

# TESTE DE CICLAGEM TÉRMICA EM MÓDULOS FOTOVOLTAICOS – UMA REVISÃO

Igor Utzig Picco – igor.picco@sengisolar.com.br

Diogo Sanchez de Oliveira

Gabriel Pereira Ugucioni Rocha

Gabriela Nascimento Pereira

Matheus Bisolotti do Carmo

Fernando Andrey Bessegato

Carlos Victor do Rêgo Brandão

Murilo Bonetto

Sengi Solar, Departamento de Pesquisa e Desenvolvimento

049. Tecnologias e ensaios de módulos fotovoltaicos

**Resumo.** *Devido ao longo período de operação e garantia de módulos fotovoltaicos, sua análise de funcionamento de longo prazo torna-se essencial. O teste de ciclagem térmica é utilizado em diversos fluxos de ensaio e validação na análise do comportamento termomecânico de módulos fotovoltaicos. Apesar de sua utilização, há diversos indícios sobre a necessidade de maior conhecimento sobre o funcionamento do módulo quando submetido a condições climáticas adversas. Tendo isso em vista, esse artigo apresenta um levantamento bibliográfico para fornecer maior entendimento sobre o teste de ciclagem térmica, os impactos de módulos fotovoltaicos submetidos ao teste, como utilizá-lo na otimização construtiva de módulos fotovoltaicos com maior durabilidade térmica e a necessidade de fluxos de teste e análise de maior intensidade e profundidade.*

**Palavras-chave:** *Módulo Fotovoltaico, Degradação Térmica, Ciclagem Térmica.*

## 1. INTRODUÇÃO

A crescente necessidade de geração de energia renovável, juntamente com o desenvolvimento tecnológico e redução de custo de sistemas fotovoltaicos refletiu em um crescimento expressivo da geração de energia fotovoltaica no Brasil nos últimos anos (De Brito, Teixeira e De Souza, 2023; Vargas *et al.*, 2023). Dentre as diversas tecnologias de células solares utilizadas nos módulos fotovoltaicos, a tecnologia predominante é a do Silício Cristalino, sendo a arquitetura PERC (*Passivated Emitter Rear Cell*) a mais utilizada e consolidada na atualidade. Entretanto, devido à contante busca de componentes com maior eficiência de conversão, o mercado fotovoltaico internacional está apresentando uma tendência de transição tecnológica para a arquitetura TOPCon (*Tunnel Oxide Passivated Contacts*) se tornar a nova arquitetura predominante, enquanto também apresenta perspectivas futuras de utilização significativa de HJT (*Heterojunction Technology*) (ITRPV, 2023). Apesar da crescente inserção da geração de energia solar na matriz energética brasileira, as condições climáticas do país, caracterizadas principalmente pela alta temperatura e umidade, divergem das condições ideais de operação do módulo fotovoltaico, que é construído e testado considerando a operação do módulo nas condições STC (*Standard Test Conditions*) de 25°C e 1000W/m<sup>2</sup> (Jiang *et al.*, 2019).

Um dos principais testes de análise de durabilidade de módulos fotovoltaicos sobre condições climáticas extremas é o teste de ciclagem térmica. Neste ensaio, o módulo é submetido a valores extremos de temperatura, com variações rápidas e de alta frequência. O teste mais utilizado é o TC200 (*Thermal Cycling 200 Cycles*), descrito na norma IEC 61215. O TC200 é utilizado mundialmente para análise de módulos submetidos a condições climáticas adversas e nos principais fluxos de homologação de produto, entretanto, o teste descrito nas normas IEC não tem como objetivo validar um módulo fotovoltaico operando durante sua vida útil completa de 25 anos, mas somente fornecer um ponto de referência para a análise da qualidade e segurança (Du, Wang e Tao, 2020), evidenciando a necessidade de testes e análises mais profundas do que a IEC para a validação de módulos fotovoltaicos, principalmente em climas quentes como o do Brasil.

Tendo em vista a necessidade de maior domínio tecnológico e entendimento do comportamento de módulos fotovoltaicos operando em clima brasileiro, esse trabalho traz uma revisão bibliográfica sobre a utilização do teste de ciclagem térmica na análise profunda de módulos fotovoltaicos e seus resultados. A revisão tem ênfase no entendimento dos fundamentos do teste, no impacto que o ensaio traz na performance dos módulos, na obtenção de informações de otimização construtiva de módulos fotovoltaicos com menor impacto da degradação térmica em operação e na formulação de ensaios novos de ciclagem térmica, com o objetivo de aprofundar a análise de resistência térmica de acordo com a especificidade e características ambientais particulares. Como contribuição, o artigo também propõe sugestões de linhas de pesquisa a serem desenvolvidas para uma maior confiabilidade na operação de módulos fotovoltaicos em solo brasileiro.

## 2. O TESTE DE CICLAGEM TÉRMICA

Essa sessão apresenta o teste padrão mais utilizado na homologação e pesquisa de degradação térmica e seus fundamentos. Em seguida são apresentados trabalhos que apresentaram os efeitos que a ciclagem térmica traz no desempenho de módulos e como diferentes *designs* modificam esse comportamento.

### 2.1 TC200 – *Thermal Cycle 200 Cycles*

As normas IEC 61215 e IEC 61730 definem os critérios mínimos de qualidade e segurança de um módulo fotovoltaico, orientações de design e construção e instruções de testes. Essas normas são utilizadas como guia base de construção e como principal fluxo de teste e homologação de módulos fotovoltaicos em âmbito mundial. Uma etapa desse fluxo se refere a aplicação do teste *TC200*. O *TC200* aplica 200 ciclos térmicos em um módulo fotovoltaico. As regras de cada ciclo térmico são apresentadas na Tab. 1 e ilustrados na Fig. 1. Os critérios de aceitação para um módulo ser aprovado no TC200 são: queda de no máximo 5% no valor nominal de potência gerada, ausência de danos estruturais verificados através de inspeção visual, resistência de isolamento acima da norma, ausência de arco de corrente, falha de circuito aberto e corrente de fuga interna do módulo dentro da norma, considerando o valor de classe de tensão do módulo. (Jiang *et al.*, 2019).

Tabela 1 – Principais parâmetros do teste de ciclagem térmica *TC200*.

PARÂMETRO	VALOR
Temperatura Inicial	25°C
Temperatura Máxima	85°C
Temperatura Mínima	-40°C
Rampa de Temperatura	100°C/h, ou 1,667°C/min
Tempo de Assentamento Mínimo	10 min
Tempo Usual de Ciclo	170 min

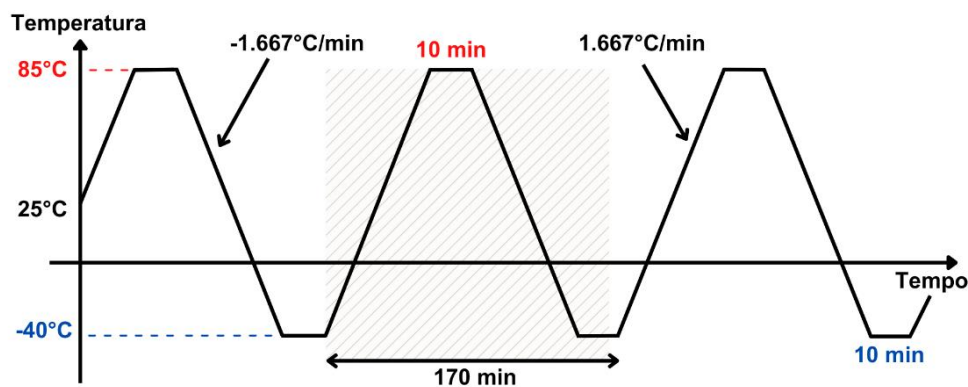


Figura 1 – Parâmetros do teste de ciclagem térmica TC200. Fonte: Adaptado de Jiang *et al.* (2019).

### 2.2 Fundamentos do teste

A realização de ciclagem térmica acelerada em módulos fotovoltaicos é dimensionada para ativar e acelerar os mecanismos de fadiga térmica que podem contribuir para a degradação e ocorrência de falha. Como o módulo fotovoltaico é um conjunto estratificado de diferentes materiais, a combinação entre os diferentes elementos torna complexa a distribuição e concentração de estresse devido às diferentes características de cada material. Ao operar em temperaturas acima de 45°C, os diferentes materiais como silício, prata, estanho, cobre e demais componentes são negativamente afetados com a disparidade entre seus comportamentos térmicos, principalmente devido aos diferentes coeficientes de expansão térmica, gerando tensões internas constantes nos materiais. Quando os materiais são submetidos a tensões constantes por um longo período do tempo, ocorre o acúmulo de energia de deformação por fluência. Com o acúmulo dessa energia, ocorrem deformações plásticas em função do tempo e a alta temperatura de operação, mesmo para valores de tensão abaixo do limite de escoamento dos materiais (Callister e Rethwisch, 2020).

A parte mais vulnerável à fadiga térmica em um módulo fotovoltaico, quando expostos a variações drásticas de temperatura, são as juntas de solda entre os fios – compostos por cobre revestidos de estanho e chumbo – e as células de silício cristalino. Isso acontece principalmente, pois as juntas de solda apresentam a união de múltiplos materiais metálicos com diferentes coeficientes de expansão térmica. Os danos causados nos pontos de solda levam a quedas significativas de potência devido ao aumento da resistência elétrica nos caminhos condutores de energia das células (Du, Wang e Tao, 2020; Jiang *et al.*, 2019; Nyarko *et al.*, 2019; Xia *et al.*, 2019).

A fadiga térmica de juntas de solda ocorre em razão do acúmulo de energia de deformação por fluência causada por mudanças frequentes de temperatura durante a vida útil do módulo, sendo associado ao *design* construtivo e aos materiais utilizados na solda (Bosco, Silverman e Kurtz, 2016; Wong *et al.*, 2016). Devido ao acúmulo de energia de deformação por fluência, módulos fotovoltaicos que operam em regiões quentes apresentam maior taxa de falha que módulos que estão operando em climas amenos e uniformes, sendo que 40% desses defeitos costumam ser nas interconexões de solda (Ogbomo *et al.*, 2018).

É demonstrado em Jiang *et al.* (2019) como o acúmulo de energia de deformação por fluência se comporta com o aumento de temperatura em um módulo fotovoltaico. Foi observado que o local que apresenta maior acúmulo de energia de deformação durante a ciclagem térmica foram as juntas de solda. A pesquisa apresentou a modelagem matemática da vida útil das junções de solda em função da temperatura do ambiente em que o módulo se encontra.

Foi apresentado em Ogbomo *et al.* (2018) que além dos materiais envolvidos na solda da interconexão elétrica das células, o comportamento constitutivo do encapsulante influencia significativamente o estresse e deformação das células fotovoltaicas de silício cristalino, sendo responsável pela variação não linear do espaçamento entre células, contribuindo para a falha de interconexão elétrica. É detalhado como o encapsulante e sua característica viscoelástica influencia as interconexões elétricas do módulo fotovoltaico, sendo um elemento impactado por ciclagens térmicas e operações em altas temperaturas. Foi apresentado também que a o intervalo de 43°C a 63°C se configura como a região crítica para a operação de módulos fotovoltaicos, induzindo o máximo de dano na solda das interconexões elétricas do módulo.

Em Xia *et al.* (2019) é demonstrado o detalhamento matemático do estresse térmico que cada elemento sofre no módulo fotovoltaico, juntamente com a análise microscópica dos materiais, explicando em detalhe como o comportamento de cada material leva a geração de falhas térmicas. O trabalho apresenta que as camadas de junção do *wafer* de silício cristalino com os *pads* de prata são os pontos críticos em que as falhas são geradas. O artigo ressalta que em virtude da estrutura do silício cristalino, ele gera e propaga trincas mesmo em tensões inferiores à sua resistência de tração devido a incapacidade de aliviar o estresse mecânico no material.

### 3. RESULTADOS DA CICLAGEM TÉRMICA EM MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

#### 3.1. Efeitos da Ciclagem Térmica em características construtivas de módulos fotovoltaicos

Nos módulos fotovoltaicos a fadiga térmica tem como efeito mais comum a quebra dos pontos de solda, conseqüentemente, perda de interconexões elétricas, levando ao aumento de resistência série e redução na potência do módulo. Outros defeitos comuns são trincas de células, ocorrência de *hot-spots*, danos nos *fingers* das células, trincas no backsheet, entre outros. Valores usuais de perda de potência após uma ciclagem térmica *TC200* costumam ser entre 2% e 3%. Estima-se que cada 3 ciclos térmicos acumulam dano equivalente a 20 dias sombreados ou 28 dias ensolarados (Bosco, Silverman e Kurtz, 2016; Kawai *et al.*, 2017; Roy, Kumar e Gupta, 2019; Weib, Klimm e Kaaya, 2022).

Em Roy, Kumar e Gupta, (2019) foi observado através de teste de eletroluminescência que, após o teste de ciclagem térmica *TC200*, ocorreu a aparição de rompimentos de *fingers*, assim como deterioração das falhas de *fingers* pré-existentes, o que justificou o aumento da Resistência série - *Rs* e redução de seu Fill Factor - *FF*, devido à redução de caminhos de condução viáveis na superfície da célula de silício. Além do rompimento de *fingers*, foi observado deterioração das trincas pré-existentes no Silício, entretanto, não foi observado surgimento de novas trincas, evidenciando que os *fingers* são mais sensíveis à ciclagem térmica do que as trincas. Foi apresentado uma modelagem matemática que relaciona a quantidade de ciclos térmicos com a aparição de danos nos *fingers*, de modo que as primeiras 100 ciclagens térmicas apresentaram maior impacto na aparição de defeitos, enquanto as ciclagens seguintes trouxeram menor ocorrência de aparição de novos *fingers* defeituosos.

Os modelos de módulos mais encontrados no mercado atualmente, construídos através de células fotovoltaicos de silício cristalino positivo, apresentam em sua parte frontal contatos elétricos de prata, enquanto a parte traseira apresenta contatos elétricos predominantemente de alumínio. Ao passar por ciclagens térmicas, foi verificado em Jiang *et al.*, 2019 que há maior dano nas interconexões elétricas da face frontal das células do que na parte posterior. Isso se deve, pois, a diferença entre os coeficientes de dilatação térmica dos materiais que constituem a interconexão elétrica da superfície frontal, composta de prata, é maior que a diferença entre os coeficientes de dilatação térmica dos materiais que constituem a interconexão elétrica da superfície traseira, formada por alumínio.

Apesar da prata trazer diversas vantagens na construção de módulos, como, melhor condutividade elétrica e menor oxidação, é verificado que em situações de amplo estresse térmico, esse material apresenta desempenho e durabilidade prejudicada. Conforme o mercado faz a transição para uma maior utilização de células fotovoltaicas que contém mais prata do que alumínio, evidencia-se a necessidade de um estudo mais amplo da utilização dessas células em climas quentes.

A pesquisa de Jiang *et al.* (2019) indicou que, quando submetidos a ciclagem térmica, há um acúmulo maior de energia de deformação por fluência nas bordas dos módulos fotovoltaicos em comparação ao centro, indicando que, em ambientes de alta temperatura, a possibilidade de ocorrência de danos nas bordas é maior do que nas outras localidades do módulo.

O trabalho de Ogbomo *et al.* (2018) apresenta a curva que estima a densidade de energia de deformação do módulo fotovoltaico para cada 1°C de aumento da temperatura da célula, no intervalo de 25°C à 115°C. Foram observadas 3 regiões de comportamentos distintos, onde a região de 43° à 63°C apresentou o maior crescimento de

densidade de energia de ruptura acumulada. A região acima de 63°C apresentou crescimento de densidade de energia reduzido, entretanto, se figura como região terciária de fluência, desenvolvendo cavidades e rupturas no material.

Também foi apresentado em Ogbomo *et al.* (2018) uma estimativa de vida útil do módulo fotovoltaico para diferentes temperaturas de ambiente. Aumentando a temperatura do ambiente de 25°C para 45°C houve uma redução em 50% da vida útil estimada do módulo fotovoltaico. Isso demonstra a importância de métodos especiais de análise para módulos fotovoltaicos operando em regiões extremamente quentes. A temperatura de operação STC de 25°C, considerada na IEC não representa de maneira adequada o funcionamento em regiões tropicais, em que a durabilidade do módulo é significativamente prejudicada. No trabalho é apresentado o modelo matemático que estima como cada variação de 1°C na condição de operação do módulo impacta a vida útil de suas interconexões elétricas.

Em Kawai *et al.* (2017), ao aplicar 3 ciclos térmicos TC200 em sequência, os módulos apresentaram um decaimento médio de potência menor que 5%. Efeitos secundários encontrados em somente algumas amostras foram o amarelamento de backsheet e trincas no backsheet, mas nenhum desses defeitos resultou em perda de potência extra – apesar de apresentar problemas de segurança. Foi observado também algumas falhas em diodos da caixa de junção, resultando em perdas de 1/3 da potência do módulo.

A pesquisa de Kawai *et al.* (2017) ressaltou que módulos com soldas frágeis – chamadas comumente de solda fria - identificadas no teste de eletroluminescência apresentaram redução de potência muito acima da média quando submetidos a mais de 400 ciclos. Foi observado também que falhas nas interconexões elétricas ocorrem em ciclagem térmica somente quando as soldas do módulo já apresentam indícios de fragilidade, ou defeituosa, antes do teste. Foi estimado que soldas de alta qualidade apresentam falha após 2500 ciclos térmicos. Isso demonstra como a qualidade do processo de solda durante a manufatura de módulos fotovoltaicos impacta na durabilidade do módulo a estresse térmicos.

O trabalho de Hanifi *et al.* (2020) utilizou a ciclagem térmica para analisar o deslocamento das células fotovoltaicas no interior do módulo, medindo a distância entre as células nos pontos de máxima e mínima temperatura, observando os pontos de dilatação e contração. Foi constatado que os módulos construídos utilizando a tecnologia *Half-cell* apresentaram menos deslocamento que módulos construídos com a tecnologia *full-cell*. Além disso, foi observado que diferenças no espaçamento entre células, tamanho de barramentos e tecnologia de encapsulantes entre modelos não influenciaram significativamente o deslocamento de células no interior do módulo.

Foi demonstrado em Xia *et al.* (2019) que as falhas em interconexões elétricas ocorrem principalmente devido a separação da interface entre o silício e prata, ressaltando que a superfície da célula que apresenta mais prata é mais danificada durante a ciclagem térmica, corroborando com os resultados apresentados em Jiang *et al.*, 2019. Foi demonstrado que, na presença de uma micro-trinca, durante o resfriamento, o silício não gera deslocamento o suficiente para aliviar o estresse gerado durante o aquecimento, sendo assim, as micro-trincas já existentes atuaram como zona de concentração de estresse e, devido a isso, ocorreu a expansão das micro-trincas. Foi observado que trincas V surgiram principalmente na interconexão entre o *pad* de solda e *fingers*, tendo sua causa atribuída a contração da camada de solda e seu contato com o *pad*.

Foi demonstrado também em Xia *et al.* (2019) que, inicialmente, o comportamento de deformação da prata permitiu relaxamento do estresse térmico, entretanto, as diversas deformações plásticas ocorridas em cada ciclo resultaram em aumento gradativo na dureza da prata. Com o aumento da dureza, ocorreu o aumento do acúmulo de estresse térmico. O crescimento dos compostos intermetálicos Ag<sub>3</sub>Sn e Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> formaram uma interface vulnerável no eletrodo de prata, sendo responsável pela formação de trincas.

Em Afridi *et al.* (2023) foi observado que um módulo que já apresenta defeitos, mesmo que leves, tem uma degradação maior após o processo de ciclagem térmica do que um módulo com 0 defeitos. O processo de ciclagem térmica por si só já cria defeitos novos, mas tem também como característica a intensificação e aumento dos defeitos já existentes.

Foi analisado em Hsiao *et al.* (2023) que o ponto de maior estresse durante uma ciclagem térmica ocorreu em -40°C, ressaltando como a tensão mecânica sobre o silício durante a contração é mais intensa que a dilatação. Também foi abordado que um dos motivos do cobre e o silício apresentarem diferença no comportamento inicial de dilatação ao iniciar o teste de ciclagem térmica acontece pois o cobre apresenta um acúmulo maior de tensões internas provenientes do processo de solda durante a manufatura do módulo do que o silício.

Foi demonstrado em Rabelo *et al.* (2021) que a camada traseira de módulos *Full-Cell* policristalino sofrem impacto mais cedo do que a camada de cima, demonstrando que a camada de alumínio sofre mais dano que a camada de prata, tendo uma redução de área de contato muito mais acelerada que a interface de prata. Essa conclusão difere dos resultados apresentados por Xia *et al.*, 2019 e Jiang *et al.*, 2019. Isso ocorreu devido a grande diferença nas células analisadas, pois enquanto Rabelo *et al.* (2021) analisou módulos de design *Full-Cell* policristalino monofacial, os trabalhos de Xia *et al.* (2019) e Jiang *et al.* (2019) analisaram módulos de células bifaciais monocristalinas, justificando a diferença dos resultados.

### 3.2. Efeitos da Ciclagem Térmica em parâmetros elétricos de módulos fotovoltaicos

A queda de potência esperada em um módulo que passa por ciclagem térmica é de 2 a 3% (Bosco, Silverman e Kurtz, 2016; Padi *et al.*, 2021; Weib, Klimm e Kaaya, 2022). Em Roy, Kumar e Gupta (2019) foi demonstrado que os danos causados pela ciclagem térmica na Tensão de Circuito Aberto - *Voc* são baixos, enquanto o impacto na Potência Máxima - *P<sub>máx</sub>*, Corrente de Curto-Circuito - *Isc* e principalmente Resistência Série - *Rs* são mais significativos. O

aumento significativo em  $R_s$  demonstra que os caminhos condutores de eletricidade foram fortemente prejudicados, enquanto o baixo dano em  $V_{oc}$  demonstrou que a ciclagem térmica não afeta a Resistência Shunt –  $R_{sh}$  significativamente. Sendo assim, foi identificado que, em relação aos parâmetros elétricos,  $R_s$  foi rotulado como o modo de degradação global do teste de ciclagem térmica. Em Kawai *et al.* (2017) foi observado um aumento de  $V_{oc}$  em algumas ciclagens térmicas, enquanto  $P_{máx}$ ,  $I_{sc}$  e  $FF$  tiveram redução.

Foi apresentado em Rabelo *et al.* (2021) que o decaimento de potência de um módulo fotovoltaico em relação a quantidade de ciclagem térmica é inicialmente linear e em seguida exponencial. Após, aproximadamente, 750 ciclos a queda de potência se tornam exponencial. Foi obtido uma perda de potência de 1% para os primeiros 250 ciclos, 2% ao alcançar 500 ciclos, 3% em 750 ciclos e 5% ao completar 1000 ciclos.

Em Du, Wang e Tao (2020) foi apresentado que o impacto de  $R_s$  foi maior na parte traseira da célula do que em sua parte frontal devido a maior qualidade construtiva e utilização de prata na face frontal da célula, invés de alumínio na parte traseira. É comumente associado que o aumento da resistência série  $R_s$  do módulo reflete diretamente em maior degradação do módulo fotovoltaico. Apesar dessa relação ser uma característica amplamente abordada de maneira teórica, ainda não se tem validações e quantizações experimental suficientes.

A Tab. 2 apresenta diversos resultados obtidos de como ciclagens térmicas afetam parâmetros elétricos de módulos fotovoltaicos. É apresentado a quantidade de ciclos realizadas e a diferença entre a medição dos parâmetros elétricos antes e depois da ciclagem. As ciclagens térmicas seguiram os parâmetros apresentados na Tab. 1, variando somente a quantidade de ciclos. É importante ressaltar que todos os resultados apresentados na Tab. 2 se referem a módulos construídos com células PERC, sendo sua maioria módulos construídos com a topologia *full-cell*.

Tabela 2 – Variação de parâmetros elétricos após teste de ciclagem térmica.

FONTE	CICLOS TÉRMICOS	VARIAÇÃO DE PARÂMETROS ELÉTRICOS
Afridi <i>et al.</i> (2023)	600 ciclos	$\Delta P_{máx}$ : -0,69% a -3,32% $\Delta I_{sc}$ : -0,002% a -0,55% $\Delta V_{oc}$ : -0,60% a -0,82% $\Delta FF$ : -0,13% a -1,96%
Du, Wang e Tao (2020)	200 ciclos	$\Delta P_{máx}$ : -3,7% $\Delta R_s$ : +12,6%
Schiller <i>et al.</i> (2019)	200 ciclos	$\Delta P_{máx}$ : -0,5% a -2,1% $\Delta I_{sc}$ : -0,25% a -0,5% $\Delta V_{oc}$ : -0,25% a -0,5% $\Delta FF$ : -0,25% a -1%
Padi <i>et al.</i> (2021)	200 ciclos	$\Delta P_{máx}$ : -2% a -3% $\Delta R_{sh}$ : -71% a -91%
Rabelo <i>et al.</i> (2021)	800 ciclos	$\Delta P_{máx}$ : -3%
Roy, Kumar e Gupta (2019)	200 ciclos	$\Delta P_{máx}$ : -3% a -31% $\Delta R_s$ : +7% a +91% $\Delta I_{sc}$ : -1% a -22% $\Delta V_{oc}$ : -1% a -5% $\Delta FF$ : -2% a -22%
Kawai <i>et al.</i> (2017)	600 ciclos	$\Delta P_{máx}$ : -0,8% a -15,62%. Média : -4,89% $\Delta I_{sc}$ : -0,11% a -1,90%. Média : -1% $\Delta V_{oc}$ : +0,24% a -11,89%. Média : -1,4% $\Delta FF$ : 0% a -12,87%. Média : -2,23%
Xia <i>et al.</i> (2019)	200 ciclos	$\Delta P_{máx}$ : -2,86% $\Delta I_{sc}$ : -1,94% $\Delta V_{oc}$ : -0,34% $\Delta FF$ : -0,6%

### 3.3. Efeitos de diferentes *designs* de módulos fotovoltaicos no desempenho em ciclagem térmica

Em Bosco, Silverman e Kurtz (2016) foi realizada a análise de fatores construtivos do módulo através de Ciclagem Térmica IEC 61215 associada à modelagem de elementos finitos. Foi avaliado como variações de design afetam a ocorrência de defeitos nos pontos de solda de módulos fotovoltaicos. A regressão linear avaliou a contribuição de diferentes parâmetros construtivos na ocorrência de danos de solda. Os resultados mostraram que os fatores construtivos que mais contribuem para a ocorrência de dano de solda durante a ciclagem térmica são, em ordem decrescente: Espessura de Solda, Espessura de Cobre e Espessura de Silício. Foi concluído que o aumento da camada de solda previne danos durante a ciclagem térmica, enquanto o aumento da espessura de cobre e de silício reflete em mais danos durante a ciclagem térmica. Caso a espessura de solda seja reduzida pela metade, o dano nos pontos de solda é dobrado. Uma redução de cobre de 150  $\mu\text{m}$  para 100  $\mu\text{m}$  reduz a intensidade dos defeitos na solda em 50%.

Devido ao maior acúmulo de Energia de Deformação Elástica nas bordas dos módulos do que no centro, a ciclagem térmica apontou que, para módulos que operam em ambientes quentes, acima dos padrões de *STC* e *NOTC*, é indicado uma maior robustez no design dos cantos. Como os danos tendem a ocorrer nas bordas, é essencial um design que garanta maior robustez nos cantos dos módulos para uma maior durabilidade em climas quentes (Bosco, Silverman e Kurtz, 2016).

Em Jiang *et al.* (2019) foi apresentado como a espessura da camada de solda leva a uma redução da Energia de Deformação Elástica no módulo. Ao aumentar a camada de solda, o acúmulo de Energia de Deformação Elástica por volume é reduzido, entretanto, foi ressaltado que conforme essa camada aumenta, a resistência térmica tende a decair ao alcançar valores altos, pois, uma camada de solda excessivamente espessa leva a uma intensificação do efeito Joule, resultando em deterioração das características físicas e mecânicas das juntas de solda. O artigo deixa claro que apesar de ser demonstrado que o aumento da espessura de camada de solda é positivo para a durabilidade térmica do módulo, isso não é válido para todos os valores, necessitando de uma análise mais profunda para camadas excessivamente espessas. É apresentado a ocorrência de maior acúmulo de Energia de Deformação Elástica nos contatos de solda frontais de células, devido aos barramentos elétricos de prata, do que na parte traseira, que contém barramentos elétricos de alumínio. Conforme os designs modernos priorizam a utilização de mais prata nos módulos, é essencial que as validações dos módulos modernos sobre estresse térmico sejam intensificadas.

A pesquisa de Xia *et al.* (2019) apresenta como aumentar a distância de célula-borda de um módulo fotovoltaico fortalece a durabilidade da estrutura de interconexão elétrica. É comentado como a equalização entre os CTE dos diferentes materiais pode reduzir a resistência do módulo ao envelhecimento térmico. Além disso, o trabalho investiga o processo de fabricação, avaliando como a redução do estresse mecânico nos fios e barramentos durante a laminação, resulta em maior a confiabilidade térmica do módulo fotovoltaico. Foi proposto que, para isso, pode ser tanto aumentado a distância célula-borda quanto utilizado um dispositivo que impede o excesso de pressão durante a laminação, de forma a reduzir a pressão nos barramentos e reduzir o vazamento de encapsulante pelos cantos do módulo durante o processo de laminação.

O design *Half-cell* divide a corrente que flui pelos barramentos pela metade, o que em teoria, reduz o aquecimento causado pelo efeito Joule em quatro vezes, quando comparado à um design *Full-Cell*. Os trabalhos de Afridi *et al.* (2023) e Akram *et al.* (2020) comprovam o impacto positivo desse design. Em Afridi *et al.* (2023) a análise é realizada através da associação entre TC estendido de 600 ciclos e Hot-Spot Test. O design *Half-cell* teve um decaimento de potência de 1,3% enquanto o *Full-Cell* teve de 8,3%. Além da redução da corrente elétrica nos barramentos, a menor degradação também é atribuída à maior quantidade de fios, fornecendo mais caminhos de escoamento de corrente da célula, que reflete em menor resistência elétrica interna. Além do efeito térmico citado, módulos *Full-Cell* apresentaram mais falhas de solda do que os módulos *Half-cell* quando submetidos ao teste de ciclagem térmica estendido.

Em Hsiao *et al.* (2023) e Hsiao *et al.* (2020) foi analisado como mudanças na topologia do fio de cobre utilizado na solda dos fios impactou o estresse mecânico causado nas células fotovoltaicas submetidas a ciclagem térmica. Foi também analisado como o estresse mecânico nos elementos da interconexão elétrica variam com mudanças topológicas da célula. Foi observado que células mais finas resultaram em aumento do estresse no silício durante a ciclagem térmica e células mais longas trouxeram incremento no estresse no fio de cobre, concluindo que células com menor espessura e tamanho reduzido resultam em menor estresse mecânico durante a ciclagem térmica, assim como as vantagens de menor resistência elétrica, redução de corrente e menor dissipação térmica. Foi demonstrado como fios de aspecto circular produzem mais estresse mecânico durante TC do que fios quadrados ou triangulares (Hsiao *et al.*, 2023). Foi observado também que quanto menor a seção transversal do fio de cobre, maior o estresse mecânico durante a ciclagem térmica, principalmente durante o ponto de menor temperatura. Os ensaios demonstraram que fios circulares não são ideais quando se analisa o estresse mecânico induzido durante TC. Os fios triangulares e retangulares apresentaram melhor desempenho nesse aspecto, apesar de não serem os fios usualmente encontrados no mercado.

As pesquisas de Hsiao *et al.* (2023) e Hsiao *et al.* (2020) testaram, através de simulação numérica e ciclagem térmicas, diversas estratégias de redução de estresse térmico induzido, sendo os melhores resultados provenientes do aumento da espessura de encapsulante, redução da diferença de coeficientes de dilatação térmica entre o cobre e silício através da utilização de ligas metálicas alternativas – como a liga de níquel-ferro - e mudanças topológicas nos *pads* de prata das células fotovoltaicas. Conforme a quantidade de barramentos por célula aumenta e a espessura dos fios é reduzida, análises cuidadosas considerando o estresse mecânico devem ser realizadas. Como o mercado está se movimentando para esse cenário de aumento de barramentos de células e redução de área de fio, ressalta-se a importância de estudos avançados de ciclagem térmica nas configurações construtivas atuais (Hsiao *et al.* 2023 e Hsiao *et al.*, 2020).

O trabalho de Lelievre *et al.* (2022) avaliou o comportamento de diferentes tecnologias de células, associadas com diferentes tipos de encapsulante, analisando predominantemente células de tecnologia n-HJT e n-PERT. Foi observado que os módulos *Full-Cell* HJT apresentaram uma degradação maior que módulos *Half-Cell* HJT. Foi verificado também que os módulos com backsheet transparente tiveram um desempenho inferior aos módulos bifaciais vidro-vidro. Foi observado que os encapsulantes com valor alto de *Cut Off Filter* tiveram desempenho superior aos encapsulantes com valor baixo de *Cut Off Filter*. Além disso foi constatado que os módulos com células n-PERT tiveram uma degradação menor do que os módulos HJT.

A Tab. 3 apresenta de maneira resumida como mudanças de design de módulos afetam o resultado de um módulo submetido a ciclagem térmica. É apresentado como o incremento de parâmetros construtivos de design impactam a robustez térmica de um módulo fotovoltaico.

Tabela 3 – Impacto de mudanças construtivas na durabilidade térmica do módulo fotovoltaico.

FONTE	MUDANÇA CONSTRUTIVA	IMPACTO
Afridi <i>et al.</i> (2023)	Utilização de células <i>Half-Cell</i> Construção bifacial (vidro-vidro)	Positivo
Bosco, Silverman e Kurtz (2016)	Aumento da camada de solda Redução da espessura de cobre Espessura da célula de silício	Positivo
Hanifi <i>et al.</i> (2020)	Utilização de células <i>Half-Cell</i> Redução do espaço entre células	Positivo
Hsiao <i>et al.</i> (2020)	Redução de espessura de células Aumento do tamanho de células Utilização de fios circulares	Negativo
Hsiao <i>et al.</i> (2023)	Aumento da espessura de encapsulante Redução de $\Delta$ CTE entre fio e silício	Positivo
Jiang <i>et al.</i> (2019)	Aumento da quantidade de prata na célula Redução da camada de solda	Negativo
Lelievre <i>et al.</i> (2022)	Uso de células <i>Full-Cell</i> Uso de backsheet transparente Encapsulante com alto valor de filtro UV	Negativo
Xia <i>et al.</i> (2019)	Redução de $\Delta$ CTE entre fio e silício Aumento da distância célula-borda Redução da pressão durante laminação	Positivo

#### 4. MODIFICAÇÕES DO TESTE DE CICLAGEM TÉRMICA

Em Hacke *et al.*, 2019, Owen-Bellini *et al.*, 2021, Rakotoniaina *et al.*, 2022 e Gok *et al.*, 2019 foi amplamente abordado a necessidade de testes avançados e de maior intensidade para a avaliação de módulos fotovoltaicos operando em regiões climáticas de temperatura elevada, principalmente em regiões tropicais, que também apresentam umidade elevada. Os artigos trouxeram as evidências de como o fluxo padrão da IEC 61215 não é o suficiente para análises profundas e precisas na durabilidade de módulos, mas sem trazer muita ênfase no teste específico de ciclagem térmica.

Essa sessão apresenta propostas de testes de ciclagem térmica diferentes do apresentado na IEC 61215. São abordados testes acelerados, testes estendidos e testes personalizados para regiões em específicos.

##### 4.1. Ciclagem Térmica Acelerada

O teste de ciclagem térmica *TC200* da IEC 61215 requer de 30 a 50 dias para sua execução. Visando um processo de teste mais rápido, que realiza degradações térmicas aceleradas similares ao *TC200*, foi proposto em Schiller *et al.* (2019) um processo de ciclagem térmica acelerada, chamada de *aTC*. Foi demonstrado que o teste proposto alcança resultados similares ao *TC200* em somente 9 dias de operação, reduzindo consideravelmente o tempo e custo de ensaio. A Tab. 4 apresenta os parâmetros de teste do *aTC*.

Tabela 4 – Principais parâmetros do teste de ciclagem térmica *aTC*. Fonte: Schiller *et al.* (2019).

PARÂMETRO	VALOR
Temperatura Inicial	25°C
Temperatura Máxima	94°C
Temperatura Mínima	-54°C
Rampa de Temperatura Máxima	480°C/h
Tempo de Assentamento Mínimo	19.5min para -54°C e 10.5 min para 94°C
Tempo Usual de Ciclo	67 min

Em Ruirui *et al.* (2019) também é utilizado ciclos térmicos altamente acelerados, apresentando mudanças de temperaturas mais intensas. Entretanto, o foco do trabalho foi acelerar o processo de teste, e não aumentar a intensidade da degradação. Foi realizado uma equivalência entre o *TC200* com o método acelerado proposto, reduzindo a duração de teste, mas chegando nos mesmos resultados.

##### 4.2. Ciclagem Térmica Estendida – *TC600*

A ciclagem de 200 ciclos proposta na IEC 61215 padrão considera uma vida útil de 25 anos em climas temperados. Novos protocolos como CSA/ANSI C450-18 e IEC TS 63209 já estão padronizando fluxos estendidos de 600 ciclos. A ciclagem térmica mantém os parâmetros, entretanto realiza o triplo de ciclagens térmicas. Essas novas

normativas surgiram devido às constantes evidências de necessidade de aprofundamento na análise da vida útil das soldas em condições reais de operação (Rabelo *et al.*, 2021), principalmente em climas tropicais e severos como o brasileiro.

Foi demonstrado em Rabelo *et al.* (2021) que após 600 ciclagem térmicas, um módulo de boa qualidade apresenta queda de aproximadamente 2% em sua potência máxima. Isso foi obtido através de modelagem matemática e, em seguida, comprovado com múltiplos ensaios experimentais, tendo divergência máxima de 4,3% entre os resultados das simulações e práticos. Isso demonstra que uma ciclagem térmica estendida com 600 ciclos não é severa demais para a análise de módulos, reforçando como a ciclagem de 200 ciclos é insuficiente para a validação.

Em Kawai *et al.* (2017) foi apresentado a diferença entre realizar a ciclagem térmica estendida, composta por 600 ciclos, em relação a ciclagem térmica comum, de 200 ciclos. Em 200 ciclos, os módulos apresentaram resultados semelhantes, entretanto, após 500 ciclos os módulos começaram a exibir resultados muito diferentes entre si, com o aparecimento de defeitos novos. Foi identificado que entre a faixa de 400 a 600 ciclagens térmicas houve um aumento expressivo de células comprometidas. Falhas como solda fria ocorrem somente com ciclagem térmica estendida de 600 ciclos, não se manifestando na ciclagem térmica TC200. Foi estimado que a ciclagem térmica de 500 ciclos representa aproximadamente 20 anos de funcionamento do módulo fotovoltaico, sendo assim, para módulos que operam em temperaturas elevadas, é mais adequado a validação com ciclagem térmica estendida do que a ciclagem térmica TC200.

Além de realizar a ciclagem padrão TC200, foi utilizado em Lelievre *et al.* (2022) uma ciclagem térmica adicional de 50 ciclos com temperatura de  $-60^{\circ}\text{C}$  a  $105^{\circ}\text{C}$ . Foi comprovado que com a adição de uma ciclagem térmica extra, de maior intensidade, o comportamento dos módulos fotovoltaicos expostos ao exterior foi melhor representado, produzindo uma severidade de danos nas interconexões mais próximas a de módulos que estavam operando em campo.

### 4.3. Ensaios personalizados de ciclagem térmica

Em Spinella e Bosco (2021) é abordado como o teste padrão de ciclagem térmica não é adequado para a análise de soldas de baixa temperatura, comumente utilizadas em tecnologias como filmes finos, HJT e BIPV. Na pesquisa foram utilizados 3 perfis de ciclagem térmica para a análise de módulos com diferentes características construtivas de solda. Foram analisadas soldas de 4 tipos: SnPb que é o tipo padrão de solda, e também soldas de baixa temperatura que utilizam InSn, SnBi e SnBiAg. Utilizando 3 perfis diferentes de ciclagem térmica foi possível analisar, para cada tipo de solda, o impacto isolado da frequência de ciclagem térmica e o impacto do gradiente de temperatura  $\Delta T$  na durabilidade do módulo.

Para a solda padrão de alta temperatura SnPb a degradação é mais impactada pelo gradiente de temperatura da ciclagem térmica do que pela frequência de oscilação. Entretanto, para soldas de baixa temperatura, o aumento de frequência de ciclagem e da temperatura  $\Delta T$  retardou a degradação. Para soldas de baixa temperatura - principalmente as que utilizam ligas de SnBi e SnBiAg - são observados mais danos em ciclagens de baixa frequência e baixo gradiente de temperatura, indicando que essas tecnologias construtivas apresentam menor durabilidade nas condições reais de operação, que envolvem transições térmicas mais graduais. O trabalho abordou que os testes da IEC são válidos para os métodos mais usuais de construção de módulos fotovoltaicos, no entanto, para tecnologias construtivas diferenciadas, como por exemplo, soldas de baixa temperatura, necessita-se de modificações no fluxo de teste (Spinella e Bosco, 2021).

Em Weib, Klimm e Kaaya (2022) é abordado a importância da criação de fluxos personalizados para regiões específicas e é levantado que isso ainda não foi adequadamente explorado pela comunidade científica. É ressaltado como o teste IEC aborda a operação suave e testes personalizados de maior intensidade são necessários para explorar mais profundamente o tópico.

Em Lelievre *et al.* (2022) é elaborado uma proposta de teste de degradação acelerada para representar melhor o funcionamento de um módulo fotovoltaico no deserto do Atacama, ambiente que apresenta condições áridas diferentes das condições simuladas pela IEC. Através de comparação entre módulos que passaram pelo fluxo de degradação térmica da IEC e módulos que passaram períodos longos operando no deserto do Atacama, ficou clara a necessidade de elaboração de um fluxo diferenciado. Para essa pesquisa foi realizado a adição de uma ciclagem térmica agressiva, variando entre  $-40^{\circ}\text{C}$  a  $100^{\circ}\text{C}$  após a ciclagem térmica padrão TC200. O trabalho testa diferentes B.O.M. (*Bills Of Materials*) visando encontrar a B.O.M. com melhor operação no ambiente árido do Atacama.

O trabalho de Nyarko *et al.* (2019) se configura como uma das principais referências atuais para a elaboração de testes personalizados para uma região climática específica. A pesquisa criou uma ciclagem térmica personalizada para a análise de uma região específica. Baseando-se no perfil e histórico climático da região do deserto do Saara em análise foi criado um perfil de ciclagem térmica que modificou tanto o gradiente de temperatura como a frequência de ciclagem. Todas as mudanças foram implementadas para modificar o teste de uma análise genérica para uma análise climática específica e de maior profundidade para a região alvo. Com a modificação apresentada foi possível observar danos muito mais significativos nos módulos fotovoltaicos do que na ciclagem térmica tradicional das IECs. Os parâmetros do teste personalizado proposto são apresentados na Tab. 5.

Ao comparar a Tab. 1 com a Tab. 5 observa-se que a rampa de temperatura, temperatura máxima e mínima foram fortemente reduzidos em Nyarko *et al.* (2019) enquanto o tempo de assentamento e tempo de ciclo foi extremamente estendido.



Tabela 5 – Principais parâmetros do teste de ciclagem térmica personalizado para a região do deserto do Saara. Fonte: Nyarko *et al.* (2019)

PARÂMETRO	VALOR
Temperatura Inicial	25°C
Temperatura Máxima	58,9°C
Temperatura Mínima	23,7°C
Rampa de Temperatura Máxima	8,996 °C/h
Tempo de Assentamento Mínimo	369min para 23,7°C e 228min para 58,9°C
Tempo Usual de Ciclo	1440min

## 5. CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou uma revisão bibliográfica profunda sobre o teste de ciclagem térmica de módulos fotovoltaicos. Foram apresentados os fundamentos do teste de ciclagem térmica utilizado nos fluxos de análise e homologação internacional, apresentando como o teste funciona e os defeitos construtivos e de performance que são esperados em módulos fotovoltaicos submetidos ao ciclo de teste. Com a revisão apresentada é possível identificar e prever o desempenho de módulos fotovoltaicos que serão submetidos ao ensaio, entendendo como identificar com maior facilidade módulos que desviam do comportamento previsto. Foi realizada a investigação de parâmetros construtivos e seus impactos na durabilidade térmica do módulo. É possível estimar como o reflexo das mudanças construtivas dos módulos em relação a durabilidade térmica, fornecendo orientação para o dimensionamento e seleção de módulos fotovoltaicos adequados para o funcionamento no Brasil. Foram também apresentados trabalhos que propuseram modificações ao teste de ciclagem térmica, ressaltando como o teste padrão não é o suficiente para a análise de módulos fotovoltaicos operando em regiões climáticas extremas. Foram identificadas áreas de pesquisa que apresentam oportunidades de expansão, como por exemplo: estudo aprofundado de ciclagem térmica em módulos fotovoltaicos de novas tecnologias de células – TOPCon, HJT e IBC, dimensionamento de um fluxo de testes específico para o clima brasileiro e otimização construtiva de um módulo para o clima do Brasil e suas variações climáticas.

### Agradecimentos

Agradecimentos a Sengi Solar pelo suporte, financiamento e incentivo a este trabalho. Agradecimento a equipe de Pesquisa e Desenvolvimento pelo suporte na elaboração do trabalho. Agradecimentos ao programa PADIS pelo incentivo e fomento ao P&D nacional.

### REFERÊNCIAS

- Afridi, M. *et al.*, 2023. Hotspot testing of glass/backsheet and glass/glass PV modules pre-stressed in extended thermal cycling. *Solar Energy*, v. 249, p. 467-475.
- Akram, M. W. *et al.*, 2020. Study of manufacturing and hotspot formation in cut cell and full cell PV modules. *Solar Energy*, v. 203, p. 247-259.
- Bosco, N.; Silverman, T. J.; Kurtz, S., 2016. The influence of PV module materials and design on solder joint thermal fatigue durability. *IEEE Journal of Photovoltaics*, v. 6, n. 6, p. 1407-1412.
- Callister Jr., William D.; Rethwisch, D. G. 2020. Callister's materials science and engineering. John Wiley & Sons.
- De Brito, E. S. M.; Teixeira, T.; De Souza, F. P., 2023. As potencialidades e os limites da energia solar fotovoltaica no Brasil. *CONTRIBUCIONES A LAS CIENCIAS SOCIALES*, v. 16, n. 9, p. 15663-15680.
- Du, Y.; Wang, L.; Tao, W., 2020. Modeling, imaging and resistance analysis for crystalline silicon photovoltaic modules failure on thermal cycle test. *Engineering Failure Analysis*, v. 118, p. 104818.
- Wong, E. H. *et al.*, 2016. Creep fatigue models of solder joints: A critical review. *Microelectron. Rel.*, vol. 59, pp. 1–12.
- Gok, A. *et al.*, 2019. Degradation science and pathways in PV systems. In: *Durability and reliability of polymers and other materials in photovoltaic modules*. William Andrew Publishing. p. 47-93.
- Hacke, P. *et al.*, 2019. Combined and sequential accelerated stress testing for derisking photovoltaic modules. In: *Advanced Micro-and Nanomaterials for Photovoltaics*. Elsevier. p. 279-313.
- Hanifi, H. *et al.*, 2020. Loss analysis and optimization of PV module components and design to achieve higher energy yield and longer service life in desert regions. *Applied energy*, v. 280, p. 116028.
- Hsiao, P. C. *et al.*, 2020. Balanced contact method: Reduction of thermomechanical stress in silicon solar cells induced by interconnection. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, v. 215, p. 110667.
- Hsiao, P. C. *et al.*, 2023. Strategies for minimizing induced thermomechanical stress in glass-glass PV modules with half cells identified using finite element modelling. *Solar Energy*, v. 255, p. 60-70.
- ITRPV. International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV): 2022 Results. 2023.
- Jiang, N. *et al.*, 2019. Thermomechanical reliability assessment of solder joints in a photovoltaic module operated in a hot climate. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, v. 10, p. 160-167.

- Lelièvre, J. F. *et al.*, 2022. Desert label development for improved reliability and durability of photovoltaic modules in harsh desert conditions. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, v. 236, p. 111508.
- Ruirui L. V., *et al.*, 2019. Highly accelerated thermal cycling test for new type of crystalline silicon photovoltaic modules. In: 2019 IEEE 46th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC). IEEE. p. 1991-1994.
- Nyarko, F. K. A. *et al.*, 2019. Generating temperature cycle profile from in-situ climatic condition for accurate prediction of thermo-mechanical degradation of c-Si photovoltaic module. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, v. 22, n. 2, p. 502-514.
- Ogbomo, O. O. *et al.*, 2018. Effect of operating temperature on degradation of solder joints in crystalline silicon photovoltaic modules for improved reliability in hot climates. *Solar Energy*, v. 170, p. 682-693.
- Owen-Bellini, M. *et al.*, 2021. Advancing reliability assessments of photovoltaic modules and materials using combined-accelerated stress testing. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, v. 29, n. 1, p. 64-82.
- Padi, S. P. *et al.*, 2021. A Brief Review on Variables and Test Priorities of Photovoltaic Module Life Expectancy. *Current Photovoltaic Research*, v. 9, n. 2, p. 36-44.
- Rabelo, M. *et al.*, 2021. Analysis of solder joint degradation and output power drop in silicon photovoltaic modules for reliability improvement. *Microelectronics Reliability*, v. 127, p. 114399.
- Rakotoniaina, J. P. *et al.*, 2022. Harsh sequential stress tests for improved PV durability. In: 2022 IEEE 49th Photovoltaics Specialists Conference (PVSC). IEEE, p. 0169-0171.
- Roy, S.; Kumar, S.; Gupta, R., 2019. Investigation and analysis of finger breakages in commercial crystalline silicon photovoltaic modules under standard thermal cycling test. *Engineering Failure Analysis*, v. 101, p. 309-319.
- Kawai, S., *et al.*, 2017 Causes of Degradation Identified by the Extended Thermal Cycling Test on Commercially Available Crystalline Silicon Photovoltaic Modules. *IEEE J. Photovoltaics*, vol. 7, no. 6, pp. 1511-1518.
- Schiller, C. H. *et al.*, 2019. Accelerated TC test in comparison with standard TC test for PV modules with ribbon, wire and shingle interconnection. *Proceedings of the 36th EUPVSEC*, p. 995-999.
- Spinella, L.; Bosco, N., 2021. Thermomechanical fatigue resistance of low temperature solder for multiwire interconnects in photovoltaic modules. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, v. 225, p. 111054.
- Vargas, P. P. *et al.* *Energia Solar Fotovoltaica: Análise de sua expansão no Brasil*. 2023.
- Weiß, K.-A.; Klimm, E.; Kaaya, I., 2022. Accelerated aging tests vs field performance of PV modules. *Progress in Energy*, v. 4, n. 4, p. 042009.
- Xia, L. *et al.*, 2019. Unveiling the failure mechanism of electrical interconnection in thermal-aged PV modules. *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, v. 20, n. 1, p. 24-32.

## THERMAL CYCLE TEST APPLIED ON PHOTOVOLTAIC MODULES – A REVIEW

**Abstract.** *Due to the long operational lifecycle and time of photovoltaic modules, long-term performance analysis becomes essential. Thermal cycling testing is used in several testing and validation workflows to assess the thermomechanical behavior of photovoltaic modules. Despite its usage, there are various indications regarding the need for a deeper understanding of module performance under adverse weather conditions. Having this in mind, this article presents a literature review to provide a better understanding of thermal cycling testing, the impacts on photovoltaic modules subjected to the test, how to use the test in the constructive optimization of photovoltaic modules for greater thermal durability, and the necessity of more intense and in-depth testing and analysis workflows.*

**Keywords:** *Photovoltaic Module, Thermal Degradation, Thermal Cycle.*