



HARISON FRANCA DOS SANTOS

**Efeito do estresse mecânico em um módulo fotovoltaico monofacial com células de
silício monocristalino**

HARISON FRANCA DOS SANTOS

Efeito do estresse mecânico em um módulo fotovoltaico monofacial com células de silício monocristalino

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenadoria de Curso de Engenharia de Energia do Câmpus Experimental de Rosana, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia de Energia.

Orientador: Renivaldo José dos Santos

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, por me dar forças para finalizar o curso de Engenharia de Energia na UNESP e por estar sempre presente em minha vida. Em seguida, agradeço a toda minha família, pois ela foi o elemento principal para que eu pudesse executar toda a graduação e este trabalho de maneira exclusiva. Em especial, faço menção à minha mãe, Adriana Franca, ao meu irmão, Kaique Franca, ao meu padrasto, Jucelio Souza e ao meu avô, José Osmar. Adiante, quero agradecer a minha companheira, Isabela Rodrigues Magalhães pelo apoio durante toda a jornada e também pelas palavras de motivação para que eu continuasse firme no caminho em busca do objetivo. Além disso, faço menção aos amigos e colegas que viveram no mesmo lar e que sofreram junto durante os períodos de provas e madrugadas de estudo, em especial, faço menção ao Luís Gonçalves.

Agradeço também ao Prof. Dr. Renivaldo José dos Santos não só por ter encarado o desafio de me orientar na jornada do trabalho de conclusão de curso, mas também por todos os ensinamentos durante a graduação e as oportunidades de execução de projetos de iniciação científica. Não menos especial, quero agradecer também a todos colaboradores da UNESP do Campus de Rosana, pois eles atuaram diretamente para que o campus oferecesse toda a infraestrutura adequada para realização das atividades durante a graduação.

“O trabalho dignifica o homem.”

Benjamin Franklin

S237e

Santos, Harison Franca dos

Efeito do estresse mecânico em um módulo fotovoltaico monofacial com células de silício monocristalino / Harison Franca dos Santos. -- Rosana, 2021

40 p. : il., tabs., fotos

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia de Energia) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Câmpus Experimental de Rosana, Rosana

Orientador: Renivaldo José dos Santos

1. Células solares. 2. Sistemas de energia fotovoltaica. 3. Energia Solar. 4. Energia Fontes alternativas. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Câmpus Experimental de Rosana. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

RESUMO

A energia solar fotovoltaica tem se destacado a cada dia como uma das principais fontes de energia renovável. Sua principal vantagem está associada à disponibilidade isonômica do recurso fundamental para produção de energia elétrica através dos módulos fotovoltaicos. Nesse contexto, conhecer e compreender os diversos fenômenos associados a essa conversão é etapa fundamental para o desenvolvimento dessa tecnologia. Sendo assim, este trabalho baseou-se no estudo do efeito do estresse mecânico em um módulo fotovoltaico monofacial com células de silício monocristalino. Inicialmente, o módulo foi caracterizado através de diversos ensaios que incluíram: potência máxima de pico, isolamento elétrico, eletroluminescência. Em seguida, o equipamento foi submetido ao ensaio de carga mecânica estática de acordo com a MQT 16 da IEC 61215:2016 e posteriormente caracterizado novamente com os mesmos ensaios iniciais. Durante o teste mecânico não houve indícios de abertura dos circuitos – indicando qualidade das interconexões entre células e barramentos. Além disso, os resultados mostraram que o módulo fotovoltaico M7K, após o estresse mecânico, apresentou redução da potência máxima (3,6%) - resultado do aparecimento de trincas longitudinais e transversais, bem como a quebra de seis células. Outro impacto significativo refere-se ao aumento da resistência série e também da resistência *shunt*.

PALAVRAS-CHAVE: Energia Renovável; Módulo fotovoltaico; Quebra de Células Fotovoltaicas.

ABSTRACT

Photovoltaic solar energy has been highlighted every day as one of the main sources of renewable energy. Its main advantage is associated with the isonomic availability of the fundamental resource for the production of electricity through photovoltaic modules, sunlight. In this context, knowing and understanding the various phenomena associated with this conversion is a fundamental step for the development of this technology. Therefore, this work was based on the study of the effect of mechanical stress on a monofacial photovoltaic module with monocrystalline silicon cells. Initially, the module was characterized through several tests that included: maximum peak power, electrical isolation, electroluminescence. Then, the equipment was subjected to static mechanical load testing according to MQT 16 of IEC 61215:2016 and later characterized again with the same initial tests. During the mechanical test there was no evidence of circuit opening – indicating the quality of the interconnections between cells and buses. Furthermore, the results showed that the M7K photovoltaic module, after mechanical stress, showed a reduction in maximum power (3.6%) - a result of the appearance of longitudinal and transversal cracks, as well as the breakage of six cells. Another significant impact refers to the increase in series resistance and also in shunt resistance.

KEYWORDS: Renewable energy; Photovoltaic Module; Breaking Photovoltaic Cells.

Sumário

1. INTRODUÇÃO.....	11
1.1. ENERGIA SOLAR.....	11
1.2. ENERGIA FOTOVOLTAICA E OS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS.....	11
1.2.1. CÉLULAS FOTOVOLTAICAS E O EFEITO FOTOVOLTAICO.....	12
1.2.2. CADEIA DE FABRICAÇÃO.....	15
1.2.2.1. LINGOTE	16
1.2.2.2. <i>WAFERS</i>	16
1.2.2.3. CÉLULAS	16
1.2.2.4. MÓDULOS CONVECIONAIS.....	17
2. OBJETIVOS.....	18
2.1. OBJETIVOS GERAIS.....	18
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
3. METODOLOGIA.....	19
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	26
5. CONCLUSÃO.....	38
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	39

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Estrutura convencional de um módulo fotovoltaico.	12
Figura 2: Representação do funcionamento de uma célula fotovoltaica.	13
Figura 3: Camadas de um material semicondutor.	14
Figura 4: Exemplo de composição de uma célula fotovoltaica.	15
Figura 5: Strings de células.	17
Figura 6: Etiquetas de identificação do módulo fotovoltaico.....	19
Figura 7: Estabilização do módulo fotovoltaico.....	22
Figura 8: Perfil de fixação do módulo para realização do ensaio de carga mecânica. ...	23
Figura 9: Detalhe do distanciamento equidistante dos grampos de fixação.....	24
Figura 10: Detalhes do grampo utilizado na fixação no módulo.....	24
Figura 11: Módulo durante a inspeção visual.....	26
Figura 12: Eletroluminescência inicial para o módulo.....	27
Figura 13: Curva característica IV em STC.	28
Figura 14: Deformação do módulo para compressão de 5400 Pa.	30
Figura 15: Deformação do módulo para tração 2400 Pa.	31
Figura 16: Parâmetros elétricos e de deformação do módulo durante o ensaio.	32
Figura 17: Eletroluminescência do módulo após o ensaio MQT 16.	34
Figura 18: Curva característica IV após ensaio MQT 16.	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Características do módulo disponibilizadas pelo fabricante no datasheet.....	21
Tabela 2: Resultados da caracterização inicial dos ensaios MQT 03 e MQT 15.	26
Tabela 3: Resultados da curva característica IV.....	29
Tabela 4: Resultados da caracterização inicial dos ensaios MQT 03 e MQT 15.	33
Tabela 5: Comparação dos resultados obtidos através da curva IV.	35

1. INTRODUÇÃO

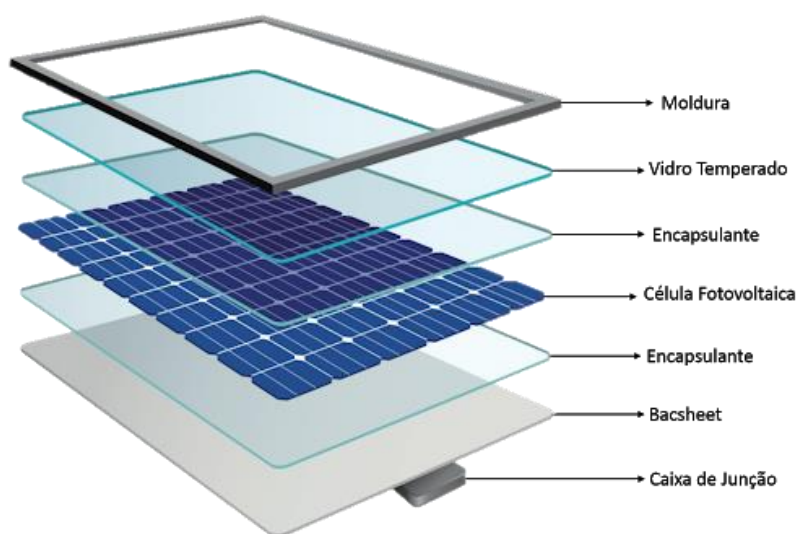
1.1. ENERGIA SOLAR

Define-se a energia solar como sendo a energia oriunda do sol que chega ao planeta através dos raios solares e que pode ser utilizada diretamente para o aquecimento do ambiente, aquecimento de água ou geração de eletricidade (PACHECO, 2006). No geral, a radiação solar além de poder ser convertida diretamente em energia elétrica através do efeito fotoelétrico e fotovoltaico, pode ser também utilizada diretamente como fonte de energia térmica, para aquecimento de fluidos para geração de potência mecânica ou elétrica.

1.2. ENERGIA FOTOVOLTAICA E OS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

A energia fotovoltaica é a energia gerada a partir da radiação eletromagnética proveniente do sol convertida em energia elétrica através dos chamados módulos fotovoltaicos (SILVA; CARMO, 2017). Esses equipamentos são construídos através da junção de diversos elementos, são eles: moldura de alumínio, responsável pela resistência mecânica à montagem; vidro, responsável por permitir a passagem de luz e proteção das células; encapsulante, responsável pela proteção das células e união do conjunto vidro-célula-*backsheet*; célula fotovoltaica, responsável por converter a luz solar em energia elétrica; *backsheet*, responsável pelo isolamento dos contatos elétricos e proteção das células; caixa de junção, responsável por levar os terminais elétricos do interior para o lado externo do módulo, além de abrigar os diodos de proteção (RAMOS, 2006). A Figura 1 apresenta a estrutura típica de um desses módulos.

Figura 1: Estrutura convencional de um módulo fotovoltaico.



Fonte: (RAMOS, 2006).

1.2.1. CÉLULAS FOTOVOLTAICAS E O EFEITO FOTOVOLTAICO

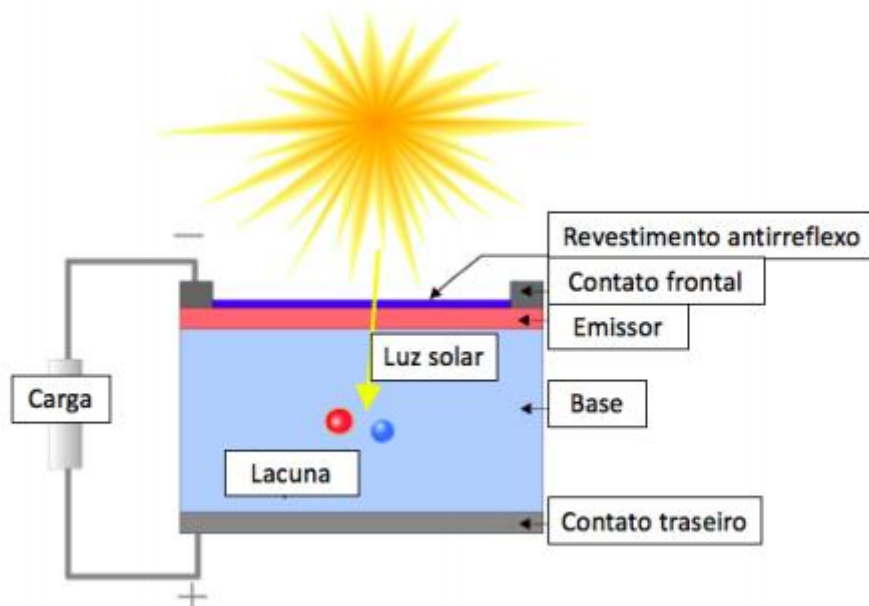
O principal elemento de um módulo são as células fotovoltaicas. Elas, na forma mais difundida hoje – utilizando silício, surgiram inicialmente em 1954 através do químico americano, Calvin Fuller (VALÊRRRA, ANTÔNIO; BRITO, 2006). Em virtude dos diversos aspectos positivos, principalmente pela potência por densidade mássica, essas células foram rapidamente difundidas no setor aeroespacial através do programa espacial norte-americano, e com o passar dos anos e melhorias na tecnologia, hoje são amplamente utilizadas em aplicações terrestres (NASCIMENTO, 2010).

Em suma, as células solares são responsáveis pela conversão direta de energia solar para energia elétrica através do efeito que foi inicialmente descrito por Edmond Becquerel, em 1839 – chamado de efeito fotovoltaico. Becquerel observou o fenômeno durante um experimento onde houve o surgimento de uma diferença de potencial (ddp) nas partes extremas de uma estrutura (eletrodos) elaborada de material semicondutor - produzida pela absorção da luz no momento da interação da radiação solar com o material semicondutor (SILVA; CARMO, 2017). Ainda sobre o experimento de Becquerel, lá havia placas metálicas de platina e de prata, as quais foram mergulhadas em eletrólito e expostas a luz, produzindo a ddp.

As células são constituídas por um material semicondutor – geralmente o silício – ao qual são adicionadas substâncias *dopantes* que criam condições adequadas para

ocorrência do efeito fotovoltaico, assim, a célula ao ser atingida pelos raios de luz (fótons) converte a potência associada à radiação luminosa em potência elétrica na forma de corrente contínua (CC) (NASCIMENTO, 2010). A Figura 2 exemplifica o funcionamento de uma célula.

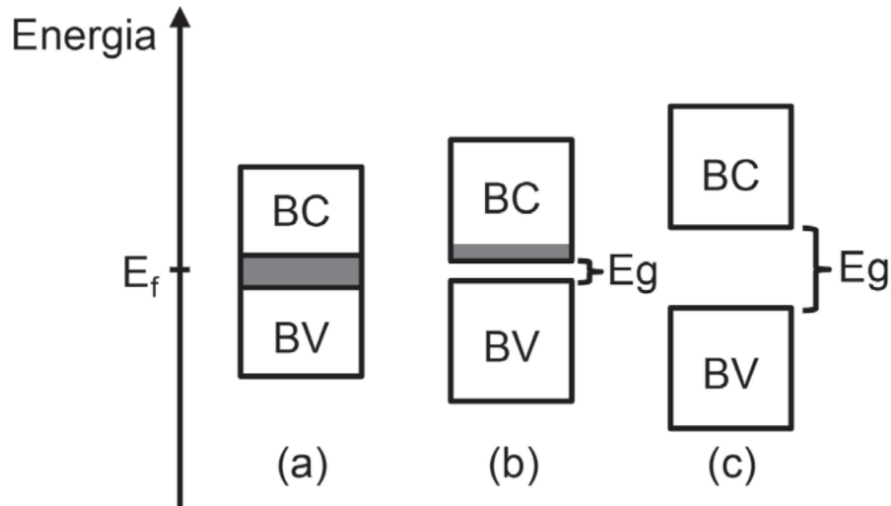
Figura 2: Representação do funcionamento de uma célula fotovoltaica.



Fonte: Matos (2020).

O funcionamento das células fotovoltaicas ocorre essencialmente devido à presença de materiais semicondutores. Qualquer material semicondutor apresenta três faixas energéticas: uma faixa de energia onde ocorre a presença de elétrons (faixa de valência), outra que permanece livre de elétrons (faixa de condução) e uma faixa intermediária, chamada de faixa proibida (hiato energético) ou *band-gap* (GRAY, 2011; BACCARO; GUTZ, 2017). Quando o material semicondutor fica em contato com a radiação solar, os fótons oriundos da luz se espalham pelo material, de modo que aqueles que apresentarem energia superior ao *band-gap* podem excitar elétrons da faixa de valência para a faixa de condução (NASCIMENTO, 2010). A Figura 3.b apresenta as camadas energéticas de um material semicondutor.

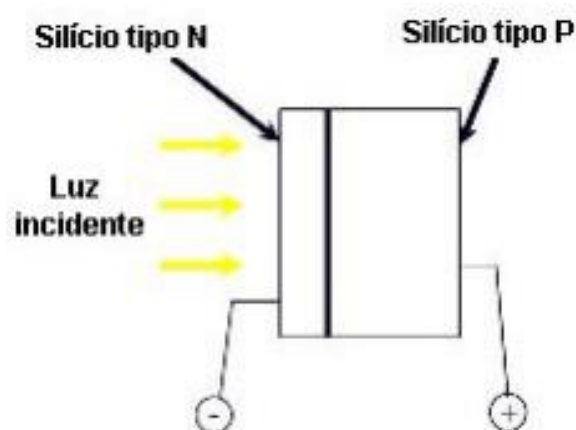
Figura 3: Camadas de um material semiconductor.



Fonte: Baccaro (2017).

No geral, a conversão “silício até a célula” envolve processos complexos, porém pode-se resumir as etapas da seguinte maneira: na natureza, geralmente o silício se apresenta como areia, logo é essencial realizar a purificação do mesmo através de métodos adequados. Realizada a purificação, o então produto “cristal de silício puro” obtido não possui elétrons livres, ou seja, é um mau condutor de eletricidade. Assim, torna-se essencial realizar a “mistura” de outros elementos em um processo denominado de dopagem. Geralmente, utiliza-se fosforo na dopagem do silício para se obter um material com elétrons livres ou materiais com portadores de carga negativa (silício tipo N) (DELANNOY, 2012). O mesmo processo é realizado com Boro para se obter um material com cargas positivas livres (silício tipo P). As células essencialmente são compostas por duas camadas: a do tipo P – geralmente mais espessa, e do tipo N (NASCIMENTO, 2010). A Figura 4 apresenta um exemplo de composição célula fotovoltaica.

Figura 4: Exemplo de composição de uma célula fotovoltaica.



Fonte: Nascimento (2004).

As camadas juntas, assim como representado na Figura 4, formam um campo elétrico, haja vista que os elétrons livres da camada tipo N ocupam os espaços vazios (lacunas) da camada tipo P, porém; separadamente, ambas são eletricamente neutras (GRAY, 2011). Denomina-se o campo elétrico – que atua sobre os elétrons livres e sobre as lacunas com força de oposição à corrente de difusão gerando uma região desprovida de cargas livres como camada de depleção. Assim, a luz incidida na célula faz com que os fótons se choquem com os demais elétrons da estrutura do silício - fornecendo-lhes energia para que esses se transformem em condutores (NASCIMENTO, 2010).

O aproveitamento da eletricidade ocorre através da conexão entre a camada positiva e negativa, assim, gera-se o fluxo de elétrons – que acontece da camada P para a N, comumente chamado de corrente elétrica (NASCIMENTO, 2010). Logo, enquanto a luz incidir na célula haverá fluxo de corrente elétrica que pode ser aproveitado.

1.2.2. CADEIA DE FABRICAÇÃO

Os passos para a produção de um módulo envolvem diversas etapas complexas. O caso dos módulos que utilizam tecnologia de silício possuem o seguinte fluxo:

- Purificação do silício;
- Fundição do silício e formação dos lingotes;
- Corte dos lingotes e formação dos “*wafers*” (bolachas);
- Montagem das células;
- Montagem dos módulos.

1.2.2.1. LINGOTE

O Silício de grau metalúrgico (MG) é produzido por redução carbotérmica do quartzo em fornos em unidades metalúrgicas. O produto possui pureza de 98 a 99% de Silício e cerca de 1 a 2% de impurezas (geralmente ferro, Alumínio, Fósforo, Cálcio, Titânio, Carbono e Boro). O Silício é derretido, purificado e solidificado na forma adequada para posterior processamento. Lingotes de Silício podem ser cultivados através de métodos como o crescimento de Czochralski ou a técnica do forno de Bridgman, dependendo do tipo de células pretendido (HASHIGAMI; ITAKURA; SAITOH, 2003). Os lingotes podem ser de silício monocristalino (C-Si) ou ainda de silício policristalino (mC-Si). A principal diferença associada a esses dois produtos corresponde principalmente ao grau de pureza e ao método de fabricação (PIZZINI, 2010). Para o primeiro, C-Si, a pureza é de 99,99% e o método de crescimento de Czochralski, para o último, mC-Si, a pureza varia entre 98,0% e 99,0% e o método de crescimento mais comum utilizado é o do forno de Bridgeman (DELANNOY, 2012).

1.2.2.2. WAFERS

Os lingotes de Silício multicristalino são inicialmente cortados em blocos e posteriormente em “fatias” muito finas, obtendo-se as bolachas (*wafers*). Em seguida, o produto do corte é então submetido diversas vezes ao tratamento por decaagem húmida e limpeza até que o conteúdo possua a perfeição desejada. No caso dos lingotes de Silício monocristalino, não é necessário o corte em blocos, ou seja, os lingotes são cortados diretamente em bolachas já com a espessura desejada, assim, visando um maior aproveitamento de área, as bolachas são cortadas em forma de quadrados (CABRAL; LOPES, 2013).

1.2.2.3. CÉLULAS

O passo inicial para produção da célula envolve a inspeção visual dos *wafers* e remoção das imperfeições do corte. Em seguida, adicionam-se Fósforo e Boro na camada de silício, além de ser implementado isolamento das arestas em uma *wet bench*. Ou seja, em uma “bancada úmida”, às imperfeições laterais – que aumentam a resistência *shunt*, são adicionados materiais isolantes. Vale lembrar que a resistência *shunt* está diretamente associada as correntes de fuga, isto é, correntes indesejáveis, que reduzem o desempenho do módulo. Adiante, adiciona-se uma camada antirreflexiva de forma a evitar a reflexão dos raios de luz, melhorando a eficiência da conversão. Assim, prossegue-se para processo de metalização onde são impressos os contatos elétricos na parte negativa e

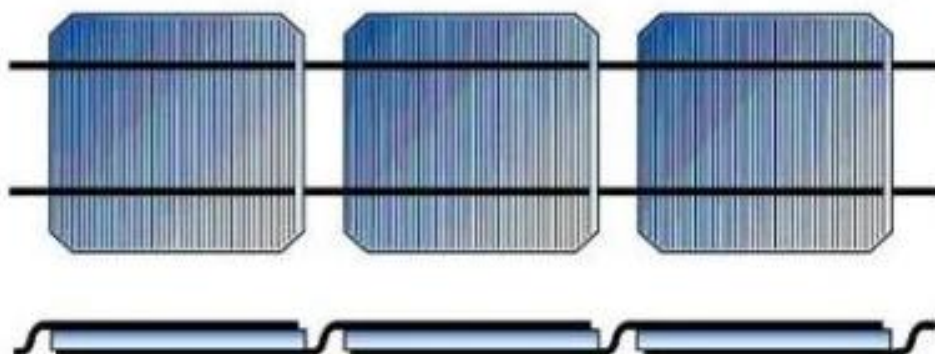
positiva da célula. Em seguida, realiza-se o cozimento dos contatos elétricos e; por fim, realizam-se os ensaios de medição da qualidade dos contatos, bem como a potência elétrica e a qualidade óptica da célula (CABRAL LOPES, 2013).

1.2.2.4. MÓDULOS CONVECIONAIS

Existem diversas tecnologias de módulos fotovoltaicos, incluindo modelos bifaciais, *double glass*, *shingle*, entre outros. Todavia, a representação do processo de produção de módulos representada aqui é direcionada para modelos convencionais, isto é, aquele representado na Figura 1.

A principal etapa para a montagem do módulo convencional envolve a associação em série das células fotovoltaicas formando as chamadas *strings*. Assim, realiza-se a soldagem dos contatos das células entre o lado negativo e positivo. A Figura 5 apresenta o processo de formação das *strings*.

Figura 5: *Strings* de células.



Fonte: Adaptado de Carneiro (2010).

Na Figura 5, os elementos em preto horizontais representam os *ribbons*, enquanto as linhas em preto horizontais representam os *fingers*. Após a soldagem, o conteúdo passa por etapas de *lay-up*, onde são dispostas as *strings* acima do conjunto vidro-encapsulante, seguido pela soldagem dos barramentos entre *strings*. Em seguida, o conjunto recebe a camada traseira de encapsulante, bem como a camada de *backsheet* e segue para a laminação (JIANG, LIU e ZOU, 2018). Por fim, são adicionadas a caixa de junção e a estrutura de alumínio. Montado o módulo, o mesmo passa por testes de eletroluminescência e caracterização da curva I-V. O primeiro ensaio é responsável por representar as condições das células sob circulação de uma corrente elétrica. Assim, com

uma câmera ‘*EL*’ (capaz de realizar fotografias representando a região do espectro infravermelho) e com os terminais do módulo conectado a uma fonte de corrente, retira-se uma fotografia do painel. Logo, por conta da natureza fotovoltaica, as células emitem luz visível na região do espectro infravermelho que é capturada pela câmera; o segundo ensaio é responsável por representar os parâmetros elétricos do módulo. Neste contexto, os terminais do módulo são conectados a uma carga eletrônica (*e-Load*) e o painel recebe a *flash* de luz com um índice de irradiância conhecido – geralmente contemplando uma grande faixa do espectro eletromagnético, assim, a potência de saída do módulo é medida, bem como o comportamento da curva *I-V* durante o *flash* é caracterizado.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVOS GERAIS

Compreender como o estresse mecânico afeta o desempenho e a qualidade de módulos fotovoltaicos de silício monocristalino.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Associar como a quebra de células – ocasionada por estresse mecânico, afeta a potência de saída de módulos fotovoltaicos que utilizam células de silício monocristalino.

3. METODOLOGIA

O módulo fotovoltaico utilizado neste trabalho foi cedido pela empresa BYD Energy do Brasil. O equipamento comercial utilizado corresponde ao modelo M7K-36-SÉRIE-5BB. Todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Semicondutores, Energia Solar e Sustentabilidade da BYD Energy do Brasil. O modelo utilizado possui tecnologia de célula monocristalina – que é uma grande tendência de mercado, e por isso foi escolhido neste estudo. A Figura 6 apresenta os dados da amostra retirados da etiqueta do fabricante (dados de placa). Além disso, a Tabela 1 apresenta os demais dados do equipamento utilizado retirados do *datasheet* disponibilizados pela empresa BYD Energy do Brasil.

Figura 6: Etiquetas de identificação do módulo fotovoltaico.



BYD ENERGY DO BRASIL LTDA

Modelo Módulo	BYD390M7K-36-5B
Potência Máxima (P _{max})	390Wp
Tolerância de Potência	0~5W
Voltagem Máxima de Operação (V _{mp})	40,9V
Corrente Máxima de Operação (I _{mp})	9,54A
Voltagem de Circuito Aberto (VOC)	49,3V
Corrente de curto-circuito (I _{sc})	9,94A
Temperatura Nominal de Funcionamento da Célula	45°C ± 2°C

Peso	21,7 KG
Dimensão	1978x999x35 (mm)
Voltagem Máxima do Sistema	1500 VCC
Corrente Máxima de Proteção	20A
Classes de Aplicação	Class A

Todos os dados técnicos na condição de teste padrão
(E=1000W/m² T_c=25°C AM1,5)

Indústria Brasileira

End: Avenida Antônio Buscato, 230 Terminal Intermodal de
Cargas - TIC

CEP: 13069-119 - Campinas/SP - Brasil

CNPJ: 21.858.948/0001-52

<http://www.byd.ind.br>

Atenção!

Leia o manual de instalação e operação antes de
instalar, operar ou fazer manutenção dessa unidade.
Não conecte ou desconecte os plugs durante o
carregamento do sistema.
Não seguir essas instruções, pode trazer *perigo* a você.



Fonte: (BYD, 2020).

Tabela 1: Características do módulo disponibilizadas pelo fabricante no *datasheet*.

Especificação elétrica	
Potência máxima (P _{máx})	390 Wp
Tensão de circuito aberto (V _{oc})	49,3 V
Corrente de curto-circuito (I _{sc})	9,94 A
Tensão de máxima potência (V _{mp})	40,9 V
Corrente de máxima potência (I _{mp})	9,54 A
Eficiência	19,7%
Temperatura de operação	-40 °C ~ 85 °C
Tensão máxima do sistema	1500 VCC
Corrente nominal do fusível	20 A
Tolerância de saída de potência	0 ~ 5 W
Carga de vento / carga de neve	2400 Pa / 5400 Pa
Ficha técnica	
Células	Monocristalino 158,75 x 158,75 mm
Número de células	72 (6 × 12) unidades
Dimensões	1978 × 999 × 35 mm
Peso	21,7 kg
Vidro	Temperado de 2,8 mm com revestimento AR
Coefficientes de temperatura	
Corrente de curto-circuito	0,04% / °C
Circuito aberto	-0,28% / °C
Temperatura da potência de pico	-0,37% / °C

Fonte: BYD Energy do Brasil (adaptado pelo autor).

Inicialmente o módulo foi colocado sob a luz do sol para estabilização elétrica durante três dias - para que ocorresse o fenômeno *Light Induced Degradation (LID)* ou degradação induzida pela luz de acordo com a norma MQT 19.1 e também para que o equipamento atingisse um nível de saída de potência eletricamente estável (JIANG, LIU E ZOU, 2018). Vale lembrar que o fenômeno *LID* pode ser entendido como a redução da eficiência da célula fotovoltaica através da oxidação do Boro que ocorre na presença da luz. A Figura apresenta 7 apresenta o módulo durante o período de estabilização.

Figura 7: Estabilização do módulo fotovoltaico.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

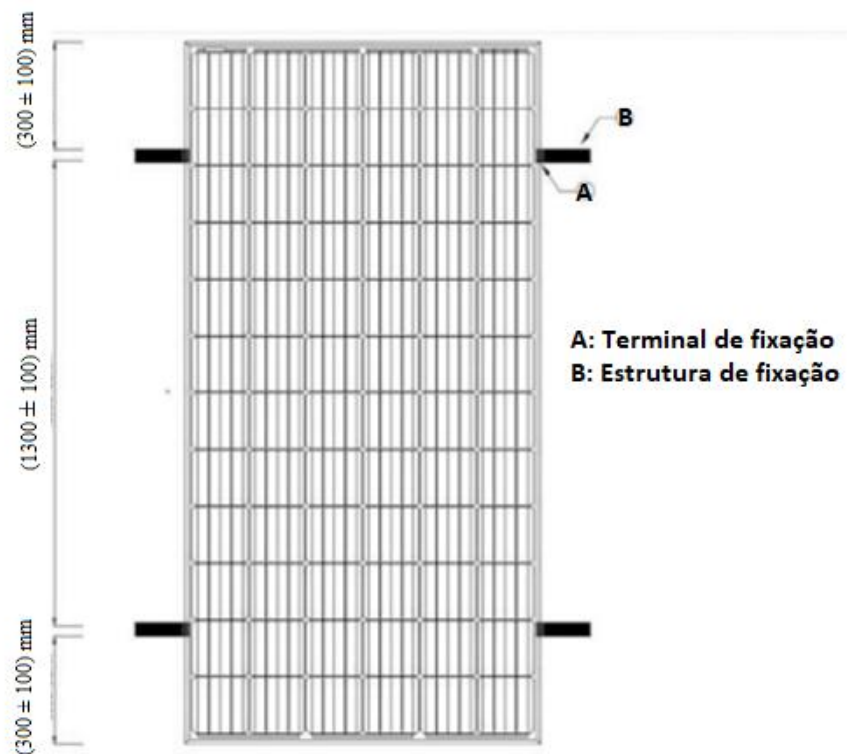
Após o período de estabilização o equipamento foi caracterizado com os seguintes ensaios (fluxo de caracterização A):

- Inspeção visual para verificação de defeitos visuais no material de acordo com a MQT 01 da IEC 61215-2:2016;
- Teste de isolamento elétrico para obtenção do valor de resistência das partes isolantes do módulo de acordo com a MQT 03 da IEC 61215-2:2016;
- Teste de corrente de fuga no molhado para verificação de possíveis correntes de fuga no módulo de acordo com a MQT 15 da IEC 61215-2:2016;
- Teste de inspeção através de eletroluminescência para identificação de possíveis trincas nas células;
- Verificação do desempenho do módulo em condições de teste padrão (STC – “*Standard Test Conditions*” (1000 W/m², 25 °C temperatura da célula) de acordo com a MQT 06.1 da IEC 61215-2:2016;
- Determinação da máxima potência em condições de teste padrão (STC – “*Standard Test Conditions*” (1000 W/m², 25 °C temperatura da célula) de acordo com a MQT 02 da IEC 61215-2:2016 (RAMOS, 2006).

Em seguida, a amostra foi submetida ao ensaio de Teste de carga mecânica estática (MQT 16) de acordo com a norma IEC 61215-2:2016. (RAMOS, 2006) A carga de compressão utilizada foi de 5.400 Pa = 5.400 N/m². A carga de tração utilizada foi de 2.400 Pa = 2.400 N/m². Cabe ressaltar que estes valores dizem respeito as cargas

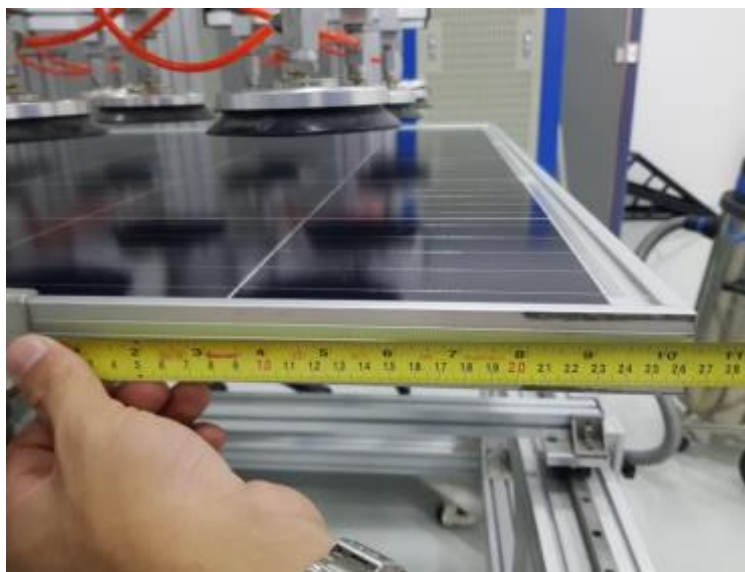
máximas de neve e de vento, respectivamente, suportadas pelo módulo de acordo com o próprio fabricante. O Módulo foi apoiado e fixado no *long-frame* utilizando grampo e parafuso auto brocante conforme o manual de instalação do fabricante. A Figura 8 apresenta o perfil de fixação dos grampos no módulo para realização do ensaio, enquanto as Figuras 9 e 10 apresentam os detalhes da fixação. ±

Figura 8: Perfil de fixação do módulo para realização do ensaio de carga mecânica.



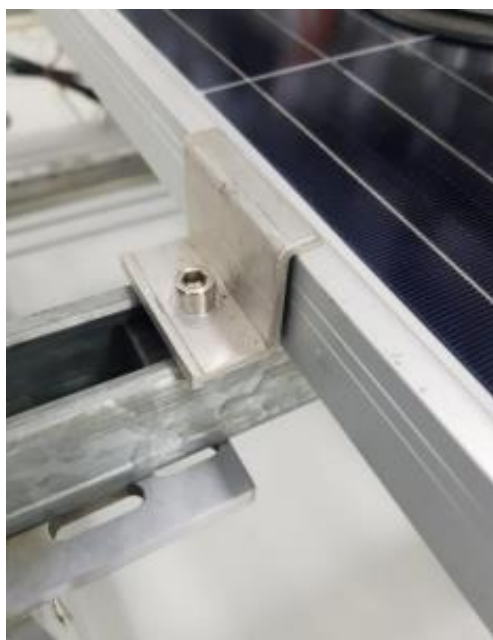
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 9: Detalhe do distanciamento equidistante dos grampos de fixação.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 10: Detalhes do grampo utilizado na fixação no módulo.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Com ralação à carga mecânica: aplicação de compressão de 5400 Pa e tração de 2400 Pa na parte frontal do módulo fotovoltaico, realizada através de 8 estações com cilindros pneumáticos e composto por 4 ventosas, cada. Estes valores estão de acordo com o a carga máxima especificada pelo fabricante e foram apresentados na Tabela 1.

Força aplicada de forma gradual e uniforme sobre toda a superfície frontal do módulo, mantendo a amostra sob estresse de compressão durante 1 hora e tração durante 1 hora. Esse ciclo foi repetido três vezes no ensaio.

Finalizado o ensaio de carga mecânica estática (MQT 16), o módulo foi novamente caracterizado através do “fluxo de caracterização A” para fins de comparação de performance.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Como proposto na metodologia, finalizada a estabilização do módulo fotovoltaico para ocorrência do fenômeno *LID* (*Light Induced Degradation*), isto é, degradação induzida pela luz, realizou-se a inspeção visual do módulo fotovoltaico, no entanto, não foi encontrado nenhum defeito aparente que pudesse comprometer o funcionamento do equipamento como: células quebradas, riscos no vidro frontal, *frame* amassado, bolhas no *backsheet*, conectores quebrados, caixa de junção solta, etc. A Figura 11 apresenta os detalhes do módulo fotovoltaico durante a inspeção visual.

Figura 11: Módulo durante a inspeção visual.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Seguindo o fluxo de caracterização, porém avaliando o isolamento das partes vivas e corrente de fuga para o equipamento molhado, a Tabela 2 apresenta os resultados para os ensaios de isolamento elétrico (MQT 03) e corrente de fuga no molhado (MQT 15).

Tabela 2: Resultados da caracterização inicial dos ensaios de isolamento elétrico (MQT 03) e ensaio de corrente de fuga (MQT 15).

Ensaio	Valor ($G\Omega$)	Valor ($G\Omega.m^2$)
--------	---------------------	-------------------------

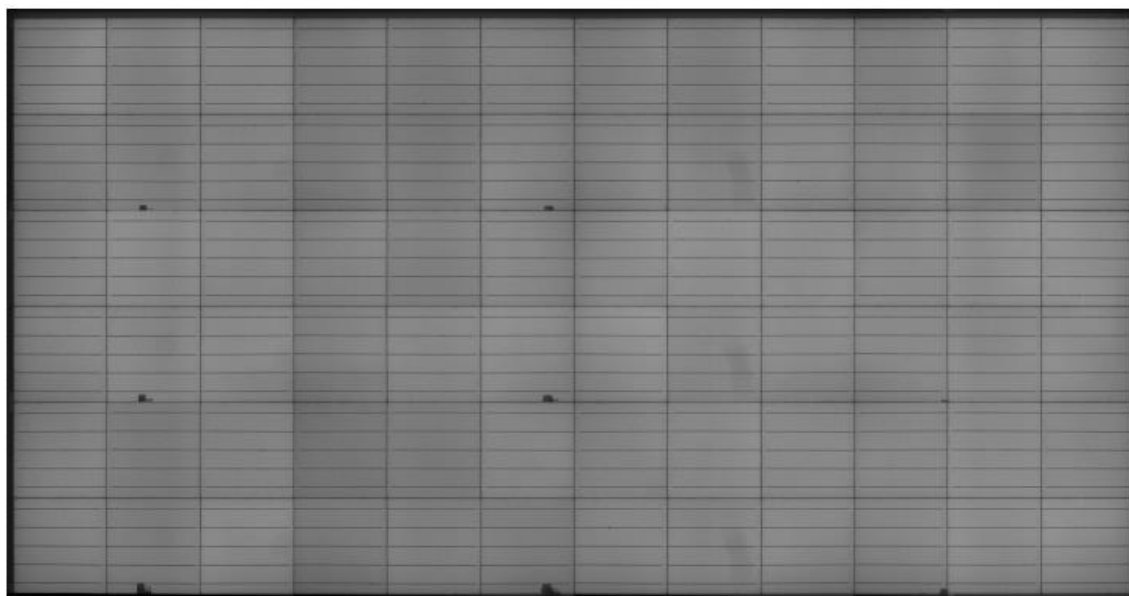
Isolamento elétrico (MQT 03)	17,89	35.35
Corrente de fuga no molhado (MQT 15)	5,64	11,14

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Como esperado, os resultados para a resistência elétrica do módulo a seco foi bem superior ao valor obtido para o módulo úmido, visto que, em contato com a água aumenta-se a condutividade elétrica, pois a água possui sais que facilitam a circulação da corrente elétrica (RAMOS, 2006). Cabe lembrar que esses resultados indicam a resistência elétrica entre os terminais dos conectores MC4 e a moldura de alumínio (*frame*), e, em especial para o MQT 15, não houve indícios de que a umidade conseguiu penetrar nas partes ativas do circuito do módulo, onde pudesse causar corrosão, falha de aterramento ou risco de segurança. Outro ponto importante, é que, de acordo com a norma 61215:2016, o valor mínimo aceitável para ambos os ensaios, MQT 03 e MQT 15, é de 40 MΩ.m².

Em seguida, continuando o fluxo de caracterização do módulo, realizou-se o ensaio de eletroluminescência para inspeção das células fotovoltaicas. A Figura 12 apresenta a eletroluminescência obtida.

Figura 12: Eletroluminescência inicial para o módulo.



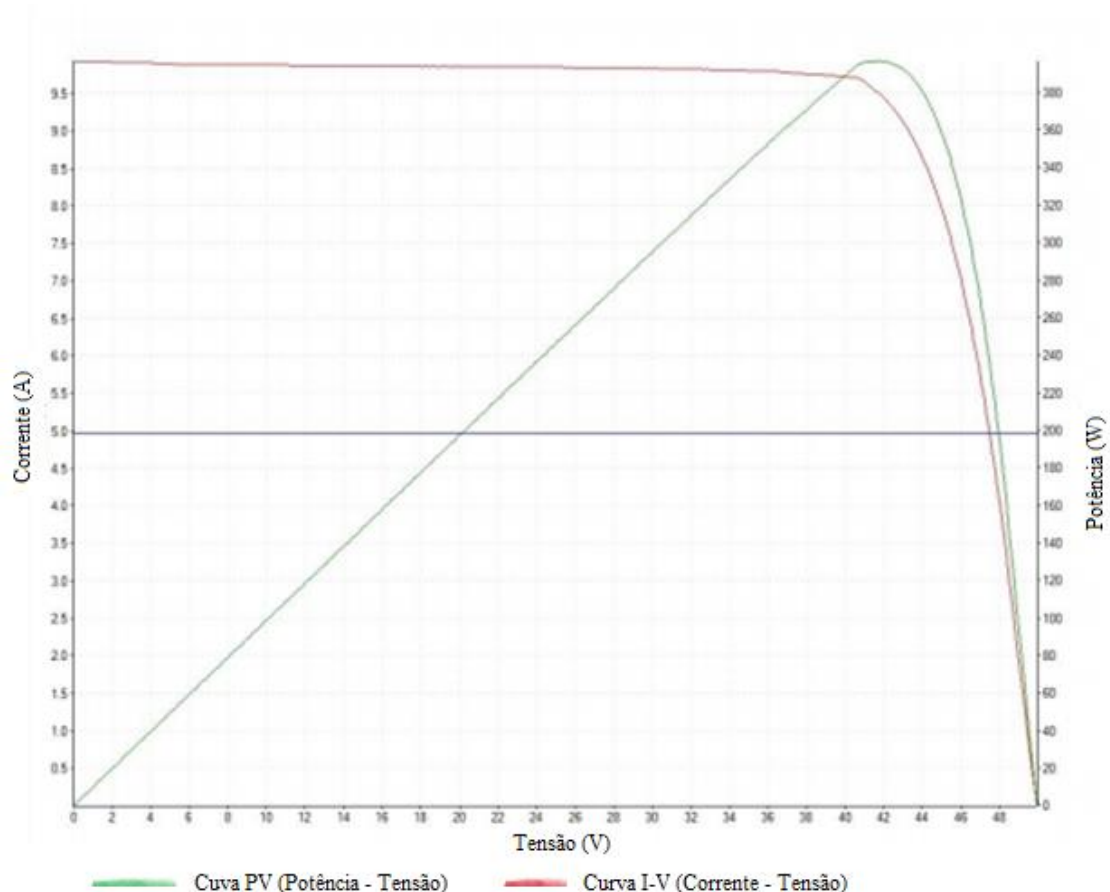
Fonte: Elaboração do próprio autor.

A análise da Figura 12 permite observar claramente que não há quaisquer indícios de trincas nas células – evidenciado pelo índice homogêneo de luminosidade, bem como nenhuma zona escura (MATOS, 2020). É válido ressaltar que os sete pontos em preto

dizem respeito ao sombreamento ocasionado pelos próprios pinos do equipamento de medição. Outro ponto importante observado é que não há indícios de soldas ou *ribbons* desalinhados, ou seja, o equipamento, assim como diz o fabricante, está em perfeitas condições de funcionamento.

Prosseguindo com a caracterização do módulo fotovoltaico, foi realizado também, assim como proposto no fluxo de metodologia, o ensaio para obtenção da máxima potência ($P_{m\acute{a}x}$) e da curva característica IV, isto é, a curva que descreve o ponto de máxima potência do equipamento (RAMOS, 2006). Observa-se que no ensaio foram utilizadas as condições de teste padrão, STC, ou seja, 1000 W/m² e temperatura ambiente de 25 °C. Nesse contexto, a Figura 13 apresenta as curvas característica obtidas.

Figura 13: Curva característica I-V em STC.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Analisando a Figura 13 é possível observar o ponto de máxima potência, bem como os valores de V_{oc} e I_{sc} , além da corrente de máxima potência I_{pm} e a tensão de máxima potência V_{pm} . Complementando a Figura 13, a Tabela 3 apresenta os valores associados à curva IV.

Tabela 3: Resultados da curva característica I-V.

Potência máxima $P_{m\acute{a}x}$	396,41 Wp
Eficiência M_{ef}	20,65
Tensão de circuito aberto V_{oc}	49,90 V
Corrente de curto-circuito I_{sc}	9,93 A
Tensão de máxima potência V_{pm}	41,64 V
Corrente de máxima potência I_{pm}	9,52 A
Resistência <i>shunt</i> R_{sh}	140,86 Ω
Resistência série R_s	0,47 Ω
Fator de forma (FF)	0,80

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Cabe lembrar que os valores de R_{sh} indicam a resistência *shunt* total do módulo, que representam a soma das resistências individuais das células entre os contatos P e N que está diretamente associada as correntes de fuga no painel. Os valores para a resistência série R_s indicam a soma das resistências dos elementos resistivos no módulo. Já o fator de forma FF mede o quão distante a curva I-V está de um formato retangular

Finalizada a caracterização inicial, foi possível submeter o módulo ao ensaio de carga mecânica estática, de acordo com a MQT 16. Cabe lembrar que este ensaio oferece um grande esforço físico para o módulo, o que gera estresse para todos os seus componentes, além disso, é válido lembrar que tais condições referem-se a níveis severos de carga que podem ser comparados a condições de rajadas de ventos de alta velocidade, bem como o grande acúmulo de neve na superfície frontal do módulo. Ademais, segundo o fabricante, esses são os valores de carga máxima suportado para a série de modelos M7K conforme Tabela 1. Nesse contexto, as Figuras 14 e 15 apresentam a deformação mecânica para a carga frontal (compressão) e traseira (tração) respectivamente.

Figura 14: Deformação do módulo para compressão de 5400 Pa.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

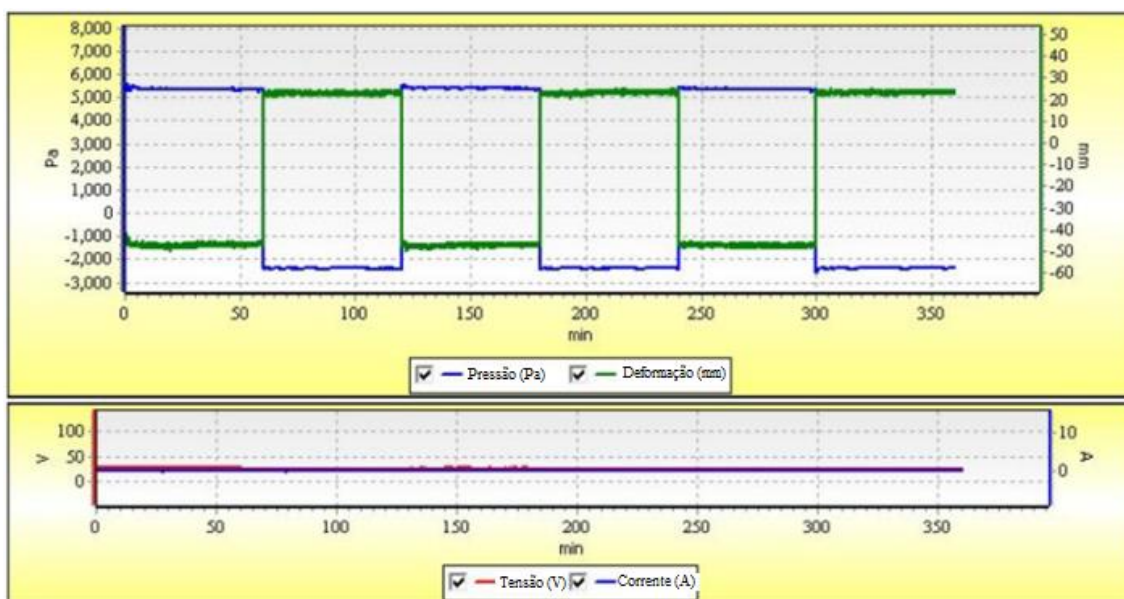
Figura 15: Deformação do módulo para tração 2400 Pa.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A partir da análise das Figuras 14 e 15 é possível notar a grande deformação do equipamento com a aplicação da carga. A principal estrutura responsável pela resistência mecânica é a moldura de alumínio, porém, é possível notar que a mesma se encontra completamente desfigurada com a aplicação da carga de 5400 Pa – principalmente no intervalo da estrutura de fixação paralela ao *short-frame*, isto é, o frame mais curto do módulo. Outro aspecto importante está associado à envergadura do vidro de 2,8 mm que não apresentou nenhum tipo de trinca ou rachadura. Continuando com os resultados do ensaio MQT 16, a Figura 16 apresenta os resultados de deformação, tensão e corrente do módulo durante o teste.

Figura 16: Parâmetros elétricos e de deformação do módulo durante o ensaio.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Através da Figura 16 é possível observar os grandes índices de deformação da região central da superfície do vidro (cerca 43 mm para compressão e 22 mm para tração). Um dos principais pontos avaliados neste ensaio diz respeito à continuidade da corrente circulante no módulo durante todo o período do experimento. Nesse contexto, como claramente apresentado pela Figura 16, é possível observar que durante todo o período o valor da corrente permaneceu inalterada, indicando que as interconexões (soldas) entre células, bem como a conexões entre os barramentos não foram danificados.

Finalizada a etapa de estresse mecânico do módulo, iniciou-se um novo ciclo de caracterização do equipamento para fins de comparação da performance inicial e final. Nesse contexto, a Tabela 4 apresenta a comparação entre os valores de resistência ao isolamento elétrico e corrente de fuga para o módulo molhado.

Tabela 4: Resultados da caracterização inicial dos ensaios de isolamento elétrico (MQT 03) e de corrente de fuga (MQT 15) para o módulo fotovoltaico molhado.

Ensaio	Valor inicial (GΩ)	Valor após MQT 16 (GΩ)
Isolamento elétrico (MQT 03)	17,89	18,98
Corrente de fuga no molhado (MQT 15)	5,64	3,55

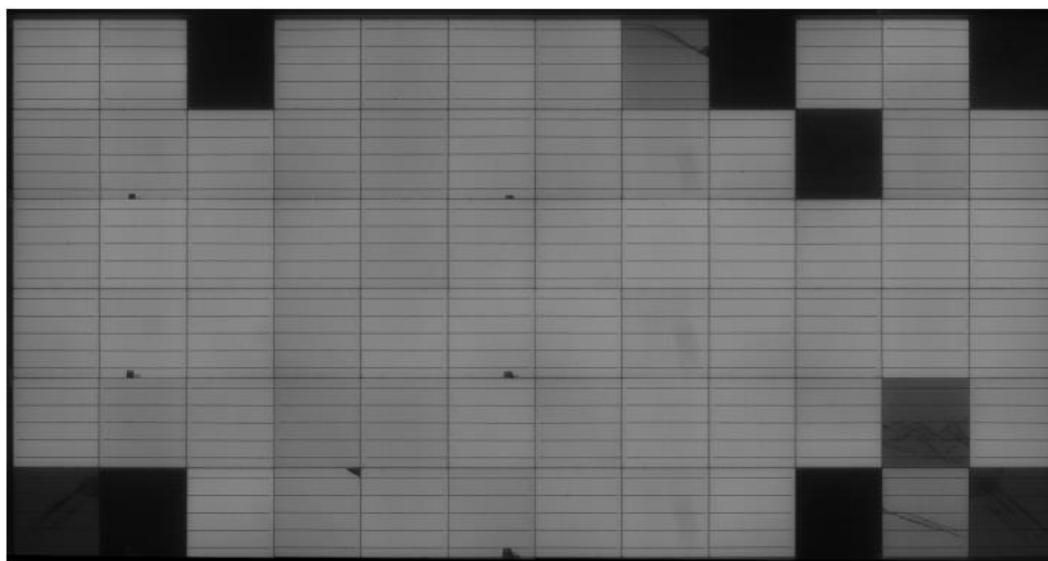
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Os resultados permitem observar a variação positiva da resistência ao isolamento elétrico para o ensaio MQT 03 após o estresse mecânico realizado no módulo. Essa mudança pode ser explicada pela quebra de células – que por consequência aumentou a R_s levando o equipamento ao aumento da resistência ao isolamento elétrico das partes vivas. Em contrapartida, o valor da resistência final para o ensaio MQT 15 referente a corrente de fuga foi menor – em comparação com o valor inicial. Essa alteração pode ser explicada pelo surgimento de microfissuras no *backsheet* ocasionada pela quebra de células – o que faz com que haja mais corrente de fuga no módulo (DOLARA *et al.*, 2016). Por fim, assim como ressaltada a importância na norma (IEC 61215-2:2016), os valores não sofreram grandes alterações, vide a ordem de grandeza dos resultados, 10^9 , e são superiores a $40 \text{ M}\Omega \cdot \text{m}^2$.

Com relação à inspeção visual, não foram encontrados danos visíveis severos que, a princípio, pudessem comprometer o funcionamento do equipamento. Contudo, levando em consideração aspectos estéticos, notou-se uma grande deformação no *long-frame*, isto é, o frame mais longo do módulo.

Prosseguindo com os resultados, a Figura 17 apresenta a eletroluminescência do módulo após o ensaio MQT 16. Através dela é possível observar a diversidade de trincas geradas no painel fotovoltaico em virtude do estresse mecânico. Além disso, é possível observar também a configuração das trincas, bem como eventuais falhas de solda das interconexões entre células.

Figura 17: Eletroluminescência do módulo após o ensaio de carga estática (MQT 16).



Fonte: Elaboração do próprio autor.

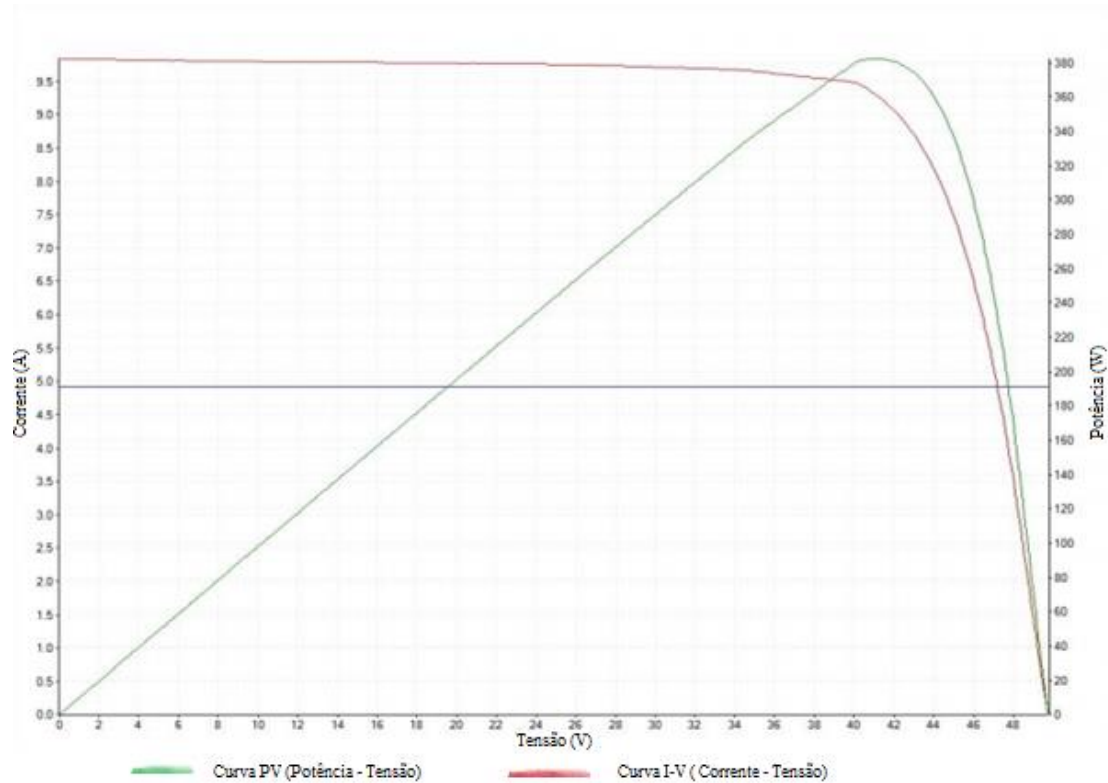
Como esperado, a submissão do módulo ao ensaio de estresse mecânico resultou no aparecimento de trincas e na quebra de diversas células do painel fotovoltaico. Nesse contexto, é possível notar que as células mais próximas dos vértices foram aquelas que mais sofreram impacto durante o teste de carga estática (MQT 16), vide a quantidade de células parcialmente ou completamente pretas (quebradas) – indicando não emissão luz, isto é, restrição de circulação de corrente (MATOS, 2020). O zoneamento (agrupamento das trincas) da quebra de célula está associado diretamente à restrição de movimento dos locais próximos aos grampos de fixação que acabam por limitar a deformação da célula somente em suas laterais, ou seja, não há homogeneidade na distribuição das cargas na célula. Por fim, na Figura 17 é possível identificar seis células pretas, sendo cinco células com trincas transversais e longitudinais e uma célula com trinca isolada.

Ainda com relação às trincas, é possível observar que o perfil de cada fratura está diretamente associado à perda de potência da célula, visto que, geralmente, para trincas com perfil majoritariamente longitudinal, os *ribbons* não afetados continuam por promover a circulação de corrente, diferentemente das fraturas transversais que acabam por afetar a maioria dos *ribbons* – dificultando a circulação da corrente elétrica e criando pontos quentes devido à dissipação de energia através do efeito Joule.

Com relação à performance, a Figura 18 apresenta a curva característica I-V para o módulo fotovoltaico após o ensaio de carga estática (MQT 16). A princípio,

comparando o pico da curva de potência antes e depois do ensaio MQT 16, nota-se que na Figura 18 há uma ligeira redução dos valores de potência máxima de pico, $P_{m\acute{a}x}$.

Figura 18: Curva característica IV após ensaio de carga estática (MQT 16).



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Complementando a interpretação da Figura 18, a Tabela 5 apresenta a comparação dos valores obtidos através da curva característica I-V antes e após o estresse mecânico.

Tabela 5: Comparação dos resultados obtidos através da curva IV.

Parâmetro	Valor inicial	Valor após MQT 16
Potência máxima $P_{m\acute{a}x}$	396,41 W	382,14 W
Eficiência M_{ef}	20,07	19,35
Tensão de circuito aberto V_{oc}	49,90 V	49,73 V
Corrente de curto-circuito I_{sc}	9,93 A	9,84 A
Tensão de máxima potência V_{pm}	41,64 V	41,09 V
Corrente de máxima potência I_{pm}	9,52 A	9,30 A
Resistência shunt R_{sh}	140,86 Ω	207,92 Ω
Resistência série R_s	0,47 Ω	0,49 Ω
Fator de forma FF	0,80	0,78

O principal ponto a ser observado na Tabela 5 refere-se à diminuição da potência máxima do módulo, $P_{m\acute{a}x.}$, após o ensaio MQT 16 (cerca de 3,60%). Esta diminuição é explicada através do surgimento de trincas e quebra de células (DOLARA *et al.*, 2016). Cabe ressaltar que as células fotovoltaicas dependem exclusivamente da área superficial para realizar a conversão da luz em eletricidade, assim, quando se reduz essa área útil, reduz-se também a potência convertida, e, conseqüentemente a eficiência. Além disso, com o aparecimento de trincas nas células, aumenta-se a resistência série do módulo – o que conseqüentemente aumenta as perdas por efeito Joule e reduz o CTM (*cell-to-module ratio*) – que é a razão entre a potência de saída do módulo em condições *STC* e a soma das potências individuais de todas as células que compõem o módulo também em condições *STC*. Outro fator importante, ainda no âmbito da potência, está associado a redução do número útil dos *fingers e ribbons* com o surgimento de trincas ou quebra de células, já que esses elementos atuam como condutores de corrente. Logo, a diminuição do número útil desses elementos (que quebram junto com a célula) reduz o número de “condutores” e criam gargalos para o transporte de corrente elétrica – gerando pontos quentes que diminuem o tempo de vida útil dos módulos fotovoltaicos (DOLARA *et al.*, 2016).

Com relação aos parâmetros de tensão de circuito aberto (V_{oc}) e corrente de curto-circuito (I_{sc}) observou-se uma ligeira redução após o ensaio de carga estática (MQT 16) que está diretamente associado à diminuição das células em funcionamento no módulo. No caso da V_{oc} , é válido lembrar que cada célula no módulo pode ser comparada ao funcionamento de uma fonte de tensão, e com a associação em série das células, a quebra desses elementos acaba por reduzir o número de “fontes” a terem suas tensões somadas. Para o caso da I_{sc} , sua redução está intrinsicamente associada ao fato de que a corrente produzida é proporcional à área células, assim, células maiores produzem níveis de corrente maiores. Logo, com a quebra de algumas das células do módulo (e conseqüentemente aumento da R_s), a célula com maior resistência (quebrada) acaba limitando a passagem de corrente e conseqüentemente reduzindo a corrente máxima do módulo fotovoltaico (MATOS, 2020).

Com respeito à resistência série (R_s), é natural que a quebra de células acabe por impactar a resistência individual de cada célula, bem como a resistência das interconexões

entre células e barramentos. Nesse contexto, insere-se o aumento da R_s , que pode ser compreendido como a redução dos caminhos para condução da corrente elétrica, bem como a piora do contato entre as conexões.

5. CONCLUSÃO

Com relação aos ensaios desenvolvidos para o módulo modelo M7K-36-SÉRIE-5BB distribuído pela empresa BYD Energy do Brasil, os resultados mostraram que o equipamento, após estabilização, apresentou potência máxima de saída superior ao valor especificado pela etiqueta do produto, mas dentro da faixa de tolerância positiva especificado pelo Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO). Além disso, não foram encontrados defeitos significativos que pudessem comprometer a vida útil do equipamento, tais quais como quebra ou trincas de suas células. Com relação ao estresse mecânico, para a carga estática avaliada neste estudo e de acordo com as ponderações apresentadas na norma IEC 61215:2016, verificou-se que o módulo em questão apresentou boa resposta durante o ensaio de carga estática (MQT 16), ou seja, durante todo o período do teste não houve falha de continuidade do módulo.

Após o estresse mecânico, o desempenho do painel fotovoltaico, assim como esperado, foi inferior ao desempenho inicial. O fato ocorreu devido à quebra das células no interior do módulo, bem como o aparecimento de trincas evidenciado pelo ensaio de eletroluminescência. Os resultados mostraram a variação da $P_{m\acute{a}x}$ para condições de teste padrão (STC) na ordem de -3,6% após o ensaio de carga estática (MQT 16). Juntamente com a queda do desempenho do equipamento, houve também aumento da resistência série R_s devido à quebra e trinca das células. Cabe ressaltar que ambos os parâmetros colaboraram também para a redução da eficiência do M7K, cerca de 3,6% (proporcional à queda da $P_{m\acute{a}x}$). Ainda com relação à performance, houve também redução dos valores de tensão de circuito aberto V_{oc} e da corrente de curto-circuito I_{sc} – também em função da quebra das células. Por fim, quanto à segurança do módulo em condições de operação, não houve variações significativas para os dados de isolamento elétrico e corrente de fuga, ou seja, após o ensaio de carga estática (MQT 16) não houve riscos quanto a operação do equipamento.

É importante ressaltar que todos os experimentos realizados, de acordo com as recomendações da IEC 61215:2016, não trouxeram prejuízos ao funcionamento do módulo fotovoltaico, porém, é válido lembrar que, apesar de não fazer parte do escopo deste trabalho, os impactos ocasionados pelo estresse mecânico provavelmente trarão prejuízos quanto ao tempo de vida útil do equipamento. Essa ressalva é fundamentada através da premissa de que a quebra ou trinca das células no módulo fotovoltaico acabam por gerar pontos quentes (*hot-spots*).

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CABRAL LOPES, R. J. Efeito do Sombreamento nos Painéis Fotovoltaicos. **Instituto Superior de Engenharia de Lisboa**, v. 1, n. 2, p. 128, 2013.

DELANNOY, Y. Purification of silicon for photovoltaic applications. **Journal of Crystal Growth**, v. 360, n. 1, p. 61–67, 2012.

DOLARA, A.; LAZAROIU, G. C.; LEVA, S.; MANZOLINI, G.; VOTTA, L. Snail Trails and Cell Microcrack Impact on PV Module Maximum Power and Energy Production. **IEEE Journal of Photovoltaics**, v. 6, n. 5, p. 1269–1277, 2016.

GRAY, J. L. The Physics of the Solar Cell. **Photovoltaic Science and Engineering**, v. 1, n. 32, p. 82–129, 2011.

HASHIGAMI, H.; ITAKURA, Y.; SAITOH, T. Effect of illumination conditions on Czochralski-grown silicon solar cell degradation. **Journal of Applied Physics**, v. 93, n. 7, p. 4240–4245, 2003.

JIANG, F.; LIU, H.; ZOU, X. **Test and Analysis of Potential Induced Degradation in Crystalline Silicon PV Modules** Proceedings of the 30th Chinese Control and Decision Conference, CCDC 2018. **Anais...IEEE**, 2018

MATOS, L. DE. Uso de imagens de eletroluminescência para detecção de danos mecânicos nos módulos fotovoltaicos. **UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**, v. 2017, n. 1, p. 1–71, 2020.

NASCIMENTO, C. A. DO. Princípio de funcionamento da célula fotovoltaica. **Structural Engineer**, v. 88, n. 15–16, p. 25–29, 2010.

PACHECO, F. Energias Renováveis: Breves Conceitos. **Conjuntura e Planejamento**, v. 1, n. 149, p. 4–11, 2006.

PIZZINI, S. Towards solar grade silicon: Challenges and benefits for low cost photovoltaics. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 94, n. 9, p. 1528–1533, 2010.

RAMOS, C. D. M. Procedimentos para Caracterização e Qualificação de Módulos Fotovoltaicos. **UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**, v. 1, n. 1,

p. 141, 2006.

SILVA, R. G.; CARMO, M. J. DO. Energia solar fotovoltaica: uma proposta para melhoria da gestão energética. **International Scientific Journal**, v. 12, n. June, p. 129–147, 2017.

VALÊRRRA, A. M.; BRITO, M. C. Meio século de história fotovoltaica. **Gazeta de física**, v. 1, n. 4, p. 11–17, 2006.