pré-aquecimento [D]	120,1	60,0	15,9	3,77	0,001
A*B	-156,3	-78,2	15,9	-4,91	0,000
A*C	60,5	30,3	15,9	1,90	0,072
A*D	10,3	5,2	15,9	0,32	0,749
B*C	124,1	62,0	15,9	3,90	0,001
B*D	27,0	13,5	15,9	0,85	0,405
C*D	-23,1	-11,5	15,9	-0,73	0,477

Fonte: Produção da Autora.

Legenda: EP – Erro Padrão do Coeficiente

A tabela acima foi obtida com auxílio do software estatístico MINITAB 17®.

De acordo com a análise de variância apresentada na Tabela 8.3, todos os parâmetros são significativos para a variável de resposta escolhida. Já de acordo com os coeficientes da ANOVA apresentados na Tabela 8.4, as interações entre os parâmetros de soldagem mais significativas foram respectivamente: corrente de soldagem [A] e tempo de soldagem [B]; tempo de soldagem [B] e pressão de soldagem [C].

Da análise de variância é possível observar os valores do resumo do modelo apresentados na Tabela 8.5.

Tabela 8.5 – Resumo do modelo.

S	87,9519
R ²	93,35%
R ² ajustado	90,02%
R ² predito	83,39%

Fonte: Produção da Autora.

A tabela acima foi obtida com auxílio do software estatístico MINITAB 17®.

Analisando os dados da Tabela 8.5, observa-se:

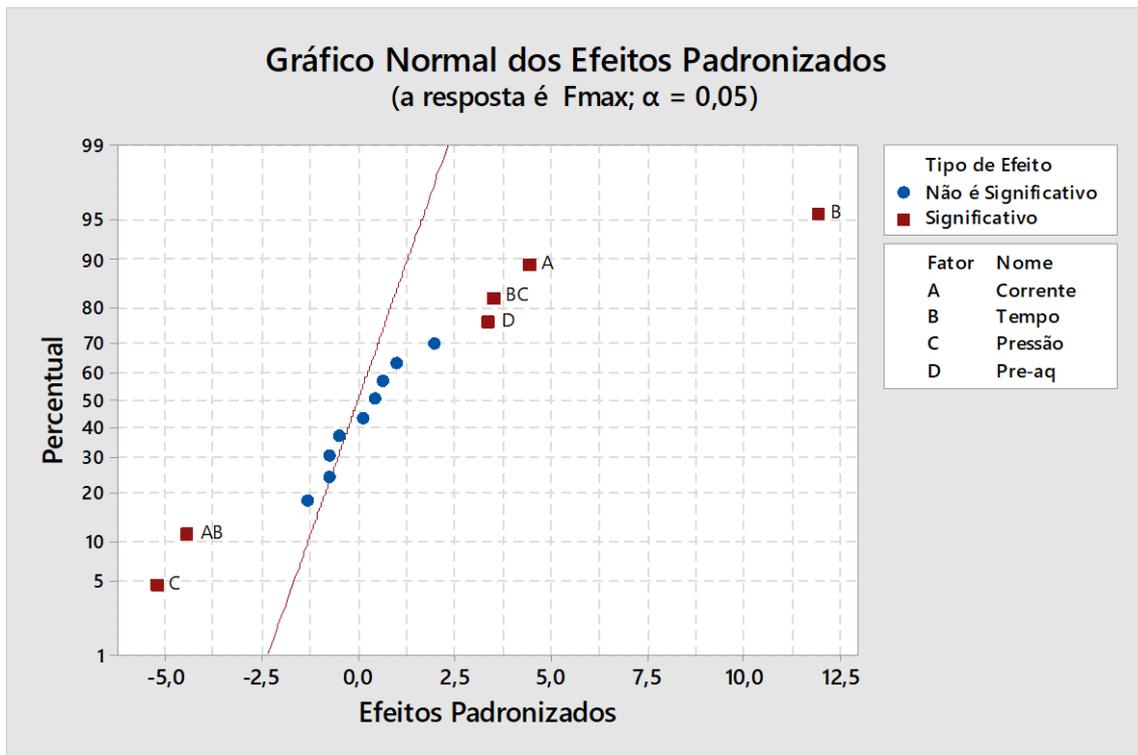
- Um valor alto de erro aleatório para a resposta analisada de 87,9519.
- O valor de R² demonstra que 93,35% da variância da força máxima de resistência à tração pode ser explicada pela relação entre os termos significativos (valor-p menor que 0,05) da análise de variância apresentada na Tabela 8.3.
- O valor do R² ajustado demonstra que 90,02% dos dados da regressão do modelo podem ser utilizados.
- O valor de R² predito demonstra que o modelo tem capacidade de previsão de 83,39%.

8.4 Gráficos dos Efeitos e resíduos

Nesta seção são apresentados os gráficos de efeitos para a análise desenvolvida com os dados da Tabela 8.2.

No Gráfico Normal dos Efeitos apresentado na Figura 8.2, os parâmetros de soldagem B (tempo de soldagem), A (corrente de soldagem) e D (tempo de pré aquecimento), e a interação BC (tempo de soldagem com pressão dos eletrodos) são, nesta ordem, mais significativos, ou seja, mais influentes de forma positiva, pois estão mais afastados da reta normal pelo lado direito; enquanto que o parâmetro C (pressão dos eletrodos) e a interação AB (corrente de soldagem com o tempo de soldagem) são mais influentes de forma negativa, nesta ordem, pois estes pontos estão localizados do lado esquerdo da reta normal.

Figura 8.2 – Gráfico Normal dos Efeitos Padronizados.

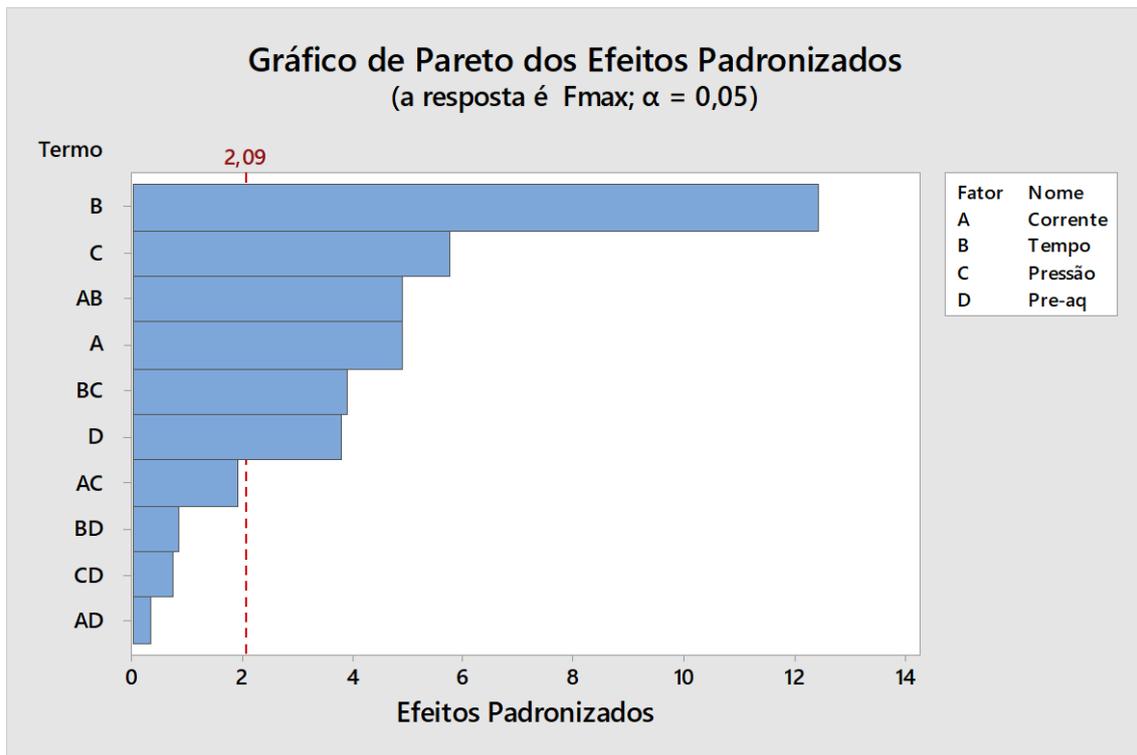


Fonte: Produção da Autora.

O gráfico acima foi obtido com auxílio do software estatístico MINITAB 17®.

Através do gráfico de Pareto apresentado na Figura 8.3, é possível afirmar que todos os parâmetros (A, B, C, D) são significativos, bem como as interações entre parâmetros (corrente de soldagem e tempo de soldagem, AB; tempo de soldagem e pressão de soldagem, BC), conforme visto na análise de variância apresentada na Tabela 8.3.

Figura 8.3 – Gráfico de Pareto.



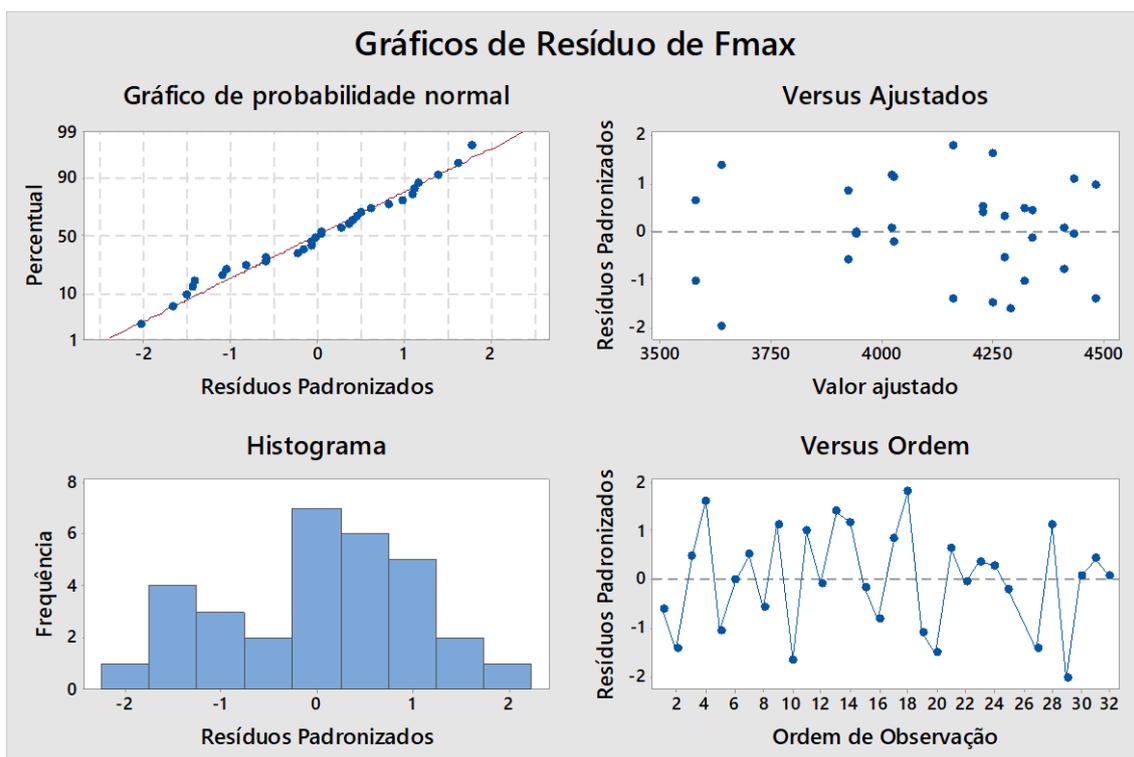
Fonte: Produção da Autora.

O gráfico acima foi obtido com auxílio do software estatístico MINITAB 17®.

Os gráficos de resíduos são usados para estudar a conformidade do modelo com os pressupostos fundamentais, que incluem a linearidade, a normalidade, a variância constante e a independência.

Os gráficos de resíduos apresentados na Figura 8.4 incluem o Gráfico de Probabilidade Normal, o Gráfico de Histograma de Resíduos, o Gráfico de Resíduos *versus* Valores Ajustados e o Gráfico de Resíduos *versus* Ordem de Observação.

Figura 8.4 – Gráficos de Resíduos.



Fonte: Produção da Autora.

O gráfico acima foi obtido com auxílio do software estatístico MINITAB 17®.

O Gráfico de Probabilidade Normal de Resíduos da Figura 8.4 apresenta uma pequena variação em torno da linha reta mostrada no gráfico, indicando uma distribuição normal cumulativa.

O Gráfico de Histograma de Resíduos é usado para estudar a não normalidade do comportamento dos resíduos. O gráfico apresentado na Figura 8.4 revela um histograma multimodal.

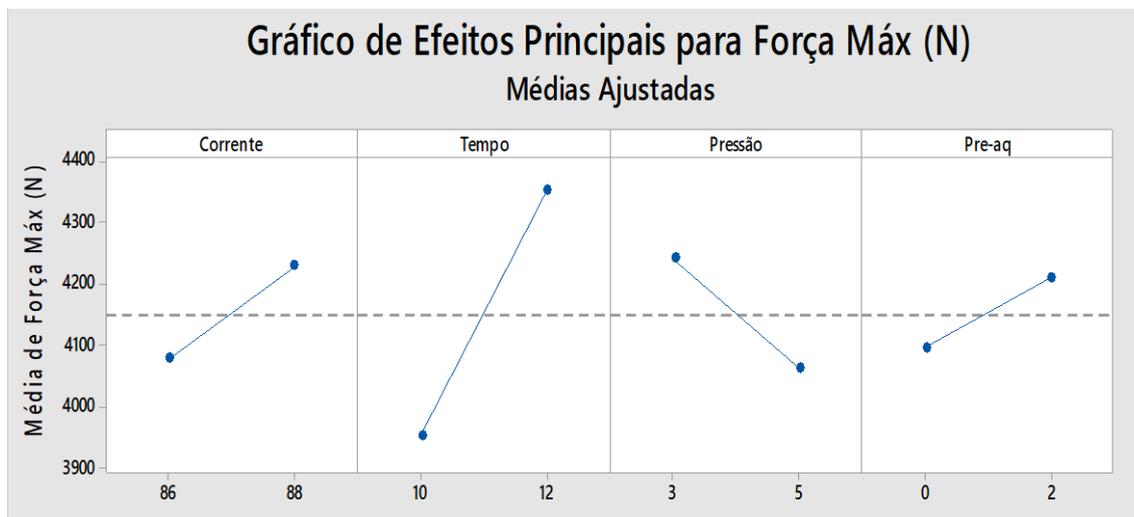
O Gráfico de Resíduos *versus* Valores Ajustados e o Gráfico de Resíduos *versus* Ordem de Observação são usados para verificar a constância da variância.

No Gráfico Resíduos *versus* Valores Ajustados acima, os resíduos parecem estar dispersos aleatoriamente em torno de zero.

No Gráfico de Resíduos *versus* Ordem de Observação apresentado na Figura 8.4, os resíduos estão dispersos aleatoriamente em torno de zero. Sendo assim, não existe nenhuma evidência de que os erros estejam correlacionados entre si.

Na Figura 8.5, são apresentados os gráficos de efeitos principais para a força de resistência à tração. Este gráfico analisa os parâmetros de forma isolada, mantendo os demais constantes, conforme mencionado anteriormente.

Figura 8.5 – Gráfico de Efeitos Principais para a Força de Tração.



Fonte: Produção da Autora.

O gráfico acima foi obtido com auxílio do software estatístico MINITAB 17®.

Analisando os gráficos de efeitos principais (Figura 8.5) é possível verificar que a corrente apresenta maior força máxima de resistência à tração quando está em seu nível máximo; a variação de 86 para 88% da corrente de soldagem tem um incremento de cerca de 150 N conforme observado no gráfico.

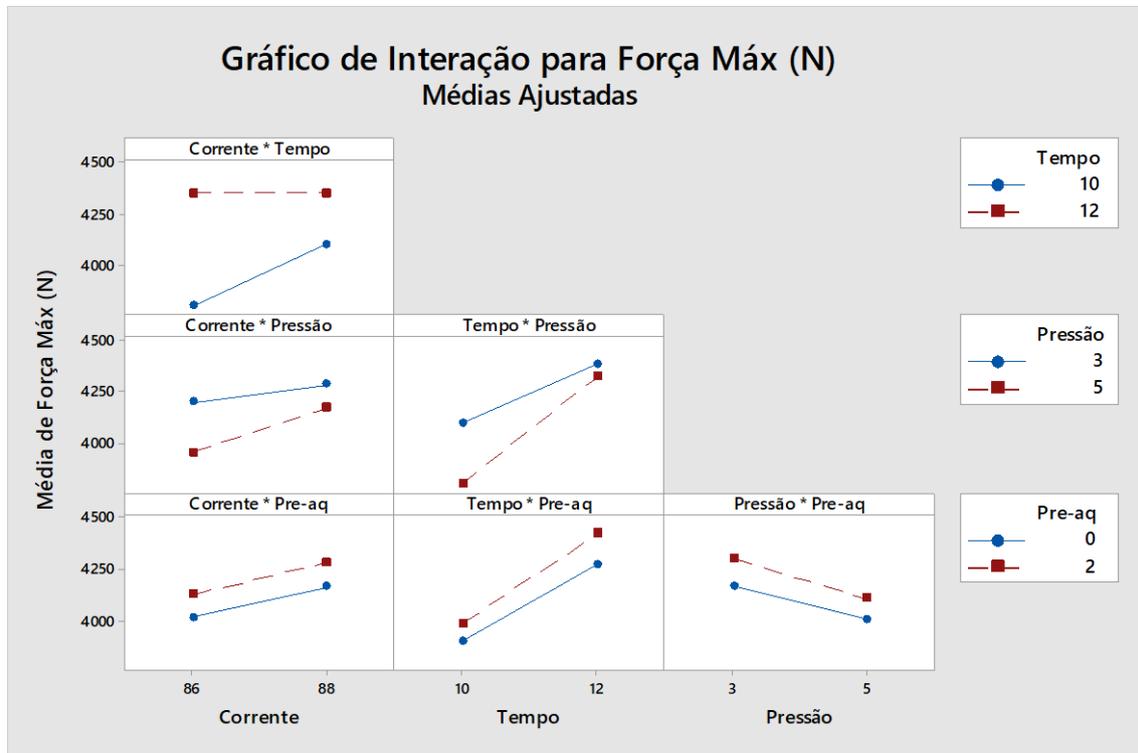
O tempo de soldagem é o parâmetro com maior efeito quando comparado aos demais; quando passa do seu nível mínimo de 10 ciclos para 12 ciclos, tem um incremento de aproximadamente 400 N em sua variável de resposta.

Já a pressão de soldagem apresenta melhores resultados de resistência a tração em níveis mínimos; ou seja, quando é aumentada de 3 para 5 bares tem a força máxima de resistência à tração retraída em aproximadamente 175 N.

O tempo de pré-aquecimento apresenta maior resistência à tração quando está em seu nível máximo; ou seja, quando é aumentado de 0 para 2 ciclos, tem um incremento de aproximadamente 115 N na variável de resposta.

Na Figura 8.6, temos o gráfico de interações entre os parâmetros para a força máxima de resistência à tração.

Figura 8.6 – Gráfico de Interações para a força máxima de resistência à tração.



Fonte: Produção da Autora.

O gráfico acima foi obtido com auxílio do software estatístico MINITAB 17®.

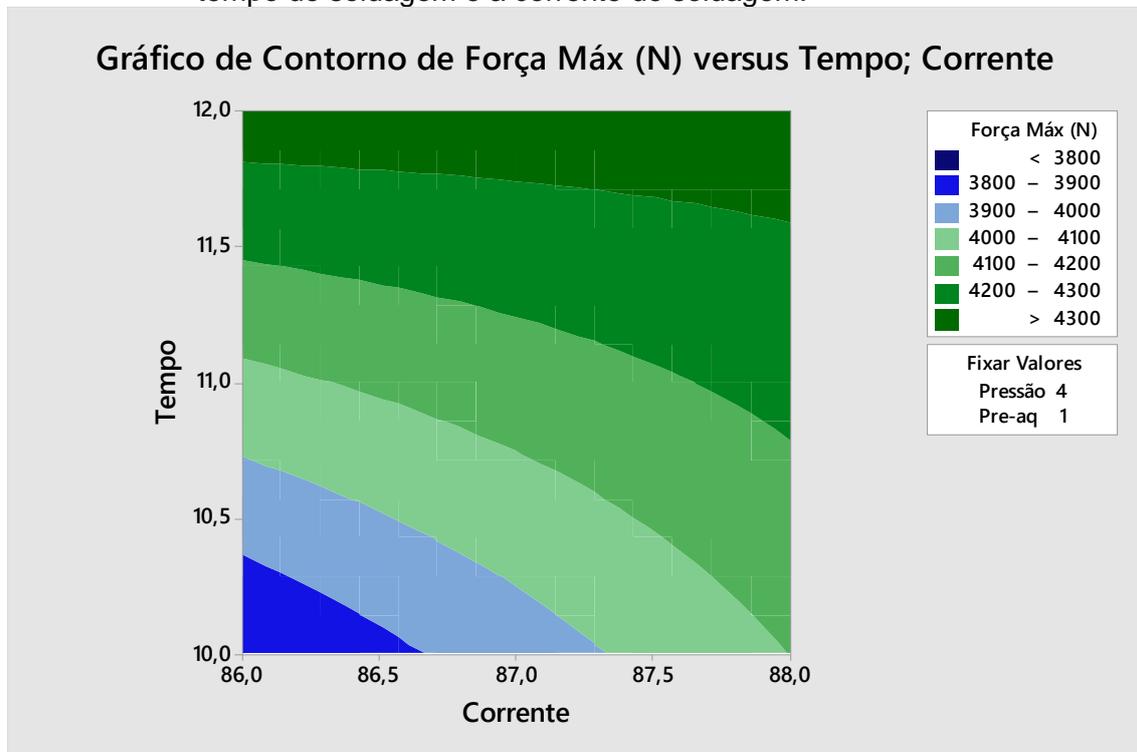
O gráfico da Figura 8.6 juntamente com a análise de variância afirmam que as interações mais significativas foram respectivamente: da corrente de soldagem, A; com o tempo de soldagem, B; do tempo de soldagem com a pressão de soldagem, BC, conforme apresentado na Tabela 8.3.

8.5 Gráficos de contorno

As Figura 8.7 a 8.12 apresentam os gráficos de contornos da força máxima de resistência à tração em relação a duas variáveis, mantendo as demais constantes.

A Figura 8.7 apresenta o gráfico de contorno da força máxima de resistência à tração em relação ao tempo de soldagem e à corrente de soldagem, mantendo a pressão e o tempo de pré-aquecimento constantes em seus níveis médios.

Figura 8.7 – Gráfico de contorno da força máxima de resistência à tração versus o tempo de soldagem e a corrente de soldagem.



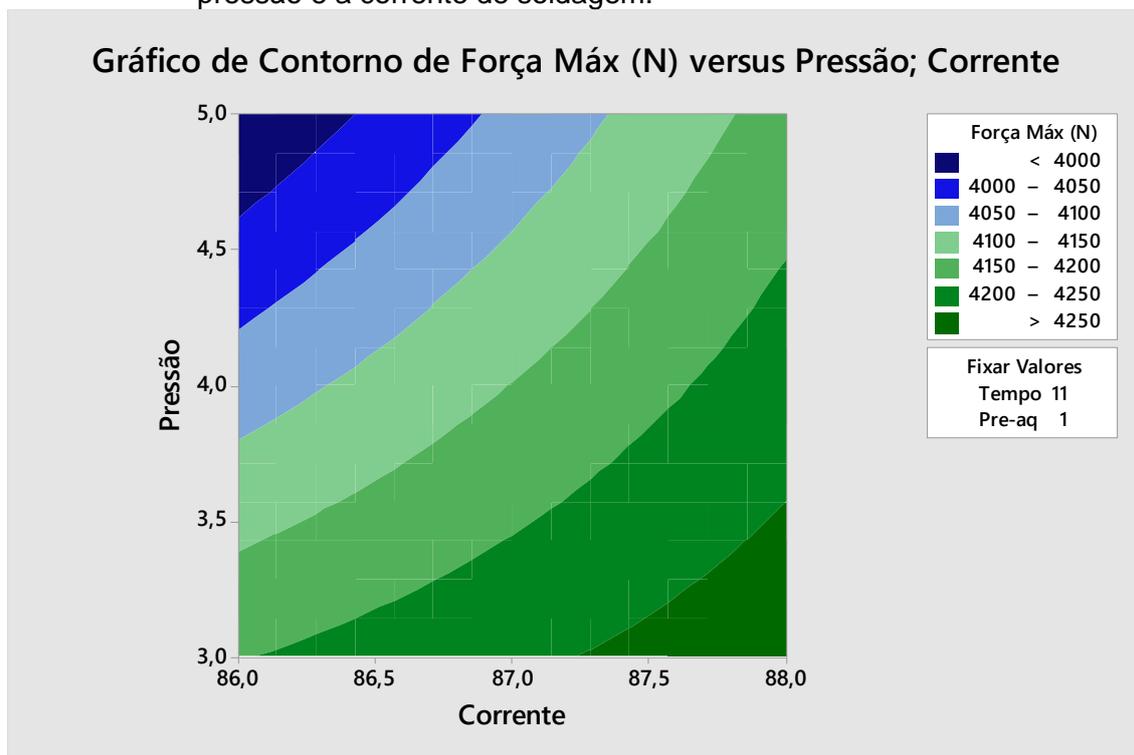
Fonte: Produção da Autora.

O gráfico acima foi obtido com auxílio do software estatístico MINITAB 17®.

O primeiro gráfico de contorno (Figura 8.7) relaciona a força máxima de resistência a tração *versus* o tempo de soldagem e a corrente de soldagem, mantendo a pressão de soldagem constante em 4 bar e o tempo de pré-aquecimento em 1 ciclo. A força máxima de resistência à tração é alcançada mantendo os níveis máximos de tempo e corrente de soldagem.

A Figura 8.8 apresenta o gráfico de contorno da força máxima de resistência à tração em relação a pressão de soldagem e a corrente de soldagem, mantendo o tempo de soldagem e o tempo de pré-aquecimento constantes em seus níveis médios.

Figura 8.8 – Gráfico de contorno da força máxima de resistência à tração *versus* a pressão e a corrente de soldagem.



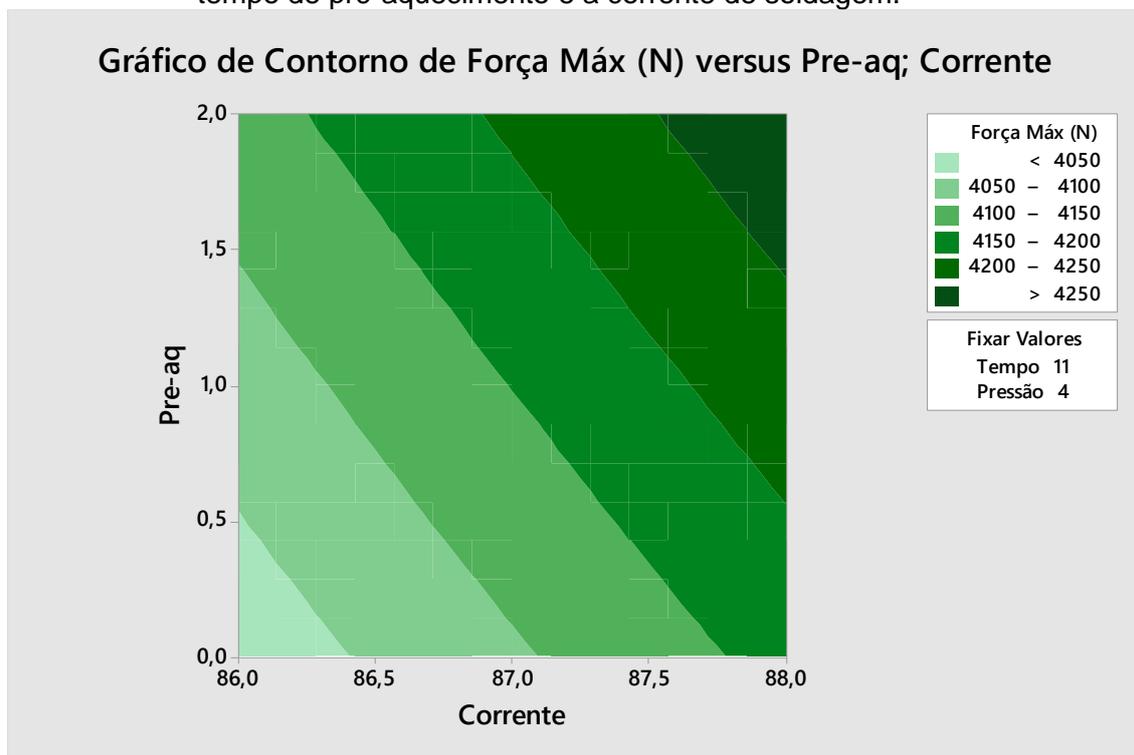
Fonte: Produção da Autora.

O gráfico acima foi obtido com auxílio do software estatístico MINITAB 17®.

O gráfico de contorno da Figura 8.8, relaciona a força máxima de resistência à tração *versus* a pressão de soldagem e a corrente de soldagem, mantendo o tempo de soldagem constante em 11 ciclos e o tempo de pré-aquecimento em 1 ciclo. A força máxima de resistência à tração é alcançada mantendo os níveis máximos para a corrente de soldagem e a pressão de soldagem em seu nível mínimo.

A Figura 8.9 apresenta o gráfico de contorno da força máxima de resistência à tração em relação ao tempo de pré-aquecimento e a corrente de soldagem, mantendo o tempo de soldagem e a pressão de soldagem constantes em seus níveis médios.

Figura 8.9 – Gráfico de contorno da força máxima de resistência à tração *versus* o tempo de pré-aquecimento e a corrente de soldagem.



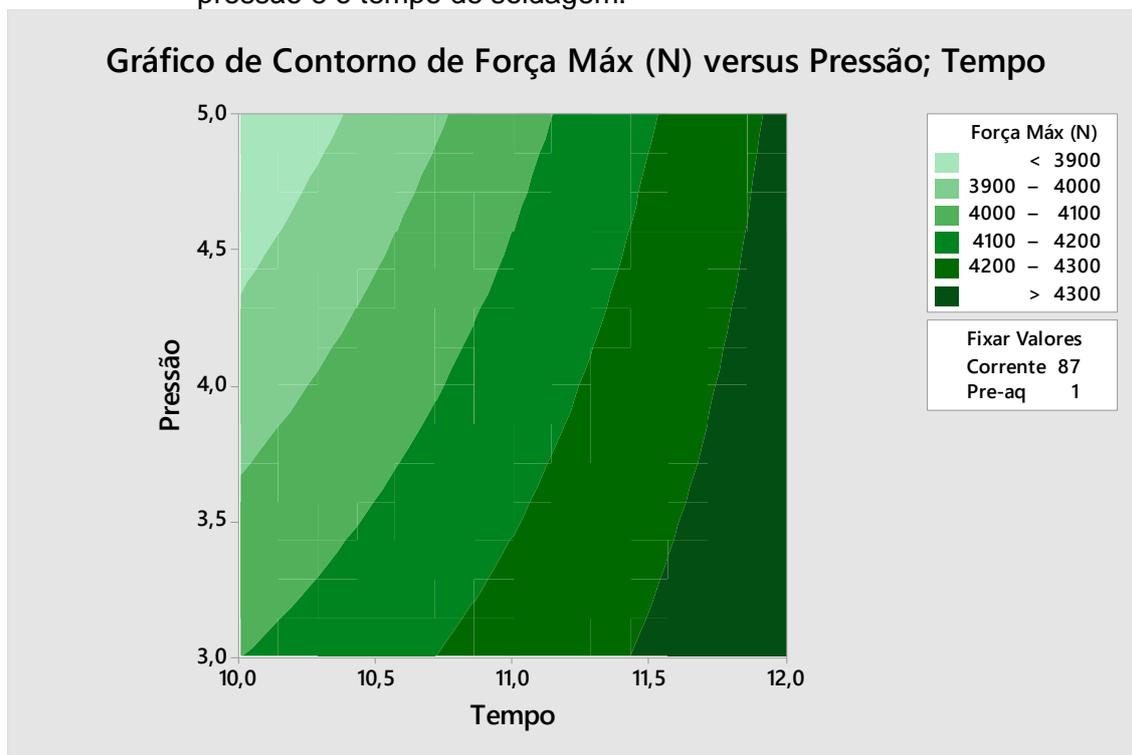
Fonte: Produção da Autora.

O gráfico acima foi obtido com auxílio do software estatístico MINITAB 17®.

O gráfico de contorno da Figura 8.9, relaciona a força máxima de resistência à tração *versus* o tempo de pré-aquecimento e a corrente de soldagem, mantendo a pressão de soldagem constante em 4 bar e o tempo de soldagem em 11 ciclos, a resistência máxima de tração é alcançada mantendo os níveis máximos de tempo de pré-aquecimento e corrente de soldagem.

A Figura 8.10 apresenta o gráfico de contorno da força máxima de resistência à tração em relação a pressão de soldagem e ao tempo de soldagem, mantendo a corrente de soldagem e o tempo de pré-aquecimento constantes em seus níveis médios.

Figura 8.10 – Gráfico de contorno da força máxima de resistência à tração *versus* a pressão e o tempo de soldagem.



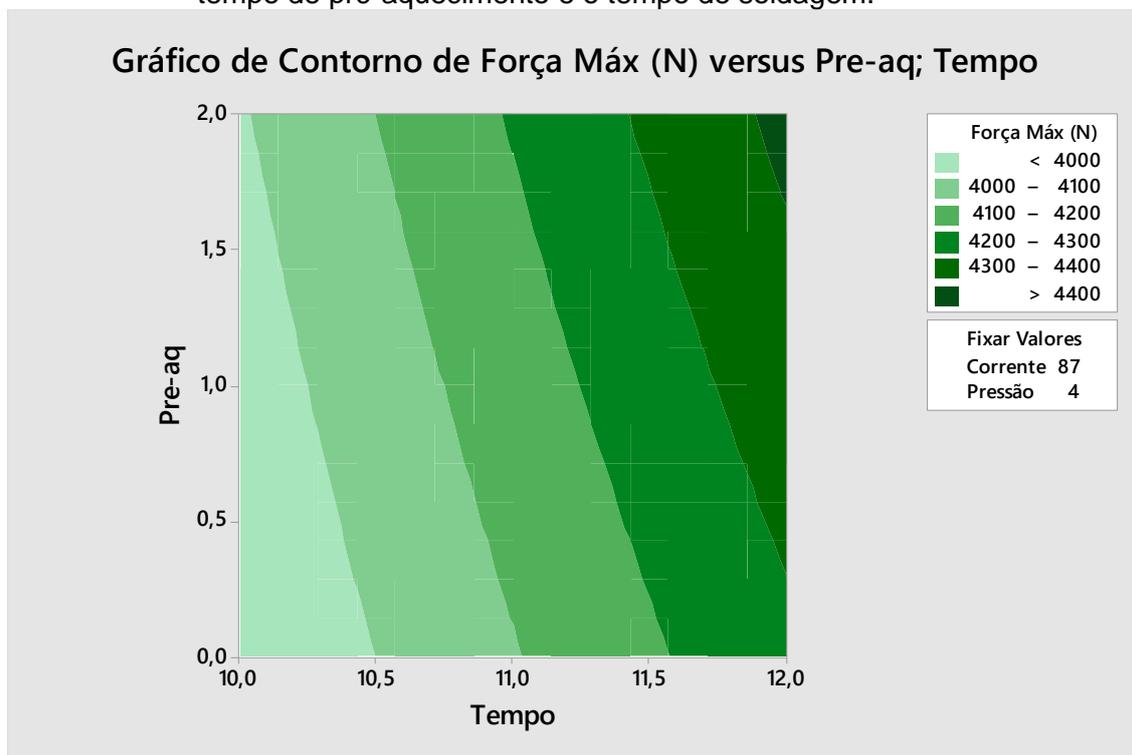
Fonte: Produção da Autora.

O gráfico acima foi obtido com auxílio do software estatístico MINITAB 17®.

O gráfico de contorno da Figura 8.10, relaciona a força máxima de resistência à tração *versus* o tempo de soldagem e a pressão de soldagem, mantendo a corrente de soldagem constante em 87% e o tempo de pré-aquecimento em 1 ciclo. A força máxima de resistência à tração é alcançada mantendo o nível máximo de tempo soldagem, já a pressão pode ser mantida tanto no nível máximo quanto mínimo.

A Figura 8.11 apresenta o gráfico de contorno da força máxima de resistência à tração em relação ao tempo de pré-aquecimento e ao tempo de soldagem, mantendo a corrente de soldagem e a pressão de soldagem constantes em seus níveis médios.

Figura 8.11 – Gráfico de contorno da força máxima de resistência à tração *versus* o tempo de pré-aquecimento e o tempo de soldagem.



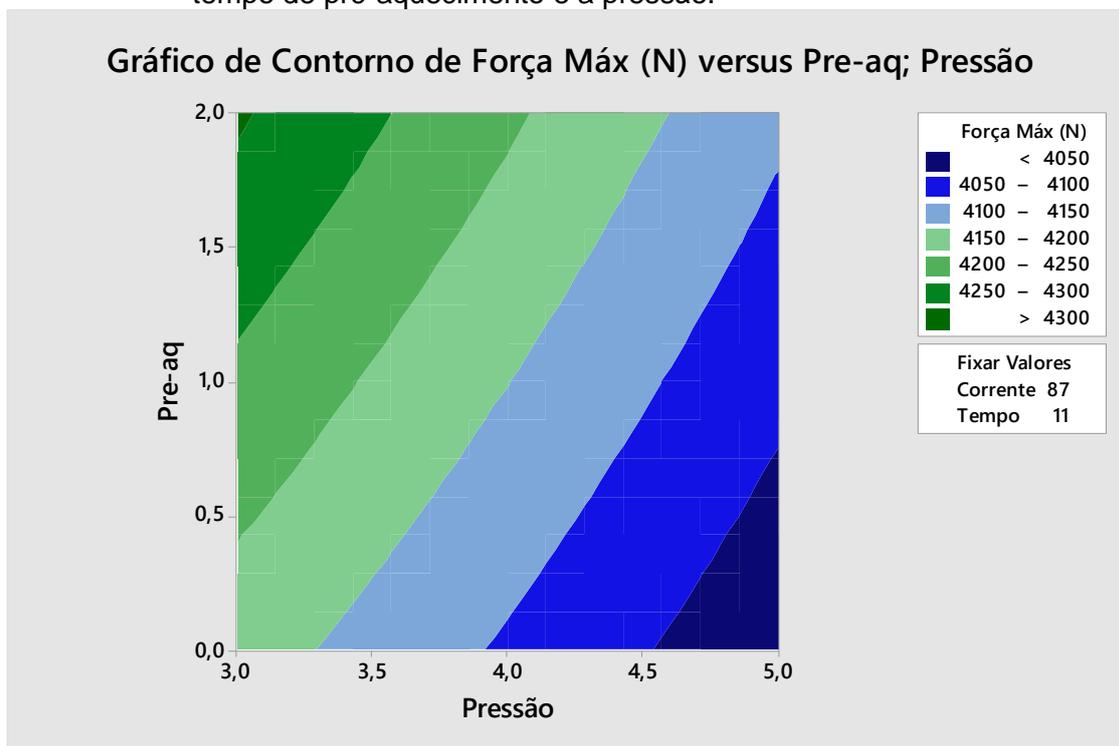
Fonte: Produção da Autora.

O gráfico acima foi obtido com auxílio do software estatístico MINITAB 17®.

O gráfico de contorno da Figura 8.11, relaciona a força máxima de resistência à tração *versus* o tempo de pré-aquecimento e o tempo de soldagem, mantendo a pressão de soldagem constante em 4 bar e a corrente de soldagem em 87%. A força máxima de resistência à tração é alcançada mantendo os níveis máximos de tempo de soldagem e tempo de pré aquecimento.

A Figura 8.12 apresenta o gráfico de contorno da força máxima de resistência à tração em relação ao tempo de pré-aquecimento e a pressão de soldagem, mantendo a corrente de soldagem e o tempo de soldagem constantes em seus níveis médios.

Figura 8.12 – Gráfico de contorno da força máxima de resistência à tração *versus* o tempo de pré-aquecimento e a pressão.



Fonte: Produção da Autora.

O gráfico acima foi obtido com auxílio do software estatístico MINITAB 17®.

O gráfico de contorno da Figura 8.12, relaciona a força máxima de resistência à tração *versus* o tempo de pré-aquecimento e a pressão de soldagem, mantendo a corrente de soldagem constante 87% e o tempo de soldagem em 11 ciclos. A força máxima de resistência à tração é alcançada mantendo o nível máximo de tempo de pré-aquecimento e a pressão de soldagem no nível mínimo.

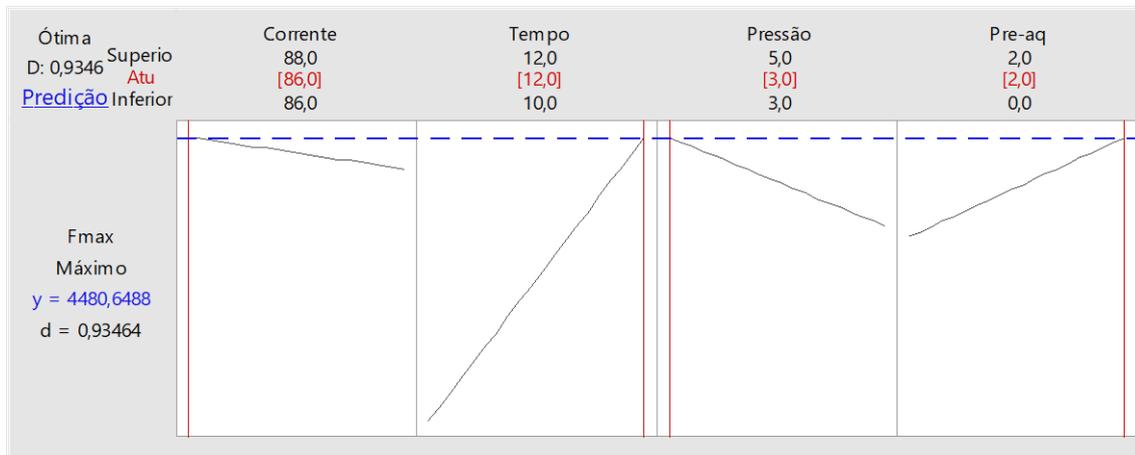
8.6 Otimização da resposta

A última análise a ser realizada foi procurar a combinação de parâmetros de soldagem que otimize a resposta, ou seja, a combinação que ofereça um maior valor da força máxima de resistência à tração.

A *Desirability* possui uma amplitude que varia de 0 a 1. O valor igual a 1 representa o caso ideal; já o valor 0 indica que uma ou mais respostas estão fora

dos limites aceitáveis. O gráfico de otimização da resposta para a amostra da Tabela 8.2, é apresentado na Figura 8.13.

Figura 8.13 – Gráfico de otimização da resposta.



Fonte: Produção da Autora.

O gráfico acima foi obtido com auxílio do software estatístico MINITAB 17®.

O gráfico da Figura 8.13 apresenta a *Desirability* geral ($D = 0,9346$) e a *Desirability* individual ($d = 0,9346$) iguais pois analisa-se apenas uma resposta.

Analisando o gráfico de otimização da resposta, é possível verificar que a resistência máxima à tração pode ser alcançada com a corrente de soldagem em 86%, o tempo de soldagem de 12 ciclos, a pressão de soldagem em 3 bares e o tempo de pré-aquecimento em 2 ciclos. Com esta configuração dos parâmetros de soldagem, a força máxima de resistência à tração pode chegar a 4480 N, conforme observado na Tabela 8.5.

Tabela 8.5 – Predição para a força máxima de resistência à tração.

Predição para Fmax

Predição de Múltiplas Respostas

Variável	Configuração
Corrente	86
Tempo	12
Pressão	3
Pre-aq	2

Resposta	Ajuste	EP do Ajustado	IC de 95%	IP de 95%
Fmax	4480,6	51,7	(4372,9; 4588,4)	(4267,9; 4693,4)

Fonte: Produção da Autora.

A tabela acima foi obtida com auxílio do software estatístico MINITAB 17®.

Da Tabela 8.5, temos:

- O intervalo de confiança (IC) de 95%, com a amplitude de valores que podem conter a resposta média para uma combinação selecionada de configurações de variável.
- O intervalo de predição (IP) também de 95%, com a amplitude de valores que pode conter uma única resposta futura para uma combinação selecionada de configurações de variável.

O intervalo de predição, conforme mencionado anteriormente é sempre mais amplo do que o intervalo de confiança correspondente, devido à incerteza adicional envolvida na predição de um único valor de resposta *versus* a resposta média.

8.7 Comentários sobre o estudo de caso da indústria automobilística

Este estudo de caso foi realizado da mesma forma que a primeira aplicação da técnica de Projeto e Análise de Experimentos, foco principal deste trabalho, ou seja, ambos considerando 32 amostras de pontos de solda, porém com aplicação diferente.

Para este estudo de caso, todos os parâmetros de soldagem escolhidos (corrente de soldagem [A], tempo de soldagem [B], pressão dos eletrodos [C] e tempo de pré-aquecimento [D]) se mostraram significativos. As interações entre parâmetros mais significativas foram a corrente de soldagem *versus* o tempo de soldagem [AB] e o tempo de soldagem *versus* a pressão de soldagem [BC].

Foram verificadas as influências de cada um dos fatores no processo de soldagem (gráficos de efeitos principais); a interação entre parâmetros (gráfico de interação entre fatores); assim como a relação entre dois parâmetros quando os demais são mantidos constantes em seus níveis médios (gráficos de contorno).

Por fim, foi encontrada a resposta de otimização para os dados analisados nesta amostra, definindo quais as combinações entre parâmetros devem ser aplicadas a fim de se alcançar uma melhor resistência à tração. Assim como na aplicação anterior, foi encontrada uma combinação ótima de parâmetros de soldagem; mas pode haver mais de uma área ótima.

9 CONCLUSÃO

Baseada nas motivações apresentadas no início desta Dissertação têm-se:

A 1ª motivação é analisar, estudar e recomendar uma melhoria do processo de soldagem de interconexões entre células solares utilizadas em painéis solares em aplicações espaciais, uma vez que, esta é uma das etapas críticas envolvidas na sua fabricação, conforme levantamento bibliográfico.

Esta primeira motivação foi alcançada por meio de 1) levantamento na literatura; 2) acompanhamento do processo de soldagem dos interconectores às células solares; e 3) inúmeras interações com o pessoal responsável pela fabricação na empresa.

A melhoria do processo foi alcançada obtendo quais os parâmetros de soldagem devem ser utilizados para a união das interconectores de 30 *mícrons* em células solares de aplicação geoestacionária. De acordo com o gráfico da Figura 7.21, a otimização do processo de soldagem pode ser alcançada com a configuração +1 para deslocamento dos eletrodos, +1 para tensão de soldagem e +1 para o tempo de soldagem. A corrente de soldagem depende da tensão aplicada. Para este experimento é ideal que ela permaneça no nível +1.

A resposta de otimização do processo de soldagem foi encontrada para a configuração do experimento realizado, ou seja, para os 32 tratamentos. Desta forma, quando aplicados estes parâmetros de soldagem para o mesmo tipo de interconector e célula solar utilizados nesta pesquisa, valores de *pull test* acima de 160 gramas-força serão obtidos.

A 2ª motivação é disponibilizar informações sobre o processo que possam ser utilizadas pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. Disponibilizar dados e informações sobre o processo de soldagem para a Orbital Engenharia que realiza a fabricação dos painéis solares, possibilitando a tomada de decisão ainda nas fases iniciais do projeto e da fabricação mais assertivas.

O experimento trouxe informações e dados que podem ser utilizados pela empresa de forma a contribuir com desenvolvimento de soldagens futuras,

poupando esforços de determinar quais os parâmetros necessários quando se tem a célula solar e o interconector estudados nesta pesquisa.

Já o Instituto fica com as informações referentes à soldagem de interconectores às células solares, desde como funciona o processo, as interações que ocorrem entre os parâmetros, os parâmetros mais influentes na qualidade do ponto de solda e uma aplicação do método Projeto e Análise de Experimentos em um caso da área espacial.

A 3ª motivação é aumentar o desempenho, a vida útil dos painéis solares e, indiretamente, a sua confiabilidade, por meio de pontos de soldas de melhor qualidade, ou seja, pontos de solda mais resistentes à hostilidade do ambiente espacial.

Esta motivação foi alcançada quando se observa que os testes de resistência máxima a ruptura alcançaram valores acima do requisito estabelecido, ou seja, maiores que 160 gramas-força (~1.6 N).

A 4ª motivação é exercitar a aplicação do método de Projeto e Análise de Experimentos. Devido a isto, foi adicionado o estudo de caso de soldagem a ponto por resistência elétrica utilizada na indústria automobilística. Para a aplicação do método de Projeto e Análise de Experimentos em ambos os casos (espacial e automobilístico) foi utilizada a ferramenta de análise estatística MINITAB 17®.

A quarta motivação foi alcançada com a aplicação do método de Projeto e Análise de Experimentos no estudo de caso de soldagem a ponto por resistência elétrica utilizado na indústria automobilística.

Após as análises estatísticas com diversos gráficos ilustrando o comportamento dos parâmetros de soldagem, foi possível concluir que o método escolhido apresentou os resultados próximos ao esperado; isto pôde ser constatado com a Tabela 7.5.

Desta forma, por meio do método de Projeto e Análise de Experimentos, foi possível:

- Determinar quais parâmetros do processo de soldagem de interconectores às células solares têm efeito significativo na variável de resposta, ou seja, qual a influência sobre o valor do *pull test*.
- Identificar o efeito das interações que os parâmetros de soldagem exercem sobre o valor do *pull test*.
- Otimizar o desempenho do processo, ou seja, qual a configuração ótima dos parâmetros de soldagem que fornece valores de *pull test* superiores a 160 gramas-força dentro do experimento realizado, incluindo a segurança e o custo.
- Reduzir o tempo de determinação dos parâmetros de soldagem ótimos, visto que o método proporciona uma redução no tempo dedicado à fase de experimentação.
- Reduzir a variação que pode ocorrer durante a fase de determinação dos parâmetros de soldagem.

O processo de soldagem dos interconectores às células solares possui muitas particularidades, é complexo e muito delicado. Desta forma, algumas observações realizadas durante a fase experimental precisam ser levadas em consideração quando outros experimentos forem feitos, são elas:

- A tensão de soldagem e o tempo de soldagem precisam ser determinados de forma que não resultem em soldas frágeis em decorrência da expulsão da fase líquida presente durante a formação da lente de solda; isto acontece devido a valores destes parâmetros acima do permitido pelo conjunto (interconector + célula).
- Valores dos parâmetros: tempo de soldagem e tensão de soldagem abaixo do estabelecido na fase de determinação resultam em pontos de solda fracos, ou seja, não promovem a fusão entre as peças de trabalho.
- O deslocamento do eletrodo é outro parâmetro que deve ser muito bem controlado, pois é responsável por unir, prender e manter as peças de trabalho em contato durante o processo de soldagem. Seu valor não pode ser excessivo, pois as células solares são componentes frágeis. Já um

valor muito baixo não é capaz de manter as peças unidas durante a passagem da corrente e formação do ponto de solda, acarretando pontos de solda fracos.

Baseado nestes poucos dados, que são relativamente caros e destrutivos, foi possível determinar uma combinação ótima, dentro do experimento analisado com 32 pontos de solda, para aprimorar ainda mais o modelo de regressão do processo de soldagem de interconectores às células solares são necessários novos experimentos.

9.1 Dificuldades encontradas

Nesta seção são descritas algumas dificuldades que foram encontradas durante o decorrer desta Dissertação.

Uma das primeiras dificuldades encontradas na fase de experimentação, foi a variação dos parâmetros de soldagem (de um nível inferior para um nível superior) para interconectores com espessura menor (abaixo de 30 *mícrons*), assim, uma vez determinada a combinação entre parâmetros que produzia um ponto de solda com boa qualidade, estes valores não podiam ser alterados. Quando essa combinação precisava ser alterada para atender à necessidade da técnica de Projeto e Análise de Experimentos (pelo menos dois níveis para cada parâmetro), a célula solar sofria alguma degradação, das quais se destacaram:

- Degradação nas propriedades elétricas obtidas pela curva $I \times V$ (devido à tensão e tempo de soldagem excessivos);
- Trincas nas células solares (devido ao deslocamento dos eletrodos, responsável pela pressão que estes exercem sobre as peças);
- Expulsão da fase líquida, gerando um ponto de solda frágil (quando a corrente de soldagem excede um determinado nível, o que contribui para uma maior geração de calor no ponto de solda, expulsando material na forma líquida).

- Solda com falta de fusão ou fusão parcial entre as peças de trabalho. Esse tipo de defeito ocorreu sempre que os parâmetros de soldagem estavam em níveis mínimos considerando o interconector mais fino).

Esse tipo de processo é bem delicado quando comparado aos demais processos de soldagem a ponto por resistência elétrica. Assim, pequenas variações na tensão e tempo de soldagem podem afetar de forma significativa o desempenho elétrico da célula solar. Assim como um aumento do deslocamento do eletrodo, caracterizado pela pressão deste nas peças de trabalho, pode ocasionar trincas nas células solares. Isso ficou constatado durante a fase de determinação dos parâmetros de soldagem que seriam aplicados ao experimento.

Mesmo utilizando um interconector com espessura de 30 *mícrons*, constatou-se que este processo é muito sensível quanto à variação dos parâmetros de soldagem. Desta forma, futuras análises que visem a otimização do processo, precisam levar este ponto em consideração, escolhendo técnicas que não necessitem de uma grande faixa entre os valores mínimos e máximos, pois um pequeno aumento na tensão de soldagem causou uma solda frágil devido à expulsão da fase líquida que se formou na interface entre os materiais. Da mesma forma, variações no deslocamento dos eletrodos ocasionaram marcas e, em alguns casos, até a quebra da célula solar.

Conforme mencionado anteriormente, o processo de soldagem dos interconectores às células solares é sensível a variações bruscas dos parâmetros de soldagem; sendo assim, a amplitude entre o nível inferior e o nível superior deve ser a menor possível para que não ocorram danos as propriedades das células solares.

Os materiais utilizados nesta Dissertação; ou seja, tanto a célula solar quanto os interconectores, são componentes relativamente caros; bem como todo o processo de soldagem envolvido na união destes materiais. Por isso, se faz necessária a correta determinação dos parâmetros de soldagem; toda a parte de experimentação precisa ser bem planejada para que não ocorram desperdícios desnecessários.

Devido à pandemia do COVID-19, os experimentos e, conseqüentemente, as análises foram adiadas, o que gerou certa incerteza se os objetivos propostos seriam alcançados. Essa dificuldade foi vencida e a pesquisa experimental pode ser concluída.

9.2 Contribuições deste trabalho

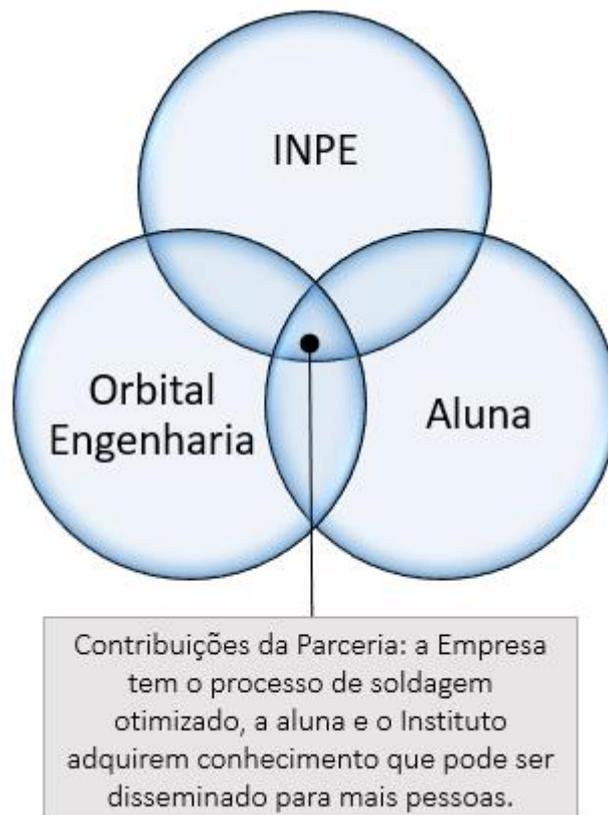
Durante o desenvolvimento desta Dissertação, foi possível observar algumas contribuições, das quais se destacam:

- Contribuir com a literatura com informações sobre o referido processo de soldagem utilizado na união de interconectores às células solares que não foram encontradas quando se iniciou esta pesquisa.
- Identificar com o método aplicado como os parâmetros de soldagem influenciam na qualidade do processo;
- A aplicação do método revelou quais são os parâmetros de soldagem ideais dentro do experimento realizado, demonstrando qual a melhor combinação entre eles; permitindo uma melhor junção entre as peças de trabalho. Isto pôde ser verificado com o *pull test* e o monitoramento na máquina de soldagem do intervalo de valor que a carga elétrica envolvida no processo apresentava valores de *pull test* acima de 160 gramas-força. Foi observado que há uma relação entre a carga elétrica e a resistência do ponto de solda; desta forma, com o monitoramento deste parâmetro (carga elétrica), é aceitável afirmar que determinado ponto de solda, dentro de determinado intervalo de carga elétrica de soldagem apresente uma boa junção entre as peças. Lembrando que este intervalo da carga elétrica é determinado de forma experimental.

A forma como a pesquisa desta Dissertação foi conduzida, ou seja, uma parceria entre o INPE e a Orbital Engenharia, revelou que este tipo de colaboração entre empresa e instituto traz benefícios para ambos, visto que o método de Projeto e Análise de Experimentos pôde ser aplicado em uma situação real presente na área espacial. A parceira contribuiu com a Empresa na otimização do processo

de soldagem; com o crescimento profissional e acadêmico da aluna; e com o Instituto, pois o conhecimento adquirido e as informações sobre o processo que podem ser divulgadas alcançarão um maior número de pessoas. Na Figura 9.1 temos o *framework* que ilustra essa parceria.

Figura 9.1 – *Framework* de parceria entre INPE x Orbital x Pós Graduação do INPE (aluna).



Fonte: Produção da autora.

9.3 Sugestões de trabalhos futuros

A soldagem dos interconectores nas células solares é um processo crítico, conforme encontrado na literatura e observado durante a fase experimental desta pesquisa. Assim, durante o desenvolvimento desta Dissertação foram levantadas algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Estudar os parâmetros de soldagem ideais para outras espessuras de interconector, sejam eles de Prata ou de outro material.

- Aplicar a técnica de Projeto e Análise de Experimentos logo nas fases iniciais de desenvolvimento de novas combinações de células solares e interconexões; ou seja, ainda na fase de experimentação / determinação dos parâmetros do processo de soldagem. Em seguida: realizar novos experimentos com as combinações obtidas. Fazer um cupom de testes com uma amostra de pelo menos 36 células solares soldadas às suas devidas interconexões, realizar testes acelerados para avaliar a confiabilidade das juntas soldadas. Analisar os efeitos que a órbita geoestacionária pode exercer sobre os interconectores de Prata e sobre outros materiais, tais como: Ouro, *Kovar*, *Invar*, Cobre, Molibdênio entre outros.
- Para esta Dissertação, foram analisados os parâmetros: tensão de soldagem, tempo de soldagem e deslocamento do eletrodo até a peça. Estudar a influência de outras variáveis como, por exemplo, a resistência de contato na interface entre a interconexão e o barramento da célula solar.
- Estudar se outra variável de resposta pode ser utilizada para avaliar a qualidade do ponto de solda. Uma sugestão seria a dimensão da indentação do ponto de solda.
- Avaliar como o desgaste dos eletrodos influencia a qualidade do ponto de solda.
- Para esta Dissertação, foram analisadas a resistência a ruptura da junta de solda e como a ruptura ocorreu (corpo do interconector ou ponto de solda). Já a resistência à fadiga, a ciclagem de temperatura e a ação da radiação não foram analisadas.
- Estudar como ocorre a Física da Falha dos interconectores de células solares utilizadas em satélites que operam tanto em órbitas LEO quanto em órbita GEO.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAHÃO, A. B. R. M. *et al.* Avaliação dos parâmetros tempo, corrente e pressão na soldagem por resistência elétrica de compósitos PEI/fibras contínuas: influência na resistência mecânica. **Matéria**, v. 20(2), p. 530-543, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620150002.0053>. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1517-70762015000200530. Acesso em: 19 ago. 2019.

AMADA MIYACHI. **Fundamentals of small parts resistance welding**. 2015. Disponível em: http://www.amadamiyachi.com/servlet/servlet.FileDownload?retURL=%2Fapex%2Feducationalresources_articles&file=01530000000Jybm. Acesso em 10 fev. 2020.

AMARAL, F. F. *et al.* Aplicação da metodologia de superfície de resposta para otimização do processo de solda a ponto no aço galvanizado AISI 1006. **Soldag Insp**. v. 23(2), p. 129-142, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1590/0104-9224/si2302.02>. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0104-92242018000200129&script=sci_abstract&tlng=pt#:~:text=Ferraz%20et%20al.-,Aplica%C3%A7%C3%A3o%20da%20Metodologia%20de%20Superf%C3%ADcie%20de%20Resposta%20para%20Otimiza%C3%A7%C3%A3o%20do,insp.&text=A%20soldagem%20a%20ponto%20por,de%20diversos%20produtos%20da%20ind%C3%BAstria. Acesso em: 20 fev. 2020.

AMARAL, F. F. **Monitoramento da qualidade na soldagem a ponto por resistência elétrica de chapas de aço galvanizadas baseado em análise de experimentos**. 2011. 95 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Universidade Federal de Itajubá. 2011. Disponível em: <https://repositorio.unifei.edu.br/jspui/handle/123456789/1366>. Acesso em: 24 set. 2020.

AMERI, T. Organic tandem solar cells: a review. **Energy & Environmental Science**. v. 2, p. 347–363, 2009. DOI: 10.1039/B817952B. Disponível em: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlepdf/2009/ee/b817952b>. Acesso em: 10 fev. 2020.

AMERICAN WELDING SOCIETY – AWS. **Brazing**. 2020. Disponível em: <https://awo.aws.org/glossary/brazing/>. Acesso em: 20 jan. 2020

AMERICAN WELDING SOCIETY – AWS. **Soldering**. 2020. Disponível em: <https://awo.aws.org/glossary/soldering-s/>. Acesso em: 20 jan. 2020.

AMERICAN WELDING SOCIETY – AWS. **Welding**. 2020. Disponível em: <https://awo.aws.org/glossary/welding>. Acesso em: 20 jan. 2020.

AN, R., XU, D. WANG, C. Parallel-gap resistance welding between gold-plated silver interconnects and silver electrodes in germanium solar cells. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRONIC PACKAGING TECHNOLOGY, 15., August 12 to 15, 2014, Chengdu, China. 2014.

Proceedings ... (ICEPT 2014). Disponível em:

<https://ieeexplore.ieee.org/document/6922812>. Acesso em: 24 ago. 2018.

ANDERSSON, O. **Process planning of resistance spot welding**. 2013. 56 p Tese (em Engenharia de Produção). Stockholm, Sweden. 2013. ISSN: 1650-1888. Disponível em: <http://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A603120&dswid=206>. Acesso em: 14 fev. 2020.

ARAÚJO, G. P. *et al.* Comparação e análise de módulos fotovoltaicos com células de Silício cristalino. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, VII., 2018, – Gramado, Brasil. **Anais ...** 2018. Disponível em: <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/345>. Acesso em: 05 fev. 2020.

ASLANLAR, S., OGUR, A., OZSARAC, U., ILHAN, E. Welding time effect on mechanical properties of automotive sheets in electrical resistance spot welding. **Materials and Design**. v. 29, p.1427–1431, 2008. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2007.09.004>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0261306907002117>

Acesso em: 05 mai. 2020.

American Society for Testing and Materials (ASTM) ASTM E 1150. **Standard definitions of terms relating to fatigue**. 1993.

ATASHPARVA, M.; HAMED, M. Investigating mechanical properties of small scale resistance spot welding of a nickel based superalloy through statistical DOE. **Exp Tech** v. 42(1), p. 27-43, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40799-017-0221-2>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40799-017-0221-2>. Acesso em: 16 fev. 2019.

AURES, J. E. V. **Estudo da formação, geometria e resistência do ponto na soldagem por resistência: uma abordagem estatística**. 2006. 164 p. Dissertação (Mestrado em Sistemas Mecatrônicos). Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Mecânica. Brasília, 2006. Disponível em: <http://repositorio.unb.br/handle/10482/6397>. Acesso em: 15 dez. 2018.

AVILA, T. L. D., BRACARENSE, A. Q. Influência dos parâmetros de soldagem no ensaio de torção de solda a ponto em um dispositivo automatizado recém desenvolvido. **Soldagem & Inspeção**, v. 22 (2), p. 228-237, 2017. DOI: [10.1590/0104-9224/SI2202.11](https://doi.org/10.1590/0104-9224/SI2202.11). Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0104-92242017000200228&script=sci_abstract&lng=pt#:~:text=BRACARENSE%2C%20Alexandre%20Queiroz.-,Influ%C3%Aancia%20dos%20Par%C3%A2metros%20de%20Soldagem%20no%20Ensaio%20de%20Tor%C3%A7%C3%A3o%20de,insp.&text=Quando%20em%20trabalho%20os%20pontos,resist%C3%Aancia%20ao%20esfor%C3%A7o%20de%20tor%C3%A7%C3%A3o. Acesso em: 22 jun. 2019.

AVIO. **Basic configuration of resistance welder and role of each part.** Disponível em: <http://www.avio.co.jp/english/products/assem/principle/welding/configuration.html>. Acesso em: 30 jan. 2020.

AZUR SPACE. **Solar power GmbH: 30% triple junction GaAs solar cell assembly.** 2018. Disponível em: http://www.azurspace.com/images/products/0003401-01-01_DB_3G30A.pdf. Acesso em: 21 ago. 2018.

AZUR SPACE. **30% Triple junction GaAs solar cell. Datasheet.** 2016. 2 p. Disponível em: http://www.azurspace.com/images/products/0003422-02-02_DB_3G30C.pdf. Acesso em: 10 fev. 2020.

BALESTRASSI, P. P.; PAIVA, A. P. **Estatística aplicada.** Apostila. UNIFEI - Universidade Federal de Itajubá, Instituto de Engenharia de Produção & Gestão 2007. 263 p. Disponível em: https://www.doraci.com.br/downloads/matematica/estatistica-aplicada_UNIFEI.pdf. Acesso em: 25 jan. 2018.

BARUEL, M. F. **Estudo da variação da corrente fotogerada nos painéis solares dos satélites do INPE.** 2012. 126 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia Espaciais/ Engenharia e Gerenciamento de Sistemas Espaciais). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, São José dos Campos, 2012. Disponível em: <http://mtc-m16d.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m19/2012/01.31.13.30/doc/publicacao.pdf>. Acesso em: 19 ago. 2018.

BARUEL, M. F.; VEISSID, N. Degradação em órbita dos painéis solares dos satélites brasileiros SCD1 e SCD2. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, IV.; CONFERENCIA A LATINO-AMERICANA DA ISES, VI., 2012, – São Paulo, Brasil. **Anais...** 2012. Disponível em: <http://mtc-m16d.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m19/2012/12.27.11.22/doc/DEGRADA%C7%C3%20EM%20d3RBITA%20DOS%20PAIN%C9IS%20SOLARES%20DOS%20SAT%C9LITES%20BRASILEIROS%20SCD1%20E%20SCD2.pdf?metadatarpository=&mirror=sid.inpe.br/mtc-m19@80/2009/08.21.17.02.53>. Acesso em: 22 mai. 2019.

BANKS, B. A., GROH, K. K., MILLER, S. K. **Low earth orbital Atomic Oxygen interactions with spacecraft materials**. NASA/TM—2004-213400. Prepared for the 2004 Fall Meeting sponsored by the Materials Research Society Boston, Massachusetts, November 29–December 3, 2004. Disponível em: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20040191331.pdf>. Acesso em: 11 mar. 2019.

BHATIA, S. C. **Advanced renewable energy systems**. 2.ed. New Delhi, India: Woodhead. 2014. 743 p. ISBN: 9789380308432.

BRANCO, H. L. O. **Avaliação de capas de eletrodos utilizadas na soldagem por resistência de chapas galvanizadas automotivas**. 2004. 116 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 2004. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/33534>. Acesso em: 18 mai. 2019.

BRENNAN, P. S. *et al.* Evaluation of welded interconnects on thermally cycled silicon solar cells. In: IEEE WORLD CONFERENCE ON PHOTOVOLTAIC ENERGY CONVERSION, 1. - WCPEC (A JOINT CONFERENCE OF PVSC, PVSEC and PSEC). IEEE. 1994, Waikoloa, HI, USA. **Proceedings ...** Waikoloa: WCPEC, 1994. DOI: 10.1109/WCPEC.1994.520767. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/520767>. Acesso em: 20 mai. 2019.

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. 226 p. Tese (Doutorado em Engenharia e Tecnologia Espaciais/ Engenharia e Gerenciamento de Sistemas Espaciais). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. São José dos Campos, Brasil. 2014. Disponível em: <http://mtc-m16d.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m19/2014/01.28.12.30/doc/publicacao.pdf>. Acesso em: 19 ago. 2018.

BUNGE, M. **Epistemologia**: curso de especialização. São Paulo: Universidade de São Paulo: 1980.

BUNGE, M. **La investigación científica**. 2 ed corrigida. Barcelona: Ariel, S.A. 1989.

CALLISTER JUNIOR W. D. **Ciência e engenharia dos materiais**: Uma introdução. Rio de Janeiro: 2008 LTC.

CARNEIRO M. R. D., BARBOSA, R. H. **Estudo dos parâmetros de solda a ponto com ênfase na soldagem de aços galvanizados**. 2015. 18 p. Campos dos Goytacazes - RJ: Instituto Federal de Educação. (2015). Disponível em: <http://bd.centro.iff.edu.br/handle/123456789/24>. Acesso em: 19 dez. 2018.

CHINA-BRAZIL EARTH RESOURCES SATELLITE – CBERS. **Satélite CBERS**. 2019. Disponível em: <http://www.cbbers.inpe.br/sobre/cbbers3-4.php>. Acesso em: 01 mar. 2019.

CENTRO DE REFERÊNCIAS PARA AS ENERGIAS SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE S. BRITO – CRESSEB. **Diodo de bloqueio**. 2019. Disponível em: http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&lang=pt&cid=331. Acesso em: 13 mar. 2019.

CHO, Y-S., LI. W., HU, S. J. Design of experiment analysis and weld lobe estimation for aluminum resistance spot welding. **Welding Research. SUPPLEMENT TO THE WELDING JOURNAL**, p. 45-51, 2006. Disponível em: <http://files.aws.org/wj/supplement/03-2006-CHO-s.pdf>. Acesso em: 20 fev. 2020.

CHU, C. ILES, P. Control of parallel gap welding for solar cells. In: ELECTRONICS COMPONENTS CONFERENCE, 38., 1988, Los Angeles, CA, USA. **Proceedings...** 1988, p. 40-44, DOI: [10.1109/ECC.1988.12567](https://doi.org/10.1109/ECC.1988.12567). Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/12567> Acesso em: 20 mai. 2019.

COLOMBARI, R. R. **Aplicação de delineamento de experimentos para o processo de solda à projeção**. 2004. 119 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção), Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI, Itajubá – MG. 2004.

CRESPO, A. A. **Estatística fácil**. 18.ed. São Paulo: Saraiva, 2002. 224 p. ISBN: 85-02-02056-0.

DIAS, J. S. **Uma metodologia para otimização de parâmetros de soldagem através de solda por resistência aplicada a chapa de aço Interstitial Free IF**. 2011. 109 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais). CEFET Centro Federal de Educação Tecnológica, Rio de Janeiro, 2011. Disponível em: http://dippq.cefet-rj.br/ppemm/attachments/article/81/4_Joanes%20Silva%20Dias.pdf. Acesso em: 20 ago. 2018.

DIAS, A. O., SILVA, E. M., COSTA, S. C., CÔRREA, E. O. **Aplicação da técnica de projeto e análise de experimento na soldagem do aço inoxidável AISI-304 com arame tubular**. In: SIMPÓSIO DE MECÂNICA COMPUTACIONAL, 9., Universidade Federal de São João Del-Rei – MG – ABMEC, 2010. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/314755798_APLICACAO_DA_TECNICA_DE_PROJETO_E_ANALISE_DE_EXPERIMENTO_NA_SOLDAGEM_DO_ACO_INOXIDAVEL_AISI-304_COM_ARAME_TUBULAR. Acesso em: 04 abr. 2019.

DIAS, C. L. A. **Modelos de avaliação de desempenho de diferentes tecnologias de geração fotovoltaica: estudo de caso para a região dos lagos.** 2017. 239 p. Tese (Doutorado em Planejamento Energético). UFRJ / COPPE / Programa de Planejamento Energético, 2017. Disponível em: http://www.ppe.ufrj.br/images/publica%C3%A7%C3%B5es/doutorado/C%C3%A9sar_Luiz_de_Azevedo_Dias.pdf. Acesso em: 15 mai. 2021.

DUNN, B. D. **Materials and processes for spacecraft and high reliability applications.** Chichester, UK, 2016, Springer International Publishing. 667 p., ISSN 2365-9599.

DURAN, J. C. *et al.* **Convenio de cooperación CONAE-CNEA: desarrollo, fabricación y ensayo de paneles solares para misiones satelitales Argentinas – actividades desarrolladas em el último año.** ASADES - Avances em Energías Renovables y Medio Ambiente, v. 6, n. 1, 2002. Impreso em la Argentina. ISSN 0329-5184. Disponível em: <https://www.mendoza-conicet.gob.ar/asades/modulos/averma/trabajos/2002/2002-t004-a003.pdf>. Acesso em: 14 mar. 2019.

DYADEM PRESS. **Guidelines for Failure Mode and Effects Analysis for automotive, aerospace and general manufacturing industries.** Canada: CRC Press, 2003. ISBN 0849319080.

ELFIKY, D. *et al.* Study the effects of proton irradiation on GaAs/Ge solar cells. In: IEEE PHOTOVOLTAIC SPECIALISTS CONFERENCE, 35. 2010, Honolulu, HI, EUA. **Proceedings...** PVSC, 2010. p. 002528–002532. DOI: <https://doi.org/10.1109/PVSC.2010.5614633>. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5614633>. Acesso em: 19 mai. 2019.

ENGENHARIA ESPACIAL INPE: Missão Amazonia-1. **Estrutura do painel solar.** Disponível em: <https://www.facebook.com/amazonia1inpe/photos/pcb.350815635596997/350813745597186>. Acesso em: 20 abr. 2021.

EUROPEAN SPACE AGENCY – ESA. **Célula solar de tripla junção.** 2019. Disponível em: https://www.esa.int/spaceinimages/Images/2014/04/30_efficient_solar_cell. Acesso em: 10 mar. 2019.

EUROPEAN COOPERATION FOR SPACE STANDARDIZATION (ECSS). **ECSS-S-ST-00-01C Glossary of terms.** Noordwijk, The Netherlands, 2012. 63 p.

EUROPEAN COOPERATION FOR SPACE STANDARDIZATION (ECSS). **ECSS-E-ST-20-08C Space Engineering** – Photovoltaic assemblies and components. Rev.1. Noordwijk, The Netherlands, 2012. 197 p.

FERRO, R. J. *et al.* Novel techniques for evaluation of interconnections in solar cells used for spacecraft power generation. In: Conference Record of the IEEE PHOTOVOLTAIC SPECIALISTS CONFERENCE, 26 – 1997. 29 Sep. -3 Oct. 1997, Anaheim, CA, USA. **Proceedings ... 1997 USA**. DOI: 10.1109/PVSC.1997.654246. Disponível em:

<https://ieeexplore.ieee.org/document/654246>. Acesso em: 18 jun. 2019.

FINCKENOR, M. M., GROH, K. K. **Space environmental effects**. A researcher's guide to International Space Station. NASA ISS Program Science Office. 40 p. Nº 14. 2015. Disponível em: <http://www.nile-center.com/uploads/86YECA28MYQB6TQ.pdf>. Acesso em 9 fev. 2020.

FIGUEIREDO, A. M. G. **Caracterização da fadiga mecânica de baixo ciclo em ligas superelásticas de NiTi**. 2006. 235 p. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas). 2006. Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG. Belo Horizonte – MG. Disponível em:

https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/MAPO-7REH9X/1/ana_maria_figuereido.pdf. Acesso em: 29 nov. 2019.

FIGUEIREDO, G. *et al.* Alternativa de baixo custo para imagens em Eletroluminescência de módulos fotovoltaicos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, VII., 2018, Gramado, Brasil. **Anais...** 2018. Disponível em: <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/321>. Acesso em: 28 mai. 2019

FONSECA, B. M. V. **Luminescência de células solares**. 2018. 101 p. Dissertação de Mestrado (Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente). Universidade de Lisboa. Faculdade de Ciências. 2018. Disponível em: <https://repositorio.ul.pt/handle/10451/35651>. Acesso em: 25 mai. 2019.

FRAZÃO, M. S., **Eletroluminescência de células solares**. 2016. 84 p. Dissertação de Mestrado (Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente). Universidade de Lisboa. Faculdade de Ciências. 2016. Disponível em: <https://repositorio.ul.pt/handle/10451/23080>. Acesso em: 20 mai. 2019.

GIERTH, P.; REBENKLAU, L.; MICHAELIS, A. Evaluation of soldering processes for high efficiency solar cells. 2012. In: IEEE INTERNATIONAL SPRING SEMINAR ON ELECTRONICS TECHNOLOGY, 35., 2012; Bad Aussee, Austria. **Proceedings...** 2012. DOI: <https://doi.org/10.1109/ISSE.2012.6273123>. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6273123>. Acesso em: 19 jun. 2019.

GROTE, H-K, ANTONSSON, E. K. **Springer handbook of mechanical engineering**. New York, USA. Springer. 1576 p. 2009. E-ISBN: 978-3-540-30738-9.

HAALAND, P.D., O'CONNELL, M.A., COLEMAN, D.E., MONTGOMERY, D.C. **Discussion:** a systematic approach to planning for a designed industrial experiment. *Technometrics*, n.209, p. v.35, n.1, p.17-20, 1993

HASHEMI, R., PASHAZADEH, H., HAMED, M. An incrementally coupled thermo-electro-mechanical model for resistance spot welding. **Materials and Manufacturing Processes**, v. 27 (12) 1442-1449, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1080/10426914.2012.718470>. Acesso em: 19 jun. 2019.

ILES, P. A. Evolution of space solar cells. **ELSEVIER**. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, v. 68, Issue 1, p. 1-13, April 2001. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0927-0248\(00\)00341-X](https://doi.org/10.1016/S0927-0248(00)00341-X). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S092702480000341X>. Acesso em: 05 nov. 2019.

IMAIZUMI M. *et al.* Radiation degradation and damage coefficients of InGaP / GaAs / Ge triple-junction solar cell by low-energy electrons. In: IEEE PHOTOVOLTAIC SPECIALISTS CONFERENCE (PVSC), 37., 2011, New York, ,. **Proceedings...**2011. v.37, p. 1579. DOI: 10.1109 / PVSC.2011.6186259. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6186259>. Acesso em: 05 nov. 2019.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS – INPE. **1° Satélite de Coleta de Dados**. 2019. Disponível em: http://www.inpe.br/scd1/site_scd/scd1/operacao.htm. Acesso em: 04 mar. 2019.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS – INPE. **Amazonia-1**. 2020. Disponível em: http://www.inpe.br/amazonia1/sobre_satelite/. Acesso em: 15 abr. 2020.

JÄPER, K. *et al.* **Solar Energy: fundamentals, technology and systems**. Delft University of Technology. Netherlands. 408 p. 2014.

JI, X. *et al.* Microstructure of Solar cell interconnections by resistance welding. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRONIC PACKAGING TECHNOLOGY, 17 (ICEPT). 2016, Wuhan, China. **Proceedings...** ICEPT, 2016. ISBN: 978-1-5090-1396-8. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7583245>. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7583245>. Acesso em: 15 mai. 2019.

JUNIOR MACIEL, H. **Uso do planejamento e análise de experimentos no desenvolvimento de um processo de solda por resistência elétrica em pequena escala**. 2011. 66 p. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Ciências e Engenharia de Produção). 2011. Universidade Federal de Itajubá, Itajubá – MG. Disponível em: <https://repositorio.unifei.edu.br/xmlui/handle/123456789/1303>. Acesso em: 24 abr. 2019.

KIM, T.; PARK, H.; RHEE, S. Optimization of welding parameters for resistance spot welding of TRIP steel with response surface methodology. **Int J Prod Res** v. 43(21), p. 4643-4657, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1080/00207540500137365>. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00207540500137365>. Acesso em: 18 abr. 2019.

KLEIMAN, J. Protection of Materials and structures from the space environment. ICPMSE-11. Springer International Publishing. Astrophysics and Space Science, v. 47. 541 p. 2017. **Proceedings...** Ontario – Canadá. Springer. ISSN 1570-6605.

KLENGEL, R.; PETZOLD, M.; SCHADE D.; SYKES, B. Improved testing of soldered Busbar interconnects on silicon solar cells. In: EUROPEAN MICROELECTRONICS & PACKAGING CONFERENCE, 18., 2011, Brighton, UK. **Proceedings...** 2011. p. 1-5. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6142434>. Acesso em: 24 abr. 2020.

LA ROCHE, G. J.; OXYNOS-LAUSCHKE, C.; WEHNER, K. Gold interconnectors for solar generators in low earth orbits. In: IEEE WORLD CONFERENCE ON PHOTOVOLTAIC ENERGY CONVERSION, 1. - WCPEC (A JOINT CONFERENCE OF PVSC, PVSEC and PSEC), Waikoloa, HI, USA. **Proceedings...** Waikoloa: WCPEC, 1994. v. 2 p. 2196-2199. DOI: [10.1109/WCPEC.1994.521659](https://ieeexplore.ieee.org/document/521659). Disponível em <https://ieeexplore.ieee.org/document/521659>. Acesso em: 15 jul. 2019.

LARRY, J. **Welding: Principles and applications**.8.ed. Cengage Learning: 2017. 972 p. ISBN: 978-1-3054-9469-5.

LARSON, R.; FABER, B. **Estatística aplicada**. 6.ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 674 p. ISBN 978-85-430-0477.

LARSON, W. J., WERTZ, J. R. **Space mission analysis and design**. 3.ed. Microcosm Press. California.1999. Space Technology Library. ISBN: 1881883108.

LEY, W., WITTMANN, K., HALLMANN, W. **Handbook of space technology Aerospace Series**. London: Wiley and Sons, 2009. 908 p. ISBN: 978-0-470-69739-9.

LIN, H. L., CHOU, T., CHOU, C. P. Optimization of resistance spot welding process using Taguchi method and a neural network. **Experimental Techniques**. v. 31, p. 30-36, 2007. DOI: 10.1111/j.1747-1567.2007.00186.x. Disponível em: <https://ir.nctu.edu.tw/bitstream/11536/10376/1/000249661100004.pdf>. Acesso em: 18 abr. 2019.

LIU, J. A study on the influence factors of parallel-gap welding heat. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRONIC PACKAGING TECHNOLOGY, 18., 2017, Harbin, China **IEEE**. ICEPT 2017. Electronic ISBN: 978-1-5386-2972-7. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8046625>. Acesso em: 15 jul. 2019.

LLOYD, W. C. **Reliability improvement with design of experiments**. 2.ed. Revised and Expanded. Quality and Reliability. New York. 2001. ISBN: 0-8247-0527-0

LUFT, W.; MAIDEN, E. E. Temperature cycling effects on solar panels. In: IEEE TRANSACTIONS ON AEROSPACE AND ELECTRONIC SYSTEMS, 5., 1969. **Proceedings...** 1969. vol. AES-5, no. 6, p. 943-950. DOI: 10.1109/TAES.1969.309970. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4103426>. Acesso em: 15 mar. 2019.

LUO, Y. *et al.* Regression modeling and process analysis of resistance spot welding on galvanized steel sheet. **Materials & Design**, v. 30, n.7, p. 2547-2555, 2009. DOI: 10.1016/j.matdes.2008.09.031. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0261306908004998> Acesso em: 03 mar. 2019

MAIA, G. F. S.; BRITO, A. C.; SOUZA, M. L. O. Análise preliminar dos parâmetros e interações do processo de soldagem de interconexões entre células solares empregando projeto de experimentos visando sua futura otimização. In: CONGRESSO AEROESPACIAL BRASILEIRO, 2. Santa Maria – RS. **Anais...** 2019. DVD. ISBN 978-85-5722-334-9. DOI: [10.29327/2cab2019.224917](https://www.even3.com.br/anais/2cab2019/224917). Disponível em: <https://www.even3.com.br/anais/2cab2019/224917-analise-preliminar-dos-parametros-e-interacoes-do-processo-de-soldagem-de-interconexoes-entre-celulas-solares-emp/> Acesso em: 12 mar. 2020.

MAIOLINO, J. V., VAZ, C. C. **Customized solar panels development for cubesats**. A Brazilian Company Experience. 2nd Latin American IAA CubeSat Workshop. February 28 to March 2, 2016. Florianópolis, Brazil.

MAIOLINO, J. V. **Desenvolvimento tecnológico de gerador solar para satélite no cenário *new space***. Monografia de qualificação de doutorado. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, São José dos Campos, 2021.

MEIER, R. Ultrasonic methods for inline solar cell interconnector inspection: method overview, applications and limits.. In: WORLD CONFERENCE ON PHOTOVOLTAIC ENERGY CONVERSION, 7.; (WCPEC) (A JOINT CONFERENCE OF 45th IEEE PVSC, PVSEC, 28 & EU PVSEC, 34., 2018, Waikoloa Village, HI, **Proceedings...** 2018. p. 2229-2233, DOI: [10.1109/PVSC.2018.8547839](https://ieeexplore.ieee.org/document/8547839). Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8547839>. Acesso em: 27 out. 2019.

MEIER, R. *et al.* Thermal cycling induced load on copper-ribbons in crystalline photovoltaic modules. RELIABILITY OF PHOTOVOLTAIC CELLS, MODULES, COMPONENTS, AND SYSTEMS III, 777312, 2010. **Proceedings...** 2010.SPIE 7773. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.861350>. Acesso em: 27 out. 2019.

MEIER, R. *et al.* Microstructural optimization approach of solar cell interconnectors fatigue behavior for enhanced module lifetime in extreme climates. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CRYSTALLINE SILICON PHOTOVOLTAICS, 6., 2016, Chambéry, France. **Proceedings...** 2016. v. 92, p. 560-568. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.07.020>. Acesso em: 28 out. 2019.

MEIER, R. *et al.* Reduction of soldering induced stresses in solar cells by microstructural optimization of copper-ribbons. Reliability of Photovoltaic Cells, Modules, Components, and Systems IV, 811206. **Proceedings...** 2011. SPIE 8112. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.893519>. Acesso em: 27 out. 2019.

METALS HANDBOOK, **Fatigue and fracture**. Volume 19. USA: AMERICAN SOCIETY FOR METALS – ASM, 1996. ISBN 0-87170-385-8.

METALS HANDBOOK, Welding, **Brazing and soldering**. Volume 6. Ninth edition. USA: AMERICAN SOCIETY FOR METALS – ASM, 1983.

MICHAELIS. **Moderno dicionário da língua portuguesa**. São Paulo, SP: Melhoramentos, 2000. ISBN: 85-86116-24-6.

MILLER **Handbook for resistance spot welding**. 2010. Disponível em: <https://www.millerwelds.com/-/media/Millerwelding>. Acesso em: 24 mai. 2018.

MINITAB 17®. Versão 17.3.1. [s. l.]: 2016 Minitab. 1 CD.

MISHRA, S. S., PATTANAIK, A., MISHRA, D., PAL, K. Parametric optimization of resistance spot welding of ss302 and low carbon steel using Taguchi method. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON EMERGING TRENDS IN MECHANICAL ENGINEERING. 2016, Faculty of Science and Technology. Hyderabad – India. **Proceedings...** 2016. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/319327760_Parametric_Optimization_of_Resistance_Spot_Welding_of_SS302_and_Low_Carbon_Steel_using_Taguchi_Method. Acesso em: 23 jul. 2019.

MONDESI, P. J.; MARQUES, P. V.; SANTOS, D. B. **Introdução à metalurgia de soldagem**. 2012. Belo Horizonte. 209 p. Universidade Federal de Minas Gerais – Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. Disponível em: <https://demet.eng.ufmg.br/wp-content/uploads/2012/10/metalurgia.pdf>. Acesso em: 18 mar. 2020.

MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments**. 9.ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2017. ISBN 9781119299363 (pdf).

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**. 2. ed. São Paulo: LTC, 2003. p. 230-320

MONTEVECHI, J. A. B. *et al.* Application of design of experiments on the simulation of a process in an automotive industry. In: Winter Simulation Conference, **Proceedings**... Washington, DC, USA. 2007. DOI: 10.1109/WSC.2007.4419779. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4419779>. Acesso em: 19 nov. 2019.

MUHAMMAD, N. *et al.* Optimization and modeling of spot welding parameters with simultaneous multiple response consideration using multi-objective Taguchi method and RSM. **J Mech Sci Technol** v. 26(8), p. 2365-2370, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12206-012-0618-x>. Acesso em: 18 jul. 2019.

MUHAMMAD, N. *et al.* Model development for quality features of resistance spot welding using multi-objective Taguchi method and response surface methodology. **Journal of Intelligent Manufacturing**. v. 24, p. 1175–1183, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10845-012-0648-3>. Acesso em: 18 jul. 2019.

NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY (NREL) **Eficiência e tecnologias das células solares**. 2021. Disponível em: <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>. Acesso em: 23 mar. 2021.

NOVAES, C. G. Otimização de métodos analíticos usando metodologia de superfícies de resposta - Parte I: variáveis de processo. **Revista Virtual de química**, v. 9, n. 3, p. 1184-1215, 2017. DOI: 10.21577/1984-6835.20170070. Disponível em: <http://static.sites.s bq.org.br/rvq.s bq.org.br/pdf/v9n3a19.pdf>. Acesso em: 15 mai. 2021.

ORBITAL ENGENHARIA. **Painel solar**. [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por <graziela.fernanda.souza@gmail.com> em 20 mai. 2021.

ORBITAL ENGENHARIA. **Diagrama elétrico**. [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por <graziela.fernanda.souza@gmail.com> em 20 mai. 2021.

ORBITAL ENGENHARIA. **Curvas I x V do simulador solar**. [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por <graziela.fernanda.souza@gmail.com> em 01 abr. 2021.

PADOVANI, C. R. **Delineamento de experimentos**. São Paulo: Cultura Acadêmica: Universidade Estadual Paulista, Pró-reitora de Graduação, 2014. 129p. ISBN: 978-85-7983-523-0. Disponível em: http://nbcgib.uesc.br/lec/download/material_didatico/pdf_files/est_experimental/padovani.pdf. Acesso em: 05 mai. 2021.

PANDER, M. *et al.* Lifetime estimation for solar cell interconnectors. In: EUROPEAN PHOTOVOLTAIC SOLAR ENERGY CONFERENCE AND EXHIBITION, 28. 2013, Villepinte (Villepinte, Frankreich), EUPVSEC201. **Proceedings...** 2013. p. 2851 – 2857. DOI: 10.4229/28thEUPVSEC2013-4CO.10.3. Disponível em: <https://www.eupvsec-proceedings.com/proceedings?paper=26064>. Acesso em: 02 set. 2019.

PATTANAİK, A. K., PANDA, S. N., PAL, K., MISHRA, D. A Comparative investigation to process parameter optimization for spot welding using Taguchi based grey relational analysis and metaheuristics. *Materials Today: Proceedings...* v. 5(5), p. 11408-11414, Part 2, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.02.108>. Acesso em: 21 jul. 2019.

PENNSYLVANIA State University Eberly College of Science – Department of Statistics. 2021. **Design of Experiments**. Disponível em: <https://online.stat.psu.edu/stat503/>. Acesso em: 25 fev. 2021.

PIMENTA, C. D. *et al.* Aplicação das metodologias *Desirability* e *Simplex* para otimização das propriedades mecânicas em arames de aço temperados. **Scielo**. Production, v. 25, n. 3, p. 598-610, Setembro 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/0103-6513.094812>. Acesso em: 17 dez. 2020.

PIMENTA, C. D. *et al.* Planejamento de experimentos em blocos aplicado às propriedades mecânicas de arames de aço para molas. **Scielo**. Production, São Paulo, v. 24, n. 1, p. 71-83, mar. 2014. Epub 05-Jul-2013. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-65132013005000042>. Acesso em: 17 dez. 2020.

PORTAL SOLAR. **Teste de electroluminescência**. 2020. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/passo-a-passo-da-fabricacao-do-painel-solar.html>. Acesso em: 06 fev. 2020.

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

ROOIJ, A. **Atomic Oxygen effects on HST-SA1 metals**. Hubble Space Telescope Workshop 30-31 May 1995 - ESA WPP-77, p 341. ESA-ESTEC. Disponível em: http://esmat.esa.int/Publications/Published_papers/mtls_hst.pdf. Acesso em: 15 mar. 2019.

ROOIJ, A. **Corrosion in Space**. Encyclopedia of Aerospace Engineering, John Wiley & Sons Ltd, 2010. Disponível em: http://www.esmat.esa.int/Publications/Published_papers/Corrosion_in_Space.pdf. Acesso em: 30 out. 2018.

ROOY, A. The degradation of metal surfaces by Atomic Oxygen. In: EUROPEAN SYMPOSIUM ON SPACECRAFT MATERIALS IN SPACE ENVIRONMENT, 3., 1985, Noordwijk, The Netherlands. **Proceedings...** 1985. ESA SP-232. Disponível em: http://esmat.esa.int/Atox_on_metals.PDF. Acesso em: 03 mar. 2019.

ROWLANDS, H., ANTONY, J. Application of design of experiments to a spot welding process. **ASSEMBLY AUTOMATION**. v. 23(3), p. 273-279, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1108/01445150310486549>. Acesso em: 23 jul. 2019.

SAFARI, M., MOSTAAN, H., YADEGARI K. H., ASGARI, D. Effects of process parameters on tensile-shear strength and failure mode of resistance spot-welds of AISI 201 stainless steel. **International Journal Advanced Manufacturing Technology**. v.89, p. 1853-1863, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9222-z>. Acesso em: 12 jul. 2019.

SANTOS, W. A. **Estudo da influência dos parâmetros de regulação na soldagem por resistência na indústria automobilística**. 2013. 40 p. (Monografia). São Caetano do Sul: Instituto Mauá de Tecnologia. 2013. Disponível em: <https://maua.br/files/monografias/completo-estudo-influencia-dos-parametros-regulagem-182333.pdf> Acesso em: 05 mai. 2019.

SAFYANU, B. D.; ABDULLAH, M. N.; OMAR, Z. Review of power device for solar-powered aircraft applications. **Journal of Aerospace Technology Management**, v. 11, e 4119, 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5028/jatm.v11.1077>. Acesso em: 27 abr. 2019.

SHARPS, P. *et al.* Next generation radiation hard IMM space solar cells. **E3S Web of Conferences**, v. 16, n.03002, 2017. ESPC 2016. DOI: 10.1051/e3sconf/20171603002. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/317119291_Next_Generation_Radiati_on_Hard_IMM_Space_Solar_Cells. Acesso em: 18 mai. 2021.

SCKACKELFORD, J. F. **Ciência dos materiais**. 6.ed. São Paulo. Pearson Prentice Hall, 2008. 556 p. ISBN: 978-85-7605-160-2.

SILVA, H. A., SILVA, M. B. Aplicação de um projeto de experimentos (DOE) na soldagem de tubos de Zircaloy. **Rev. Eletrônica Produção & Engenharia**, v. 1(1): p. 41-52, 2008. Disponível em: <https://periodicos.ufjf.br/index.php/producaoeeengenharia/article/view/28879>. Acesso em: 16 mai. 2019.

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): p. 131 – 140, jul. – dez. (2013). Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14393/19834071.2013.20995>. Acesso em: 28 mai. 2019.

SOUZA, M. L. O.; CARVALHO, T. R. **The fault avoidance and the fault tolerance approaches for increasing the reliability of aerospace and automotive systems**. In: SAE BRASIL, 2005, São Paulo. Anais... p. 15. (INPE-13723-PRE/8916).

SOUZA *et al.* **Introdução a projetos de experimentos: caderno didático**. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Naturais e Exatas, Departamento de Estatística, 2002. 129 p. Disponível em: <http://w3.ufsm.br/adriano/livro/Livro%20de%20Projetos%20de%20Experimentos.pdf>. Acesso em: 04 mai. 2020.

SREENU. S. *et al.* Regression modeling and process analysis of resistance spot welded joints. In: INTERNATIONAL, 5.; ALL INDIA MANUFACTURING TECHNOLOGY DESIGN AND RESEARCH CONFERENCE, 26 (AIMTDR 2014). 2014, Guwahati, Assam, Índia **Proceedings...** 2014. Disponível em: <http://www.iitg.ac.in/aimtdr2014/PROCEEDINGS/papers/513.pdf>. Acesso em: 11 mai. 2019.

STANDARD SOLAR. (2018). **Configuração painel solar**. Disponível em <https://standardsolar.com.au/products/solar-panels/>. Acesso em: 17 out. 2018.

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 ago. 2018.

STROBL, G. F. X.; *et al.* Evolution of fully European triple GaAs solar cell. EUROPEAN SPACE POWER CONFERENCE, 7., 2005, Stresa, Italy. **Proceedings...** Italy: ESA SP-589, 2005. Disponível em: http://www.azurspace.com/images/pdfs/Download%20PDF_9.pdf. Acesso em 04 fev. 2020.

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**. pp. 3595-3600. DOI: 10.1109/PVSC.2014.6924884. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6924884>. Acesso em: 04 fev. 2020.

SUNSTRUCK SOLAR SOLUTION. (2021). **String**. Disponível em: <https://www.sunstrucksolarsolutions.com/wp-content/uploads/2020/10/Chapter-1e.pdf>. Acesso em: 02 mar. 2021.

SZCZEPANIK, G. A concepção de método científico para Mario Bunge. **REVISTA GUAIRACÁ**, p. 09-30, n. 27, 2011 ISSN 0103-250X. Disponível em: <https://revistas.unicentro.br/index.php/guaiaraca/article/download/2418/2016>. Acesso em: 01 mai. 2021.

TAKAMOTO, T.; *et al.* Paper-thin InGaP/ GaAs solar cells. In: WORLD CONFERENCE ON PHOTOVOLTAIC ENERGY CONFERENCE, 4., 2006, Waikoloa, HI, USA. **IEEE**. p. 1769-1772. DOI: [10.1109/WCPEC.2006.279833](https://doi.org/10.1109/WCPEC.2006.279833). Acesso em: 18 nov. 2019.

TORCHYNSKA, T. V., POLUPAN, G. High efficiency solar cells for space applications. **Superficies y vacío** v.17(3), p. 21-25, septiembre de 2004. ©Sociedad Mexicana de Ciencia de Superficies y de Vacío. Disponível em: https://www.fis.cinvestav.mx/~smcsyv/supvac/17_3/SV1732104.PDF. Acesso em: 20 fev. 2020.

TORRES, L. C. G. **Células solares para uso espacial**. (Notas de aula). Apresentação do Curso de Tecnologia de Satélites. Divisão Eletrônica Espacial – DEA, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. São José dos Campos – SP. Brasil. Maio de 2012.

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**. 2014. 171 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia Espaciais / Engenharia e Gerenciamento de Sistemas Espaciais). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, São José dos Campos, 2012. Disponível em: <http://mtc-m21b.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m21b/2014/06.18.14.10/doc/publicacao.pdf?ibiurl.language=pt-BR>. Acesso em: 25 abr. 2021.

TURETTA, I. **Análise do desgaste de eletrodos de solda por resistência a ponto em função do número de pontos soldados em chapas galvanizadas**. 2016. 85 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais). 2016. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – SP. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3133/tde-07102016-093322/publico/lvoneiTurretta16.pdf>. Acesso em: 15 mai. 2019.

VALERA, J. *et al.* Optimization of electrical parameters in resistance spot welding of dissimilar joints of micro-alloyed steels TRIP sheets. 2017. **Procedia Manuf** v. 13, p. 291-298. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.09.074> Acesso em: 13 abri. 2019.

VAZ C. C. **Geradores fotovoltaicos**: apresentação do curso de tecnologia de satélites (Notas de aula). São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. 1999.

VAZ, J. N.; SINKA, V.; VAZ, C. C. **Determinação experimental dos parâmetros de soldagem de células solares de uso espacial.** In: ENCONTRO LATINO AMERICANO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, XI.; ENCONTRO LATINO AMERICANO DE PÓS-GRADUAÇÃO, VII. – Universidade do Vale do Paraíba. p. 501-504. 11º INIC (2007). São José dos Campos – SP. Disponível em: http://www.inicepg.univap.br/cd/INIC_2007/trabalhos/engenharias/inic/INICG00259_01O.pdf. Acesso em: 22 ago. 2019.

VAZ, C. C., VAZ, J. N. Manufacturing and testing of the electrical part of solar array for the China-Brazil Earth Resources Satellite – CBERS 2B. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING, 19, November 5-9, 2007, Brasília, DF. 2007. **Proceedings...** Brasília: COBEM 2007. Disponível em: <https://abcm.org.br/anais/cobem/2007/pdf/COBEM2007-1878.pdf>. Acesso em: 05 mai. 2018.

VAZ, C. C., VAZ, J. V. Welding head development and qualification for solar array manufacturing for space applications. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING, 18. November 6-11, 2005, Ouro Preto, MG. **Proceedings...** Ouro Preto, COBEM 2005. Disponível em: <https://www.abcm.org.br/anais/cobem/2005/PDF/COBEM2005-0634.pdf>. Acesso em: 03 mai. 2018.

VEISSID, N.; VILELA, W. A.; PASIN, D. G. Estudo dos parâmetros de saída de uma célula solar de tripla junção. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, VII., 2018, Gramado, Brasil. **Anais...** 2018. Disponível em: <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/255>. Acesso em: 20 fev. 2019.

VEST, C. E. The effects of the space environment on spacecraft surfaces. Johns Hopkins **APL Technical Digest**, v. 12, n. 1, p. 46-54, 1991. Disponível em: <https://www.jhuapl.edu/Content/techdigest/pdf/V12-N01/12-01-Vest.pdf>. Acesso em: 10 mar. 2020.

VIGNESH, K.; ELAYAPERUMAL, A.; VELMURUGAN, P. Optimization of resistance spot welding process parameters and microstructural examination for dissimilar welding of AISI 316L austenitic stainless steel and 2205 duplex stainless steel. In: **International Journal Advanced Manufacturing Technology**. v. 93 p. 455-465, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0089-4> Acesso em: 12 mar. 2019.

YANG, J. C., GROH, K. K. Materials issues in the space environment. **MRS BULLETIN**. v. 35, January 2010. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/278240923_Materials_Issues_in_the_Space_Environment. Acesso em: 03 mar. 2019.

YI, L. *et al.* Regression modeling and process analysis of resistance spot welding on galvanized steel sheet. **Materials and Design**. n. 30, p. 2547-2555, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.09.031>. Acesso em: 11 mar. 2019.

YUE, X. *et al.* Optimal welding parameters for small-scale resistance spot welding with response surface methodology. **Sci Technol Weld Join** v. 22, n. 2, p. 143-149, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1080/13621718.2016.1204799> Acesso em: 03 mar. 2019.

WENDT, J. *et al.* Improved quality test method for solder ribbon interconnects on silicon solar cells. In: IEEE INTERSOCIETY CONFERENCE ON THERMAL AND THERMOMECHANICAL PHENOMENA IN ELECTRONIC SYSTEMS, 12. 2010, Las Vegas, NV, USA, p. 1-4, **Proceedings...** 2010. DOI: [10.1109/ITHERM.2010.5501299](https://doi.org/10.1109/ITHERM.2010.5501299). Acesso em: 19 dez. 2020.

WIESE, S.; MEIER, R.; KRAEMER, F.; BAGDAHN, J. Constitutive behaviour of copper ribbons used in solar cell assembly processes. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THERMAL, MECHANICAL AND MULTI-PHYSICS SIMULATION AND EXPERIMENTS IN MICROELECTRONICS AND MICROSYSTEMS, 10., 2009, Delft, Netherlands. **Proceedings...** EuroSimE: 2009. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4938464>. Acesso em: 30 mai. 2018.

WIESE, S.; MEIER, R.; KRAEMER, F. Mechanical behavior and fatigue of copper ribbons used as solar cell interconnectors. In: INTERNATIONAL THERMAL, MECHANICAL & MULTI-PHYSICS SIMULATION, 11.; EXPERIMENTS IN MICROELECTRONICS AND MICROSYSTEMS (EuroSimE). 2010, Bordeaux, France. **Proceedings...** 2010. DOI: <https://doi.org/10.1109/ESIME.2010.5464551> Acesso em: 17 dez. 2020.

ZARMAI, M. T; EKERE, N. N.; ODUOZA, C. F.; EMEKA H. A. A review of interconnection technologies for improved crystalline silicon solar cell photovoltaic module assembly. **Applied Energy**. v. 154, p. 173-182, 2015 ISSN 0306-2619. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.04.120> Acesso em: 20 dez. 2020.

ZEMEN, Y. *et al.* The impact of yield strength of the interconnector on the internal stress of the solar cell within a module. In: EUROPEAN PHOTOVOLTAIC SOLAR ENERGY CONFERENCE AND EXHIBITION, 25.; WORLD CONFERENCE ON PHOTOVOLTAIC ENERGY CONVERSION, 5., 2010, Valencia, Spain. **Proceedings...** 2010. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/267943914_The_impact_of_yield_strength_of_the_interconnection_on_the_internal_stress_of_the_solar_cell_within_a_module/citations. Acesso em: 20 dez. 2020.

ZHELUDKEVICH, M.L. *et al.* Oxidation of Silver by Atomic Oxygen. **Oxidation of metals** v. 61, p. 39–48 (2004). DOI: <https://doi.org/10.1023/B:OXID.0000016275.96500.24>. Acesso em: 15 mar. 2019.

ZHOE, D. *et al.* Process analysis and optimization for failure energy of spot-welded titanium alloy. **Materials & Design**. v. 60, p. 479-489, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.03.070>. Acesso em: 12 mai. 2019.

GLOSSÁRIO

Coefficiente de Determinação (R²) – mede o quanto a variável resposta é explicada pelo modelo. Quanto maior for o valor de R² melhor será. Assim, pode-se dizer que com um valor de R² acima de 70%, o modelo está explicando bem a variação na variável resposta.

Desirability – segundo Novaes *et al.* (2017) o método consiste em avaliar várias respostas de forma simultânea, permitindo a determinação de uma combinação de condições mais próximas aos requisitos desejados. A escala da *Desirability* (ou Desejabilidade em Português) varia de 0 (resposta inaceitável) a 1 (resposta desejada). O método é embasado na transformação de cada resposta individual em uma escala adimensional de *Desirabilities* individuais (d_i); assim a transformação torna possível a combinação dos resultados encontrados para as propriedades medidas em diferentes ordens de grandeza. A *Desirability* global (D) pode ser obtida com a média geométrica das *Desirabilities* individuais, conforme a equação abaixo:

$$D = \sqrt[m]{d_1 d_2 \dots d_m}$$

Onde m é o número de respostas obtidas na otimização. Para mais informações sobre o método de *Desirability*, recomenda-se a leitura em Novaes *et al.* (2017).

Erro do Tipo I – ocorre quando há a rejeição da hipótese nula (H_0), quando esta for verdadeira. É também conhecido como Falso Alarme ou Falso Positivo.

Erro do Tipo II – ocorre quando se falha em rejeitar a hipótese nula quando esta for falsa. É também conhecido como Perda de Alarme ou Falso Negativo.

O quadro abaixo torna mais simples a compreensão dos erros dos tipos I e II.

	H ₀ é verdadeira	H ₀ é falsa
Rejeita-se H ₀	Erro do Tipo I (rejeição de um hipótese nula verdadeira)	Decisão correta
Aceita-se H ₀	Decisão correta	Erro do Tipo II (aceitação de uma hipótese nula falsa)

Graus de Liberdade (GL) – são usados para calcular o Quadrado Médio (QM). Em geral, os graus de liberdade medem quanta informação "independente" se tem disponível para calcular cada Soma dos Quadrados (SQ).

Assim:

- GL total = são a soma dos GL de todos os fatores + GL de todas as interações + GL do erro.
- GL total = n-1, onde n é o número total de observações.
- GL fator = k-1, onde k é o número de níveis do fator.
- GL interação = (k₁ - 1) * (k₂ - 1) onde k₁ é o número de níveis do fator um e k₂ é o número de níveis do fator dois. A mesma regra se aplica a interações de mais de dois fatores.

Hipótese Nula (H₀) – afirma que um parâmetro da população (como a média, o desvio padrão, e assim por diante) é igual a um valor hipotético. A hipótese nula é, muitas vezes, uma alegação inicial baseado em análises anteriores ou conhecimentos especializados.

Hipótese Alternativa (H₁) – afirma que um parâmetro da população é menor, maior ou diferente do valor hipotético na hipótese nula. A hipótese alternativa é aquela que você acredita que pode ser verdadeira ou espera provar ser verdadeira.

Intervalo de Confiança (IC) – é uma amplitude de valores, derivados de estatísticas de amostras, que têm a probabilidade de conter o valor de um parâmetro populacional desconhecido. Fornece um intervalo de valores prováveis para a resposta média.

Intervalo de Predição (IP) – fornece um intervalo de valores prováveis para uma única resposta. O valor para IP é sempre maior que IC em virtude da incerteza adicionada envolvida na predição da resposta única em relação à resposta média.

Repetição – as medidas de repetição são obtidas durante o mesmo tratamento (ou corrida) experimental ou tratamentos consecutivos.

Replicação – as medidas de replicação são obtidas durante tratamentos experimentais idênticos porém diferentes, frequentemente randomizadas.

O MINITAB traz um exemplo que auxilia na compreensão da diferença entre repetição e replicação. O exemplo do MINITAB ilustra uma empresa de manufatura que possui uma linha de produção com diversas configurações que podem ser modificadas pelos operadores. Os engenheiros da qualidade então planejaram dois experimentos, um com repetições e um com replicações, para avaliar o efeito das configurações sobre a qualidade do produto estudado.

1º experimento com repetição: os operadores configuram os fatores da linha de produção com os níveis já definidos, executam a produção e realizam a medição da qualidade de 5 produtos. Novamente a linha de produção é reconfigurada com novos níveis, a produção é executada e a qualidade de 5 produtos são medidas. Esse processo é repetido até que a produção tenha sido realizada uma vez com cada combinação de configurações de fatores e 5 medições de qualidade tenham sido realizadas em cada tratamento (ou corrida).

2º experimento com replicação: os operadores configuram os fatores da linha de produção com níveis predefinidos, executam a produção e obtêm uma medida

de qualidade. Os operadores reconfiguram linha de produção com novos níveis, executam a fabricação e obtêm uma medida de qualidade. De forma aleatória, eles executam cada combinação de configurações de fatores cinco vezes e realizam uma medição em cada tratamento (ou corrida).

Vale ressaltar que em cada experimento são realizadas 5 medições em cada combinação de configuração dos fatores. Porém, para o primeiro experimento, as medições são realizadas durante um mesmo tratamento (ou corrida); já no segundo experimento, as medições de qualidade são realizadas em tratamentos (ou corridas) diferentes. Assim, a variabilidade apresentada entre as medições realizadas com as mesmas configurações de fatores na linha de produção tende a ser maior para as replicações em relação às repetições, pois as máquinas são reconfiguradas antes de cada tratamento, o que confere uma maior variabilidade ao processo.

Resíduo – é a diferença entre um valor observado (y) e seu valor ajustado correspondente (\hat{y}).

Resíduos Padronizados – é igual ao valor de um resíduo, e_i , dividido por uma estimativa de seu desvio padrão.

$$r_1 = \frac{e_i}{\sqrt{QM_{residuo}}}$$

Resíduos padronizados maiores que 2 e menores que -2 são geralmente considerados grandes. Devem ser utilizados para detectar *outliers*, já que os resíduos brutos podem não ser identificadores aceitáveis de *outliers* quando possuem variância não constante.

Teste F ou Valor F - Um teste de hipótese que examina a proporção de duas variâncias para determinar sua igualdade.

Um teste F avalia se a estatística observada excede um valor crítico da distribuição. Se a estatística F observada exceder o valor crítico, rejeite a hipótese nula.

O valor F é calculado conforme equação abaixo:

$$F = \frac{QM}{\text{Erro de } QM}$$

onde:

- QM – Quadrado Médio do fator ou interação;
- Erro QM – é o Quadrado Médio dos erros

Teste-t ou Valor-t – o valor-t não é muito informativo por si, mas ele é usado para calcular o valor-p. O valor-t é calculado conforme a fórmula abaixo:

$$\text{Valor} - t = \frac{\text{Coeficiente}}{EP \text{ Coeficiente}}$$

Valor-p – é o menor nível de significância que conduz à rejeição da hipótese nula, com os dados fornecidos. Assim, tem-se:

- Valor-p < α : rejeita-se a hipótese nula, ou seja, aceita-se a hipótese alternativa.
- Valor-p > α : Aceita-se a hipótese alternativa.

O valor-p segundo Balestrassi e Paiva (2007) “é a probabilidade de se obter um valor da estatística amostral de teste no mínimo tão extremo como o que resulta dos dados amostrais, na suposição de a hipótese nula ser verdadeira”.

Valores Ajustados (do Inglês, *Fitted Values*) na ANOVA quando tem-se apenas um fator, o valor ajustado para uma determinada observação é a média das observações para o nível de fator correspondente. No entanto, se houver quatro

níveis do fator, haverá, no máximo, quatro valores ajustados diferentes. Os valores ajustados também podem ser chamados de valores preditos.

**APÊNDICE A – LEVANTAMENTO DAS REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS
EM RELAÇÃO AO USO DE INTERCONECTORES EM CÉLULAS
SOLARES**

Este apêndice apresenta o levantamento bibliográfico realizado no início desta pesquisa de mestrado, a fim de buscar nichos não estudados ainda no processo de soldagem de interconectores em células solares de uso espacial.

A Tabela A.1 apresenta os diversos estudos avaliando os interconectores utilizados em células solares, tanto de uso espacial, quanto de outras aplicações encontradas na literatura. Os estudos estão apresentados de acordo com o ano de publicação.

Tabela A.1 — Publicações avaliando os interconectores aplicados a células solares.

Autor (es) e Ano	Descrição da Pesquisa	Comentários
Chu and Iles (1988)	Foi realizado um modelo tridimensional dependente do tempo a fim de avaliar a distribuição de temperatura na peça soldada. O resultado da modelagem mostrou que as trincas podem ser causadas pela dissipação insuficiente do calor gerado pela corrente de soldagem. Essas trincas podem ser eliminadas modificando os parâmetros de soldagem (reduzindo a energia da solda ou aumentando o tamanho da região soldada entre as áreas de contato dos eletrodos). De acordo com o artigo quando essas modificações foram implementadas houve um melhor desempenho. Este estudo foi aplicado a células de Silício e de GaAs (Arsenieto de Gálio).	Um estudo que pode ser realizado novamente avaliando a distribuição de calor em células solares de tripla junção com diversos materiais de interconectores, dentre eles a Prata, objeto de estudo nesta Dissertação.

Continua

Tabela A.1 – Continuação.

Autor (es) e Ano	Descrição da Pesquisa	Comentários
Brennan <i>et al.</i> (1994)	Interconexões de <i>Invar</i> revestidas com Prata e interconexões de Prata foram cicladas em temperaturas semelhantes às esperadas em órbita e avaliadas por microscopia eletrônica de varredura, o que permitiu distinguir falhas devida à fadiga térmica e à sobrecarga dúctil durante os testes destrutivos. De acordo com o estudo, as interconexões de <i>Invar</i> revestidas com Prata obtiveram maior sucesso após a ciclagem de temperatura. Quando comparadas às interconexões de Prata, estas apresentaram algumas falhas, pois revelaram menor deformação térmica e, de forma inerente, melhor qualidade na solda.	O artigo aborda interconexões de dois tipos. Pode ser utilizado como referência no futuro para avaliar o desempenho de outro material na fabricação de interconectores; comparando com um já utilizado.
La Roche, Oxynos-Lauschke e Wehner (1994)	Interconectores de Ouro com espessura de 12,5 µm montados em um Cupom de testes com células de Silício. Esses cupons foram ciclados entre -110 e +110 °C. O artigo mostra o estudo até 27500 ciclos (5 anos em órbita LEO), que não causou degradação elétrica mensurável. Houve algumas falhas mecânicas (13 trincas no vidro de cobertura, 2 trincas em terminações de <i>strings</i> e 6 trincas no fio de isolamento) que não impactaram nas características elétricas da célula.	O artigo traz uma avaliação de interconectores de Ouro durante testes de qualificação de cupons de células solares.

Continua

Tabela A.1 – Continuação.

Autor (es) e Ano	Descrição da Pesquisa	Comentários
Rooij e Collins (1995)	<p>O autor estudou células solares da asa de um painel que retornou a Terra depois de experimentar 1315 dias em órbita LEO (aproximadamente 21000 ciclos térmicos variando entre -100 e +90 °C) no Telescópio Espacial <i>Hubble</i>. Neste programa, foram avaliadas soldas no início da vida útil e após 15000 e 30000 ciclos térmicos rápidos entre +100 °C e -100 °C. Segundo os autores, na maioria dos casos, foi observada uma diminuição no tamanho do ponto de solda, após a ciclagem. Essa redução no tamanho do ponto de solda também foi observada durante o programa de qualificação.</p>	<p>O artigo pode ser utilizado para avaliar dados após testes acelerados, comparando dados de campo com dados de laboratório.</p>

Continua

Tabela A.1 – Continuação.

Autor (es) e Ano	Descrição da Pesquisa	Comentários
Ferro <i>et al.</i> (1997)	Investigação experimental dos efeitos de confiabilidade da ciclagem térmica em interconexões de Molibdênio banhado a Prata utilizadas em células solares de GaAs (junção única com substrato de Ge). Os pontos de solda foram realizados entre a metalização de Prata na célula solar e a interconexão. Três técnicas experimentais foram usadas para avaliação da soldagem. A ciclagem ocorreu na faixa de -125 á 65 °C, indicando 790 ciclos na câmara térmica equivaleriam a 5 anos de vida útil em órbita LEO. Não foram encontradas degradações, mas concluiu-se que a técnica de seccionamento cruzado é precisa, mas exige um trabalho muito intensivo. A geração de imagens térmicas não detecta trincas ou soldas ruins, mas é útil para localizar curtos elétricos e caminhos de fuga. As imagens acústicas com ultrassom são uma maneira rápida e conveniente de avaliar a integridade da solda de interconexão e as trincas nas células solares.	O artigo traz técnicas não destrutivas que podem ser utilizadas para avaliar a qualidade da solda.

Continua

Tabela A.1 – Continuação.

Autor (es) e Ano	Descrição da Pesquisa	Comentários
Vaz, Sinka e Vaz (2007)	Procedimento para determinar os parâmetros de soldagem ideais para células solares de Silício monocristalino (CBERS 2B) e de tripla junção (utilizada na PMM). Para esse experimento, foram utilizados interconectores de Prata com 12 μm de espessura e interconectores de <i>Kovar</i> com 50 μm . Assim, concluiu-se que a tensão nominal ideal para os interconectores de Prata deve estar entre 480 mV e 540 mV; o tempo de soldagem total de 390 ms. Já para o interconector de <i>Kovar</i> , a tensão nominal ideal deve estar acima de 370 mV com tempo total de soldagem de 390 ms.	Esse trabalho tem maior proximidade com a proposta desta pesquisa, pois contempla a determinação dos parâmetros ideais para soldagem de células solares de uso espacial; porém, os interconectores são de <i>Kovar</i> e as células solares são de Silício monocristalino.
Wiese <i>et al.</i> (2009)	Estudo do comportamento constitutivo das fitas de Cobre para reduzir a quebra após a soldagem de células solares. Com o estudo através de elementos finitos, os autores concluíram que o comportamento mecânico das fitas de cobre difere significativamente do comportamento do cobre policristalino padrão. Concluíram também que o módulo de Young é menor e a tensão de escoamento é maior em comparação com o Cobre policristalino padrão.	O artigo trata do processo de produção das fitas metálicas utilizadas para a fabricação dos interconectores.

Continua

Tabela A.1 – Continuação.

Autor (es) e Ano	Descrição da Pesquisa	Comentários
Wendt <i>et al.</i> (2010)	<p>O artigo enfoca o desenvolvimento de um ensaio inovador para o teste de tração em células solares, a avaliação do método de teste e os primeiros resultados para a confiabilidade da interconexão. Apresenta a importância de um procedimento de teste reprodutível para fornecer uma referência clara para a soldabilidade e a qualidade das interconexões. Os autores defendem que os testes de tração devem ser realizados não apenas com a interconexão sendo puxada e a célula mantida fixa; segundo eles, isso pode ser melhorado aplicando uma força oposta na faixa de opções no ponto de aplicação da carga de teste.</p> <p>Os primeiros experimentos mostraram que o teste sem força oposta produziu o rompimento do Silício em grandes áreas sem força de tração mensurável. Para cessar o alastramento de micro trincas nas interconexões sob metalização, o teste com força oposta causou apenas pequenos rompimentos.</p>	<p>O artigo traz novas formas de realizar o teste de tração, muito utilizado para avaliar a qualidade do ponto de solda neste tipo de processo de soldagem.</p>

Continua

Tabela A.1 – Continuação.

Autor (es) e Ano	Descrição da Pesquisa	Comentários
Wiese, Meier e Kraemer (2010)	<p>O artigo apresenta os resultados dos testes mecânicos em interconexões de Cobre, a fim de explicar o comportamento sob fadiga do material, e fornece uma correlação com as microestruturas relevantes. Os autores supõem que mecanismos de localização de deformação foram seguidos de recristalização e crescimento de trincas. Afirmam que o número de ciclos até a falha pode ser correlacionado com a amplitude do deslocamento cíclico. Os dados de fadiga existentes mostram a validade de uma lei de Coffin-Manson. Análises microestruturais de amostras estiradas ciclicamente mostraram que o crescimento da fissura começa no lado inferior do <i>crimp</i> na fita de Cobre. A área ao redor da fissura indicou a ocorrência de processos de recristalização antes do início da fissura.</p>	<p>O artigo pode ser utilizado para avaliar as condições de fadiga em interconexões.</p>

Continua

Tabela A.1 – Continuação.

Autor (es) e Ano	Descrição da Pesquisa	Comentários
Zemen <i>et al.</i> (2010)	Os autores construíram módulos usando diferentes fitas, com diferentes forças de escoamento e diferentes técnicas de interconexão. Diferentes métodos, como a aplicação de adesivo condutor elétrico em vez de solda, fita com baixo Coeficiente de Expansão Térmica (CTE) e fixação apenas mecânica foram investigados. De acordo com os autores, a utilização de adesivo condutor elétrico pode reduzir o estresse da célula durante o processo de interconexão. Quando o experimento foi realizado com fitas de baixo coeficiente de expansão térmica, não houve trincas, porém existem perdas de encapsulamento devidas à maior resistividade da fita com baixo coeficiente de expansão térmica. Estas são aumentadas em comparação com a fita de Cobre com mesma seção transversal.	-

Continua

Tabela A.1 – Continuação.

Autor (es) e Ano	Descrição da Pesquisa	Comentários
Meier <i>et al.</i> (2010)	<p>O objetivo dos autores era criar uma estimativa quantitativa da deformação termomecânica induzida em fitas de Cobre durante o serviço. O artigo foi dividido em duas partes. Na primeira parte foi realizada a montagem de um módulo fotovoltaico e ele foi filmado durante os testes de ciclagem de temperatura; posteriormente, as imagens foram analisadas por técnicas de correlação de imagens e o deslocamento das células foi medido. A segunda parte mostrou um método de como este modelo pode ser usado para gerar condições de carga para testes de fadiga relacionados ao dispositivo mecânico da fita. A partir de experimentos de fadiga com diferentes amplitudes de deslocamento, foi gerado um modelo de vida útil da fita de Cobre, que pode ser combinado com condições de carga com as condições de carga a partir das medições de correlação para prever as vidas úteis das fitas para ciclos de temperatura constantes e conhecidos (por exemplo, testes de ciclos térmicos).</p>	-

Continua

Tabela A.1 – Continuação.

Autor (es) e Ano	Descrição da Pesquisa	Comentários
Klengel <i>et al.</i> (2011)	Os autores desenvolveram um equipamento de teste de resistência à tração onde a célula solar não fica fixada e o interconector é puxado. Após diversos experimentos, os autores acreditam que, com o equipamento desenvolvido por eles, é possível fornecer um método reprodutível, rápido e fácil de manusear, que pode ser utilizado independentemente da geometria da célula solar, condição dos materiais de contato, tecnologia de solda ou fabricante. E, segundo os autores, o <i>setup</i> desenvolvido por eles evita a quebra de células de Silício, que são finas e quebradiças, apenas mudando a forma como o teste é conduzido.	-

Continua

Tabela A.1 – Continuação.

Autor (es) e Ano	Descrição da Pesquisa	Comentários
Meier <i>et al.</i> (2011)	<p>Os autores analisaram em detalhes a microestrutura da fita de Cobre e correlacionaram-na com o comportamento do material mecânico. Um método de difração de retro dispersão de elétrons foi usado para avaliar tamanhos e orientações de grãos em várias etapas de recozimento da fita. Esses resultados foram comparados às suas propriedades mecânicas, alcançadas por testes mecânicos convencionais. Com o resultado dessas investigações, o processo de recozimento da fita foi otimizado em escala de laboratório para obter propriedades de material altamente ajustadas. Por fim, o benefício foi verificado por simulação numérica do processo de solda.</p>	<p>Este artigo analisa a produção das fitas metálicas. Pode ser aplicado em estudos futuros que visem otimizar a produção do material dos interconectores.</p>

Continua

Tabela A.1 – Continuação.

Autor (es) e Ano	Descrição da Pesquisa	Comentários
Pander <i>et al.</i> (2013)	<p>Os autores realizaram estudos por meio de dados de material experimental derivados de todos os componentes do módulo (Silício, vidro, encapsulante, folha traseira etc.), formularam um modelo numérico que descreve os cenários de carga, bem como o comportamento à fadiga da fita. Este modelo pode ser usado para estimar a vida útil da fita (ciclos a falha) dentro de um módulo fotovoltaico sob carga mecânica e termomecânica cíclica com simulação de elemento finito. Os resultados da simulação foram validados por comparação com testes mecânicos de carregamento de módulos. O acordo alcançado entre simulação e experimento permite uma redução do enorme esforço experimental atual (medição de deslocamento de células, fabricação de amostras) para acessar a vida útil limitada do módulo de fita sob várias condições geométricas e ambientais. No entanto, a caracterização e modelagem abrangente de materiais são necessárias para capturar todos os fatores de influência.</p>	-

Continua

Tabela A.1 – Continuação.

Autor (es) e Ano	Descrição da Pesquisa	Comentários
An, Xu e Wang (2014)	Os autores estudaram a confiabilidade das juntas entre interconexões de Prata banhadas a Ouro e eletrodos de Prata de células solares de base Germânio de um satélite de órbita baixa, ou seja, a otimização do processo de soldagem e a avaliação da confiabilidade. Os três principais parâmetros de soldagem (pressão do eletrodo na peça, potência de soldagem e tempo de soldagem) foram cuidadosamente ajustados para investigar seus efeitos nas propriedades das juntas. Concluíram que os elementos das camadas em interconexões e eletrodos difundem muito bem com a pressão de 8,89 N, a potência de soldagem de 65 W e o tempo de soldagem de 50 ms. O modo de fratura da articulação é principalmente fratura dúctil e fratura intergranular.	Este artigo analisa o processo de soldagem de interconexões em células solares utilizadas em satélites LEO. As análises serviram como base para a interpretação dos dados obtidos nos experimentos desta pesquisa.

Continua

Tabela A.1 – Continuação.

Autor (es) e Ano	Descrição da Pesquisa	Comentários
Zarmai <i>et al.</i> (2015)	<p>A revisão identificou a tecnologia de solda a laser com um potencial de fazer interconexão com maior confiabilidade quando comparada à tecnologia de solda convencional. Verificou-se que aquela tecnologia suporta a tendência atual de projeto de células solares de Silício cristalino mais finas, amplas e baratas, produzindo significativamente interconexões que experimentam um estresse termomecânico induzido relativamente menor. Os autores recomendam que uma maior aceitação e uso da tecnologia de solda a laser possa melhorar o desempenho e, conseqüentemente, estender o Tempo Médio Até a Falha (MTTF) dos módulos fotovoltaicos em geral e, particularmente, aqueles que operam nos trópicos. Isto, segundo eles permitirá melhorar a confiabilidade dos módulos fotovoltaicos para geração sustentável de energia.</p>	<p>A sugestão do artigo pode ser aplicada no futuro em desenvolvimento de novos processos de fabricação, avaliando se a proposta dos autores atende à produção de painéis solares de uso espacial.</p>

Continua

Tabela A.1 – Continuação.

Autor (es) e Ano	Descrição da Pesquisa	Comentários
Ji <i>et al.</i> (2016)	<p>Estudo da microestrutura de sistemas de interconexão (incluindo as juntas entre interconexões de Ag banhadas a Au e eletrodos de Germânio prateados, as junções entre cabos de Cobre prateados e cabos de Cobre prateados, e as junções entre cabos de Cobre banhados a Prata e interligações de Molibdênio banhados a Ag / Ag banhados a Au) nas células solares da órbita LEO. Todas as juntas foram fabricadas por solda por resistência sob diferentes parâmetros de soldagem. Encontraram estruturas eutéticas através de imagens do MEV. Com a ajuda do diagrama de fases, ilustraram as razões da formação dessas estruturas. E os resultados sugeriram que a ligação metalúrgica apareceu nos sistemas de interconexão. Além disso, a análise EDS da interface demonstrou a difusão de átomos na interface, o que também comprovou a formação de ligações metalúrgicas. O teste de tração foi realizado para obter a propriedade mecânica das juntas, que avaliou a resistência dos sistemas de interconexão com uma maior precisão. Os resultados sugeriram que a ligação metalúrgica apareceu nos sistemas de interconexão.</p>	<p>A técnica de avaliar a microestrutura formada na junta de solda pode ser uma sugestão para trabalhos futuros, dando continuidade à esta pesquisa. A análise da interface dos elementos soldados pode avaliar os parâmetros de soldagem sob a ótica metalúrgica, avaliando as fases que se formam durante o processo de soldagem.</p>

Continua

Tabela A.1 – Conclusão.

Autor (es) e Ano	Descrição da Pesquisa	Comentários
Meier (2018)	O artigo traz uma visão sobre três métodos ultrassônicos para caracterizar interconectores em formas de fitas de Cobre, sendo eles: 1) Determinação de constantes elásticas por análise de dispersão ultrassônica (utilizado para avaliação da constante elástica em todas as áreas da produção das fitas e fabricação de módulos); 2) Análise microestrutural acústico-elástica (utilizado para detectar alterações na microestrutura causadas pelo processo de fabricação); 3) Determinação do tamanho médio dos grãos por análise de espalhamento ultrassônico (determinar o tamanho médio dos grãos, caracterizando o processo de recozimento). O autor conclui que os métodos recém-desenvolvidos e os resultados alcançados indicam um enorme potencial para a caracterização de fitas em escala industrial e se encaixam bem no conceito de Indústria 4.0.	As técnicas utilizadas pelo autor não podem ser aplicadas a esta pesquisa devido ao tempo que seria necessário para realizar tais análises, porém, são válidas para trabalhos futuros que pretendam avaliar todo o processo de fabricação das interconexões.

Fonte: Produção da autora

De acordo com o levantamento bibliográfico apresentado na Tabela A.1 acima, foi verificado que existem diversas pesquisas envolvendo o estudo dos interconectores utilizados em células solares (tanto de aplicação espacial como de aplicação terrestre), porém, de acordo com tal levantamento, apenas três artigos: Ferro *et al.*, 1997, Vaz, Sinka e Vaz, 2007 e An, Xu e Wang, 2014, que

avaliaram os parâmetros ideais para a soldagem de interconectores em células solares aplicadas em órbita LEO.

APÊNDICE B – MÉTODOS ESTATÍSTICOS

Este apêndice resume e cita os métodos estatísticos abordados nesta Dissertação, como: análise de variância, regressão linear múltipla, análise de covariância, correlação, Projeto e Análise de Experimentos, técnica de Taguchi, e Análise de Superfície de Resposta. E dá as referências citadas/para aprofundar.

Estatística é o “ramo da Matemática que tem por objetivo a coleção, análise e interpretação de dados numéricos a respeito de fenômenos coletivos ou de massa”, ou ainda a “representação numérica e comparativa, em tabelas ou gráficos, dos resultados da análise desses fenômenos” (MICHAELIS, 2000).

Método pode ser definido segundo Crespo (2002), como “um conjunto de meios dispostos convenientemente para se chegar a um fim que se deseja”.

Métodos científicos de acordo com o dicionário Michaelis (2000), é o “conjunto ordenado de regras e procedimentos que devem ser seguidos na investigação científica para se chegar ao conhecimento e à verdade”.

Método científico segundo Bunge (1989 p. 31) *apud* Szczepanik (2011):

“O método científico é a estratégia da investigação científica: afeta o ciclo completo de investigação e é independente do tema de estudo. Mas, por outro lado, a execução concreta de cada uma dessas operações estratégicas dependerá do tema em estudo e do estado de nosso conhecimento a respeito do dito tema.”

No campo dos métodos científicos destacam-se o **método estatístico** e o **método experimental** (CRESPO, 2002). Bunge (1989 p. 52) *apud* Szczepanik (2011), destaca que:

“... o que habitualmente se chama ‘método experimental’ não envolve necessariamente experimentos no sentido estrito do termo e pode aplicar-se fora do laboratório. Assim, por exemplo, a astronomia não realiza experimentos com corpos celestes (até o momento), mas é uma ciência empírica porque aplica o método experimental.”

Resumindo Bunge (1980 p. 25) *apud* Szczepanik (2011) o método científico possui nove etapas que devem ser seguidas: 1) descobrimento do problema ou

lacuna; 2) colocação precisa do problema; 3) procura de conhecimento ou instrumento relevantes ao problema; 4) tentativa de solução do problema com os meios identificados; 5) intenção de novas ideias ou a produção de novos dados empíricos; 6) obtenção de uma solução; 7) investigação das consequências da solução obtida; 8) Prova ou comparação da solução; e 9) correção das hipóteses, teorias, procedimentos ou dados utilizados na obtenção de solução incorreta.

B.1 Análise de Variância (ANOVA)

A técnica de Análise de Variância foi criada pelo geneticista e estatístico britânico Sir Ronald A. Fisher (1890-1962) a partir de 1918. A análise de variância tem a finalidade de buscar pontos em uma amostra que se desviam da média, mostra se os resultados são ou não estatisticamente significativos, ou seja, se são capazes de apresentar uma tendência, uma mudança ou uma causa real; ou se apenas aparecem de forma aleatória (BRITO 2014).

A análise de variância consiste em testar a hipótese de que as médias de duas ou mais amostras são iguais; avalia a importância de um ou mais fatores, comparando as médias da variável de resposta nos diferentes níveis do fator. Para executar uma ANOVA é necessário ter uma variável de resposta contínua e pelo menos um fator categórico com dois ou mais níveis. As Análises de Variância requerem amostras de populações normalmente distribuídas com variâncias aproximadamente iguais entre os níveis do fator.

De acordo com Montgomery (2017), a análise de variância pode ser descrita como um método que examina um ou mais fatores em um dado processo ou produto, é capaz de analisar dados de experimentos com fatores quantitativos e qualitativos.

B.2 Análise de Regressão Linear Múltipla

A Análise de Regressão é frequentemente usada para determinar como a variável de resposta muda à medida que uma variável preditora específica muda.

Modelos que contêm mais de uma variável independente são modelos de regressão múltipla.

A regressão linear múltipla examina as relações lineares entre uma resposta contínua e duas ou mais variáveis preditoras (variáveis independentes usada para prever valores da variável dependente, ou de resposta, em uma análise de regressão).

Se o número de preditoras for grande, antes de ajustar um modelo de regressão com todas as preditoras, é necessário usar técnicas de seleção de modelo de melhores conjuntos ou *stepwise* para examinar as preditoras que não estão associadas às respostas.

Montgomery e Runger (2003), afirmam que a regressão linear múltipla é utilizada em situações que envolvam mais de um regressor. Este modelo é dado pela Equação 4.11:

$$Y = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \dots + \beta_nx_n + \varepsilon \quad (4.1)$$

onde:

Y: representa a variável dependente;

x_1, x_2, \dots, x_n : representam as variáveis independentes;

ε : erro aleatório;

β_0 : é a interseção do plano;

$\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$: são os coeficientes parciais de regressão.

De acordo com Pimenta *et al.* (2012), quando se utiliza a técnica de regressão linear múltipla, complementarmente ao planejamento de experimentos, esta é muito eficiente para desenvolver modelos estatísticos que quantificam a influência das variáveis de entrada do processo para predição das variáveis de saída.

B.3 Correlação

Um coeficiente de correlação mede a extensão da tendência de duas variáveis para mudar simultaneamente.

“Uma correlação é uma relação entre duas variáveis. Os dados podem ser representados por pares ordenados (x, y) , sendo x a variável independente (ou explanatória) e y a variável dependente (ou resposta)” (LARSON e FARBER, 2015, p. 438).

Aqui citaremos dois tipos de análises diferentes de correlação: a correlação *Pearson* e correlação ordinal de *Spearman*.

Um coeficiente de relação *Pearson* é uma estatística que mede a extensão segundo a qual duas variáveis contínuas são relacionadas linearmente. O coeficiente é padronizado para que um valor absoluto de um indique uma relação linear perfeita e um valor de zero indica uma relação não linear. Um relacionamento é linear quando uma mudança em uma variável está associada a uma mudança proporcional na outra variável.

Correlação ordinal de *Spearman* (também chamada r_s de *Spearman*) avalia o relacionamento monotônico entre duas variáveis contínuas ou ordinais. Em um relacionamento monotônico, as variáveis tendem a mudar juntas, mas não necessariamente com uma taxa constante. O coeficiente de correlação de *Spearman* é baseado nos valores classificados para cada variável no lugar dos dados brutos, e é usado frequentemente para avaliar relacionamentos envolvendo variáveis ordinais.

B.4 Análise de Covariância

A Análise de Covariância (ANCOVA) combina dois tipos de análises, a ANOVA (B.1) e Análise de Regressão (B.2).

Assim como o coeficiente de correlação (B.3), a covariância é uma medição da relação linear entre duas variáveis contínuas. Ao contrário do coeficiente de correlação, no entanto, a covariância é expressa em unidades que variam de acordo com os dados que estão sendo analisados. Desta forma, é difícil usar a

estatística de covariância para avaliar a força de uma relação linear. Porém, caso o objetivo seja este, é necessário utilizar o coeficiente de correlação (de *Pearson*).

A covariância é usada em determinados cálculos estatísticos e pode ser útil para determinar a direção de uma relação linear:

- Se ambas as variáveis tendem a aumentar ou diminuir juntas, o coeficiente é positivo.
- Se uma variável tende a aumentar na medida que a outra diminui, o coeficiente é negativo.

B.5 Projeto e Análise de Experimentos

Esta seção apresenta um breve histórico sobre o Projeto e Análise de Experimentos, as definições sobre o método e as etapas que devem ser seguidas para sua condução.

B.5.1 Breve histórico sobre Projeto e Análise de Experimentos

Na década de 1950, W. Edward Deming levou ao Japão a importância de se realizar o Controle Estatístico da Qualidade, dando assim início à Segunda Era Industrial (ou Revolução da Qualidade). Nesta época os produtos japoneses eram de baixa qualidade.

Então na década seguinte, a indústria japonesa começou a utilizar procedimentos estatísticos de controle de qualidade, que levou à condução do processo de experimentação, das quais se destacam as técnicas de gerenciamento estatístico da qualidade: Gerenciamento da Qualidade Total (*Total Quality Management – TQM*) e Melhoria Contínua da Qualidade (*Continuous Quality Improvement – CQI*) (PENNSTATE, 2021).

Ainda em 1960, ocorreu uma importante fase de projeto de experimentação que melhorou os ensaios clínicos pois, nesta época, os médicos se baseavam em dados brutos. Isto tornou o ensaio clínico duplo cego aleatório um padrão ouro para aprovar qualquer produto, dispositivo ou procedimento médico,

consagrando a importância da aplicação de procedimentos estatísticos (PENNSSTATE, 2021).

Já em 1990, a Melhoria Contínua da Qualidade teve início com o *Six Sigma*, que se tornava cada vez mais popular. Técnica esta que usa a estatística embasada na qualidade e em ciclos de *feedback* para a tomada de decisões. Essa já é considerada uma Era Moderna, onde a competitividade econômica e a globalização levam à concorrência em diversos segmentos da economia.

B.5.2 Definições de Projeto e Análise de Experimentos

Experimento segundo Souza *et al.* (2002), é um procedimento **planejado**, que parte de uma hipótese, e que tem o objetivo de **provocar fenômenos** em **condições controladas**, observar e analisar os seus resultados. Os autores ainda definem as palavras destacadas:

- **planejado:** demonstra que o pesquisador ou analista mantém o controle sobre o experimento, onde qualquer ação deve ser pré-definida ou prognosticada.
- **provocar fenômenos:** significa não esperar a Natureza produzi-los por si (como na Observação), mas fazê-lo acontecer (no caso, 32 vezes), sob condições controladas (as da Tabela 6.1), e escolher diferentes maneiras, procedimentos, técnicas, para registrá-lo.
- **condições controladas:** significa que somente os fatores ou tratamentos (que podem ser qualitativos ou quantitativos) podem variar; e as demais condições deverão manter-se constantes, salvo os fatores e erros não controláveis.

Em Pennstate (2021), a experimentação, do ponto de vista da engenharia, possui as seguintes finalidades:

- Redução do tempo na fase de projeto e/ou desenvolvimento de novos processos e produtos;
- Melhoria do desempenho de processos;
- Melhoria da confiabilidade e *performance* do produto;

- Alcançar uma robustez tanto do produto quanto do processo;
- Avaliação de materiais, seleção do projeto, configuração de componentes, tolerância do sistema, dentre outros.

Segundo Lloyd (2001), Projeto e Análise de Experimentos 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.

Projeto e Análise de Experimentos também pode ser definido como uma técnica experimental utilizada para manipular as entradas de um processo, a fim de entender melhor seus efeitos na saída do processo (DYADEM PRESS, 2003).

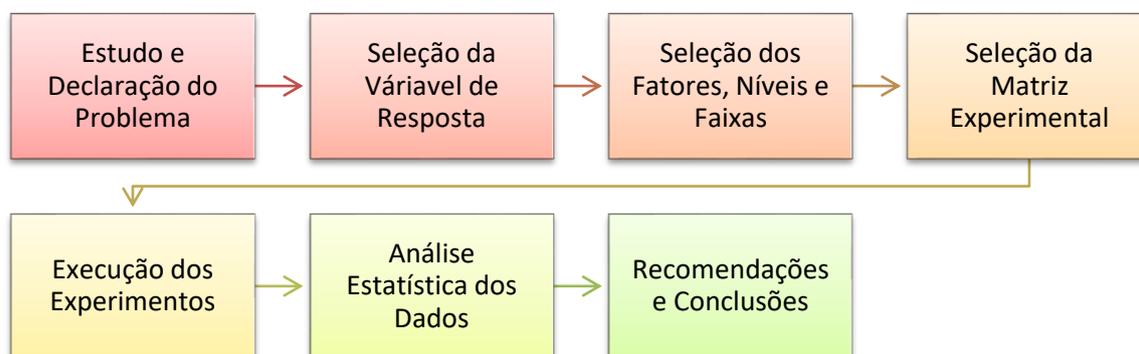
Projeto e Análise de Experimentos (do Inglês, *Design and Analysis of Experiments* - DoE) em Montgomery (2017), se refere ao processo de planejamento dos experimentos que serão coletados e analisados através de métodos estatísticos, que resultarão em conclusões objetivas e válidas. A abordagem estatística do projeto experimental é necessária quando se deseja tirar conclusões significativas a partir dos dados obtidos.

B.5.3 Etapas para conduzir o Projeto e Análise de Experimentos

Esta seção tem como objetivo apresentar as etapas para condução da técnica de Projeto e Análise de Experimentos.

Segundo Montgomery (2017) e Silva e Silva (2008), para utilizar o método de Projeto e Análise de Experimentos é necessário que todas as pessoas envolvidas no experimento possuam o entendimento de como os dados serão analisados. Montgomery (2017) sugere etapas a serem seguidas conforme ilustrado na Figura B.1.

Figura B.1 – Etapas do Projeto e Análise de Experimentos.



Fonte: Elaborado pela autora baseado em Montgomery (2017).

As etapas apresentadas na Figura B.1 serão detalhadas a seguir.

B.5.3.1 Estudo e declaração ou detalhamento do problema

Existem vários significados para o termo “estudo” mas, para este trabalho, será considerada a seguinte definição: estudo é a observação cuidadosa e detalhada a respeito de alguém ou de alguma coisa; análise, exame (MICHAELIS, 2000).

Já “detalhamento” pode ser definido como o ato ou efeito de expor algo de forma minuciosa; apresentar em detalhes; pormenorizar (MICHAELIS, 2000).

Nesta primeira etapa, é necessário primeiro estudar e detalhar o problema ou reconhecer e relatar o problema. Em geral, na prática, é difícil perceber que há um problema que necessite de experimentos planejados. Assim, segundo Montgomery (2017), não é fácil conseguir relatar um problema que seja aceito e claro por todas as partes interessadas (*stakeholders*) envolvidas no processo. Desta forma, frequentemente, é importante solicitar aos envolvidos (engenharia de produto, qualidade, operadores, entre outros) as entradas do processo.

Silva e Silva (2008) destacam que um relato claro do problema e dos objetivos do experimento contribuirão de forma substancial para que o processo seja melhor compreendido e para que uma eventual solução do problema seja obtida.

B.5.3.2 Seleção da variável de resposta

Segundo Montgomery (2017), e Silva e Silva (2008), para selecionar a variável de resposta, a pessoa que está conduzindo os testes deve ter certeza de que a variável selecionada é a que realmente fornece informação sobre o processo. Respostas múltiplas não são raras.

A seleção da variável de resposta para esta pesquisa foi baseada na revisão da literatura e práticas realizadas por empresas que utilizam o processo de soldagem a ponto por resistência elétrica. Desta forma, a variável de resposta escolhida foi a tensão máxima à ruptura no teste de resistência à tração do ponto de solda. Ou seja, que fatores ou combinação de fatores influenciam ou não de forma positiva ou negativa a resposta do processo? No caso, seria a tensão de ruptura da interconexão; e, uma vez obtido esse conjunto de fatores, estes evitariam que fosse ultrapassado um determinado e pré-definido valor de tensão e que a junção fosse danificada, fragilizada, podendo dar início a uma falha catastrófica.

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 a ponto por resistência elétrica, além de ser comumente aplicado na indústria para avaliação do processo.

B.5.3.3 Seleção dos fatores, seus níveis e faixas

“Seleção” pode ser definida como o “ato ou efeito de selecionar ou escolher; escolha criteriosa e fundamentada; selecionamento” (MICHAELIS, 2000).

Segundo Montgomery (2017), na terceira etapa, são realizadas as seleções dos fatores e seus níveis. O analista que realiza o experimento escolhe os fatores variáveis, os intervalos sobre os quais esses fatores serão variados e os níveis específicos de cada rodada do experimento.

Nesta etapa, é muito importante investigar todos os fatores que possam ter influência nas respostas do processo, evitando considerações de fatores

passados, em particular, aqueles que foram definidos ainda nas fases iniciais do processo, ou seja, quando este ainda não estava bem consolidado (MONTGOMERY, 2017).

Silva e Silva (2008) destacam que, quando o objetivo é realizar a investigação dos fatores ou então caracterizar o processo, em geral, é melhor manter o número de níveis de fatores baixo.

B.5.3.4 Seleção do planejamento (ou matriz) experimental

Quando as três primeiras etapas descritas anteriormente são executadas de forma correta, a seleção do planejamento experimental é considerada relativamente fácil.

A escolha do tipo de planejamento experimental leva em consideração o tamanho da amostra (número de replicações), a seleção de ordem que seja adequada para as experimentações e se será necessária a formação de blocos ou outras restrições de aleatorização (MONTGOMERY, 2017).

B.5.3.5 Execução dos experimentos

“Realizar” pode ser definido como levar a efeito uma ação, um projeto (MICHAELIS, 2000).

A quinta etapa será a execução dos experimentos. Durante a execução dos experimentos, é importante que se monitore o processo, a fim de garantir que tudo esteja sendo realizado conforme foi planejado. Vale ressaltar que o planejamento desde o início até o fim dos experimentos é fundamental para o sucesso da qualificação do processo (MONTGOMERY, 2017).

B.5.3.6 Análise estatística dos dados

A palavra “análise” pode ser definida como o exame pormenorizado ou a observação minuciosa, crítica de cada elemento componente de um todo, com o objetivo de investigar sua natureza, suas causas, funções, proporções etc. (MICHAELIS, 2000).

Após concluir a fase de execução dos experimentos, deve-se realizar a análise estatística dos dados.

Silva e Silva (2008) destacam que existem vários pacotes estatísticos disponíveis no mercado para auxiliar na análise dos dados, além de métodos gráficos que tornam mais fácil a interpretação dos dados.

B.5.3.7 Conclusões e recomendações

Esta é a última etapa para o planejamento de um experimento, onde são apresentadas as conclusões e as recomendações.

Com os dados analisados, o Projeto e Análise de Experimentos deve fornecer conclusões que sejam claras e objetivas sobre os resultados, além de ser capaz de recomendar um plano de ação para tomada de decisão em relação ao processo estudado (MONTGOMERY, 2017).

B.6 Técnicas de Projeto e Análise de Experimentos

Nesta seção são resumidas algumas técnicas para o Projeto e Análise de Experimentos, tais como: planejamento fatorial, planejamento fatorial fracionado, análise de variância, metodologia de superfície de resposta, metodologia de Taguchi. Este trabalho não pretende abordar todas as técnicas de Projeto e Análise de Experimentos presentes na literatura.

No setor industrial se faz necessário a realização de experimentos, a fim de assegurar que as informações do processo sejam confiáveis e que os recursos, sejam eles materiais, humanos, equipamentos ou informações tenham uma boa utilização. Para isto, pode-se usar o:

B.6.1 Planejamento Fatorial

Planejamento Fatorial (Total/Completo) é empregado com frequência em experimentos que envolvem diversos fatores, onde se faz necessário o estudo

do efeito conjunto dos fatores sobre determinada variável de resposta (MONTGOMERY, 2017).

Ainda segundo Montgomery (2017), nesta etapa são feitos os testes com todas as possíveis combinações dos níveis (alto e baixo) de fatores pré-estabelecidos a serem investigados.

Existem vários casos especiais no Planejamento Fatorial (Total/Completo), devido ao fato de serem amplamente empregados em diversos trabalhos de pesquisas, além de formarem a base para outros planejamentos de valor prático considerável. O mais importante desses casos é aquele de k fatores, cada um com apenas dois níveis. Os níveis por sua vez podem ser qualitativos (por exemplo: temperatura, pressão, tempo) ou quantitativos (duas ferramentas, duas pessoas); aqui serão os níveis “alto” e “baixo”

Esta técnica é indicada nas fases iniciais do planejamento experimental, quando existe a necessidade de se definir os fatores mais importantes a serem investigados e estudar seus efeitos sobre a variável de resposta selecionada.

O modelo estatístico de um experimento fatorial 2^2 é representado pela Equação B.1 o (MONTGOMERY, 2017).

$$y = k + k_1x_1 + k_2x_2 + k_3x_1x_2 \quad (\text{B.1})$$

Em que:

k é a constante;

k_1 é o coeficiente do fator de controle x_1 ;

x_1 é o primeiro fator de controle;

k_2 é o coeficiente do fator de controle x_2 ;

x_2 é o segundo fator de controle;

k_3 é o coeficiente da interação entre os fatores x_1x_2 ;

x_1x_2 é a interação entre o primeiro e o segundo fator de controle.

A forma como os fatores e as respostas de um experimento são organizados é chamada de **matriz experimental**. A fim de ilustrar uma matriz, na Tabela B.1 é apresentado um experimento com três fatores (A, B e C), ou seja, $2^3 = 8$ experimentos, cada fator com dois níveis alto (+) e baixo (-). Todas as combinações entre os fatores e níveis são representadas.

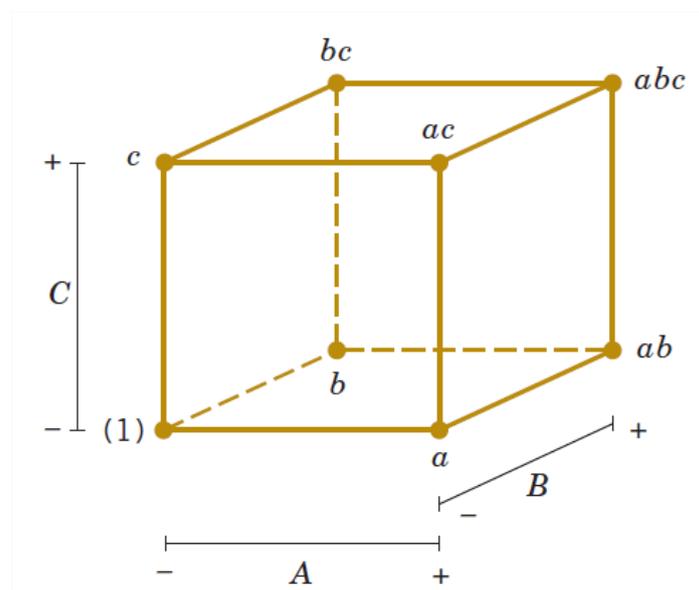
Tabela B.1 – Matriz experimental de um delineamento fatorial 2^3 .

Nº do teste	A	B	C
1	-	-	-
2	+	-	-
3	-	+	-
4	+	+	-
5	-	-	+
6	+	-	+
7	-	+	+
8	+	+	+

Fonte: Adaptada de Montgomery (2017).

A representação geométrica dos fatores, seus níveis e interações são apresentados na Figura B.2.

Figura B.2 – Representação geométrica de 3 fatores.



Fonte: Adaptada de Montgomery (2017).

B.6.2 Planejamento Fatorial Fracionado

O Planejamento Fatorial Fracionado é caracterizado como um planejamento em que se realiza apenas um subconjunto ou fração dos experimentos do Planejamento Fatorial Total.

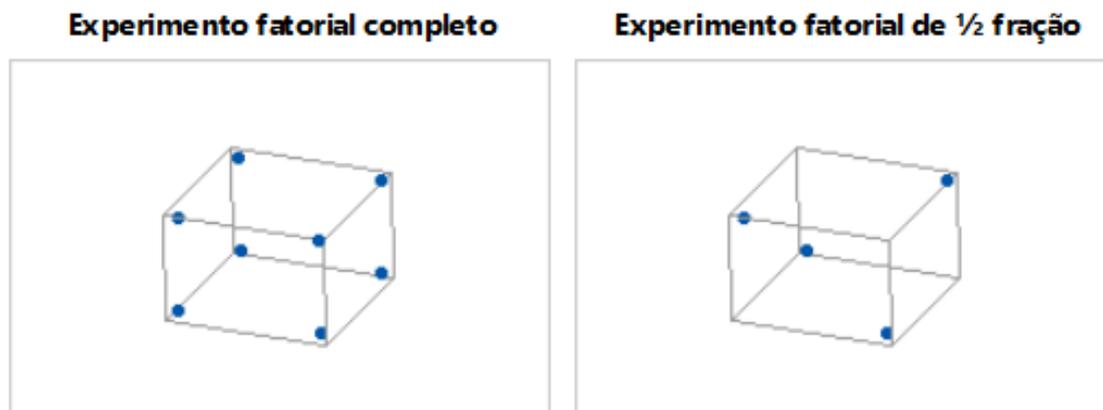
Segundo Brito (2014), este tipo de planejamento é aplicado quando os recursos são moderados; ou então, quando a quantidade de fatores no projeto é grande, comparado com as poucas observações e com os planejamentos fatoriais totais/completos.

Esse tipo de experimento acaba sendo muito utilizado por indústrias já que possibilita diminuir o número de tratamentos e, desta forma, diminuir o custo para realizar tais experimentos.

De acordo com Montgomery (2017), o número de observações ou experimentos necessários para executar um planejamento fatorial de 2 níveis é 2^k onde k representa o número de fatores. Enquanto o número de fatores k num planejamento 2^k aumenta, a quantidade de experimentos necessários para realizar um planejamento fatorial completo aumenta exponencialmente. Um exemplo de planejamento fatorial completo com 5 fatores, requer 32 experimentos (pois $2^5 = 32$), já um planejamento com 8 fatores requer 256 experimentos (pois $2^8 = 256$); porém, quando se aplica um planejamento fatorial fracionado pela metade, seriam necessárias apenas a metade desses experimentos.

Os diagramas da Figura B.3, mostram a comparação de um experimento fatorial completo *versus* um experimento fatorial de $\frac{1}{2}$ fração. Na Figura B3, é possível verificar que o experimento fatorial completo contém o dobro de pontos de experimentos que o experimento fatorial fracionado pela metade; assim, a resposta é medida em quatro dos oito pontos de extremidade possíveis. Porém, neste tipo de experimento, os efeitos principais são confundidos com as interações de 2 fatores.

Figura B.3 – Comparação experimento fatorial completo e experimento fatorial fracionado pela metade.



Fonte: MINITAB 17®.

B.7 Método de Taguchi – Projeto Robusto

Segundo Montgomery (2017) o método proposto pelo engenheiro japonês *Genichi Taguchi*, logo no início da década de 80, defende três objetivos principais:

- Projetar produtos ou processos que sejam robustos quando comparados aos fatores ambientais ou fatores que sejam difíceis de controlar;
- Projetar e desenvolver produtos que sejam robustos quanto à variação sofrida por seus componentes;
- Buscar níveis das variáveis do processo que forcem a média até um valor desejado e, de forma simultânea, minimizem a variabilidade em torno desse valor.

O termo “robusto”, pode ser definido como algo “que é bem construído, que suporta peso, que é resistente; potente”, segundo Michaelis (2020).

O Projeto Robusto de Parâmetros (do Inglês *Robust Parameter Design* – RPD) é uma abordagem utilizada em atividades de concepção de produtos que se concentra na escolha dos níveis de fatores (ou parâmetros) controláveis em um processo ou produto a fim de atingir dois objetivos: (1) garantir que a resposta da saída esteja no nível ou meta desejado e (2) garantir que a variabilidade em torno desse valor alvo seja a menor possível (MONTGOMERY, 2017). Assim,

quando um estudo de RPD é realizado em um processo, recebe o nome de “estudo de robustez do processo”.

Em consequência de uma extensa análise do método de Taguchi, houve um período de extensa pesquisa e desenvolvimento de novas abordagens para o problema de RPD. Em decorrência desses fatos, o Método da Superfície de Resposta emergiu como uma abordagem para resolver o problema do RPD, que não apenas permite o emprego do conceito de projeto robusto de Taguchi, mas também fornece uma abordagem mais sólida e eficiente no que tange ao projeto e à análise (MONTGOMERY, 2017).

A próxima seção abordará o Método de Superfície de Resposta.

B.8 Método de Superfície de Resposta (MSR)

Métodos da Superfície de Resposta são usados para examinar a relação entre uma resposta e um conjunto de variáveis experimentais quantitativas ou fatores.

O Método da Superfície de Resposta (do Inglês: *Response Surface Methodology* - RSM) é um conjunto de técnicas matemáticas e estatísticas utilizadas na modelagem e na análise de problemas onde a resposta de interesse é influenciada por diversas variáveis e o objetivo é a otimização desta resposta (MONTGOMERY, 2017).

Por exemplo, um engenheiro deseja encontrar os níveis de temperatura (representada por x_1) e a pressão (representada por x_2) que podem maximizar o rendimento do processo (representado por y). Assim, o rendimento do processo é uma função dos níveis de pressão e temperatura; então tem-se:

$$y = f(x_1, x_2) + \varepsilon$$

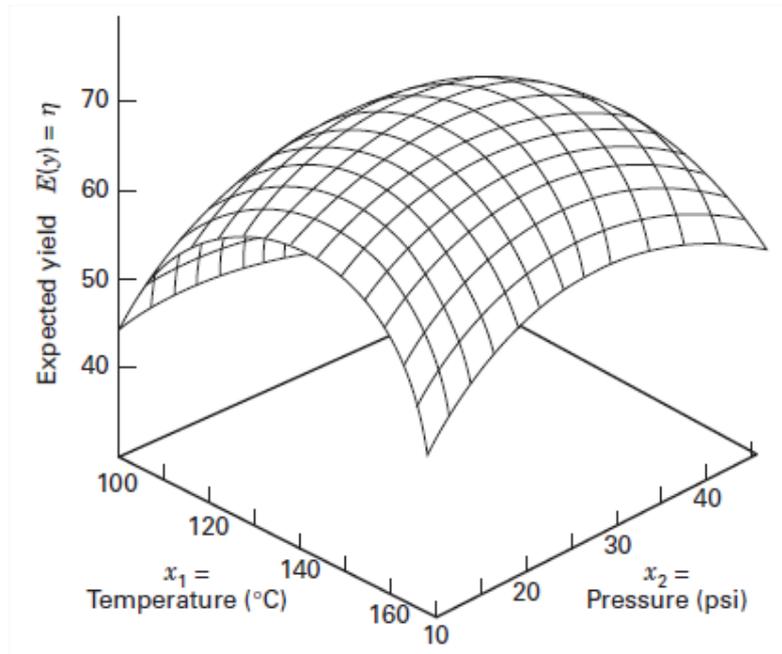
Onde:

ε representa o erro ou ruído observado na resposta y . Se a resposta esperada for denotada por $E(y) = f(x_1, x_2) = \eta$, então a superfície pode ser representada por:

$$\eta = f(x_1, x_2)$$

A superfície de resposta pode ser representada conforme Figura B.4, assim η é plotada no gráfico em relação aos níveis de x_1 e x_2 .

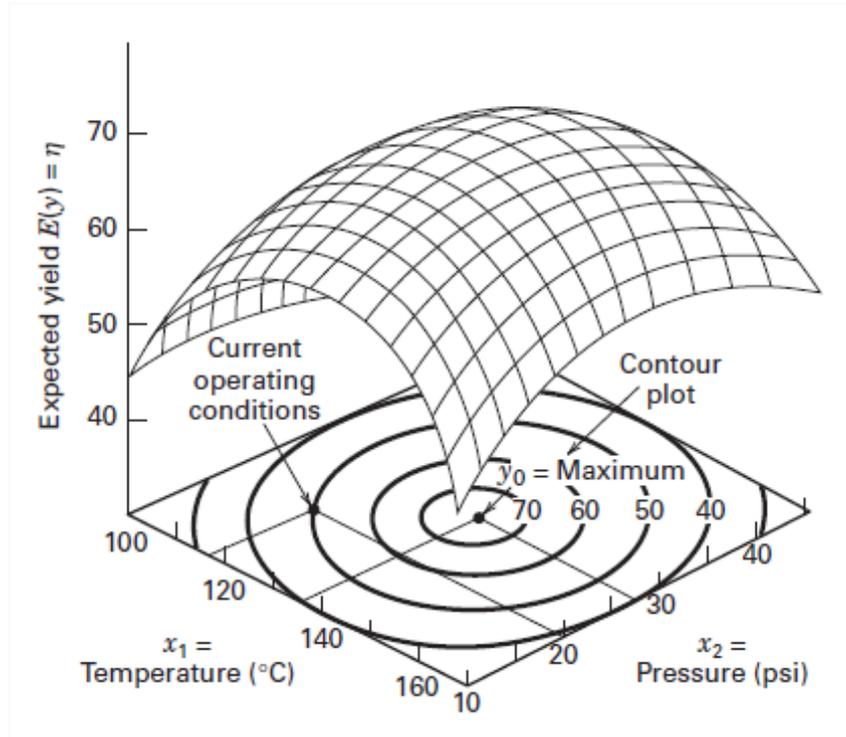
Figura B.4 – Superfície de resposta mostrando a expectativa de resposta (η) em função da temperatura (x_1) e pressão (x_2).



Fonte: Montgomery (2017).

O gráfico da superfície de resposta pode ser projetado no plano para facilitar a visualização da forma da superfície de resposta, conforme apresentado na Figura B.5. Este tipo de gráfico recebe o nome de **gráfico de contorno**. Assim, cada contorno representa uma altura da superfície de resposta.

Figura B.5 – Gráfico de contorno para a superfície de resposta.



Fonte: Montgomery (2017).

O primeiro passo na análise por RSM é encontrar a aproximação adequada para a verdadeira função entre a resposta y e as variáveis independentes. Então quando a resposta é bem modelada por uma função linear, o modelo de primeira ordem é dado por:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n + \varepsilon$$

Se existe uma curvatura no sistema, então um polinômio de segunda ordem deve ser utilizado. Esse polinômio representa de forma significativa os problemas para a superfície de resposta (AMARAL *et al.*, 2018). A equação de segunda ordem é dada por:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \sum \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon$$

onde:

y é a resposta de interesse,

k é o número de variáveis independentes,

β são os coeficientes estimados,

x são os parâmetros,

ε é o erro associado.

Os métodos de superfície de resposta podem ser empregados para:

- Encontrar as configurações de fator (condições operacionais) que produzem a "melhor" resposta;
- Encontrar as configurações de fator que satisfaçam às especificações operacionais ou de processo;
- Identificar novas condições operacionais que produzam uma melhoria comprovada na qualidade do produto em relação à qualidade obtida pelas condições vigentes;
- Modelar uma relação entre os fatores quantitativos e a resposta.

Nesta Dissertação, o método da superfície de resposta completo não foi aplicado, pois seriam necessários mais experimentos e o tempo disponível não seria suficiente para abranger essas análises, mas na seção 7.3.4. (nas Figuras 7.12 a 7.17) deste documento foram apresentadas algumas superfícies de contorno indicando algumas combinações de parâmetros que maximizam o valor do *pull test*.

APENDICE C – CURVAS I x V

Este apêndice contempla as demais curvas I x V realizadas durante a pesquisa experimental.

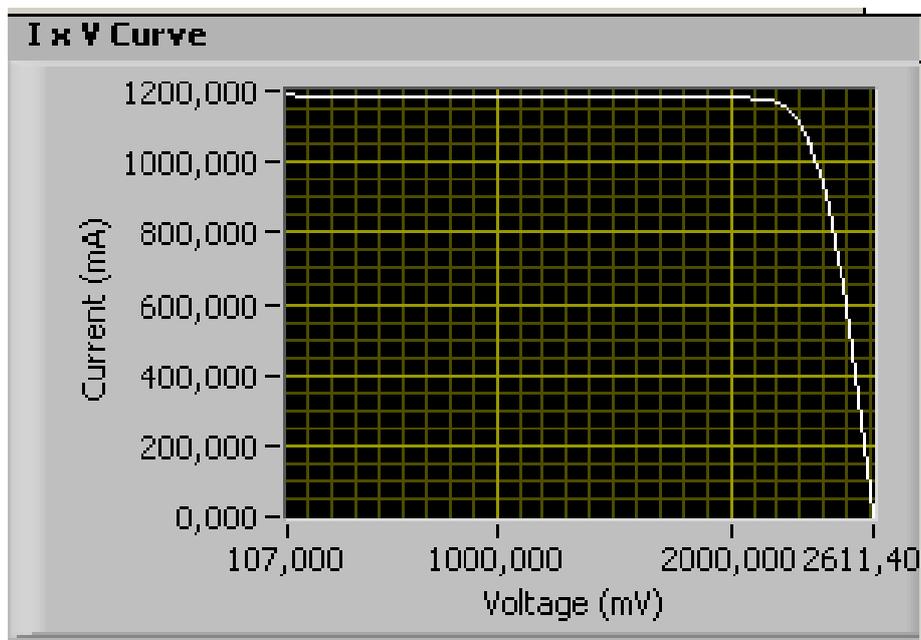
C.1 – Curvas I x V

O comportamento elétrico da célula solar pode ser representado pela sua curva corrente elétrica *versus* tensão elétrica (I x V), na qual se mede a capacidade de geração do módulo fotovoltaico ao fazê-lo fornecer energia a uma carga enquanto se mede a dinâmica de corrente e tensão do dispositivo.

Conforme mencionado no Capítulo 7, o levantamento da curva I x V foi realizado a cada 4 tratamentos, a fim de garantir que o processo de soldagem do interconector à célula solar não causou danos à mesma.

A Figura C.1 apresenta a curva I x V da célula solar antes do início do processo. Esta célula foi utilizada para a calibração do simulador solar em todos os dias de experimentação.

Figura C.1 – Curva I x V mostrando a calibração do simulador solar antes do início do processo.

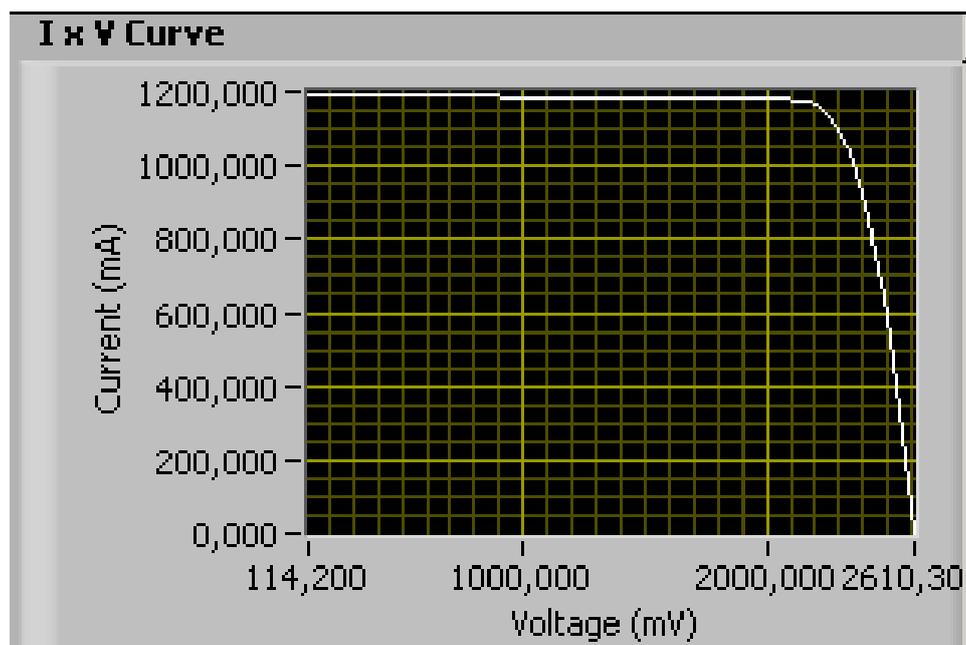


Fonte: Orbital Engenharia (2021).

Na sequência, são apresentadas todas as curvas I x V dos experimentos realizados.

A Figura C.2 mostra as características da curva I x V da célula solar antes da soldagem do interconector.

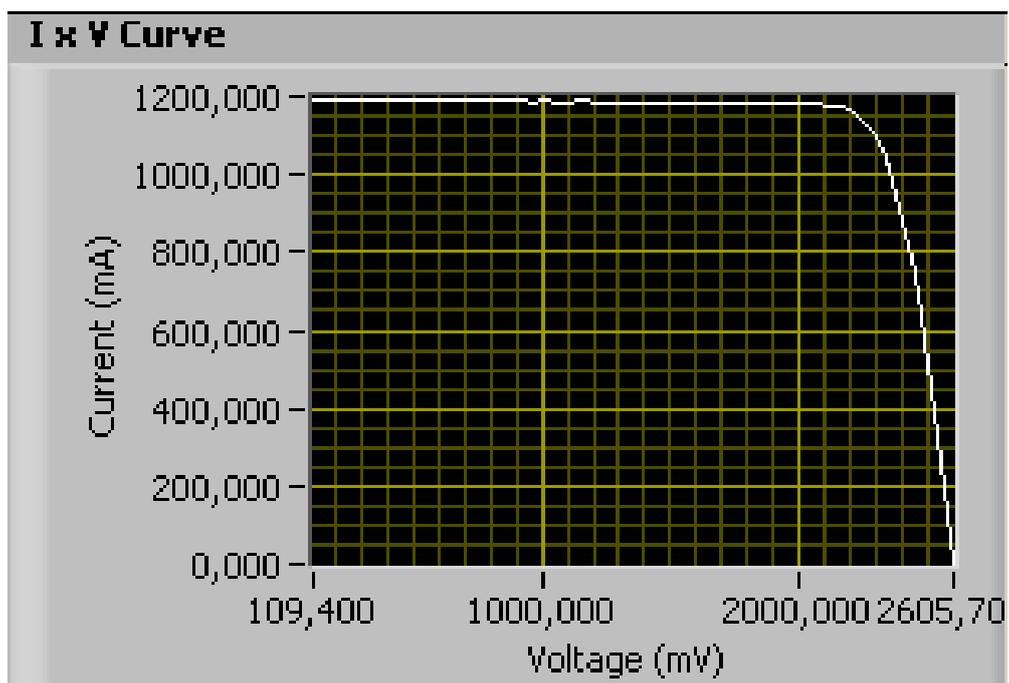
Figura C.2 – Curva I x V antes do processo de soldagem do interconector.



Fonte: Orbital Engenharia (2021).

A Figura C.3 mostra a curva I x V da célula solar após a soldagem dos quatro primeiros pontos de solda identificados na Tabela 6.2.

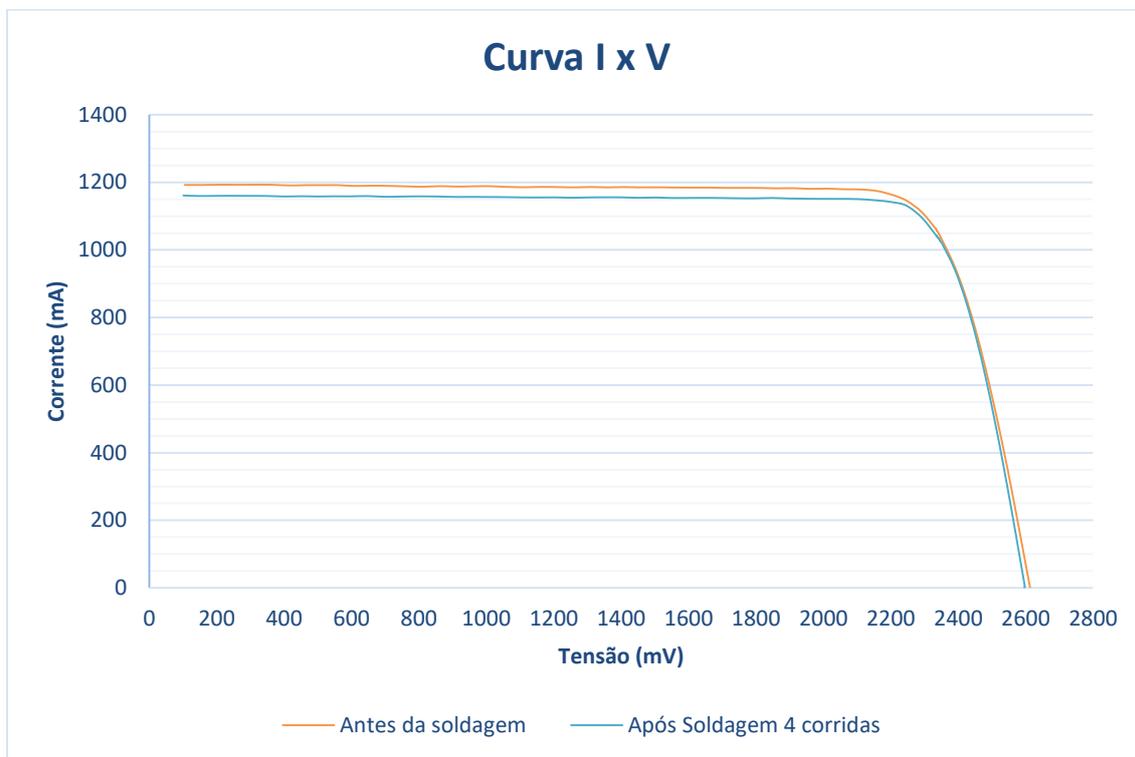
Figura C.3 – Curva I x V após o processo de soldagem (quatro pontos de solda).



Fonte: Orbital Engenharia (2021).

A Figura C.4 mostra a curva I x V (antes e depois do processo de soldagem, com 4 pontos de solda na mesma célula).

Figura C.4 – Curva I x V comparativo antes e depois do processo de soldagem (quatro pontos de solda).



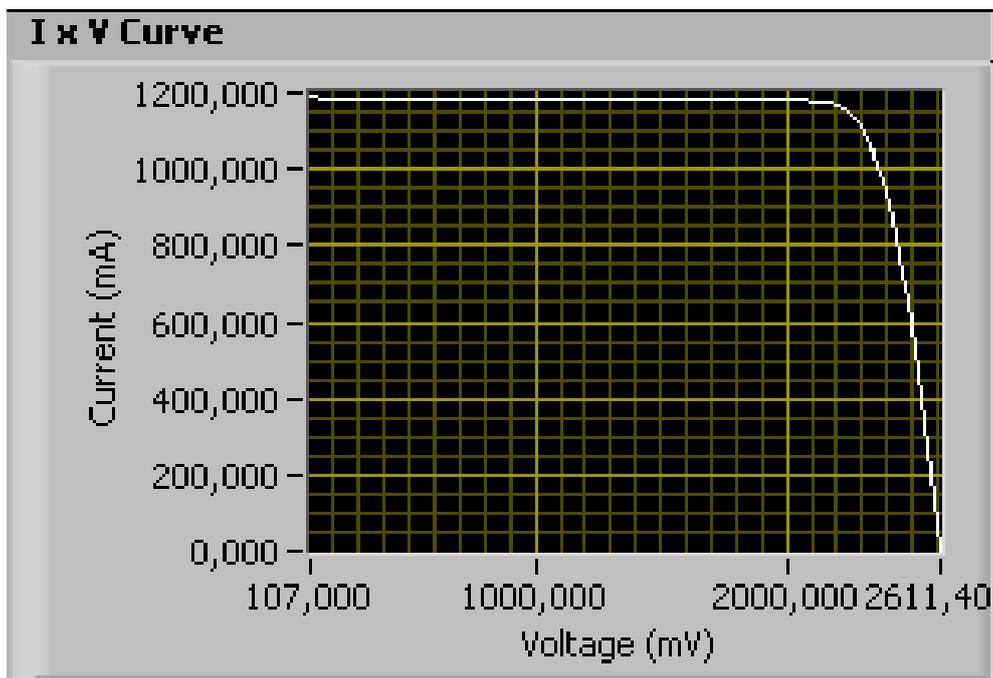
Fonte: Produção da autora.

Conforme observado no gráfico da Figura C.4, as duas curvas mostradas demonstraram que não ocorreram danos nas propriedades elétricas da célula solar após o processo de soldagem das interconexões, pois são aproximadamente iguais quando comparadas.

A tensão de máxima potência da célula solar antes do processo de soldagem foi de 2349,3 mV. Após a soldagem foi de 2349,5 mV. Sendo assim, a variação na tensão de máxima potência foi de 0,0085% para mais. Os dados de tensão máxima de potência foram obtidos através do software que controla o simulador solar.

Na Figura C.5 é apresentada a curva I x V da célula solar utilizada na calibração do simulador solar para o segundo dia de experimentação. Lembrando que é a mesma célula solar utilizada no primeiro dia.

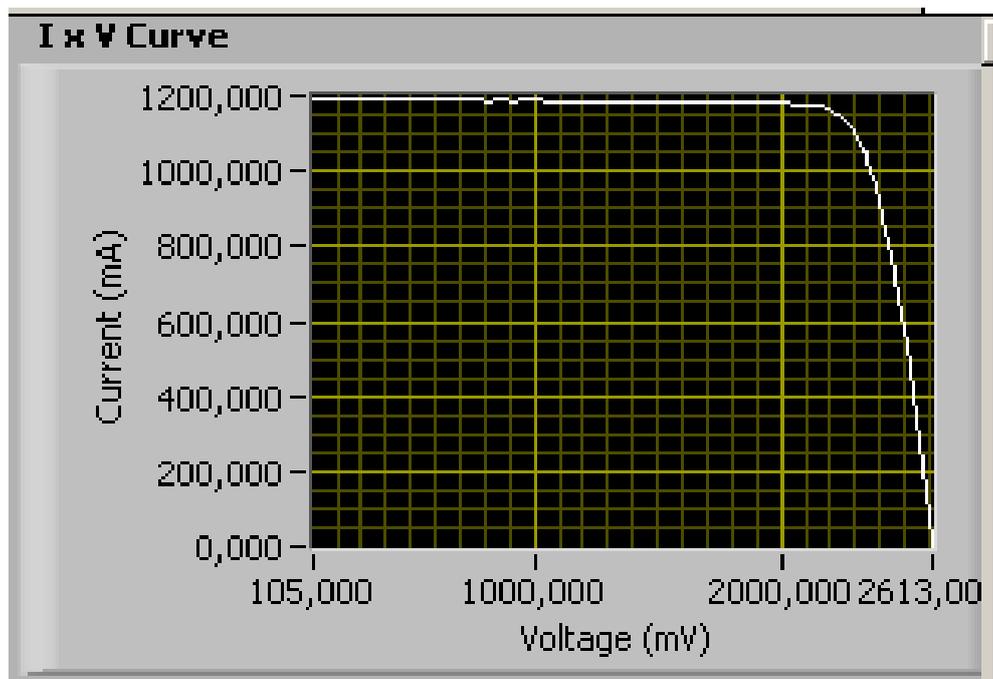
Figura C.5 – Curva I x V mostrando a calibração do simulador solar – 2º dia de experimentação.



Fonte: Orbital Engenharia (2021).

A Figura C.6 mostra a curva I x V da célula solar após a soldagem de mais quatro pontos de solda, totalizando 8 tratamentos.

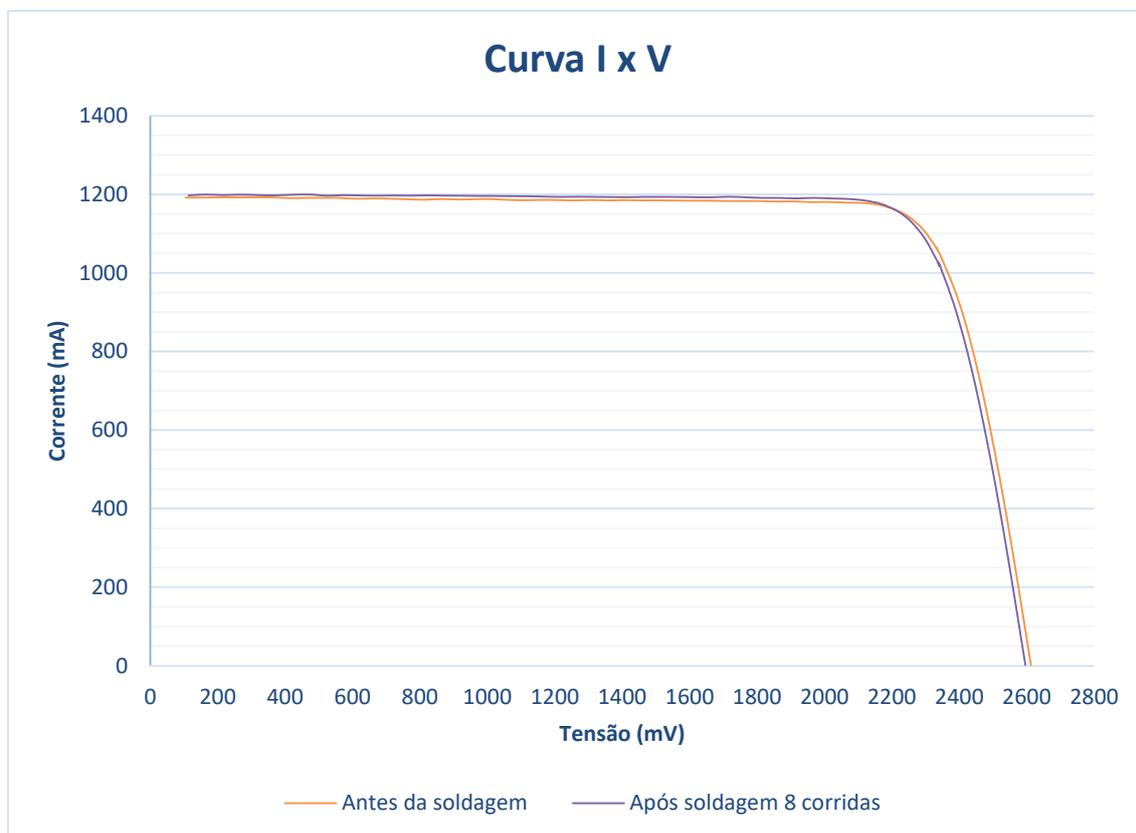
Figura C.6 – Curva I x V após o processo de soldagem (total de oito pontos de solda).



Fonte: Orbital Engenharia (2021).

A Figura C.7 mostra o comparativo da curva I x V (antes e após o processo de soldagem, com 8 pontos de solda na mesma célula).

Figura C.7 – Curva I x V comparativo antes e depois o processo de soldagem (oito pontos de solda).



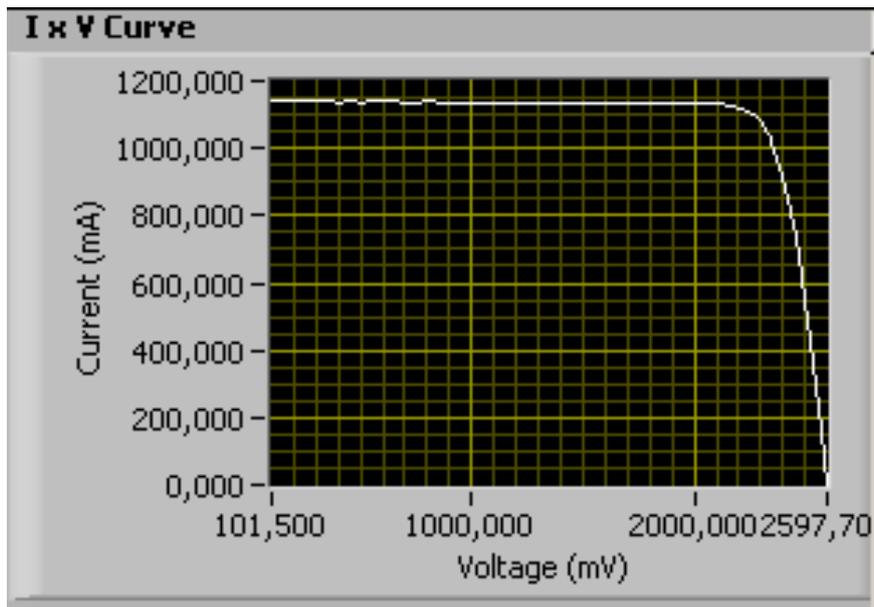
Fonte: Produção da autora.

Conforme observado no gráfico da Figura C.7, as duas curvas mostradas demonstraram que não ocorreram danos nas propriedades elétricas da célula solar após o processo de soldagem das interconexões, pois são aproximadamente iguais quando comparadas.

A tensão de máxima potência da célula solar antes do processo de soldagem foi de 2349,3 mV. Após a soldagem foi de 2347,8 mV. Sendo assim, a variação na tensão de máxima potência foi de 0,0638 % para menos. Os dados de tensão de máxima potência foram obtidos através do software que controla o simulador solar.

A Figura C.8 mostra a curva I x V da célula solar após a soldagem de mais quatro pontos de solda, totalizando 12 tratamentos.

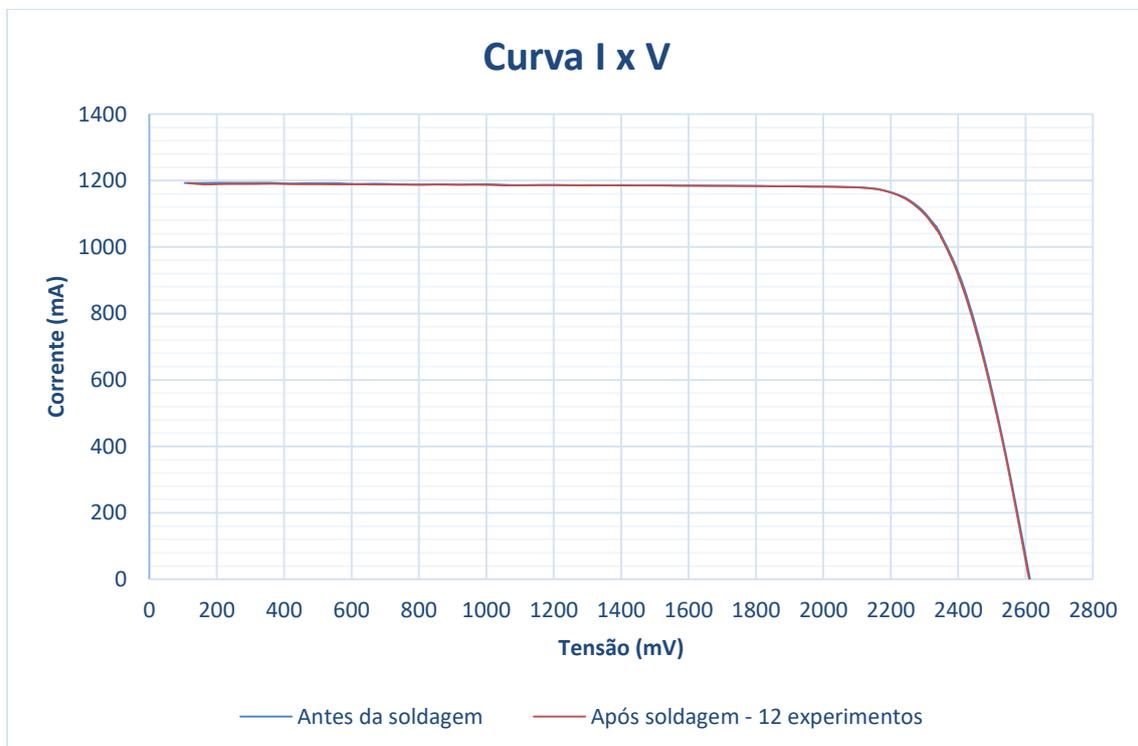
Figura C.8 – Curva I x V após o processo de soldagem (total de 12 pontos de solda).



Fonte: Orbital Engenharia (2021).

A Figura C.9 mostra a curva I x V antes e depois do processo de soldagem (totalizando 12 pontos de solda na mesma célula).

Figura C.9 – Curva I x V comparativo antes e depois do processo de soldagem (doze pontos de solda).



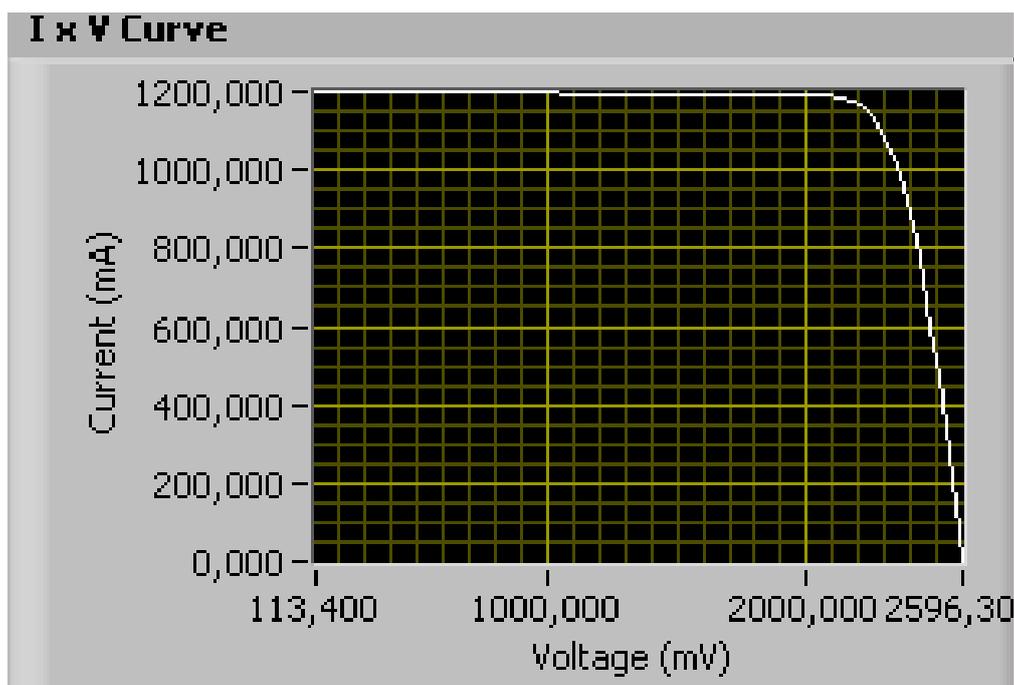
Fonte: Produção da autora.

Conforme observado no gráfico da Figura C.9, as duas curvas mostradas demonstraram que não ocorreram danos nas propriedades elétricas da célula solar após o processo de soldagem das interconexões, pois são aproximadamente iguais quando comparadas.

A tensão de máxima potência da célula solar antes do processo de soldagem foi de 2349,3 mV. Após a soldagem foi de 2344,5 mV. Sendo assim, a variação na tensão de máxima potência foi de 0,2043 % para menos. Os dados de tensão de máxima potência foram obtidos através do software que controla o simulador solar.

A Figura C.10 mostra a curva I x V da célula solar após a soldagem de mais quatro pontos de solda, totalizando 16 tratamentos.

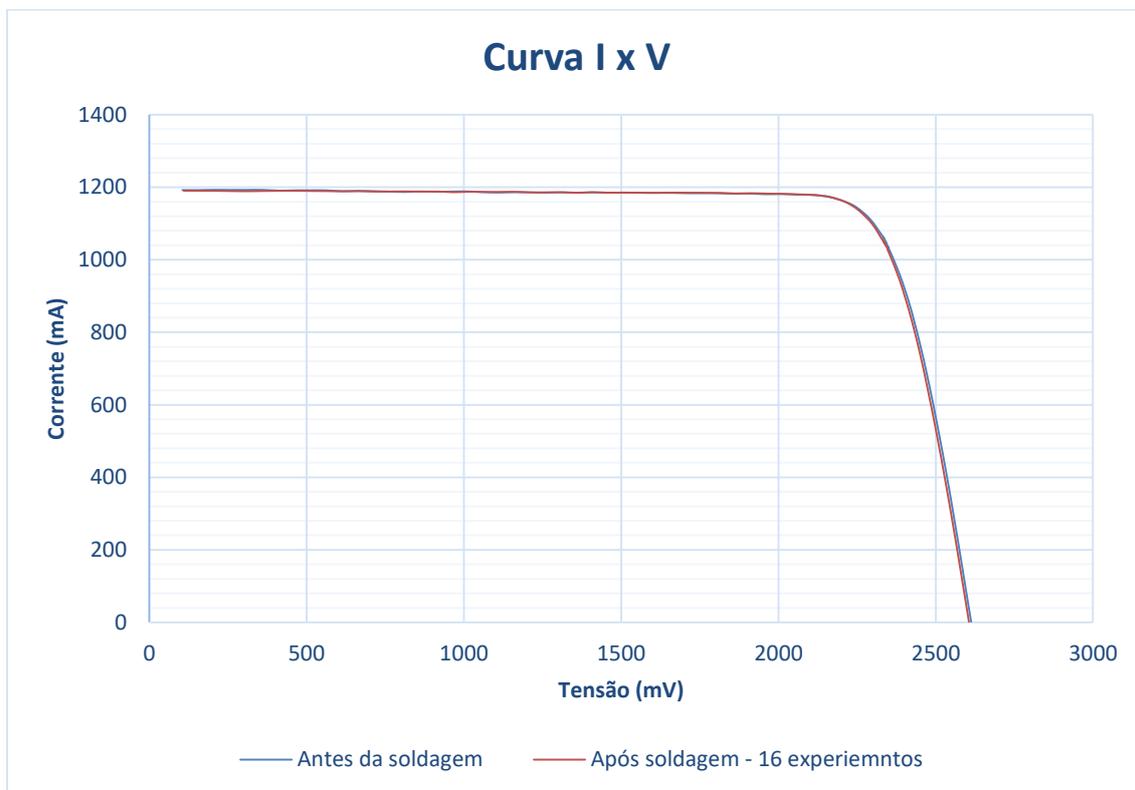
Figura C.10 – Curva I x V após o processo de soldagem (total de 16 pontos de solda).



Fonte: Orbital Engenharia (2021).

A Figura C.11 mostra a curva I x V antes e depois do processo de soldagem (totalizando 16 tratamentos).

Figura C.11 – Curva I x V comparativo antes e após o processo de soldagem (dezesesseis pontos de solda).



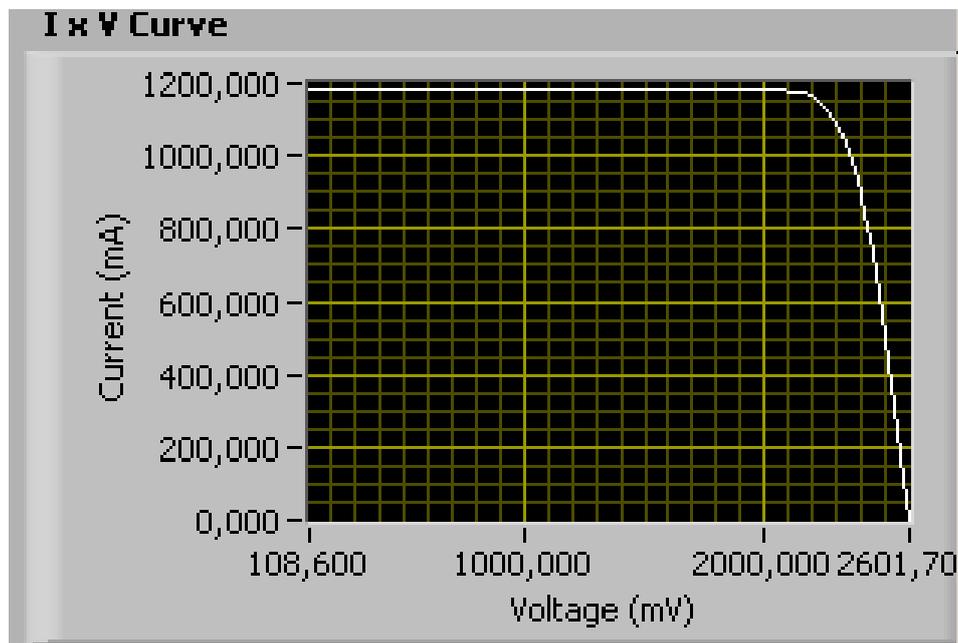
Fonte: Produção da autora.

Conforme observado no gráfico da Figura C.11, as duas curvas mostradas demonstraram que não ocorreram danos nas propriedades elétricas da célula solar após o processo de soldagem das interconexões, pois são aproximadamente iguais quando comparadas.

A tensão de máxima potência da célula solar antes do processo de soldagem foi de 2349,3 mV. Após a soldagem foi de 2348,6 mV. Sendo assim, a variação na de tensão máxima potência foi de 0,0553 % para menos. Os dados de tensão de máxima potência foram obtidos através do software que controla o simulador solar.

Na Figura C.12 é apresentada a curva I x V da célula solar utilizada para a calibração do simulador solar no terceiro dia de experimentação. Esta célula é a mesma utilizada nos demais dias.

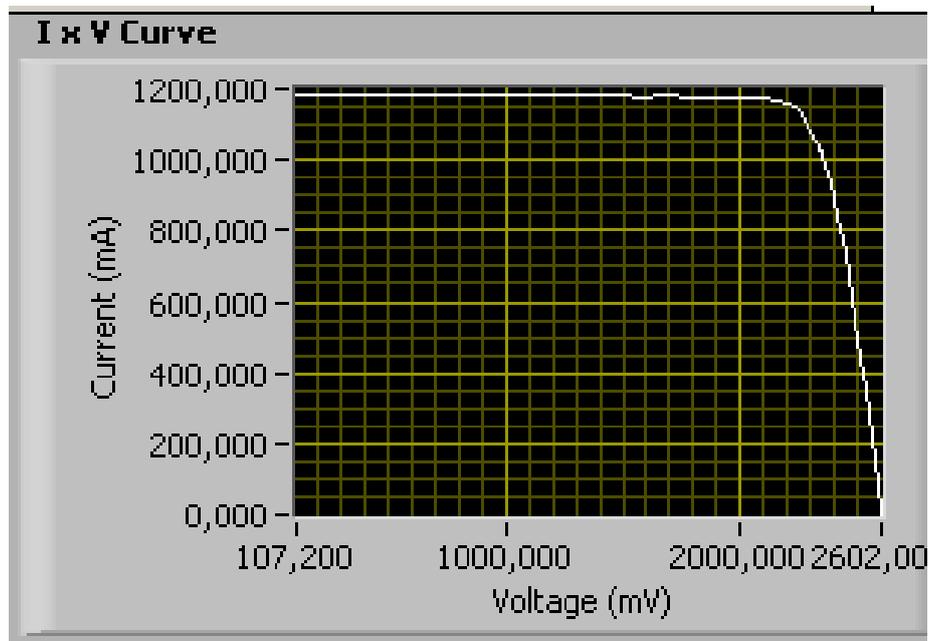
Figura C.12 – Curva I x V mostrando a calibração do simulador solar – 3º dia de experimentação.



Fonte: Orbital Engenharia (2021).

A Figura C.13 mostra as características da curva I x V da célula solar antes da soldagem do interconector.

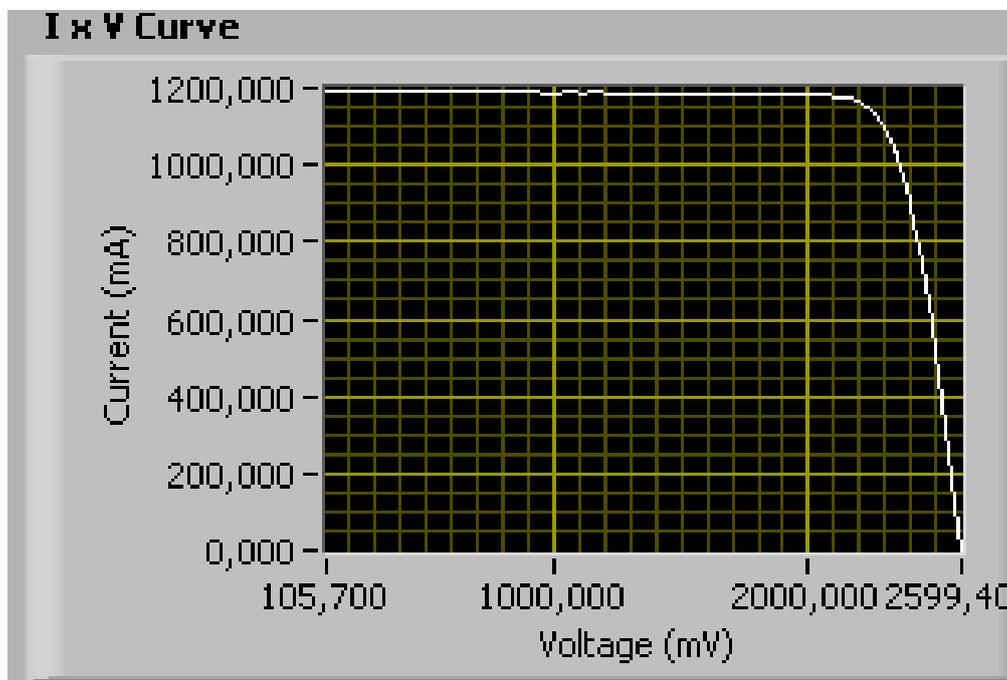
Figura C.13 – Curva I x V antes do processo de soldagem do interconector.



Fonte: Orbital Engenharia (2021).

A Figura C.14 mostra as características da curva I x V da célula solar após a soldagem do interconector.

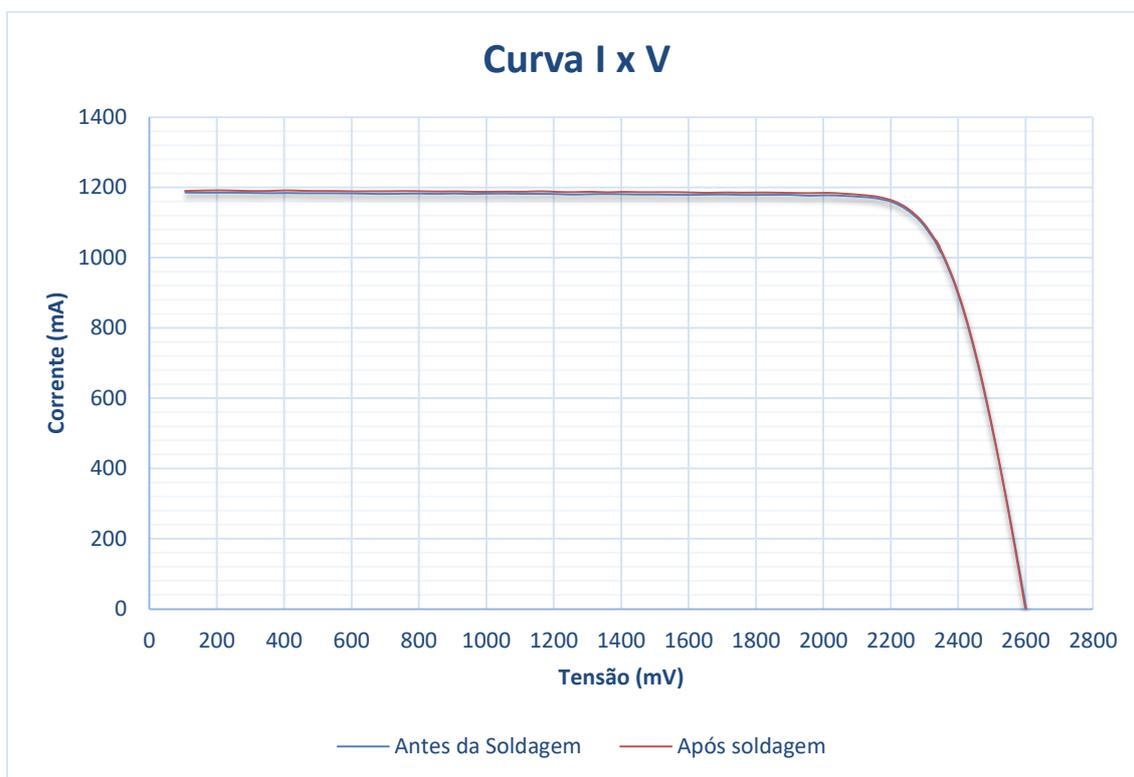
Figura C.14 – Curva I x V após o processo de soldagem (total de 20 pontos de solda).



Fonte: Orbital Engenharia (2021).

A Figura C.15 mostra a curva I x V antes e depois do processo de soldagem (totalizando 20 tratamentos).

Figura C.15 – Curva I x V comparativo antes e após o processo de soldagem.



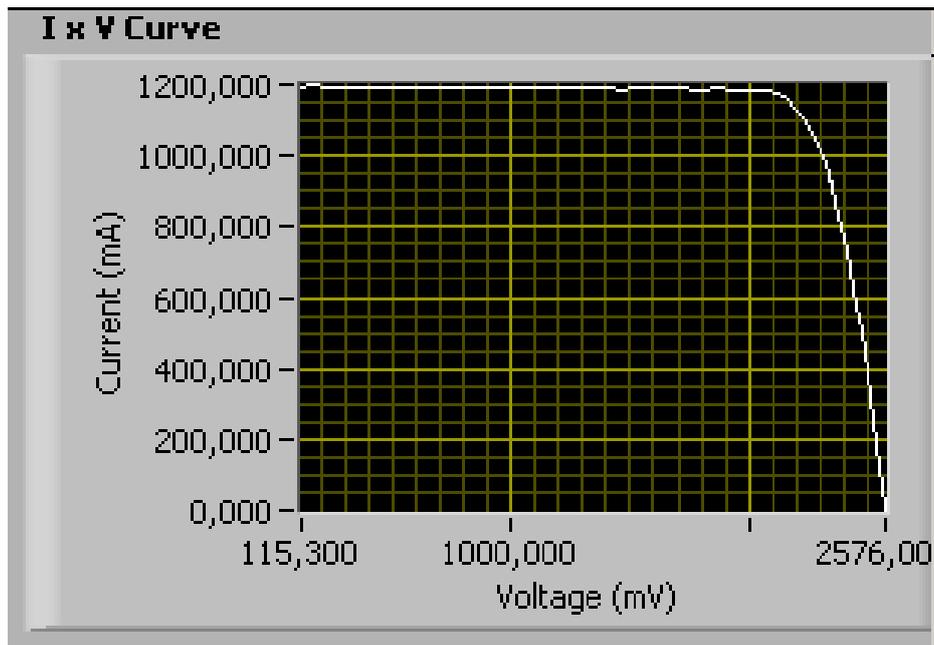
Fonte: Produção da autora.

Conforme observado no gráfico da Figura C.15, as duas curvas mostradas demonstraram que não ocorreram danos nas propriedades elétricas da célula solar após o processo de soldagem das interconexões, pois são aproximadamente iguais quando comparadas.

A tensão de máxima potência da célula solar antes do processo de soldagem foi de 2348,5 mV. Após a soldagem foi de 2343,9 mV. Sendo assim, a variação na tensão de máxima potência foi de 0,1958 % para menos. Os dados de tensão de máxima potência foram obtidos através do software que controla o simulador solar.

A Figura C.16 mostra as características da curva I x V da célula solar após a soldagem do interconector.

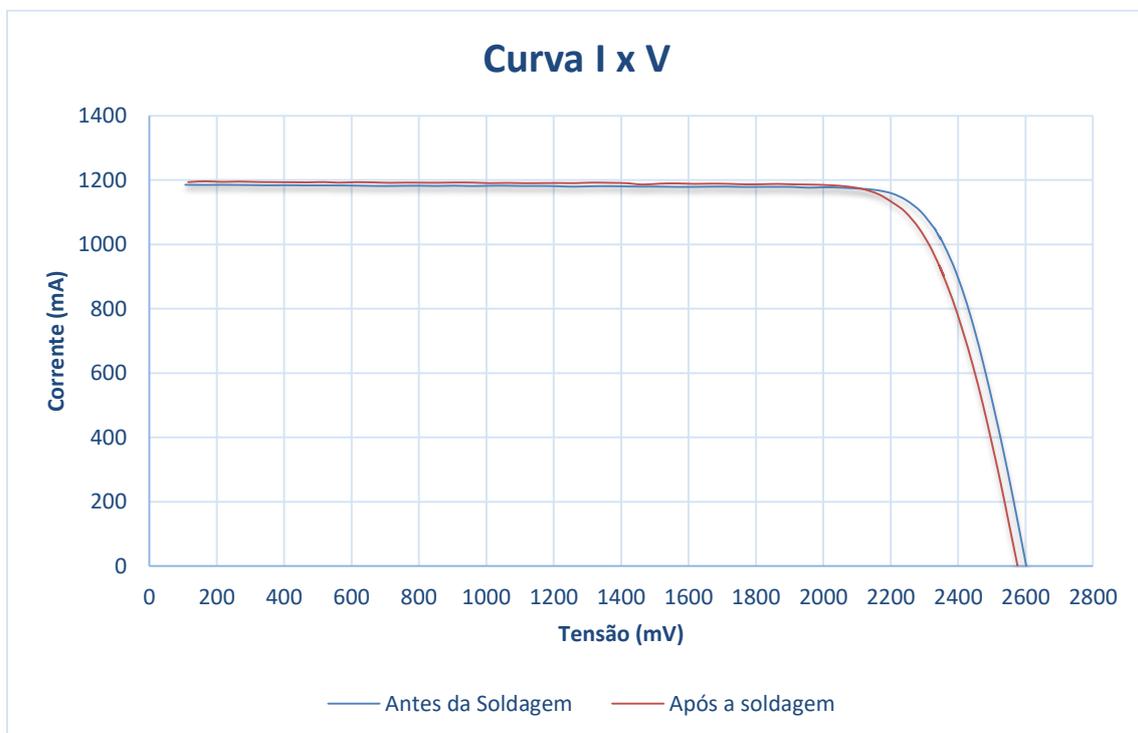
Figura C.16 – Curva I x V após o processo de soldagem (total de 24 pontos de solda).



Fonte: Orbital Engenharia (2021).

A Figura C.17 mostra a curva I x V antes e depois do processo de soldagem (totalizando 24 tratamentos).

Figura C.17 – Curva I x V comparativo antes e após o processo de soldagem.



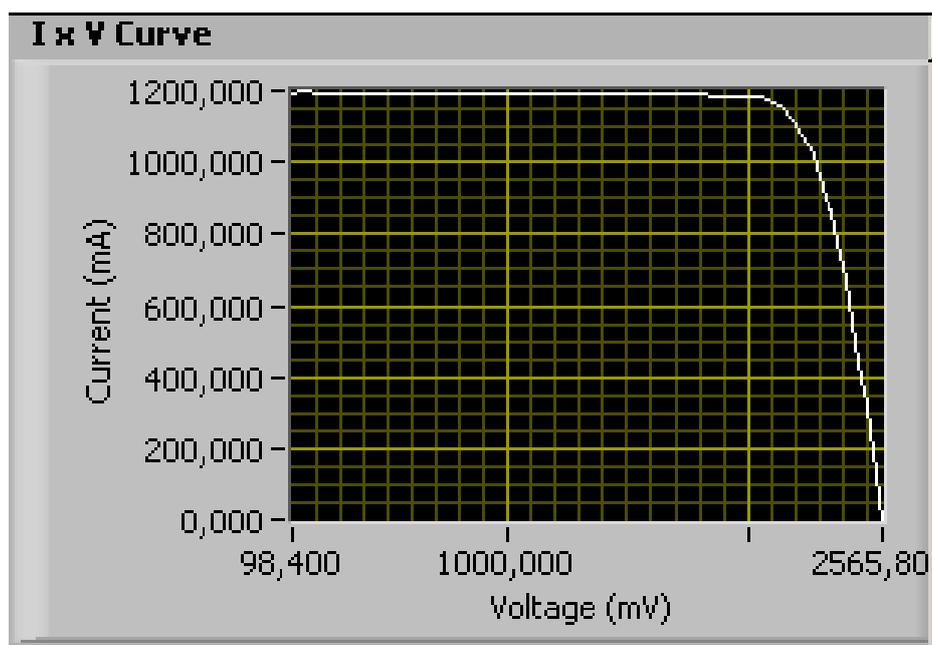
Fonte: Produção da autora.

Conforme observado no gráfico da Figura C.17, as duas curvas mostradas demonstraram que não ocorreram danos nas propriedades elétricas da célula solar após o processo de soldagem das interconexões, pois são aproximadamente iguais quando comparadas.

A tensão de máxima potência da célula solar antes do processo de soldagem foi de 2348,5 mV. Após a soldagem foi de 2350,7 mV. Sendo assim, a variação na tensão de máxima potência foi de 0,0937 % para mais. Os dados de tensão de máxima potência foram obtidos através do software que controla o simulador solar.

A Figura C.18 mostra as características da curva I x V da célula solar após a soldagem do interconector.

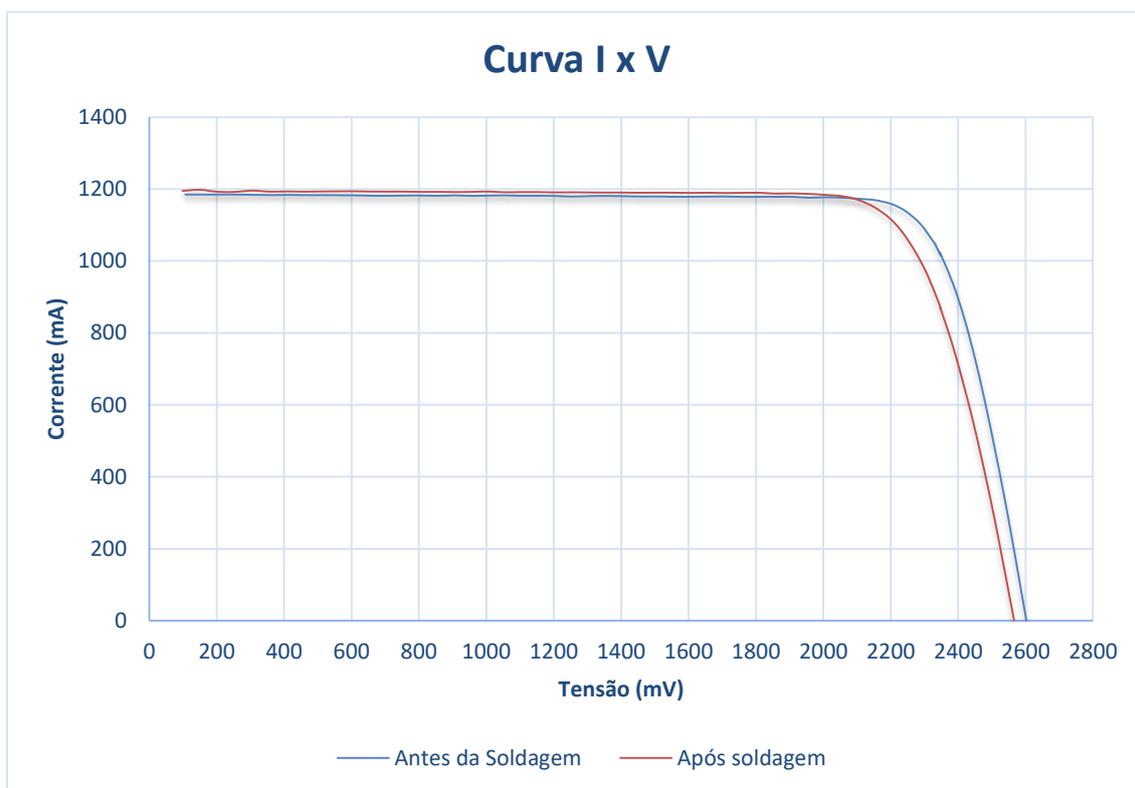
Figura C.18 – Curva I x V após o processo de soldagem (total de 28 pontos de solda).



Fonte: Orbital Engenharia (2021).

A Figura C.19 mostra a curva I x V antes e depois do processo de soldagem (totalizando 28 tratamentos).

Figura C.19 – Curva I x V comparativo antes e após o processo de soldagem.



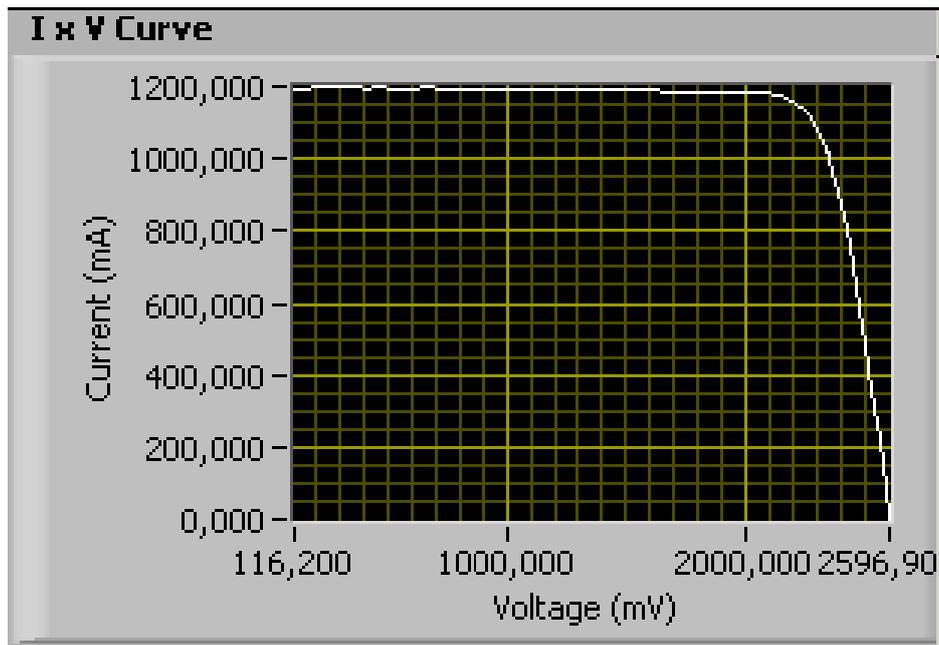
Fonte: Produção da autora.

Conforme observado no gráfico da Figura C.19, as duas curvas mostradas demonstraram que não ocorreram danos nas propriedades elétricas da célula solar após o processo de soldagem das interconexões, pois são aproximadamente iguais quando comparadas.

A tensão de máxima potência da célula solar antes do processo de soldagem foi de 2348,5 mV. Após a soldagem foi de 2347,5 mV. Sendo assim, a variação na tensão de máxima potência foi de 0,0426 % para menos. Os dados de tensão de máxima potência foram obtidos através do software que controla o simulador solar.

A Figura C.20 mostra as características da curva I x V da célula solar antes da soldagem do interconector.

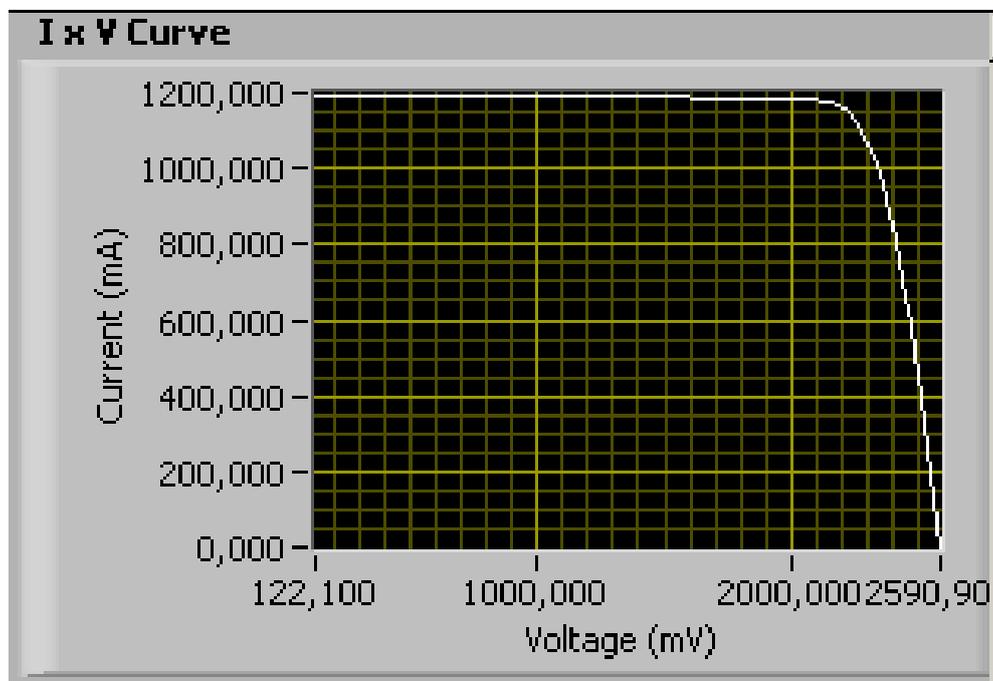
Figura C.20 – Curva I x V antes do processo de soldagem do interconector.



Fonte: Orbital Engenharia (2021).

A Figura C.21 mostra as características da curva I x V da célula solar após a soldagem do interconector.

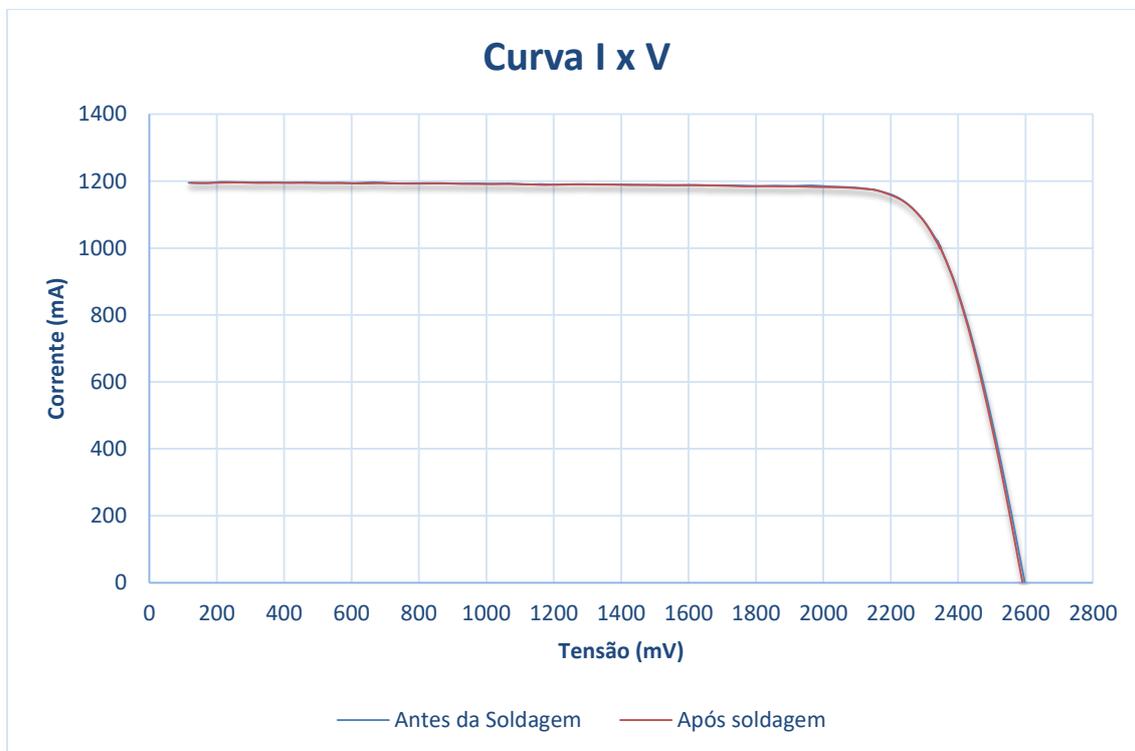
Figura C.21 – Curva I x V após o processo de soldagem (total de 32 pontos de solda).



Fonte: Orbital Engenharia (2021).

A Figura C.22 mostra a curva I x V antes e depois do processo de soldagem (totalizando 32 tratamentos).

Figura C.22 – Curva I x V comparativo antes e após o processo de soldagem.



Fonte: Produção da autora.

Conforme observado no gráfico da Figura C.22, as duas curvas mostradas demonstraram que não ocorreram danos nas propriedades elétricas da célula solar após o processo de soldagem das interconexões, pois são aproximadamente iguais quando comparadas.

A tensão de máxima potência da célula solar antes do processo de soldagem foi de 2348,0 mV. Após a soldagem foi de 2347,7 mV. Sendo assim, a variação na tensão de máxima potência foi de 0,0128 % para menos. Os dados de tensão de máxima potência foram obtidos através do software que controla o simulador solar.

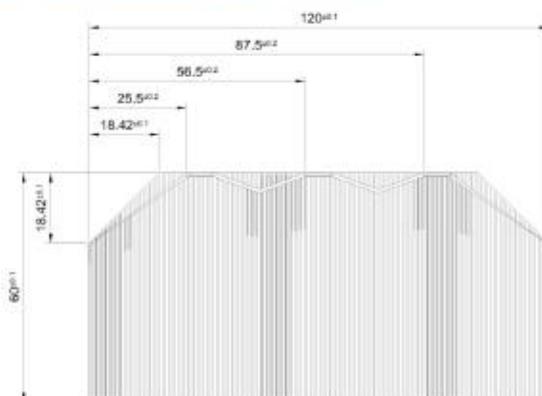
ANEXO A – DATASHEET DA CÉLULA SOLAR UTILIZADA NO EXPERIMENTO



30% Triple Junction GaAs Solar Cell Type: TJ Solar Cell 3G30C - Advanced Large Area: 120mm x 60mm



This cell type is an InGaP/GaAs/Ge on Ge substrate triple junction solar cell (efficiency class 30% advanced). The large area cell has an active area of 68.76cm² and is equipped with AZUR SPACE's improved grid-design. The advanced large version of the 3G30C offers best EOL-values in this class and is also available in various customized cell designs with a side length of up to 125mm where an active cell area of 72.0cm² is possible.



Issue date:
2016-06-19

DB 0003422-02-02
Page 1 of 2

Copyright © 2010 AZUR SPACE Solar Power GmbH

AZUR SPACE Solar Power GmbH
Theresienstr. 2
74072 Hellbronn
phone: +49 7131 67 2603
telefax: +49 7131 67 2727
e-mail: info@azurspace.com
website: www.azurspace.com

Certified Company

ISO 9001
ISO 14001
OHSAS 18001

Space

3G30C - Advanced

30% Triple Junction GaAs Junction Solar Cell

Type: TJ Solar Cell 3G30C - Advanced (120mm x 60mm)



Design and Mechanical Data

Base Material	GaInP/GaAs/Ge on Ge substrate
AR-coating	TiO ₂ /Al ₂ O ₃
Dimensions	120 x 60 mm ² ± 0.1 mm
Cell Area	68.76 cm ²
Average Weight	≤ 130 mg/cm ²
Thickness (without contacts)	230 ± 20 μm (other thicknesses available)
Contact Metallization Thickness (Ag/Au)	4 – 10 μm
Grid Design	Grid system with 3 contact pads



Electrical Data

		BOL	2,5E14	5E14	1E15
Average Open Circuit V _{oc}	[mV]	2700	2616	2564	2522
Average Short Circuit I _{sc}	[mA]	1186	1182	1172	1144
Voltage at max. Power V _{mp}	[mV]	2411	2345	2290	2246
Current at max. Power I _{mp}	[mA]	1147	1144	1138	1107
Average Efficiency η _{BOL} (1367 W/m ²)	[%]	29.4	28.6	27.7	26.5
Average Efficiency η _{BOL} (1353 W/m ²)	[%]	29.7	28.9	28.1	26.7

Standard: CASOLBA 2005 (05-20MV1, etc); Spectrum: AMO WRC = 1367 W/m²; T = 28 °C

@fluence 1MeV [e/cm²]

Acceptance Values

Voltage V _{op}	2350 mV
Min. average current I _{op avg} @ V _{op}	1152 mA
Min. individual current I _{op min} @ V _{op}	1080 mA



Temperature Gradients

		BOL	2E14	5E14	1E15
Open Circuit Voltage	ΔV _{oc} /ΔT↑ [mV/°C]	- 6.2	- 6.5	- 6.6	- 6.7
Short Circuit Current	ΔI _{sc} /ΔT↑ [mA/°C]	0.82	0.75	0.80	0.87
Voltage at max. Power	ΔV _{mp} /ΔT↑ [mV/°C]	- 6.7	- 6.8	- 7.1	- 7.2
Current at max. Power	ΔI _{mp} /ΔT↑ [mA/°C]	0.55	0.46	0.55	0.64

@fluence 1MeV [e/cm²]



Threshold Values

Absorptivity	≤ 0.91 (with CMX 100 AR)
Pull Test	> 1.6 N with 12.5μm welded Ag stripe, pulled at 45°

Issue date:
2016-08-19

DB 0003422-02-02
Page 2 of 2

Copyright © 2010 AZUR SPACE Solar Power GmbH

AZUR SPACE Solar Power GmbH
Theresenstr. 2
74072 Heilbronn
phone: +49 7131 67 2603
telefax: +49 7131 67 2727
e-mail: info@azurspace.com
website: www.azurspace.com

Certified Company

ISO 9001
ISO 14001
OHSAS 18001

3G30C - Advanced

Space

ANEXO B – INFORMAÇÕES REFERENTES AO SIMULADOR SOLAR

CONTINUOUS SUN SIMULATOR

Main Aspects

The Continuous Sun Simulator (CSS) of Orbital Engenharia SA produces solar radiation through a compact set of two different types of lamps and reflectors. The first type of lamps work with gas discharge, and the second with filaments. The lamps are mounted on an illumination structure installed into the top of a cabinet that has a height of 1.9 meters (6.23 ft.), as can be seen on the side picture. The figure below shows the measurement made with a spectrum-radiometer UV-VIS-IR of the radiation spectrum curve.

The CSS meets the specifications of the Brazilian norm ABNT NBR11879, which are summarized as follows: spectrum of luminous radiation AM1, 5G with intensity of 1000 W/m², uniformity variation in the target plane better than 10% and temporal stability better than 5%. The above figure shows a comparison of Orbital's CSS measured (red curve) and reference (blue curve) radiation spectrum data. Thus, the CSS can be ranked as Class-A for this spectral range.

Spectra of the luminous radiation:
The CSS is available with two main configurations:
-AM1, 5G with intensity of 1367 W/m².
-AM1, 5G with intensity of 1000 W/m².

For other configurations, please contact Orbital Engenharia SA.



ORBITAL ENGENHARIA

www.orbital-eng.com

CONTINUOUS SUN SIMULATOR

Technical specifications:

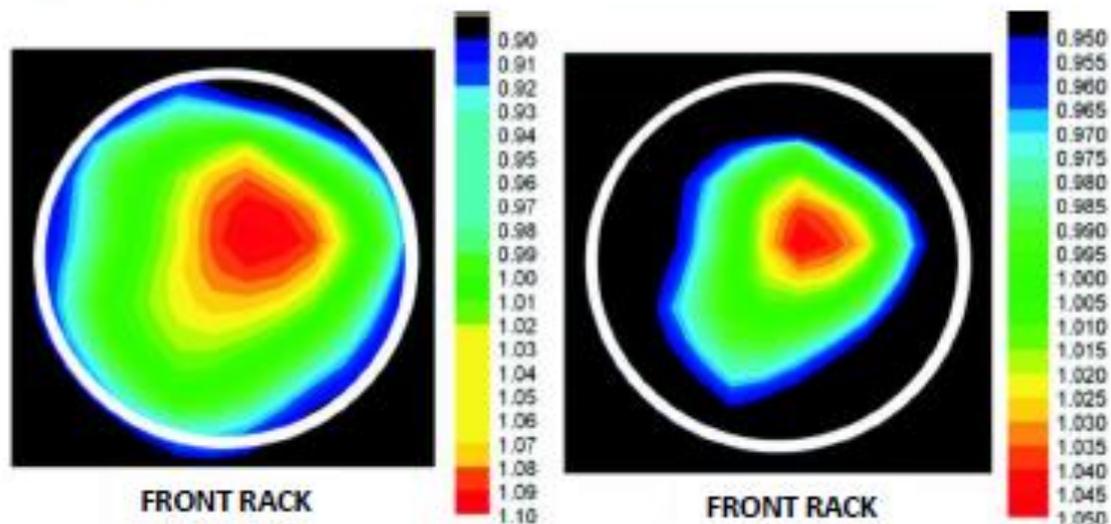
- Power supply of 220V and 60Hz;
- Power consumption of 2500W;
- Vertical light beam from top to bottom;
- Illumination target plane at a fixed height with an area of 14 cm (5.51 inches) x 14 cm (5.51 inches);
- Constant intensity of 1000 W/m², regulated manually by the supply voltage regulator;

- Uniformity variation within target plane less than 10%;
- Temporal stability of 5%, considering the supply voltage oscillating 1V;
- Normal operation foresees lamps' lifespan with 3000 hours while maintaining a constant spectrum;
- Recalibration is required either after 1000 hours of operation or 12 months, whichever occurs first;
- The control panel of the cabinet allows simple visualization and understanding of the commands.

The spectral mismatching data (%) for the CSS over a wavelength range from 400 to 1100nm are shown below:

Wavelength range (nm)	400	500	600	700	800	900	1000
	500	600	700	800	900	1000	1100
Spectral mismatching	-6,4	-1,8	+4,2	+11,3	-1,5	-7,5	-16,9

The image below shows a typical variation of the illumination relative uniformity of the target plane in a circle with a 20 cm diameter (7.87 inches), that is 10% Class-C for the whole circle. The sidebar shows the scale of variation of the uniformity. The inner part of the circle (10 cm of diameter) shows a variation of 5% Class-B.



Optional accessories:

- Reference solar cell to regulate the intensity;
- Light beam blocker to manipulate samples on the target plane;
- Cooling system to control the temperature of the target plane;

Dimensions and weight:

- 1900x570x570 mm;
- 100 Kg

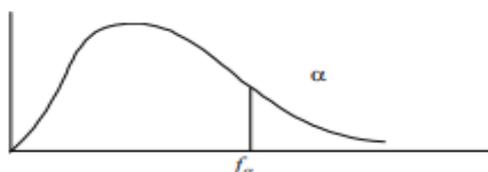
For further
information,
please contact us:

Av. Doutor Joao Batista Soares de Queiroz Junior, 1821
Jardim das Industrias, Sao Jose dos Campos - SP, Brazil, 12240-000
solsim@orbital-eng.com - www.orbital-eng.com
Tel/Fax: +55 12 3933-2230



ANEXO C – DISTRIBUIÇÃO F

Tabela C.1 – Distribuição F [P (F>F0) = 0,05]

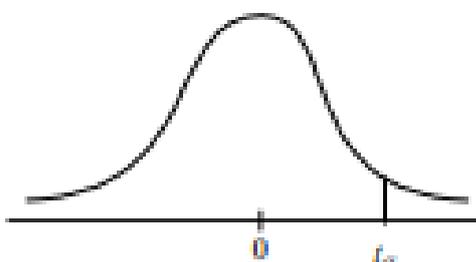


$m =$ g. lib. numerador
 $n =$ g. lib. denominador

n	m																		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	24	30	40	60	120	∞
1	161,40	199,50	215,70	224,60	230,20	234,00	236,80	238,90	240,50	241,90	243,90	245,90	248,00	249,10	250,10	251,10	252,20	253,30	254,30
2	18,51	19,00	19,16	19,25	19,30	19,33	19,35	19,37	19,38	19,40	19,41	19,43	19,45	19,45	19,46	19,47	19,48	19,49	19,50
3	10,13	9,55	9,28	9,12	9,01	8,94	8,89	8,85	8,81	8,79	8,74	8,70	8,66	8,64	8,62	8,59	8,57	8,55	8,53
4	7,71	6,94	6,59	6,39	6,26	6,16	6,09	6,04	6,00	5,96	5,91	5,86	5,80	5,77	5,75	5,72	5,69	5,66	5,63
5	6,61	5,79	5,41	5,19	5,05	4,95	4,88	4,82	4,77	4,74	4,68	4,62	4,56	4,53	4,50	4,46	4,43	4,40	4,36
6	5,99	5,14	4,76	4,53	4,39	4,28	4,21	4,15	4,10	4,06	4,00	3,94	3,87	3,84	3,81	3,77	3,74	3,70	3,67
7	5,59	4,74	4,35	4,12	3,97	3,87	3,79	3,73	3,68	3,64	3,57	3,51	3,44	3,41	3,38	3,34	3,30	3,27	3,23
8	5,32	4,46	4,07	3,84	3,69	3,58	3,50	3,44	3,39	3,35	3,28	3,22	3,15	3,12	3,08	3,04	3,01	2,97	2,93
9	5,12	4,26	3,86	3,63	3,48	3,37	3,29	3,23	3,18	3,14	3,07	3,01	2,94	2,90	2,86	2,83	2,79	2,75	2,71
10	4,96	4,10	3,71	3,48	3,33	3,22	3,14	3,07	3,02	2,98	2,91	2,85	2,77	2,74	2,70	2,66	2,62	2,58	2,54
11	4,84	3,98	3,59	3,36	3,20	3,09	3,01	2,95	2,90	2,85	2,79	2,72	2,65	2,61	2,57	2,53	2,49	2,45	2,40
12	4,75	3,89	3,49	3,26	3,11	3,00	2,91	2,85	2,80	2,75	2,69	2,62	2,54	2,51	2,47	2,43	2,38	2,34	2,30
13	4,67	3,81	3,41	3,18	3,03	2,92	2,83	2,77	2,71	2,67	2,60	2,53	2,46	2,42	2,38	2,34	2,30	2,25	2,21
14	4,60	3,74	3,34	3,11	2,96	2,85	2,76	2,70	2,65	2,60	2,53	2,46	2,39	2,35	2,31	2,27	2,22	2,18	2,13
15	4,54	3,68	3,29	3,06	2,90	2,79	2,71	2,64	2,59	2,54	2,48	2,40	2,33	2,29	2,25	2,20	2,16	2,11	2,07
16	4,49	3,63	3,24	3,01	2,85	2,74	2,66	2,59	2,54	2,49	2,42	2,35	2,28	2,24	2,19	2,15	2,11	2,06	2,01
17	4,45	3,59	3,20	2,96	2,81	2,70	2,61	2,55	2,49	2,45	2,38	2,31	2,23	2,19	2,15	2,10	2,06	2,01	1,96
18	4,41	3,55	3,16	2,93	2,77	2,66	2,58	2,51	2,46	2,41	2,34	2,27	2,19	2,15	2,11	2,06	2,02	1,97	1,92
19	4,38	3,52	3,13	2,90	2,74	2,63	2,54	2,48	2,42	2,38	2,31	2,23	2,16	2,11	2,07	2,03	1,98	1,93	1,88
20	4,35	3,49	3,10	2,87	2,71	2,60	2,51	2,45	2,39	2,35	2,28	2,20	2,12	2,08	2,04	1,99	1,95	1,90	1,84
21	4,32	3,47	3,07	2,84	2,68	2,57	2,49	2,42	2,37	2,32	2,25	2,18	2,10	2,05	2,01	1,96	1,92	1,87	1,81
22	4,30	3,44	3,05	2,82	2,66	2,55	2,46	2,40	2,34	2,30	2,23	2,15	2,07	2,03	1,98	1,94	1,89	1,84	1,78
23	4,28	3,42	3,03	2,80	2,64	2,53	2,44	2,37	2,32	2,27	2,20	2,13	2,05	2,01	1,96	1,91	1,86	1,81	1,76
24	4,26	3,40	3,01	2,78	2,62	2,51	2,42	2,36	2,30	2,25	2,18	2,11	2,03	1,98	1,94	1,89	1,84	1,79	1,73
25	4,24	3,39	2,99	2,76	2,60	2,49	2,40	2,34	2,28	2,24	2,16	2,09	2,01	1,96	1,92	1,87	1,82	1,77	1,71
26	4,23	3,37	2,98	2,74	2,59	2,47	2,39	2,32	2,27	2,22	2,15	2,07	1,99	1,95	1,90	1,85	1,80	1,75	1,69
27	4,21	3,35	2,96	2,73	2,57	2,46	2,37	2,31	2,25	2,20	2,13	2,06	1,97	1,93	1,88	1,84	1,79	1,73	1,67
28	4,20	3,34	2,95	2,71	2,56	2,45	2,36	2,29	2,24	2,19	2,12	2,04	1,96	1,91	1,87	1,82	1,77	1,71	1,65
29	4,18	3,33	2,93	2,70	2,55	2,43	2,35	2,28	2,22	2,18	2,10	2,03	1,94	1,90	1,85	1,81	1,75	1,70	1,64
30	4,17	3,32	2,92	2,69	2,53	2,42	2,33	2,27	2,21	2,16	2,09	2,01	1,93	1,89	1,84	1,79	1,74	1,68	1,62
40	4,08	3,23	2,84	2,61	2,45	2,34	2,25	2,18	2,12	2,08	2,00	1,92	1,84	1,79	1,74	1,69	1,64	1,58	1,51
60	4,00	3,15	2,76	2,53	2,37	2,25	2,17	2,10	2,04	1,99	1,92	1,84	1,75	1,70	1,65	1,59	1,53	1,47	1,39
120	3,92	3,07	2,68	2,45	2,29	2,17	2,09	2,02	1,96	1,91	1,83	1,75	1,66	1,61	1,55	1,50	1,43	1,35	1,25
∞	3,84	3,00	2,60	2,37	2,21	2,10	2,01	1,94	1,88	1,83	1,75	1,67	1,57	1,52	1,46	1,39	1,32	1,22	1,00

ANEXO D – DISTRIBUIÇÃO t DE STUDENT

Tabela D.1 – Distribuição t de Student [P (-t_α < t < t_α) = 1-α]



v g. l.	α					
	0,25	0,10	0,05	0,025	0,01	0,005
1	1,000	3,078	6,314	12,706	31,821	63,657
2	0,816	1,886	2,920	4,303	6,965	9,925
3	0,765	1,638	2,353	3,182	4,541	5,841
4	0,741	1,533	2,132	2,776	3,747	4,604
5	0,727	1,476	2,015	2,571	3,365	4,032
6	0,718	1,440	1,943	2,447	3,143	3,707
7	0,711	1,415	1,895	2,365	2,998	3,499
8	0,706	1,397	1,860	2,306	2,896	3,355
9	0,703	1,383	1,833	2,262	2,821	3,250
10	0,700	1,372	1,812	2,228	2,764	3,169
11	0,697	1,363	1,796	2,201	2,718	3,106
12	0,695	1,356	1,782	2,179	2,681	3,055
13	0,694	1,350	1,771	2,160	2,650	3,012
14	0,692	1,345	1,761	2,145	2,624	2,977
15	0,691	1,341	1,753	2,131	2,602	2,947
16	0,690	1,337	1,746	2,120	2,583	2,921
17	0,689	1,333	1,740	2,110	2,567	2,898
18	0,688	1,330	1,734	2,101	2,552	2,878
19	0,688	1,328	1,729	2,093	2,539	2,861
20	0,687	1,325	1,725	2,086	2,528	2,845
21	0,686	1,323	1,721	2,080	2,518	2,831
22	0,686	1,321	1,717	2,074	2,508	2,819
23	0,685	1,319	1,714	2,069	2,500	2,807
24	0,685	1,318	1,711	2,064	2,492	2,797
25	0,684	1,316	1,708	2,060	2,485	2,787
26	0,684	1,315	1,706	2,056	2,479	2,779
27	0,684	1,314	1,703	2,052	2,473	2,771
28	0,683	1,313	1,701	2,048	2,467	2,763
29	0,683	1,311	1,699	2,045	2,462	2,756
30	0,683	1,310	1,697	2,042	2,457	2,750
40	0,681	1,303	1,684	2,021	2,423	2,704
60	0,679	1,296	1,671	2,000	2,390	2,660
120	0,677	1,289	1,658	1,980	2,358	2,617
∞	0,674	1,282	1,645	1,960	2,326	2,576