

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS,
METALÚRGICA E DE MATERIAIS

USO DE IMAGENS DE ELETROLUMINESCÊNCIA PARA DETECÇÃO DE
DANOS MECÂNICOS NOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

por

Lucas de Matos

Dissertação para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, junho de 2020

USO DE IMAGENS DE ELETROLUMINESCÊNCIA PARA DETECÇÃO DE DANOS MECÂNICOS NOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

por

Lucas de Matos

Engenheiro de Energia

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGE3M), como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Ciência e Tecnologia de Materiais

Orientador: Prof. Dr. Arno Krenzinger.

Porto Alegre, junho de 2020

USO DE IMAGENS DE ELETROLUMINESCÊNCIA PARA DETECÇÃO DE DANOS MECÂNICOS NOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

por

Lucas de Matos

Engenheiro de Energia

Esta dissertação foi analisada e julgada para a obtenção de título de mestre em Engenharia e aprovada em sua forma final pelo orientador e pela banca examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGE3M) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof. Dr. Arno Krenzinger.

Prof. Dr. Afonso Reguly

Banca examinadora

Prof. Dr. João Batista Dias - PPGEM/UNISINOS

Prof. Dr. Rafael Haag – UERGS

Prof. Dr. Fabiano Perin Gasparin - PPGE3M/UFRGS

Porto Alegre, junho de 2020

RESUMO

O uso da energia solar vem crescendo cada vez mais e se tornando uma importante fonte para composição da matriz energética mundial. Os módulos fotovoltaicos são capazes de converter a radiação solar em energia elétrica. A produção de energia elétrica por conversão fotovoltaica está diretamente relacionada à disponibilidade da radiação solar, inclinação do módulo, eficiências dos sistemas envolvidos, entre outros fatores. Esta dissertação apresenta uma avaliação dos efeitos de danos mecânicos em células fotovoltaicas, por microfissuras e outros tipos de degradação, através de imagens de eletroluminescência, curva I-V e inspeção visual. Para isso, avaliaram-se quantitativamente e qualitativamente diversos módulos disponíveis no Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Labsol-UFRGS), com intuito de relacionar danos mecânicos nas células com a potência produzida. Analisaram-se módulos em diferentes condições antes e depois da realização de ensaios mecânicos. Alguns módulos fotovoltaicos, apesar de apresentarem bom aspecto visual, demonstraram uma degradação considerável, impactando assim as suas potências. Por outro lado, módulos com alguma célula danificada ainda apresentaram valores medidos de potência máxima semelhantes aos valores nominais. Módulos de 60 células apresentaram maior resistência aos ensaios mecânicos do que módulos com 72 células. Alguns módulos apresentaram um acréscimo na potência após o ensaio mecânico, apesar de observar-se o aumento de microfissuras, tendo em vista que houve também contatos internos restabelecidos. Destas observações, constatou-se que nas células em que as microfissuras não obtiveram rompimento total de contato, a perda de potência é quase imperceptível, porém é provável que haverá impacto com a propagação do defeito ao longo do tempo de operação.

Palavras-chave: módulos fotovoltaicos, microfissuras em células fotovoltaicas, eletroluminescência, danos mecânicos em células fotovoltaicas.

ABSTRACT

The use of solar energy has been growing more and more and becoming an important source for the composition of the world energy mix. Photovoltaic modules are capable of converting solar radiation into electrical energy. The production of electric energy by photovoltaic conversion is directly related to the availability of solar radiation, module inclination, the efficiency of the systems involved, degradation, among other factors. This dissertation presents an evaluation of the mechanical damage in photovoltaic cells, by microcracks and other types of degradation, through images of electroluminescence, I-V curve, and visual inspection. Therefore, several modules available at the Solar Energy Laboratory of the Federal University of Rio Grande do Sul (Labsol-UFRGS) were evaluated quantitatively and qualitatively, to relate degradation to the impact on power. Modules were analyzed in different conditions before and after mechanical tests. Some photovoltaic modules, despite presenting a good visual aspect, showed considerable degradation, thus impacting their power. On the other hand, modules with some damaged cells still presented measured values of maximum power similar to the nominal values. Modules of 60 cells showed greater resistance to mechanical tests than modules with 72 cells. Some modules showed an increase in power after the mechanical test, despite the increase in micro cracks, considering that internal contacts were also reestablished. From these observations, it was found that in the cells in which the microcracks did not obtain total contact break, the loss of power is almost imperceptible, however it is likely to be an impact with the propagation of the defect over the time of operation.

Keywords: photovoltaic modules, solar cell microcracks, electroluminescence, mechanical damage in solar cells.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
1.1	OBJETIVOS	14
1.1.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	14
2	ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA	16
2.2	MÓDULOS FOTOVOLTAICOS.....	18
3	ELETROLUMINESCÊNCIA	23
4	METODOLOGIA	27
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
5.1	COMPARAÇÃO DE MÓDULOS E SEUS ASPECTOS VISUAIS E IMAGENS ELETROLUMINESCENTES.....	33
5.2	AVALIAÇÃO QUANTITATIVA DOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS	39
5.3	ENSAIOS MECÂNICOS	46
5.3.1	Ensaio Módulo 21	47
5.3.1	Ensaio módulo 22.....	52
5.3.3	Ensaio módulo 23.....	57
5.3.4	Ensaio módulo 24.....	60
5.3.4	Considerações finais dos ensaios mecânicos.....	64
6	CONCLUSÃO	66

LISTA DE FIGURA

Figura 1: Projeção da geração de energia renovável no Brasil - EPE (2018) ..	13
Figura 2: Componentes da radiação solar (Barreto e Pinho, 2008)	17
Figura 3: Funcionamento de uma célula (Honsberg e Bowden, 2019)	18
Figura 4: Lingote de silício (Honsberg e Bowden, 2019)	19
Figura 5: Ilustração dos componentes de um módulo fotovoltaico (Honsberg e Bowden, 2019).....	20
Figura 6: Curva característica I-V destacando os principais componentes (Gasparin, 2009).....	21
Figura 7: Curva característica I-V de um módulo para diferentes irradiâncias .	22
Figura 8: Curva característica de um módulo fotovoltaico com variação da temperatura (Gasparin, 2009).....	22
Figura 9: Registro Módulo 2 – (a) inspeção visual e (b) imagem de eletroluminescência.....	24
Figura 10: Protótipo de uma sola de sapato.....	29
Figura 11: Transpaquete utilizado para os ensaios mecânicos	29
Figura 12: Bancada dos ensaios mecânicos.....	30
Figura 13: Vista superior do plano do simulador solar – esquema da bancada para imagens de eletroluminescência	31
Figura 14: Local de aplicação de carga sobre a superfície do módulo	32
Figura 15: Registro módulo 1 – (a) inspeção visual e (b) imagem de eletroluminescência.....	33
Figura 16: Curva característica obtida pelo simulador solar - módulo 1	34
Figura 17: Registro módulo 2 – (a) inspeção visual e (b) imagem de eletroluminescência.....	35
Figura 18: Curva característica obtida pelo simulador solar - módulo 2	36
Figura 19: Registro módulo 3 – (a) inspeção visual e (b) imagem de eletroluminescência.....	37
Figura 20: Curvas I-V do módulo 3 antes e depois do acidente.....	38
Figura 21: Imagens ampliadas das células do módulo 4	42
Figura 22: : Imagens ampliadas das células do módulo 5.....	43
Figura 23: Imagens ampliadas das células - (a) módulo 6 e (b) módulo 8	43

Figura 24: Imagens ampliadas das células do módulo 9.....	44
Figura 25: Ensaio módulo 21 na região central – (a) antes do ensaio e (b) depois do ensaio	49
Figura 26: Ensaio módulo 21 na região lateral – (a) antes do ensaio e (b) depois do ensaio	51
Figura 27: Comparação de células módulo 21 – (a) antes do ensaio e (b) depois do ensaio	51
Figura 28: Ensaio módulo 22 na região central – (a) antes do ensaio e (b) depois do ensaio	54
Figura 29: Comparação de células módulo 22 – (a) antes do ensaio e (b) depois do ensaio	54
Figura 30: Ensaio módulo 22 na região lateral – (a) antes do ensaio e (b) depois do ensaio	56
Figura 31: Comparação de células módulo 22 – (a) antes do ensaio e (b) depois do ensaio	56
Figura 32: Comparação do módulo 23 – (a) antes do ensaio e (b) depois do ensaio.....	58
Figura 33: Comparação de células do módulo 23 – (a) antes do ensaio e (b) depois do ensaio	59
Figura 34: Danos das células do módulo 23 – (a) antes do ensaio e (b) depois do ensaio	59
Figura 35: Ensaio módulo 24 na região central– (a) antes do ensaio e (b) depois do ensaio	61
Figura 36: Danos das células do módulo 24– (a) antes do ensaio e (b) depois do ensaio	64

LISTA DE TABELA

Tabela 1: Tipos de defeito (Adaptado de Berardone, Garcia e Paggi, 2018) ...	25
Tabela 2: Ciclos de carga do ensaio mecânico.....	30
Tabela 3: Comparação dos valores obtidos do módulo 1.....	34
Tabela 4: Comparação dos valores obtidos do módulo 2.....	36
Tabela 5: Comparação dos valores obtidos do módulo 3.....	37
Tabela 6: Módulos com potência medida dentro da incerteza global (continua)	40
Tabela 6: Módulos com potência medida dentro da incerteza global (continua)	41
Tabela 6: Módulos com potência medida dentro da incerteza global (concluído)	42
Tabela 8: Módulos com diferença de potência (continua)	45
Tabela 8: Módulos com diferença de potência (concluído)	46
Tabela 9: Módulos selecionados para os testes mecânicos.....	47
Tabela 10: Ensaio mecânico módulo 21 – região central	48
Tabela 11: Ensaio mecânico módulo 21 – região lateral	50
Tabela 12: Comparação do módulo 21 antes e depois dos ensaios mecânicos	52
Tabela 13: Ensaio mecânico módulo 22 – região central	53
Tabela 14: Ensaio mecânico módulo 22 – região lateral	55
Tabela 15: Comparação do módulo 22 antes e depois dos ensaios mecânicos	57
Tabela 16: Comparação do módulo 23 antes e depois dos ensaios mecânicos	60
Tabela 17: Ensaio mecânico módulo 24 – região central	61
Tabela 18: Ensaio mecânico módulo 24 – região lateral	63
Tabela 19: Comparação do módulo 24 antes e depois dos ensaios mecânicos	64

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CCD	Charge-coupled Device
IEA	International Energy Agency
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
LABSOL	Laboratório de Energia Solar da UFRGS
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
STC	<i>Standard Test Conditions</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

I	Corrente elétrica - Ampere (A)
I _{mp}	Corrente de máxima potência - Ampere (A)
I _{sc}	Corrente de curto circuito - Ampere (A)
P _{max}	Potência máxima - Watt (W)
NM	Número identificador do módulo
PM	Potência medida no simulador solar - Watt (W)
PN	Potência Nominal - Watt (W)
V	Tensão elétrica - Volts (V)
V _{mp}	Tensão de máxima potência - Volts (V)
V _{oc}	Tensão de circuito aberto - Volts (V)

1 INTRODUÇÃO

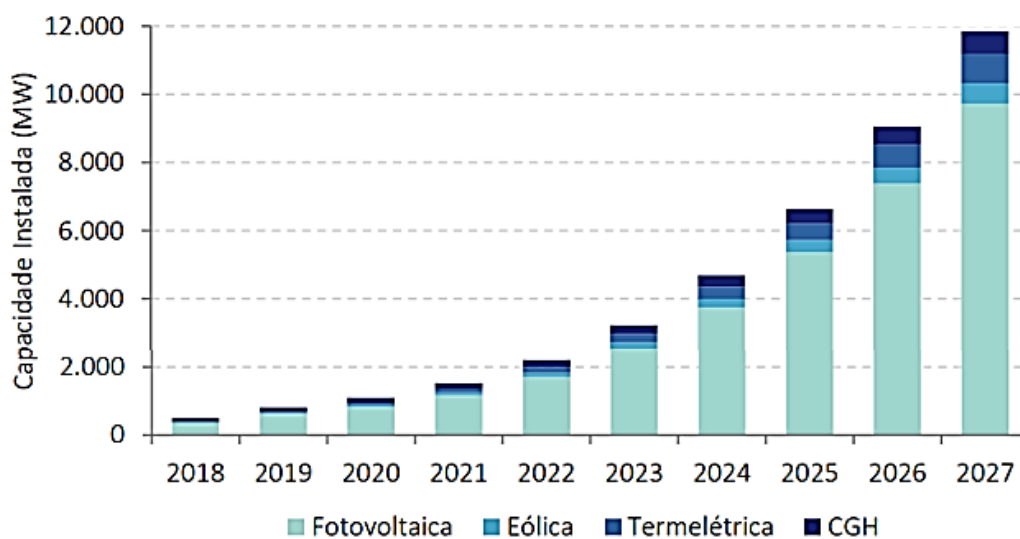
Devido ao crescimento populacional, a necessidade de suprir e garantir recursos básicos para subsistência, assim como energia elétrica, tornou-se um desafio para as nações. Em 1950 estima-se que a população mundial se encontrava com aproximadamente 2,56 bilhões de habitantes, enquanto que em 2015 alcançou-se a faixa de 7,24 bilhões de indivíduos, praticamente triplicando o número de habitantes no planeta (EIA, 2017). Portanto, cada vez mais a demanda de energia elétrica mundial cresce, assim como a necessidade de formas de geração que não dependam de recursos finitos e que reduzam os impactos ao meio ambiente.

Os módulos fotovoltaicos são capazes de converter a radiação solar em energia elétrica. Esse tipo de conversão é dependente de diversos fatores, tal como a intensidade da radiação solar a disposição, eficiências dos componentes do sistema, perdas envolvidas, degradação, entre outros. Compreender os fenômenos envolvidos na conversão de energia solar em energia elétrica através de sistemas fotovoltaicos é de suma importância para a evolução e melhor utilização dessa tecnologia. A conversão fotovoltaica da energia solar contribui para uma obtenção de energia elétrica mais limpa e uma diversificação da matriz energética, atuando em encontro com as ações de redução dos efeitos dos gases que contribuem para o aquecimento global (Burnett, Barbour e Harrison, 2014).

Em muitos países do mundo, assim como o Brasil, a produção de energia elétrica através de sistemas fotovoltaicos tem-se popularizando na medida em que os preços dos sistemas têm diminuído e incentivos governamentais se tornam mais atrativos. Após a Resolução Normativa RN 482/2012 promulgada pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), aumentou de maneira substancial o número de mini e microgeração de fontes renováveis introduzindo o mecanismo de compensação do excedente da energia gerada pelo sistema. Em 2018 a capacidade instalada de sistemas fotovoltaicos ultrapassou a marca de 500 GW (IEA, 2019), sendo que no Brasil com mais de 171 mil sistemas conectados à rede, já superou 2 GW instalado (Absolar, 2019).

Além disso, a partir de 2010 a energia fotovoltaica começa a crescer em caráter exponencial no mundo todo. De acordo com EIA (2019), até 2017 já foram gerados aproximadamente 500 TWh no mundo todo, sendo que no Brasil esse número já está chegando próximo de 900 GWh. A projeção para o ano de 2030 no Brasil é atingir a marca dentro da matriz energética de aproximadamente 13% (International Renewable Energy Agency, 2016). De acordo com EPE (2018), a projeção da geração de energia para o ano de 2027 é de cerca de 12 GW de fontes renováveis, sendo que próximo de 10 GW será de solar fotovoltaica. A Figura 1 mostra a projeção de 4 tipos de fontes geradoras de energia até o ano de 2027, onde percebe-se a disparidade de crescimento da capacidade instalada para a energia solar fotovoltaica no Brasil.

Figura 1: Projeção da geração de energia renovável no Brasil - EPE (2018)



Fonte: EPE, 2018

Este crescimento somente tem sido possível porque os fabricantes de módulos atestam qualidade e durabilidade dos módulos fotovoltaicos. Os ensaios experimentais são fundamentais para analisar o desempenho dos sistemas fotovoltaicos, degradações e possíveis falhas. A curva de corrente-tensão (curva I-V) é utilizada para caracterizar módulos fotovoltaicos eletricamente, observando parâmetros de desempenho, assim como eventuais problemas intrínsecos.

As condições padrão de teste (STC) consideram o valor de irradiância de 1.000 W/m², temperatura da célula de 25°C e o espectro padrão de massa de ar (AM) de 1,5. Com essa padronização é possível a comparação de diferentes módulos fotovoltaicos, sendo de suma importância para o desenvolvimento da tecnologia (Kenny et al, 2013).

Além disso, o ensaio de eletroluminescência em módulos fotovoltaicos é uma das ferramentas de detecção de defeitos que tem sido muito recorrente, devido a apresentar-se como uma maneira rápida e fácil de detectar anomalias que não são reveladas na inspeção visual. O módulo em teste é submetido à circulação de corrente elétrica direta, com valor semelhante à sua corrente de curto circuito nominal e então é possível observar uma radiação de baixa intensidade, na faixa do infravermelho, emitida pelas células (Frazão et al., 2016).

1.1 OBJETIVOS

O objetivo principal desta dissertação é avaliar o impacto dos danos e eventuais degradações produzidos nas células por esforços mecânicos que podem causar rupturas ou microfissuras. Pretende-se realizar esta avaliação qualitativamente e quantitativamente, visando explorar os conceitos da técnica de imagens de eletroluminescência.

1.1.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Concomitantemente ao intuito principal, os objetivos específicos da dissertação estão divididos em três:

- a) Apresentar uma comparação de resultados obtidos para diferentes módulos fotovoltaicos que sofreram solicitações de impacto mecânico distintas, realizado a partir da inspeção visual, imagens de eletroluminescência e curvas características I-V;

- b) Realizar e avaliar qualitativamente as imagens de eletroluminescência de módulos distintos, com o intuito de identificar a relação das falhas na uniformidade de emissão com as variações nas características elétricas dos módulos fotovoltaicos;
- c) Submeter diferentes módulos a alguns esforços mecânicos e entender as relações do aparecimento de microfissuras e células quebradas a partir de ciclos de carga sobre a superfície dos módulos com valores da potência elétrica antes e depois do experimento.

2 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

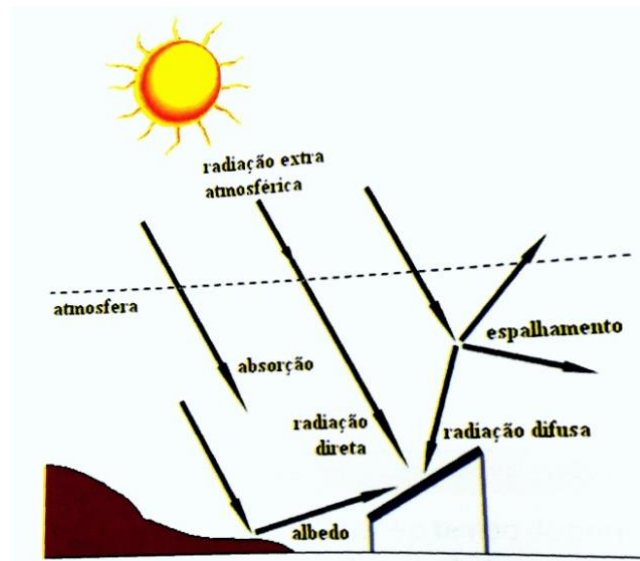
A energia solar tem sido usada pela humanidade desde o princípio, suprimindo necessidades básicas de iluminação, aquecimento, alimentação, entre outras tantas áreas de influência dessa energia. A radiação solar na superfície terrestre depende principalmente das condições atmosféricas e climáticas. Estima-se que a quantidade de energia que atinge a Terra é na ordem de $1,5 \times 10^{18}$ kWh por ano, sendo assim, cerca de 10 mil vezes o consumo energético mundial (CRESESB, 2000).

A composição do Sol é de aproximadamente 80% hidrogênio e 18% hélio, onde é gerado um processo de fusão na qual o hidrogênio é transformado em hélio, gerando assim enormes quantidades de energia (Barreto e Pinho, 2008). A energia solar chega à superfície da Terra em forma de radiação em diversos comprimentos de onda, onde a distribuição da energia radiante está principalmente entre 0,25 a 3 μm . (Duffie e Beckman, 2013).

A radiação solar global se divide em 3 componentes: direta, difusa e albedo. A radiação direta pode ser definida por aquela que atinge uma superfície terrestre sem interferência em sua direção, enquanto a radiação difusa refere-se à componente que sofre interferência direcional por elementos constituintes da atmosfera terrestre, tal como moléculas de água e poeiras. Já a radiação que é refletida pelo solo é chamada de radiação de albedo (Barreto e Pinho, 2008). A Figura 2 mostra um diagrama da radiação solar e suas componentes. A fim de quantificar a radiação solar incidente em uma superfície, utilizam-se equipamentos capazes de medir os valores da irradiância solar, como piranômetros termoelétricos.

Em 1839, Edmond Becquerel percebeu uma diferença de potencial nas extremidades de um material semicondutor quando submetido à luz pela primeira vez em um eletrólito. Apenas 37 anos depois foram criados os primeiros aparatos fotovoltaicos em estado sólido e em 1956 iniciou-se a produção em escala industrial juntamente com o crescimento da microeletrônica (CRESESB, 2000). A partir de então, desenvolveram-se diferentes dispositivos com materiais diversos melhorando a eficiência das células fotovoltaicas.

Figura 2: Componentes da radiação solar



Fonte: Barreto e Pinho, 2008

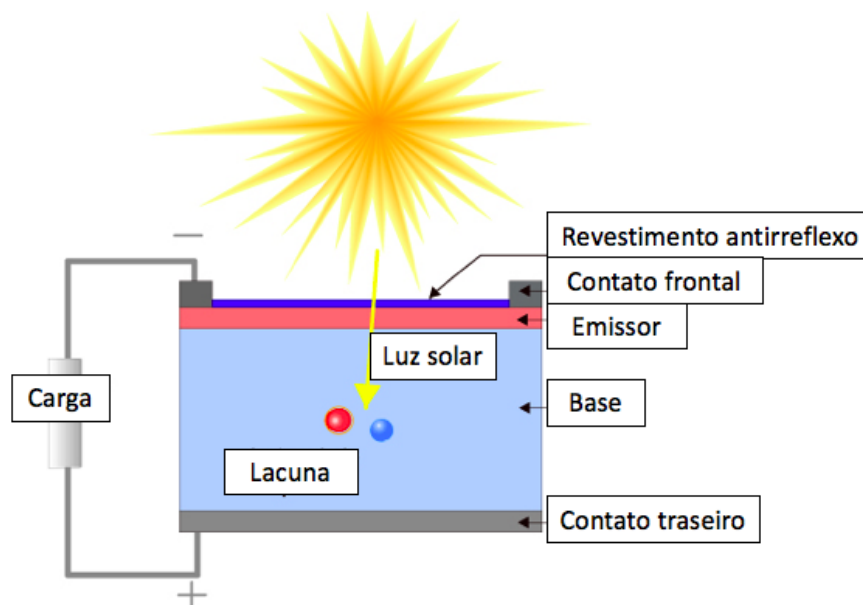
Em 1839, Edmond Becquerel percebeu uma diferença de potencial nas extremidades de um material semicondutor quando submetido à luz pela primeira vez em um eletrólito. Apenas 37 anos depois foram criados os primeiros aparatos fotovoltaicos em estado sólido e em 1956 iniciou-se a produção em escala industrial juntamente com o crescimento da microeletrônica (CRESEB, 2000). A partir de então, desenvolveram-se diferentes dispositivos com materiais diversos melhorando a eficiência das células fotovoltaicas.

O Brasil tem um potencial considerável em termos de geração de energia fotovoltaica. De acordo com o Atlas Brasileiro de Energia Solar (2017), o Brasil possui uma irradiação diária média de 4,97 kWh/m², sendo que há regiões em determinados períodos do ano que atingem uma média diária de 7,1 kWh/m².

Após a regulação da ANEEL, via resoluções normativas 482/2012 e 687/2015, houve um grande avanço no setor da energia solar fotovoltaica, chegando em 2019 na marca de 1 GW de potência instalada em mini e microgeração distribuída de energia elétrica (ANEEL, 2019). Essas resoluções permitiram que consumidores pudessem produzir sua própria energia elétrica, onde o excedente pode ser injetado na rede convencional elétrica e gerar créditos para utilização futura.

A conversão da energia solar em energia elétrica é possível devido ao efeito fotovoltaico. Semicondutores podem ser modificados para apresentar maioria de portadores de carga negativos (os elétrons), material tipo N, ou maioria de portadores de carga positivos (as lacunas), material tipo P. O efeito fotovoltaico ocorre quando fótons são absorvidos nas proximidades de uma junção do material tipo N com o material tipo P. A célula fotovoltaica é o dispositivo na qual é realizado esse tipo de conversão, e quando agrupadas geralmente em série, formam os módulos fotovoltaicos.

Figura 3: Funcionamento de uma célula



Fonte: Adaptado de Honsberg e Bowden, 2019

2.2 MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

O principal material utilizado na fabricação de células fotovoltaicas é o silício, visto ser um material abundante e possui quatro elétrons que se ligam aos vizinhos constituindo assim uma rede cristalina (CRESESB, 2000). A Figura 4 apresenta uma foto de um lingote de silício. O silício pode ser dopado com

pequena quantidade de átomos de valência 5 tornando-se um semicondutor tipo N ou ser dopado com pequena quantidade de átomos de valência 3, tornando-se um semicondutor do tipo P.

Figura 4: Lingote de silício



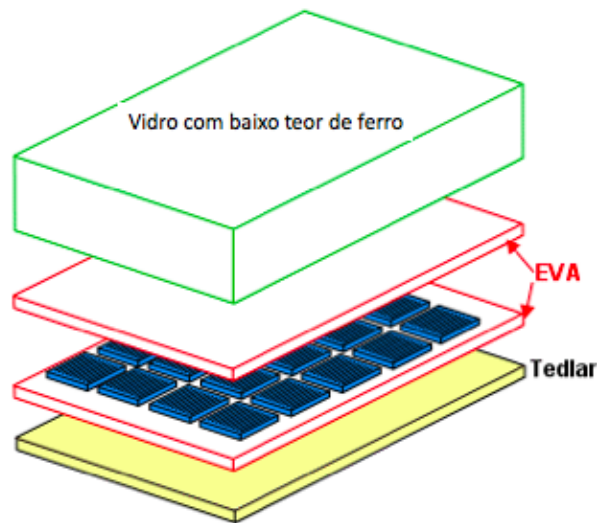
Fonte: Honsberg e Bowden, 2019

Devido à baixa tensão de saída de uma célula fotovoltaica, associam-se várias células formando um módulo, arranjando em série e/ou paralelo, dependendo da finalidade desejada.

Os módulos são fabricados com o intuito de operarem por mais de duas décadas em ambientes muitas vezes hostis, portanto, o encapsulamento adequado é essencial para durabilidade do módulo. As células solares são extremamente finas, sendo assim, são protegidas por uma camada de vidro, já as partes metálicas internas dos módulos podem ser corroídas pela água ou vapor de água caso não estejam bem protegidas pelo encapsulamento (Honsberg e Bowden, 2019).

Como é possível visualizar na Figura 5, a maioria dos módulos fotovoltaicos consiste em uma camada de vidro transparente, de preferência com percentual baixo de ferro, duas camadas de EVA (Etileno Acetato de Vinila) e o Tedlar (nome comercial do PoliVinil Fluorado) na camada traseira.

Figura 5: Ilustração dos componentes de um módulo fotovoltaico



Fonte: Adaptado de Honsberg e Bowden, 2019

O material da superfície frontal do módulo fotovoltaico deve ter alta transmissividade. Na cobertura do módulo pode ser utilizada alguns tipos de materiais, por exemplo, acrílico, polímero ou vidro. Como encapsulante é utilizado um material estável para resistir a variações de temperaturas e radiação ultravioleta. A função da camada inferior é possuir uma certa rigidez dielétrica de modo a garantir um isolamento elétrico e baixa resistência térmica, assim aumentar a dissipação de calor do módulo. A moldura possui o papel de dar estabilidade mecânica para o módulo, geralmente sendo utilizado algum tipo de metal. E por fim, a caixa de conexão na parte posterior, onde se encontram os terminais elétricos do módulo (Gasparin, 2012).

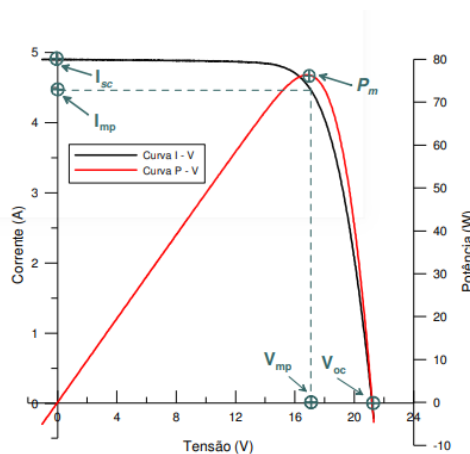
A potência de um módulo fotovoltaico geralmente é dada pela potência de pico, porém, há outras características importantes deste dispositivo.

- Tensão de circuito aberto (V_{oc});
- Corrente de curto circuito (I_{sc});
- Potência máxima (P_m);
- Tensão de máxima potência (V_{mp});
- Corrente de máxima potência (I_{mp}).

2.4 CURVA I-V

O método utilizado para obtenção de parâmetros característicos dos módulos fotovoltaicos é a determinação da curva I-V, onde é descrito o comportamento da corrente elétrica em função da tensão da célula. Além disso, no ensaio da determinação da curva I-V é possível obter informações da tensão de circuito aberto (V_{oc}), corrente de curto-circuito (I_{sc}), ponto de máxima potência (P_m) e fator de forma (FF) (Gasparin, 2009).

Figura 6: Curva característica I-V destacando os principais componentes

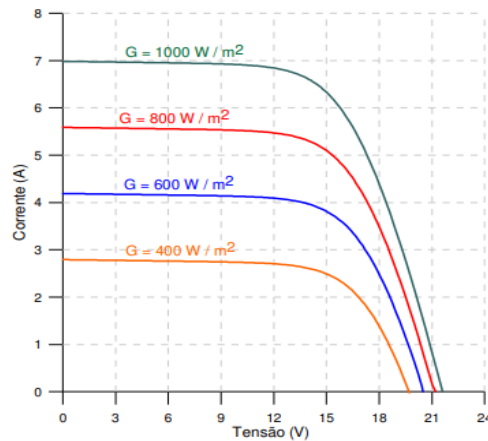


Fonte: Gasparin, 2009

O ensaio para obtenção da curva I-V deve seguir condições específicas padronizadas, assim garantindo a possibilidade de comparar diferentes módulos e garantir a repetibilidade. As Condições Padrão de Teste (STC) é uma das padronizações existentes para realizar este tipo de ensaio, onde são especificadas irradiância solar de 1.000 W/m^2 , o espectro padrão de massa de ar (AM) de 1,5 e uma temperatura de célula de 25°C (Kenny et al, 2013).

A irradiância solar está diretamente relacionada com a potência elétrica produzida pelo módulo fotovoltaico. Conforme é possível observar na Figura 7, na medida em que a radiação aumenta, a curva também se altera, ou seja, a corrente de curto circuito aumenta proporcionalmente com a irradiância solar.

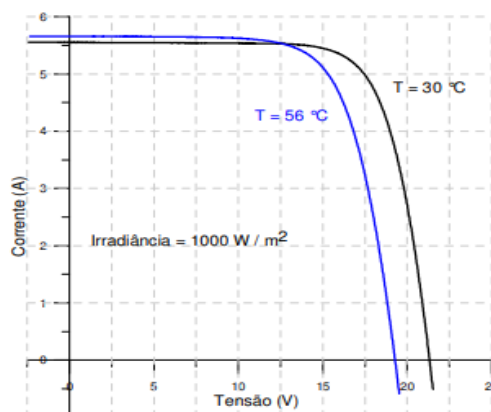
Figura 7: Curva característica I-V de um módulo para diferentes irradiâncias



Fonte: Gasparin, 2009

Outro aspecto que está relacionado ao desempenho do módulo fotovoltaico é a temperatura da célula. Esse efeito é característico dos materiais semicondutores, onde a corrente fotogerada terá um aumento leve de acordo com o aumento da temperatura devido à redução do *gap* de energia do material. Entretanto, a tensão de circuito aberto irá reduzir conforme o aumento da temperatura devido à corrente de saturação, podendo ter uma redução na ordem de $2 \text{ mV/}^\circ\text{C}$ para cada célula de silício no intervalo de 20 a 100°C (Gasparin, 2009).

Figura 8: Curva característica de um módulo fotovoltaico com variação da temperatura



Fonte: Gasparin, 2009

3 ELETROLUMINESCÊNCIA

Um das técnicas para caracterização dos módulos fotovoltaicos é a eletroluminescência. O módulo a ser examinado é colocado em ambiente escuro, sem incidência de radiação, e é submetido a uma tensão com valor maior que a tensão de circuito aberto nominal. Nestas condições circula uma corrente elétrica direta, com valor semelhante à corrente de curto circuito nominal do módulo e então é possível detectar uma radiação de baixa intensidade, sendo emitida pelas células na faixa do infravermelho, normalmente na ordem de 800 a 1150 nm (Frazão et al, 2016).

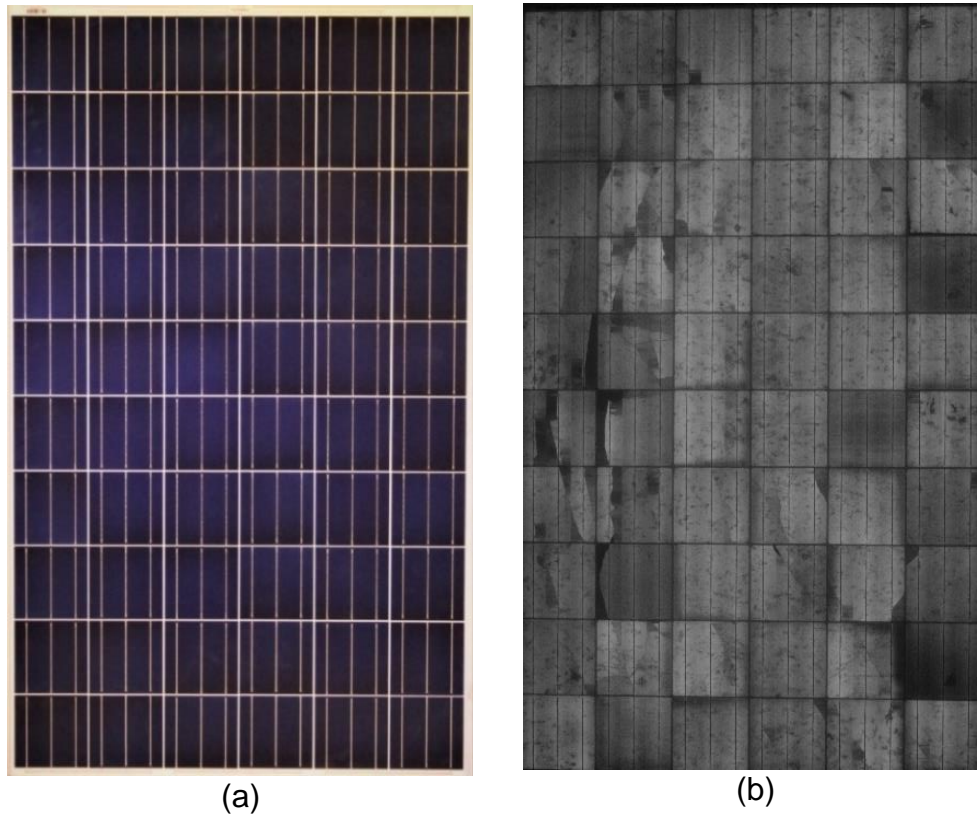
A radiação da eletroluminescência emitida no ensaio acontece pela recombinação de portadores. Essa emissão ocorre quando os elétrons cruzam a junção da camada N para P nas células fotovoltaicas, se recombinando com as lacunas, emitindo fótons com energia semelhante à energia da banda proibida. Da mesma maneira, as lacunas que passam de P para N absorvem elétrons, produzindo a mesma emissão (Sombrio, 2016).

O método de análise de imagens de eletroluminescência atualmente é utilizado através de um observador humano. Apesar da eficácia para identificação de defeitos na célula, ainda não se sabe ao certo a questão essencial de como as microfissuras afetam a potência do módulo fotovoltaico. Sabe-se que fissuras de alta intensidade irão afetar a potência imediatamente, mas quando se trata de microfissuras, as células podem continuar conduzindo e o módulo pode não ser afetado significativamente na potência. Apesar de saber a correlação de aumento de temperatura com a variação da potência de saída dos módulos, a interpretação das imagens de eletroluminescência está ainda em debate e não há uma análise quantitativa, apenas qualitativa (Berardone, Garcia e Paggi, 2018).

Muitas vezes os danos dos módulos não são percebidos facilmente, portanto, a eletroluminescência serve como uma ferramenta de identificação de alguns tipos de defeitos que não são possíveis serem detectados apenas com inspeção visual. Como exemplo, a Figura 9 mostra a imagem de um módulo que não apresentou danos quando verificado na inspeção visual, mas o ensaio de

eletroluminescência resultou na imagem da Figura 9 (b) onde é possível identificar células quebradas.

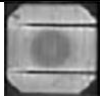
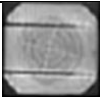


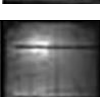
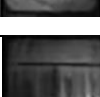
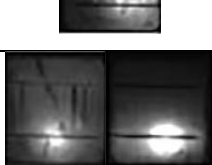
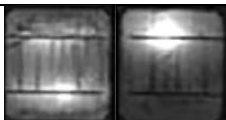
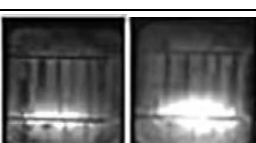
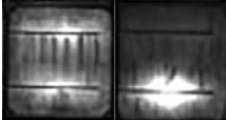


Figura 9: Registro Módulo 2 – (a) inspeção visual e (b) imagem de eletroluminescência



Há também como classificar o tipo de defeito e suas características, além de identificar sua possível causa. Berardone, Garcia e Paggi (2018), classificam as falhas nos módulos através da imagem em eletroluminescência conforme a Tabela 1. O estudo foi realizado em um módulo com mais de 20 anos de operação, assim podendo ser observados diversos tipos de defeitos presentes.

Diversos tipos de fissuras podem ser observados em células fotovoltaicos e dependendo do tipo de fissura presente no módulo impactará diferentemente na potência de acordo com o seu tamanho e o sentido que a fissura se propaga. Porém, há casos de fissuras que não resultam em perda de desempenho no instante do teste.

Tabela 1: Tipos de defeito

Tipo de defeito	Imagem da célula
Anéis de estriação	
Defeito pelo manuseio com suporte de vácuo	
Formação de contato	
Corrosão por umidade com baixo dano na célula	
Corrosão por umidade com alto dano na célula	
Interrupção do <i>finger</i>	
Célula interligada desconectada com dano alto (local)	
Célula interligada desconectada com dano baixo (local)	
Célula altamente danificada interligada desconectada com dano alto (linha)	
Célula interligada desconectada com dano baixo na célula (linha)	
Célula interligada desconectada da linha até para o <i>busbar</i>	
Microfissura com partes isoladas	

Fonte: Adaptado de Berardone, Garcia e Paggi, 2018

Os ensaios de imagem de eletroluminescência devem ser realizados em ambientes escuros e com uma câmera especial capaz de detectar a radiação infravermelha (900 a 1.150 nm). Quando há propriedades eletroluminescentes, representa que haverá o efeito fotovoltaico naquela região que está emitindo radiação. Caso haja ausência de radiação eletroluminescente, poderá ser correspondente a possíveis defeitos de contato, fissuras, microfissuras, corrosão e/ou curto-circuito (Figueiredo et al, 2018).

Há diversas causas que podem danificar o módulo mecanicamente e eletricamente, tal como neve, impactos por granizo, processo de instalação, erros de fabricação, entre outros (Kernahan, Curzon e Stewart, 2012).

4 METODOLOGIA

Todos os ensaios apresentados na dissertação foram realizados dentro do Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (LABSOL).

Os módulos testados foram escolhidos conforme potência, tamanho e também por critério da inspeção visual, selecionando-se aqueles que estavam visualmente conservados quando feitas as imagens de eletroluminescência. Além disso, selecionou-se um módulo que estava visivelmente com fissuras nas células, para verificar qual o comportamento quando submetido aos ensaios mecânicos, comparado com os módulos conservados. Para o ensaio mecânico selecionou-se também um módulo de potência maior quando comparado com os demais testados, o qual é similar aos módulos mais comercializados atualmente no mercado.

Realizou-se o estudo em três partes principais:

- Comparação de módulos e seus aspectos visuais e imagens de eletroluminescência: Estudo de três módulos, sendo 2 com bom aspecto e 1 com o vidro estilhaçado;
- Análise qualitativa de imagens eletroluminescentes de 17 módulos disponíveis no laboratório, com a intenção de visualizar a relação das células quebradas entre outras degradações vistas nas imagens de eletroluminescência com possíveis variações na potência;
- Submeter 4 módulos de diferentes características a ensaios mecânicos, e assim entender possíveis aparecimentos de células quebradas e microfissuras, tanto em luz visível quando em imagens de eletroluminescência, além de mudanças nas potências.

Os ensaios foram realizados em ciclos graduais de aumento de carga, onde se observou o impacto obtido a partir de um peso específico submetido sobre o módulo. Para qualquer módulo testado mecanicamente, verificou-se seu desempenho no simulador solar antes e depois do ensaio, além de realizar as imagens de eletroluminescência. As curvas I-V foram feitas por meio de um simulador solar, no qual o *flash* produz radiação similar à radiação solar, a qual incide sobre o módulo de maneira uniforme e com estabilidade temporal de 10 ms. Assim, garantiram-se as condições recomendadas pela norma, possibilitando a repetibilidade dos ensaios nos demais módulos utilizados.

O *flash* é disparado na medida em que as condições requeridas são obtidas, submetendo o módulo a uma radiação de 1.000 W/m², catalogando os valores de corrente e tensão durante uma varredura de tensões. A área disponível para o teste do simulador é de 4 m², sendo as dimensões máximas do módulo sob teste 2 m por 2 m (Gasparin et al., 2016). O simulador solar utilizado foi um SunSim 3C, de classe C com estabilidade temporal classe A.

Sobre as incertezas nos resultados das curvas I-V é importante ressaltar que esta grandeza depende muito do que se quer observar em cada ensaio ou comparação. Uma análise completa de reprodutibilidade realizada por Gasparin et al. (2016) mostra que ao comparar várias medições de um mesmo módulo a incerteza na potência máxima fica em 0,15%. Isto significa que é possível analisar certos impactos sobre a potência ao ensaiar um módulo, submeter o mesmo a alguns esforços para depois repetir o ensaio e comparar as curvas I-V. Estando os resultados com diferenças na potência maiores do que 0,15% tem sentido concluir que houve um efeito causado pelo esforço, visto que no trabalho foi utilizado o mesmo simulador solar. Por outro lado, a incerteza absoluta da medição de potência é de 2% e depende fortemente da incerteza da calibração da célula de referência (1,7%). Ao comparar os dados medidos em um módulo fotovoltaico com dados medidos em outro laboratório, ou ainda com dados nominais (fornecidos pelo fabricante) é a incerteza de 2% que deve ser considerada.

Com intuito de provocar uma carga similar à carga de uma pessoa pisando sobre o módulo, utilizou-se uma placa similar a uma sola de sapato com área de 285 cm². Utilizou-se poliuretano expandido rígido como material para produção

do protótipo. Entende-se que há um aumento considerável no número de instalações de sistemas de energia solar e por muitas vezes há más práticas ou até mesmo desinformação dos impactos gerados no módulo quando o instalador se apoia sobre o módulo para realizar seu trabalho. Por isso, escolheu-se aplicar a carga mecânica sobre o protótipo e o mesmo transferir a pressão para superfície do módulo.

Figura 10: Protótipo de uma sola de sapato



Além disso, a bancada para os ensaios mecânicos foi composta um transpalete hidráulico onde se adicionaram pesos até atingir o limite desejado.

Figura 11: Transpalete utilizado para os ensaios mecânicos



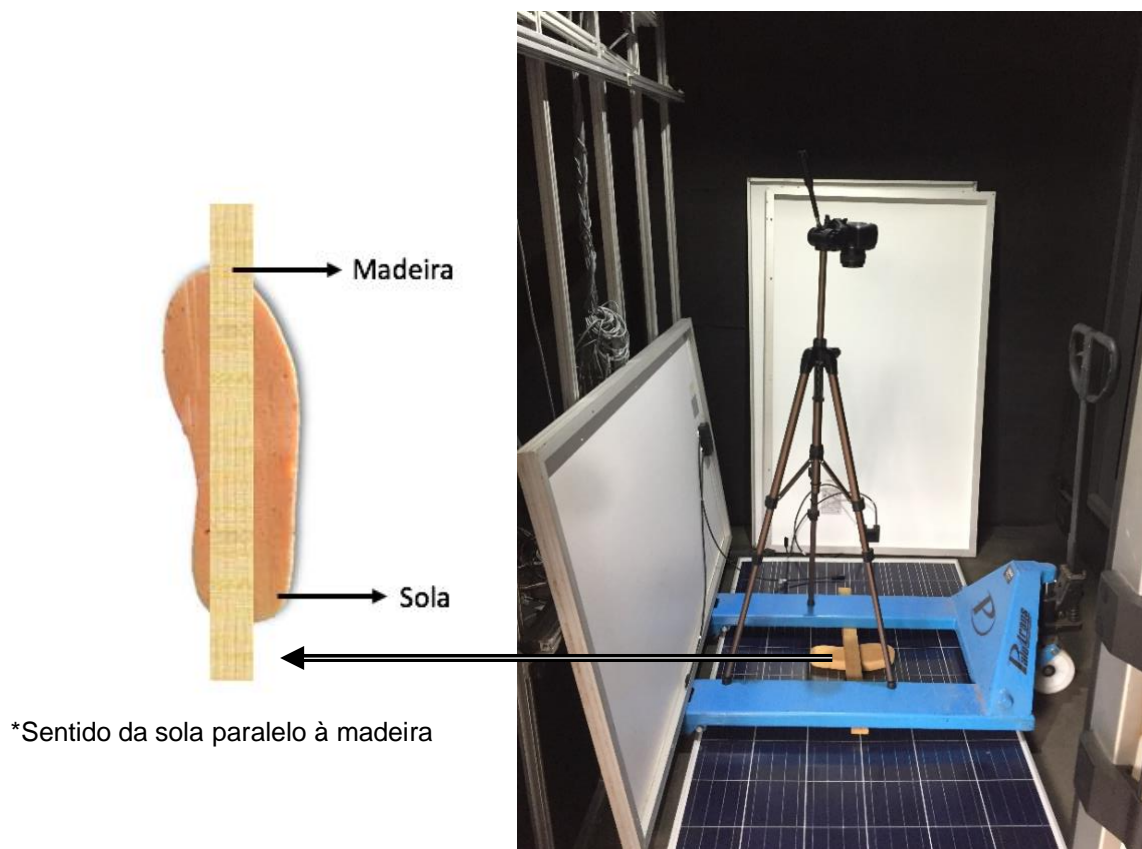
Utilizaram-se massas determinadas, previamente pesadas por uma balança digital com capacidade máxima de 200 kg. Os módulos foram

submetidos a seis ciclos de esforços com cargas gradativas, conforme mostrado na Tabela 2. Para as massas foram utilizados módulos fotovoltaicos e um recipiente com água.

Tabela 2: Ciclos de carga do ensaio mecânico

Ciclos	Massa (kg)	Pressão (kPa)
1	48,2	16,6
2	66,7	22,9
3	78,7	27,1
4	101,7	35,0
5	119,9	41,3
6	195,7	67,3

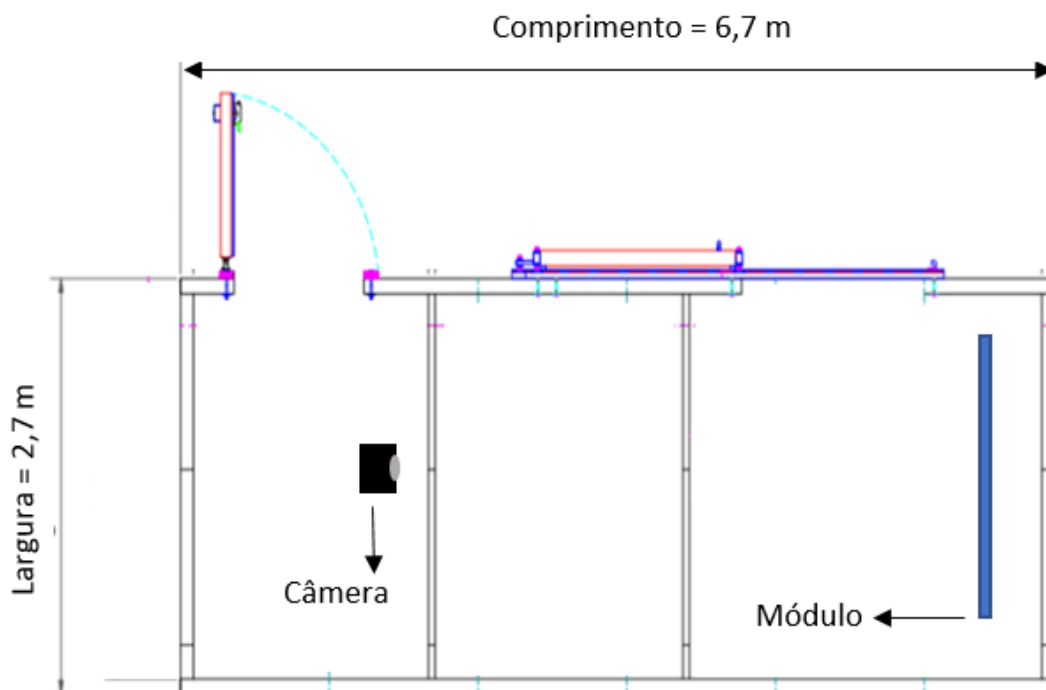
Figura 12: Bancada dos ensaios mecânicos



Todos os ensaios mecânicos foram feitos dentro do gabinete do simulador solar, onde há o bloqueio de luz natural, sendo utilizada apenas luz artificial no qual o comprimento de onda não interfere na realização das imagens da eletroluminescência. Isto é possível porque foi acoplado nas lentes da câmera um filtro que somente deixa passar a radiação infravermelha. Para as imagens, utilizou-se uma câmera fotográfica Canon EOS Rebel T6, onde a mesma possui um arranjo de sensores CCD de silício o qual é sensível na luz visível e também na banda da emissão da eletroluminescência. Em condições de fábrica o infravermelho da luz que passa pelas lentes é removido por um filtro. Este filtro original foi retirado da câmera por uma assistência técnica conforme procedimento realizado por Figueiredo et al. (2018).

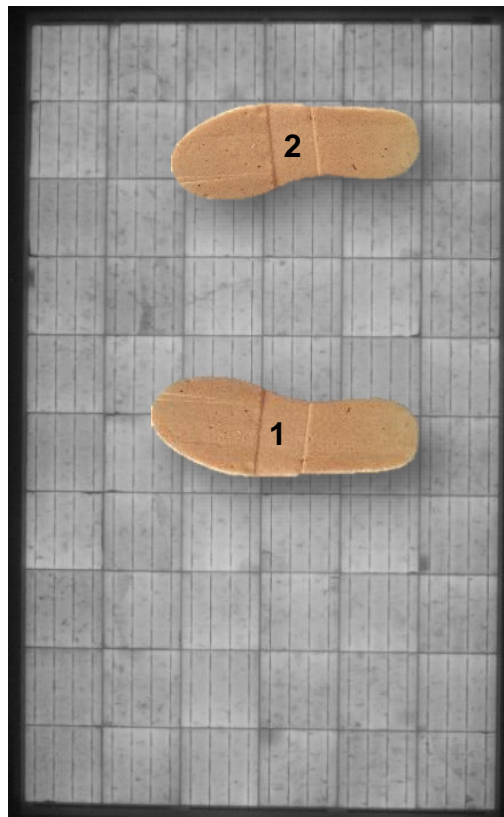
Fixou-se a câmera em um tripé onde todas as imagens foram realizadas em uma exposição de 2 segundos. A posição da câmera no gabinete do simulador está indicada na Figura 13. A distância entre a Câmera e o módulo foi de aproximadamente 5 m.

Figura 13: Vista superior do plano do simulador solar – esquema da bancada para imagens de eletroluminescência



Foi aplicada a carga sobre a superfície do módulo em duas principais regiões, tanto na parte central quanto nas células mais próximas da moldura, conforme mostra a Figura 14. Além disso, realizaram-se alguns testes do sentido do eixo da distribuição da carga sobre o módulo em diferentes sentidos, porém, por não haver mudanças significativas, optou-se por utilizar no sentido transversal, como sugerido pela imagem.

Figura 14: Local de aplicação de carga sobre a superfície do módulo



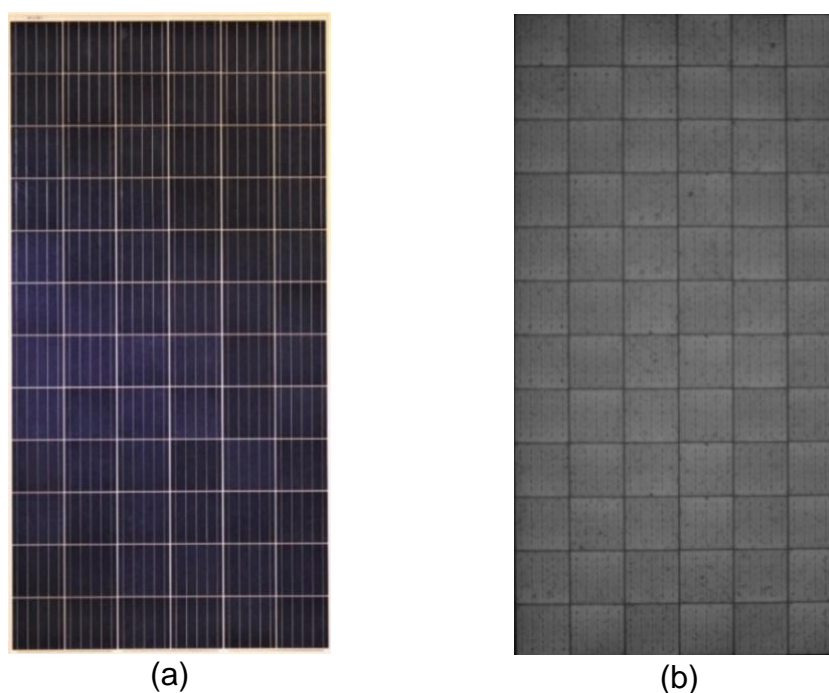
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 COMPARAÇÃO DE MÓDULOS E SEUS ASPECTOS VISUAIS E IMAGENS ELETROLUMINESCENTES

Primeiramente avaliaram-se três diferentes módulos, sendo dois módulos em ótimo estado considerando apenas a inspeção visual e um módulo com estado visualmente danificado, sendo possível verificar intensas rupturas no vidro com inspeção visual. Com o objetivo de verificar possíveis defeitos intrínsecos, foram feitas imagens fotográficas normais e imagens da emissão eletroluminescente, além da determinação de suas curvas características I-V comparando os resultados obtidos com os dados nominais.

O primeiro módulo apresentou bom aspecto tanto na imagem fotográfica quanto na imagem obtida por eletroluminescência. Ambas as imagens estão apresentadas na Figura 15. Por se tratar de um módulo policristalino, qualquer eventual ponto mais escuro percebido na imagem de eletroluminescência, é somente manifestação da natureza das células com regiões de menos corrente elétrica.

Figura 15: Registro módulo 1 – (a) inspeção visual e (b) imagem de eletroluminescência



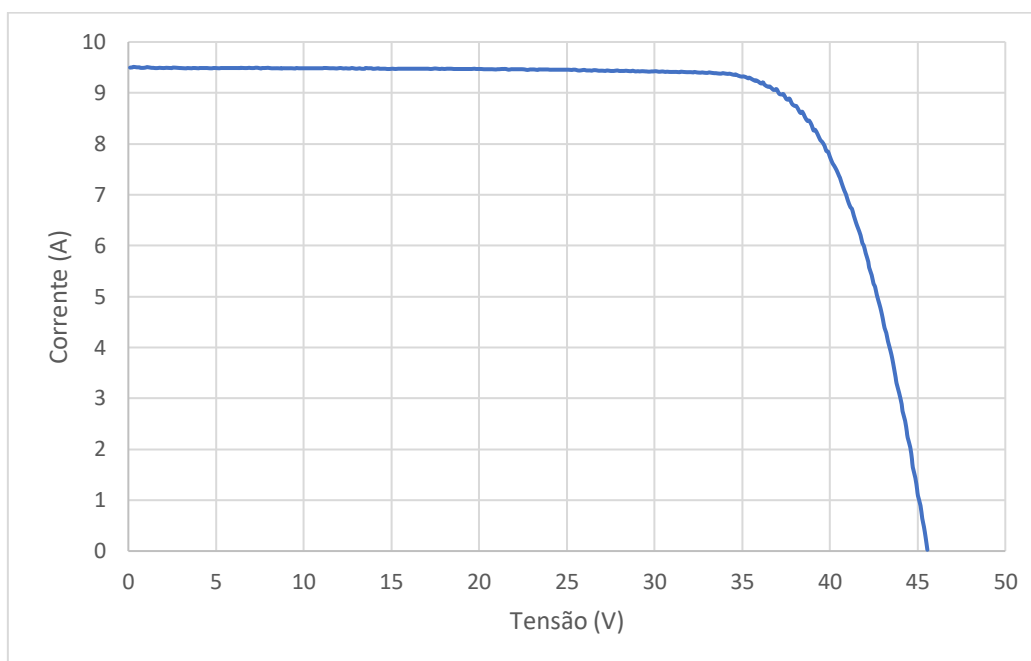
A curva I-V foi determinada utilizando o simulador solar com condições muito próximas às condições padrão. Os resultados dos parâmetros encontrados são comparados com os valores nominais na Tabela 3. Observa-se uma diferença positiva na potência máxima, de 1,5%.

Tabela 3: Comparação dos valores obtidos do módulo 1

Módulo 1	Condições nominais	Resultados obtidos (simulador)	% diferença
Potência nominal máxima (Pmax)	330 W	335 W	1,5 %
Tensão de máxima potência (Vmp)	37,8 V	37,3 V	
Corrente de máxima potência (Imp)	8,73 A	9 A	
Tensão de circuito aberto (Voc)	46,2 V	46 V	
Corrente de curto-circuito (Isc)	9,33 A	9,5 A	

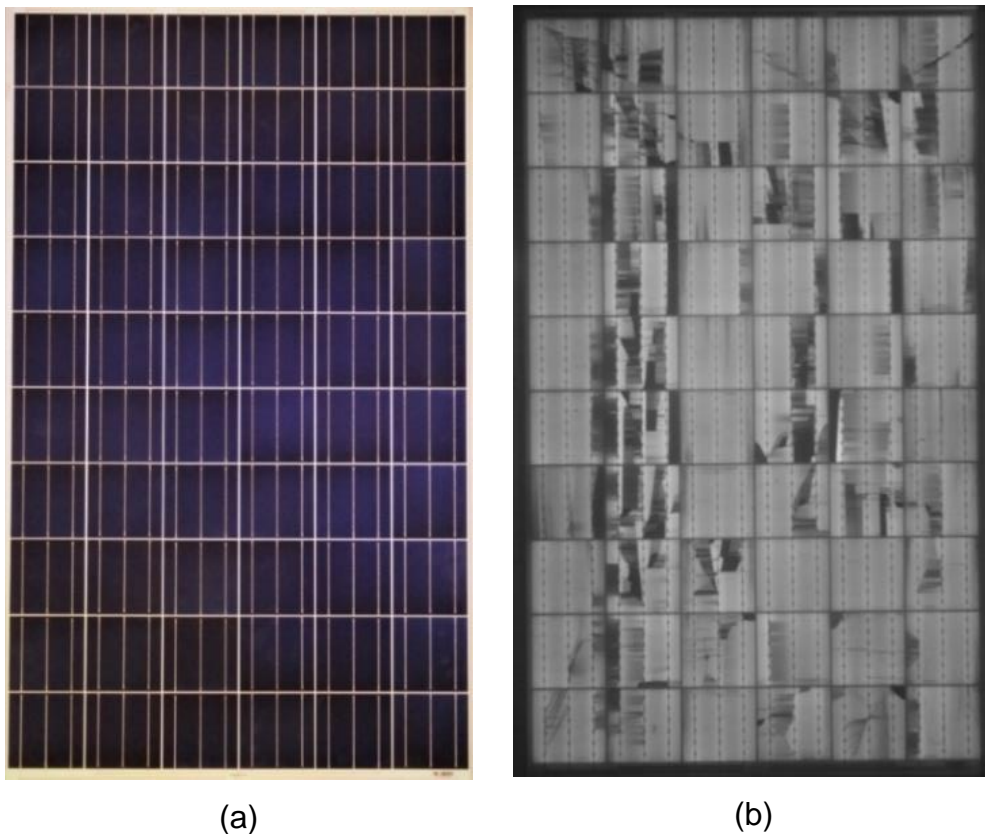
A Figura 16 apresenta a curva característica I-V obtida neste ensaio, com aspecto esperado para um módulo com bom desempenho e confirmando similaridade com os dados nominais.

Figura 16: Curva característica obtida pelo simulador solar - módulo 1



No segundo módulo testado foi verificada a ausência visual de danos ou eventuais falhas, porém, quando se realizou a imagem de eletroluminescência, foi possível observar diversas células quebradas. Conforme é possível perceber na Figura 17, há uma grande quantidade de regiões escuras. Estas regiões escuras representam a ausência de corrente elétrica através da junção. A Tabela 4 mostra os valores nominais e aqueles obtidos pela determinação da curva no simulador. Como é possível observar, houve uma redução significativa na potência do módulo quando comparada ao seu valor nominal.

Figura 17: Registro módulo 2 – (a) inspeção visual e (b) imagem de eletroluminescência

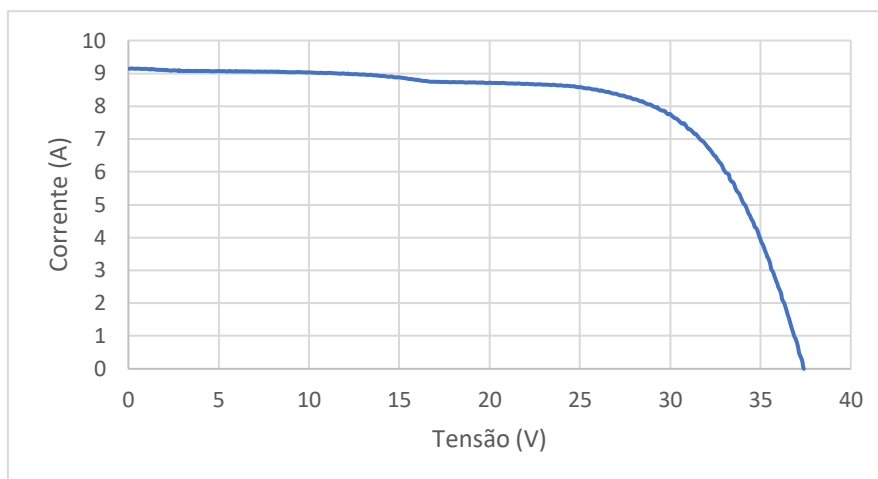


Conforme a curva característica I-V obtida para o segundo módulo testado, observa-se que houve uma alteração da corrente nas proximidades da tensão de 16 V, que provavelmente afeta na queda de corrente no ponto de máxima potência, resultando em uma diferença de 10% na potência máxima.

Tabela 4: Comparação dos valores obtidos do módulo 2

Módulo 2	Condições nominais	Resultados obtidos (simulador)	% diferença
Potência nominal máxima (Pmax)	260 W	234 W	-10 %
Tensão de máxima potência (Vmp)	30 V	29.3 V	
Corrente de máxima potência (Imp)	8,6 A	8 A	
Tensão de circuito aberto (Voc)	39 V	37,5 V	
Corrente de curto-circuito (Isc)	9,3 A	9 A	

Figura 18: Curva característica obtida pelo simulador solar - módulo 2



O terceiro módulo avaliado tinha sofrido previamente um grave impacto ao ser desprendido do seu suporte em um dia de vendaval, sendo arremessado mais de 5 metros do local da instalação. A inspeção visual mostra o vidro temperado totalmente fragmentado. A expectativa inicial seria de um módulo com fluxo de corrente interrompido, no entanto o mesmo ainda apresentou uma resposta de característica elétrica. A Figura 19 mostra sua fotografia ao lado da imagem obtida por eletroluminescência. Nesta última imagem foi possível verificar a presença de muitas células quebradas e apenas algumas células preservadas.

A curva característica deste módulo já tinha sido determinada antes do acidente e mostrava um desempenho ligeiramente menor que os valores nominais (4% na potência). Quando feito o teste no simulador solar depois do acidente os valores resultaram em uma queda muito intensa na potência, chegando a uma diferença de -80% no ponto de máxima potência. A Tabela 5 mostra as comparações dos parâmetros obtidos nas medições no simulador solar antes e depois do acidente com os valores nominais do módulo.

Figura 19: Registro módulo 3 – (a) inspeção visual e (b) imagem de eletroluminescência

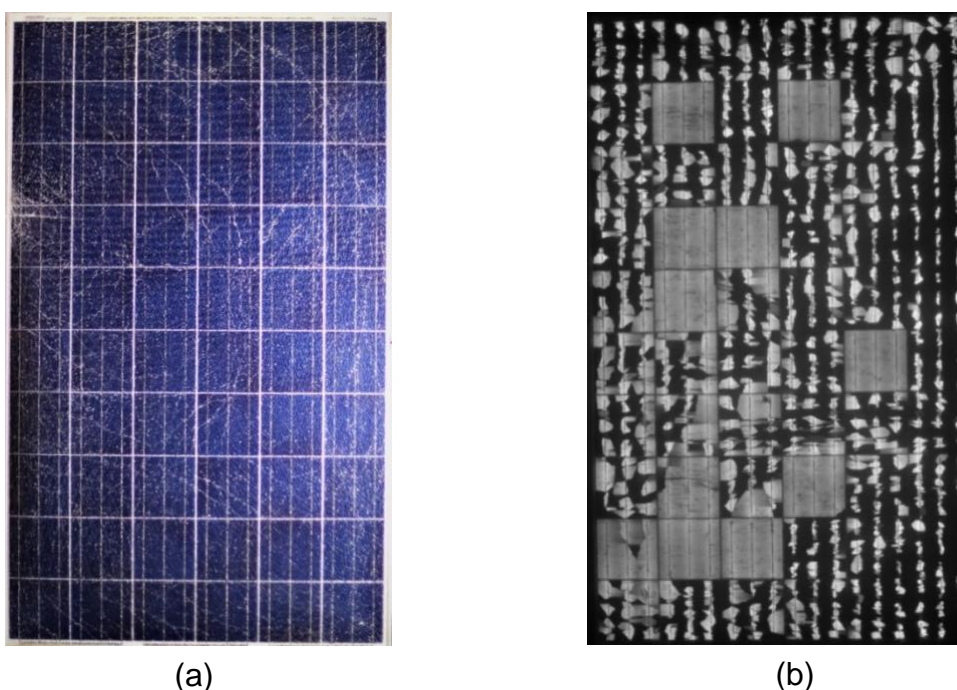
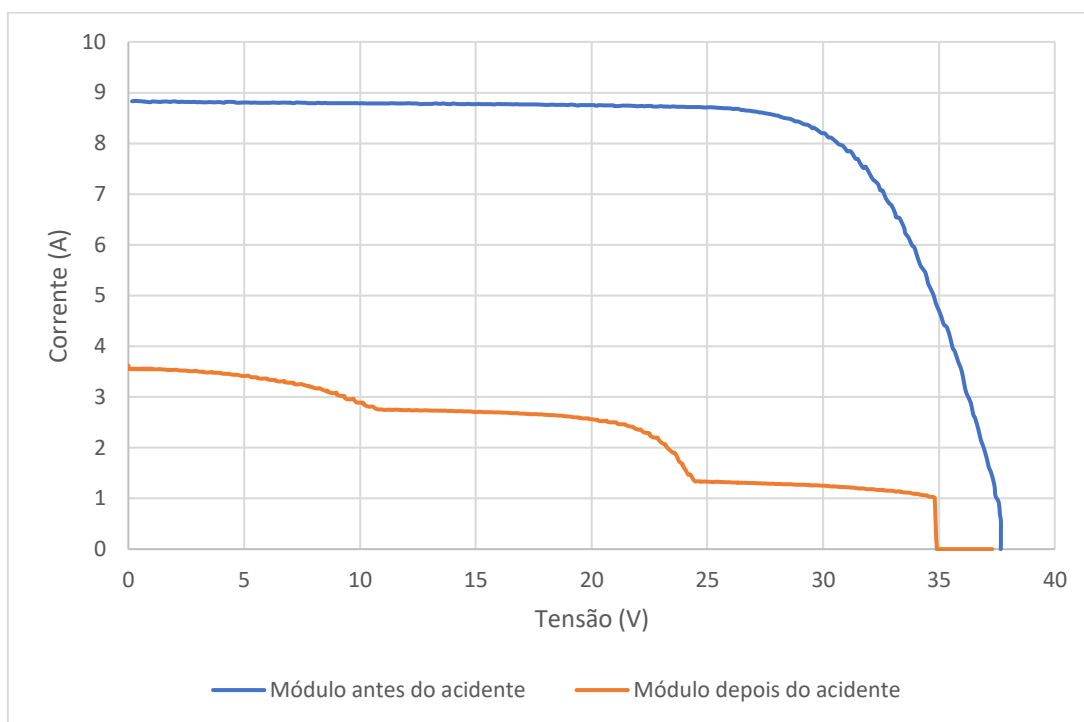


Tabela 5: Comparação dos valores obtidos do módulo 3

Módulo 3	Condições nominais	Resultados obtidos (simulador)	Condições registrada após o dano	% diferença
Potência nominal máxima (Pmax)	250 W	240 W	48 W	-81%
Tensão de máxima potência (Vmp)	30,5 V	30 V	20,5 V	
Corrente de máxima potência (Imp)	8,2 A	8,2 A	2,5 A	
Tensão de circuito aberto (Voc)	37,7 V	37,5 V	36,7 V	
Corrente de curto-circuito (Isc)	9,5 A	9 A	3,7 A	

A Figura 20 representa a curva característica I-V do terceiro módulo testado antes e depois de sofrer os danos. Foi possível observar que depois do acidente houve uma brusca variação da corrente elétrica em relação à tensão devido aos estragos causados nas células do módulo.

Figura 20: Curvas I-V do módulo 3 antes e depois do acidente



Portanto, percebe-se que as imagens de eletroluminescência e a curva I-V demonstram efetividade como ferramenta para verificar as condições dos módulos, mostrando assim defeitos intrínsecos e danos por degradação. Além disso, as imagens de eletroluminescência servem preferencialmente para identificar os defeitos nas células, com imagens em alta resolução, quando não é possível constatar na inspeção visual. A ferramenta demonstra assim uma maneira eficaz capaz de identificar células quebradas, fissuras, microfissuras ou problemas até mesmo de conexão interna entre células.

O teste no primeiro módulo, onde se encontrou boa condição na inspeção visual e na imagem de eletroluminescência, não demonstrou perdas quando comparado as condições nominais. Entretanto, o segundo e terceiro módulo testados demonstraram perdas de 10 e 80%, respectivamente.

5.2 AVALIAÇÃO QUANTITATIVA DOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Foram selecionados mais 17 módulos para análise, de uma forma que abrangesse aqueles módulos com aspecto visual preferencialmente em bom estado e de marcas aleatórias. Nesse estudo da segunda etapa foram selecionados apenas módulos de 60 células. Realizaram-se imagens de eletroluminescência com o intuito de analisar de uma maneira quantitativa e entender a relação de células quebradas, microfissuras e degradação no impacto da potência.

As Tabelas 6, 7 e 8 mostram todos os módulos analisados nessa etapa, comparando a potência nominal com a potência medida. Foi inserida uma coluna apresentando a porcentagem de diferença entre essas duas potências, sendo positivo caso o módulo apresente potência medida maior que a nominal e negativa caso contrário.

Com a finalidade de agrupar os módulos em conjuntos onde houvesse mais chance de detectar problemas, os módulos foram selecionados pela diferença entre a potência medida no simulador solar e a potência nominal. Levando em conta que a incerteza global dos ensaios de potência máxima é de 2%, os módulos foram separados entre os que apresentaram potência medida acima da potência nominal ou com menos de 2% de diferença (módulos de 4 a 14), e aqueles que apresentaram potência medida abaixo da nominal com diferença maior do que 2% (módulos de 15 a 20).

Como é possível perceber nos módulos da Tabela 6, mesmo alguns módulos com microfissuras presentes ou até mesmo com células quebradas, ainda apresentaram uma eficiência acima do nominal. O módulo 4, por exemplo, apresenta manchas pretas, o que são características do material multicristalino, e as células estão totalmente conservadas, resultando assim em uma potência superior a nominal. A Figura 21 mostra uma imagem ampliada do módulo 4, onde é possível ver as manchas pretas nas células.

Tabela 6: Módulos com potência medida dentro da incerteza global (continua)


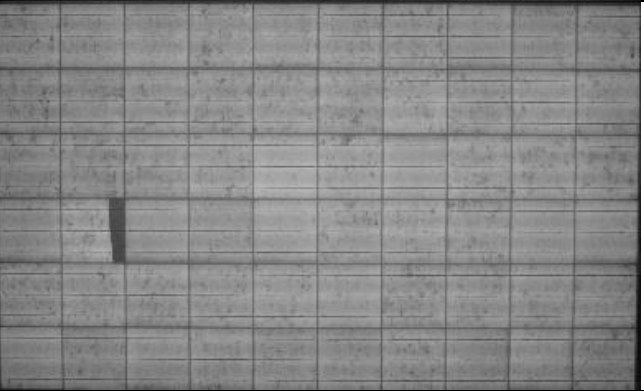
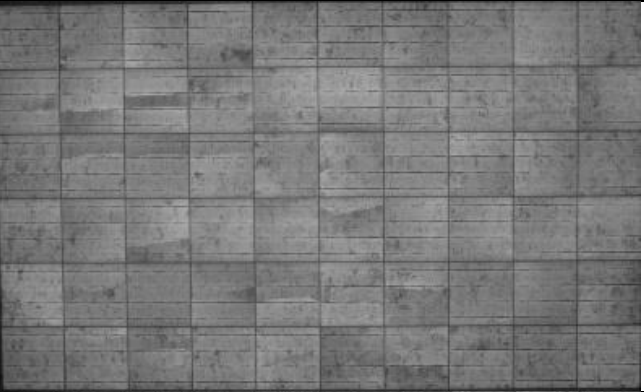
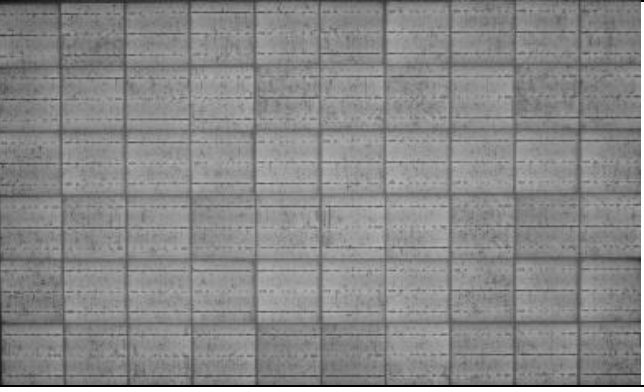
NM = Número identificador do módulo PN = Potência Nominal PM = Potência medida no simulador solar DIF = Diferença percentual da PN e PM				
NM	PN (W)	PM (W)	DIF	Imagem
4	245	253,0	3,3%	
5	250	257,4	3,0%	
6	250	254,4	1,8%	
7	260	264,9	1,5%	

Tabela 7: Módulos com potência medida dentro da incerteza global (continua)

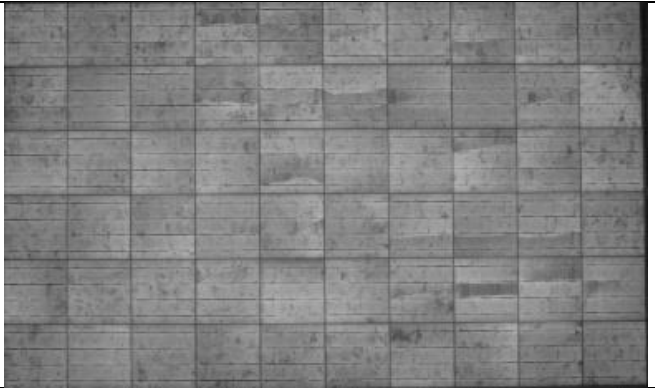
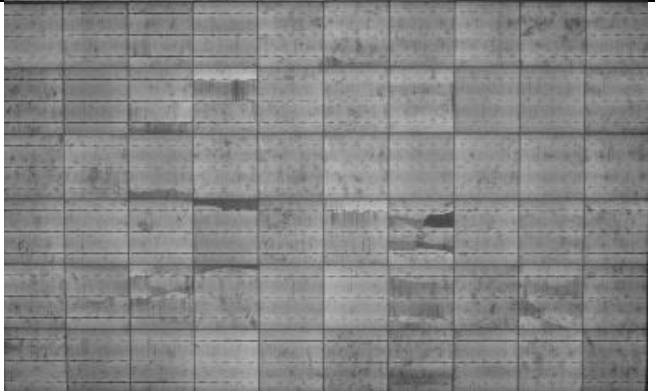


NM = Número identificador do módulo PN = Potência Nominal PM = Potência medida no simulador solar DIF = Diferença percentual da PN e PM				
NM	PN (W)	PM (W)	DIF	Imagem
8	250	252,6	0,6%	
9	250	251,5	0,6%	
10	250	250,1	0,0%	
11	270	269,0	-0,4%	

Tabela 8: Módulos com potência medida dentro da incerteza global (concluído)

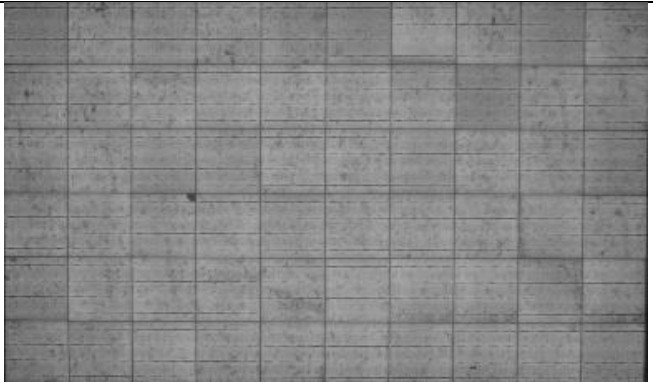
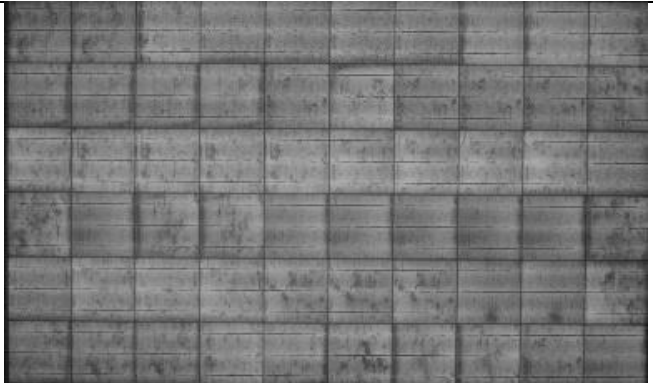

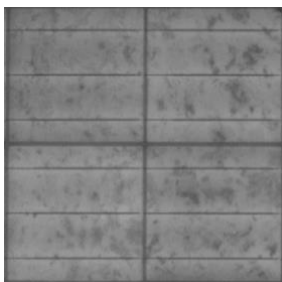
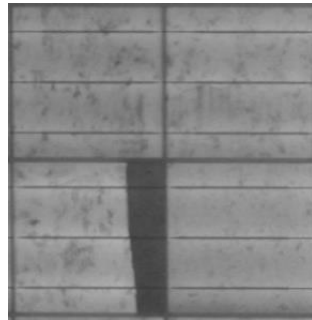
NM = Número identificador do módulo PN = Potência Nominal PM = Potência medida no simulador solar DIF = Diferença percentual da PN e PM				
NM	PN (W)	PM (W)	DIF	Imagem
12	260	258,9	-0,4%	
13	245	243,2	-0,7%	
14	250	246.0	-1,6%	

Figura 21: Imagens ampliadas das células do módulo 4



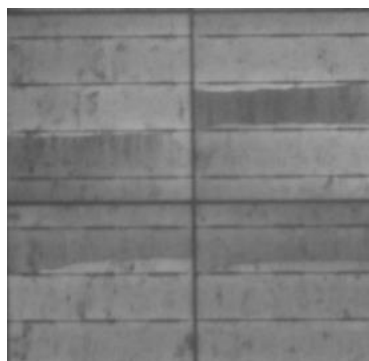
Já o módulo 5 apresentou um pedaço de uma célula quebrada, porém, esse defeito não foi capaz de gerar um impacto significativo na potência final. Além disso, as demais células apresentaram excelente aspecto. A Figura 22 mostra o local do módulo com a célula danificada.

Figura 22: Imagens ampliadas das células do módulo 5



O módulo 6 e 8 apresentaram diversas células com a presença de microfissuras, e, quando analisada a potência de saída, apresentou valores acima do nominal, conforme também é possível ver na Figura 23, onde apresenta uma imagem ampliada das células do módulo 6 e 8. Isso significa que as microfissuras não alteraram a corrente das células afetadas, fazendo com que as mesmas atuassem como vários segmentos de células em paralelo.

Figura 23: Imagens ampliadas das células - (a) módulo 6 e (b) módulo 8



(a)



(b)

Módulo 9 apresentou diversas células com microfissuras e algumas até mesmo quebradas. Entretanto, os defeitos observados não foram capazes de gerar impacto significativo no rendimento do módulo quando comparado aos valores nominais. O módulo 10, 11 e 12 apresentaram um bom aspecto na sua imagem de eletroluminescência e tiveram potências medidas com valor próximo às potências nominais. A Figura 24 mostra a imagem aproximada de algumas células danificadas do módulo 9.

Figura 24: Imagens ampliadas das células do módulo 9



Já do módulo 15 ao 20, os mesmos apresentaram uma diferença na potência significativa. Como é possível observar na Tabela 7, estes módulos apresentam imagens de eletroluminescência revelando problemas, com células quebradas, microfissuras e degradação por eventuais períodos de exposição também. Os módulos que apresentam aspectos menos degradados apresentam uma menor diferença na potência comparada com os valores nominais, porém, quando observado os módulos com maior número de células quebradas, eles apresentam uma maior diferença, havendo assim uma relação significativa do número de células afetadas no impacto da potência de saída. Como por exemplo os módulos 19 e 20, que além da emissão eletroluminescente não uniforme nas células, apresentam um alto número de células quebradas.

Tabela 9: Módulos com diferença de potência (continua)

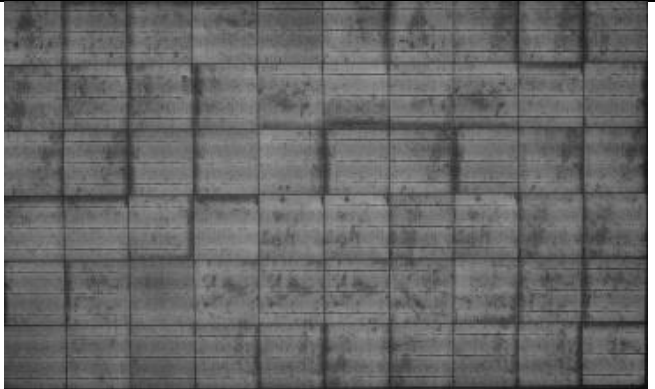
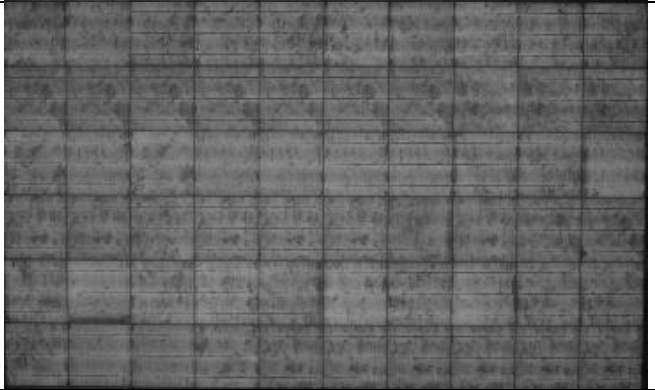
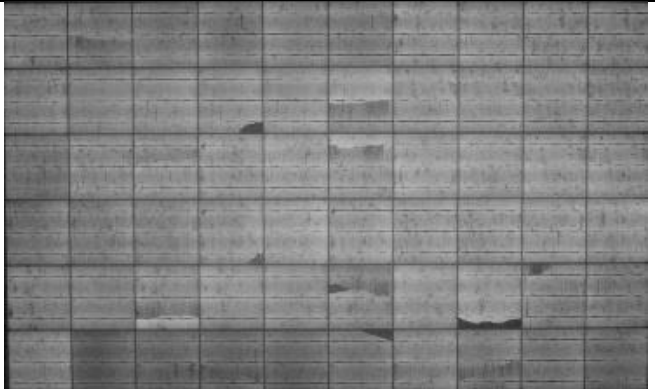

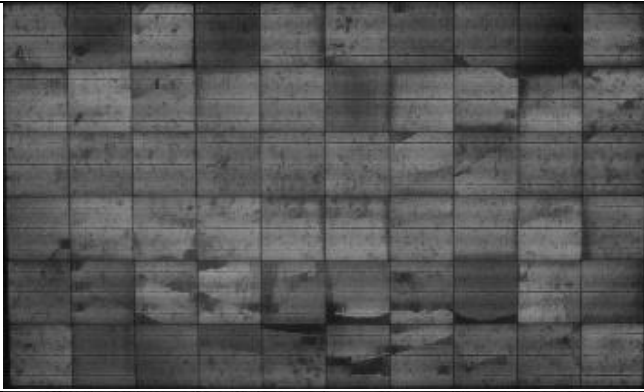
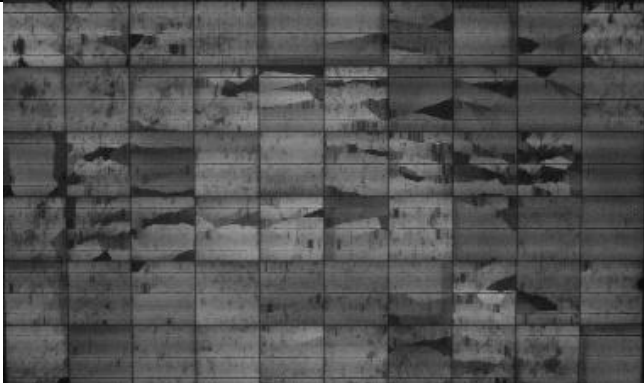
NM = Número identificador do módulo PN = Potência Nominal PM = Potência medida no simulador solar DIF = Diferença percentual da PN e PM				
NM	PN (W)	PM (W)	DIF	Imagem
15	245	238.6	-2,6%	
16	245	238.0	-2,8%	
17	265	256.6	-3,2%	
18	245	236.1	-3,6%	

Tabela 10: Módulos com diferença de potência (concluído)

NM = Número identificador do módulo PN = Potência Nominal PM = Potência medida no simulador solar DIF = Diferença percentual da PN e PM				
NM	PN (W)	PM (W)	DIF	Imagem
19	250	231.3	-7,5%	
20	250	216.6	-13,3%	

5.3 ENSAIOS MECÂNICOS

Para os ensaios mecânicos foram selecionados 4 módulos para os testes, avaliando assim os impactos antes e depois de aplicar a carga. Foram escolhidos 3 módulos com boas condições, na avaliação de inspeção visual e nas imagens de eletroluminescência além de valores similares aos nominais na sua caracterização elétrica. Além disso, o módulo 24, que estava bastante danificado, foi submetido aos esforços mecânicos com intuito de entender seu comportamento.

Tabela 11: Módulos selecionados para os testes mecânicos

Módulos	Potência nominal (W)	Potência medida antes do ensaio mecânico (W)	Número de células	Área (m ²)	Peso (kg)
Módulo 21	250	250,0	60 células	1,67	19,8
Módulo 22	260	258,9	60 células	1,67	19,6
Módulo 23	260	223,6	60 células	1,67	21,1
Módulo 24	330	328,5	72 células	1,94	22,0

Como referido no capítulo da metodologia, foram feitos ciclos de carga sobre a superfície dos módulos com a intenção de simular cargas de pisadas, tentando representar uma situação de instalação de geradores fotovoltaicos.

Além disso, foram feitos ciclos de cargas na região central do módulo e nas células mais próximas da moldura como já citado na metodologia na Figura 14. Realizaram-se 6 ciclos de carga, registrando o momento que a carga está sendo aplicada e logo após sem carga, possibilitando assim a análise do comportamento das células durante cada aplicação.

5.3.1 Ensaio Módulo 21

A Tabela 12 apresenta resultados dos testes realizados no módulo 21, com aplicação da carga na superfície na região central.

Tabela 12: Ensaio mecânico módulo 21 – região central

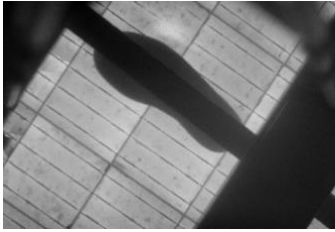
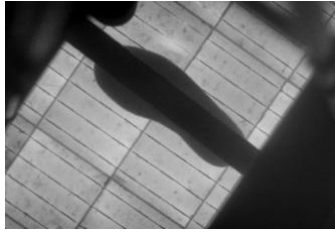

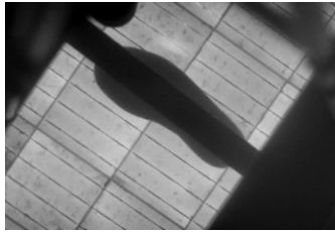
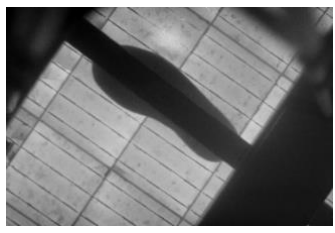
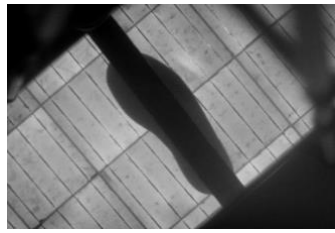
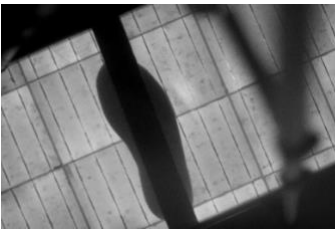
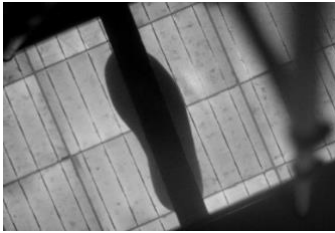




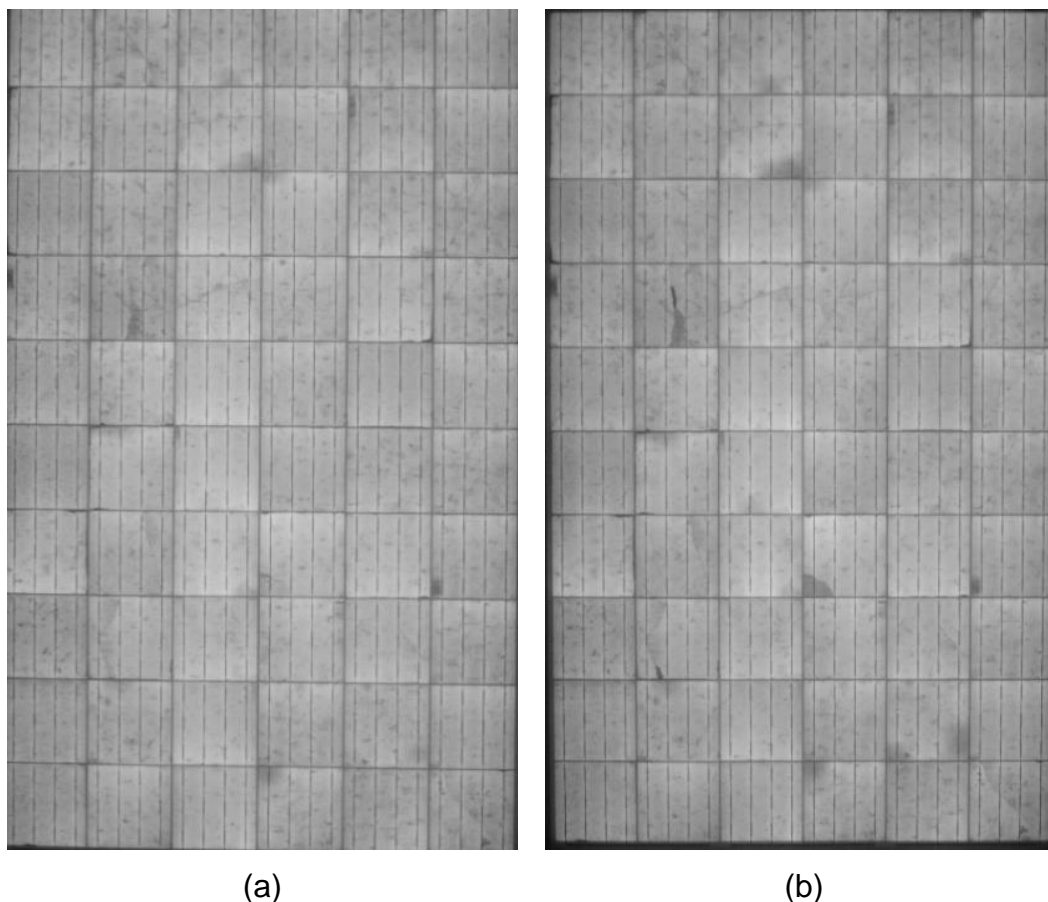
Ciclos	Com carga	Sem carga
Ciclo 1 (48,2 kg)		
Ciclo 2 (66,7 kg)		
Ciclo 3 (78,7 kg)		
Ciclo 4 (101,7 kg)		
Ciclo 5 (119,9 kg)		
Ciclo 6 (195,7 kg)		

Figura 25: Ensaio módulo 21 na região central – (a) antes do ensaio e (b) depois do ensaio



Como se observa na Tabela 12, durante o ensaio os impactos as fissuras não foram percebidas pela eletroluminescência. Na comparação entre as imagens antes e depois do ensaio, porém, verifica-se que houve aumento de microfissuras e pequenos escurecimentos em algumas regiões do módulo. A Tabela 13 representa o teste do módulo 21 na região mais próxima da moldura.

Nas imagens da Tabela 13, foi possível observar que quando aplicada a carga, apareceram regiões com ausência de corrente elétrica, entretanto, quando a carga deixava de ser aplicada, algumas regiões escuras voltaram a conduzir corrente elétrica.

Quando comparadas as imagens é possível perceber o aumento de microfissuras devido às cargas mecânicas do ensaio. A Figura 27 mostra alguns exemplos de células que acabaram sofrendo mais danos.

Tabela 13: Ensaio mecânico módulo 21 – região lateral

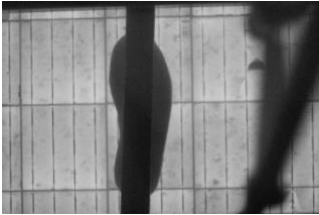











Ciclos	Com carga	Sem carga
Ciclo 1 (48,2 kg)		
Ciclo 2 (66,7 kg)		
Ciclo 3 (78,7 kg)		
Ciclo 4 (101,7 kg)		
Ciclo 5 (119,9 kg)		
Ciclo 6 (195,7 kg)		

Figura 26: Ensaio módulo 21 na região lateral – (a) antes do ensaio e (b) depois do ensaio

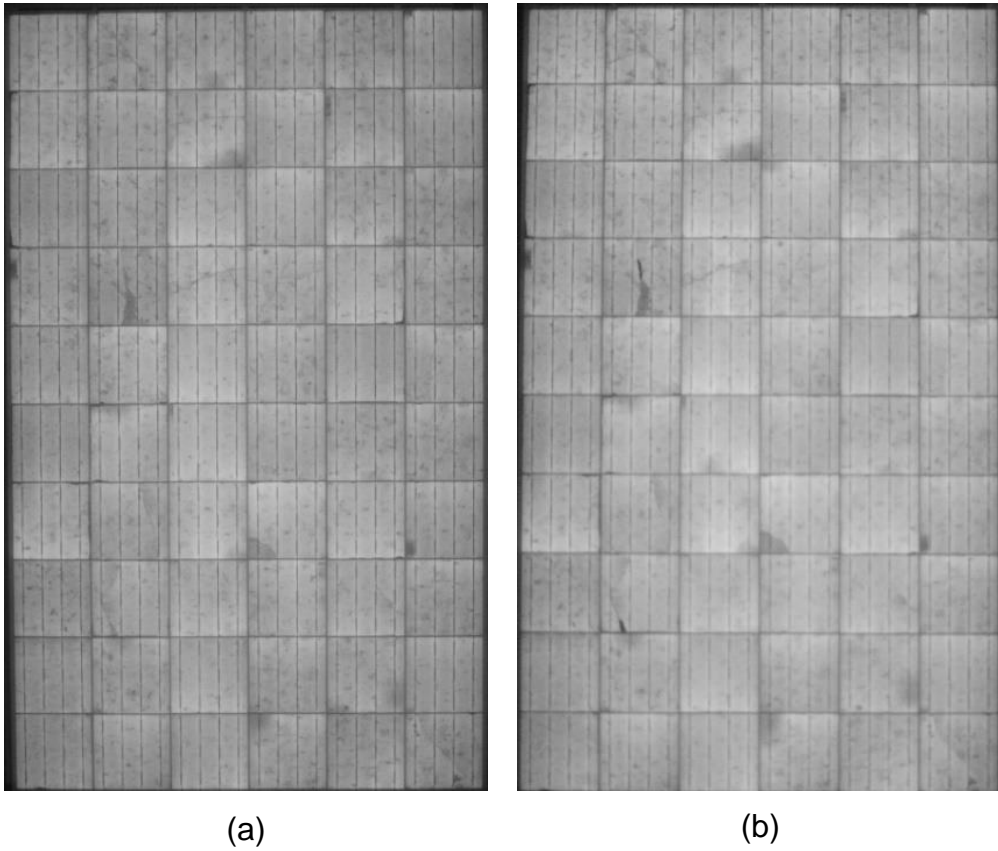
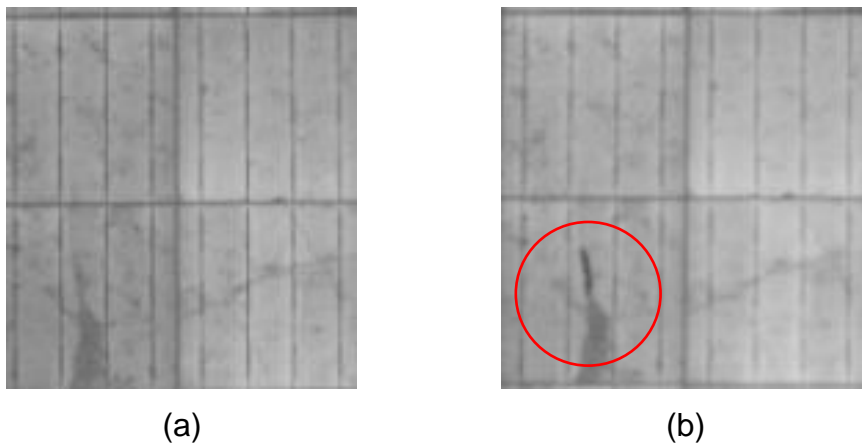


Figura 27: Comparação de células módulo 21 – (a) antes do ensaio e (b) depois do ensaio



Também se compararam dados elétricos para avaliar o impacto das novas microfissuras na potência do módulo, conforme resultados apresentados na Tabela 14.

Tabela 14: Comparação do módulo 21 antes e depois dos ensaios mecânicos

Módulo 23	Condições nominais	Resultados obtidos (simulador antes do ensaio)	Resultados obtidos (simulador depois do ensaio)	% diferença
Potência nominal máxima (Pmax)	250 W	250 W	248 W	-0,8%
Tensão de máxima potência (Vmp)	31,29 V	30,5 V	30,32 V	
Corrente de máxima potência (Imp)	7,99 A	8,21 A	8,2 A	
Tensão de circuito aberto (Voc)	37,5 V	37,8V	37,6 V	
Corrente de curto-circuito (Isc)	8,5 A	8,75 A	8,7 A	

A queda de potência determinada pelos ensaios de característica elétrica foi bem pequena. Quando observado nas imagens de eletroluminescência também é possível perceber que não houve grandes mudanças e aumento substancial de danos nas células.

5.3.1 Ensaio módulo 22

A Tabela 15 representa os testes realizados no módulo 22, com aplicação na superfície na região central. Foi aplicado o mesmo procedimento do módulo 21. Percebe-se que o módulo 22 já apresentou a partir do segundo ciclo um aumento na microfissura, resultando no aparecimento de um pedaço da célula mais escura quando a carga estava aplicada. Entretanto, quando a carga deixava de ser aplicada, a região escura voltava a conduzir normalmente. Conforme os ciclos foram avançando, cada vez mais a região escura foi aumentando.

Quando comparado o aspecto do módulo antes e depois do ensaio mecânico, percebe-se que não houve mudanças significativas em termos de percepção de células quebradas ou aumento substancial de microfissuras. A Figura 28 demonstra uma comparação entre algumas células antes e depois do

ensaio, onde mostra que de maneira sutil o pedaço de célula quebrada ficou um pouco mais escura, indicando que aquela região está conduzindo menos que anteriormente.

Tabela 15: Ensaio mecânico módulo 22 – região central












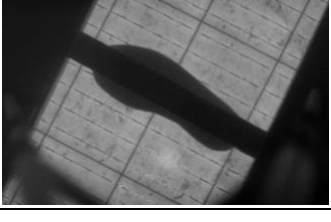
Ciclos	Com carga	Sem carga
Ciclo 1 (48,2 kg)		
Ciclo 2 (66,7 kg)		
Ciclo 3 (78,7 kg)		
Ciclo 4 (101,7 kg)		
Ciclo 5 (119,9 kg)		
Ciclo 6 (195,7 kg)		

Figura 28: Ensaio módulo 22 na região central – (a) antes do ensaio e (b) depois do ensaio

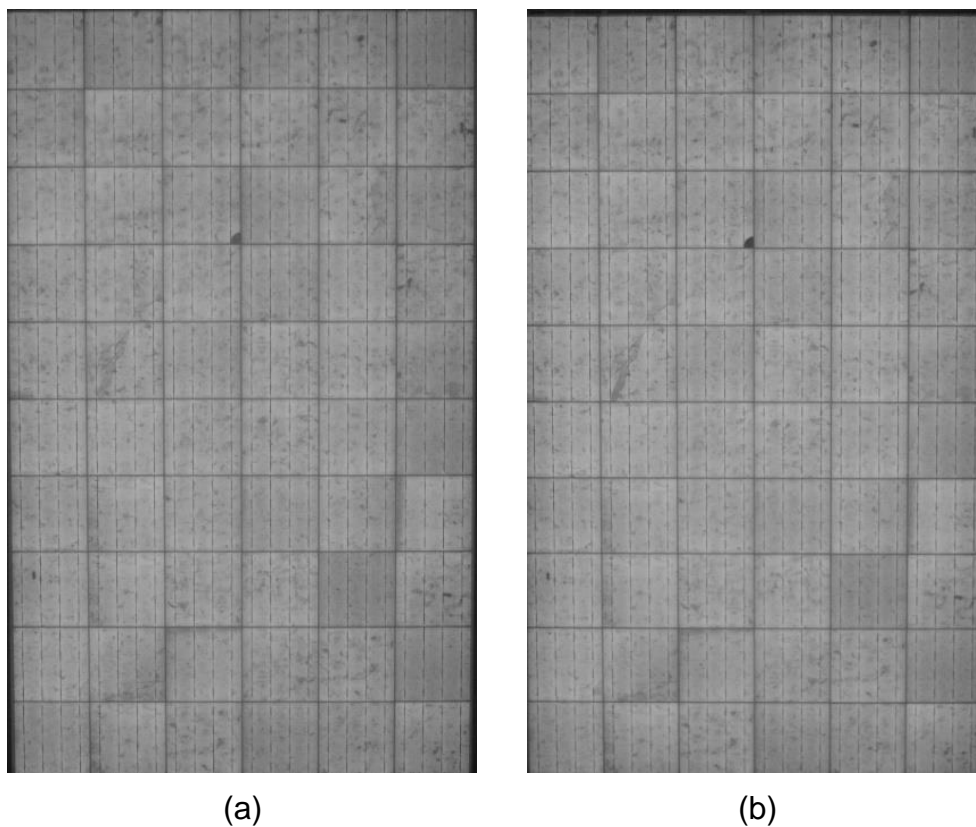
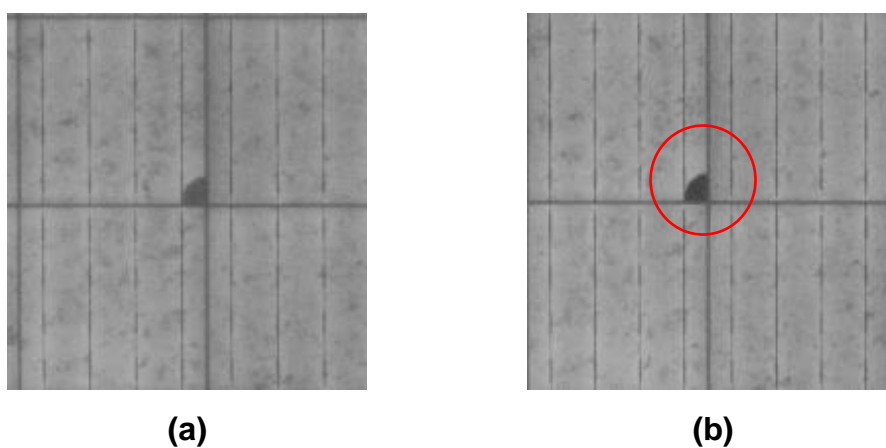
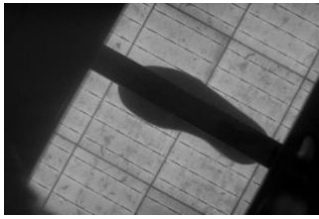
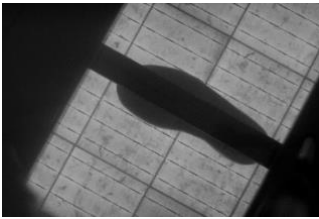
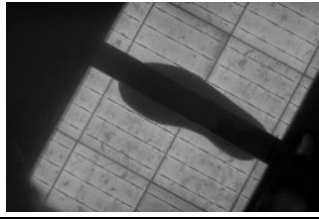
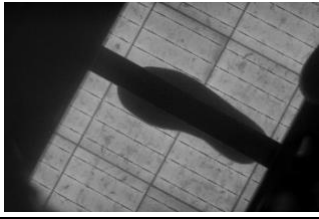
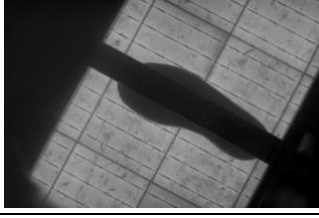
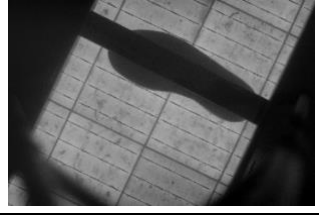
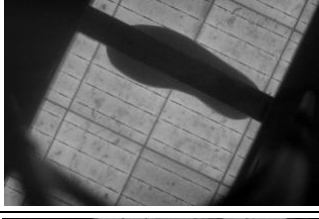
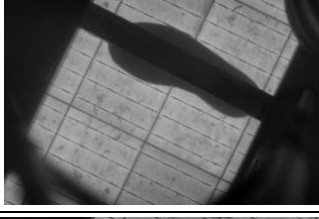
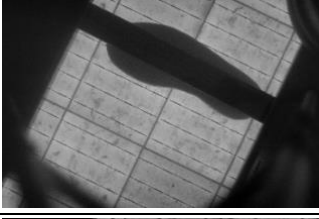
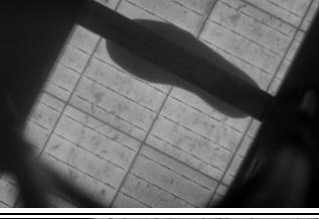
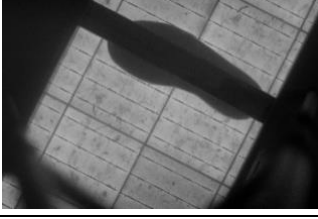
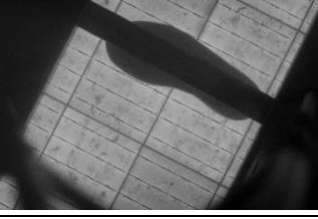


Figura 29: Comparação de células módulo 22 – (a) antes do ensaio e (b) depois do ensaio



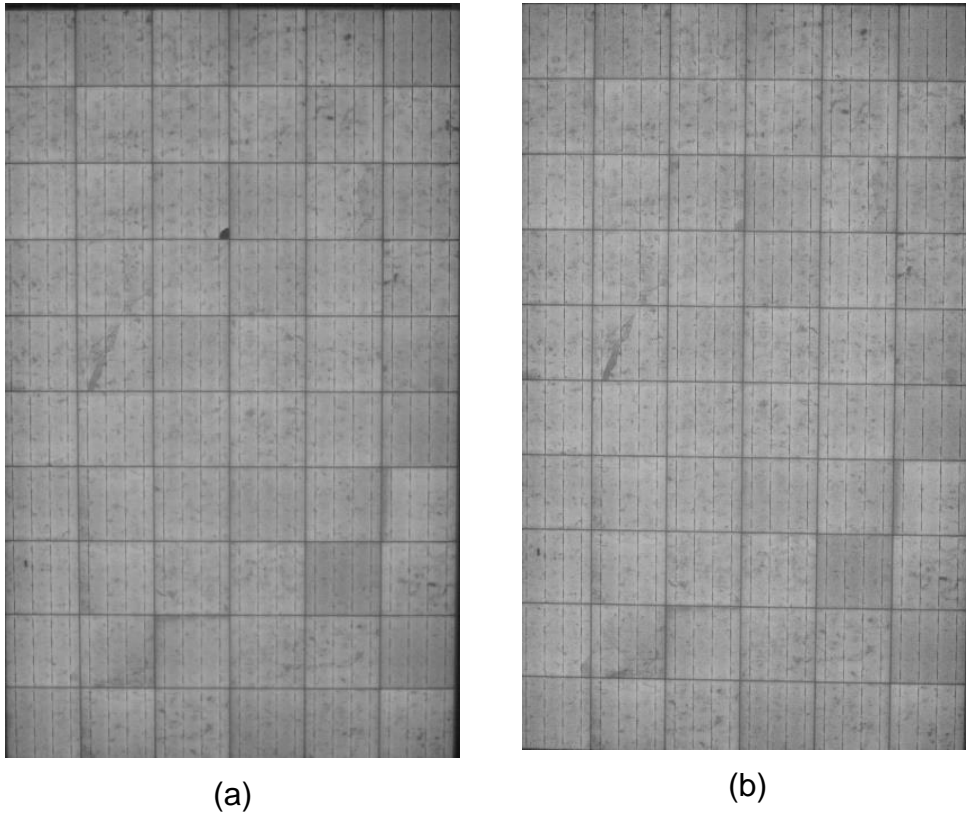
A Tabela 16 representa o teste mecânico do Módulo 22 na região mais próxima da moldura.

Tabela 16: Ensaio mecânico módulo 22 – região lateral

Ciclos	Com carga	Sem carga
Ciclo 1 (48,2 kg)		
Ciclo 2 (66,7 kg)		
Ciclo 3 (78,7 kg)		
Ciclo 4 (101,7 kg)		
Ciclo 5 (119,9 kg)		
Ciclo 6 (195,7 kg)		

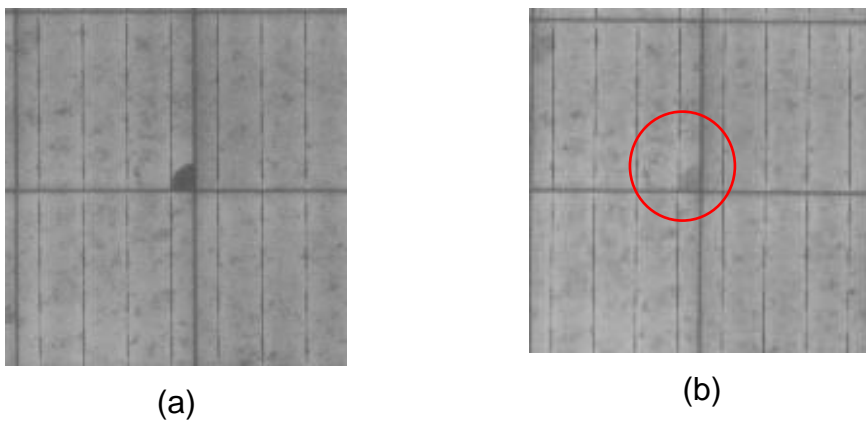
No teste mecânico próximo a moldura, não se observou nenhum impacto significativo aparente. A Figura 30 compara as imagens de eletroluminescência antes e o depois desse ensaio mecânico, mostrando que não houve percepção do aumento de microfissuras no módulo e sim, de modo oposto ao esperado, houve contato na região do módulo que apresentava um defeito de célula quebrada e falta de contato.

Figura 30: Ensaio módulo 22 na região lateral – (a) antes do ensaio e (b) depois do ensaio



A Figura 31 mostra por comparação das imagens de eletroluminescência das células do módulo antes e depois do ensaio mecânico a volta do contato em uma das células quebradas.

Figura 31: Comparação de células módulo 22 – (a) antes do ensaio e (b) depois do ensaio



Conforme a metodologia, realizaram-se os ensaios no simulador solar para entender possíveis mudanças nas características elétricas do módulo. A Tabela 17 apresenta a comparação dos resultados obtidos antes e depois do ensaio mecânico.

Tabela 17: Comparação do módulo 22 antes e depois dos ensaios mecânicos

Módulo 22	Condições nominais	Resultados obtidos (simulador antes do ensaio)	Resultados obtidos (simulador depois do ensaio)	% diferença
Potência nominal máxima (P _{max})	260 W	258,9 W	260,7 W	0,7%
Tensão de máxima potência (V _{mp})	30,8 V	30,4 V	30,44 V	
Corrente de máxima potência (I _{mp})	8,45 A	8,5 A	8,6 A	
Tensão de circuito aberto (V _{oc})	37 V	37,5 V	37,5 V	
Corrente de curto-circuito (I _{sc})	9,16 A	9,03 A	9,08 A	

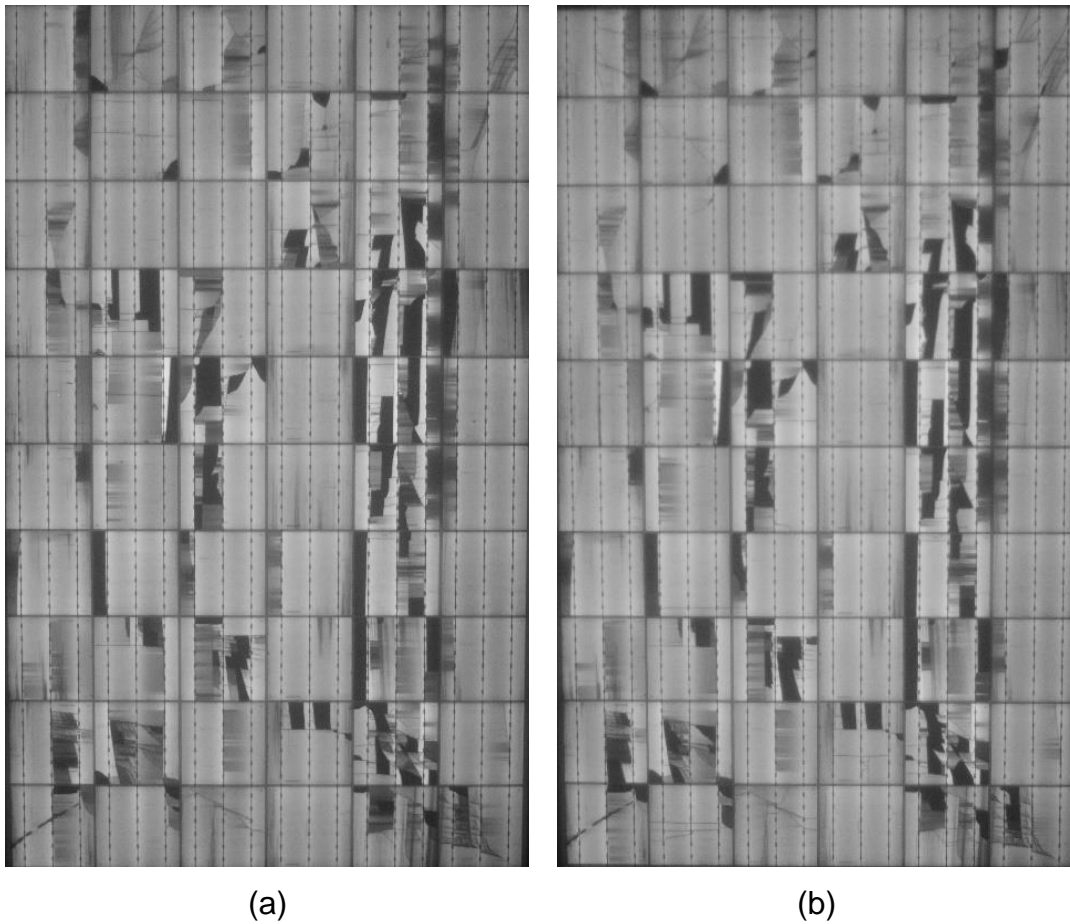
Como foi possível observar na Tabela 17, a potência do módulo eventualmente teve um acréscimo na saída de quase 2 W. Essa variação não foi de importância relevante, porém, tendo em vista que a única mudança percebida na imagem de eletroluminescência foi o retorno do contato, é provável que isto tenha ocasionado o aumento.

5.3.3 Ensaio módulo 23

Devido ao resultado do módulo 22, onde após o ensaio mecânico o módulo obteve um acréscimo na sua potência, escolheu-se um módulo previamente observado nas imagens de eletroluminescência, onde se encontravam diversas células quebradas e realizou-se um ensaio mecânico apenas para verificar qual comportamento seria percebido. Além disso, foram

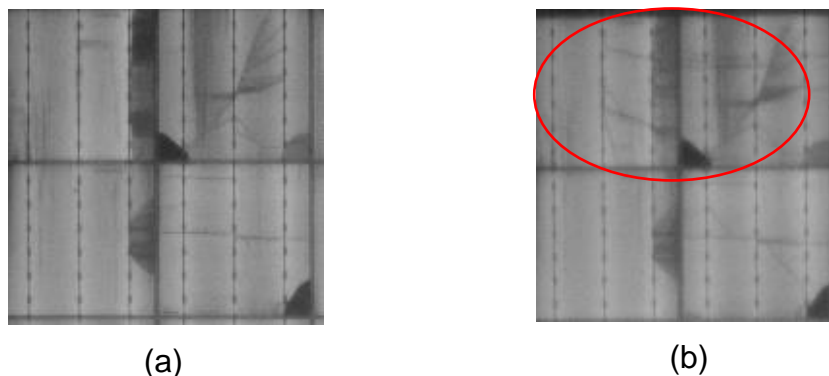
extraídas as medidas do módulo antes e depois do ensaio mecânico no simulador solar. A Figura 32 mostra as imagens de eletroluminescência do módulo antes e depois do ensaio mecânico.

Figura 32: Comparação do módulo 23 – (a) antes do ensaio e (b) depois do ensaio



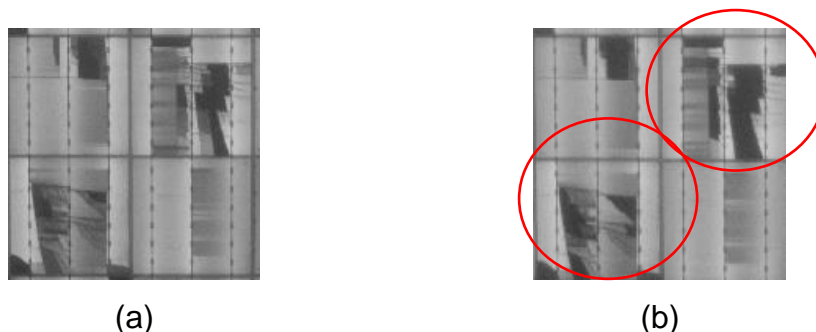
Foram observadas alterações nas imagens de eletroluminescência após o ensaio mecânico em um módulo já bastante danificado. A Figura 33 mostra algumas células que eventualmente ficaram com regiões menos escuras, porém, também apareceram novas microfissuras.

Figura 33: Comparação de células do módulo 23 – (a) antes do ensaio e (b) depois do ensaio



Algumas células, como mostra a Figura 34, apesar de previamente já danificadas, aumentaram as regiões que antes ainda estavam de alguma maneira conduzindo corrente elétrica, depois do ensaio passaram a bloquear totalmente a corrente, visto que apresentaram uma região escurecida em algumas partes da célula.

Figura 34: Danos das células do módulo 23 – (a) antes do ensaio e (b) depois do ensaio



Foram observadas no módulo 23 diversas regiões que ganharam muitas microfissuras, entretanto, algumas regiões que estavam com ausência de corrente voltaram a conduzir. Assim como mostra a Tabela 18, dos dados elétricos antes e depois do ensaio mecânico, houve um acréscimo na potência máxima de aproximadamente 4,3 W. A hipótese desse aumento da potência máxima é que quando foi aplicada a carga mecânica sobre a superfície do módulo, alguns contatos se reconectaram e assim voltaram a conduzir melhor que anteriormente.

Tabela 18: Comparação do módulo 23 antes e depois dos ensaios mecânicos

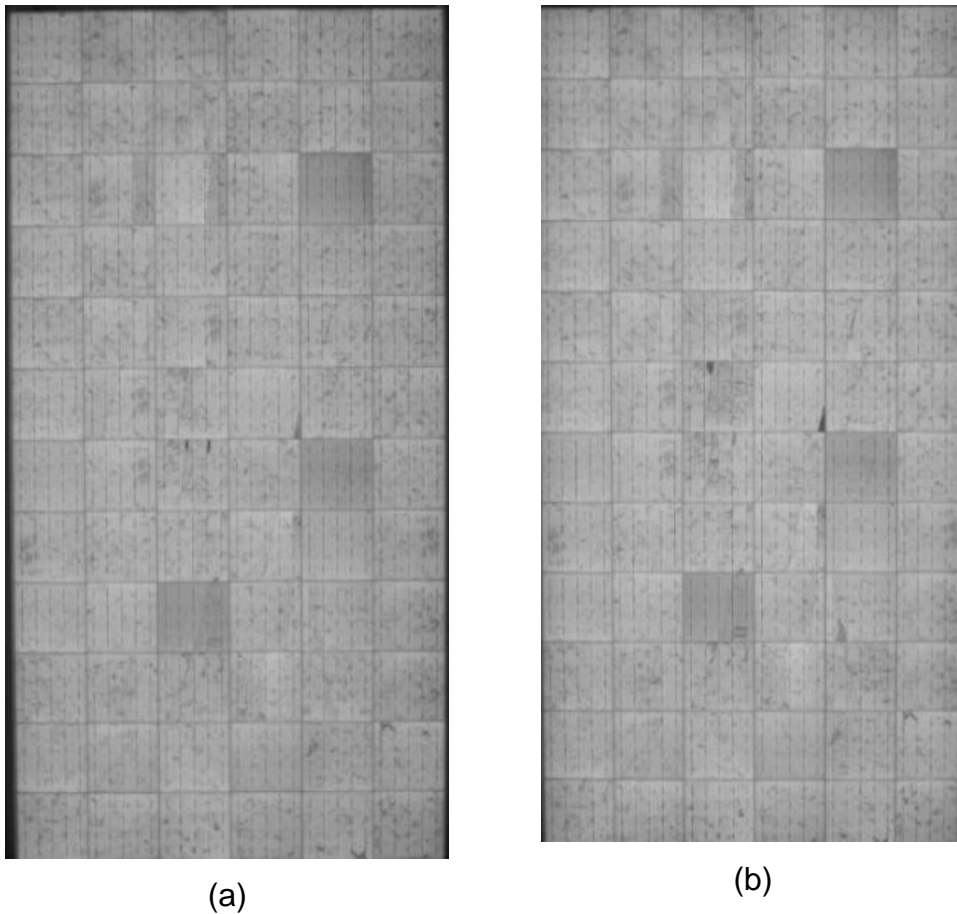
Módulo 23	Condições nominais	Resultados obtidos (simulador antes do ensaio)	Resultados obtidos (simulador depois do ensaio)	% diferença
Potência nominal máxima (Pmax)	260 W	223,6 W	227,9 W	1,89 %
Tensão de máxima potência (Vmp)	31,4 V	28,9 V	29,43 V	
Corrente de máxima potência (Imp)	8,37 A	7,7 A	7,7 A	
Tensão de circuito aberto (Voc)	38,4 V	37,5 V	37,5 V	
Corrente de curto-circuito (Isc)	8,94 A	8,97 A	8,99A	

5.3.4 Ensaio módulo 24

O último módulo escolhido para ser submetido aos ensaios mecânicos foi de potência nominal de 330 W, 72 células, com uma área de 1,94 m², ou seja, maior quando comparado aos módulos testados anteriormente. O intuito de variar o módulo era testar o mesmo procedimento, porém, agora em um módulo com fabricação mais recente, de tecnologia compatível com aquelas que atualmente são amplamente comercializadas no Brasil e também no mundo todo.

Logo no primeiro ciclo já foi possível observar a presença das microfissuras, bloqueando a corrente elétrica em algumas determinadas regiões. Conforme o avanço dos ciclos de carga, os danos das células foram aparecendo mais, mas ainda quando retirada a carga o módulo retornava a conduzir normalmente, salvo algumas regiões. A Figura 35 mostra imagens de eletroluminescência do módulo obtidas antes e depois dos ensaios. Na Tabela 19 aparecem resultados das imagens de eletroluminescência durante o ensaio mecânico na superfície do módulo na região central. Já na Tabela 20 estão as imagens de eletroluminescência durante o ensaio no módulo na região mais próxima a moldura.

Figura 35: Ensaio módulo 24 na região central– (a) antes do ensaio e (b) depois do ensaio



Já no módulo 24, no primeiro ensaio já foi capaz de aumentar o número de danos no módulo. A Figura 36 mostra a comparação de algumas células, onde é possível observar alguns danos. O mesmo comportamento foi observado quando realizado o ensaio nas regiões mais próximas à moldura. Como é visto na Tabela 19, já no primeiro ciclo é possível observar os impactos mecânicos sobre o módulo.

Quando comparadas as características elétricas do módulo antes e depois do ensaio mecânico, verificou-se uma diferença negativa de 1,7 W, indicando assim uma perda na potência máxima devido ao ensaio mecânico. A Tabela 21 mostra a comparação do módulo 24 antes e depois do ensaio mecânico.

Tabela 19: Ensaio mecânico módulo 24 – região central

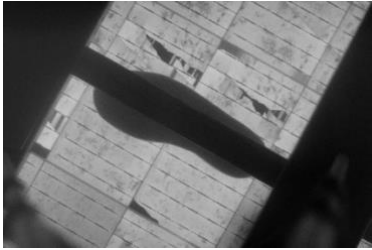
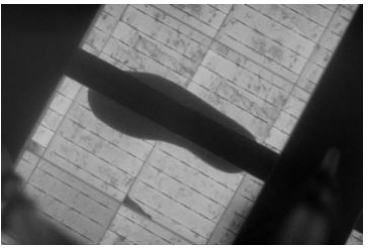
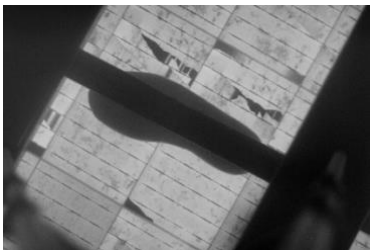
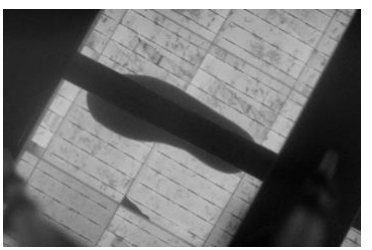

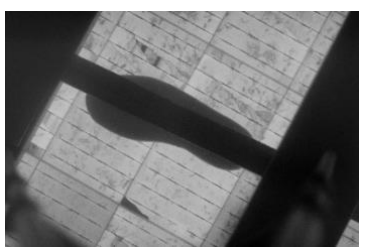
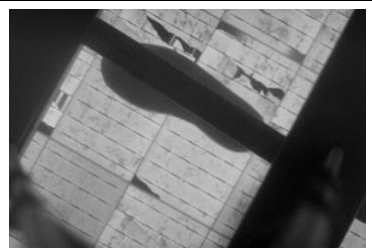


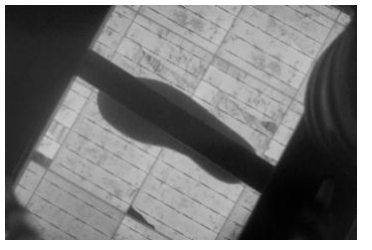
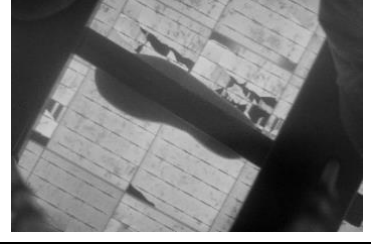

Ciclos	Com carga	Sem carga
Ciclo 1 (48,2 kg)		
Ciclo 2 (66,7 kg)		
Ciclo 3 (78,7 kg)		
Ciclo 4 (101,7 kg)		
Ciclo 5 (119,9 kg)		
Ciclo 6 (195,7 kg)		

Tabela 20: Ensaio mecânico módulo 24 – região lateral


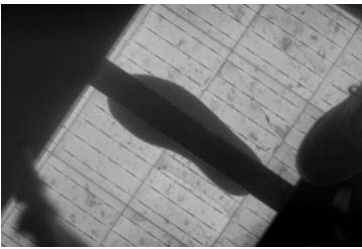
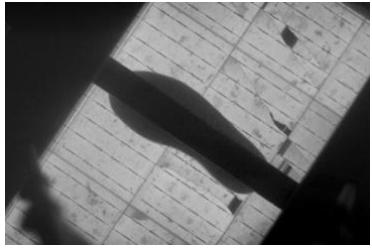
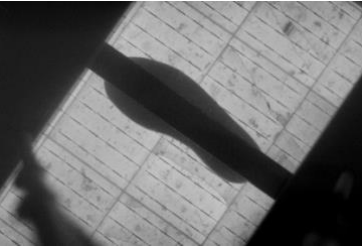
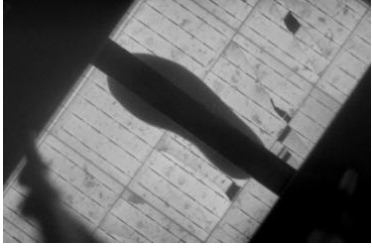
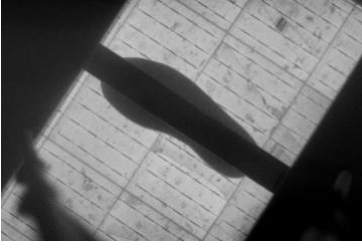
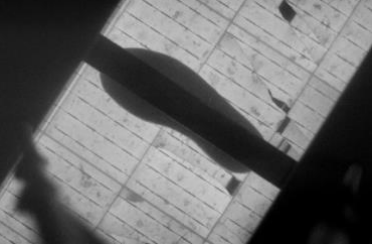
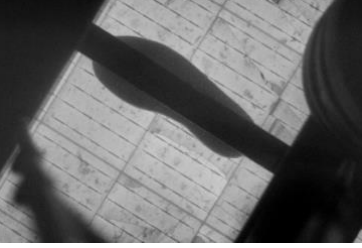
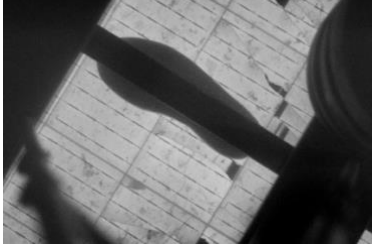
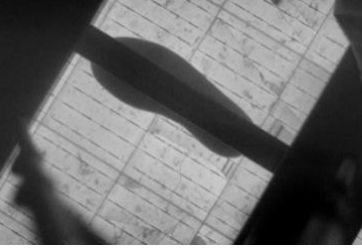
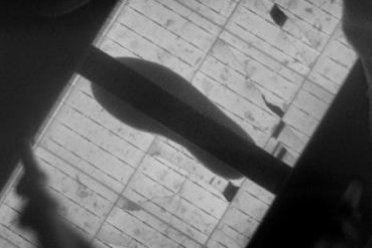
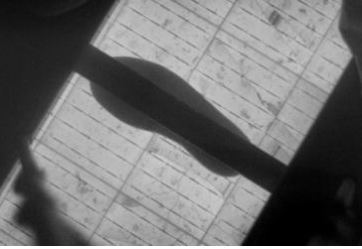
Ciclos	Com carga	Sem carga
Ciclo 1 (48,2 kg)		
Ciclo 2 (66,7 kg)		
Ciclo 3 (78,7 kg)		
Ciclo 4 (101,7 kg)		
Ciclo 5 (119,9 kg)		
Ciclo 6 (195,7 kg)		

Figura 36: Danos das células do módulo 24– (a) antes do ensaio e (b) depois do ensaio

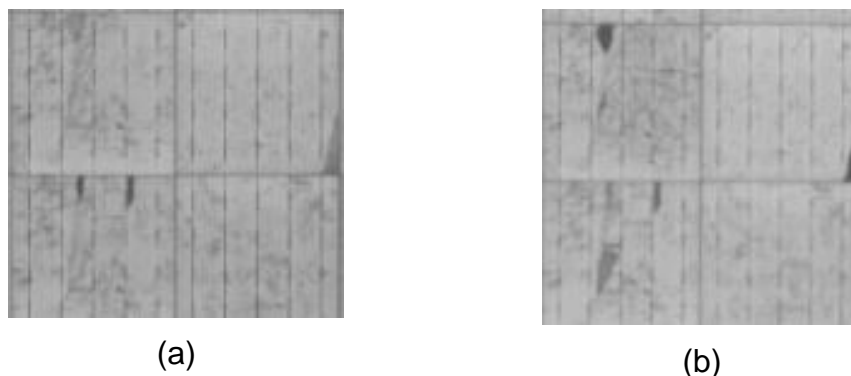


Tabela 21: Comparação do módulo 24 antes e depois dos ensaios mecânicos

Módulo 26	Condições nominais	Resultados obtidos (simulador antes do ensaio)	Resultados obtidos (simulador depois do ensaio)	% diferença
Potência nominal máxima (Pmax)	330 W	328,5 W	326,8 W	-0,52%
Tensão de máxima potência (Vmp)	37,8 V	37,3 V	37,2 V	
Corrente de máxima potência (Imp)	8,73 A	8,8 A	8,7 A	
Tensão de circuito aberto (Voc)	46,2 V	45,6 V	45,6 V	
Corrente de curto-circuito (Isc)	9,33 A	9,3 A	9,3 A	

5.3.4 Considerações finais dos ensaios mecânicos

Nos ensaios do módulo 24, ainda que os impactos nas características elétricas causados pelos ensaios mecânicos tenham sido muito reduzidos, observa-se que quando se aplica uma carga mecânica, mesmo abaixo de 50 kg, já é possível observar a presença das células quebradas e o aumento das microfissuras. Como citado no referencial teórico da dissertação, não se conhece exatamente os impactos das microfissuras no módulo e que muitas vezes não interferem diretamente na potência a curto prazo. Algumas referências mostram que quanto mais fissuras no módulo, maior a presença de pontos de calor, e

mais rápida é a degradação do módulo em longo prazo. Sabe-se também da correlação direta de aumento da temperatura com o rendimento do módulo.

Os módulos 21, 22, e 23, que são módulos mais antigos, com peso muito similar a módulos de maior área e mais capacidade, apresentaram pouca variação quando submetidos a ensaios mecânicos. Quando selecionado um módulo mais atual, que atualmente se encontra muito próximo daqueles mais comercializados para instalações em casas e usinas solares, percebe-se que o impacto é maior. Sabe-se que o vidro é um elemento muito importante para a estrutura de um módulo fotovoltaico, apensar de o dado da espessura do vidro não estar disponível nos catálogos, entende-se que com o passar do tempo, com as novas tecnologias visando diminuir os custos envolvidos na fabricação desse tipo de dispositivo, o vidro ficou cada vez com menor espessura.

Eventualmente em alguns módulos, quando aplicada a carga mecânica, fez que os contatos que estavam desconectados voltassem a conduzir, sendo perceptível, ainda de maneira sutil, na potência do módulo. Entretanto, para todos os ensaios mecânicos a presença de microfissuras aumentou substancialmente.

6 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou de uma maneira ampla, análises qualitativas e quantitativas dos impactos gerados pela presença de microfissuras, fissuras entre outros tipos de degradação na potência de módulos fotovoltaicos, utilizando imagens de eletroluminescência e ensaios de caracterização elétrica.

Os primeiros resultados corroboraram que uma inspeção visual não assegura de maneira efetiva a integridade física de um módulo. Foram feitas análises de módulos comparando resultados de inspeção visual e de imagens de eletroluminescência em 3 módulos diferentes, 2 deles com bom aspecto visual e outro visualmente danificado. Neste experimento foi constatado que o módulo que apresentou bom aspecto, tanto na inspeção visual quanto na imagem de eletroluminescência, apresentou desempenho conforme condições nominais. O segundo módulo apresentou um bom aspecto visual, porém, quando registrada sua imagem de eletroluminescência, foi possível perceber diversas células danificadas. Nos resultados do ensaio no simulador solar, percebeu-se o reflexo das fissuras das células em sua potência, com 10% de perda quando comparado à nominal. Já no módulo que estava visualmente danificado, com o vidro frontal bastante quebrado, percebeu-se que a perda foi ainda maior, cerca de 81%. Quando feita a imagem de eletroluminescência, verificou-se que as células estão fortemente destruídas, porém com algumas inteiras, o que fez o módulo ainda produzir a 19% da sua capacidade nominal.

No segundo experimento foi possível observar diversas características nos módulos. Dos 17 módulos analisados, 10 deles estavam com desempenho acima da capacidade nominal, mesmo com algumas células danificadas, e microfissuras presentes. Portanto, supõe-se que as microfissuras naquele momento não causaram nenhum impacto negativo no módulo, visto que estavam conduzindo normalmente. Além disso, foi observado que um dos módulos apresentava diversas células com microfissuras e algumas até mesmo com partes sem estar conduzindo corrente, porém, os defeitos não foram suficientes para gerar uma perda significativa na potência. Os 7 demais módulos apresentaram aspectos nas imagens de eletroluminescência piores comparados

com os outros grupos, além de manifestarem uma perda significativa de potência. Nas imagens no decorrer das análises é possível observar que quanto maior o número de microfissuras, fissuras e células desconectadas presentes no módulo, maior é a perda da potência.

Nos ensaios mecânicos foi possível analisar os impactos gerados nos módulos quando submetidos a ciclos de cargas sobre a superfície. No primeiro ensaio não foi possível observar nenhum dano efetivo nas células que estavam no campo de visão da câmera. Entretanto, quando observadas as imagens de eletroluminescência comparando condições antes e depois do ensaio mecânico, houve um aumento das microfissuras e um pequeno escurecimento em algumas regiões do módulo, representando assim uma perda de 0,8% na potência. O segundo módulo testado mecanicamente apresentava as mesmas características do primeiro, em termos de tamanho, potência, peso, entre outros fatores. Na primeira etapa o módulo apresentou um pequeno impacto, entretanto quando realizado o ensaio mecânico próximo à moldura, o módulo acabou corrigindo um pedaço de uma célula que não estava conduzindo, que passou a conduzir. Essa mudança ocasionou um acréscimo na potência de 0,7% do módulo. O terceiro módulo em teste foi escolhido porque continha muitas células quebradas. Então se aplicou o ensaio mecânico para entender o comportamento da potência conforme a aplicação das cargas. Percebeu-se que aumentou o número de microfissuras e regiões escuras em algumas células, porém, após o ensaio mecânico o módulo apresentou um pequeno acréscimo de potência (4,3 W) demonstrando que os impactos das reconexões de algumas células foram maiores que os impactos gerados.

O último módulo testado mecanicamente foi escolhido por ter características diferentes dos 3 primeiros, visando trazer um novo tipo de módulo, com potência, número de células e tamanho diferente. O último módulo escolhido foi em razão de ser compatível com aqueles que atualmente são amplamente comercializados. Logo nas primeiras cargas já foi possível observar o aparecimento de microfissuras no módulo, as quais foram aumentando progressivamente conforme as cargas foram avançando. Portanto houve um impacto maior nesse último módulo, resultando em uma perda de potência de 1,7 W.

Percebe-se que com o intuito de reduzir custos associados na fabricação do módulo, alguns recursos como diminuir a espessura da célula e do vidro se tornam recorrente, o que quando submetido ao ensaio mecânico refletem ainda mais nos módulos dessa característica.

Ainda que os impactos observados na realização dos ensaios mecânicos foram baixos em relação à potência, os impactos a longo prazo nas células podem diminuir consideravelmente seu desempenho e reduzir o tempo de vida do módulo. Eventualmente em alguns casos, quando aplicada uma carga mecânica na superfície do módulo, alguns contatos desconectados voltaram a conduzir, resultando na sua potência final recuperada. Entretanto, todos os testes apresentaram, mesmo que de maneira reduzida, o aumento de microfissuras nas células.

O trabalho se torna relevante principalmente para ampliar o estudo dos danos sofridos nos módulos nas más práticas das instalações fotovoltaicas (tal como caminhar por cima dos módulos), sobretudo na medida em que há uma vasta expansão do setor da energia solar fotovoltaica em escala mundial, principalmente no Brasil, onde começou, de maneira muito acentuada, o aumento da capacidade instalada após resoluções governamentais que estimularam esse tipo de tecnologia.

Entretanto, como visto nesta dissertação, apesar de alguns danos impactarem pouco na potência dos módulos em curto prazo, em longo prazo podem resultar em efeitos negativos e de degradação mais acelerada.

Para trabalhos futuros, sugere-se aumentar a quantidade de registros de imagens de eletroluminescência de módulos fotovoltaicos, assim como realizar o desenvolvimento de uma ferramenta quantitativa capaz de fazer uma leitura das imagens dos módulos e como resposta fornecer um valor acurado da perda pelas degradações.

REFERÊNCIAS

ABSOLAR - Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica e ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. (2019). Disponível em: <<http://absolar.org.br/noticia/noticias-externas/energia-solar-fotovoltaica-tingemarca-historica-de-500-mw-em-microgeracao-e-minigeracao-distribuid.html>>. Acesso em: 26 dezembro 2019.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica, 2017. **Outorgas e Registros de Geração: Unidades Consumidoras com Geração Distribuída**. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/scg/gd/gd.asp>>. Acesso em: 5 fevereiro. 2020.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, 2019^a (2019). **Geração Distribuída**. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/scg/gd/GD_Fonte.asp>. Acesso em: 20 de novembro 2019.

Barreto, E. J. F.; Pinho, J. T. (2008). **Sistemas Híbridos: Soluções Energéticas para a Amazônia. Programa Luz para Todos**. 1ed Brasília – Ministério de Minas e Energia, 2008. Brasil, 2008.

Berardone, I., Lopez Garcia, J. and Paggi, M. (2018). **Analysis of electroluminescence and infrared thermal images of monocrystalline silicon photovoltaic modules after 20 years of outdoor use in a solar vehicle**. Solar Energy, 173, pp.478-486.

Burnett, D., Barbour, E. and Harrison, G. (2014). **The UK solar energy resource and impact of climate change**. Renewable Energy, 71, pp.333-343.

CRESESB – Centro de Referência para Energia Solar e Eólica (2000). **Energia solar: princípios e aplicações**. Rio de Janeiro: CEPEL, 2000. 28 p. Disponível em: < http://www.cresesb.cepel.br/tutorial/tutorial_solar.pdf>. Acesso em: 12 dezembro 2019

Duffie, J.; Beckman, W. (2013) **Solar engineering of thermal processes**. Hoboken, NJ: Wiley, 2013.

EIA - U.S. Energy information administration (2017). **Monthly Energy Review: Appendix C Population, U.S. Gross Domestic Product, and U.S. Gross Output**, Estados Unidos, 2017.

EIA – U.S. Energy Information Administration. **Monthly energy review: renewable energy**. Total Energy Data, 2019. Disponível em:

<http://www.eia.gov/totalenergy/data/monthly/index.cfm>. Acesso em: 15 janeiro 2020

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2027**. Ministério de Minas e Energia, 2018.

Figueiredo, G., Almeida, M.P., Manito, A., Zilles, R. (2018). **Alternativa de baixo custo para imagens em eletroluminescência de módulos fotovoltaicos**. VII Congresso Brasileiro de Energia Solar.

Frazão, M., Silva, J., Lobato, K. and Serra, J. (2017). **Electroluminescence of silicon solar cells using a consumer grade digital camera**. Measurement, 99, pp.7-12.

Gasparin, F. P. (2009). **Desenvolvimento de um Traçador de Curvas Características de Módulos Fotovoltaicos**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

Gasparin, F. P. (2012). **Análise de Efeitos Transientes na Caracterização Elétrica de Módulos Fotovoltaicos**. Tese Doutorado em Engenharia Mecânica - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

Gasparin, F. P.; Bühler A. J.; Rampinelli A. R.; Krenzinger A. (2016). **Statistical analysis of I–V curve parameters from photovoltaic modules**. Solar Energy, 131, pp. 30-38.

HONSBURG, C.; BOWDEN, S. (2019) **PVEducation**. Disponível em: <<http://pveducation.org/>>. Acesso em: 12 de dezembro 2019.

International Renewable Energy Agency. **REmap: Roadmap for a Renewable Energy Future**. Abu Dhabi: IRENA, 2016.

Kenny, R., Viganó, D., Salis, E., Bardizza, G., Norton, M., Müllejans, H. and Zaaiman, W. (2013). **Power rating of photovoltaic modules including validation of procedures to implement IEC 61853-1 on solar simulators and under natural sunlight**. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 21(6), pp.1384-1399.

Kernahan, K., Curzon, P., Stewart, M. (2012) **Solar Cell Microcracks Are Inevitable, And idealPV FOZHS Makes Them Irrelevant.** IdealPV.

Sombrio, G. (2011). **Foto e eletroluminescência de filmes de nitreto de silício não estequiométrico depositados por sputtering reativo.** Tese Doutorado em Microeletrônica – University of Louisville. Estados Unidos, 2011.