



UNIDADE DE ENSINO SUPERIOR DE FEIRA DE SANTANA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

FILIPE ALMEIDA DA CONCEIÇÃO INOCÊNCIO
FRANCISCO VIEIRA LIMA

**TRAÇADOR E ANALISADOR DE CURVAS I-V PARA CARACTERIZAÇÃO DE MÓDULOS
FOTOVOLTAICOS ATRAVÉS DO LEVANTAMENTO DE PARÂMETROS ELÉTRICOS**

FEIRA DE SANTANA
Fevereiro de 2022

FILIPPE ALMEIDA DA CONCEIÇÃO INOCENCIO
FRANCISCO VIEIRA LIMA

**TRAÇADOR E ANALISADOR DE CURVAS I-V PARA CARACTERIZAÇÃO DE MÓDULOS
FOTOVOLTAICOS ATRAVÉS DO LEVANTAMENTO DE PARÂMETROS ELÉTRICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Departamento de
Engenharia Elétrica, da Unidade de Ensino
Superior de Feira de Santana, em
cumprimento às exigências para obtenção
do grau de Bacharel em Engenharia
Elétrica.

Orientador: Prof. Me. Flavio Couvo
Teixeira Maia.

FEIRA DE SANTANA

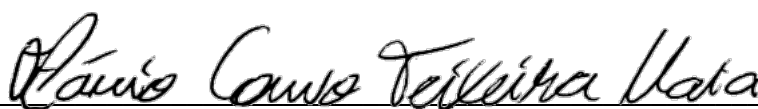
Fevereiro de 2022

FILIPPE ALMEIDA DA CONCEIÇÃO INOCENCIO
FRANCISCO VIEIRA LIMA

**TRAÇADOR E ANALISADOR DE CURVAS I-V PARA CARACTERIZAÇÃO DE MÓDULOS
FOTOVOLTAICOS ATRAVÉS DO LEVANTAMENTO DE PARÂMETROS ELÉTRICOS**

Feria de Santana, 07 de fevereiro de 2022

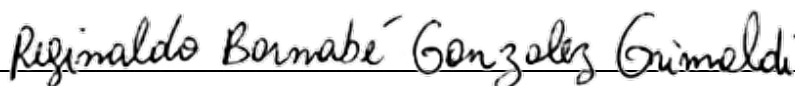
Banca Examinadora:



Prof. Me. Flávio Couvo Teixeira Maia
Unidade de Ensino Superior de Feira de Santana
Orientador



Prof. Me. Márcio da Silva Pereira Bove
Unidade de Ensino Superior de Feira de Santana
Avaliador



Prof. Me. Reginaldo Barnabé Gonzalez Grimaldi
Unidade de Ensino Superior de Feira de Santana
Avaliador

AGRADECIMENTOS

Eu Filipe, gostaria de agradecer primeiramente à Deus pelo dom da vida que permitiu que não só eu, mas todos que eu amo compartilhem este momento comigo e pela inteligência designada à mim para que vença mais um desafio proposto à mim. Gostaria de agradecer aos meus pais por não medirem esforços para me ajudarem no que estava e no que não estava ao alcance deles. Gostaria de agradecer em especial a minha mãe, Valdirene, que está aqui hoje presente para presenciar este momento que tanto esperou acontecer e está compartilhando comigo esse momento. Muito obrigado também por me incentivar nos estudos, nunca medindo esforços para que eu tivesse uma educação de qualidade. Gostaria de agradecer a meu pai, Márcio, que sempre me ajudou com ferramentas, equipamentos e materiais, sendo eles quais forem, se eu pedisse ele dava um jeito de conseguir para mim, para que eu pudesse colocar em prática tudo que estudei, acreditando em meu potencial desde pequeno. Gostaria de agradecer também aos meus avós, Valdemir e Irenia, que sempre buscaram ajudar como podiam na minha educação, assim também como meu tio Valdeir que sempre esteve disponível para contribuir com seus conhecimentos para meu crescimento e que com certeza me trouxeram também onde estou hoje, nunca medindo esforços para me ajudar em nenhum momento que eu precisei.

“Na vida, não existe apenas um caminho para nos realizarmos. Existem inúmeras possibilidades que poderão nos levar muito além do que imaginamos.”
(Flávio Augusto da Silva)

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Conexão de geração distribuída à rede	12
Figura 2 - Participação das fontes na capacidade instalada	13
Figura 3 - Oferta interna de energia elétrica por fonte.....	13
Figura 4 - Célula Monocristalina e Policristalina	14
Figura 5 - Célula de filme fino.....	14
Figura 6 - Curva de tensão e corrente (I-V).....	16
Figura 7 – Indicação dos pontos de I_{sc} , I_{mp} , V_{oc} , V_{mp} e P_{max} de uma curva I-V.....	17
Figura 8 - Ponto de potência máxima	17
Figura 9 – Circuito do amplificador de transimpedância	20
Figura 10 - Esquema de ligação do LM35.....	20
Figura 11 –Circuito para o traçador de curvas.....	21
Figura 12 - Montagem do protótipo do traçador de curvas I-V	21
Figura 13 - Módulo FV utilizado para a aquisição dos dados	22
Figura 14 - Local onde foram realizados os ensaios.....	22
Figura 15 - Dados do módulo FV utilizados no experimento.....	22
Figura 16 – Curva de potência do módulo FV TSM-345PE15H	22
Figura 17 - Curva I-V do Ensaio 1, realizado às 16:15, com temperatura de 30,3°C e irradiância de 400W/m ²	23
Figura 18 – Curva de Potência do Ensaio 1, realizado às 16:15, com temperatura de 30,3°C e irradiância de 400W/m ²	23
Figura 19 - Curva I-V do Ensaio 2, realizado às 16:24, com temperatura de 32,71°C e irradiância de 300W/m ²	24
Figura 20 - Curva de Potência do Ensaio 2, realizado às 16:24, com temperatura de 32,71°C e irradiância de 300W/m ²	24

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Materiais utilizados na construção do protótipo	19
Tabela 2 – Parâmetros BPW34.	19
Tabela 3 - Dados do módulo FV Trinasolar TSM-345PE15H, obtidos em laboratório com irradiância de 1000W/m ² e temperatura de 25°C.	22
Tabela 4 - Dados obtidos pelo traçador de curvas em dois ensaios.	24

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

°C	Graus Célsius
CRESESB	Centro de Referência para Energias Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito
A	Ampére
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BEN	Balanço Energético Nacional
CC	Corrente Contínua
Isc	Corrente de Curto-Circuito
I-V	Corrente-Tensão
eV	Elétron-Volt
FV	Fotovoltaico
GWh	Gigawatt-hora
MW	Megawatt
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
PRODIST	Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
kW	Quilowatt
KWh/m ² /ano	Quilowatt hora por metro quadrado por ano
SIN	Sistema Interligado Nacional
Voc	Tensão de Circuito Aberto
W/m ²	Watt por metro quadrado
Imp	Corrente no Ponto de Máxima Potência
P-V	Potência-Tensão
Vmp	Tensão no Ponto de Máxima Potência
Pmax	Ponto de Potência Máxima
V	Volts
Wp	Watt-Pico
Si	Silício

SUMÁRIO

SUMÁRIO	9
1. Introdução.....	10
2. Fundamentação Teórica	12
2.1. <i>Geração Distribuída</i>	<i>12</i>
2.2. <i>Energia Renovável.....</i>	<i>12</i>
2.4 <i>Tipos e Eficiência de Células Fotovoltaicas</i>	<i>13</i>
2.5 <i>Radiação Solar.....</i>	<i>14</i>
2.6 <i>Efeito da Intensidade de Radiação Solar (Influência da Irradiância)</i>	<i>15</i>
2.7 <i>Efeito da Temperatura.....</i>	<i>15</i>
2.8 <i>Curva Característica das Células Fotovoltaicas</i>	<i>16</i>
2.9 <i>Potência Máxima de Saída Durante o Dia (Ponto de Potência Máxima)</i>	<i>17</i>
2.10 <i>Piranômetro</i>	<i>18</i>
2.11 <i>Sensor de Temperatura.....</i>	<i>18</i>
2.12 <i>Sensor de Tensão</i>	<i>18</i>
2.13 <i>Sensor de Corrente</i>	<i>18</i>
2.14 <i>Arduino</i>	<i>19</i>
3. Materiais e Métodos	19
3.1 <i>Sistema de Condicionamento</i>	<i>21</i>
4. Resultados	21
4.1 <i>Traçador de Curvas</i>	<i>22</i>
4.2 <i>Piranômetro</i>	<i>23</i>
4.3 <i>Sensor de temperatura.....</i>	<i>23</i>
4.4 <i>Comparação dos ensaios</i>	<i>23</i>
5. Conclusão	214
6. Referências	215

TRAÇADOR E ANALISADOR DE CURVAS I-V PARA CARACTERIZAÇÃO DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS ATRAVÉS DO LEVANTAMENTO DE PARÂMETROS ELÉTRICOS

FILIPE ALMEIDA DA CONCEIÇÃO INOCENCIO, FRANCISCO VIEIRA LIMA

Departamento de Engenharia Elétrica, Unidade de Ensino Superior de Feira de Santana,
Feira de Santana, Bahia, Brasil.

Abstract: *This work aims to build a portable prototype of a voltage versus current (IV) curve plotter, reading the ambient temperature and reading the solar radiation incident on the photovoltaic module with low-cost sensors, using an Arduino microcontroller to connect the sensors. voltage, current, temperature and irradiance and obtain the data, in order to identify possible constructive problems of the module, failures in the installation or generation deficit for climatic reasons. The temperature, when high, reduces the performance of photovoltaic modules, the irradiance when it is in a low index makes the photovoltaic module have less solar radiation to convert into electrical energy, which reduces the performance of the module. After the tests performed, it was possible to observe that the values whose results were satisfactory occurred when the temperature was lower and the irradiance was higher, since with the oscillation of some variables it was possible to observe the variation of the module efficiency. However, with the results obtained, it is possible to confirm the working of the prototype, but it also proves the need to obtain accurate equipment to perform the calibrations and make the data acquisition performed by this prototype more reliable.*

Keywords: *Photovoltaic module, Characteristic curves, IV curve plotter, Capacitive method.*

Resumo: Este trabalho tem como objetivo a construção de um protótipo portátil de traçador de curvas de tensão versus corrente (I-V), leitura da temperatura ambiente e leitura da radiação solar incidente no módulo fotovoltaico com sensores de baixo custo, utilizando um microcontrolador Arduino, para conectar os sensores de tensão, corrente, temperatura e irradiância e realizar a obtenção dos dados, com a finalidade de identificar possíveis problemas construtivos do módulo, falhas na instalação ou déficit de geração por razões climáticas. A temperatura, quando elevada, reduz o desempenho dos módulos fotovoltaicos, a irradiância quando está em um baixo índice, faz com que o módulo fotovoltaico tenha menos radiação solar para converter em energia elétrica, o que reduz o desempenho do módulo. Após os ensaios realizados, pôde-se observar que os valores, cujos resultados foram satisfatórios, ocorreram quando a temperatura estava mais baixa e a irradiância estava mais elevada, visto que com a oscilação de algumas variáveis pôde-se observar a variação da eficiência do módulo. Todavia, com os resultados obtidos, é possível confirmar o funcionamento do protótipo, mas também prova a necessidade de se obter equipamentos precisos para realizar as calibrações e tornar a aquisição dos dados realizado por este protótipo mais confiável.

Palavras-chave: Módulo fotovoltaico, Curvas características, Traçador de curvas IV, Método capacitivo.

1. Introdução

De acordo com o Balanço Energético Nacional (BEN), publicado no ano de 2020, ano base 2019, o Brasil possui uma matriz energética diversificada, sendo as principais fontes geradoras, em percentual de geração, a Hidráulica (64,9%), Gás Natural (9,3%), Eólica (8,6%), Biomassa (8,4%), Carvão e Derivados (3,3%), Nuclear (2,5%), Derivados de Petróleo (2,0%) e Solar (1%), com o destaque para a fonte solar fotovoltaica (FV), com 1.659 Gigawatt-hora (GWh) de geração e 1.992 Megawatt (MW) de potência instalada (EPE, 2020).

O aproveitamento do recurso energético proveniente do sol, traz diversos benefícios, como a redução de emissão de gases poluentes na atmosfera provenientes de usinas térmicas, diminuição da dependência de recursos hídricos para geração de energia, além de contribuir positivamente na redução de perdas no Sistema Interligado Nacional (SIN) (ATLAS, 2017).

Com a descoberta da conversão da luz irradiada do sol em energia elétrica em 1839, pelo físico francês Edmond Becquerel, pôde-se perceber que a emissão de poluição ao meio ambiente utilizando

essa tecnologia é menor. Desde então, as células FV vêm sendo estudadas e aperfeiçoadas. As células FV mais encontradas atualmente no mercado são compostas de silício, um semicondutor que atualmente tem uma eficiência de conversão FV em torno de 30,5%, dependendo da sua forma construtiva. Esse material, ao ser exposto à luz solar, acelera os elétrons livres do material semicondutor, produzindo uma corrente elétrica. Quando adicionados diversos filamentos desse material, é possível coletar a eletricidade gerada (MACHADO; MIRANDA, 2015; GREEN et al., 2020, tradução nossa).

A energia elétrica gerada pelo processo fotovoltaico é extraída a partir do fluxo de energia eletromagnética emitida pelo sol, chamada de irradiância. Existem locais, como o Brasil, que estão geograficamente posicionados em áreas com irradiância maior do que a maioria dos países no mundo. A energia que o sol emite na terra anualmente corresponde a 10 mil vezes o consumo mundial nesse período (SILVA; CARMO, 2017).

O aumento na geração de energia solar FV no mundo vem ocorrendo também no Brasil, como afirma Pereira (2019). Esse aumento nas usinas fotovoltaicas traz como consequência uma necessidade de manutenções e acompanhamentos mais rotineiros nos módulos fotovoltaicos.

Os módulos fotovoltaicos são muito sensíveis à temperatura, radiação solar e angulação, sendo que uma mudança simples em uma dessas variáveis pode afetar drasticamente a geração de energia pelo módulo fotovoltaico (OLIVEIRA, 2015).

Para identificar se um módulo está gerando energia da maneira como foi projetado ou se está apresentando problemas, como sombreamento ou falhas que afetam a geração de energia, é necessário obter a curva característica de Corrente-Tensão (I-V) do módulo

fotovoltaico. Os testes, utilizando as curvas I-V, estão previstos na NBR 16274 (ABNT, 2014).

Para implementação da tecnologia de geração é necessário conhecer os dados I-V de um módulo fotovoltaico, pois carregam uma grande quantidade de informações além do ponto de potência máxima do módulo. Informações como corrente de curto-circuito (I_{sc}), tensão de circuito aberto (V_{oc}), resistência shunt, resistência em série e fator de preenchimento são essenciais para diagnosticar o desempenho e degradação dos painéis solares (MA et al., 2019, tradução nossa).

Como a expansão das usinas solares FV no Brasil indica um forte crescimento no setor, também é necessário um acompanhamento técnico com equipamentos de medição adequados. Na geração de energia existem alguns fatores que influenciam na eficiência dos módulos, como a radiação solar, a temperatura e a distribuição espectral da radiação. A partir do exposto, a seguinte problemática surge: como o traçador de curvas I-V pode ser utilizado para determinar possíveis problemas nos módulos fotovoltaicos?

O presente trabalho tem como objetivo desenvolver um protótipo portátil com finalidade de medir as curvas características I-V de um módulo fotovoltaico.

Os objetivos específicos são: construir circuitos auxiliares de medição; implantar sistema de medição de temperatura; desenvolver a aquisição de dados utilizando um microcontrolador; realizar medidas de curvas características I-V; comparar as curvas medidas pelo protótipo com os dados disponibilizados pelo fabricante no manual do módulo.

No capítulo 2 é apresentado a fundamentação teórica, no capítulo 3 é apresentado os materiais e métodos, no capítulo 4 e apresentado os resultados, no

capítulo 5 é apresentado as conclusões e capítulo 6 as referências.

2. Fundamentação Teórica

2.1. Geração Distribuída

De acordo com a resolução normativa 482/2012 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), publicada no Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) Módulo 3, a geração distribuída, que pode ser caracterizada como micro e minigeração distribuída, permite que consumidores conectem fontes de geração de energia elétrica renováveis à rede de distribuição de sua localidade, como é mostrado na Figura 1, fazendo com que haja o consumo instantâneo do consumidor por parte da geração particular e quando a geração exceder o consumo, o excedente seja injetado na rede de distribuição da concessionária local (ANEEL, 2012).



Figura 1 - Conexão de geração distribuída à rede.
Adaptado de CANAL SOLAR (2021), acesso disponível em 13/05/2021, às 11h40.

É permitido o uso de qualquer fonte renovável como geração distribuída, o que está inclusa a fonte de energia solar fotovoltaica, sendo qualificada como microgeração distribuída às centrais geradoras com potência instalada de até 75 Quilowatt (kW) e a minigeração distribuída às centrais geradoras com potência

instalada maior que 75 kW e menor que 5 MW, sendo que ambas as modalidades devem estar conectadas na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras (ANEEL, 2012).

A geração distribuída tem como vantagem a capacidade de gerar créditos. Isso se aplica quando o consumo da unidade geradora é menor que a geração, permitindo que o excedente seja injetado na rede de distribuição e o consumidor tenha até 60 meses para consumir esses créditos, ou, caso existam unidades consumidoras no mesmo titular da unidade geradora e na mesma área de atendimento da distribuidora, essas unidades podem se beneficiar dos créditos injetados na rede (ANEEL, 2012).

2.2. Energia Renovável

A grande demanda por energia elétrica no mundo trouxe um grande problema, a utilização de combustíveis fósseis para geração de energia, aumentando a emissão de gases poluentes, como o dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera (OWUSU; ASUMADU-SARKODIE, 2016, tradução nossa).

As fontes de energia renováveis são consideradas fontes limpas de energia, se levado em consideração as não renováveis, pois, reduzem os impactos ambientais, produzem menos resíduos secundários e são sustentáveis com base nas necessidades econômicas e sociais atuais e futuras e podem contribuir para a mitigação da emissão de gases de efeito estufa e redução do aquecimento global (OWUSU; ASUMADU-SARKODIE, 2016, tradução nossa).

O Brasil possui muitos recursos naturais que podem ser explorados para obtenção de energia elétrica. De acordo com o BEN, as fontes de energia renováveis possuem uma participação maior do que as não renováveis no país, como é mostrado Figura 2.

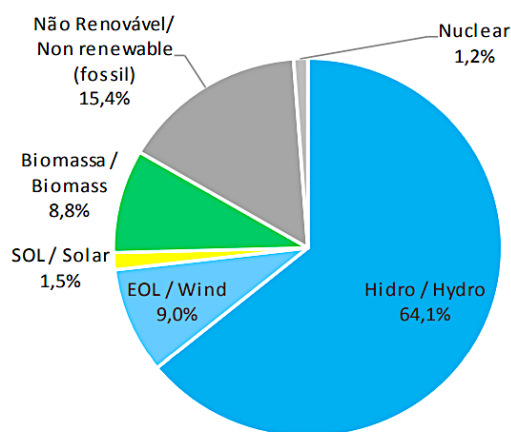


Figura 2 - Participação das fontes na capacidade instalada. Fonte: BEN, 2019.

Como visto na Figura 2, o maior destaque na geração de energia elétrica no Brasil em relação a capacidade instalada de geradores são as usinas hidrelétricas que contam com 64,9% da potência total, seguida pelas usinas eólicas com participação de 8,6%, biomassa com 8,4%, e por fim a solar, com participação de 1,5% (BEN, 2019).

A energia solar utiliza painéis FV compostos na sua maioria por silício para transformar a radiação emitida pelo sol em energia elétrica. Conforme ilustrado na Figura 3, a energia solar tem uma baixa participação na matriz energética brasileira, se comparada com as outras fontes de geração, mas, se avaliarmos o crescimento dela nos últimos anos, como é apresentado no BEN de 2020 com ano base 2019, houve um crescimento de 137,54% entre os anos de 2018 e 2019, sendo que, no ano de 2018 foram gerados 1.798 MW enquanto em 2019 a geração foi de 2.473 MW (SAMPAIO; GONZÁLEZ, 2017, tradução nossa; BEN, 2019).

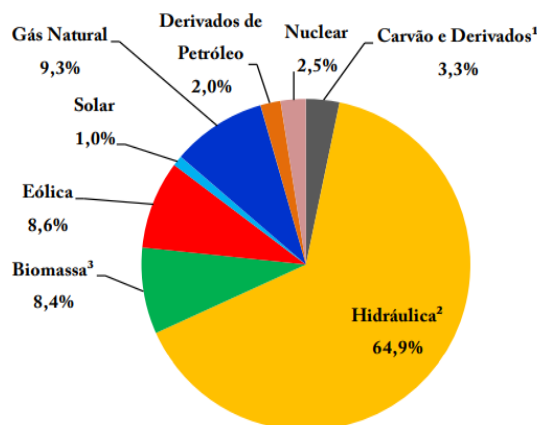


Figura 3 - Oferta interna de energia elétrica por fonte. Fonte: BEN, 2019.

2.4 Tipos e Eficiência de Células Fotovoltaicas

O Silício é o material mais comum a ser utilizado para a fabricação dos painéis FV, responsável por cerca de 90% do mercado de células FV. Esse elemento químico é vantajoso, pois é um dos elementos mais abundantes da Terra, possui estabilidade e geralmente não é tóxico, tem uma banda proibida (característica que permite ao Silício conduzir eletricidade) de 1,12 Elétron-Volt (eV), quase idealmente adaptado ao espectro solar que atinge a Terra, sendo este o responsável por fazer com que haja a produção de eletricidade e por já existirem tecnologias avançadas para manipulação deste elemento nas indústrias de microeletrônica baseadas em Silício (SAMPAIO; GONZÁLEZ, 2017, tradução nossa).

Segundo Carvalho, (2014), existem diversas tecnologias que envolvem o processo de fabricação dos módulos FV, sendo elas classificadas por gerações, sendo os mais importantes:

- Células de primeira geração ou cristalinas: Utilizando os *wafers* do semicondutor, podem ser extraídas células monocristalinas ou policristalinas, como se pode observar na Figura 4. As células monocristalinas (m-Si) são estruturas

cristalinas de silício cultivadas pelo processo de Czochralski. Estas células apresentam uma excelente eficiência de conversão, cerca de 30,5%. Já as células policristalinas (p-Si) surgiram para reduzir os custos elevados de fabricação das monocristalinas. Baseada em multicristais, essa tecnologia está se tornando cada vez mais atraente. Além de ter custos de fabricação mais baixos, em relação às monocristalinas, também possuem uma eficiência de geração menor, em torno de 15% (SAMPAIO; GONZÁLEZ, 2017, tradução nossa; CARVALHO, 2014; GREEN et al., 2020, tradução nossa).

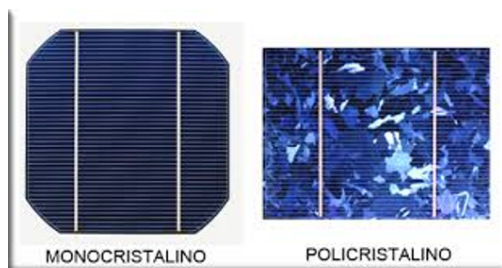


Figura 4 - Célula Monocristalina e Policristalina.
Fonte:

<https://ecorienergiasolar.com.br/imgpost/post3.png>,
acesso disponível em 13/05/2021 às 14h05.

- Células de segunda geração ou filmes finos: As células solares de película fina, como ilustrado na Figura 5 surgiram a partir da busca de redução de custos para fabricação de células solares. Têm como características a sua flexibilidade, fácil instalação e peso reduzido; porém, possuem uma eficiência baixa em relação às mencionadas anteriormente de aproximadamente 12% além de sua baixa vida útil (SAMPAIO; GONZÁLEZ, 2017, tradução nossa; CARVALHO, 2014).

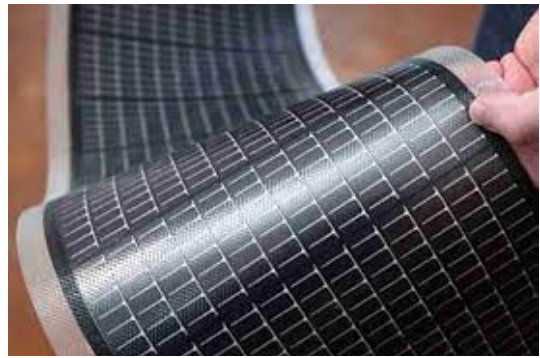


Figura 5 - Célula de filme fino. Fonte:
<https://canalsolar.com.br/filmes-finos-cigs-uma-alternativa-ao-silicio-cristalino/>, acesso disponível em 13/05/2021 às 14h35.

- Células de terceira geração ou multi-junção: As células multi-junção utilizam materiais semicondutores com múltiplas junções P-N para aumentar a eficiência de conversão. Pelo fato de existirem diferentes comprimentos de luz, as camadas de semicondutores que compõem a célula solar são dispostas de uma forma que a corrente elétrica tenha respostas a diferentes comprimentos da onda de luz, maximizando a eficiência da célula, fazendo com que seja de aproximadamente 30% (CARVALHO, 2014).

2.5 Radiação Solar

A radiação solar, fenômeno da energia eletromagnética que atinge a Terra, proveniente do Sol, é a fonte de energia renovável mais fundamental da natureza. A energia solar, luz radiante e calor do sol, tem sido aproveitada pelos humanos desde os tempos antigos, usando uma gama de tecnologias em constante evolução. Nos estudos de energia solar, os dados sobre a radiação solar e seus componentes em um determinado local são um insumo fundamental para essa conversão de energia (BESHARAT; DEHGHAN; FAGHIH, 2013, tradução nossa).

A energia produzida por um módulo fotovoltaico está diretamente relacionada à

disponibilidade de energia solar e, como resultado, é dependente do local. A irradiação geralmente flutua de acordo com o clima e a localização do sol no céu (FOUAD; SHIHATA; MORGAN, 2017, tradução nossa).

De acordo com Silva e Carmo (2017) e Machado e Miranda (2015), o Brasil, por ser um país tropical, tem um grande potencial de geração de energia solar FV, por contar com um grande potencial de radiação solar, sendo esta fonte de energia viável em praticamente todo o território.

Derivada da radiação solar, a irradiância denomina o fluxo de energia eletromagnética por unidade de superfície, ou seja, Watt por metro quadrado (W/m^2), a irradiância média anual no Brasil varia entre 1200 e 2400 Quilowatt hora por metro quadrado por ano ($KWh/m^2/ano$), enquanto na Alemanha, o mesmo varia entre 900 e 1250 $KWh/m^2/ano$, o que torna o Brasil um país com capacidade de geração de energia solar FV maior que a Alemanha, mas que ainda não tem uma cultura para explorar essa tecnologia ao contrário do que acontece com a Alemanha (SILVA; CARMO, 2017; MACHADO; MIRANDA, 2015).

2.6 Efeito da Intensidade de Radiação Solar (Influência da Irradiância)

A radiação solar geralmente flutua de acordo com o clima e a localização do sol, visto que a irradiância muda no decorrer do dia, devido às mudanças na altitude do sol, que é o ângulo entre os raios do sol e o plano horizontal e ângulo de azimute, que é o ângulo entre o norte verdadeiro e a projeção dos raios solares na horizontal (FOUAD et al., 2017, tradução nossa).

Para uma maior eficiência do sistema é necessário levar em consideração a radiação direta, difusa e radiação refletida. A maior parte da radiação solar é direta,

consequentemente, a máxima irradiância aproveitada pelos módulos se dá quando as placas solares estão perpendiculares à radiação solar direta. Para cada ângulo de desvio existe uma perda de 0,08% de eficiência do sistema; além disso, a potência de saída está diretamente ligada à irradiância, e quanto maior for, maior será a potência fornecida em seus terminais (FOUAD et al., 2017, tradução nossa).

A radiação solar incidente em uma célula fotovoltaica provoca o aparecimento de uma corrente fotogerada que é diretamente proporcional a esta radiação. Já a corrente de curto-circuito da célula, desprezando os efeitos da sua resistência, também varia na mesma proporção da radiação, a tensão Voc aumenta logaritmicamente por aumento da radiação solar e a corrente aumenta linearmente (CHIKATE; SADAWARTE, 2015, tradução nossa).

2.7 Efeito da Temperatura

A temperatura em um módulo fotovoltaico é um dos fatores que influenciam diretamente na curva característica da tensão e corrente, pois modifica a eficiência do sistema. Devido aos efeitos da temperatura, as células FV tendem a produzir tensões mais altas conforme a temperatura diminui, e conforme a temperatura aumenta, as tensões diminuem, consequentemente aumentando as perdas (CHIKATE; SADAWARTE, 2015, tradução nossa).

Para qualquer módulo FV, devem ser levados em consideração os cálculos de ajuste de temperatura. Conforme a temperatura aumenta, os semicondutores sofrem interferência direta e os valores de tensão no GAP (assim como a tensão Voc diminuem, seguindo de acordo com a tensão da junção P-N, resultando em uma menor potência de saída do sistema (CHIKATE; SADAWARTE, 2015, tradução nossa).

Conforme a temperatura diminui, mais energia incidente é absorvida pelas placas devido um maior percentual de energia, permitindo aos portadores de cargas conduzirem mais corrente, portanto, o ISC aumenta para um determinado isolamento, com isso as placas tem um bom coeficiente de temperatura, esse efeito aumenta a potência máxima teórica. (CHIKATE; SADAWARTE, 2015, tradução nossa).

2.8 Curva Característica das Células Fotovoltaicas

Com o avanço do crescimento das usinas FV, também surgem as preocupações com a degradação do desempenho de captação e conversão de energia pelos módulos, devido às condições de instalações errôneas e sombreamento parcial, trazendo como problema a perda de potência nos módulos FV (BOSCAINO et al., 2014, tradução nossa).

Um método utilizado para caracterizar e compreender a natureza inerentemente variável do desempenho de uma célula ou módulo fotovoltaico é o teste que mede a curva I-V das células, conforme ilustrado na Figura 6. A detecção da curva I-V efetiva dos módulos FV para identificar condições operacionais anormais é geralmente necessária (BOSCAINO et al., 2014, tradução nossa).

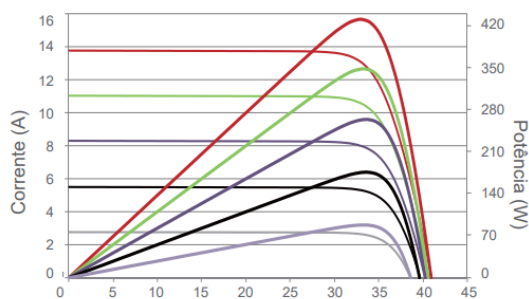


Figura 6 - Curva de tensão e corrente (I-V). Fonte: [https://jinkosolar.eu/files/jinko/download/2020/data-sheet/Tiger-Pro/TR%20JKM430-450M-6TL4-\(V\)-A1-EN.pdf](https://jinkosolar.eu/files/jinko/download/2020/data-sheet/Tiger-Pro/TR%20JKM430-450M-6TL4-(V)-A1-EN.pdf), acesso disponível em 05/05/2021, às 16h.

Existem fatores que influenciam na

curva I-V, como a temperatura, intensidade da luz incidente, orientação para a fonte de luz, uniformidade da iluminação, sombreamento e local de instalação (YANDT et al., 2015, tradução nossa).

A caracterização elétrica eficaz dos módulos FV é crítica para encurtar o ciclo de desenvolvimento associado à confiabilidade de longo prazo e custo do ciclo de vida dos módulos (YANDT et al., 2015, tradução nossa).

A curva I-V possui uma grande importância na análise dos módulos FV, por ser muito sensível a problemas de design do módulo, como resposta espectral, problemas de interconexão, efeitos de alinhamento óptico, problemas de gerenciamento térmico, falhas de diodo de *bypass* e impedâncias parasitas (YANDT et al., 2015, tradução nossa).

Existem diversos métodos para detecção de curvas I-V dos módulos FV, muitas vezes baseados no uso de conversores de CC-CC (circuitos utilizados para converter a tensão ou corrente contínua em outra amplitude), sendo a diferença entre os métodos de detecção o número de componentes, custo, tamanho, eficiência e desempenho da ondulação da corrente de entrada. O objetivo é controlar o conversor para emular uma carga não linear variante no tempo para o módulo FV (BOSCAINO et al., 2014, tradução nossa).

Segundo Caires (2014) alguns parâmetros são essenciais para caracterização elétrica da curva I-V sob condições geradas através da radiação e temperatura específicas. Os parâmetros encontram-se na Figura 7. A curva característica é um parâmetro fundamental usado para descrever a eficiência de uma placa solar ou associação de placas, baseia-se na representação matemática do comportamento da corrente em função da tensão. Assim, para cada tipo de carga conectada aos terminais da célula, obtém-se

um par de valores I-V, unindo-se os pontos traça-se a curva da corrente versus tensão. Os parâmetros extraídos da curva I-V são: corrente de curto-circuito (Isc) - corrente máxima que um dispositivo pode produzir correspondendo a tensão nula e consequentemente potência nula; tensão de circuito-aberto (Voc) - tensão máxima que um dispositivo pode produzir. O valor da tensão ao máxima quando a corrente será nula e consequentemente potência nula; corrente no ponto de máxima potência (Imp) - é o valor da corrente para a potência máxima. Utilizada como corrente nominal no dispositivo; tensão no ponto de máxima potência (Vmp) - é o valor da tensão para a potência máxima. Utilizada como tensão nominal do dispositivo; Ponto de potência máxima (Pmax) - é o valor máximo de potência que um dispositivo pode produzir. Corresponde ao ponto em que a curva Potência-Tensão (P-V) tem o seu valor máximo.

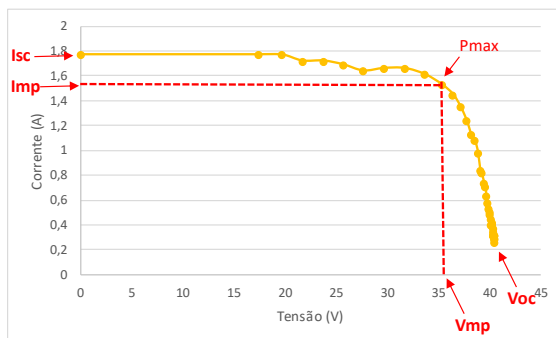


Figura 7 – Indicação dos pontos de Isc, Imp, Voc, Vmp e Pmax de uma curva I-V. Fonte: Autores.

Para obtenção da curva característica utiliza-se do método capacitivo, pois consiste em utilizar capacitores como carga para o módulo. A principal função do capacitor no circuito é armazenar energia sem causar variações consideradas na tensão do circuito a ser avaliado. No processo de carga o capacitor é conectado à placa solar. Assim quando o capacitor atingir a capacidade máxima de carga a corrente deve ser zero obtendo assim a corrente de circuito aberto (MAIA et al., 2018).

O dimensionamento correto do capacitor é bastante importante pois é com a carga e descarga que se obtém a curva característica do arranjo. O tempo de carga do capacitor pode ser obtido a partir da fórmula a seguir, onde Tc é o tempo de carga do capacitor, Voc é a tensão de circuito aberto, Isc é a corrente de curto-circuito e C é a capacitância do capacitor.

$$T_c = \frac{V_{oc}}{I_{sc}} \times C \quad (1)$$

2.9 Potência Máxima de Saída Durante o Dia (Ponto de Potência Máxima)

A curva I-V mostra quanto de corrente e tensão uma célula FV pode fornecer em diferentes níveis de intensidade de luz. A potência é calculada multiplicando a tensão pela corrente, mas na célula FV é necessário conhecer os pontos. Como ilustrado na Figura 8, na extrema direita é mostrado a tensão Voc, ou seja, quando não há nenhum fluxo de corrente, ou nenhuma carga conectada (WOLFE, 2018, tradução nossa).

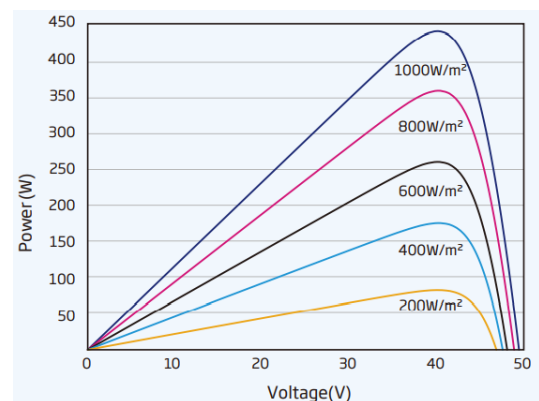


Figura 8 - Ponto de potência máxima. Fonte: https://canalsolar.com.br/download/1711/folhas-de-dados/9451/ps-m-datasheet_tallmaxm_de17mii_en_2019_a_web.pdf, acesso disponível em 14/05/2021, às 15h13.

Na extrema esquerda da Figura 8, é mostrado a corrente Isc, que flui se os contatos da célula solar estiverem conectados diretamente, ou seja, com tensão zero. A partir desta análise, as células

solares não produzem potência em circuito aberto (onde a corrente é zero) ou em curto-circuito (onde a tensão é zero), sendo assim, não é possível medir a potência apenas multiplicando a tensão máxima pela corrente máxima, pois o máximo de uma das variáveis é o mínimo da outra (WOLFE, 2018, tradução nossa).

O ponto em que a potência atinge seu máximo é chamado de ponto de máxima potência. A saída neste ponto, conhecida como Watt-pico (Wp), é o parâmetro principal pelo qual as células FV são avaliadas. Uma célula FV cotada em Wp é uma classificação da potência que fornece para operar no ponto de potência pico sob condições de teste padrão. A potência máxima é produzida quando um certo nível de tensão de operação é atingido (WOLFE, 2018, tradução nossa; NASCIMENTO JUNIOR, 2018).

2.10 Piranômetro

A irradiância solar está diretamente ligada a capacidade de geração de um painel FV e na sua curva I-V, portanto, há a necessidade de um instrumento que seja capaz de detectar a intensidade de irradiância incidente sobre o painel FV, sendo chamado de piranômetro (OYELAMI et al. 2020, tradução nossa).

Os piranômetros são equipamentos que ao serem expostos ao sol, de acordo com a variação da radiação solar, variam suas características elétricas (podendo ser tensão ou corrente) de forma linear (BOLZAN, 2014).

Piranômetros baseados em fotodiodos transformam as frequências do espectro solar em corrente elétrica, que podem ser utilizadas para mensurar a irradiância incidente no local (OYELAMI et al. 2020, tradução nossa).

2.11 Sensor de Temperatura

A leitura da temperatura é muito

importante para traçar as curvas I-V dos painéis FV como já mencionado anteriormente. Para ler a temperatura ambiente, foi utilizado um sensor de temperatura de precisão LM35 da marca National Semiconductor®. De acordo com os dados fornecidos pelo fabricante, o LM35 possui uma tensão de saída linearmente proporcional à temperatura em graus celsius (°C), uma faixa de leitura que varia de -55 a 150°C e precisão de 0,5°C, além de não requerer nenhum tipo de calibração ou circuito auxiliar para fornecer os dados de temperatura ao microcontrolador (NATIONAL SEMICONDUCTOR. LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors, 2000).

2.12 Sensor de Tensão

Os conversores analógicos para digitais do microcontrolador suportam uma tensão de entrada máxima de 5V. Para ser conectado uma fonte com uma tensão maior que a suportada pelo microcontrolador faz-se necessário a construção de um circuito divisor de tensão, que possui uma tensão de entrada compatível com o equipamento utilizado e uma tensão de saída compatível com o microcontrolador, sendo ela, no máximo 5V. Este circuito faz a utilização de dois resistores no qual são conectados em série e a carga é conectada em suas extremidades. A tensão fornecida pelo nó entre os resistores é a tensão proporcional à inserida pela carga, de forma reduzida (ATMEL ATMEGA328P 8-bit AVR Microcontroller with 32K Bytes In-System Programmable Flash, 2015; KOCHAN et al. 2013, tradução nossa).

2.13 Sensor de Corrente

A corrente elétrica é o fluxo ordenado de partículas portadoras de carga elétrica. Sensores de corrente de efeito Hall são compostos por um núcleo magnético e um sensor de campo magnético denominado de Hall. Existindo fluxo de corrente no núcleo magnético, esse núcleo

cria um campo magnético no qual é lido pelo sensor Hall que tem como finalidade fornecer um valor proporcional em forma de tensão elétrica, podendo ser lido por conversores analógico/digital dos microcontroladores (YATCHEV et al. 2018, tradução nossa).

2.14 Arduino

O arduino é uma plataforma de código aberto, que consiste em uma placa de circuito programável físico quanto em um software, ou IDE, Ambiente de Desenvolvimento Integrado, do inglês Integrated Development Environment, que é executado em seu computador, usado para escrever e carregar códigos do computador para o placa física. O arduino tornou-se bastante popular devido sua facilidade na programação, diferente dos demais circuitos programáveis. (ELFASI, A., et al., 2017, tradução nossa).

A placa arduino é construída de uma única peça de hardware, para carregar um novo programa. Pode ser utilizada a porta USB para carregar a programação do computador para a placa. A plataforma de programação do arduino utiliza uma versão da linguagem de programação C++, trazendo facilidades para programar (BADAMASI, Y. A. 2014, tradução nossa).

Esta plataforma pode ser utilizada para fazer leituras das informações de dispositivos de entrada, como sensores de temperatura, através das entradas analógicas e digitais. Além disso, pode enviar informações para dispositivos através de suas saídas analógicas ou digitais, para dispositivos como LED, alto-falantes, display LCD e motores (BADAMASI, Y. A. 2014, tradução nossa).

3. Materiais e Métodos

Para a construção do protótipo do traçador de curvas I-V portátil foram utilizados os materiais contidos na Tabela 1

abaixo.

Materiais	Quantidades(UN)
Amplificador operacional TL072CP	1
Foto diodo BPW34	1
Resistor 1kΩ	2
Resistor 1kΩ	1
Resistor 1,5kΩ	1
Resistor 6.8Ω	1
Capacitor de cerâmica 100pF	2
Capacitor de cerâmica 2.2nF	1
Capacitor eletrolítico 220uf 220/380V	2
Capacitor eletrolítico 2200uf 220/380V	1
Resistor 10k 10W	1
Modulo relé para arduino 5V/10A	1
Botão de pulso	1
Botão ON/OFF	1
Micro controlador arduino Uno R3	1
Sensor de temperatura LM35	1
Bateria 12V 2A	1
Sensor de efeito Hall ACS712ELCTR-05B-T	1
Placa de circuito Impresso	1
Conector MC4 (Macho e fema)	2
Caixa de acrílico 200X200mm	1

Tabela 1 – Materiais utilizados na construção do protótipo. Fonte: Autores.

Para medir a irradiação solar, foi construído um piranômetro digital utilizando um fotodiodo BPW34 da fabricante Vishay®. O BPW34 trabalha fornecendo corrente linearmente proporcional ao que recebe de irradiância. Os parâmetros do fotodiodo estão listados na Tabela 2 de acordo com os dados fornecidos pelo fabricante.

Faixa de largura de banda espectral (nm)	Potência equivalente de ruído (W/Hz ^{1/2})	Área Sensível (mm ²)
400-1100	4x10 ⁻¹⁴	7,5

Tabela 2 – Parâmetros BPW34. Fonte: NATIONAL SEMICONDUCTOR.

Para converter a corrente fornecida pelo fotodiodo em tensão para que possa ser possível fazer a leitura por um microcontrolador, é necessário um amplificador de transimpedância, como mostrado na Figura 9 (MAIA, 2019).

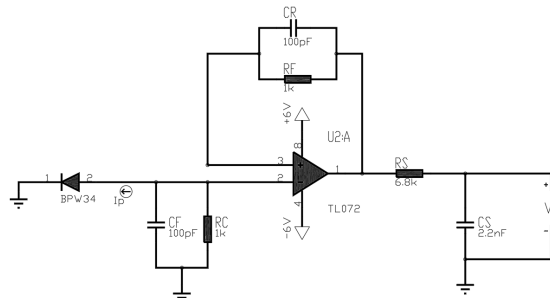


Figura 9 – Circuito do amplificador de transimpedância. Fonte: Autores.

Neste circuito, I_p é a corrente gerada pelo sensor a partir da irradiância. Os capacitores CR e CF e o resistor RC são elementos de compensação, correção e estabilização do sistema. O resistor RS e o capacitor CS compõem um filtro passa-baixa, e tem como finalidade mitigar qualquer tipo de ruído proveniente do sensor. RF é o resistor de feedback, que é responsável por fixar um ganho de corrente contínua ao circuito, sendo a tensão de saída dada por V0 (LUZ et al., 2018).

De acordo com Luz et al., (2018), para que o piranômetro seja calibrado e mensurar a corrente que o diodo BPW34 fornece quando exposto a uma irradiância de 1000 W/m², é necessário aplicar, na equação (1), os dados fornecidos pelo fabricante do fotodiodo e apresentados na Tabela 2, sendo esses dados a sensibilidade espectral e a área sensível à radiação.

$$I_p = \text{Irradiância} * \text{Área} * \text{Sensibilidade} \quad (1)$$

A partir do resultado da equação (1), e conhecendo o valor da corrente fornecida pelo fotodiodo a 1000 W/m² que é de 4,34 * 10⁻³ Amperes (A), sendo assim, o amplificador de transimpedância converte esse valor para 4,34 Volts (V), mantendo a escala de leitura linear (LUZ et al., 2018; MAIA, 2019).

O circuito de ligação do LM35 pode ser visto na Figura 10, onde ele está diretamente ligado ao microcontrolador, sem a necessidade de nenhum tipo de circuito auxiliar para realizar a leitura da

temperatura.

O circuito deste termômetro, como apresentado na Figura 10, utiliza uma tensão de referência de 5V. Para converter a tensão fornecida pelo sensor em °C é necessário mapear a entrada analógica do microcontrolador e assim utilizar a faixa de 0 a 5V para associar a temperatura em °C (MAHMUD et al., 2013).

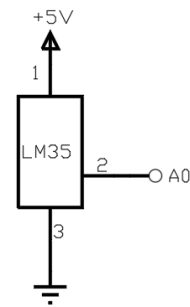


Figura 10 - Esquema de ligação do LM35. Fonte: Autores.

A leitura da tensão para traçar as curvas I-V dos painéis FV será realizada através de um circuito divisor de tensão, composto por dois resistores que a partir da Equação (2) serão dimensionados para suportar a tensão máxima que o painel FV tende a gerar, sendo que Vout é a tensão de saída para o sensor analógico do microcontrolador e que não pode ultrapassar 5V, Vin é a tensão fornecida pelo módulo FV, R2 e R1 são resistores responsáveis pelo divisor de tensão.

$$V_{out} = V_{in} * \frac{R2}{R1 + R2} \quad (2)$$

A leitura da corrente para traçar as curvas I-V dos painéis FV será realizada através de um sensor de corrente de efeito Hall ACS712ELCTR-05B-T da fabricante Allegro®. De acordo com os dados fornecidos pelo fabricante, o sensor possui uma tensão de saída com uma sensibilidade de 185 Milivolts/Amperem (mV/A), com uma faixa de leitura que varia de -5A a +5A além de não requerer nenhum tipo de calibração ou circuito auxiliar para fornecer

os dados de temperatura ao microcontrolador (ALLEGRO MICROSYSTEMS. ACS712 Fully Integrated, Hall Effect-Based Linear Current Sensor with 2.1 kVRMS Voltage Isolation and a Low-Resistance Current Conductor. Massachusetts: Allegro, 2006).

3.1 Sistema de Condicionamento

O circuito eletrônico básico da medição de tensão/corrente é mostrado na Figura 11.

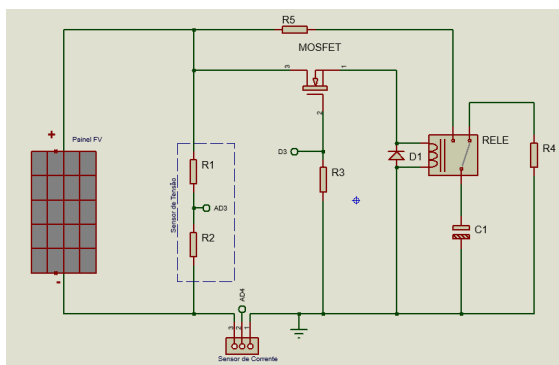


Figura 11 –Circuito para o traçador de curvas.
Fonte: Autores.

A operação normal do circuito é o relé em estado aberto e o capacitor descarregado. Quando o relé é comutado a partir de um sinal enviado da saída digital do microcontrolador, o painel fotovoltaico é conectado à carga do capacitor. A tensão é lida a partir do circuito divisor de tensão e a corrente é lida a partir do sensor de corrente ACS712 de ± 5 A. O microcontrolador realiza as medições de tensão e corrente até o instante em que a corrente lida no sensor apresenta valor zero. A corrente e a tensão são obtidas durante o processo de carregamento do capacitor, que correspondem às características I-V do módulo FV. Após este processo, o relé retorna ao seu estado inicial e o capacitor é descarregado em um resistor para o rastreamento da próxima medição. Todo o circuito foi montado em uma caixa para facilitar o transporte e o manuseio, conforme ilustrado na Figura 12.



Figura 12 - Montagem do protótipo do traçador de curvas I-V. Fonte: Autores.

Para se obter a potência máxima gerada pela placa, utiliza-se o produto da tensão pela corrente em cada ponto da curva. A potência é variável, e no decorrer do gráfico observa-se que a potência é máxima no pico da curvatura chamada de joelho de curva. A potência será zero quando a corrente ou a tensão apresentarem valores nulos.

4. Resultados

Foi utilizado o Arduino como microcontrolador pela sua facilidade de programação e maior disponibilidade de módulos que se conectam a ele para a leitura dos dados, assim como sua facilidade de comunicação com o computador, não necessitando de circuitos para armazenamento de dados externos.

A data da realização dos ensaios e aquisição dos dados foi dia 13/12/2021. Neste dia, a previsão do tempo indicava que a temperatura ambiente estava em 31°C e com o céu parcialmente nublado durante os ensaios, realizados entre 15:00 e 17:00.

Em virtude do surgimento de nuvens ao longo deste período, tem-se, inevitavelmente, grandes variações de irradiância, entre 300Wh/m² e 500Wh/m², dificultando a análise dos resultados nesse período do dia, conforme ilustrado na Figura 13. Porém, nos últimos ensaios já não havia

presença de nuvens que comprometessem a irradiância, que estava por volta de 900Wh/m^2 .



Figura 13 - Local onde foram realizados os ensaios.
Fonte: Autores.

4.1 Traçador de Curvas

O traçador de curvas foi instalado nas saídas positiva (+) e negativa (-) do módulo FV. O módulo encontrava-se sob uma superfície angular, com a face perpendicular aos raios do sol, estando livre de qualquer sombreamento, conforme ilustrado na Figura 14.



Figura 14 - Módulo FV utilizado para a aquisição dos dados. Fonte: Autores.

O módulo FV utilizado para a aquisição dos dados foi o TSM-345PE15H da fabricante Trina Solar. Os valores de Voc e Isc do módulo FV para comparação foram obtidos através dos dados do módulo, ilustrados na Tabela 3, com uma tensão Voc

de $46,4\text{V} \pm 3\%$ e a corrente Isc de $9,62\text{A} \pm 4\%$. Estes dados foram obtidos pelo fabricante em laboratório, em Condições Padrão de Testes STC, do inglês *Standard Testing Conditions*, à uma irradiância de 1000W/m^2 e temperatura ambiente de 25°C . Na Figura 15 estão apresentadas as curvas P-V (potência versus tensão) desse modelo, fornecidas também pelo fabricante.

TSM-345PE15H		
Maximum Power	Pmax	$345\text{W} \pm 2,5\%$
Maximum Power Voltage	Vmp	$37,7\text{V}$
Maximum Power Voltage Current	Imp	$9,15\text{A}$
Open Circuit Voltage	Voc	$46,4\text{V} \pm 3\%$
Short Circuit Current	Isc	$9,62\text{A} \pm 4\%$

Tabela 3 - Dados do módulo FV Trinasolar TSM-345PE15H, obtidos em laboratório com irradiância de 1000W/m^2 e temperatura de 25°C . Fonte: *TRINA SOLAR. The tallmax framed 144 half-cell module. 20--*.

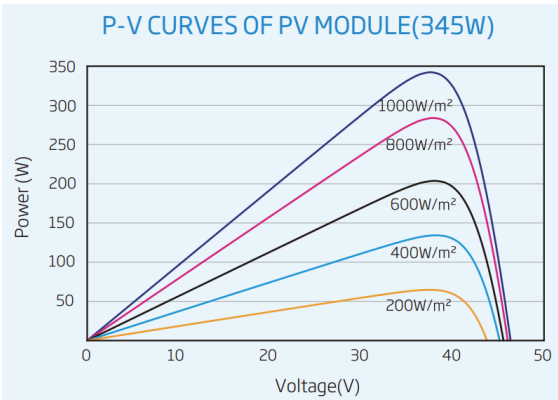


Figura 15 – Curva de potência do módulo FV TSM-345PE15H. Fonte: *TRINA SOLAR. The tallmax framed 144 half-cell module. 20--*

Para que os dados fossem obtidos, utilizou-se um computador, conectado ao arduino ao qual estavam conectados todos os sensores.

O método capacitivo permite a obtenção da corrente e da tensão a partir da impedância que o capacitor gera quando existe uma variação de corrente.

Ao acionar a chave para chaveamento do capacitor, foram obtidos os dados de tensão e corrente do módulo FV em um período de tempo pré-estabelecido no microcontrolador de 2 segundos. Neste

período o capacitor realizou o carregamento e posteriormente se tornou um circuito aberto, fazendo com que fossem identificados os dados de corrente I_{sc} no ato do chaveamento do capacitor e ao finalizar o carregamento foi obtido os dados de tensão V_{oc} .

Foram realizados 2 ensaios para comparação e validação dos resultados e comparação com os dados do módulo FV.

4.2 Piranômetro

Os dados do piranômetro foram obtidos através do microcontrolador, conectado ao computador e aos sensores. Para ser detectada a irradiância incidente sob o módulo, o sensor BPW34 foi exposto na mesma angulação do módulo e ao lado dele, assim os dados serão mais fiéis.

Para a conversão dos dados lidos pelo sensor e convertidos pelo circuito de transimpedância, foi utilizada a Equação (1) na qual pôde-se obter os valores em W/m^2 da irradiância incidente nos dois ensaios realizados a ao mesmo tempo da aquisição dos dados de tensão e corrente do módulo FV.

4.3 Sensor de temperatura

O sensor de temperatura LM35 foi exposto ao ambiente próximo ao módulo FV para que a temperatura incidente sob o módulo também fosse incidente no sensor e assim trazer uma maior proximidade da temperatura na qual o módulo se encontrava no momento da aquisição dos dados de tensão, corrente e irradiância.

4.4 Comparação dos ensaios

As curvas I-V obtidas pelo traçador nos dois ensaios estão ilustradas na Figura 16 e Figura 17. Comparando a curva I-V dos dois ensaios, é perceptível que o Ensaio 1 obteve uma corrente I_{sc} maior que o Ensaio 2. Isso

se deve ao fato de a corrente ser a variável que mais sofre mudanças com as variações externas de temperatura e irradiância. No Ensaio 1 a temperatura está mais baixa, o que aumenta a eficiência do módulo. Outro fator que influenciou neste resultado foi a irradiância, que está maior no Ensaio 1, fazendo com que o módulo converta mais radiação solar em energia elétrica.

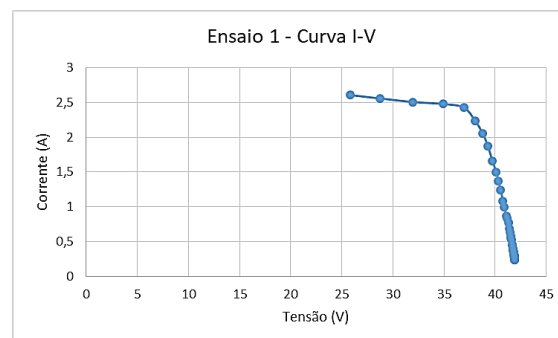


Figura 16 - Curva I-V do Ensaio 1, realizado às 16:15, com temperatura de $30,3^{\circ}C$ e irradiância de $400W/m^2$. Fonte: Autores.

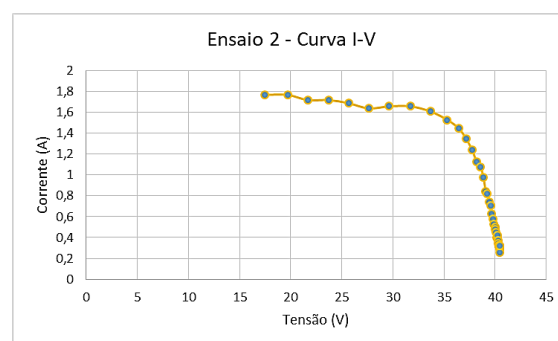


Figura 17 – Curva de Potência do Ensaio 1, realizado às 16:15, com temperatura de $30,3^{\circ}C$ e irradiância de $400W/m^2$. Fonte: Autores.

A curva de potência obtida através dos dois ensaios está ilustrada na Figura 18 e Figura 19. Esta curva é obtida através do produto da tensão pela corrente ao longo do período de amostragem. É perceptível através dos gráficos que o Ensaio 1 obteve uma maior potência extraída do módulo do que no Ensaio 2, devido às alterações

climáticas de temperatura e irradiância.

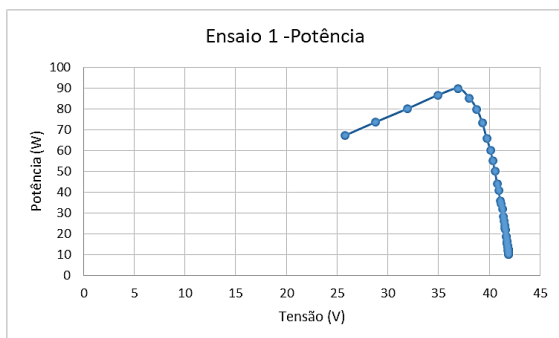


Figura 18 - Curva I-V do Ensaio 2, realizado às 16:24, com temperatura de 32,71°C e irradiância de 300W/m². Fonte: Autores.

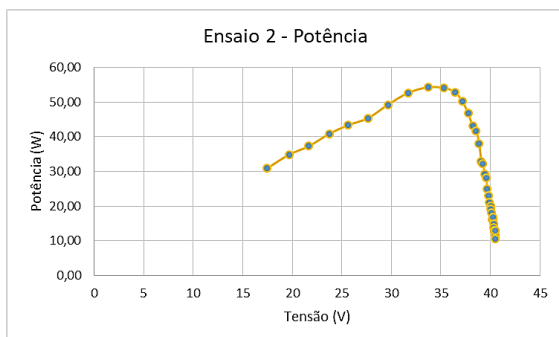


Figura 19 - Curva de Potência do Ensaio 2, realizado às 16:24, com temperatura de 32,71°C e irradiância de 300W/m². Fonte: Autores.

Os resultados obtidos a partir dos dois ensaios estão descritos na Tabela 4. Como pode-se perceber, o ensaio 1 obteve uma maior potência extraída do que no ensaio 2. Isso se deve ao fato de ocorrerem mudanças de temperatura e irradiância que afetaram negativamente

Resultados dos Ensaios		
	Ensaio 1	Ensaio 2
Hora	16:15	16:24
Temperatura (°C)	30,3	32,71
Irradiância	400	300
Isc (A)	2,61	1,77
Voc (V)	41,88	40,48
Imp (A)	2,43	1,61
Vmp (V)	36,94	33,69
Pmax (W)	89,76	54,24

Tabela 4 - Dados obtidos pelo traçador de curvas em dois ensaios. Fonte: Autores.

Comparando os resultados obtidos com os fornecidos pelo fabricante de acordo com a Figura 15, é perceptível que com a irradiância próxima à exposta o módulo nos ensaios (entre 300 e 400W/m²), os resultados obtidos em laboratório conseguem extrair uma potência maior do módulo, porém, esses dados foram obtidos em um ambiente controlado, no qual a temperatura é fixada em 25°C, o que tem um fator determinante na eficiência que o módulo têm, ao contrário do módulo exposto em condições reais, com altas temperaturas incidentes sob o módulo FV.

5. Conclusão

Este artigo descreveu a construção de um traçador portátil com a finalidade de traçar as curvas características de um módulo fotovoltaico de 345Wp, tendo como atributo a portabilidade, a capacidade de operar fora de laboratórios, além de apresentar qualidade no que tange ao diagnóstico de falhas. Utilizando a técnica de polarização para módulos fotovoltaicos foram utilizados capacitores eletrolíticos com chaveamento por relé, que a partir dos testes realizados se mostrou eficaz, possibilitando a medição de dados importantes como a estimativa das correntes Isc e Imp, das tensões Voc e Vmp e da potência Pmax.

O controle do relé e a coleta dos dados medidos foram realizados através da placa Arduino. Para a completa coleta dos dados foram construídos circuitos auxiliares para realizar as medições de irradiância incidente no local e temperatura ambiente no qual foi utilizado o sensor de temperatura o LM35.

Para executar o trabalho foi necessário seguir os passos descritos nos objetivos, entender o princípio de caracterização dos módulos fotovoltaicos a partir dos dados de corrente e tensão por elas produzidas, entender o processo de coleta dos dados e

aprender a programar o Arduino para realizar as leituras dos dados, estes objetivos foram alcançados mediante revisão bibliográfica e testes em laboratório.

A metodologia utilizada para o desenvolvimento deste trabalho consistiu em pesquisas bibliográficas e levantamento de dados em campo.

O estudo realizado apresentou algumas limitações quando comparados com as curvas I-V fornecidas pelo fabricante. As curvas obtidas com o traçador desenvolvido neste trabalho apresentaram divergências com as fornecidas pelo fabricante que podem ser justificadas, pela diferença de temperatura utilizada nos testes em laboratório (STC), realizados pelo fabricante, e nos experimentos com o traçador montado. Outro fator associado a essas divergências é em relação à falta de referência precisa para o ajuste do piranômetro, que foi ajustado de acordo com o trabalho de Luz et al., (2018).

Apesar de os resultados obtidos não terem sido comparados com os dados de um analisador/traçador de curvas I-V profissional, devido à sua indisponibilidade no momento da realização dos experimentos, o circuito desenvolvido nesse trabalho se mostrou plausível, podendo ser mais estudado e aprimorado futuramente para uma melhor performance.

6. Referências

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. *Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST: Módulo 3 – Acesso ao Sistema de Distribuição*. Distrito Federal, 2017. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/documents/656827/14866914/PRODIST-M%C3%B3dulo3_Revis%C3%A3o7/ebfa9546-09c2-4fe5-a5a2-ac8430cbca99>. Acesso em 4 abril 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16274: sistemas fotovoltaicos conectados à rede – requisitos mínimos para documentação, ensaios de comissionamento, inspeção e avaliação de desempenho**. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.
- BESHARAT, F.; DEGHAN, A. A.; FAGHIH, A. R. Empirical models for estimating global solar radiation: A review and case study. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. Yazd, v. 21, p. 798-821, ago. 2012/mar. 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2012.12.043>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032112007484?via%3Dihub>>. Acesso em: 04 abril 2021.
- BOLZAN, M. B. *Desenvolvimento de um piranômetro baseado em componentes semicondutores*. 2014. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Programa de pós-graduação em Meteorologia, linha de pesquisa meteorológica, Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2014. Disponível em: <<https://repositorio.ufsm.br/handle/1/10277>>. Acesso em 07 dezembro 2021.
- BOSCAINO, V.; CIPRIANI, G.; DI DIO, V.; MICELI, R.; PULIZZOTTO, A.; RIZZO, R. A standard-compliant prototype for PV module curve detection. **3RD RENEWABLE POWER GENERATION CONFERENCE (RPG 2014)**. P. 1-6, set./dez. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1049/cp.2014.0874>. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/6993267>>. Acesso em 16 abril 2021.
- CAIRES, S. M. P. *Estudo sobre posicionamento de placas fotovoltaicas*. 2014. Monografia (Engenharia Eletricista com ênfase em Eletrônica) - Engenharia Elétrica, Faculdade Independente do Nordeste, Vitória da Conquista, 2014. Disponível em: <https://semanaacademica.org.br/system/files/artigos/tcc_suzane_caires.pdf>. Acesso em 27 fevereiro 2021.
- CARVALHO, A. L. C. *Metodologia para análise, caracterização e simulação de células fotovoltaicas*. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014. Disponível em: <<https://www.ppgee.ufmg.br/defesas/1083M.PDF>>. Acesso em 10 abril 2021.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Balanco Energético Nacional 2020: Ano base 2019*. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados>>

abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-479/topico-528/BEN2020_sp.pdf>. Acesso em: 20 fevereiro 2021.

FOUAD, M. M.; SHIHATA, L. A.; MORGAN, E. I. An integrated review of factors influencing the performance of photovoltaic panels. **RENEWABLE AND SUSTAINABLE ENERGY REVIEWS**. V. 80, p. 1499-1511, jul. 2016/jun. 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.141>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032117307803?via%3Dihub>>. Acesso em 24 abril 2021.

GREEN, M.; DUNLOP, E.; HOHL-EBINGER, J.; YOSHITA, M.; KOPIDAKIS, N.; HAO, X. Solar cell efficiency tables (version 57). **Progress in Photovoltaics**. V. 29, n. 1, p. 3-15, out./nov. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1002/pip.3371>. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/pip.3371>>. Acesso em 17 dezembro 2021.

LUZ, Caio M. A. et al. ANÁLISE COMPARATIVA DE MEDIDORES DE IRRADIÂNCIA. CBA2018, São João del Rei, p.1-8, 2018.

MA, X.; HUANG, W.; SCHNABEL, E.; KÖHL, M.; BRYNJARSDÓTTIR, J.; BRAID, J. L.; FRENCH, R. H. Data-driven I-V feature extraction for photovoltaic modules. **IEEE JOURNAL OF PHOTOVOLTAICS**. V. 9, n. 5, p. 1405-1412, mar./ago. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2019.2928477>. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8788579>>. Acesso em 03 março 2021.

MACHADO, C. T.; MIRANDA, F. S. Energia solar fotovoltaica: uma breve revisão. **Revista Virtual de Química**. Rio de Janeiro, v. 7, n. 1, p. 126-143, fev./out. 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.5935/1984-6835.20150008>. Disponível em: <<http://static.sites.s bq.org.br/rvq.s bq.org.br/pdf/v7n1a08.pdf>>. Acesso em: 27 fevereiro 2021.

MAHMUD, K.; ALAM, M. S.; GHOSH, R. Design of Digital Thermometer Based on PIC16F77A Single Chip Microcontroller. **2013 3rd International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks**. P. 246-249, nov./nov. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1109/CECNet.2013.6703317>. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/6703317>>. Acesso em 17 dezembro 2021.

MAIA, F. C. T. **Estudo de modelos e técnicas de detecção e diagnóstico de falhas aplicadas à sistemas fotovoltaicos**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de pós-graduação em Engenharia Elétrica - PROEE, Universidade Federal de Sergipe, Sergipe, 2019. Disponível em: <https://ri.ufs.br/bitstream/riufs/12317/2/FLAVIO_COUVO_TEIXEIRA_MAIA.pdf>. Acesso em 07 dezembro 2021.

MATSUSHITA, T. L.; GRANADO, D. W. A crise hídrica no Brasil e seus impactos no desenvolvimento econômico e ambiental. **Thesis Juris**, São Paulo, v. 6, n. 1, p. 167-185, jan./abr. 2017.

NASCIMENTO JUNIOR, A. J. **Contribuição à modelagem de módulos fotovoltaicos e proposta de uma técnica híbrida de seguimento do ponto de máxima potência com estimador de irradiância**. 2018. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018. Disponível em: <<https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/35132>>. Acesso em 24 abril 2021.

NATIONAL SEMICONDUCTOR. LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors, 2000.

OLIVEIRA, F. S. **Desenvolvimento de traçador de curvas I-V portátil para arranjos fotovoltaicos**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2015. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/127782/000970155.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em 14 março 2021.

OWUSU, P. A.; ASUMADU-SARKODIE, S. A review of renewable energy sources, sustainability issues and climate change mitigation. **Cogent Engineering**. República Turca do Norte de Chipre, v. 3, n. 1167990, p. 1-14, jan./abr. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1080/23311916.2016.1167990>. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/23311916.2016.1167990?needAccess=true>>. Acesso em 30 março 2021.

OYELAMI, S.; AZEEZ, N. A.; ADEDIGBA, S. A.; AKINOLA, O. J.; AJAYI, R. M. A Pyranometer for Solar Radiation Measurement-Review. **Adeleke University Journal of Engineering and Technology**. V. 3, n. 1, p. 61-68, set./dez. 2020. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/349210517_A_Pyranometer_for_Solar_Radiation_Measur

ent-Review>. Acesso em 07 dezembro 2021.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; GONÇALVES, A. R.; COSTA, R. S.; LIMA, F. J. L.; RÜTHER R.; ABREU, S. L.; TIEPOLO G. M.; PEREIRA, S. V.; SOUZA, J. G. Atlas brasileiro de energia solar. São Paulo: INPE, 2017.

PEREIRA, N. X. **Desafios e perspectivas da energia solar fotovoltaica no Brasil: geração distribuída vs geração centralizada**. 2019. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) - Instituto de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, São Paulo, 2019. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/181288>>. Acesso em 14 março 2021.

SAMPAIO, P. G. V.; GONZÁLEZ, M. O. A. Photovoltaic solar energy: Conceptual framework. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. Rio Grande do Norte, v. 74, p. 590-601, jun. 2016/ mar. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.081>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032117303076?via%3Dihub>>. Acesso em 01 abril 2021.

SILVA, R. G.; CARMO, M. J. Energia solar fotovoltaica: uma proposta para melhoria da gestão energética. **InterSciencePlace**. Minas Gerais, v. 12, n. 2, p. 129-147, abr./jun. 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.6020/1679-9844/v12n2a8>. Disponível em: <<http://www.interscienceplace.org/isp/index.php/isp/article/download/649/403>>. Acesso em 27 fevereiro 2021.

TRINA SOLAR. The tallmax framed 144 half-cell module. 20—

WOLFE, Philip R. **The Solar Generation: Childhood and Adolescence of Terrestrial Photovoltaics**. 1. ed. Wiley-IEEE Press, 2018.

YANDT, M., D.; COOK, J. P. D.; KELLY, M.; SCHRIEMER, H.; HINZER, K. Dynamic Real-Time I-V Curve Measurement System for Indoor/Outdoor Characterization of Photovoltaic Cells and Modules. **IEEE JOURNAL OF PHOTOVOLTAICS**. V. 5, n. 1, p. 337-343, jul./nov. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2014.2366690>. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/6967715>>. Acesso em 16 abril 2021.

CANAL SOLAR. O que é geração distribuída de

energia elétrica?. **CANAL SOLAR**, 2021. Disponível em: <<https://canalsolar.com.br/o-que-e-geracao-distribuida-de-energia-eletrica/>>. Acesso em 13 maio 2021.

KOCHAN, R.; KOCHAN, O.; CHYRKA, M.; JUN, S.; BYKOVYY, P. Approaches of Voltage Divider Development for Metrology Verification of ADC. **2013 IEEE 7th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IDAACS)**. P. 70-75, set./nov. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1109/IDAACS.2013.6662642>. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6662642>>. Acesso em 11 fevereiro 2022.

ATMEL ATMEGA328P. 2015. Disponível em: <https://content.arduino.cc/assets/Atmel-7810-Automotive-Microcontrollers-ATmega328P_Datasheet.pdf?_gl=1*1nm7vyp*_ga*_NDcwOTU3NzAwLjE2MzQwNjkwNzY.*_ga_NEXN8H46L5*MTY0NDYyNTQxMC45LjEuMTY0NDYyNTQxNC4w>. Acesso em 11 fevereiro 2022.

YATCHEV, I.; SEM, M.; BALABOZOV, I.; KOSTOV, I. Modelling of a Hall Effect-Based Current Sensor with an Open Core Magnetic Concentrator. **Sensors**. V. 18, n. 4, p. 1-11, fev./abr. 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/s18041260> Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1424-8220/18/4/1260>>. Acesso em 11 fevereiro 2022.

ELFASI, A.; SHAWESH, M. A.; SHANAB, W. T.; THABET, A. K. **Oscilloscope using Arduino interface LabVIEW**. **2017 International Conference on Green Energy Conversion Systems (GECS)**. p. 1-5, out. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2019.2928477>. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/GECS.2017.8066129>>. Acesso em 16 maio 2021.

BADAMASI, Y. A. **The Working Principle Of An Arduino**. **2014 11th International Conference on Electronics, Computer and Computation (ICECCO)**. Abuja, p. 1-4, set./dez. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICECCO.2014.6997578>. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/6997578>>. Acesso em 16 maio 2021.