

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL

MARCELO HENRIQUE VERZA DE OLIVEIRA

**IMPACTO DE MICROFISSURAS EM MÓDULOS SOLARES DE SILÍCIO EM
SISTEMAS FOTOVOLTAICOS**

CAXIAS DO SUL

2021

MARCELO HENRIQUE VERZA DE OLIVEIRA

**IMPACTO DE MICROFISSURAS EM MÓDULOS SOLARES DE SILÍCIO EM
SISTEMAS FOTOVOLTAICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso II apresentado
como requisito parcial para obtenção de grau de
Bacharel em Engenharia Elétrica na Universidade
de Caxias do Sul.

Orientador: Prof. Me. Tiago Cassol Severo

CAXIAS DO SUL

2021

MARCELO HENRIQUE VERZA DE OLIVEIRA

**IMPACTO DE MICROFISSURAS EM MÓDULOS SOLARES DE SILÍCIO EM
SISTEMAS FOTOVOLTAICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso II apresentado
como requisito parcial para obtenção de grau de
Bacharel em Engenharia Elétrica na
Universidade de Caxias do Sul.

Orientador: Prof. Me. Tiago Cassol Severo

Aprovado em 19 de julho de 2021

Banca Examinadora

Prof. Me. Tiago Cassol Severo (Orientador)

Universidade de Caxias do Sul - UCS

Prof. Dr. Alexandre Mesquita

Universidade de Caxias do Sul - UCS

Prof. Me. Andréa Cantarelli Morales

Universidade de Caxias do Sul - UCS

“No que diz respeito ao empenho, ao compromisso, ao esforço, à dedicação, não existe meio termo. Ou você faz uma coisa bem-feita ou não faz!”

Ayrton Senna

RESUMO

As microfissuras em módulos solares são comuns e aparecem por diversas maneiras, desde o transporte, manuseio e até por causas naturais, afetando a produção de energia dos sistemas fotovoltaicos. Por isso, tem-se o objetivo de danificar um módulo solar para causar estas microfissuras, a fim de detectá-las e analisar o impacto através de ensaios e medições dos parâmetros elétricos durante a operação do painel. Com a transformação de uma câmera digital em uma câmera de eletroluminescência, é possível visualizar estas microfissuras nas células solares do painel, antes e depois de ser danificado propositalmente. É projetado um circuito de medição para traçar a curva $I-V$, com o intuito de encontrar os valores de corrente, tensão e o ponto de máxima potência do módulo durante a sua operação. Para quantificar o impacto destas microfissuras, é realizado os cálculos de geração de energia e feita a projeção ao longo de 25 anos, comparando as condições do painel fotovoltaico em seu estado inicial e após as microfissuras. Apesar de haver uma queda significativa na potência de saída, o painel não perdeu totalmente sua capacidade de produção de energia e ainda pode ser utilizado.

Palavras-chave: Painel fotovoltaico; microfissuras; eletroluminescência.

ABSTRACT

Microcracks in solar modules are common and appear in different ways, from transport, handling and even natural causes, affecting the energy production of photovoltaic systems. Therefore, the objective is to damage a solar module to cause these micro-cracks, in order to detect them and analyze the impact through tests and measurements of electrical parameters during panel operation. With the transformation of a digital camera into an electroluminescence camera, it is possible to visualize these micro-cracks in the panel's solar cells, before and after being purposely damaged. A measuring circuit is designed to trace the I-V curve, in order to find the values of current, voltage and the maximum power point of the module during its operation. To quantify the impact of these microcracks, energy generation calculations are performed and a projection is made over 25 years, comparing the conditions of the photovoltaic panel in its initial state and after the microcracks. Although there is a significant drop in output power, the panel has not fully lost its power-producing capability and is still usable.

Keywords: Photovoltaic panel, microcracks, electroluminescence.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Total diário da irradiação global horizontal, média anual.....	14
Figura 2 – Diagrama de um sistema conectado da rede	15
Figura 3 – Diagrama de um sistema desconectado da rede.....	16
Figura 4 – Curva característica $I-V$ e curva de potência $P-V$	19
Figura 5 – Variação da radiância solar sobre a curva de característica $I-V$	19
Figura 6 – Variação da temperatura sobre a curva de característica $I-V$	20
Figura 7 – Células solares em série, paralelo e a curva $I-V$	21
Figura 8 – Associação mista de painéis fotovoltaicos.....	21
Figura 9 – Célula monocristalina a esquerda e policristalina a direita	22
Figura 10 – Diferentes tipos de rachaduras nas células.....	24
Figura 11 – Estrutura física de uma célula fotovoltaica	24
Figura 12 – Curvas $I-V$ e $P-V$ com dois painéis paralelos inteiros e dois painéis paralelos sendo um rachado	25
Figura 13 – Configuração experimental para a detecção de microfissuras	27
Figura 14 - Sequência de ensaio	28
Figura 15 – Imagens de eletroluminescência após os ensaios mecânico e térmico	28
Figura 16 – Imagem de eletroluminescência, térmica e visual.....	29
Figura 17 – Utilização da câmera EL	31
Figura 18 – Circuito básico de medição capacitiva.....	31
Figura 19 – Divisor de tensão e sensor de corrente ACS712	32
Figura 20 – Obtenção de dados	32
Figura 21 – Fluxograma de atividades	34
Figura 22 – Painel solar fotovoltaico SinoSola	35
Figura 23 – Curvas $I-V$ da variação da temperatura com irradiação solar a $800\text{W}/\text{m}^2$	36
Figura 24 – Curvas $I-V$ da variação da irradiação solar com temperatura em 25°C	37
Figura 25 – Câmera digital para testes de eletroluminescência.....	37
Figura 26 – Imagens testes da câmera de eletroluminescência utilizando células solares	38
Figura 27 – Diagrama elétrico do circuito de medição capacitiva de curva $I-V$	39
Figura 28 – Montagem física do circuito de medição capacitiva	41
Figura 29 – Tecla e Relés do circuito	41
Figura 30 – Obtenção das imagens de eletroluminescência	42
Figura 31 – Eletroluminescência do painel solar em estado inicial	43

Figura 32 – Eletroluminescência do painel solar fissurado	44
Figura 33 – Disposição das ligações com o circuito de medição	45
Figura 34 – Disposição dos equipamentos para realizar as medições	46
Figura 35 – Curva $I-V$ e $P-V$ obtida do painel em estado inicial	47
Figura 36 – Curva $I-V$ e $P-V$ obtida do painel solar em estado fissurado	47
Figura 37 – Comparação dos dois estados do painel na relação Potência x Temperatura	49
Figura 38 – Projeção da produção de energia em 25 anos	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação dos resultados em relação a potência ideal do painel	48
Tabela 2 – Comparação dos resultados em relação ao estado inicial	48
Tabela 3 – Irradiação média global de Bento Gonçalves - RS	50

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CGH	Central Geradora Hidrelétrica
Curva $I-V$	Curva característica entre a corrente e a tensão
Curva $P-V$	Curva característica entre a potência e a tensão
$D_{(LxA)}$	Dimensões (Largura x Altura)
EL	Eletroluminescência
IGH	Irradiação Global Horizontal
IGH_{ANUAL}	Irradiação Global Horizontal Anual
$IGH_{DIÁRIA}$	Irradiação Global Horizontal Anual
I_{MP}	Corrente máxima do painel
IR	Infravermelho
I_{SC}	Corrente de curto-circuito
n	Rendimento
NOCT	<i>Nominal Operating Cell Temperature</i>
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
P_{PAINEL}	Potência de saída do painel solar
P_{PERDAS}	Perdas de Potência
V_{OC}	Tensão de circuito aberto
V_{MP}	Tensão máxima do painel

LISTA DE GRANDEZAS FÍSICAS

A	<i>Ampère</i>
Ah	<i>Ampère-hora</i>
GW	<i>Gigawatt</i>
kW	<i>quilowatt</i>
kWh	<i>quilowatt-hora</i>
kWh/m ² /dia	<i>quilowatt-hora por metro quadrado por dia</i>
m	<i>metro</i>
nm	<i>nanômetro</i>
V	<i>Volt</i>
W	<i>Watt</i>
Wp	<i>Watt-pico</i>
W/m ²	<i>Watt por metro quadrado</i>
Wh/m ²	<i>Watt-hora por metro quadrado</i>
°C	<i>Graus Celsius</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	JUSTIFICATIVA DO TEMA.....	11
1.2	OBJETIVOS GERAIS	11
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	11
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	11
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	13
2.1	FONTES RENOVÁVEIS E ENERGIA SOLAR	13
2.2	ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA NO BRASIL	13
2.3	SISTEMAS DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA.....	14
2.3.1	Sistema conectado da rede elétrica	15
2.3.2	Sistema autônomo.....	16
2.3.3	Armazenamento de energia	16
2.3.4	Controlador de carga	17
2.4	PAINÉIS FOTOVOLTAICOS.....	18
2.4.1	Curvas características	18
2.4.2	Série e paralelo.....	20
2.4.3	Células fotovoltaicas.....	22
2.5	MICROFISSURAS EM PAINÉIS FOTOVOLTAICOS.....	23
2.5.1	Tipos de microfissuras	23
2.5.2	Curvas $I-V$ e $P-V$ de painéis com microfissuras.....	25
2.5.3	Forma de detecção das microfissuras.....	25
2.6	REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO	26
2.6.1	Artigo 1: Effect of micro cracks on photovoltaic output power: case study based on real-time long-term data measurements	26
2.6.2	Artigo 2: The risk of power loss in crystalline silicon based photovoltaic modules due to micro-cracks	27
2.6.3	Artigo 3: Snail Trails and Cell Microcrack Impact on PV Module Maximum Power and Energy Production	28
3	METODOLOGIA	30
3.1	MÉTODO DA ELETROLUMINESCÊNCIA	30
3.2	MÉTODO DE MEDIÇÃO DA CURVA $I-V$	31

3.3	PRODUÇÃO DE ENERGIA	32
3.4	FLUXOGRAMA.....	33
4	RESULTADOS.....	35
4.1	PAINEL SOLAR.....	35
4.2	CARACTERIZAÇÃO DO PAINEL SOLAR POR SIMULAÇÃO.....	35
4.3	MONTAGEM DA CÂMERA DE ELETROLUMINESCÊNCIA	37
4.4	PROJETO DO CIRCUITO DE MEDIÇÃO DE CURVA <i>I-V</i>	38
4.5	ENSAIO PARA AQUISIÇÃO DAS IMAGENS DE ELETROMINESCÊNCIA	42
4.6	EXPERIMENTO DAS MEDIÇÕES	45
4.7	PROJEÇÃO DA PRODUÇÃO DE ENERGIA SOLAR AO LONGO DO TEMPO	50
5	CONCLUSÃO	52
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53
	APÊNDICE A – DIAGRAMA MEDIÇÃO DA CURVA <i>I-V</i> – COMPLETO.....	56
	APÊNDICE B – DIAGRAMA MEDIÇÃO DA CURVA <i>I-V</i> – ESTÁGIO UM	57
	APÊNDICE C – DIAGRAMA MEDIÇÃO DA CURVA <i>I-V</i> – ESTÁGIO DOIS.....	58
	APÊNDICE D – MONTAGEM CIRCUITO DE MEDIÇÃO DA CURVA <i>I-V</i>.....	59
	APÊNDICE E – CÓDIGO MATLAB PARA SIMULAÇÃO	60
	APÊNDICE F – CÓDIGO MICROCONTROLADOR PARA MEDIÇÃO	62
	APÊNDICE G – DADOS PARA PROJEÇÃO DAS CURVAS	63
	APÊNDICE H – DADOS PARA PROJEÇÃO DA PRODUÇÃO DE ENERGIA.....	64
	ANEXO A – DATASHEET DO PAINEL SOLAR	65
	ANEXO B – FONTE DE ALIMENTAÇÃO MINIPA.....	66
	ANEXO C – MEDIDOR DE TEMPERATURA	67
	ANEXO D – RELÉ 24V	68

ANEXO E – MICROCONTROLADOR ARDUINO UNO.....	69
ANEXO F – SENSOR DE CORRENTE ACS712	71

1 INTRODUÇÃO

O Brasil possui a sua matriz energética composta pela maior parte de hidrelétricas, dependendo das chuvas para manter os reservatórios em níveis satisfatórios. Se necessário, acionam-se as termelétricas para atender a demanda quando as hidrelétricas não conseguem suprir, aumentando os custos da energia. Como alternativa as hidrelétricas e termoeletricas, cresce o interesse em energias alternativas renováveis que causem menores impactos ambientais e tenham maior confiabilidade no sistema elétrico, e a energia solar fotovoltaica torna-se uma interessante saída. Comparado aos principais países que possuem esta energia inserida de forma consistente em suas matrizes, o Brasil possui um excelente potencial para a geração da energia solar fotovoltaica (ROSA; GASPARIN, 2016).

O avanço na tecnologia solar fotovoltaica no Brasil na última década é bastante significativo, ainda que o mercado seja muito recente. Há em torno de 12 mil empresas de energia solar, responsáveis por disseminar a tecnologia por todo o país, tornando-a cada vez mais acessível (KOLOSZU; SAUIAIA; MEYER, 2019).

Conforme relata a ANEEL (2019), a potência instalada de energia solar fotovoltaica é de pouco mais de 2,25 GW no Brasil. Deste montante, foram instalados, desde 2012 até hoje, quase 1 GW, mostrando que o mercado solar fotovoltaico está crescendo dentro do setor elétrico brasileiro. O aumento da eficiência dos módulos, barateamento de equipamentos, redução com energia elétrica, menores impactos ao meio ambiente, novas formas de investimentos e aumento da empregabilidade, são alguns dos fatores que contribuem para este avanço da tecnologia (KOLOSZU; SAUIAIA; MEYER, 2019).

Com a expectativa de crescimento da energia no mercado, espera-se que o desempenho e a confiabilidade dos sistemas de geração também cresçam. Entretanto, diversos módulos de sistemas fotovoltaicos têm seu tempo de vida útil reduzido, pois a eficiência dos painéis diminui consideravelmente devido a problemas de microfissuras nos mesmos (CHENG et al., 2018).

As microfissuras em células solares causam problemas em sistemas fotovoltaicos, sendo difíceis de evitar e de quantificar o seu impacto sobre a eficiência dos módulos. A presença destas microfissuras causa separações das conexões elétricas, resultando, assim, em células que não produzem energia (KONTGES et al, 2011).

Diante de todo o contexto, este trabalho visa usar um método para a detecção das microfissuras, além de realizar a medição das grandezas elétrica do painel solar, a fim de verificar a situação de sua operação ao longo do tempo.

1.1 JUSTIFICATIVA DO TEMA

Fissuras em módulos fotovoltaicos são comuns e podem se desenvolver em diferentes fases da vida do módulo: durante a fabricação, o manuseio, o transporte, cargas mecânicas devido ao vento, neve, entre outros (KONTGES et al, 2011).

As rachaduras celulares aparecem nos painéis de diversas maneiras e causam impactos diferentes. Através de testes, é possível analisar estas microfissuras e verificar o impacto causado no desempenho da potência de saída e da geração de energia elétrica (DHIMISH et al., 2017).

1.2 OBJETIVOS GERAIS

Analisar o impacto de microfissuras sobre painéis fotovoltaicos, mediante o ensaio de parâmetros elétricos.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Utilizar uma câmera digital voltada a testes de eletroluminescência para detectar microfissuras em um painel solar fotovoltaico;
- b) Realizar medições de tensão, corrente e potência neste painel solar fotovoltaico com e sem microfissuras, comparando as curvas $I-V$ e $P-V$;
- c) Verificar a queda de desempenho deste painel com microfissuras em relação ao sem as microfissuras;
- d) Analisar o comportamento da geração de energia do módulo ao longo dos anos, comparando a situação do módulo com e sem microfissuras.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está disposto em cinco capítulos, os quais abordam um conjunto estrutural diferente sobre o tema estudado.

O capítulo 1 apresenta a introdução, a justificativa do tema escolhido, os objetivos gerais e específicos do trabalho a ser elaborado, além da descrição de sua estrutura.

A fundamentação teórica está redigida no capítulo 2, que consiste na revisão de diversos materiais, fazendo parte dele os assuntos: fontes renováveis, energia solar no Brasil,

os sistemas de energia solar fotovoltaica, painéis fotovoltaicos, as microfissuras encontradas em painéis de silício e, por fim, o estado da arte.

O capítulo 3 apresenta a metodologia do trabalho, o qual descreve as técnicas e as ferramentas a serem empregadas, juntamente com o fluxograma de atividades.

O desenvolvimento e a obtenção dos resultados deste trabalho de conclusão de curso são descritos no capítulo 4.

Por fim, o capítulo 5 é a conclusão.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, é estruturado os conceitos teóricos a serem utilizados para realização do TCC.

2.1 FONTES RENOVÁVEIS E ENERGIA SOLAR

O Sol é a fonte primária de energia, uma vez que praticamente todas as fontes de energia necessárias à sobrevivência do homem, tais como alimentos vegetais e animais, calor e luz, são supridas de alguma forma pela energia solar (MOREIRA, 2017).

As fontes de energias renováveis são aquelas consideradas inesgotáveis para os padrões de utilização da humanidade. Elas podem ser usadas e não irão se acabar, pois sempre se renovam. Alguns exemplos são as energias provindas das hidrelétricas, energia eólica, oceânica, biomassa, geotérmica e a energia solar, que é aproveitada diretamente para o aquecimento da água ou a geração de eletricidade (VILLALVA, 2015).

O atual cenário de produção de energia elétrica apresenta indícios de esgotamento dos recursos naturais. Portanto, os países acabam buscando novas formas de geração através de energias renováveis, que sejam mais viáveis economicamente, causem menores danos ao meio ambiente e reduzam as emissões de gases poluentes. As formas atuais de geração causam impactos financeiros nas economias dos países, devido ao elevado custo de implementação e aos riscos ambientais (ROSA; GASPARIN, 2016).

2.2 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA NO BRASIL

O mercado de energia solar fotovoltaica, neste ano de 2019, apresenta uma trajetória animadora, tendo superado a marca de 2 GW e ultrapassado a energia nuclear, assumindo a posição de sétima fonte de geração de energia do país (HARATZ; SAUIAIA; KOLOSZU, 2019).

A capacidade de geração de energia no Brasil, considerando todas as fontes, é de 173,3 GW de potência instalada. Hoje, a geração de energia solar representa 1,73% deste montante, girando em torno de 3 GW de potência (ANEEL, 2020).

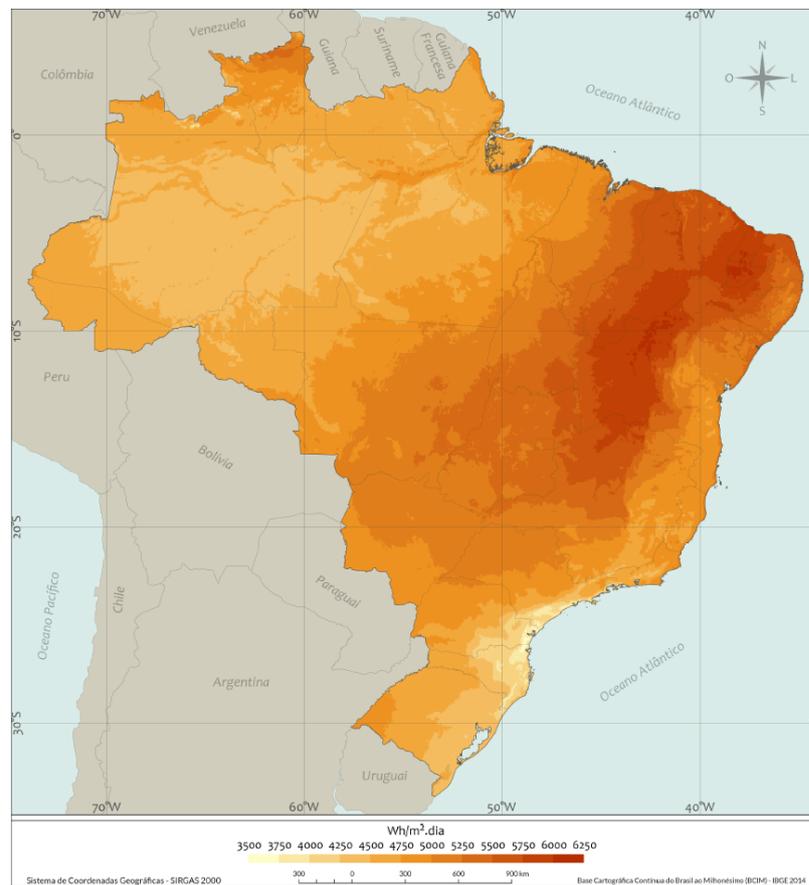
A geração fotovoltaica no Brasil, tem se firmado como uma fonte renovável de alto valor agregado à sociedade. As atuais usinas em operação, são capazes de atender as necessidades de mais de três milhões de pessoas, gerando energia limpa e renovável. Visto isso,

estima-se que até o ano de 2022, mais de 1,7 GW entrarão em operação no país (BARROS; SAUIAIA; KOLOSZU, 2019).

Oferecendo preços cada vez mais competitivos, e que já são menores que os preços das CGHs e PCHs, a fonte solar possui características para se dar um salto significativo no mercado livre de energia no curto, médio e longo prazo (HARATZ; SAUIAIA; KOLOSZU, 2019).

Diariamente, no Brasil, é incidido entre 4.444 Wh/m² a 5.483 Wh/m² de radiação solar. A figura 1 apresenta a média anual de irradiação que em incide ao longo de um dia (INPE, 2018).

Figura 1 – Total diário da irradiação global horizontal, média anual



Fonte: INPE (2018)

2.3 SISTEMAS DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

A obtenção da energia solar dá-se através de um fenômeno físico chamado efeito fotovoltaico. Este fenômeno permite a conversão direta da radiação eletromagnética do sol em

eletricidade incidindo em materiais semicondutores, gerando corrente contínua, que é coletada através de dispositivos conversores e controladores. (VILLALVA, 2015). Esta energia pode ser consumida instantaneamente por sua carga conectada, armazenada em baterias ou, ainda, fornecida para a rede de distribuição da concessionária local (MOREIRA, 2018).

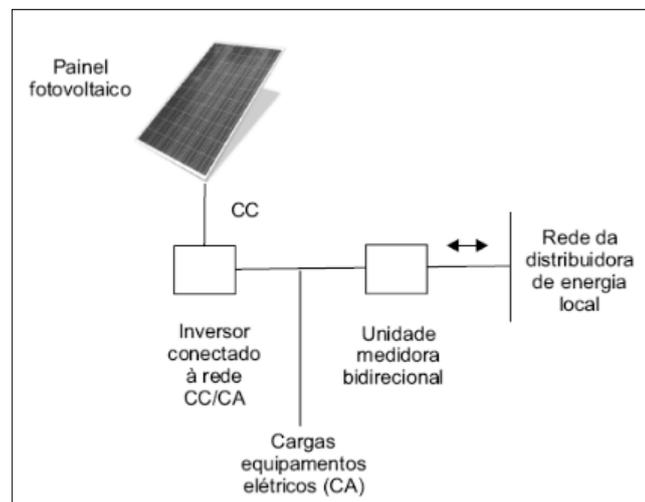
As duas principais classificações dos sistemas solares fotovoltaicos são os independentes e os integrados à rede elétrica. Contudo, estão disponíveis em uma ampla gama de tamanhos e funções, como, por exemplo, os sistemas com armazenamento de energia em baterias (HODGE, 2018).

2.3.1 Sistema conectado da rede elétrica

Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica dispensam armazenadores de energia, pois a demanda pode ser atendida pela distribuidora local, caso seja insuficiente a geração de energia em um determinado dia (MOREIRA, 2017).

Um aspecto positivo é a perspectiva de fornecer para a rede elétrica da distribuidora local a energia produzida excedente, que não está sendo consumida naquele momento. Entretanto, no Brasil, esta prática de ainda é insipiente, embora em outros países é amplamente incentivada, visto que, ao longo do tempo, há retorno de investimento para este tipo de instalação. Para tanto, é preciso utilizar um inversor de frequência com sincronia de fase, para que haja a conexão entre as redes interna e externa, permitindo a operação bidirecional. Um sistema solar fotovoltaico conectado à rede é ilustrado na figura 2, onde a energia solar dos arranjos deve ser sincronizada em frequência, fase e tensão (HODGE, 2018).

Figura 2 – Diagrama de um sistema conectado da rede



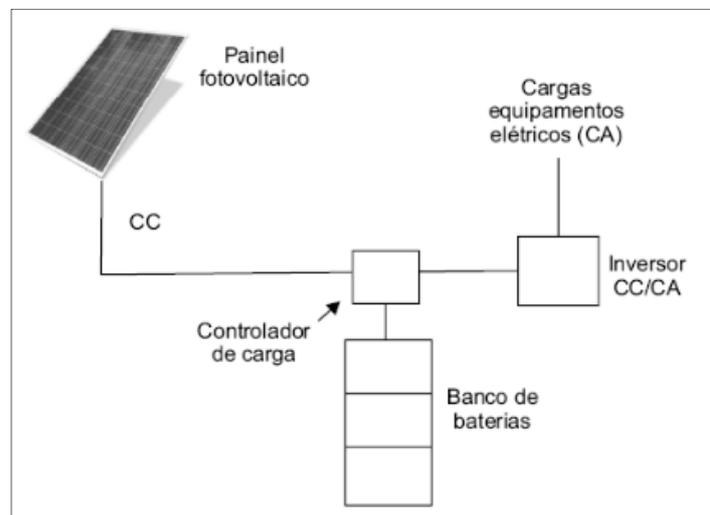
Fonte: MOREIRA (2017)

2.3.2 Sistema autônomo

Para atender a uma edificação, os sistemas não conectados à rede elétrica dependem exclusivamente da geração de energia a partir da conversão fotovoltaica. Portanto, para que não haja interrupções no fornecimento de energia, mesmo durante dias com pouca irradiação solar, é necessário que o sistema opere juntamente com armazenadores de energia (MOREIRA, 2017).

A configuração mais simples deste sistema é aquela cuja operação é em corrente contínua, onde a tensão da carga é compatível com a tensão de fornecimento. Normalmente utilizado em poucas demandas de energia. Desta forma, o sistema precisa ser composto pelos painéis, o controlador de carga, as baterias e os dispositivos de conexão e de segurança. Caso a carga opere em corrente alternada, é necessário que haja um inversor de frequência, transformando a tensão fornecida CC em CA. A figura 3 apresenta um diagrama de um sistema autônomo (MOREIRA, 2017).

Figura 3 – Diagrama de um sistema desconectado da rede



Fonte: MOREIRA (2017)

2.3.3 Armazenamento de energia

A utilização de dispositivos para armazenamento de energia é usada em sistemas fotovoltaicos isolados da rede elétrica e faz-se necessário para atender a demanda em períodos nos quais a geração de energia é insuficiente ou nula para atender a demanda. Assim, parte da energia produzida pela geração durante o dia é armazenada, para que, posteriormente, possa ser

usada em momentos com baixa irradiância solar ou à noite, atendendo a demanda necessária (GTES, 2014).

As baterias aplicadas em sistemas fotovoltaicos possuem algumas características, como a tensão (V) e a capacidade de carga (Ah), que são necessárias para verificar o potencial e armazenamento. O produto destas duas grandezas resulta na energia máxima armazenada pela bateria. Por exemplo, uma bateria com tensão de 12 V e capacidade de carga de 70 Ah, armazena 600 Wh de energia. Outra característica das baterias é a capacidade de ciclos, que se refere à quantidade de cargas/descargas que a bateria tem até acabar a sua vida útil. Por fim, a profundidade de descarga específica é a porcentagem da energia armazenada que pode ser extraída sem que a bateria tenha danos. Os sistemas autônomos necessitam que as baterias tenham uma alta capacidade de ciclo e uma alta capacidade de profundidade de descarga (HODGE, 2018).

A bateria eletrolítica é o equipamento mais utilizado em sistemas fotovoltaicos, para o armazenamento de energia. Esta bateria é um conjunto de células conectada em série e/ou em paralelo, capazes de armazenar energia elétrica na forma de energia química. Quando uma carga é conectada a bateria, ocorre o processo reverso, ou seja, a energia química é convertida a elétrica, produzindo uma corrente contínua. As baterias podem ser classificadas, dependendo do tipo de célula que as compõe, em primárias (não recarregáveis) e secundárias (recarregáveis) (GTES, 2014).

As células primárias compõem as baterias não recarregáveis, sendo aproveitadas apenas uma vez. Estas baterias devem ser descartadas, pois sua vida útil se encerra quando descarregadas completamente. Este tipo de bateria é utilizado geralmente como fontes de baixa potência, como relógios, calculadores e outros dispositivos portáteis (GTES, 2014).

Já as células secundárias compõem as baterias recarregáveis, que, para as recargas, precisam do auxílio de fontes de tensão ou corrente. Estas baterias são habitualmente empregadas em sistemas fotovoltaicos, que demandam longos períodos de uso (GTES, 2014).

2.3.4 Controlador de carga

A principal função deste equipamento é controlar a energia entre os geradores, a carga e o armazenador. Quando houver energia gerada em excesso, o controlador deve carregar as baterias. Se a demanda de energia da carga for maior que a energia gerada, o controlador deve utilizar a energia das baterias para atender a carga (MOREIRA, 2017).

Além disso, o controlador de carga evita que a bateria descarregue a sua energia armazenada nos painéis fotovoltaicos, tornando-se um dispositivo obrigatório em sistemas

desconectados da rede elétrica (VILLALVA, 2015).

2.4 PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

Os painéis fotovoltaicos são compostos por um agrupamento de células conectadas em arranjos, podendo ser em série e/ou paralelo. Estes arranjos produzem tensão e corrente contínua, gerando energia elétrica, para atender determinadas demandas (GTES, 2014).

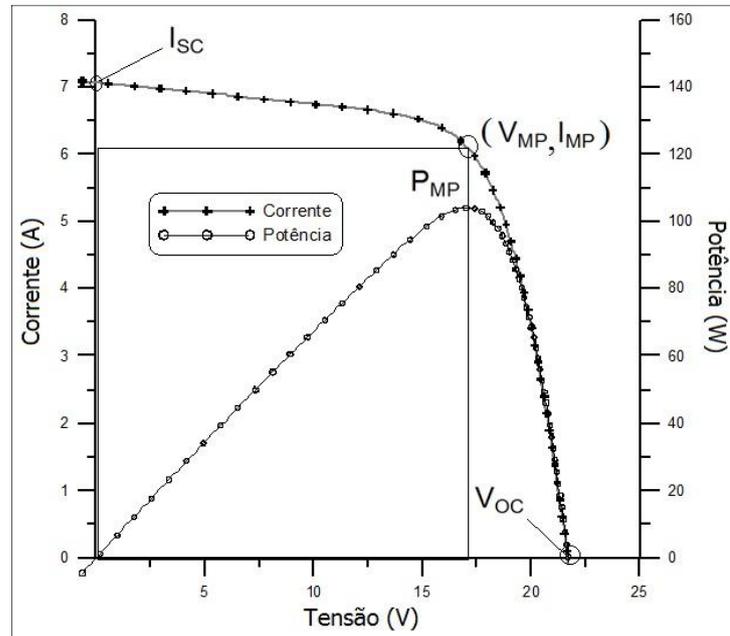
Dependendo da classe de potência, os módulos costumam ter 36, 54 ou 60 células. Uma célula fotovoltaica produz aproximadamente 0,6 V. Os fabricantes costumam conectá-las em série para produzir tensões de saída maiores. A corrente elétrica é produzida conforme a quantidade de luz que o módulo recebe. Quanto maior a área do módulo, maior será a capacidade de absorção de luz e, conseqüentemente, maior será a corrente produzida (VILLALVA, 2015).

2.4.1 Curvas características

O módulo é identificado pela sua potência elétrica de pico (W_p), considerando a irradiância solar de 1.000 W/m^2 e temperatura da célula de $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Quando o módulo está posicionado em direção ao sol, pode-se medir tensão nos terminais positivo e negativo, através de um voltímetro. A tensão existente em um módulo desligado é a tensão de circuito aberto (V_{oc}). Por outro lado, para medir a corrente de curto-circuito (I_{sc}), conecta-se os terminais do módulo a um amperímetro (GTES, 2014).

A figura 4 mostra a curva $I-V$, onde cada ponto representa o produto tensão-corrente a potência gerada para aquela determinada condição de operação do sistema. Além disso, a curva $P-V$ identifica o ponto máximo do valor de potência. Utilizando o ponto máximo da curva $P-V$, é possível verificar o ponto correspondente na curva $I-V$, que se encontra os valores máximos de tensão (V_{MP}) e corrente (I_{MP}). Portanto, este ponto passa a ser também o ponto máximo de potência (P_{MP}) (GTES, 2014).

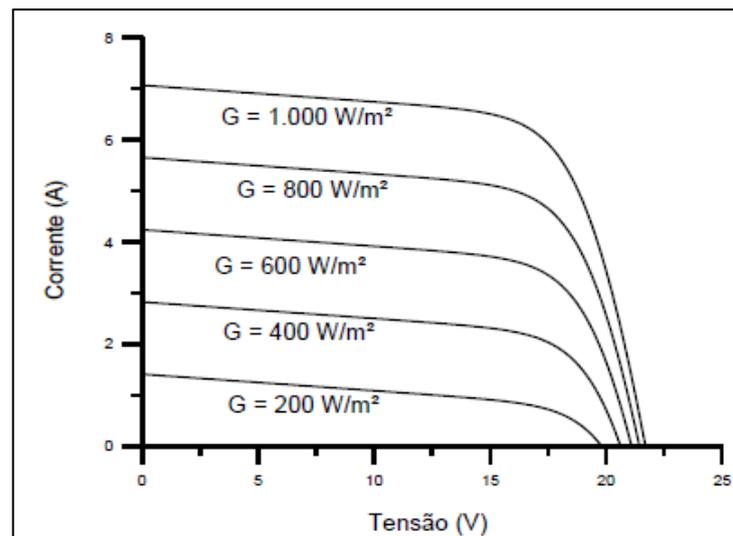
Figura 4 – Curva característica $I-V$ e curva de potência $P-V$



Fonte: GTES (2014)

O aumento da irradiância solar sobre o módulo faz com que a corrente elétrica gerada pelo mesmo e a corrente de curto-circuito aumentem também, conforme se observa na figura 5 (GTES, 2014).

Figura 5 – Variação da radiância solar sobre a curva de característica $I-V$

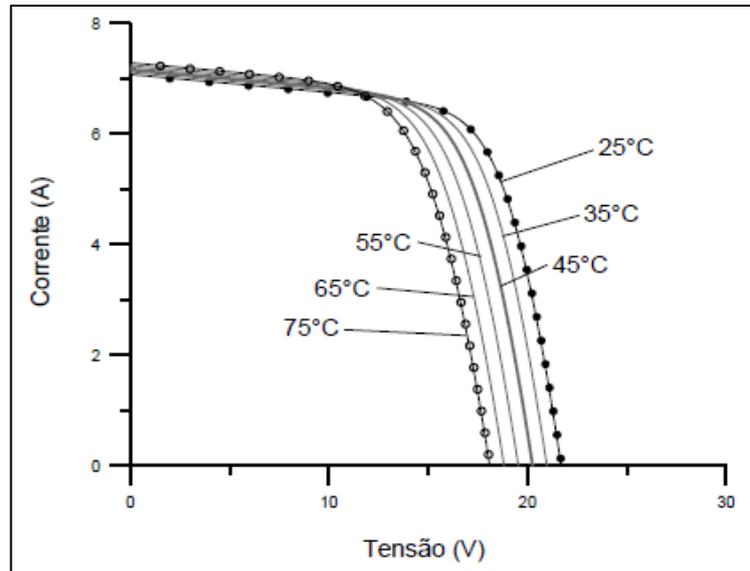


Fonte: GTES (2014)

As células que compõem os módulos sofrem variações de temperatura devido a própria temperatura do ambiente e a incidência de radiação solar. A figura 6 abaixo exibe curvas $I-V$

para diversas temperaturas da célula fotovoltaica. O aumento significativo da temperatura causa um aumento pouco expressivo na corrente elétrica, mas que acarreta queda de tensão, diminuindo a potência produzida pelo painel, aumentando as perdas de energia (GTES, 2014).

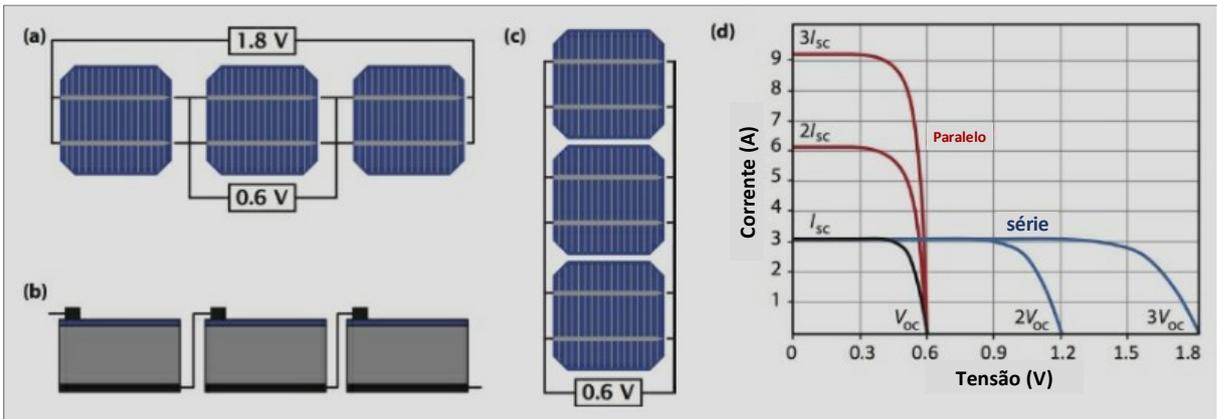
Figura 6 – Variação da temperatura sobre a curva de característica $I-V$



Fonte: GTES (2014)

2.4.2 Série e paralelo

Para fazer um módulo solar a partir de um conjunto de células solares, pode-se conectá-las de diferentes maneiras. Primeiro, em uma conexão em série, como mostra a Figura 7 (a), as tensões de cada célula se somam e a corrente permanece a mesma. Para as baterias, a conexão em série pode ser estabelecida conectando o polo positivo no polo negativo da bateria anterior, com o intuito de somar as tensões e mantendo o valor da corrente, conforme ilustrado na Figura 7 (b). Também pode-se conectar células solares em paralelo, como ilustrado na Figura 7 (c), onde a tensão será a mesma em todas as células solares, enquanto as correntes se somam. A Figura 7 (d) mostra a curva $I-V$ de células solares conectadas em série e em paralelo, apresentando o comportamento da tensão e da corrente em ambos os casos (SMETS et al., 2016).

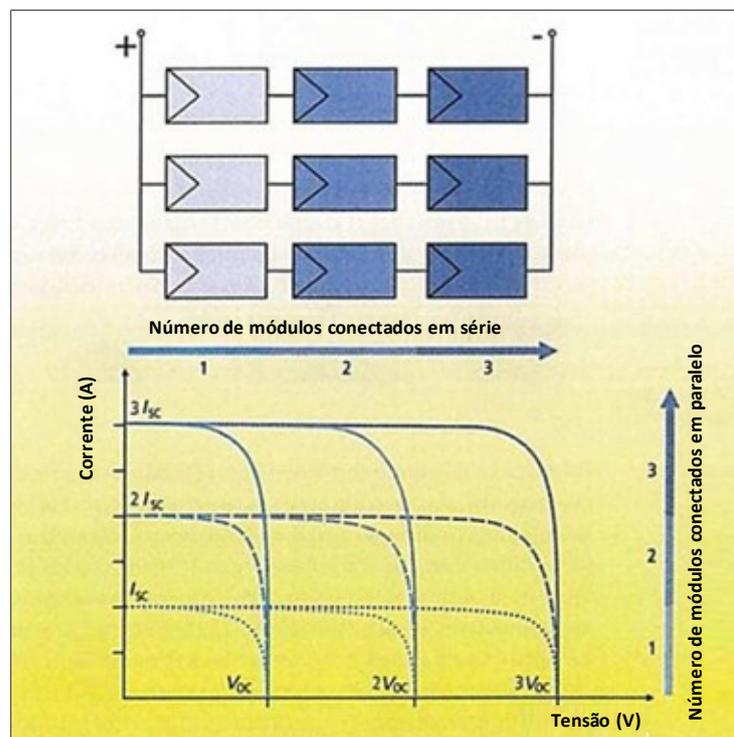
Figura 7 – Células solares em série, paralelo e a curva $I-V$ 

Fonte: Adaptado de SMETS et al., (2016)

Em diversos casos é necessário associar os módulos em paralelo, para alcançar a potência-pico calculada no projeto, e em série, para alcançar a tensão nominal do sistema. Nesses casos, têm-se características das duas associações apresentadas anteriormente, além de maiores perdas no sistema (BLUE-SOL, 201-?).

A figura 8 apresenta a ligação de painéis tanto em série como em paralelo em um mesmo sistema, bem como o comportamento da tensão e da corrente na curva $I-V$.

Figura 8 – Associação mista de painéis fotovoltaicos



Fonte: Adaptado de BLUE-SOL (201-?).

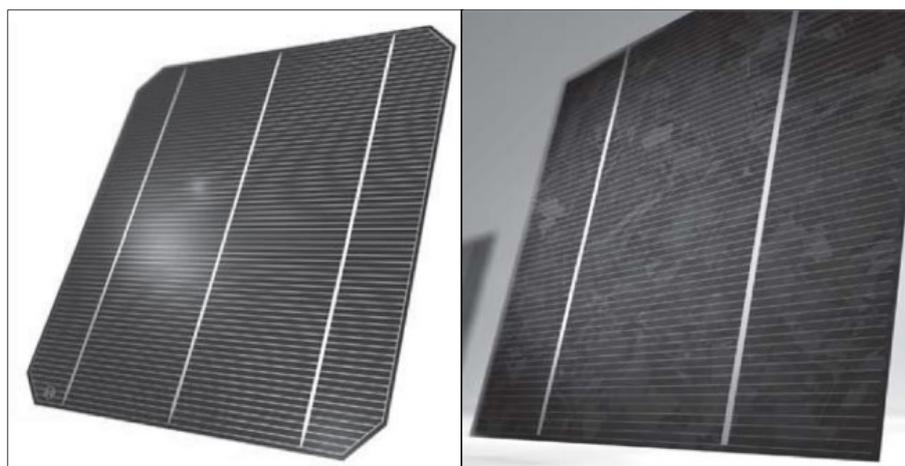
2.4.3 Células fotovoltaicas

Existem várias tecnologias para a fabricação de células e módulos fotovoltaicos. As células de silício monocristalino e silício policristalino são as mais comuns encontradas no mercado. O silício é o material semiconductor mais utilizado na fabricação de células. Ainda que exista outras tecnologias, as células de silício são as mais desenvolvidas atualmente, com maior penetração dos raios solares (VILLALVA, 2015).

Os módulos de silício monocristalinos requerem mais investimentos comparado ao de silício policristalino, apresentando um preço de mercado mais elevado. As células do módulo monocristalino são provindas do crescimento de apenas um único cristal de silício. Com o crescimento do cristal, os seus cantos são cortados, apresentando um padrão reconhecível. Estas células alcançam uma eficiência de até 26,7% (GREEN et al., 2019). Além disso, comportam-se melhor em locais de pouca luminosidade e em temperaturas mais elevadas, comparado aos módulos policristalinos (ELYSI211A, 201-?).

Conforme relata Green et al. (2019), a eficiência das células de silício policristalino pode chegar até 22,3%, um pouco abaixo das células monocristalinas. Neste tipo de placa solar, as células possuem um processo de produção mais simples, sendo fabricadas a partir de vários cristais de silício, por isso, torna-se mais em conta economicamente. Em razão ao modo como é produzido, este módulo apresenta cor mais azulada e um formato quadrado (ELYSIA, 201-?).

Figura 9 – Célula monocristalina a esquerda e policristalina a direita



Fonte: Adaptado de VILLALVA (2015)

2.5 MICROFISSURAS EM PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

Com o aumento da energia solar fotovoltaica no mercado de energia, o desempenho e a confiabilidade dos sistemas de geração tornam-se cada vez mais importantes de serem analisados. Os painéis fotovoltaicos são considerados componentes relativamente confiáveis com longa vida útil em comparação com seus circuitos de eletrônica de potência interligados, visto que a maioria dos fabricantes fornecem garantias de até 25 anos. No entanto, as microfissuras podem reduzir a eficiência de energia do painel e encurtar o seu tempo de vida (CHENG et al., 2019).

As rachaduras celulares podem aparecer nos painéis fotovoltaicos durante o transporte até o local de instalação. Além disso, algumas condições climáticas, tais como cargas de neve, ventos fortes e tempestades de granizo, possivelmente criam rachaduras na superfície dos módulos (RAJPUT et al., 2016 apud DHIMISH et al., 2017).

Estas rachaduras levam a uma separação das partes das células e, portanto, a um aumento da perda de energia total gerada pelos módulos fotovoltaicos (KONTGERS et al., 2010 apud DHIMISH et al., 2017).

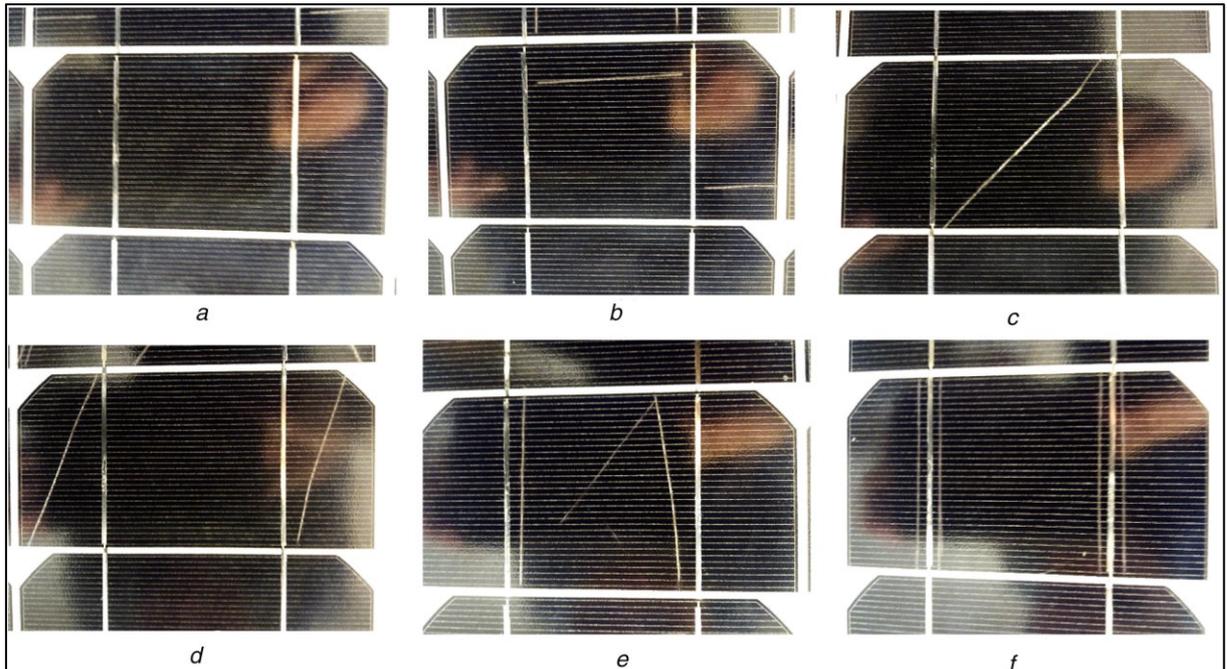
2.5.1 Tipos de microfissuras

Existem vários tipos de microfissuras que ocorrem em módulos fotovoltaicos: fendas diagonais, paralelas aos barramentos, perpendiculares aos barramentos e rachaduras em múltiplas direções. As fendas diagonais e as rachaduras em múltiplas direções mostram sempre uma redução na potência de saída dos módulos fotovoltaicos. (DHIMISH et al., 2017).

Na figura 10 abaixo, a letra (a) mostra uma célula normal, sem rachaduras; a letra (b) célula rachada perpendicular ao barramento; (c) célula rachada diagonalmente entre barramentos; (d) célula diagonalmente rachada fora dos barramentos; (e) célula parcialmente rachada entre os barramentos; (f) célula totalmente rachada (CHENG et al., 2019).

O maior dano ao desempenho do sistema é causado quando uma célula é totalmente rachada, seguido de quando uma célula é parcialmente rachada. A totalmente rachada perde a ligação elétrica para o barramento, enquanto a célula parcialmente rachada ainda tem uma área capaz gerar corrente (CHENG et al., 2019).

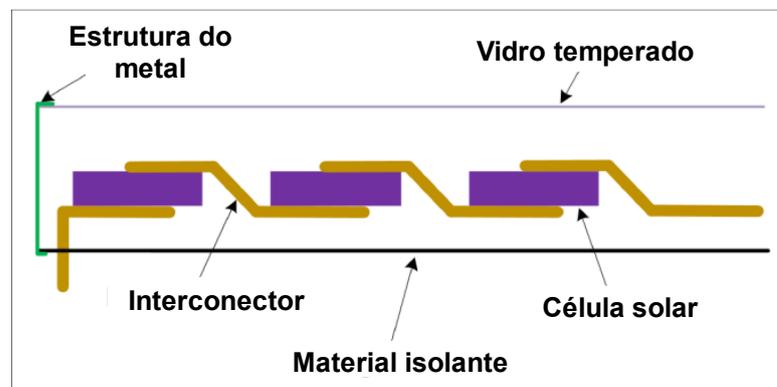
Figura 10 – Diferentes tipos de rachaduras nas células



Fonte: CHENG et al. (2019)

Ambos os casos, parcialmente e totalmente rachada, mostram uma corrente reduzida que afeta todo o painel solar, e isso ocorre devido a estrutura do painel. A célula é basicamente uma junção PN, que a camada superior é a negativa, enquanto a camada inferior é a positiva. Para vincular células fotovoltaicas em série, as conexões são feitas ligando a camada superior da primeira célula na camada inferior da segunda célula, como mostrado na figura 11. A corrente flui entre as duas camadas e, por isso, quaisquer células que tenham algum tipo de rachadura citada anteriormente, acaba por afetar o percurso da corrente (CHENG et al., 2019).

Figura 11 – Estrutura física de uma célula fotovoltaica

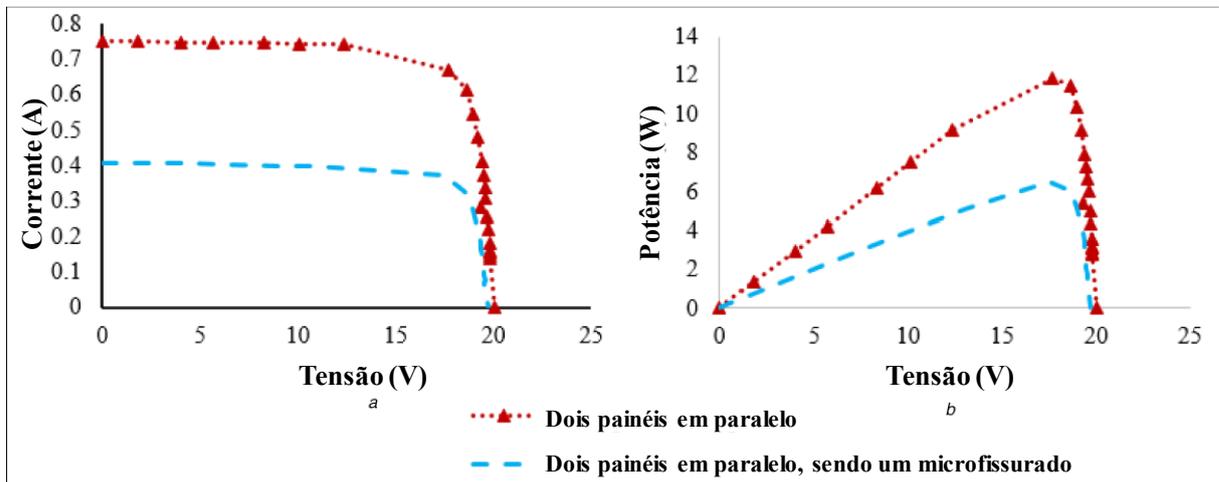


Fonte: Adaptado de CHENG et al. (2019)

2.5.2 Curvas $I-V$ e $P-V$ de painéis com microfissuras

Um exemplo das curvas $I-V$ e $P-V$ de painéis com e sem microfissuras está na figura 12, que mostra dois painéis inteiros conectados em paralelo comparado com dois painéis também conectados em paralelo, sendo um deles com células totalmente rachadas. Contudo, a operação do sistema não é afetada pelas rachaduras, mas o desempenho da produção de energia diminui drasticamente, visto que a corrente do sistema cai pela metade, fazendo com que a potência máxima também caia pela metade (CHENG et al., 2019).

Figura 12 – Curvas $I-V$ e $P-V$ com dois painéis paralelos inteiros e dois painéis paralelos sendo um rachado



Fonte: Adaptado de CHENG et al. (2019)

2.5.3 Forma de detecção das microfissuras

As técnicas de imagem são ferramentas essenciais na pesquisa fotovoltaica, pois permitem a coleta de informações obtidas através da resposta elétrica e óptica de uma célula solar (MÜLLER et al., 2014 apud FRAZÃO et al., 2016).

A eletroluminescência (EL) é um dos métodos de imagem mais populares para a caracterização de células e módulos solares de silício. A principal vantagem do EL é sua capacidade de produzir mapeamentos de alta resolução usando curtos tempos de aquisição (FRAZÃO et al., 2016).

O princípio da medição de eletroluminescência começa com a injeção de corrente de polarização direta na célula solar, sendo identificada a recombinação radiativa banda a banda. Além disso, consegue-se fazer o mapeamento dos comprimentos de difusão, tomando a

proporção de duas imagens obtidas com filtros espectrais diferentes e o mapeamento da resistência em série local da célula (HINKEN et al., 2007; KIRCHARTZ et al., 2009 apud FRAZÃO et al., 2016).

2.6 REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

Neste subcapítulo apresenta-se três artigos que possuem teorias, metodologias e análises conclusivas, as quais devem ser tomadas como base para a obtenção dos resultados deste TCC.

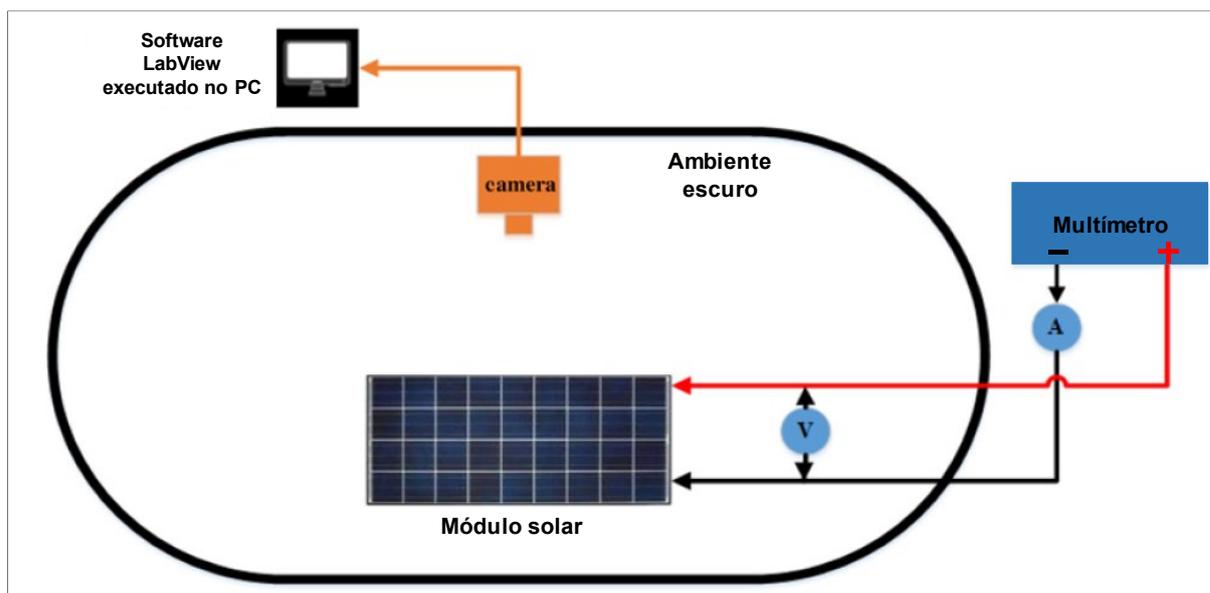
2.6.1 **Artigo 1: Effect of micro cracks on photovoltaic output power: case study based on real-time long-term data measurements**

A principal contribuição deste artigo é a utilização de um sistema de imagem que detecta microfissuras em módulos fotovoltaicos. Há a comparação entre a potência de saída teórica e a potência de saída do painel rachado, sendo realizado em vários módulos fotovoltaicos sob medição de dados em tempo real (DHIMISH et al., 2017).

O desempenho dos sistemas fotovoltaicos pode ser monitorado usando o software o *LabView*. Além disso, o software *MatLab* permite a criação de ferramentas para modelar e estimar o desempenho dos sistemas fotovoltaicos. A simulação é importante para comparar os dados de saída medidos no módulo fotovoltaico com o desempenho teórico (DHIMISH et al., 2017).

A figura 13 abaixo apresenta como é realizada a verificação nos módulos. Através do uso de um voltímetro e um amperímetro para verificar o comportamento da tensão e da corrente e da potência de saída nos módulos. Além disso, com a câmera é possível descobrir quais as células solares dos módulos estão danificadas, utilizando a eletroluminescência (DHIMISH et al., 2017).

Figura 13 – Configuração experimental para a detecção de microfissuras



Fonte: Adaptado de DHIMISH et al. (2017)

2.6.2 Artigo 2: The risk of power loss in crystalline silicon based photovoltaic modules due to micro-cracks

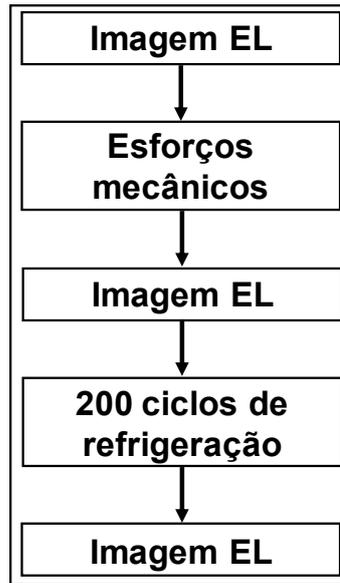
Com o passar do tempo, os módulos solares estão sujeitos a esforços térmicos e mecânicos, criando microfissuras, resultando na separação das ligações elétricas internas, tornando células inativas que não circulam corrente e não produzem energia. Portanto, pode-se realizar ensaios de esforços mecânicos, com o objetivo de verificar o impacto causado no desempenho do painel, pela presença das microfissuras (KONTGES et al, 2011).

Primeiro é utilizado um módulo fotovoltaico intacto para realizar o teste de carga mecânica e medir a imediata influência das microfissuras na alimentação do módulo. Em seguida, realizar um teste de envelhecimento acelerado nestes módulos e verificar o impacto das microfissuras na geração de energia do sistema (KONTGES et al, 2011).

O processo de análise do painel fotovoltaico passa por uma sequência de testes, como mostrado na figura 14. É tirado fotos de eletroluminescência antes e depois de ensaios mecânicos e térmicos, com o intuito de acelerar e simular a degradação do painel, podendo assim, verificar a queda de desempenho (KONTGES et al, 2011).

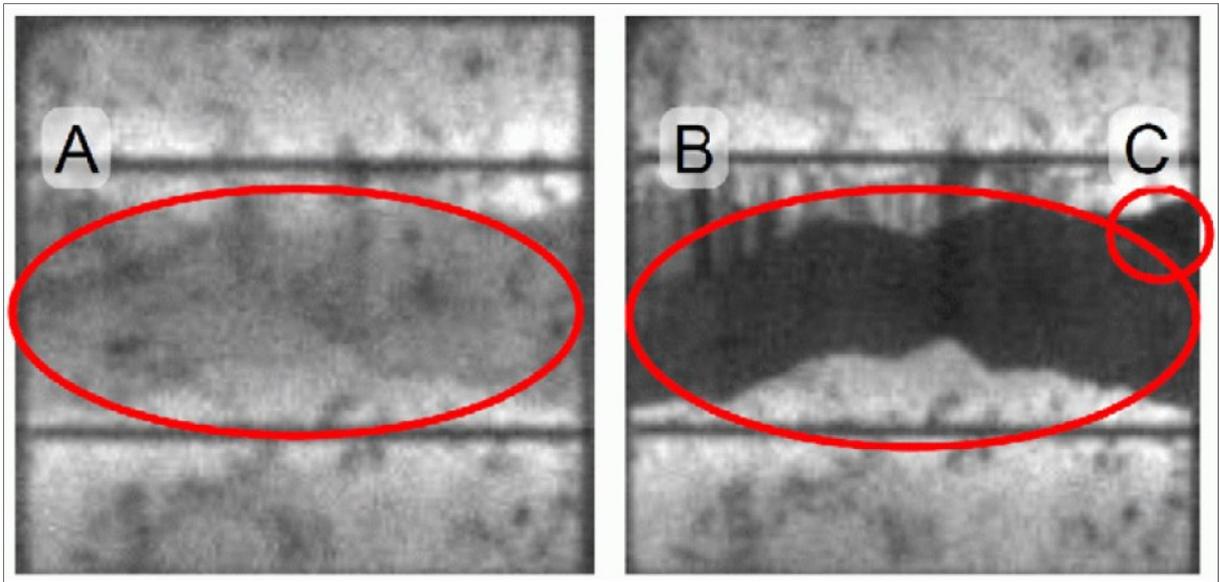
A figura 15 mostra imagens de eletroluminescência antes de depois de ensaios mecânicos. É verificado na imagem a esquerda a célula solar com uma parta mais frágil, dentro do círculo vermelho A. Já a imagem da direita mostra, após o ensaio de carga mecânica e ensaio térmico sobre a célula, as microfissuras dentro dos círculos B e C (KONTGES et al, 2011).

Figura 14 - Sequência de ensaio



Fonte: Adaptado de KONTGES et al. (2011)

Figura 15 – Imagens de eletroluminescência após os ensaios mecânico e térmico



Fonte: KONTGES et al. (2011)

2.6.3 Artigo 3: Snail Trails and Cell Microcrack Impact on PV Module Maximum Power and Energy Production

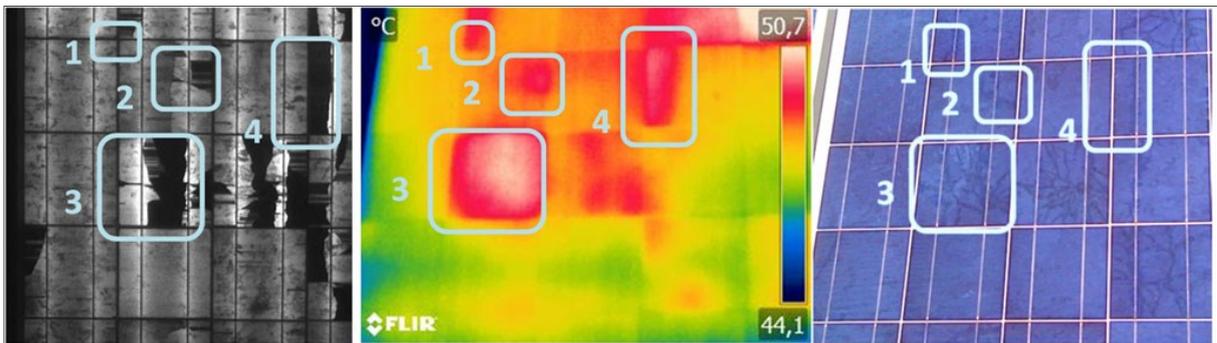
A análise de degradação de módulos fotovoltaicos durante o seu período de operação é altamente importante para avaliar o seu desempenho. Alguns defeitos podem aparecer imediatamente após a instalação e durante a sua operação. Entre eles, as microfissuras que

ocorrem em sistemas fotovoltaicos dentro de alguns meses após a instalação são muito impactantes no desempenho dos painéis fotovoltaicos (DOLARA et al., 2016).

A foto com uma câmera de eletroluminescência é um teste qualitativo utilizado para a detecção de microfissuras em módulos fotovoltaicos. As áreas afetadas são mais escuras do painel, já que as células não geram energia e, por isso, não emitem luz (DOLARA et al., 2016).

A figura 16, abaixo, apresenta uma imagem de eletroluminescência, uma imagem térmica e uma imagem visual de um painel fotovoltaico com diversas microfissuras em suas células. Comparando as três, é possível verificar uma relação entre os pontos mais escuros da imagem de eletroluminescência, os pontos quentes da imagem térmica e os defeitos visuais (DOLARA et al., 2016).

Figura 16 – Imagem de eletroluminescência, térmica e visual



Fonte: DOLARA et al. (2016)

3 METODOLOGIA

Neste capítulo, pretende-se apresentar os meios para de verificar as condições de operação, desempenho e perdas de energia de um módulo fotovoltaico com e sem microfissuras. Parte-se do desenvolvimento de uma câmera que possibilita fotografar e detectar as microfissuras nos painéis, passando pela construção de um circuito capaz de medir tensão e corrente de trabalho do painel e, por fim, realizando uma simulação da produção de energia do painel ao longo do tempo.

3.1 MÉTODO DA ELETROLUMINESCÊNCIA

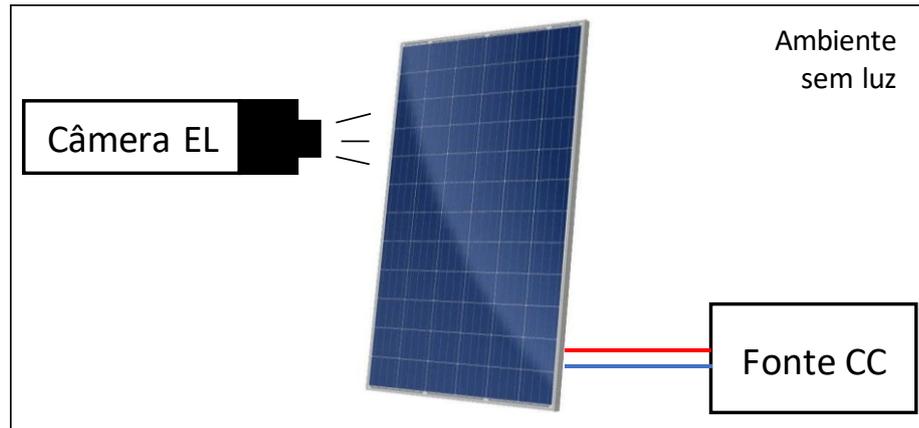
Os dispositivos fotovoltaicos emitem uma radiação que não é visível a olho nu, mas encontra-se na faixa infravermelha do espectro eletromagnético, que possui 900 *nm* à 1300 *nm* de comprimento de onda (FIGUEIREDO et al., 2018).

Com uma câmera digital convencional, têm-se a intenção de transformá-la em uma câmera de eletroluminescência de baixo custo. Para isso, deve-se retirar da câmera digital o filtro infravermelho (IR), possibilitando a captura de imagens dentro da faixa espectral de EL.

Para fotografar um painel fotovoltaico e observar a sua condição, é preciso polarizar o módulo diretamente em uma fonte CC para que a corrente flua pelos semicondutores das células e emita luz. Os valores de corrente e tensão fornecidos pela fonte devem ser muito superiores aos valores de corrente de curto-circuito (I_{sc}) e tensão de curto aberto (V_{oc}) do painel fotovoltaico. Além disso, o experimento deve ser feito dentro de um ambiente totalmente escuro, para que seja mais visível, sem interferência da luz externa, resultando em uma melhor qualidade na imagem.

No experimento, primeiramente serão tiradas fotos com esta câmara EL de um painel solar para averiguar a sua condição inicial. Posteriormente, serão tiradas fotos dos painéis após a realização dos esforços mecânicos, para examinar as microfissuras causadas pelo impacto destes esforços. A figura 17 abaixo apresenta a forma de como deve ser tirada as fotos com a câmara EL.

Figura 17 – Utilização da câmera EL

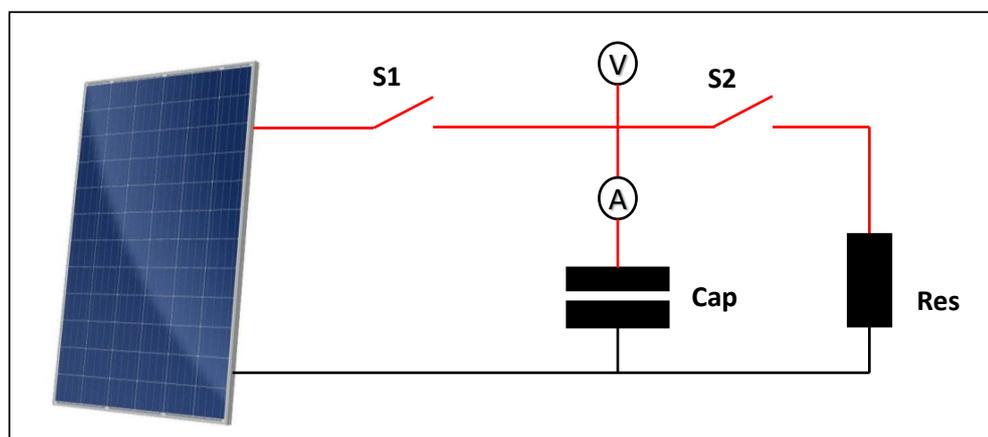


Fonte: O Autor (2021)

3.2 MÉTODO DE MEDIÇÃO DA CURVA $I-V$

Para obter a curva $I-V$ do painel solar será utilizada a técnica da carga capacitiva, que consiste em conectar um capacitor em paralelo com o gerador fotovoltaico. Para carregar o capacitor, é necessário fechar a chave S1, fazendo com que o capacitor se comporte inicialmente como um curto-circuito, a qual a tensão é nula e a corrente é máxima (I_{SC} – corrente de curto-circuito). Ao longo do ciclo, a carga do capacitor aumentará até atingir a condição de circuito aberto, o qual terá o valor máximo de tensão fornecido pelo painel e valor de corrente próximo a zero. Neste instante, deve-se abrir a chave S1 e fechar a chave S2, resultando na descarga do capacitor em cima da carga resistiva. Assim, fecha-se o ciclo. Para realizar uma nova medição, basta abrir a chave S2 e fechar a chave S1.

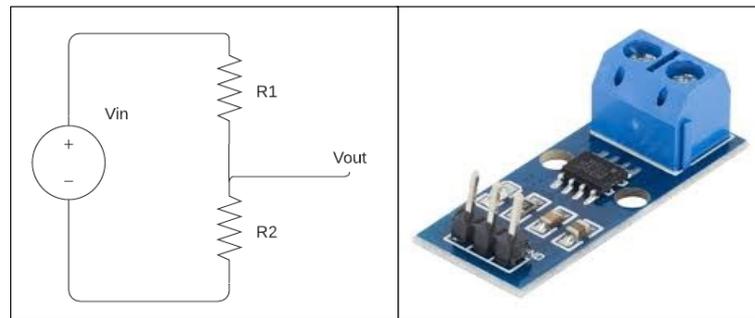
Figura 18 – Circuito básico de medição capacitiva



Fonte: O Autor (2021)

Para as medições, é necessário coletar os dados de tensão e corrente durante o carregamento do capacitor e, para isso, será utilizado o método do circuito divisor de tensão e uma placa microcontrolada, que é o sensor de corrente ACS712 (Anexo F), mostrados na figura 19, respectivamente.

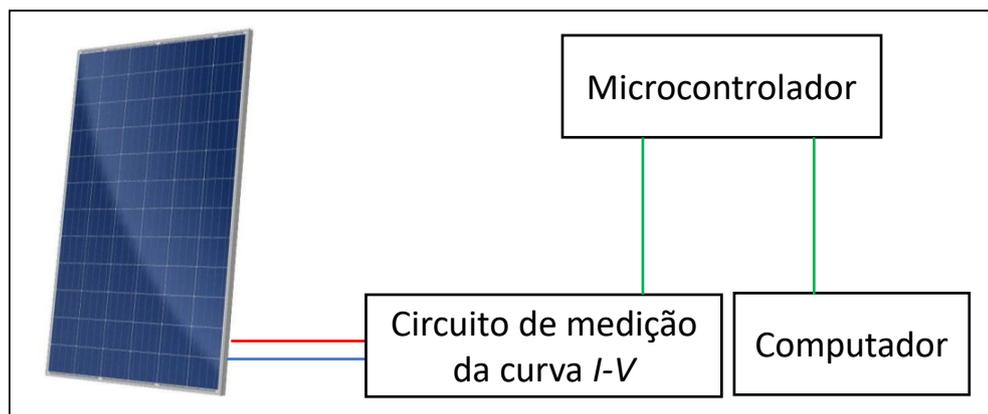
Figura 19 – Divisor de tensão e sensor de corrente ACS712



Fonte: O Autor (2021)

Para realizar o experimento, este circuito a ser projetado, estará conectado diretamente ao painel solar, que, por sua vez, ficará posicionado ao norte e inclinado no ângulo que tenha melhor incidência da luz solar. Além disso, o ensaio precisa ser feito em um dia com o céu limpo, entre às nove e às quinze horas, para que o painel gere o máximo de energia possível.

Figura 20 – Obtenção de dados



Fonte: O Autor (2021)

3.3 PRODUÇÃO DE ENERGIA

Com o intuito de verificar as condições de operação do painel, será feita uma projeção da produção de energia ao longo do tempo, comparando as situações do módulo solar antes e

depois da realização dos esforços mecânicos.

Para isso, será necessário adquirir as informações de irradiação solar global do local que será realizado o experimento das medições da curva $I-V$. A equação 1 mostra o cálculo para irradiação solar anual.

$$IGH_{Anual}(kWh/m^2) = IGH_{diária}(kWh/m^2/dia) \cdot 12 \text{ meses} \cdot 30,4 \text{ dias} \quad (1)$$

São consideradas as perdas de energia, pois é normal os painéis solares perderem energia anualmente, devido ao seu tempo de operação. É incluído também um rendimento de operação de geração de 80%. As dimensões do painel são necessárias, pois os valores de irradiação são por metro quadrado.

A energia produzida anualmente é feita através do cálculo da equação 2, levando em conta a potência do painel e das perdas de energia, a irradiação solar anual, o rendimento do painel, e as dimensões.

$$Energia (kWh) = (P_{painel} - P_{perdas}) \cdot IGH_{Anual} \cdot n \cdot D_{(LxA)} \quad (2)$$

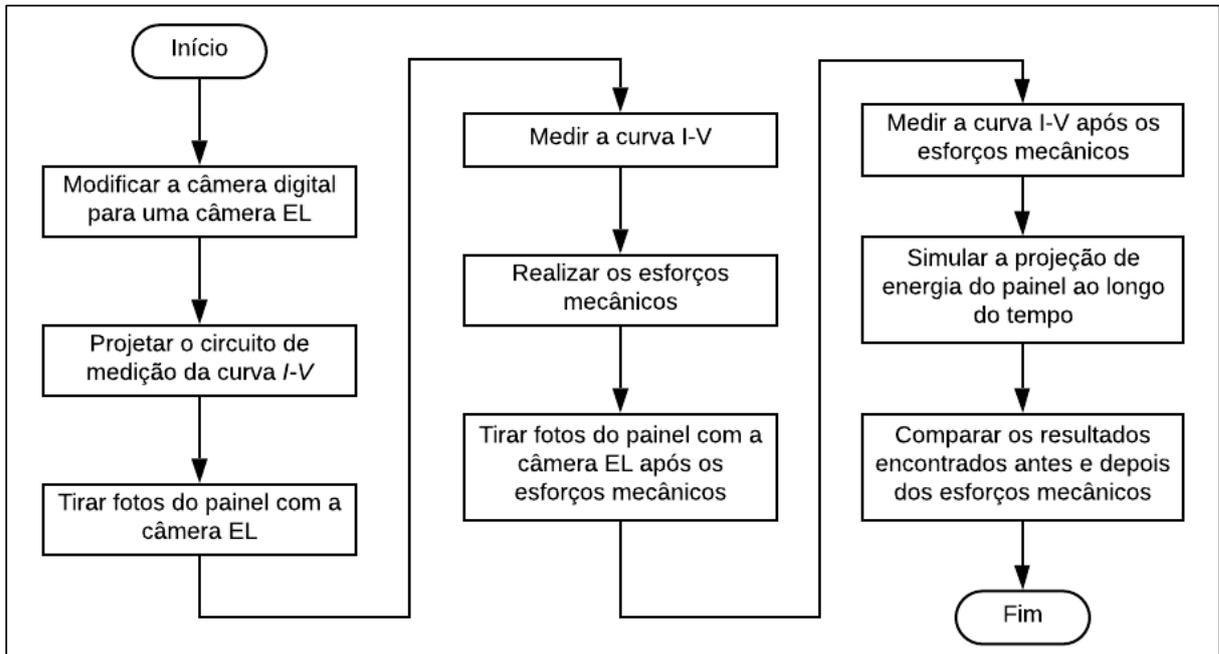
3.4 FLUXOGRAMA

O fluxograma de atividades, representado na figura 21, é composto por todas as etapas de desenvolvimento deste trabalho. Inicialmente, tem a transformação da câmera digital em câmera de eletroluminescência e o projeto do circuito de medição das curvas características. Após isto, parte-se para os experimentos práticos que são:

- a) Fotos com a câmera de eletroluminescência;
- b) Medição da curva $I-V$;
- c) Esforços mecânicos, como batidas e torções, para causar fissuras nas células solares;
- d) Fotos com a câmera de eletroluminescência após os esforços mecânicos;
- e) Medições da curva $I-V$ após os esforços mecânicos.

Depois dos ensaios, realiza-se a projeção de energia produzida pelo painel solar ao longo dos anos, considerando as situações do painel antes e depois dos esforços mecânicos praticados. Por fim, compara-se todos os resultados encontrados.

Figura 21 – Fluxograma de atividades



Fonte: O Autor (2021)

4 RESULTADOS

Neste capítulo, apresenta-se o desenvolvimento prático dos objetivos propostos. É iniciado pela apresentação do painel solar, a adaptação da câmera digital para uma câmera de eletroluminescência e o projeto do circuito de medição de curva $I-V$. Posteriormente, são mostrados os resultados encontrados através das análises obtidas das fotos retiradas do painel com a câmera EL, das medições da curva $I-V$ e da comparação da produção de energia com o painel antes e depois de sofrer os esforços mecânicos.

4.1 PAINEL SOLAR

O painel solar utilizado é da marca SinoSola, modelo SA30-36P com células solares de silício policristalino, o qual possui 30W de potência e 18,6% de eficiência energética. O *datasheet* deste painel está no Anexo A.

Figura 22 – Painel solar fotovoltaico SinoSola



Fonte: O Autor (2021)

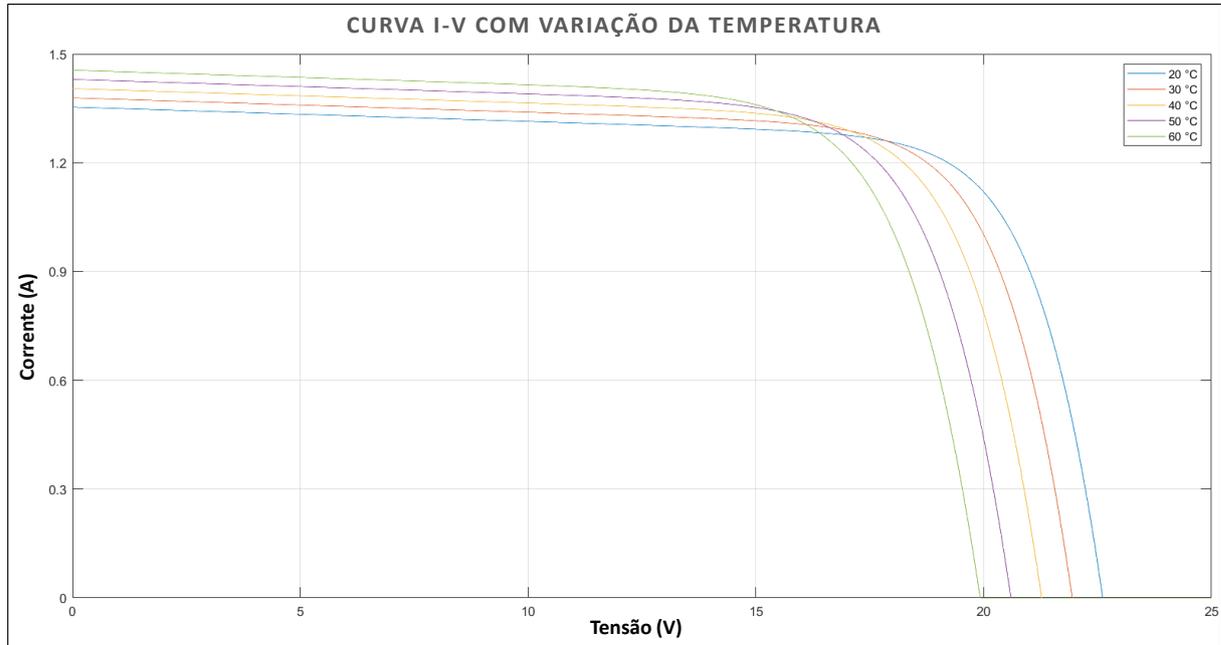
4.2 CARACTERIZAÇÃO DO PAINEL SOLAR POR SIMULAÇÃO

Com o intuito de caracterizar o painel solar, foi utilizado o *software* MatLab para obter a curva $I-V$ em diversas situações de irradiação e temperatura. Para isso, o código descrito no Apêndice E foi utilizado.

Verifica-se, na figura 23, a variação de temperatura de 20 à 60°C, com irradiação solar fixada em 800W/m², que é o valor nominal de temperatura e operação da célula solar (NOCT

– *Nominal Operating Cell Temperature*). Conforme a temperatura do painel aumenta, a tensão tende a diminuir bastante, já a corrente conta com um leve aumento. Conseqüentemente, a potência de operação é menor em temperaturas mais elevadas.

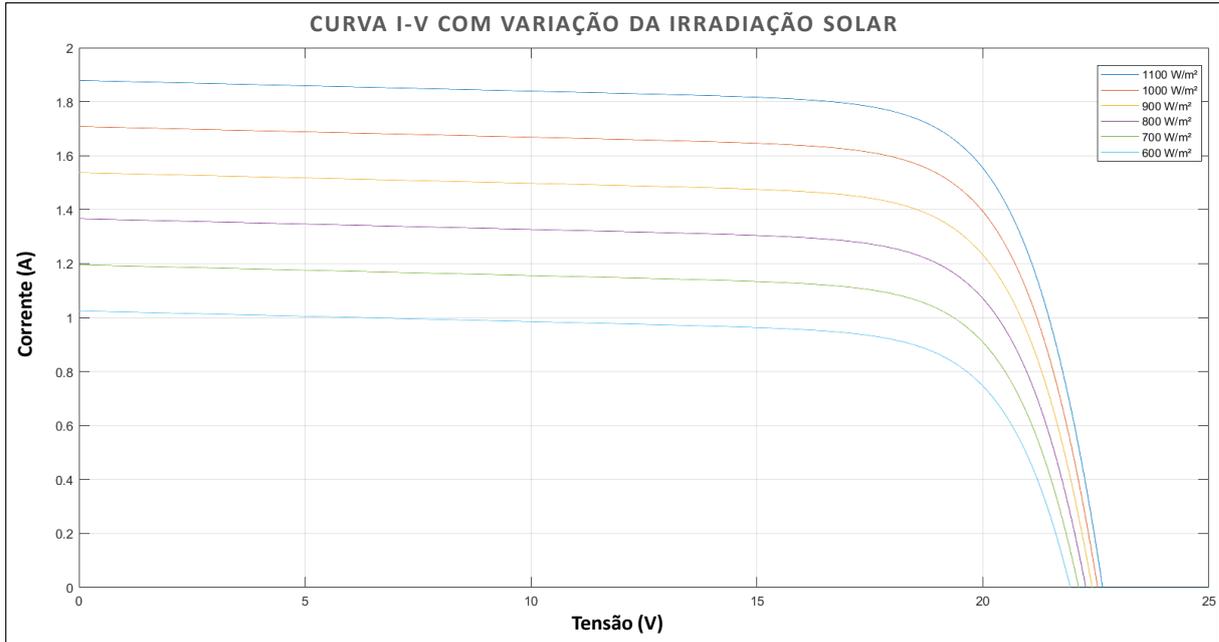
Figura 23 – Curvas $I-V$ da variação da temperatura com irradiação solar a $800\text{W}/\text{m}^2$



Fonte: O Autor (2021)

Observando a figura 24, tem-se a simulação da curva $I-V$ com a temperatura fixada em 25°C e com a variação na irradiação solar de 600 à $1100\text{W}/\text{m}^2$. Ao contrário da simulação mostrada na figura 24, a irradiação solar causa uma diferença maior com a corrente do painel. A corrente de curto circuito possui o valor um pouco maior que 1A quando a irradiação solar está em $600\text{W}/\text{m}^2$ e o valor próximo de $1,9\text{A}$ quando está em $1100\text{W}/\text{m}^2$. Já o valor da tensão também aumenta quando a irradiação solar aumenta, porém, com uma diferença bem menor. Portanto, os valores de irradiação solar afetam diretamente a operação do painel e, quanto maior seu valor, maior será a potência de saída, conseqüentemente, maior será a produção de energia.

Figura 24 – Curvas $I-V$ da variação da irradiação solar com temperatura em 25°C



Fonte: O Autor (2021)

4.3 MONTAGEM DA CÂMERA DE ELETROLUMINESCÊNCIA

Para a adaptação da câmera digital, houve a necessidade de desmontá-la e retirar o filtro infravermelho, que é responsável por impedir que os raios infravermelhos apareçam nas fotos. Com a retirada deste filtro, é possível captar a luz gerada pela corrente passante nas células do painel fotovoltaico. A figura 25 apresenta a câmera digital utilizada para o experimento.

Figura 25 – Câmera digital para testes de eletroluminescência

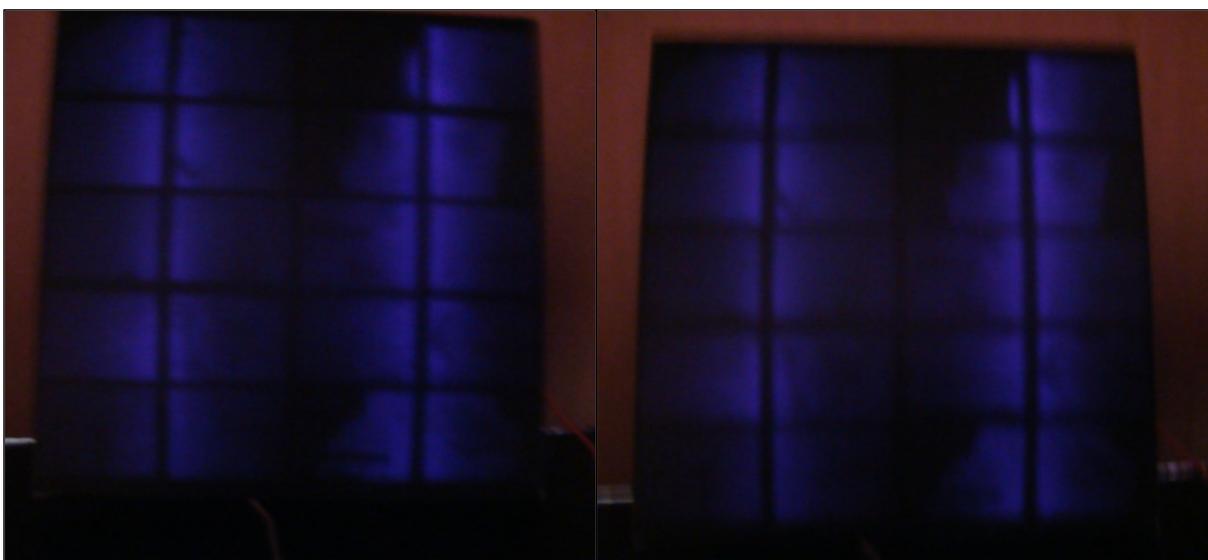


Fonte: O Autor (2021)

A fim de testar o funcionamento após a transformação da câmera digital em uma câmera de eletroluminescência, foram registradas algumas imagens de células solares. Para isso, necessitou-se um ambiente totalmente escuro, além da aplicação direta de tensão e corrente na célula solar.

Abaixo, na figura 26, as imagens tiradas com esta câmera de eletroluminescência. Examinando as imagens, é observado pontos que há pouca ou nenhuma luz. Isso nos mostra que a não há passagem de corrente nestes pontos, devido as células estarem danificadas.

Figura 26 – Imagens testes da câmera de eletroluminescência utilizando células solares



Fonte: O Autor (2021)

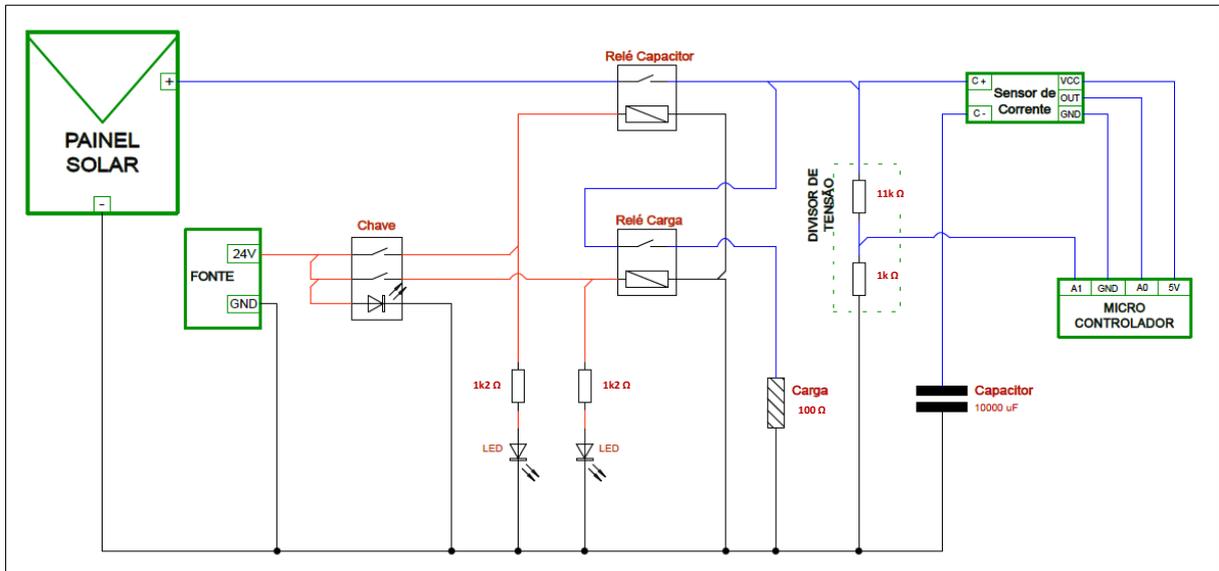
A câmera digital para realização deste trabalho é da marca Sony, modelo Cyber-Shot DSC-T700 Carl Zeiss e atende as condições necessárias para os testes de eletroluminescência em painéis solares. É possível fazer este experimento da retirada do filtro infravermelho com qualquer câmera digital.

4.4 PROJETO DO CIRCUITO DE MEDIÇÃO DE CURVA $I-V$

Conforme mencionado na metodologia do trabalho, foi escolhido o método capacitivo para obtenção da curva $I-V$. Para isso, foi utilizado o *software* de projeto elétrico Zuken E3 Series, a fim de arquitetar o circuito, prevendo todas as ligações dos componentes necessários para o correto funcionamento do experimento.

A figura 27 consta o diagrama elétrico projetado, o qual foram previstas as ligações do painel solar, da fonte de alimentação, chaves e relés para acionamento, além da parte de medição de dados.

Figura 27 – Diagrama elétrico do circuito de medição capacitiva de curva $I-V$



Fonte: O Autor (2021)

O circuito consta com uma fonte de tensão 24V, uma chave de três estágios, dois relés com acionamento em 24V e 30A de corrente, dois LEDs, um capacitor, uma carga resistiva, um sensor de corrente, um divisor de tensão e um microcontrolador.

A fonte de tensão é responsável pela alimentação do circuito, visto que tanto a chave quanto os relés funcionam em tensão de 24V. A chave possui três estágios independentes. O estágio zero mantém as duas chaves internas abertas. O estágio 1 aciona a primeira chave da tecla, que, por sua vez, energiza a bobina do relé do capacitor, fechando o contato da sua chave interna, conduzindo a energia do painel solar para carregar o capacitor. O capacitor armazenará energia gradativamente até que esteja totalmente carregado. Posteriormente, acionando o estágio 2 da tecla, o relé do capacitor irá parar de conduzir e o relé da carga receberá energia em sua bobina, fechando a sua chave interna, fazendo com que a energia armazenada do capacitor se descarregue na carga que está em paralelo com o circuito.

Os relés (Anexo D) são necessários pois suportam uma corrente de até 30A cada, diferentemente da tecla, que suporta uma corrente bem abaixo, não sobrecarregando-a.

Os dois LEDs são para mostrar qual estágio da tecla está em condução. Um LED acende com o estágio 1 acionado e outro acende com o estágio 2 da tecla acionado.

O circuito conta com também um microcontrolador Arduino Uno (Anexo E), responsável por receber os dados de tensão e corrente obtidos através do divisor de tensão e do sensor de corrente, respectivamente.

Sabendo que a tensão de circuito aberto (V_{OC}) do painel solar é 22,54V (Anexo A), e que a tensão máxima da entrada analógica do Arduino tem que ser de no máximo 5V (conforme seu *datasheet*), é realizado o cálculo de divisão de tensão para saber os valores de resistores para usar no circuito. Foi atribuído um valor máximo de 55V para o divisor de tensão:

$$V_{IN} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} V_{OUT} \quad (3)$$

$$55 = \frac{R_1 + R_2}{R_2} 5$$

$$5 \cdot R_1 + 5 \cdot R_2 = 55 \cdot R_2$$

$$R_1 = 10 \cdot R_2$$

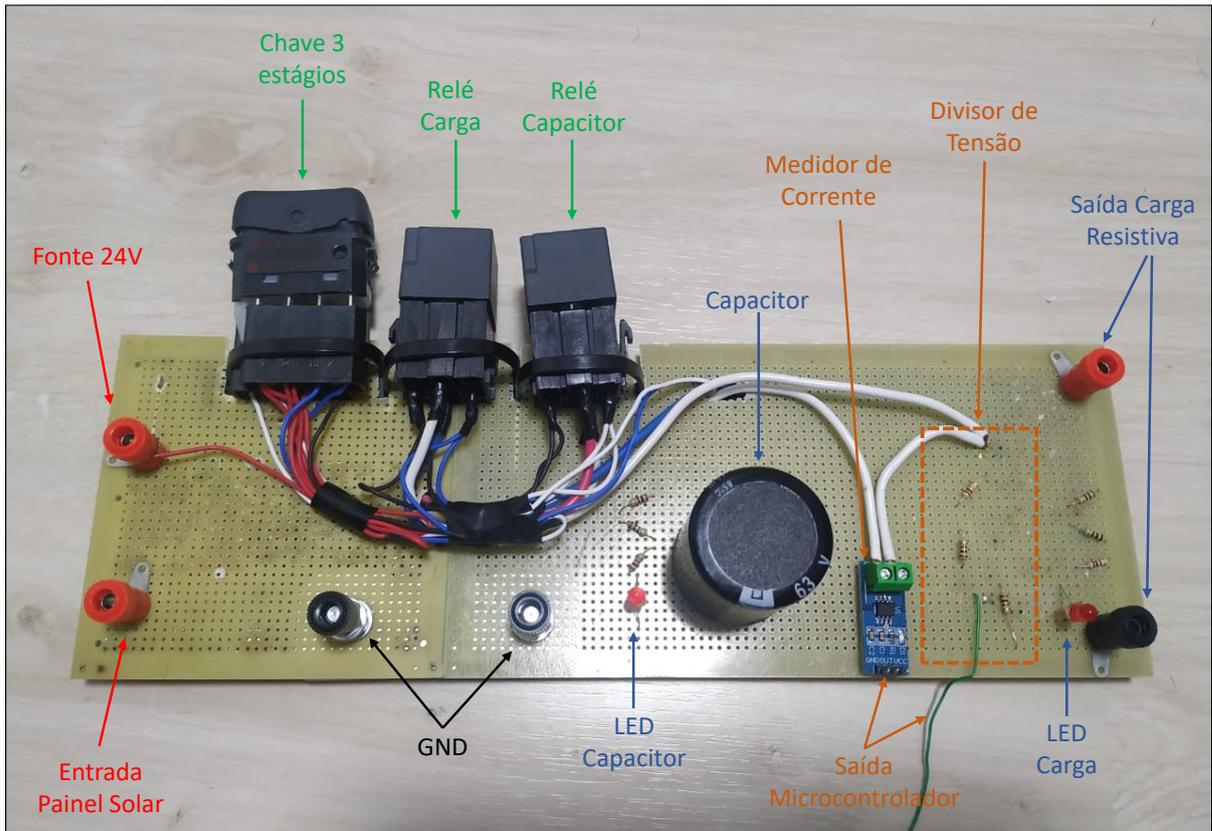
Com base nos cálculos, considera-se que o valor da associação de resistores de R_2 precisa ser 10 vezes maior que o valor do resistor R_1 . Portanto, para o projeto do circuito de curva $I-V$, definiu-se os seguintes valores para R_1 e R_2 :

- a) $R_1 = 10k + 1k = 11k \Omega$
- b) $R_2 = 1k \Omega$

O sensor de corrente utilizado é ligado em série com o circuito, sendo alimentado por 5V que são fornecidos pelo próprio microcontrolador Arduino. O sensor também consta com uma saída que está conectada a uma entrada analógica do microcontrolador, responsável pela transferência de dados para obter os valores da corrente. O apêndice F mostra o código programável utilizado no microcontrolador Arduino.

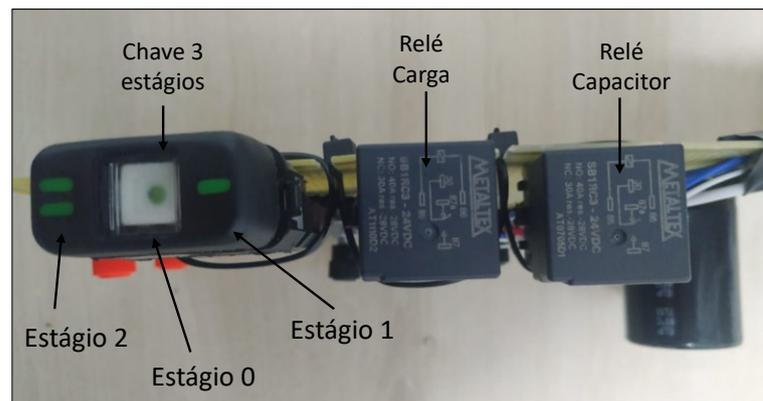
Nas duas imagens abaixo, 28 (também representada no Apêndice D) e 29, pode-se ver o circuito montando conforme o diagrama apresentado, sinalizando todos os componentes do circuito, como a tecla (e seus 3 estágios), os reles, o capacitor, medidor de corrente e divisor de tensão, além das terminações de alimentação, da entrada do painel, da carga resistiva e dos pontos terra.

Figura 28 – Montagem física do circuito de medição capacitiva



Fonte: O Autor (2021)

Figura 29 – Tecla e Relés do circuito



Fonte: O Autor (2021)

O Apêndice A consta a arquitetura do diagrama do circuito de medição completo, com todas as ligações, semelhante ao que consta a figura 26, para melhor visualização. No Apêndice B, o diagrama possui apenas as ligações de quando o estágio 1 da tecla está acionado, o qual o capacitor é carregado pelo painel solar. Já o Apêndice C, refere-se quando o estágio 2 da tecla é acionado, contendo as ligações do circuito quando o capacitor é descarregado na

carga resistiva industrial.

4.5 ENSAIO PARA AQUISIÇÃO DAS IMAGENS DE ELETROMINESCÊNCIA

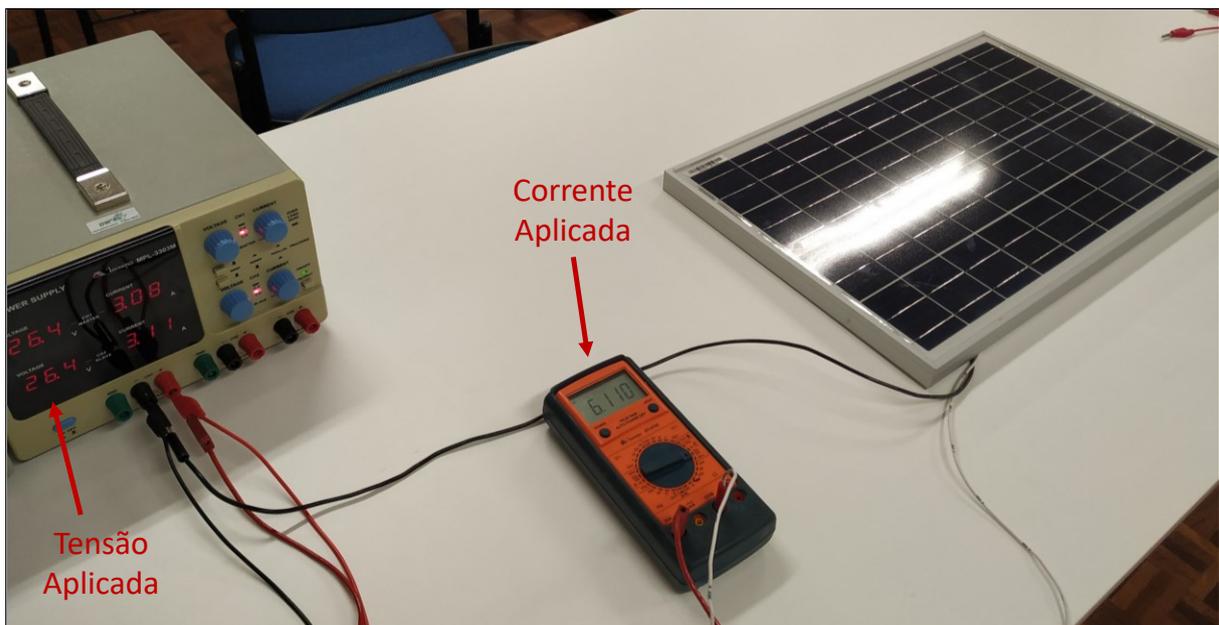
Para este experimento, seguindo as diretrizes do subcapítulo 3.1, da metodologia, utilizando uma fonte de alimentação de bancada da marca Minipa (Anexo B), contendo duas saídas independentes e que cada uma gera até 3A de corrente, houve a necessidade de ligá-las em paralelo, a fim de atingir um valor de corrente maior que 3A.

Utilizando as duas saídas, foi aplicado diretamente no painel uma tensão de pouco mais de 26V e corrente de 6A, resultando em uma potência de 156W, valor este bem acima das características de operação do painel solar. O alto valor de corrente e de tensão aplicados no painel dá-se pela necessidade de ele emitir a luz infravermelha necessária para a câmera de eletroluminescência conseguir capturar nas imagens.

Com a aplicação de valores de tensão e corrente nominais de operação do painel solar (atingindo potência máxima de 30W), não foi viável capturar imagens, pois a luz infravermelha emitida pelo painel nesta condição não é visível, resultando em fotos totalmente escuras.

Na figura 30, a fonte de alimentação mostra o valor de tensão durante o experimento, já o multímetro, o valor de corrente. Os dois equipamentos estão conectados diretamente com o painel solar utilizado neste trabalho.

Figura 30 – Obtenção das imagens de eletroluminescência



Fonte: O Autor (2021)

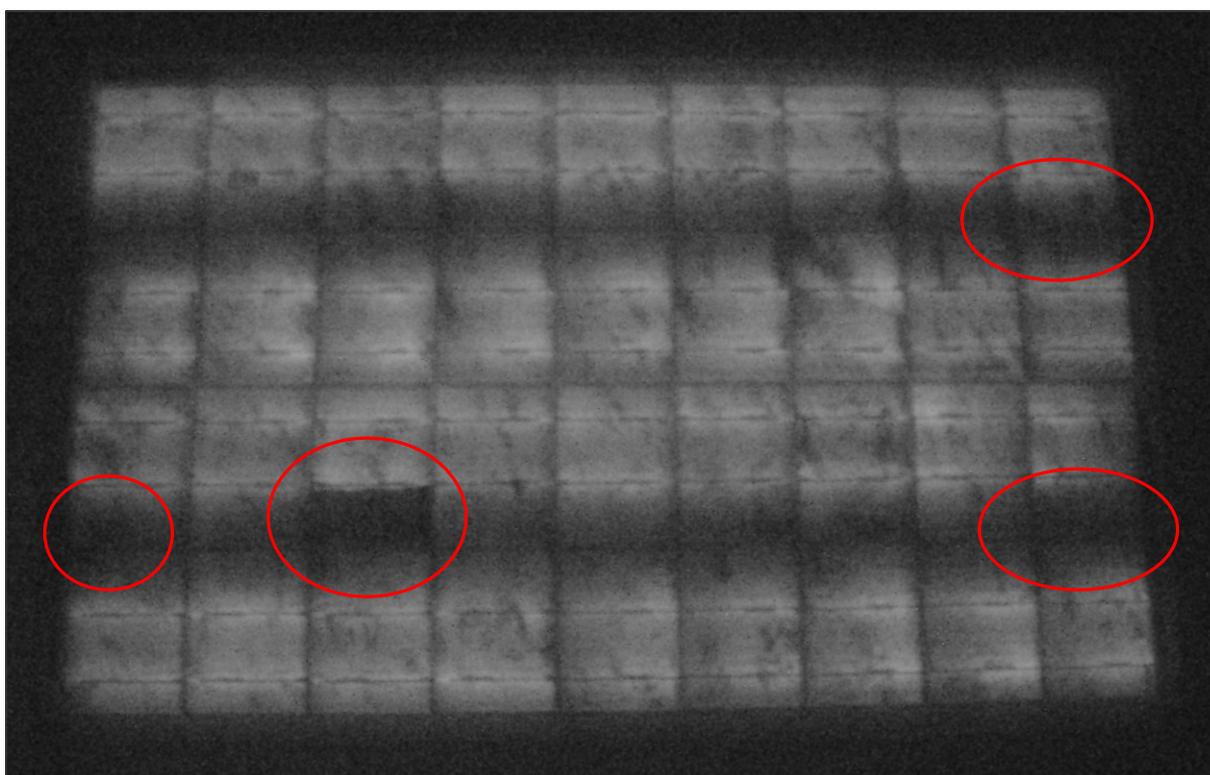
Utilizando a câmera de eletroluminescência apresentada no subcapítulo 4.2, em um ambiente totalmente escuro, foram tiradas as fotos do painel solar antes de depois dos esforços realizados, a fim de verificar as condições do painel durante a obtenção de dados através da medição das curvas $I-V$.

Na figura 31, visualiza-se a imagem de eletroluminescência obtida mediando o painel solar em seu estado inicial. Apesar de ser um módulo novo, ele apresenta algumas microfissuras que são destacadas em círculos vermelhos na imagem.

Por ainda não ter sido aplicado nenhum esforço ou torção para que as células quebrem, conclui-se que estas microfissuras encontradas em seu estado inicial tenham ocorrido devido ao transporte ou manuseio do painel solar, além da fragilidade dele.

Além dos círculos vermelhos destacados, observa-se também diversas pequenas rachaduras, sendo elas diagonais, perpendiculares, parciais e totais, semelhante ao que é apresentado na figura 10.

Figura 31 – Eletroluminescência do painel solar em estado inicial



Fonte: O Autor (2021)

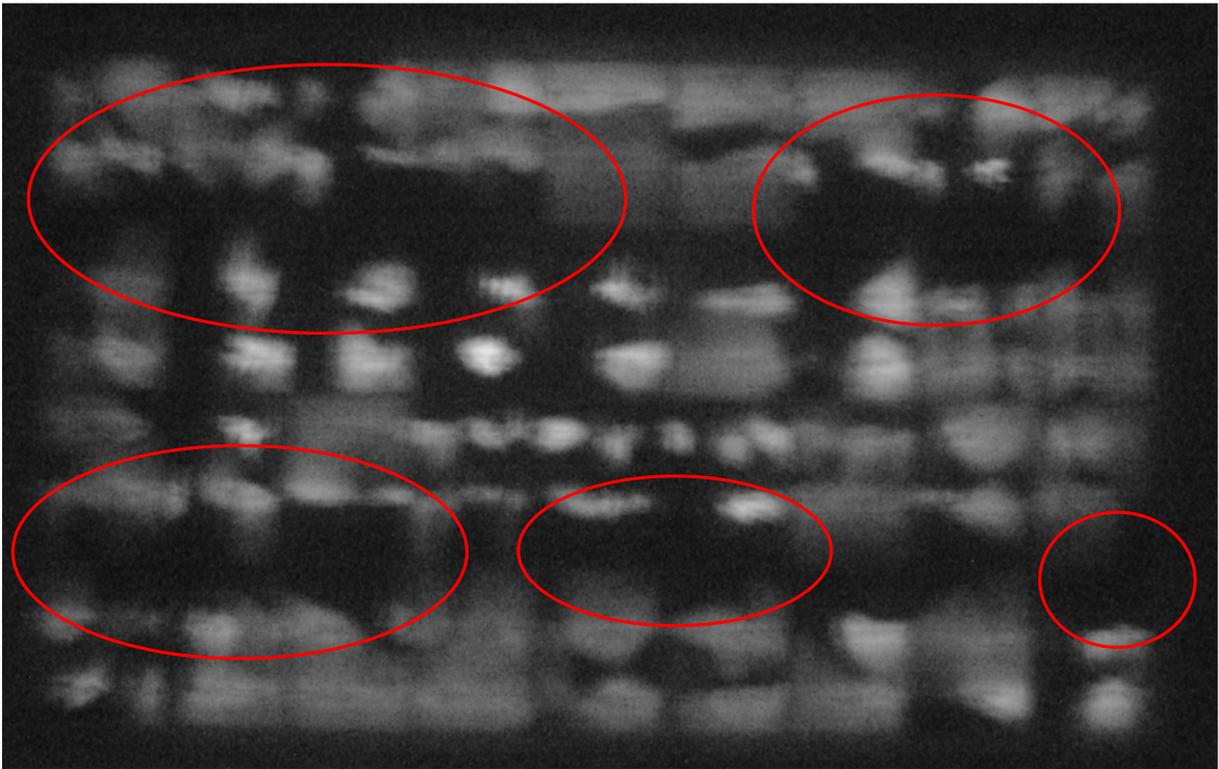
Após o experimento das medições, que será apresentado nos próximos capítulos, foi realizado no painel solar os esforços, aplicando batidas e torções, para garantir a quebra das

interconexões das células solares.

Na figura 32, é apresentado a imagem de eletroluminescência com muitas rachaduras no painel. As marcações em vermelho, mostram as partes mais críticas, as quais existem diversas células solares totalmente escuras, devido as interconexões das células estarem rompidas. Por consequência, o fluxo de corrente é interrompido nestas partes do painel, prejudicando a produção de energia e aumento da temperatura, além de comprometer a durabilidade do módulo.

Pela imagem, é avaliado que as batidas e torções empregadas no módulo fotovoltaico tiveram efeitos significativos, em razão de que todas as células apresentam algum tipo de rachadura, sendo ela parcial ou total.

Figura 32 – Eletroluminescência do painel solar fissurado



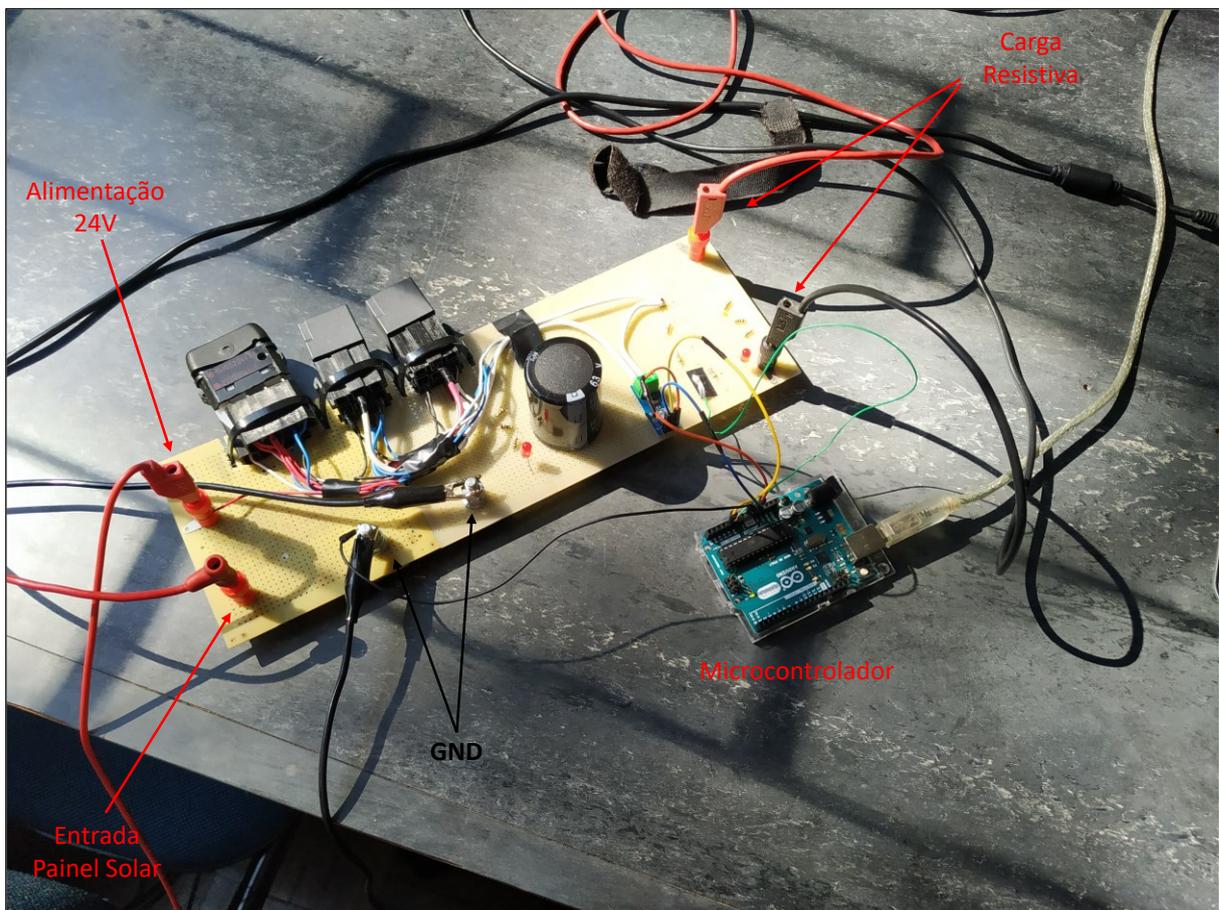
Fonte: O Autor (2021)

4.6 EXPERIMENTO DAS MEDIÇÕES

Nesta etapa, é utilizado os métodos apresentados no subcapítulo 3.2 da metodologia em conjunto com o subcapítulo 4.3, o qual foi desenvolvido e montado o circuito de medição.

Na imagem 33, tem-se o circuito montado juntamente com os equipamentos conectados durante a sua operação e com as descrições em cada ponto das ligações, como a alimentação, o painel solar, a carga e o microcontrolador.

Figura 33 – Disposição das ligações com o circuito de medição



Fonte: O Autor (2021)

Estes ensaios foram realizados no Campus Universitário Vale dos Vinhedos da UCS, localizado na cidade de Bento Gonçalves – RS e ocorreram em um período entre 10 e 12 horas a céu aberto, sem nuvens, durante o mês de abril. Para a maior quantidade de raios solares incidentes, o painel foi posicionado diretamente para o norte, com uma inclinação de 40°.

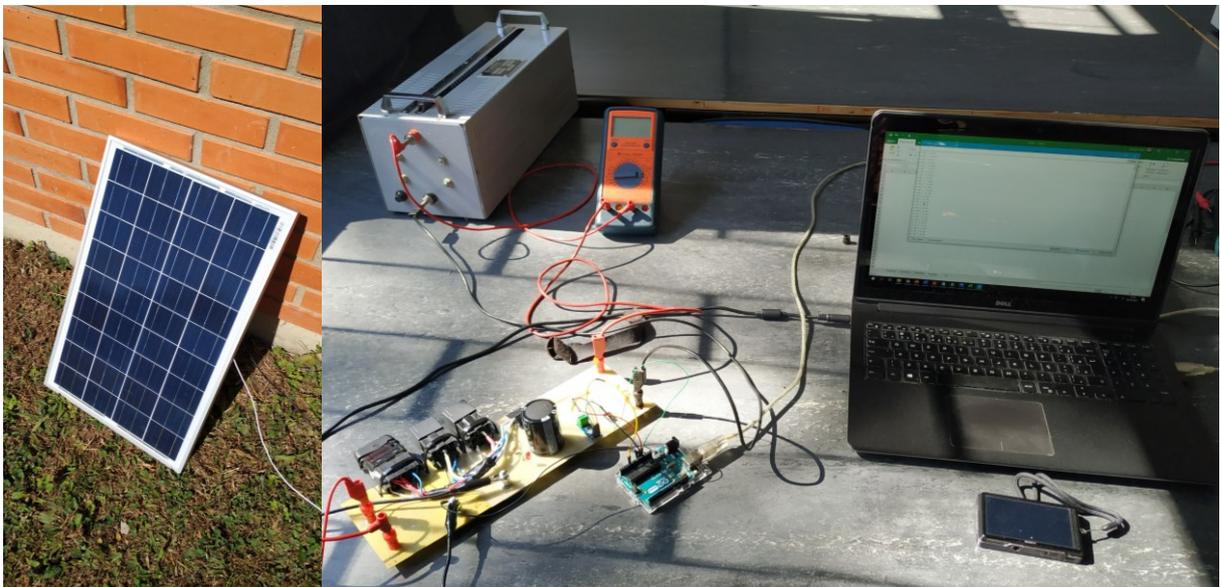
As medições foram obtidas em função do tempo, a qual foram realizadas no instante inicial que o painel era exposto ao sol e durante alguns minutos depois, o qual a temperatura

atingiu níveis mais altos. Para aferir a temperatura do painel na hora da realização do experimento, foi utilizado um medidor de temperatura (Anexo C).

A carga resistiva variável utilizada suporta uma potência de até 1000W e sua variação é de 1 Ω até 100 Ω . Para o experimento, foi mantido o valor da resistência da carga em 1 Ω , pois, assim, o capacitor descarrega mais rapidamente.

A figura 34 mostra os equipamentos utilizados durante a realização do experimento. Estão na imagem o painel solar, o circuito de medição, a carga resistiva variável e o microcontrolador conectado ao computador para armazenamento dos dados.

Figura 34 – Disposição dos equipamentos para realizar as medições

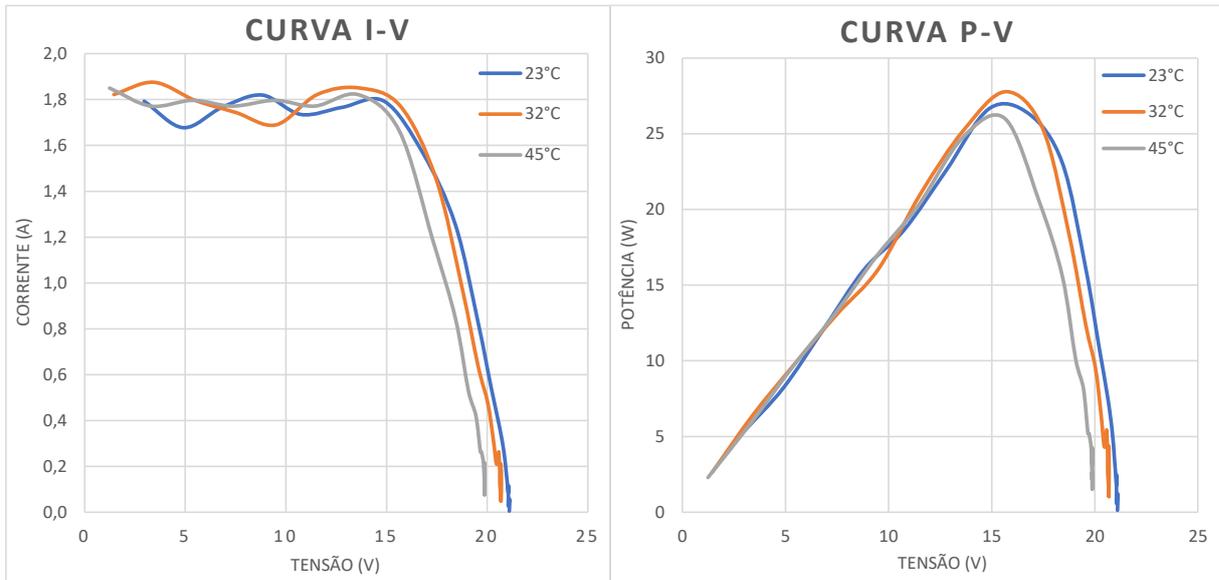


Fonte: O Autor (2021)

Cada medição realizada teve entre cinco a sete ciclos em sequência e todos os dados coletados pelo microcontrolador Arduino foram salvos e modelados em uma planilha do *software* Microsoft Excel. A partir dos dados salvos, os quais são mostrados no apêndice G, foi possível traçar as curvas $I-V$ e $P-V$ do painel em seu estado inicial e, posteriormente, traçar as curvas $I-V$ e $P-V$ após os esforços mecânicos aplicados no módulo.

A figura 35 apresenta no lado esquerdo a curva $I-V$ e no lado direito a curva $P-V$, projetadas através dos dados adquiridos pelos ensaios de medições com o painel solar em estado inicial. São exibidas três curvas características, nas temperaturas de 23°C, 32°C e 45°C.

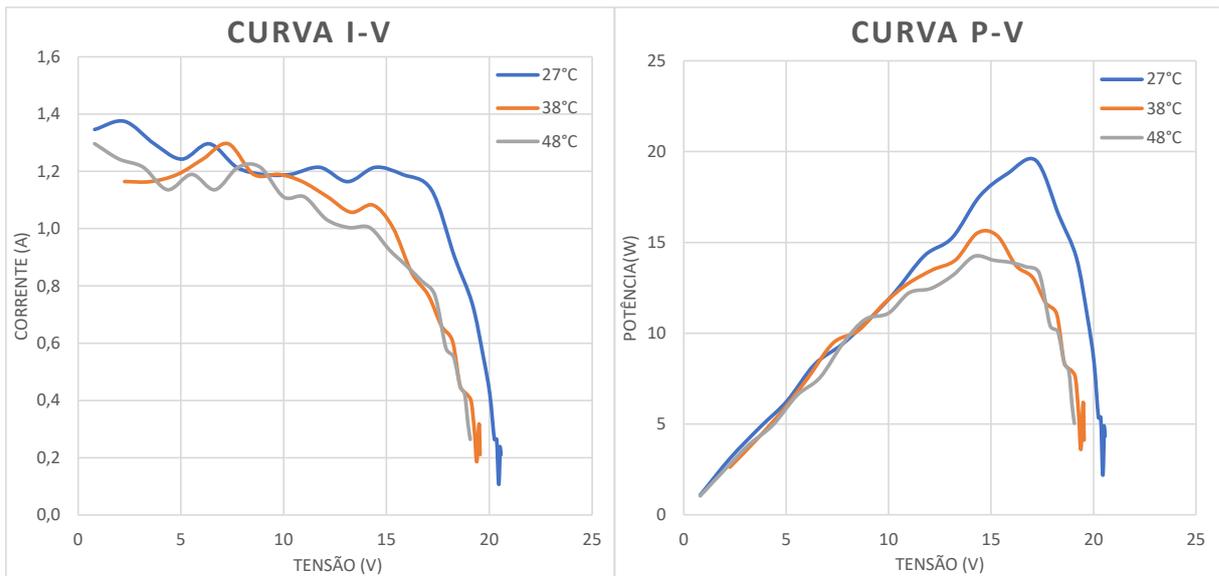
Figura 35 – Curva $I-V$ e $P-V$ obtida do painel em estado inicial



Fonte: O Autor (2021)

Após a realização das quebras no painel, explicadas no subcapítulo anterior, foram realizadas novamente as medições sobre o módulo. Com isso, a figura 36 apresenta, em três temperatura diferentes, as curva $I-V$, no lado esquerdo e $P-V$, no lado direito, projetadas a partir dos dados adquiridos desta secção de medições.

Figura 36 – Curva $I-V$ e $P-V$ obtida do painel solar em estado fissurado



Fonte: O Autor (2021)

Para conceituar as perdas de potência entre as duas situações, é fundamental utilizar os valores do ponto máximo de potência, pois este é o maior valor que o módulo consegue entregar em sua saída. Na tabela 1, são exibidos os resultados das perdas de potência com e sem microfissuras do módulo solar utilizado. Os cálculos de diferença de eficiência em percentual e de diferença de potência máxima foram executados em cima do valor de potência máxima ideal que o módulo pode entregar, que são 30W.

Tabela 1 – Comparação dos resultados em relação a potência ideal do painel

	Temperatura (°C)	Máxima Potência (W)	Diferença de Eficiência (%)	Diferença Potencial (W)
Estado Inicial do Painel	23	26,7	-11	-3,3
	32	27,8	-7,3	-2,2
	45	26,1	-13,0	-3,9
Estado Fissurado do Painel	27	19,5	-35,0	-10,5
	38	15,5	-48,3	-14,5
	48	14,2	-52,7	-15,8
Estado Ideal do Painel		30,0	-	-

Fonte: O Autor (2021)

Na tabela 2, os cálculos de diferença de potência máxima em Watts e em percentual, foram realizados em cima do primeiro caso, o qual o painel está em seu estado inicial e com a menor temperatura, de 23°C.

Tabela 2 – Comparação dos resultados em relação ao estado inicial

	Temperatura (°C)	Máxima Potência (W)	Diferença de Eficiência (%)	Diferença potencial (W)
Estado Inicial do Painel	23	26,7	0,0	0,0
	32	27,8	4,1	1,1
	45	26,1	-2,2	-0,6
Estado Fissurado do Painel	27	19,5	-27,0	-7,2
	38	15,5	-41,9	-11,2
	48	14,2	-46,8	-12,5

Fonte: O Autor (2021)

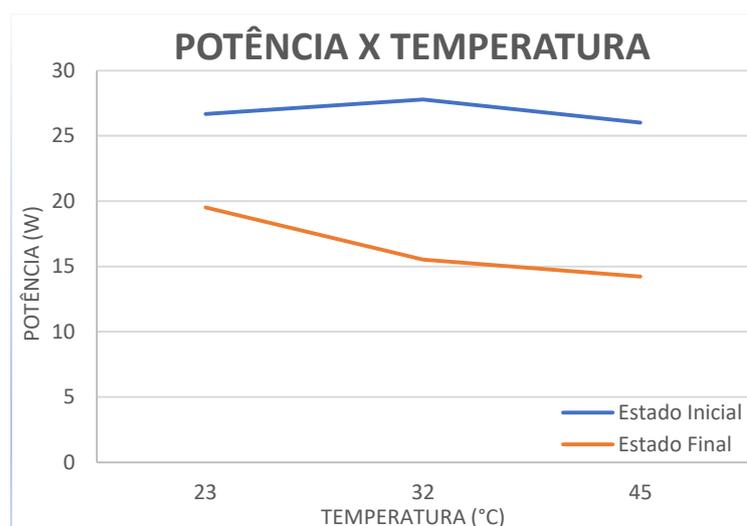
Nos resultados, observa-se que o módulo em seu estado inicial, teve o melhor desempenho e entrega de potência de saída em sua temperatura de 32°C. Contudo, com a

temperatura mais elevada em 45°C, o rendimento do painel tende a diminuir, porém com uma diferença baixa de 2,2% em relação a potência de saída quando a temperatura era de 23°C.

Após a quebra das células do painel, na temperatura mais baixa, já apresentava perda de eficiência de 27%. Com as medições realizadas na temperatura mais elevada do painel microfissurado, houve uma queda de 46,8% na potência de saída, em comparação com a medição do painel inteiro na temperatura mais baixa.

Como a variação da temperatura causa mudança nos parâmetros do painel, impactando na potência máxima, tem-se na figura 37 a curva de tendência da temperatura em relação a potência do painel solar nos dois estados do experimento. No estado inicial, é possível reparar a leve subida na potência e posteriormente a queda. Já no estado final, a potência tem um caimento em todas as mudanças de temperatura, sendo mais suavizada no final.

Figura 37 – Comparação dos dois estados do painel na relação Potência x Temperatura



Fonte: O Autor (2021)

Apesar da quantidade significativa de rachaduras apresentadas após os esforços realizados e da queda da potência de saída encontrada na curva $P-V$, o módulo solar ainda possui condições de operação, pois ainda é capaz de entregar tensão e corrente em sua saída. Neste estado, a vida útil do módulo pode diminuir consideravelmente, contudo, é possível aproveitá-lo, destinando-o a produzir energia para uma carga de menor consumo.

4.7 PROJEÇÃO DA PRODUÇÃO DE ENERGIA SOLAR AO LONGO DO TEMPO

A fim de verificar a produção do módulo de 30W, foi utilizado o software Microsoft Excel para realizar a projeção durante 25 anos, que é o tempo de garantia dado pela fabricante do painel. O objetivo é visualizar a energia produzida, comparando os estados antes e depois das microfissuras.

Primeiramente, com o *software* Radasol 2, foi possível obter a irradiação horizontal global média de todos os meses da cidade de Bento Gonçalves, a qual foram realizados todos os testes. A tabela 3 mostra os valores de irradiação extraídos de todos os meses.

Tabela 3 – Irradiação média global de Bento Gonçalves - RS

Mês	Irradiação Horizontal Global											
	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
kWh/m²/dia	5,27	5,80	4,80	4,07	3,05	2,55	2,91	3,32	4,38	5,38	6,13	6,35

Fonte: Software Radasol 2 (2021)

Com os valores de irradiação solar de todos os meses, é possível obter uma média anual, que resulta em 4,5 kWh/m²/dia. Visto que este valor é referente a metro quadrado, é necessário fazer o ajuste com as dimensões do painel, que são 564 x 360 mm, totalizando 0,20304 m².

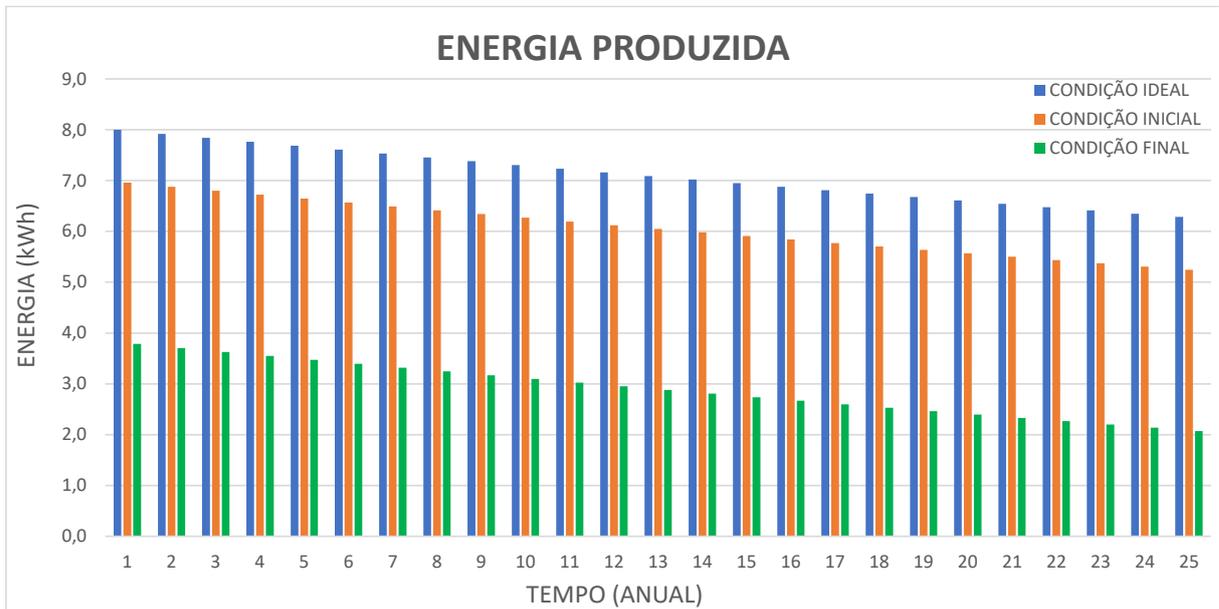
Para as perdas de potência do painel solar, é atribuído o valor de 1% ao ano em relação as condições ideais do painel solar. Além disso, não foi considerada nenhuma perda por conversão de energia e o rendimento de operação do painel é de 80%.

Seguindo o conceito apresentado no subcapítulo 3.3, tem-se, na figura 38, a produção de energia projetada ao longo de 25 anos, nas três situações:

- a) Condição ideal do painel solar, que é a geração de energia do painel operando com sua máxima potência;
- b) Condição inicial do experimento, que mostra a produção do painel no estado em que foi recebido, antes das microfissuras;
- c) Condição final, a qual é feita a análise da geração após as microfissuras.

Para a condição ideal, a potência base para os cálculos foi de 30W. Na condição inicial, utilizou-se a potência máxima obtiva na curva $I-V$ na temperatura mais alta, sendo 26,1W. Por fim, para a condição final foi atribuída a potência de 14,2W, sendo o valor da curva $I-V$ no pior caso após as microfissuras.

Figura 38 – Projeção da produção de energia em 25 anos



Fonte: O Autor (2021)

No gráfico exposto acima, os quais os dados estão no apêndice H, a produção de energia do painel no primeiro ano de operação é de 6,96 kWh na condição inicial. Já na condição final, possui produção de 3,78 kWh, apresentando queda 46%. No último ano de projeção do gráfico, o painel, em condição inicial, tem produção de energia de 5,24 kWh, e em condição final, 2,07 kWh, com diferença de 60%.

Ao longo dos 25 anos, a condição inicial do painel tem energia produzida de 151,7 kWh, e a condição final, 72,4 kWh. Comparando os dois estados do módulo, a condição final deixou de produzir 79,3 kWh de energia, 52% a menos que o painel em sua condição inicial.

A consequência das microfissuras nos módulos solares é aquecimento das células, o rompimento das interconexões, a perda de energia produzida e a redução da vida útil, por isso, é de suma importância o cuidado com os painéis, começando pelo transporte, o manuseio e durante a instalação, para que não haja impactos na geração de energia.

5 CONCLUSÃO

A câmera digital utilizada é de fácil acesso e possui baixo custo. Para transformá-la em uma câmera de eletroluminescência, basta desmontá-la e retirar o seu filtro infravermelho. Torna-se essencial para a identificação de rachaduras e microfissuras nos módulos, ajudando a entender a causa das perdas de potência e diminuição da produção de energia.

Como ponto negativo, para a realização dos ensaios com esta câmera, é preciso aplicar valores de tensão e corrente muito superiores aos permitidos no *datasheet* do painel solar, o que resulta em riscos ao operador, sendo indispensável muito cuidado no manuseio dos equipamentos.

O circuito projetado para a medição utiliza o conceito de carga e descarga de um capacitor, simulando a curva característica do painel. Junto com um circuito de leitura simultânea de tensão e corrente, é possível coletar diversos dados em um curto intervalo de tempo, repetindo as ações de carga e descarga do painel. As curvas traçadas por meio dos dados adquiridos durante as medições são satisfatórias, possuindo o formato próximo do ideal.

Com as medições realizadas, é possível comparar as curvas $I-V$ e $P-V$ do painel solar nos dois estados de operação, com e sem microfissuras. Nestas comparações, pode-se observar o ponto de potência máximo alcançado em diversas situações ao qual o painel foi exposto.

Quanto maior forem os danos no painel, maior será o impacto causado no ponto de máxima potência e na produção de energia. Contudo, mesmo após muitas microfissuras e diversas células sem conduzir corrente, o painel ainda consegue produzir energia, mesmo que bem abaixo do ideal.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] VILLALVA, Marcelo Gradella. **Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e Aplicações**. 2ª ed. São Paulo: Érica, 2015. 225 p.
- [2] MOREIRA, José Roberto Simões. **Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética**. 1ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017. 385 p.
- [3] HODGE, B. K. **Sistemas e Aplicações de Energia Alternativa**. 1ª ed. Tradução Luiz Claudio de Queiroz Faria; Revisão técnica Marco Aurélio dos Santos. Rio de Janeiro. LTC, 2018. 309 p.
- [4] GTES – Grupo de Trabalho de Energia Solar. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro. 2014. 530 p.
- [5] ELYSIA, E-book. **Como Funciona a Energia Solar: Economia e Sustentabilidade**. [201-?]. 29p. Disponível em: < https://d335luupugsy2.cloudfront.net/cms/files/55319/1532469907elysia_energia_solar_ebook_como_funciona_energia_solar.pdf > Acesso em 21 ago. 2019.
- [6] ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. **Capacidade de Geração no Brasil. BIG - Banco de Informações de Geração**. 2019. Disponível em: < <https://bit.ly/2IGf4Q0> >. Acesso em: setembro de 2020.
- [7] ROSA, Antônio Robson Oliveira. GASPARIN, Fabiano Perin. Panorama da Energia Solar Fotovoltaica no Brasil. **Revista Brasileira de Energia Solar**. Ano 7, Vol. 7, Nº 2, 2016. 140-147 p.
- [8] HARATZ, Marcel. SAUAIA, Rodrigo. KOLOSZUK, Ronaldo. Energia Solar Fotovoltaica: A Próxima Onda do Mercado Livre de Energia. **Ambiente Energia**, 23/07/2019. Disponível em: < <https://www.ambienteenergia.com.br/index.php/2019/07/energia-solar-fotovoltaica-proxima-onda-mercado-livre-de-energia/36208> >. Acesso em 03 set. 2019.
- [9] BARROS, Ricardo. SAUAIA, Rodrigo. KOLOSZUK, Ronaldo. Perspectivas para a

Geração Centralizada Solar Fotovoltaica no Brasil. ABSOLAR – Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica. **Revista O Setor Elétrico**, 14/06/2019. Disponível em: < <http://www.absolar.org.br/noticia/artigos-da-absolar/artigo-perspectivas-para-a-geracao-centralizada-solar-fotovoltaica-no-brasil.html> >. Acesso em 03 set. 2019.

[10] INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Especiais. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 2ª ed. São José dos Campos: 2018. 80 p.

[11] SMETS, Arno et al. **Solar energy: The physics and engineering of photovoltaic conversion, technologies and systems**. Cambridge: Uit Cambridge Ltd, 2016.

[12] BLUE-SOL, Energia Solar. **Os Sistemas de Energia Solar Fotovoltaica: Livro Digital de Introdução aos Sistemas Solares**. [201-?], 114p. Disponível em: < <https://programaintegradoronline.com.br/wp-content/uploads/2016/03/Livro-Digital-de-Introdu%C3%A7%C3%A3o-aos-Sistemas-Solares-novo.pdf> > Acesso em 08 set. 2019.

[13] FRAZÃO M. et al. Electroluminescence of silicon solar cells using a consumer grade digital camera. **Measurement**, 2016.

[14] DHIMISH, Mahmoud et al. Effect of micro cracks on photovoltaic output power: case study based on real time long term data measurements. **Micro & Nano Letters**, Huddersfield - UK. Vol.12, Nº10, p. 803–807, 13 jun. 2017.

[15] CHENG, Tial et al. Experimental study of PV strings affected by cracks. **The Journal Of Engineering: The 7th International Conference on Renewable Power Generation (RPG 2018)**, England, v. 2019, p.5124-5128, 21 jun. 2019.

[16] KOLOSZUK, Ronaldo. SAUAIA, Rodrigo. MEYER, Rodolfo. Os Guerreiros da Geração Distribuída Solar Fotovoltaica. **ABSOLAR – Associação Brasileira de Energia Solar**. 20/08/2019. Disponível em < <http://www.absolar.org.br/noticia/artigos-da-absolar/os-guerreiros-da-geracao-distribuida-solar-fotovoltaica.html> >. Acesso em 05 out. 2019.

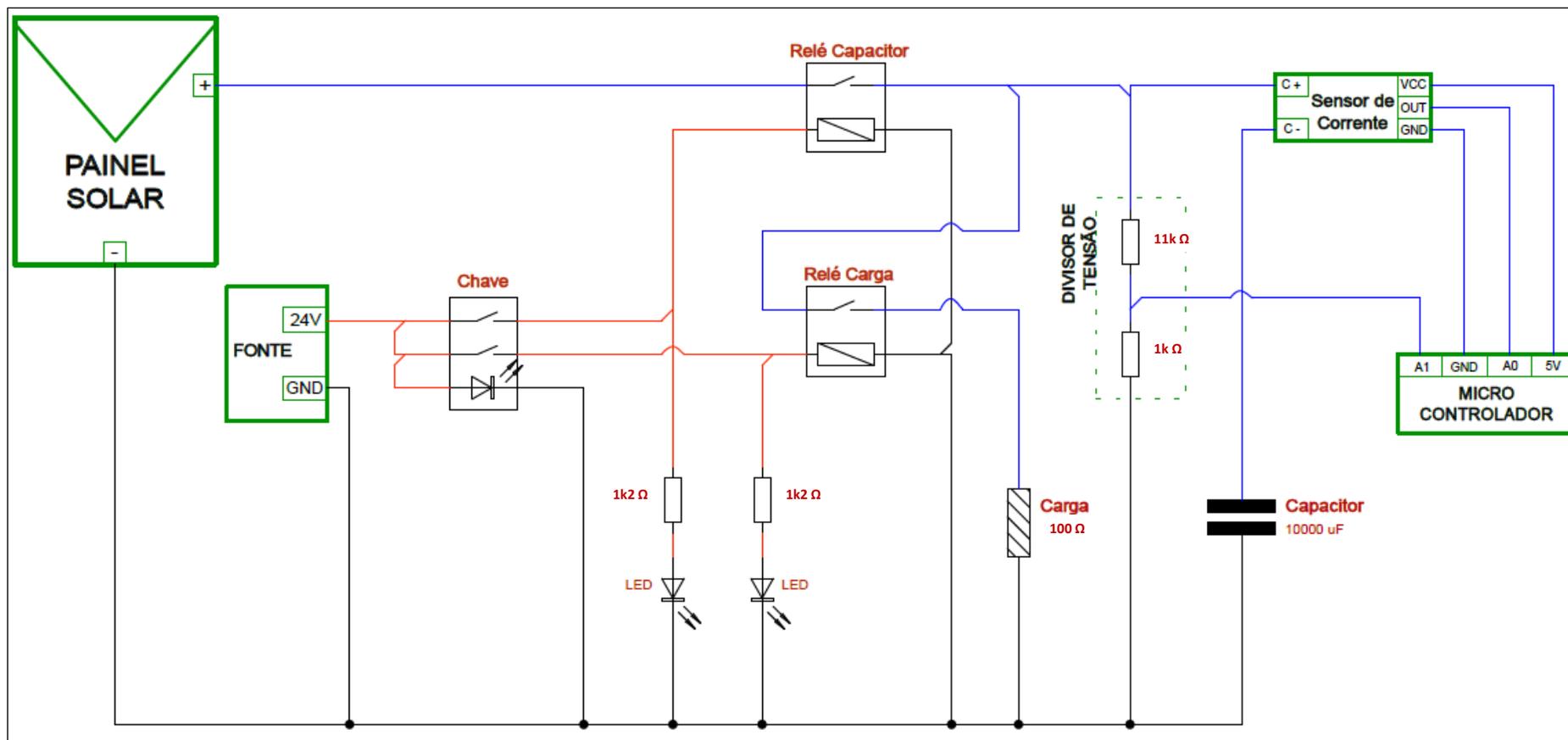
[17] DOLARA, Alberto et al. Snail Trails and Cell Microcrack Impact on PV Module Maximum Power and Energy Production. **IEEE Journal of Photovoltaics**. Vol. 6, p. 1269-

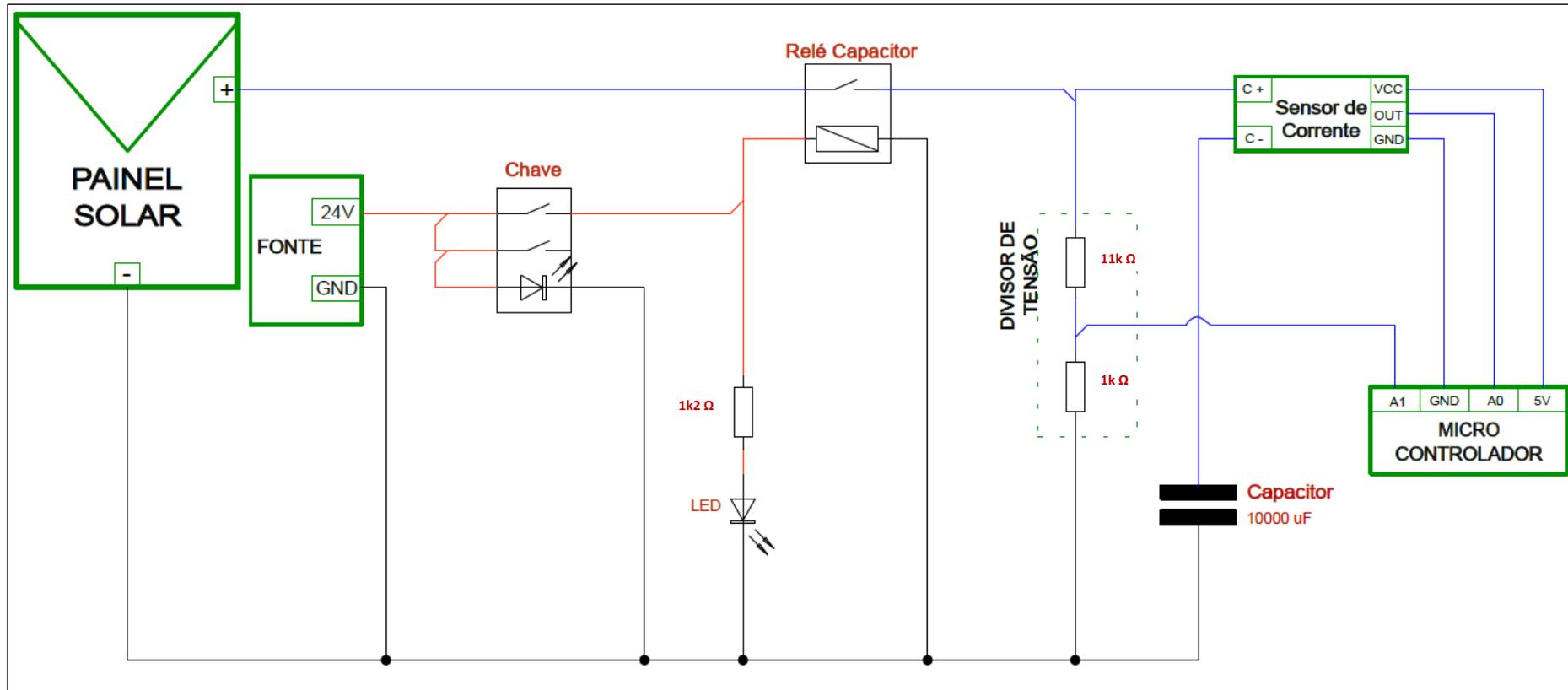
1277, 23 jun. 2016.

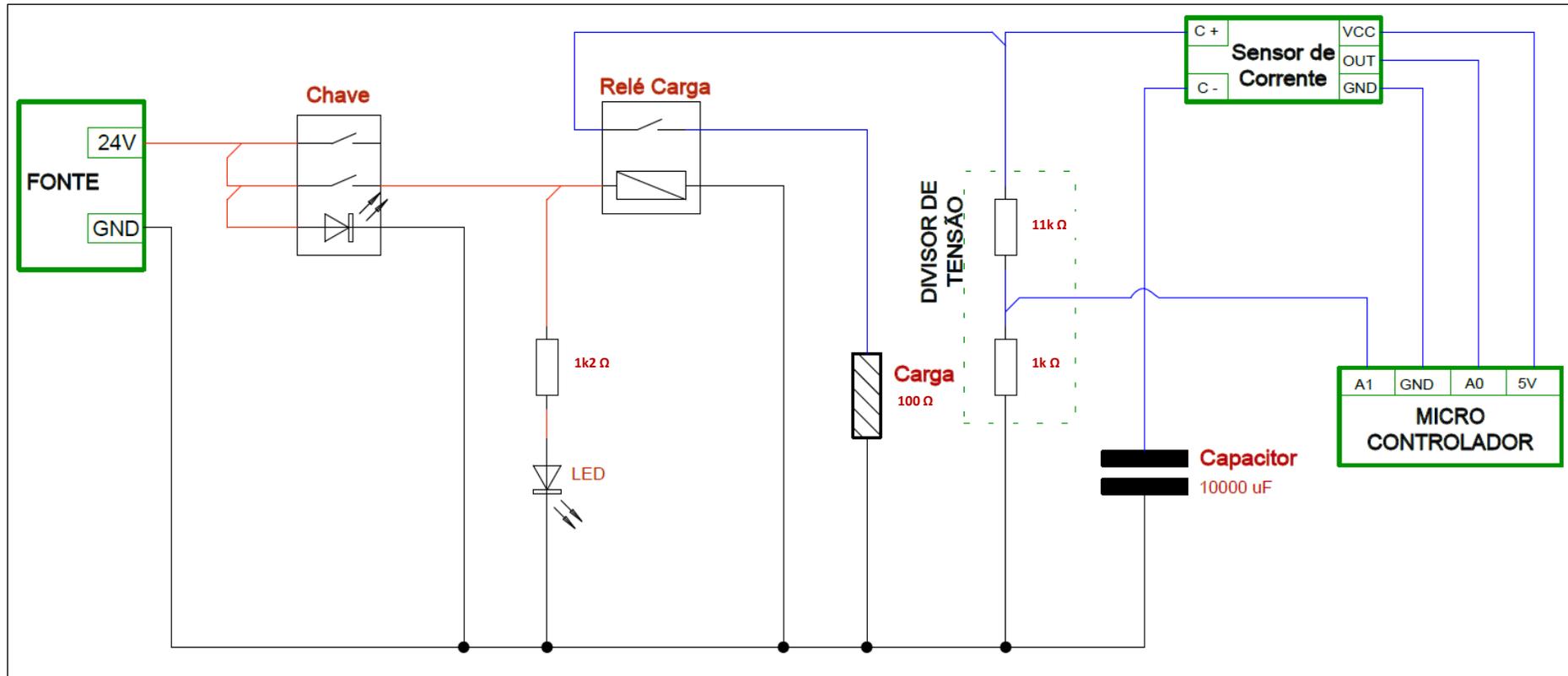
[18] KONTGES, M. et al. The risk of power loss in crystalline silicon based photovoltaic modules due to micro-cracks. **Journal Elsevier: Solar Energy Materials & Solar Cells**. v. 95, p. 1131-1137, 19 jan. 2011.

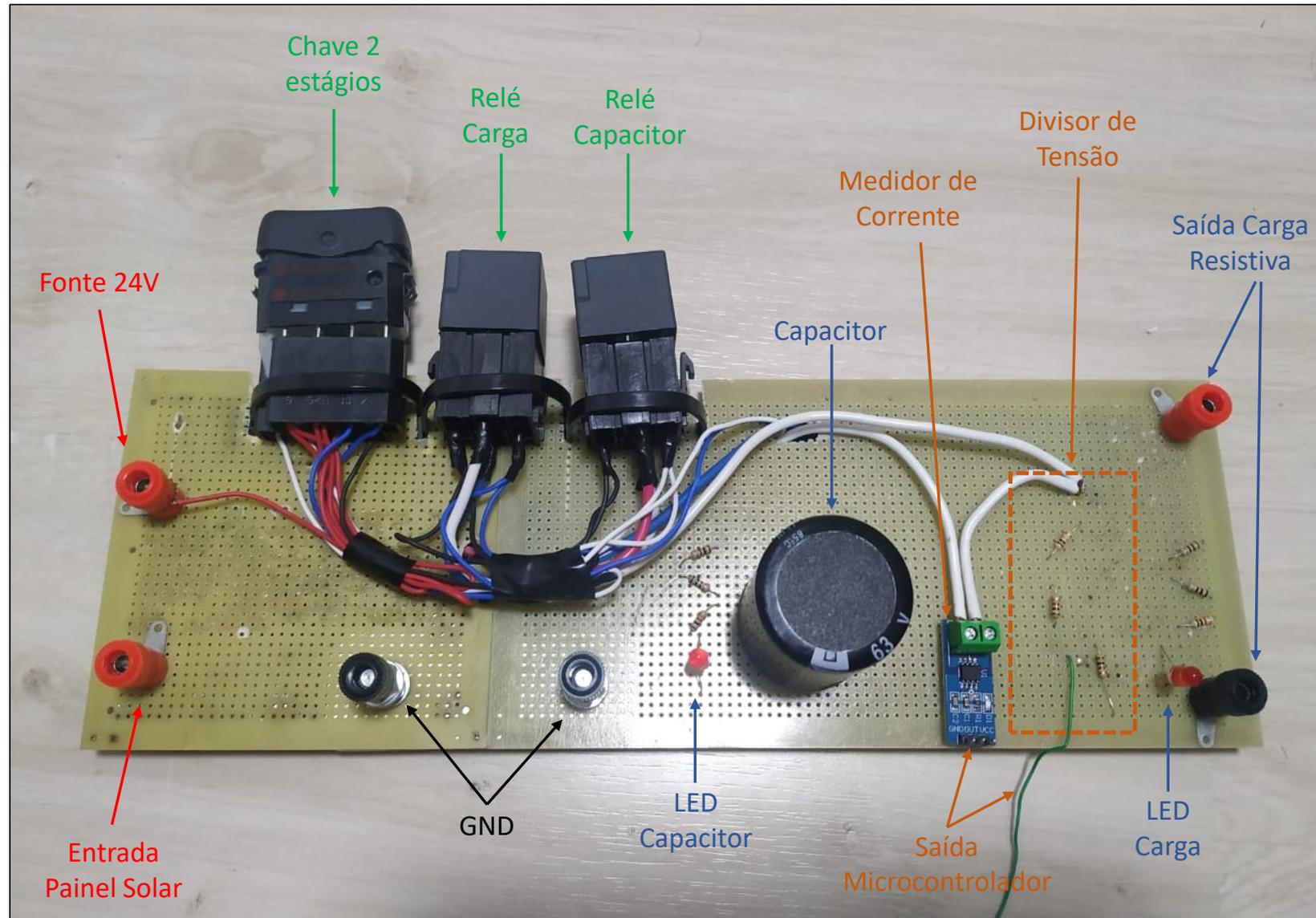
[19] FIGUEIREDO, Gilberto et al. Alternativa de baixo custo para imagens de eletroluminescência de módulos fotovoltaicos. **VII Congresso Brasileiro de Energia Solar**. Gramado, 6 p. 20 abr. 2018.

[20] GREEN, Martin et al. Solar Cell efficiency tables. **Wiley: Progress in Photovoltaics**. Sydney. n 54, p. 565-575, 31 mai. 2019.

APÊNDICE A – DIAGRAMA MEDIÇÃO DA CURVA $I-V$ – COMPLETO

APÊNDICE B – DIAGRAMA MEDIÇÃO DA CURVA $I-V$ – ESTÁGIO UM

APÊNDICE C – DIAGRAMA MEDIÇÃO DA CURVA $I-V$ – ESTÁGIO DOIS

APÊNDICE D – MONTAGEM CIRCUITO DE MEDIÇÃO DA CURVA $I-V$ 

APÊNDICE E – CÓDIGO MATLAB PARA SIMULAÇÃO

```

% VARIÁVEIS DE ENTRADA (são modificadas conforme
irradiação solar e temperatura)
Psun = 800;
T = 25;
Vpa = 0:0.01:50;

% AJUSTE DA CARACTERÍSTICA I-V (Rp é modificado conforme
características do módulo)

Rs = 0.008;
Rp = 7;
Ms = 1;
Mp = 1;

% DADOS DE CATÁLOGO

Ns = 36;
Voc = 22.54/Ns;
Isc = 1.71;
a = 3.18e-3;

% CONSTANTES

n = 1.2;
k = 1.38e-23;
q = 1.60e-19;
EG = 1.1;
Tr = 273 + 25;

% CÁLCULOS

T = 273 + T;
Vt = n*k*T/q;
V = Vpa/Ns/Ms;
Iph = (Isc+a*(T-Tr))*Psun/1000;
Irr = (Isc-Voc/Rp)/(exp(q*Voc/n/k/Tr)-1);
Ir = Irr*(T/Tr)^3*exp(q*EG/n/k*(1/Tr-1/T));
I = zeros(size(V));

for j=1:5;
    I = I-(Iph-I-Ir.*(exp((V+I.*Rs)./Vt)-1)-(V+I.*Rs...
    )./Rp)./(-1-Ir.*exp((V+I.*Rs)./Vt).*Rs./Vt-Rs./Rp);
end

```

```
for j=1:length(I);
    if I(j)<0
        I(j)=0;
    end
end

Ipa = I*Mp;

% GERAÇÃO DE CURVAS I-V E P-V

figure(1);
plot(Vpa,Ipa);
grid on;
hold on;

for j=1:length(I);
    Ppa(j)=Vpa(j)*Ipa(j);
end
figure(2);
plot(Vpa,Ppa);

grid on;
```

APÊNDICE F – CÓDIGO MICROCONTROLADOR PARA MEDIÇÃO

```
float CorrenteA0; //Corrente
float TensaoA1; //Tensão
float RelacaoA1 = 11; //relacao do divisor de tensao

float ler_tensao() { //leitura divisor de tensão
    return (analogRead(A1) * RelacaoA1 * 5) / 1024.00;
}

float ler_corrente() { //leitura sensor de corrente
    return ((analogRead(A0) * 0.004882815 - 2.5) / 0.066);
    //66mV/A = sensibilidade do ACS712 30A
}

void mostraValores () {
    Serial.print (TensaoA1);
    Serial.print (" ; ");
    Serial.print (CorrenteA0);
    Serial.print ("\n");
    //Serial.print (TensaoA1 + " ; " + CorrenteA0 + "\n");
}

void loop() {
    TensaoA1 = ler_tensao();
    CorrenteA0 = ler_corrente();
    delay(1);
    mostraValores();
}

void setup() {
    Serial.begin(9600);
}
```

APÊNDICE G – DADOS PARA PROJEÇÃO DAS CURVAS

23°C			32°C			45°C		
TENSÃO	CORRENTE	POTÊNCIA	TENSÃO	CORRENTE	POTENCIA	TENSÃO	CORRENTE	POTENCIA
2,95	1,79	5,29	1,45	1,82	2,64	1,24	1,85	2,29
4,89	1,68	8,20	3,44	1,88	6,45	3,28	1,77	5,81
6,82	1,77	12,04	5,48	1,80	9,84	5,37	1,80	9,65
8,81	1,82	16,03	7,52	1,74	13,11	7,36	1,77	13,04
10,74	1,73	18,63	9,51	1,69	16,07	9,45	1,80	16,98
12,78	1,77	22,56	11,55	1,82	21,04	11,44	1,77	20,27
14,88	1,79	26,67	13,64	1,85	25,23	13,59	1,82	24,75
16,81	1,57	26,31	15,68	1,77	27,78	15,63	1,66	26,01
18,42	1,25	23,10	17,46	1,45	25,38	17,29	1,19	20,56
19,55	0,83	16,17	18,75	0,98	18,35	18,42	0,85	15,59
20,20	0,54	10,95	19,55	0,64	12,43	19,07	0,53	10,08
20,62	0,37	7,61	20,03	0,48	9,51	19,44	0,42	8,19
20,84	0,26	5,37	20,30	0,32	6,45	19,66	0,26	5,20
20,95	0,17	3,55	20,46	0,21	4,31	19,71	0,26	5,21
21,05	0,08	1,78	20,57	0,26	5,44	19,82	0,21	4,18
21,05	0,08	1,78	20,57	0,26	5,44	19,87	0,11	2,13
21,05	0,12	2,43	20,62	0,19	3,83	19,87	0,13	2,63
21,05	0,06	1,21	20,62	0,13	2,72	19,87	0,11	2,13
21,05	0,03	0,57	20,68	0,08	1,62	19,87	0,11	2,13
21,11	0,06	1,22	20,68	0,19	3,84	19,87	0,13	2,63
21,11	0,03	0,57	20,68	0,11	2,22	19,87	0,08	1,56
21,11	0,03	0,57	20,68	0,05	1,11	19,87	0,21	4,19
21,10	0,01	0,12	20,68	0,21	4,36	19,87	0,16	3,12

27°C			38°C			48°C		
TENSÃO	CORRENTE	POTÊNCIA	TENSÃO	CORRENTE	POTENCIA	TENSÃO	CORRENTE	POTENCIA
0,81	1,35	1,09	2,26	1,16	2,63	0,81	1,30	1,05
2,26	1,38	3,11	3,54	1,16	4,12	1,99	1,24	2,47
3,71	1,30	4,81	4,83	1,19	5,74	3,17	1,21	3,85
5,05	1,24	6,28	6,07	1,24	7,54	4,35	1,14	4,94
6,39	1,30	8,28	7,30	1,30	9,46	5,53	1,19	6,58
7,73	1,21	9,39	8,54	1,19	10,16	6,66	1,14	7,56
9,02	1,19	10,73	9,78	1,19	11,63	7,79	1,21	9,46
10,31	1,19	12,26	10,90	1,16	12,69	8,86	1,21	10,76
11,76	1,21	14,28	12,14	1,11	13,48	9,99	1,11	11,10
13,11	1,16	15,26	13,27	1,06	14,03	11,01	1,11	12,23
14,45	1,21	17,55	14,34	1,08	15,52	12,08	1,03	12,47
15,79	1,19	18,78	15,31	1,00	15,36	13,16	1,00	13,21
17,19	1,14	19,52	16,22	0,85	13,73	14,18	1,00	14,23
18,32	0,90	16,49	17,03	0,77	13,08	15,15	0,93	14,01
19,17	0,74	14,17	17,67	0,66	11,67	15,95	0,87	13,90
19,71	0,55	10,91	18,21	0,61	11,06	16,70	0,82	13,66
20,03	0,42	8,44	18,58	0,45	8,36	17,35	0,77	13,32
20,25	0,26	5,35	18,91	0,42	7,97	17,89	0,58	10,41
20,36	0,26	5,38	19,12	0,40	7,58	18,26	0,55	10,11
20,46	0,11	2,19	19,28	0,29	5,58	18,58	0,45	8,36
20,52	0,21	4,32	19,39	0,19	3,60	18,80	0,42	7,92
20,52	0,24	4,91	19,50	0,32	6,20	18,96	0,32	6,03
20,57	0,21	4,33	19,55	0,21	4,12	19,07	0,26	5,04

APÊNDICE H – DADOS PARA PROJEÇÃO DA PRODUÇÃO DE ENERGIA

Ano	Perda (W)	CONDIÇÃO IDEAL		CONDIÇÃO INICIAL		CONDIÇÃO FINAL	
		Potência Painei (W)	ENERGIA (kWh)	Potência Painei (W)	ENERGIA (kWh)	Potência Painei (W)	ENERGIA (kWh)
1	0,00	30,00	7,999	26,100	6,960	14,200	3,786
2	0,3000	29,70	7,919	25,800	6,880	13,900	3,706
3	0,2970	29,40	7,840	25,503	6,800	13,603	3,627
4	0,2940	29,11	7,762	25,209	6,722	13,309	3,549
5	0,2911	28,82	7,684	24,918	6,644	13,018	3,471
6	0,2882	28,53	7,607	24,630	6,567	12,730	3,394
7	0,2853	28,24	7,531	24,344	6,491	12,444	3,318
8	0,2824	27,96	7,456	24,062	6,416	12,162	3,243
9	0,2796	27,68	7,381	23,782	6,342	11,882	3,168
10	0,2768	27,41	7,308	23,506	6,268	11,606	3,095
11	0,2741	27,13	7,235	23,231	6,195	11,331	3,022
12	0,2713	26,86	7,162	22,960	6,122	11,060	2,949
13	0,2686	26,59	7,091	22,692	6,051	10,792	2,878
14	0,2659	26,33	7,020	22,426	5,980	10,526	2,807
15	0,2633	26,06	6,949	22,162	5,910	10,262	2,736
16	0,2606	25,80	6,880	21,902	5,840	10,002	2,667
17	0,2580	25,54	6,811	21,644	5,771	9,744	2,598
18	0,2554	25,29	6,743	21,388	5,703	9,488	2,530
19	0,2529	25,04	6,676	21,135	5,636	9,235	2,463
20	0,2504	24,79	6,609	20,885	5,569	8,985	2,396
21	0,2479	24,54	6,543	20,637	5,503	8,737	2,330
22	0,2454	24,29	6,477	20,392	5,437	8,492	2,264
23	0,2429	24,05	6,413	20,149	5,373	8,249	2,200
24	0,2405	23,81	6,348	19,908	5,309	8,008	2,135
25	0,2381	23,57	6,285	19,670	5,245	7,770	2,072

ANEXO A – DATASHEET DO PAINEL SOLAR

18,60%

Eficiência da Célula

Alta Eficiência policristalina

30W

Máxima Potência de Saída

Tolerância positiva de potência

5 Anos

Garantia do Material e da Fabricação

Performace excelente em condições de baixa radiação

25 Anos

Garantia de desempenho linear

Bons coeficientes de temperatura que permitem uma potência maior em locais com altas temperaturas

Características Elétricas para Condições Padrão (STC)

Modelo	SA30-36P
Máxima Potência - Pmax (W)	30
Tolerância Positiva da Potência	0-3%
Tensão de Circuito Aberto - Voc (V)	22,54
Corrente de Curto Circuito - Isc (A)	1,71
Tensão em Máxima Potência - Vmp (V)	19,12
Corrente em Máxima Potência - Imp (A)	1,59
Eficiência do Módulo	14,78%

Dados elétricos relacionados com as condições padrão de testes (STC) : radiação 1000 W/m² ; AM 1.5 ; temperatura da célula 25°C medida com uma incerteza de ±3%. Certificado de acordo com IEC61215, IEC61730-1/2

Características Térmicas

Coeficiente de Temperatura (Voc)	-0.307%/K
Coeficiente de Temperatura (Isc)	+0.039%/K
Coeficiente de Temperatura (Pmpp)	-0.423%/K

Valores Máximos

Tensão Máxima do Sistema (V)	715
Máximo Fusível em Série (A)	10
Sobrecarga de Corrente Reversa (A)	25

Características Mecânicas

Dimensões	564*360*25mm
Peso	2.4kg
Moldura	Perfil de alumínio anodizado
Vidro Frontal	Vidro temperado, 3.2 mm
Encapsulamento da Célula	EVA (Ethylene-Vinyl-Acetate)
Folha traseira	Filme composto
Células	36 (4x9) - células solares policristalinas
Caixa de Junção	Corrente Nominal ≤ 10, IP ≥ 65, TUV
Cabo	Não possui
Conector	Não possui

Embalagem

Container 20'
Container 40'
Container 40' HC

Design do Sistema

Temp. de Operação	-40°C a + 85°C
Granizo	Diâmetro max. de 25mm com 23m/s de velocidade
Capacidade máx.	Neve 5400 Pa, vento 2400 Pa
Classe de aplicação	A
Classe de segurança	II

ANEXO B – FONTE DE ALIMENTAÇÃO MINIPA

A. Especificações Gerais

- **Display:** 4 dígitos duplo;
- **Saída Variável:** Simples;
- **Consumo:** Aproximadamente 260W;
- **Método de Resfriamento:** Ventilação Forçada;
- Uso Interno;
-  **Proteção:** Fusível de Vidro 5x20mm - 5A/250V;
- **Led's Indicadores:**
 - Led Verde para Tensão Contínua (CV);
 - Led Vermelho para Corrente Contínua (CC);
- **Ambiente:**
 - Operação: 0°C a 40°C, U.R. <80%;
 - Armazenamento: -10°C a 70°C, U.R. <70%;
- **Altitude:**
 - Operação: até 2.000 metros;
 - Armazenamento: até 2.000 metros;
- **Alimentação:** 110V/220V +10% / -5% - 50/60Hz (selecionável);
- **Dimensões:** 145(A) x 128(L) x 285(P)mm;
- **Peso:** Aproximadamente 5 kg.

B. Especificações Elétricas

As especificações são influenciadas pelas resistências dos contatos e dos cabos. Portanto tente minimizá-las, assim como utilizar conexões externas auxiliares nos modos Série e Paralelo, mesmo que já exista uma comutação interna. Ciclo de calibração recomendado de 1 ano.

- Tensão Constante

Descrição		Valor
Saída (Continuamente Ajustável)		0 a 30V
Estabilização	Linha	< 0,01%+3mV
	Carga (< 3A)	< 0,5%+3mV
	Carga (> 3A)	< 0,5%+5mV
Ripple & Ruído (5Hz a 1MHz)	< 3A	< 5mV rms
	> 3A	< 7mV rms

- Corrente Constante

Descrição		Valor
Saída (Continuamente Ajustável)		0 a 5A
Estabilização	Linha	< 0,2%+3mA
	Carga	< 0,2%+3mA
Ripple e Ruído		< 15mA rms

- Display

Descrição	Valor	
Display	4 dígitos duplo	
Precisão do Voltímetro	± (0,5% Leit. + 1 dígito)	
Precisão do Amperímetro	± (0,5% Leit. + 1 dígito)	
Resolução	Tensão	0,01V (10mV)
	Corrente	0,001A (1mA)

Observações:

- Tempo de recuperação para troca de cargas: <100µs (para variação de carga de 50% e corrente mínima da carga de 0,5A).

ANEXO C – MEDIDOR DE TEMPERATURA

Specifications and Features

RayngerST



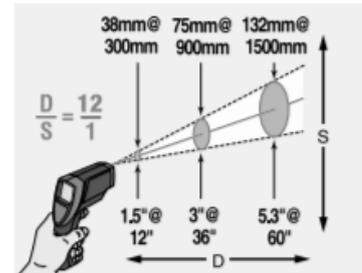
Specifications

Temperature Range	
ST20 Pro	-32 to 400°C (-25 to 750°F)
ST30 Pro	-32 to 545°C (-25 to 950°F)
Accuracy	
@ 23°C (73°F) ambient	1% or ±1°C (±2°F), whichever is greater
operating temperature	±2°C (±3°F) @ -18 to 23°C (0 to 73°F) ±2.5°C (±4°F) @ -26 to -18°C (-15 to 0°F) ±3°C (±5°F) @ -32 to -26°C (-25 to -15°F)
Repeatability	≤ ±0.5% or ≤ ±1°C (±2°F) whichever is greater
Response Time	≤ 0.5 second (95% of reading)
Ambient Operating Range	0 to 50°C (32 to 120°F)
Power	9V Alkaline or NiCd Battery
Weight	320g (11oz)

Features	ST20 Pro	ST30 Pro
Distance to Spot (D:S)	12:1	12:1
Emissivity	pre-set at 0.95	pre-set at 0.95
Laser Sighting	single point	offset 8 point circular
MAX Temperature Display	✓	✓
Display Hold (7 seconds)	✓	✓
LCD Backlight	✓	✓
Display Resolution	0.2°C (0.5°F)	0.2°C (0.5°F)
Hard Carrying Case	✓	✓

Options/Accessories

- Nylon Holster
- NIST Traceable Calibration Certificate



ST20 and ST30 ProPlus Target Spot Sizes
D:S = 12:1 at Focus Point

ANEXO D – RELÉ 24V

Especificações de bobina / Coil specifications

Modelo Type	Tensão Nominal Nominal Voltage VCC / VDC	Máx. Tensão Contínua Max. Allowable voltage VCC / VDC	Tensão de Operação Pick-up Voltage VCC / VDC	Tensão de Desoperação Drop-out Voltage VCC / VDC	Corrente nominal Nominal current mA	Resistência (±10%) Resistance (±10%) Ω*
C2	12	20,2 (20°C) 16,7 (80°C)	≤ 7,8	≥ 1,2	141	85
C3	24	40,5 (20°C) 31,5 (85°C)	≤ 15,6	≥ 2,4	68	350

* ± 15% acima (over) de 1200Ω

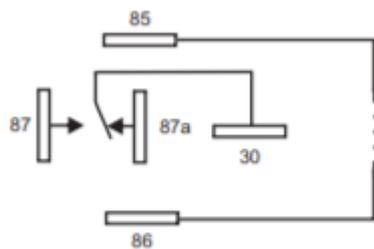
Especificações de contato / Contact specifications

Capacidade do contato / Rated current (Carga resistiva / Resistive load)	NA / NO : 40A - 28 VCC / VDC NF / NC : 30A - 28 VCC / VDC
Corrente de partida (carga: lâmpadas) / Max. inrush (lamps load) current	120A (NA/NO) 45A (NF/NC)
Tensão de comutação máx. / Maximum switching voltage	32 VCC / VDC
Corrente de condução máx. / Maximum carry current	60A (NA/NO) / 40A (NF/NC)
Resistência de contato inicial máx. / Maximum initial contact resistance	100 mΩ (a 1A 6VCC / at 1A 6VDC)
Vida mecânica / Mechanical life	10 ⁷ operações mín. / operations min. (300 operações/ minuto) (operations/minute)
Vida elétrica / Electrical life	10 ⁵ operações mín. / operations min. (20 operações/minuto) (operations/minute)
Tempo de operação / Operate time	7 ms máx.
Tempo de desoperação / Release time	5 ms máx.
Material dos contatos / Contact material	Liga de prata / Silver alloy

Características gerais / Characteristics

Rigidez dielétrica entre bobina e contatos / Breakdown voltage between contact and coil	500 VCA / VAC (1 minuto/minute)
Rigidez dielétrica entre contatos abertos / Breakdown voltage between open contacts	500 VCA / VAC (1 minuto/minute)
Resistência de isolamento / Insulation resistance	100 MΩ mín. (500 VCC/VDC)
Temperatura de operação / Operating ambient temperature	-40 a / to +85°C
Resistência à vibração / Vibration resistance:	Funcional / Functional Destrutiva / Destructive
	10 a / to 40 Hz - 1,5mm 10 a / to 500 Hz - 1,5mm
Resistência a impacto / Shock resistance:	Funcional / Functional Destrutiva / Destructive
	100 m/s ² mín. 200 m/s ² mín.

Diagrama Elétrico / Schematic



Vista de baixo / Bottom view

ANEXO E– MICROCONTROLADOR ARDUINO UNO

Summary

Microcontroller	ATmega328
Operating Voltage	5V
Input Voltage (recommended)	7-12V
Input Voltage (limits)	6-20V
Digital I/O Pins	14 (of which 6 provide PWM output)
Analog Input Pins	6
DC Current per I/O Pin	40 mA
DC Current for 3.3V Pin	50 mA
Flash Memory	32 KB of which 0.5 KB used by bootloader
SRAM	2 KB
EEPROM	1 KB
Clock Speed	16 MHz

Power

The Arduino Uno can be powered via the USB connection or with an external power supply. The power source is selected automatically.

External (non-USB) power can come either from an AC-to-DC adapter (wall-wart) or battery. The adapter can be connected by plugging a 2.1mm center-positive plug into the board's power jack. Leads from a battery can be inserted in the Gnd and Vin pin headers of the POWER connector.

The board can operate on an external supply of 6 to 20 volts. If supplied with less than 7V, however, the 5V pin may supply less than five volts and the board may be unstable. If using more than 12V, the voltage regulator may overheat and damage the board. The recommended range is 7 to 12 volts.

The power pins are as follows:

- **VIN.** The input voltage to the Arduino board when it's using an external power source (as opposed to 5 volts from the USB connection or other regulated power source). You can supply voltage through this pin, or, if supplying voltage via the power jack, access it through this pin.
- **5V.** The regulated power supply used to power the microcontroller and other components on the board. This can come either from VIN via an on-board regulator, or be supplied by USB or another regulated 5V supply.
- **3V3.** A 3.3 volt supply generated by the on-board regulator. Maximum current draw is 50 mA.
- **GND.** Ground pins.

Memory

The Atmega328 has 32 KB of flash memory for storing code (of which 0,5 KB is used for the bootloader); it has also 2 KB of SRAM and 1 KB of EEPROM (which can be read and written with the [EEPROM library](#)).

Input and Output

Each of the 14 digital pins on the Uno can be used as an input or output, using [pinMode\(\)](#), [digitalWrite\(\)](#), and [digitalRead\(\)](#) functions. They operate at 5 volts. Each pin can provide or receive a maximum of 40 mA and has an internal pull-up resistor (disconnected by default) of 20-50 kOhms. In addition, some pins have specialized functions:

- **Serial: 0 (RX) and 1 (TX).** Used to receive (RX) and transmit (TX) TTL serial data. These pins are connected to the corresponding pins of the ATmega8U2 USB-to-TTL Serial chip .
- **External Interrupts: 2 and 3.** These pins can be configured to trigger an interrupt on a low value, a rising or falling edge, or a change in value. See the [attachInterrupt\(\)](#) function for details.
- **PWM: 3, 5, 6, 9, 10, and 11.** Provide 8-bit PWM output with the [analogWrite\(\)](#) function.
- **SPI: 10 (SS), 11 (MOSI), 12 (MISO), 13 (SCK).** These pins support SPI communication, which, although provided by the underlying hardware, is not currently included in the Arduino language.
- **LED: 13.** There is a built-in LED connected to digital pin 13. When the pin is HIGH value, the LED is on, when the pin is LOW, it's off.

The Uno has 6 analog inputs, each of which provide 10 bits of resolution (i.e. 1024 different values). By default they measure from ground to 5 volts, though is it possible to change the upper end of their range using the AREF pin and the [analogReference\(\)](#) function. Additionally, some pins have specialized functionality:

- **I²C: 4 (SDA) and 5 (SCL).** Support I²C (TWI) communication using the [Wire library](#).

There are a couple of other pins on the board:

- **AREF.** Reference voltage for the analog inputs. Used with [analogReference\(\)](#).
- **Reset.** Bring this line LOW to reset the microcontroller. Typically used to add a reset button to shields which block the one on the board.

See also the [mapping between Arduino pins and Atmega328 ports](#).

Communication

The Arduino Uno has a number of facilities for communicating with a computer, another Arduino, or other microcontrollers. The ATmega328 provides UART TTL (5V) serial communication, which is available on digital pins 0 (RX) and 1 (TX). An ATmega8U2 on the board channels this serial communication over USB and appears as a virtual com port to software on the computer. The '8U2 firmware uses the standard USB COM drivers, and no external driver is needed. However, on Windows, an *.inf file is required..

The Arduino software includes a serial monitor which allows simple textual data to be sent to and from the Arduino board. The RX and TX LEDs on the board will flash when data is being transmitted via the USB-to-serial chip and USB connection to the computer (but not for serial communication on pins 0 and 1).

A [SoftwareSerial library](#) allows for serial communication on any of the Uno's digital pins.

The ATmega328 also support I2C (TWI) and SPI communication. The Arduino software includes a Wire library to simplify use of the I2C bus; see the [documentation](#) for details. To use the SPI communication, please see the ATmega328 datasheet.

Programming

The Arduino Uno can be programmed with the Arduino software ([download](#)). Select "Arduino Uno w/ ATmega328" from the **Tools > Board** menu (according to the microcontroller on your board). For details, see the [reference](#) and [tutorials](#).

The ATmega328 on the Arduino Uno comes preburned with a [bootloader](#) that allows you to upload new code to it without the use of an external hardware programmer. It communicates using the original STK500 protocol ([reference](#), [C header files](#)).

You can also bypass the bootloader and program the microcontroller through the ICSP (In-Circuit Serial Programming) header; see [these instructions](#) for details.

The ATmega8U2 firmware source code is available . The ATmega8U2 is loaded with a DFU bootloader, which can be activated by connecting the solder jumper on the back of the board (near the map of Italy) and then resetting the 8U2. You can then use [Atmel's FLIP software](#) (Windows) or the [DFU programmer](#) (Mac OS X and Linux) to load a new firmware. Or you can use the ISP header with an external programmer (overwriting the DFU bootloader).

ANEXO F – SENSOR DE CORRENTE ACS712

Fully Integrated, Hall Effect-Based Linear Current Sensor with 2.1 kVRMS Voltage Isolation and a Low-Resistance Current Conductor

Features and Benefits

- Low-noise analog signal path
- Device bandwidth is set via the new FILTER pin
- 5 μ s output rise time in response to step input current
- 50 kHz bandwidth
- Total output error 1.5% at $T_A = 25^\circ\text{C}$, and 4% at -40°C to 85°C
- Small footprint, low-profile SOIC8 package
- 1.2 m Ω internal conductor resistance
- 2.1 kV_{RMS} minimum isolation voltage from pins 1-4 to pins 5-8
- 5.0 V, single supply operation
- 66 to 185 mV/A output sensitivity
- Output voltage proportional to AC or DC currents
- Factory-trimmed for accuracy
- Extremely stable output offset voltage
- Nearly zero magnetic hysteresis
- Ratiometric output from supply voltage

Package: 8 pin SOIC (suffix LC)



Approximate Scale 1:1 

Description (continued)

loss. The thickness of the copper conductor allows survival of the device at up to 5 \times overcurrent conditions. The terminals of the conductive path are electrically isolated from the sensor leads (pins 5 through 8). This allows the ACS712 current sensor to be used in applications requiring electrical isolation without the use of opto-isolators or other costly isolation techniques.

Description

The Allegro[®] ACS712 provides economical and precise solutions for AC or DC current sensing in industrial, automotive, commercial, and communications systems. The device package allows for easy implementation by the customer. Typical applications include motor control, load detection and management, switched-mode power supplies, and overcurrent fault protection.

The device consists of a precise, low-offset, linear Hall sensor circuit with a copper conduction path located near the surface of the die. Applied current flowing through this copper conduction path generates a magnetic field which is sensed by the integrated Hall IC and converted into a proportional voltage. Device accuracy is optimized through the close proximity of the magnetic signal to the Hall transducer. A precise, proportional voltage is provided by the low-offset, chopper-stabilized BiCMOS Hall IC, which is programmed for accuracy after packaging.

The output of the device has a positive slope ($>V_{IOUT(Q)}$) when an increasing current flows through the primary copper conduction path (from pins 1 and 2, to pins 3 and 4), which is the path used for current sensing. The internal resistance of this conductive path is 1.2 m Ω typical, providing low power

Continued on the next page...

The ACS712 is provided in a small, surface mount SOIC8 package. The leadframe is plated with 100% matte tin, which is compatible with standard lead (Pb) free printed circuit board assembly processes. Internally, the device is Pb-free, except for flip-chip high-temperature Pb-based solder balls, currently exempt from RoHS. The device is fully calibrated prior to shipment from the factory.

Selection Guide

Part Number	Packing*	T_{OP} ($^\circ\text{C}$)	Optimized Range, I_p (A)	Sensitivity, Sens (Typ) (mV/A)
ACS712ELCTR-05B-T	Tape and reel, 3000 pieces/reel	-40 to 85	± 5	185
ACS712ELCTR-20A-T	Tape and reel, 3000 pieces/reel	-40 to 85	± 20	100
ACS712ELCTR-30A-T	Tape and reel, 3000 pieces/reel	-40 to 85	± 30	66

*Contact Allegro for additional packing options.

Absolute Maximum Ratings

Characteristic	Symbol	Notes	Rating	Units
Supply Voltage	V_{CC}		8	V
Reverse Supply Voltage	V_{RCC}		-0.1	V
Output Voltage	V_{IOUT}		8	V
Reverse Output Voltage	V_{RIOUT}		-0.1	V
Output Current Source	$I_{IOUT(SOURCE)}$		3	mA
Output Current Sink	$I_{IOUT(SINK)}$		10	mA
Overcurrent Transient Tolerance	I_P	100 total pulses, 250 ms duration each, applied at a rate of 1 pulse every 100 seconds.	60	A
Maximum Transient Sensed Current	$I_R(max)$	Junction Temperature, $T_J < T_{J(max)}$	60	A
Nominal Operating Ambient Temperature	T_A	Range E	-40 to 85	°C
Maximum Junction	$T_{J(max)}$		165	°C
Storage Temperature	T_{stg}		-65 to 170	°C

COMMON OPERATING CHARACTERISTICS¹ over full range of T_{OP} , $C_F = 1$ nF, and $V_{CC} = 5$ V, unless otherwise specified

Characteristic	Symbol	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Units
ELECTRICAL CHARACTERISTICS						
Supply Voltage	V_{CC}		4.5	5.0	5.5	V
Supply Current	I_{CC}	$V_{CC} = 5.0$ V, output open	6	8	11	mA
Output Zener Clamp Voltage	V_Z	$I_{CC} = 11$ mA, $T_A = 25^\circ\text{C}$	6	8.3	-	V
Output Resistance	R_{IOUT}	$I_{IOUT} = 1.2$ mA, $T_A = 25^\circ\text{C}$	-	1	2	Ω
Output Capacitance Load	C_{LOAD}	V _{IOUT} to GND	-	-	10	nF
Output Resistive Load	R_{LOAD}	V _{IOUT} to GND	4.7	-	-	k Ω
Primary Conductor Resistance	$R_{PRIMARY}$	$T_A = 25^\circ\text{C}$	-	1.2	-	m Ω
RMS Isolation Voltage	V_{ISORMS}	Pins 1-4 and 5-8; 60 Hz, 1 minute, $T_A = 25^\circ\text{C}$	2100	-	-	V
DC Isolation Voltage	V_{ISODC}	Pins 1-4 and 5-8; 1 minute, $T_A = 25^\circ\text{C}$	-	5000	-	V
Propagation Time	t_{PROP}	$I_P = I_P(max)$, $T_A = 25^\circ\text{C}$, $C_{OUT} = \text{open}$	-	3	-	μs
Response Time	$t_{RESPONSE}$	$I_P = I_P(max)$, $T_A = 25^\circ\text{C}$, $C_{OUT} = \text{open}$	-	7	-	μs
Rise Time	t_r	$I_P = I_P(max)$, $T_A = 25^\circ\text{C}$, $C_{OUT} = \text{open}$	-	5	-	μs
Frequency Bandwidth	f	-3 dB, $T_A = 25^\circ\text{C}$; I_P is 10 A peak-to-peak	50	-	-	kHz
Nonlinearity	E_{LIN}	Over full range of I_P	-	± 1	± 1.5	%
Symmetry	E_{SYM}	Over full range of I_P	98	100	102	%
Zero Current Output Voltage	$V_{IOUT(Q)}$	Bidirectional; $I_P = 0$ A, $T_A = 25^\circ\text{C}$	-	$V_{CC} \times 0.5$	-	V
Magnetic Offset Error	V_{ERROM}	$I_P = 0$ A, after excursion of 5 A	-	0	-	mV
Clamping Voltage	V_{CH}		Typ. -110	$V_{CC} \times 0.9375$	Typ. +110	mV
	V_{CL}		Typ. -110	$V_{CC} \times 0.0625$	Typ. +110	mV
Power-On Time	t_{PO}	Output reaches 90% of steady-state level, $T_J = 25^\circ\text{C}$, 20 A present on leadframe	-	35	-	μs
Magnetic Coupling ²			-	12	-	G/A
Internal Filter Resistance ³	$R_{F(INT)}$			1.7		k Ω

¹Device may be operated at higher primary current levels, I_P , and ambient, T_A , and internal leadframe temperatures, T_{OP} , provided that the Maximum Junction Temperature, $T_{J(max)}$, is not exceeded.

²1G = 0.1 mT.

³ $R_{F(INT)}$ forms an RC circuit via the FILTER pin.

x30A PERFORMANCE CHARACTERISTICS $T_{OP} = -40^\circ\text{C}$ to 85°C ¹, $C_F = 1$ nF, and $V_{CC} = 5$ V, unless otherwise specified

Characteristic	Symbol	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Units
Optimized Accuracy Range	I_P		-30	-	30	A
Sensitivity ²	$Sens_{TA}$	Over full range of I_P , $T_A = 25^\circ\text{C}$	-	66	-	mV/A
	$Sens_{TOP}$	Over full range of I_P	64	-	68	mV/A
Noise	$V_{NOISE(PP)}$	Peak-to-peak, $T_A = 25^\circ\text{C}$, 66 mV/A programmed Sensitivity, $C_F = 4.7$ nF, $C_{OUT} = \text{open}$, 20 kHz bandwidth	-	20	-	mV
		Peak-to-peak, $T_A = 25^\circ\text{C}$, 66 mV/A programmed Sensitivity, $C_F = 47$ nF, $C_{OUT} = \text{open}$, 2 kHz bandwidth	-	7	-	mV
		Peak-to-peak, $T_A = 25^\circ\text{C}$, 66 mV/A programmed Sensitivity, $C_F = 1$ nF, $C_{OUT} = \text{open}$, 50 kHz bandwidth	-	35	-	mV
Electrical Offset Voltage	V_{OE}	$I_P = 0$ A	-30	-	30	mV
Total Output Error ³	E_{TOT}	$I_P = \pm 30$ A, $T_A = 25^\circ\text{C}$	-	± 1.5	-	%

¹Device may be operated at higher primary current levels, I_P , and ambient temperatures, T_{OP} , provided that the Maximum Junction Temperature, $T_{J(max)}$, is not exceeded.

²At -40°C Sensitivity may shift as much 9% outside of the datasheet limits.

³Percentage of I_P , with $I_P = 30$ A. Output filtered.

