

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E  
TECNOLOGIA DE SÃO PAULO  
CÂMPUS GUARULHOS

MURILO FABRICIO SILVA, VICTOR HUGO DIAS LOPES

TRAÇADOR DE CURVA I-V PARA PAINÉIS  
FOTOVOLTAICOS DE BAIXA POTÊNCIA

GUARULHOS

2019

MURILO FABRICIO SILVA, VICTOR HUGO DIAS LOPES

## Traçador de curva I-V para painéis fotovoltaicos de baixa potência

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Tecnólogo em Automação Industrial.

Orientador: Prof.Dr. Marcelo Kenji Shibusawa

Coorientador: Profa.Dra. Vanessa Seriácopi

GUARULHOS

2019

Folha destinada à inclusão da Catalogação na Fonte - Ficha Catalográfica (a ser solicitada à Biblioteca IFSP – Câmpus Guarulhos e posteriormente impressa no verso da Folha de Rosto (folha anterior).

Catalogação na Fonte preparada pela Biblioteca Comunitária “Wolgran Junqueira Ferreira” do IFSP – Câmpus São João da Boa Vista

Murilo Fabricio Silva, Victor Hugo Dias Lopes

Traçador de curva I-V para painéis fotovoltaicos de baixa potência/ Murilo Fabricio Silva, Victor Hugo Dias Lopes. – Guarulhos, 2019-  
50 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador Prof. Dr. Prof.Dr. Marcelo Kenji Shibuya

Trabalho de Conclusão de Curso – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo  
Câmpus Guarulhos , 2019.

1. Palavra-chave 1. 2. Palavra-chave 2. 3. Palavra-chave 3. I. Orientador. II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo. III. Título

MURILO FABRICIO SILVA, VICTOR HUGO DIAS LOPES

## TRAÇADOR DE CURVA I-V PARA PAINÉIS FOTOVOLTAICOS DE BAIXA POTÊNCIA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
ao Instituto Federal de Educação, Ciência  
e Tecnologia de São Paulo, como parte  
dos requisitos para a obtenção do grau de  
Tecnólogo em Automação Industrial.

Aprovado em DIA(número) de MÊS(por extenso) de ANO(Número).

---

**Prof.Dr. Marcelo Kenji Shibuya**

Orientador

Titulação

Instituição

---

**Professor Convidado 1**

Titulação

Instituição

---

**Professor Convidado 2**

Titulação

Instituição

Guarulhos

2019

*Dedicatória (Opcional). Não digite a palavra Dedicatória. Texto no qual o autor do trabalho oferece homenagem ou dedica o seu trabalho a alguém (não usar ponto final)*

# AGRADECIMENTOS

Somos gratos primeiramente a Deus, em seguida pelo apoio familiar. Agradecemos aos ensinamentos dos mestres professores que guiaram e guiam nossa trajetória, em especial ao professor doutor Marcelo Kenji Shibuya pelo aprendizado que nos agregou e pela confiança depositada.

*“Any fool can write code that a computer can understand. Good programmers write code that humans can understand”.*

---

Martin Fowler

SOBRENOME, Prenome. **Título do trabalho de TCC colocado em negrito:** sub-título (se houver). Ano da defesa. Tipo de documento (Grau e vinculação acadêmica) – Instituição, Local. Ano da entrega.

Exemplo: RODRIGUES, Rosana Ferrareto Lourenço. **Verbos de movimento em inglês:** uma proposta de descrição e ensino por meio do modelo de integração conceptual. 2012. Tese (Doutorado em Linguística e Língua Portuguesa) – Faculdade de Ciências e Letras, Câmpus Araraquara, Universidade Estadual Paulista, Araraquara. 2012.

## RESUMO

Elemento obrigatório, constituído de uma sequência de frases concisas e objetivas, fornecendo uma visão rápida e clara do conteúdo do estudo. O texto deverá conter entre 150 a 250 palavras e ser antecedido pela referência do estudo. Também, não deve conter citações e deverá ressaltar o objetivo, o método, os resultados e as conclusões. O resumo deve ser redigido em parágrafo único, seguido das palavras representativas do conteúdo do estudo, isto é, palavras-chave, em número de três a cinco, separadas entre si por ponto e finalizadas também por ponto. Usar o verbo na terceira pessoa do singular, com linguagem impersonal (pronome SE), bem como fazer uso, preferencialmente, da voz ativa.

**Palavras-chave:** Palavra-chave 1. Palavra-chave 2. Palavra-chave 3. Palavra-chave n.

SOBRENOME, Prenome. **Título do trabalho de TCC colocado em negrito:** sub-título (se houver). Ano da defesa. Tipo de documento (Grau e vinculação acadêmica) – Instituição, Local. Ano da entrega.

## ABSTRACT

Elemento obrigatório. É a versão do resumo em português para o idioma de divulgação internacional. Deve ser antecedido pela referência do estudo.

**Keywords:** Keyword 1. Keyword 2. Keyword 3. Keyword n.

# LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Variação na temperatura geral da superfície da Terra durante os anos de 1986-2005 para 2081-2100. Fonte: IPCC(2003). . . . .	20
Figura 2 – Simulação do uso de energias renováveis na Alemanha, utilizando-se diferentes ponderações na divisão entre fontes de geração solar e eólica. Fonte: Weitemeyer et al. (2015) . . . . .	21
Figura 3 – Distribuição da matriz energética brasileira. Fonte: Wanderley (2013).	21
Figura 4 – Curva IxV Característica de um painel fotovoltaico. Fonte: (GAO et al., 2018). . . . .	22
Figura 5 – Variação na temperatura de células fotovoltaicas em um arranjo em curto-círcuito. Fonte: Bressan et al. (2016) . . . . .	24
Figura 6 – Curva característica de um sistema composto por 3 módulos de 245 W: (a) módulos sobre uma mesma irradiação com funcionamento pleno; (b) ao sombrear mais de 50% de sua área, há uma grande diferença em sua curva característica. Fonte: Oliveira, Rampinelli e Krenzinger (2016)	25
Figura 7 – Curva característica I-V de painéis fotovoltaicos sobre influência de neve, a qual foi removida no dia 01/01. Fonte: Schill, Brachmann e Koehl (2015). . . . .	25
Figura 8 – Curva característica I-V de painéis fotovoltaicos sobre diferentes temperaturas. Fonte: Martin, Vladislav e Pavel (2017). . . . .	26
Figura 9 – Uso de MOSFET como carga eletrônica para uso em painéis fotovoltaicos. Fonte: Willoughby e Osinowo (2018). . . . .	26
Figura 10 – Exemplos de Arduinos Uno. Fonte: arduino.cc . . . . .	27
Figura 11 – Exemplo simplificado de um sistema de interruptor como chaveando a tensão sobre a carga, simulando assim o sinal PWM .Fonte:<http://www.newtoncbraga.com.br/index.php/robotica/5169-mec071a> .	28
Figura 12 – Chaveamento do sinal PWM e sua tensão média. Fonte:<http://www.newtoncbraga.com.br/index.php/robotica/5169-mec071a> . . . . .	29
Figura 13 – Diferentes tempos de tensão alta para diferentes valores médios de tensão. Fonte: <http://www.newtoncbraga.com.br/index.php/robotica/5169-mec071a> . . . . .	29
Figura 14 – Exemplo de gerador de sinal PWM. Fonte: <http://www.newtoncbraga.com.br/index.php/robotica/5169-mec071a> . . . . .	30
Figura 15 – Diagrama de blocos. Fonte: Datasheet do fabricante(Texas Instruments).	31
Figura 16 – Exemplo de comunicação utilizando o protocolo I2C. Fonte: (SEMI-CONDUCTORS, 2000). . . . .	32

Figura 17 – Modelos de Cartão SD. Fonte: SD Association. . . . .	32
Figura 18 – Exemplo comunicação SPI. . . . .	33
Figura 19 – Representação de um transistor de efeito de campo(FET). Fonte: Braga (2016). . . . .	34
Figura 20 – Exemplo simplificado de um <i>MOSFET</i> . Fonte: Braga (2016). . . . .	34
Figura 21 – Acionamento de um <i>MOSFET</i> e seus 3 estados:(a)chave aberta, ,(b)amplificador de corrente e (c)chave fechada. Fonte: Braga (2016) adaptado. . . . .	35
Figura 22 – Amplificador operacional no circuito de carga eletrônica. Fonte: Braga (2008) adaptado. . . . .	35
Figura 23 – Diferentes valores de tensão e comparação entre o sensor e um multímetro comercial. Fonte: Elaborado pelo Autor. . . . .	38

# LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tabela do hardware do microcontrolador do Arduino Uno(Atmega328p)	28
Tabela 2 – Combinação dos LEDs de sinalização . . . . .	39

# LISTA DE QUADROS

# LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

1D           Uma dimensão

2D           Duas dimensões

3D           Três dimensões

# LISTA DE SÍMBOLOS

$\alpha$  Letra grega minúscula Alfa

$\beta$  Letra grega minúscula Beta

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>18</b>
<b>1.1</b>	<b>Justificativa</b>	<b>18</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos</b>	<b>19</b>
<b>1.2.1</b>	Objetivo Geral	19
<b>1.2.2</b>	Objetivos Específicos	19
<b>1.3</b>	<b>Metodologia</b>	<b>19</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA</b>	<b>20</b>
<b>2.1</b>	<b>Componentes</b>	<b>27</b>
<b>2.1.1</b>	Arduino	27
<b>2.1.1.1</b>	PWM	28
<b>2.1.1.2</b>	ADC	30
<b>2.1.2</b>	ADS1115	30
<b>2.1.2.1</b>	I2C	31
<b>2.1.3</b>	Cartão SD	32
<b>2.1.3.1</b>	SPI	32
<b>2.1.4</b>	Carga Eletrônica	33
<b>2.1.4.1</b>	MOSFET	33
<b>2.1.4.2</b>	Amplificador Operacional	35
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>36</b>
<b>3.0.1</b>	Arduino	36
<b>3.0.2</b>	I2C e SPI	36
<b>3.0.3</b>	Carga Eletronica	37
<b>3.0.4</b>	Circuito Completo	37
<b>3.0.5</b>	Métodos	37
<b>3.0.5.1</b>	Controle de Variáveis	37
<b>3.0.5.2</b>	Comportamento do Protótipo	38
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>40</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES/CONCLUSÕES PARCIAIS</b>	<b>41</b>
<b>6</b>	<b>CRONOGRAMA</b>	<b>42</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>43</b>

<b>APÊNDICES</b>	<b>45</b>
APÊNDICE A – TÍTULO DO APÊNDICE A . . . . .	46
APÊNDICE B – TÍTULO DO APÊNDICE B . . . . .	47
 <b>ANEXOS</b>	 <b>48</b>
ANEXO A – TÍTULO DO ANEXO A . . . . .	49
ANEXO B – TÍTULO DO ANEXO B . . . . .	50

# 1 INTRODUÇÃO

A energia tem se tornado cada vez mais importante no mundo atual, assim como a busca de meios de energias renováveis e sustentáveis. Entre as principais formas de geração de energia no Brasil são citáveis as energias eólica e solar, que com o avanço da tecnologia têm se tornado cada vez mais acessível. No Brasil, há grande potencial de geração de energia solar, devido a sua posição geográfica, possuindo diversas áreas tropicais, favorecendo assim a geração fotovoltaica. Entre as formas de energia solar, o uso da energia fotovoltaica tem se tornado mais popular. Entretanto, para garantir que um sistema que utilize energia fotovoltaica seja viável é necessário o uso de alguns processos que permitam uma geração eficiente, como o uso MPPT, *Maximum Power Point Tracker*, ou Rastreador de Máxima Potência, de forma a garantir que o sistema dê a maior potência possível em um determinado período.

Tendo este aspecto em mente, este trabalho tem como premissa o desenvolver um protótipo de um traçador de curva I-V portátil para painéis fotovoltaicos, podendo assim detectar anomalias em painéis durante a geração, como sombreamentos, curto circuitos e outros defeitos sobre o modulo ou painel em análise.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

No Brasil, cerca de 81,9% da capacidade de geração de energia e 87,8% da produção total foram por meio de energias renováveis, sendo a matriz hidráulica ainda dominante com 63,7%, e tendo 8,1% as usinas eólicas e 1% as solares, em junho de 2018 de acordo com o Boletim de Monitoramento do Sistema Elétrico, divulgado pelo Ministério de Minas e energias.

Nota-se que a energia solar ainda está se popularizando no Brasil, entretanto segundo a Organização das Nações Unidas(ONU), os investimentos focados em energia solar já ultrapassam a casa dos US\$ 160 bilhões, se tornando cada vez mais importantes em um contexto de geração de energia sustentável. Dito isso, há a necessidade de engajar o uso e conhecimento deste meio de geração de energia, desta maneira, permitindo ao país a diversificação de suas fontes de geração elétrica, de maneira a permitir maior flexibilidade e uma menor dependência a apenas um meio. Realidade a qual pode gerar diversas consequências em caso de problemas ou falta na geração a partir desse meio, como aumento das taxas pagas sobre o consumo de energia, desencadeando diversos problemas econômicos, sociais, e estruturais sobre um país. Entretanto, ao estimular o uso da energia solar é possível descentralizar as fontes de geração de energia por meio de geração limpa,

sustentável, e viável, gerando diversas oportunidades de trabalho e estudo.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo Geral

Analisar o comportamento de painéis fotovoltaicos por meio do uso de sua curva I-V.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Desenvolver um sistema traçador de curva I-V de baixo custo;
- Comparar curvas I-V durante diferentes níveis de irradiação solar em diferentes painéis fotovoltaicos;
- Valorizar o uso de sistemas fotovoltaicos para estudo e uso em faculdades e empresas ao redor do Brasil;
- Categorizar usos diversos de sistemas traçadores de curva I-V para diferentes aplicações para estudo ou comercialmente.

## 1.3 METODOLOGIA

A metodologia utilizada durante a realização do trabalho tem como base o tipo de pesquisa tecnológica exploratória, de maneira a descrever e desenvolver a curva I-V de um painel fotovoltaico e seu uso em estudos ou uso comercial. Deste modo foram realizados os seguintes passos: 1. Análise bibliográfica; 2. Desenvolvimento de um sistema protótipo; 3. Teste do circuito; 4. Análise dos dados coletados; 5. Teste para diferentes quantidades de conjuntos de valores. 6. Comparaçao e análise dos dados coletados, gráficos gerados e curva teórica.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

Graças ao avanço da tecnologia, o uso da energia elétrica se tornou extremamente vital, causando o aumento do uso de meios de geração por combustíveis fósseis, o qual gerou grande emissão de gás carbônico. De acordo com Caldeira, Jain e Hoffert (2003), considerando um cenário para estabilização do clima e onde a sensibilidade climática se encontra no máximo apontado pelo IPCC, *Intergovernmental Panel on Climate Change*, e assumindo o IPCC IaaS92a, ao final do século XXI a maior parte da geração de energia deverá ser estritamente de fontes não emissoras de  $CO_2$ .

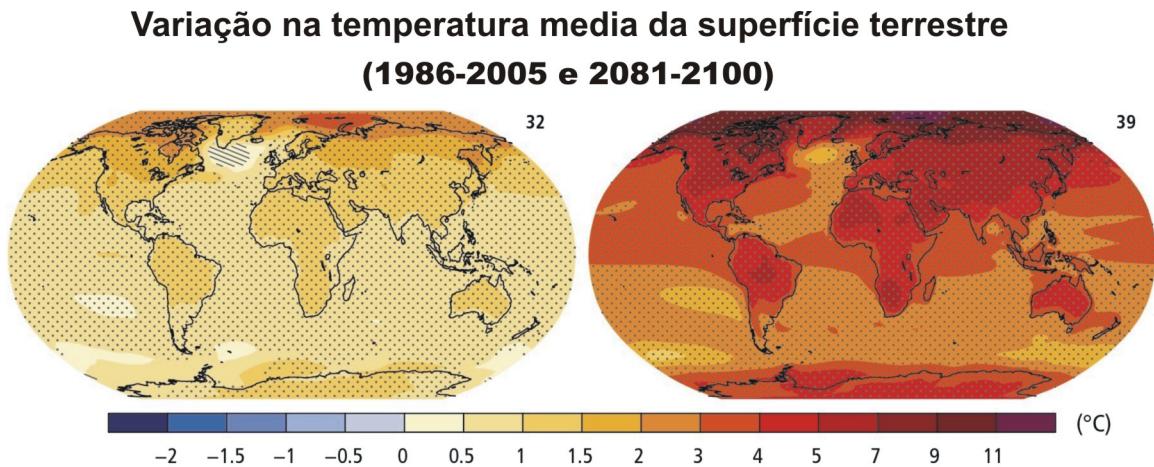


Figura 1 – Variação na temperatura geral da superfície da Terra durante os anos de 1986-2005 para 2081-2100. Fonte: IPCC(2003).

Como apontado por Weitemeyer et al. (2015), o uso de energias renováveis na Europa tem aumentado, considerando as preocupações em relação as alterações climáticas. Como citado pelo autor, devido à facilidade imposta pelo ambiente, considerando um objetivo onde o uso da geração será prioritariamente por fontes renováveis, tem-se o uso da energia solar e eólica como pontos chaves para se alcançar esse objetivo. Como simulado e mostrado na figura 2, o uso de energias renováveis se mostra promissor na simulação considerando a Alemanha como objeto de estudo, tendo apenas a geração estrita por meio de energia solar, distante do cenário de integração perfeita, onde  $\alpha=0$  representa uma geração estritamente solar, e  $\alpha=1$  representa uma geração estritamente eólica.

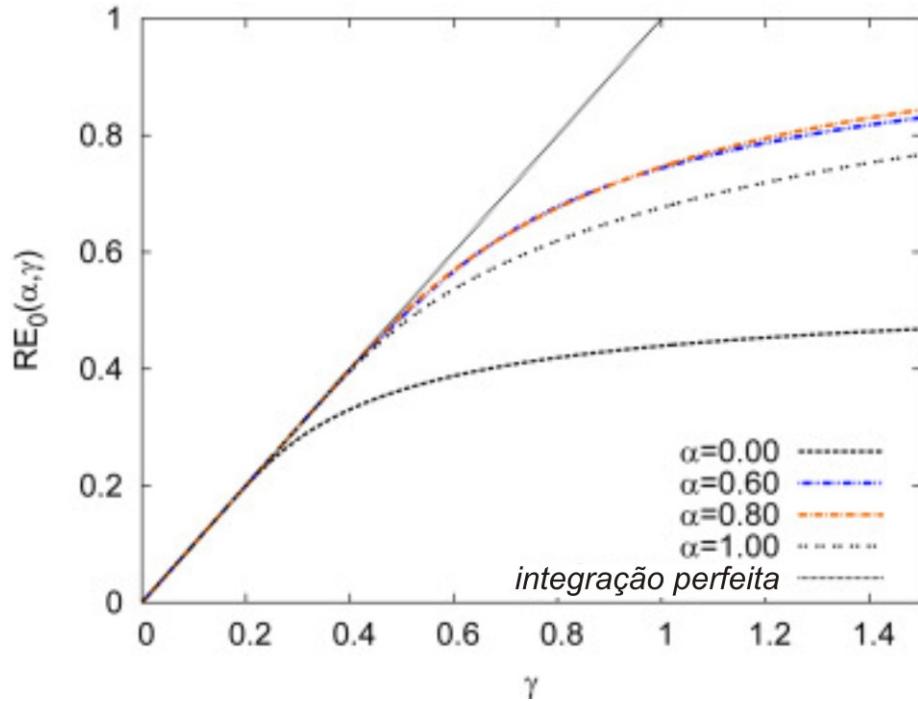


Figura 2 – Simulação do uso de energias renováveis na Alemanha, utilizando-se diferentes ponderações na divisão entre fontes de geração solar e eólica. Fonte: Weitemeyer et al. (2015)

Tendo em vista o problema causado por energias provenientes de fontes fósseis, o Brasil se concentrou na geração de energia elétrica de fontes renováveis principalmente hidráulicas, atingindo um índice de mais de 74% de sua produção de acordo com Wanderley (2013) e conforme visto na figura 3.

Devido a oscilações anuais dos índices de chuva, o racionamento de energia causado pelas épocas de estiagem, excitou a busca por novas fontes energéticas alternativas; tendo em vista que o Brasil é um país de clima predominantemente tropical, houve um crescente desenvolvimento de pesquisas para a produção de energia solar fotovoltaica.

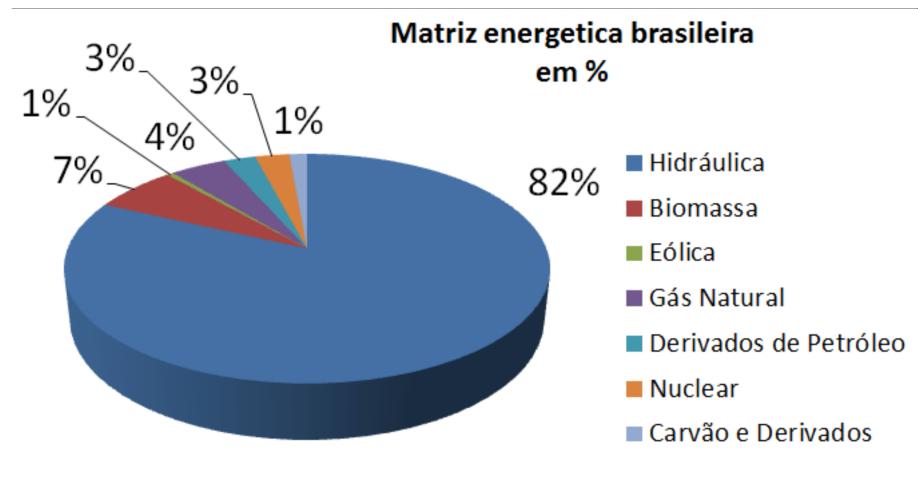


Figura 3 – Distribuição da matriz energética brasileira. Fonte: Wanderley (2013).

O grande impasse para produção de usinas solares é o alto valor de produção tendo em vista o rendimento dos painéis fotovoltaicos comparado com as fontes de energias tradicionais. De acordo com Ribeiro et al. (2017), para construir uma usina solar fotovoltaica com capacidade de produção de aproximadamente  $4.000\text{MWh}$  ao ano, seria necessário um investimento de aproximadamente  $R\$22.000.000,00$  ou seja,  $7,30\text{R\$/Wp}$ ; no artigo citado, foram taxados preços dos painéis, inversores, imposto de importação e taxas de produção. A solução para viabilizar a produção deste tipo de energia, seria o aumento de sua eficiência energética. Para alcançar este objetivo, foram efetuados diversos estudos, pesquisas e implementações de circuitos eletrônicos e projetos mecânicos.

Há trabalhos de pesquisa que visam obter o melhor aproveitamento da radiação solar criando sistemas mecânicos, Willoughby e Osinowo (2018), enquanto alguns fazem comparações entre painéis com células obstruídas através de sombreamento, Bressan et al. (2016), outros fazem a aplicação de diferentes aparelhos para se obter energia perdida devido à difusão dos raios solares, Lee et al. (2016), há trabalhos que propõem mensurar a perda de energia devido a poluição do ar em determinadas regiões, Li et al. (2017). Foram apresentados projetos que objetivam a melhora da potência entregue pelos painéis através no melhoramento da curva  $\text{IxV}$  (Corrente por tensão) - figura 4, foram apresentados projetos mostrando modos de melhoria desta curva, entre eles o algoritmo MPPT (Maximum Power Point Traking), Willoughby e Osinowo (2018).

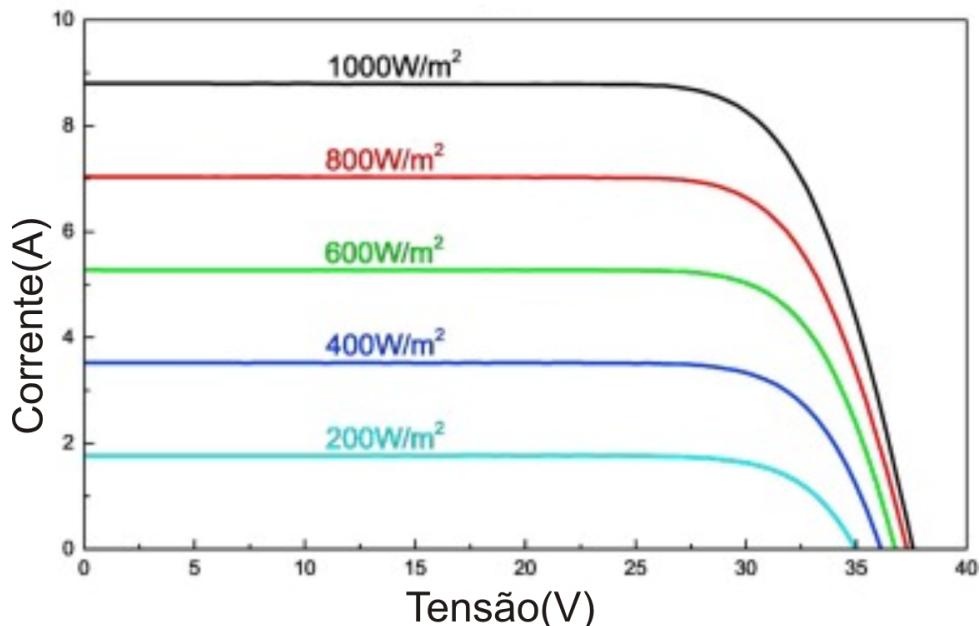


Figura 4 – Curva  $\text{IxV}$  Característica de um painel fotovoltaico. Fonte: (GAO et al., 2018).

Para se obter um maior rendimento dos painéis fotovoltaicos, Willoughby e Osinowo (2018) apresentaram um projeto de um seguidor solar tendo por base um microcontrolador e motores de passo. A ideia proposta é a de que, durante o transcorrer do dia, o painel

solar modificaria sua inclinação de modo a estar sempre perpendicular a incidência dos raios solares, tendo assim uma potência de geração superior aos modelos convencionais com bases fixas.

Tomando uma abordagem diferente, porém com o mesmo intuito, Lee et al. (2016) publicaram *Concentrator photovoltaic module architectures with capabilities for capture and conversion of full global solar radiation*. No artigo citado, foi apresentada a ideia de um concentrador de raios solares fazendo uso das células fotovoltaicas do tipo 3J (esférica) e 4J (plana).

Foram propostas duas tecnologias de funcionamentos similares:

- O primeiro concentrador é uma placa translúcida composto por bolhas que é colocada na parte de cima do painel com um distanciamento de 10 centímetros, essas bolhas tem como função captar os raios solares difusos e concentrar sobre células fotovoltaicas do tipo 3J;
- O segundo concentrador tem o mesmo princípio de funcionamento, uma placa translúcida com bolhas de estrutura diferente da apresentada anteriormente é colocada na parte superior do painel com um distanciamento de aproximadamente 10 centímetros, mas ao invés de concentrar os raios solares em uma única célula 3J, a bolha capta a irradiância solar e distribui de maneira uniforme sobre uma célula do tipo 4J.

Os dois métodos exibem resultados de até 8% mais eficiência energética em comparação aos painéis fotovoltaicos convencionais, isso dado ao aumento da concentração e direcionamento dos raios solares difusos sobre as células fotovoltaicas.

Foi colocado por LI et al.(2017) um ponto negativo e preocupante a respeito da produção de energia fotovoltaica no território da China. Segundo o artigo publicado: *Reduction of solar photovoltaic resources due to air pollution in China*, A China tem por pretensão a produção de 400 GW de energia elétrica proveniente de painéis fotovoltaicos até 2023. Porém, o estudo realizado revela que atualmente a poluição aérea causada por aerossóis, diminui de forma significativa a produção de energia fotovoltaica, em destaque na região do centro, leste e nordeste no país, locais de maior concentração de indústrias, índice de poluição e necessidade de energia elétrica. Índices mostram uma perda de 35% da energia produzida e 1,5 kWh/m<sup>2</sup> da irradiância solar em todo território descrito, as nuvens causam grande influência sobre a irradiância solar que atinge o solo daquela região, porém com o agravante, as perdas aumentaram significativamente.

Assim como descrito anteriormente, painéis fotovoltaicos possuem diversas características favoráveis à geração de energia por meios sustentáveis e limpos. Entretanto, apontado por Bressan et al. (2016), arranjos fotovoltaicos estão extremamente sujeitos a meios externos que podem afetar sua geração, como sujeira, ou sombreamento, fatores

os quais causam um rápido aquecimento das células fotovoltaicas. Existem maneiras de amenizar esse efeitos, como o uso de diodos *bypass*, entretanto o uso dessas técnicas não anulam esse efeitos por completo. Como mostrado na figura 5, é possível observar a variação da temperatura, alterando consequentemente o funcionamento do painel fotovoltaico.

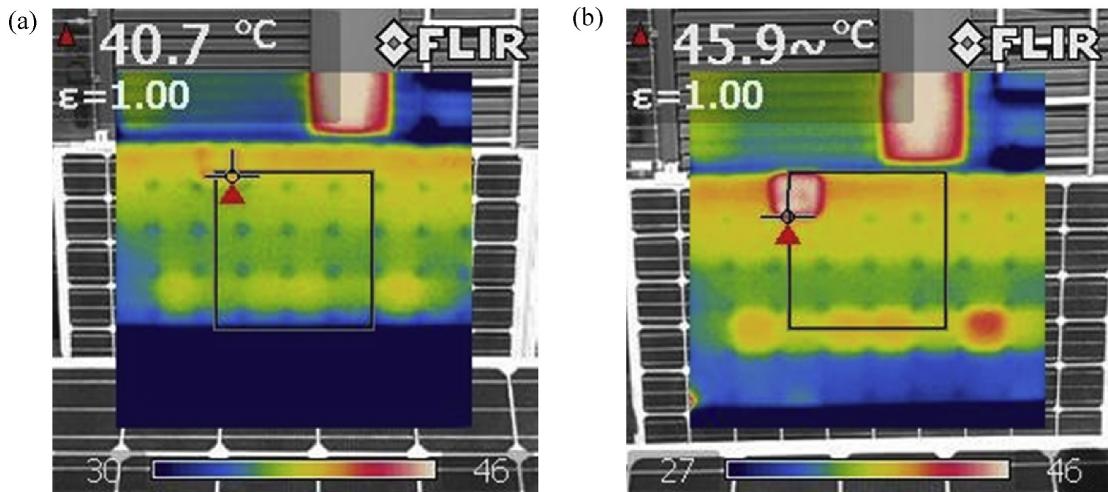


Figura 5 – Variação na temperatura de células fotovoltaicas em um arranjo em curto-círculo. Fonte: Bressan et al. (2016)

Tendo em vista a presença de fatores internos e externos na geração e funcionamento ideal de um painel fotovoltaico, se faz presente a necessidade de um padrão de avaliação e teste, assim garantindo seu funcionamento pleno, podendo também permitir a detecção de erros ou anomalias sobre o painel. Como descreve Oliveira, Rampinelli e Krenzinger (2016), o uso da curva característica de sistemas fotovoltaicos a qual relaciona os valores de correntes e de tensão sobre o painel ao se utilizar diferentes cargas, intitulada como curva I-V, permite a avaliação e análise de desempenho de sistemas fotovoltaicos. Ao se obter a curva I-V de um sistema fotovoltaico é possível detectar problemas na geração como demonstrado na figura 6.

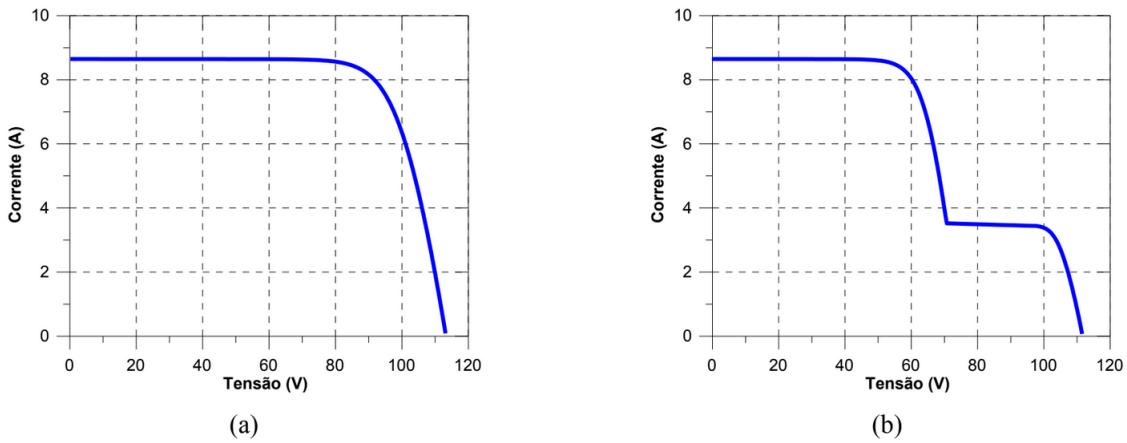


Figura 6 – Curva característica de um sistema composto por 3 módulos de 245 W: (a) módulos sobre uma mesma irradiância com funcionamento pleno; (b) ao sombrear mais de 50% de sua área, há uma grande diferença em sua curva característica. Fonte: Oliveira, Rampinelli e Krenzinger (2016)

Como apontado anteriormente, há grande importância e interesse no uso da curva I-V de sistemas fotovoltaicos, para gerenciamento, funcionamento, e verificação de erros, e assim como descreve Schill, Brachmann e Koehl (2015) no *Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE*, faz-se o uso da curva I-V para verificação da performance dos arranjos fotovoltaicos durante teste em ambientes abertos para verificação da durabilidade de materiais para o uso em sistemas fotovoltaicos. De acordo com os autores, é verificado e monitorado a curva a cada 10 minutos. O uso da curva I-V permitiu a conclusão em teste onde os painéis foram sujos, durante o teste foi verificada uma diminuição de até 20% dos valores iniciais de eficiência, sendo possível observar a diferença entre as curvas de placas limpas e placas sobre grande influência de poeira como visto na Figura 7.

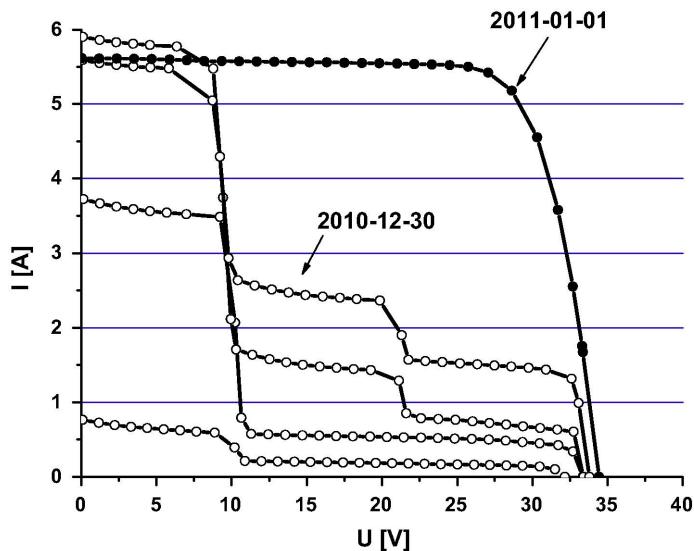


Figura 7 – Curva característica I-V de painéis fotovoltaicos sobre influência de neve, a qual foi removida no dia 01/01. Fonte: Schill, Brachmann e Koehl (2015).

Assim como analisado por Martin, Vladislav e Pavel (2017) , a temperatura do painel fotovoltaico também possui influência sobre a geração, e respectiva curva I-V do painel em análise. É possível observar esse efeito na figura 8.

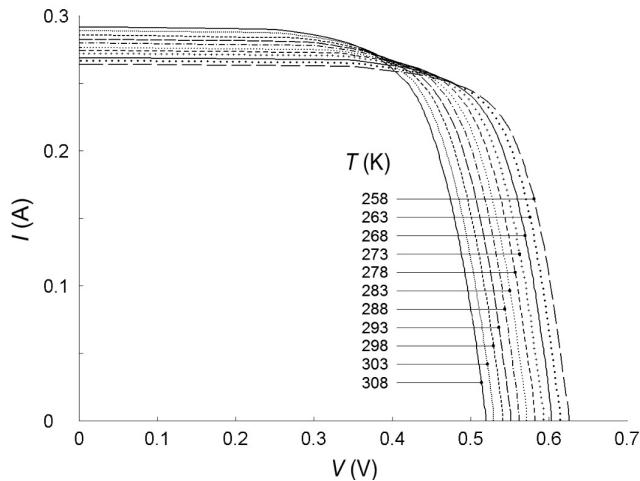


Figura 8 – Curva característica I-V de painéis fotovoltaicos sobre diferentes temperaturas.  
Fonte: Martin, Vladislav e Pavel (2017).

Assim como apontado por Schill, Brachmann e Koehl (2015), o elemento central para a geração da curva I-V é a carga eletrônica, que tem como principal função simular diferentes cargas para o painel fotovoltaico, de maneira a permitir verificar seu comportamento, como foi descrito também por Aliaga et al. (2016), na criação de sistemas que possam garantir a máxima potência global de um arranjo fotovoltaico. Um sistema de carga eletrônica com MOSFET, como mostrado na figura 9 permite a rápida variação de carga sobre o painel fotovoltaico de maneira a possibilitar a construção da curva I-V característica do painel em determinado instante, desta maneira diminuir a diferença de geração devido a meios externos como nuvens ou variações climáticas, (WILLOUGHBY; OSINOWO, 2018).

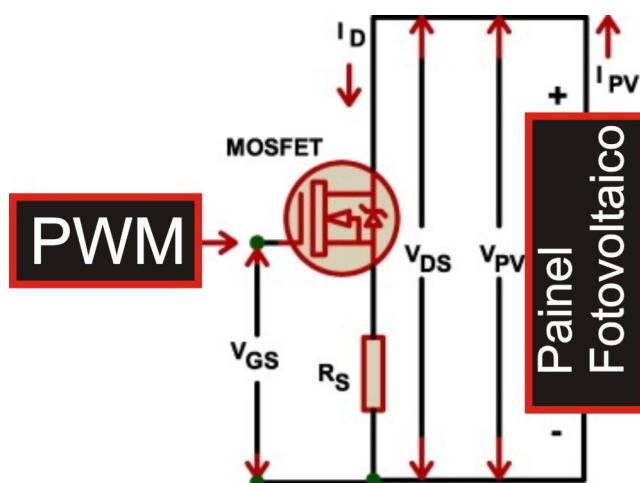


Figura 9 – Uso de MOSFET como carga eletrônica para uso em painéis fotovoltaicos.  
Fonte: Willoughby e Osinowo (2018).

## 2.1 COMPONENTES

Para a aquisição de dados foram utilizados diversos conceitos e ferramentas eletrônicas de diversas esferas específicas, garantindo uma melhor adaptação para o objetivo específico de traçador IxV.

### 2.1.1 Arduino

Arduino, plataforma *open-source*, baseada em fácil prototipagem eletrônica e de programação, permite o fácil e rápido desenvolvimento de protótipos. Devido a fácil disponibilidade no mercado e alto custo x benefício, pode-se fazer o uso do Arduino Uno como componente principal para o controle e aquisição de dados para a curva IxV.



Figura 10 – Exemplos de Arduinos Uno. Fonte: [arduino.cc](http://arduino.cc) .

Na Tabela 2 São Listadas as principais características encontradas no hardware do Arduino Uno.

Tabela 1 – Tabela do hardware do microcontrolador do Arduino Uno(Atmega328p)

Microcontrolador	ATmega328P
Tensão operacional	5 V
Tensão de entrada (recomendado)	7-12 V
Pinos Digital I / O	6-20 V
PWM Digital I / O Pins	6
Pinos de entrada analógica	6
Corrente DC por pino de E / S	20 mA
Corrente DC para Pin 3.3V	50 mA
Memória flash	32 KB (ATmega328P)
SRAM	2 KB (ATmega328P)
EEPROM	1 KB (ATmega328P)
Velocidade do relógio(Clock)	16 MHz
LED BUILTIN	13
comprimento	68.6 mm
Largura	53.4 mm
Peso	25 g

Fonte: Adaptado de [Arduino.cc](http://Arduino.cc).

Conforme mostrado na tabela 1, o Arduino Uno possui 6 entradas analógicas, e 6 saídas PWM.

#### 2.1.1.1 PWM

O PWM, *Pulse Width Modulation*, ou Modulação por Largura de Pulso, é uma técnica utilizada em circuitos eletrônicos para o controle de potências de cargas, fontes chaveadas, cargas eletrônicas, entre outras aplicações. Seu princípio de funcionamento baseia-se no controle do tempo em que se mantém uma onda quadrada em um nível lógico alto mantendo a mesma frequência. Fazendo uma analogia, o PWM tem seu funcionamento semelhante ao de uma chave, no qual oscila seu estado em uma frequência pré estabelecida, desta maneira, tem-se o controle do tempo em que o circuito fica com seu valor máximo de tensão e o momento em que a tensão é zero, como exemplificado na Figura 11.

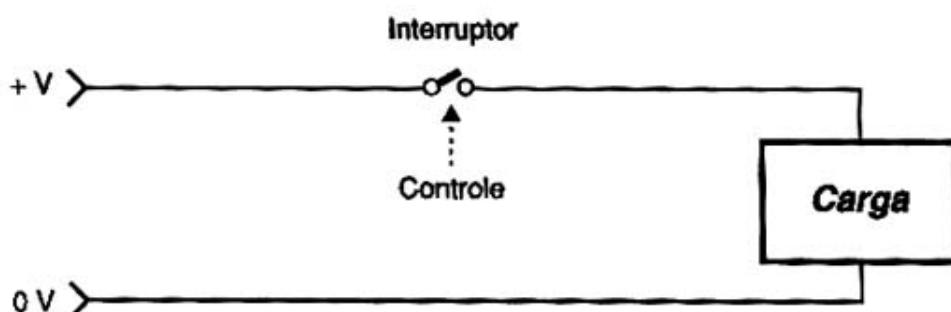


Figura 11 – Exemplo simplificado de um sistema de interruptor como chaveando a tensão sobre a carga, simulando assim o sinal PWM .Fonte:<<http://www.newtoncbraga.com.br/index.php/robotica/5169-mec071a>>

Quando a chave está aberta, tensão em cima da carga é nula, ao se fechar o interruptor, tem-se o valor máximo da tensão sobre a carga. Se alternar rapidamente o estado da chave em 50 por cento do tempo aberta e 50 por cento fechado , o circuito terá a metade do tempo com corrente e metade do tempo sem corrente, tendo assim uma potência média de 50 por cento, assim como visto na Figura 12.

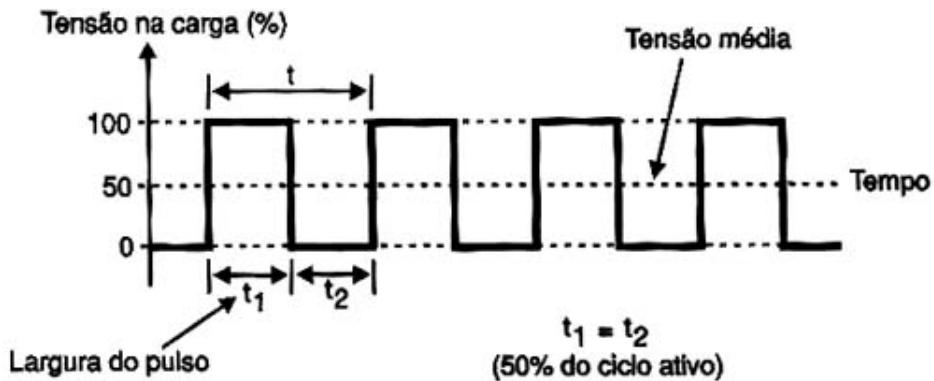


Figura 12 – Chaveamento do sinal PWM e sua tensão média. Fonte:<<http://www.newtoncbraga.com.br/index.php/robotica/5169-mec071a>>

De acordo com a Figura 13, Com o intuito de variar a potência do circuito, basta controlar o tempo em que o interruptor fica em seu nível lógico alto, ou também chamado de Ciclo Ativo.

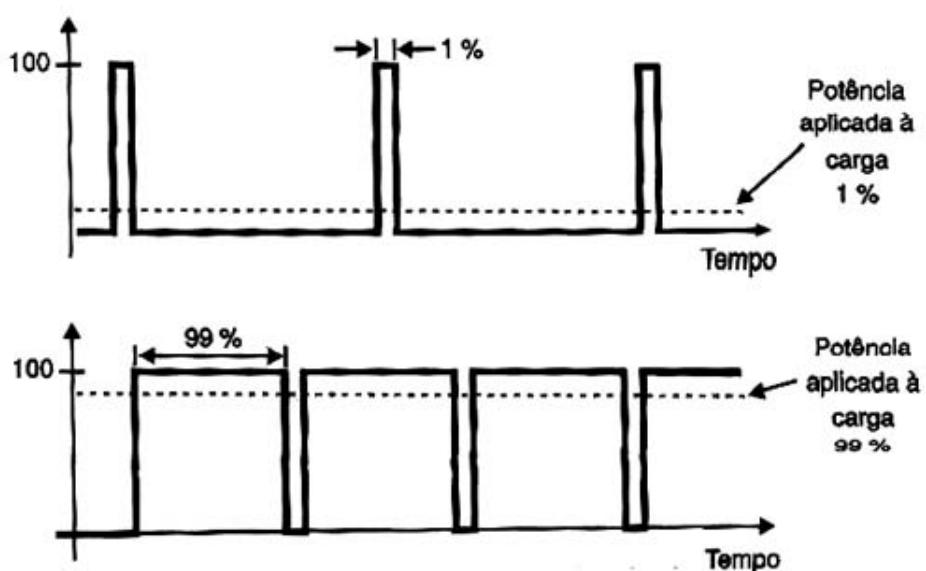


Figura 13 – Diferentes tempos de tensão alta para diferentes valores médios de tensão. Fonte: <<http://www.newtoncbraga.com.br/index.php/robotica/5169-mec071a>>

Na prática, substitui-se o interruptor por um dispositivo de estado sólido que possa ser aberto ou fechado rapidamente, um transistor bipolar ou um FET de potência, por exemplo. A este dispositivo, integra-se um circuito oscilador que possa ter seus ciclos ativos

controlado numa grande faixa de valor. Na figura 14 temos um exemplo de um circuito que faz o controle do PWM.

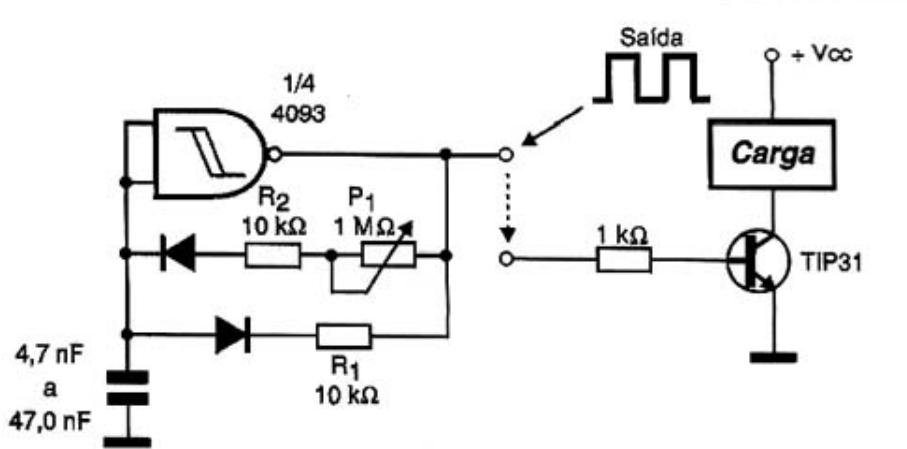


Figura 14 – Exemplo de gerador de sinal PWM. Fonte: <<http://www.newtoncbraga.com.br/index.php/robotica/5169-mec071a>>

### 2.1.1.2 ADC

ADC, ou *Analog-to-Digital Converter*, é uma tecnologia que tem como objetivo converter sinais analógicos em sinais digitais. Sinais digitais têm como característica a continuidade em nível de sinal, podendo alternar entre dois estados: 0 para nível baixo e 1 para nível alto, caracterizando assim o funcionamento ON/OFF de sistemas digitais. Sinais analógicos comportam-se de maneira mutável, variando assim o seu valor em função do tempo, podendo assumir quaisquer valores entre dois extremos predeterminados. Estas características permitem a integração entre componentes digitais como computadores e meios físicos.

### 2.1.2 ADS1115

O módulo ADS1115 da Adafruit é um módulo ADC com resolução de 16-Bits e utiliza a comunicação I2C, o uso deste módulo foi vital para a aquisição de dados.

Diferentemente dos conversores Analógico Digital integrados na placa Arduino, o módulo ADS1115 possui ótima repetibilidade e grande precisão durante a aquisição dos valores.

Há ainda a possibilidade do uso de amplificadores internos através de PGA de forma a aumentar ainda mais a precisão das medidas, como visto na figura 15.

Ao se utilizar sua resolução de 16-Bits, e ganho unitário é possível obter-se uma precisão de  $0,125 \text{ mV}$ , o qual ultrapassa grandemente o fundo de escala de  $4,9 \text{ mV}$  do ADC proveniente do Arduino.

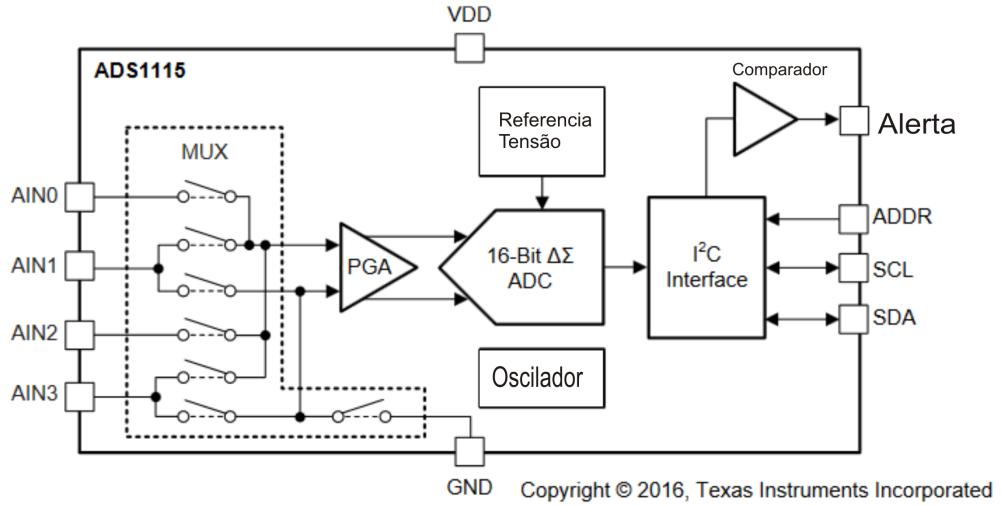


Figura 15 – Diagrama de blocos. Fonte: Datasheet do fabricante(Texas Instruments).

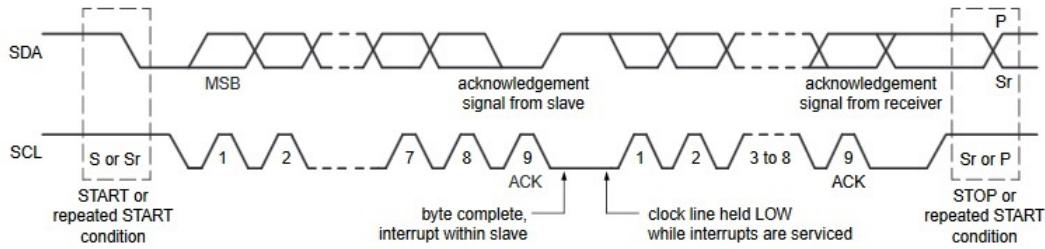
O módulo ADS1115 utiliza o barramento de comunicação I<sup>2</sup>C, o qual possui grande compatibilidade com grande parte dos microcontroladores do mercado.

#### 2.1.2.1 I<sup>2</sup>C

O barramento I<sup>2</sup>C ou IIC, *Inter-Integrated Circuit*, é um protocolo de comunicação mundialmente utilizado e implementado em mais de 1000 Circuitos Integrados diferentes. É utilizado em diferentes sistemas, desde controle inteligente, circuitos genéricos de LCD, LED, EEPROM até circuitos mais complexos como processadores de sinal de radio e vídeo. A comunicação por I<sup>2</sup>C permite uma taxa de transferência de 100kbit/s a até 3,4Mbits/s no modo *High-speed mode*, modo de alta velocidade, tendo um máximo de 127 sensores (SEMICONDUCTORS, 2000).

O I<sup>2</sup>C é um protocolo que utiliza o modelo origem/destino, mestre/escravo, o qual permite a comunicação entre múltiplos "escravos" para um ou mais "mestres". Assim como protocolos assíncronos, é utilizado apenas 2 fios para a comunicação, sendo eles SDA(*Serial Data Line*, Linha de Dados Seriais), e SCL(*Serial Clock Line*, Linha de Clock Serial), entretanto diferentemente dos protocolos assíncronos, o I<sup>2</sup>C permite a comunicação síncrona, permitindo a comunicação entre dispositivos que não necessitem ser pré-configurados para se comunicarem.

Como descreve Semiconductors (2000), o protocolo se utiliza de 8 bits de dados seguido de um bit extra de reconhecimento("ACK/NACK"). Para se iniciar a comunicação é enviado um *Start Bit*, o qual indica o inicio da troca de dados, após o envio da mensagem de 8 bits, é enviado o bit ACK e se repete o processo, até a presença de um *Stop Bit*, o qual termina a troca de informações assim como demonstrado na figura 16.



**Fig 6. Data transfer on the I<sup>2</sup>C-bus**

Figura 16 – Exemplo de comunicação utilizando o protocolo I2C. Fonte: (SEMICONDUCTORS, 2000).

### 2.1.3 Cartão SD

Em sistemas onde há a aquisição de dados, se faz útil o uso de memórias externas e portáteis, permitindo assim grande parte da memória do microcontrolador livre para outras tarefas. Um exemplo de memória externa e muito comum são os cartões *MicroSD*, em diversos modelos de como demonstrado pela figura 17, muito usados em celulares e câmeras digitais. Há possibilidade de comunicação a partir do protocolo SPI, o qual permite uma rápida comunicação em baixas distâncias.

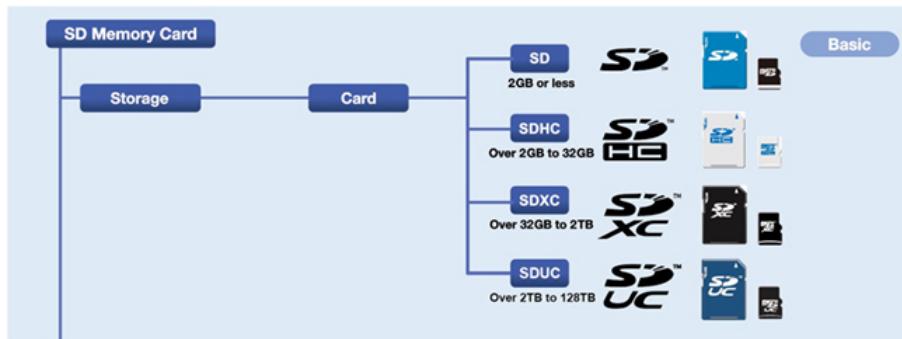


Figura 17 – Modelos de Cartão SD. Fonte: SD Association.

#### 2.1.3.1 SPI

O protocolo SPI permite a comunicação entre diferentes dispositivos, diferentemente do protocolo I2C, é necessário 4 fios para a comunicação. Além disso, o protocolo SPI possui o modo de operação *Full-duplex*, o qual permite a transmissão de dados entre mestre para escravo, e vice-versa, simultaneamente. Há também a diferença na quantidade de mestres, no protocolo SPI pode haver apenas um mestre.

As conexões para SPI possuem a seguinte característica:

- SCLK: Envia o clock a partir do mestre para o escravo.

- $SS_n$ : Utilizado para selecionar o escravo que irá se comunicar com o mestre, é necessário um SS para cada escravo utilizado no barramento
- MOSI: Envia o dado do mestre para o escravo.
- MISO: Envia o dado do escravo para o mestre.

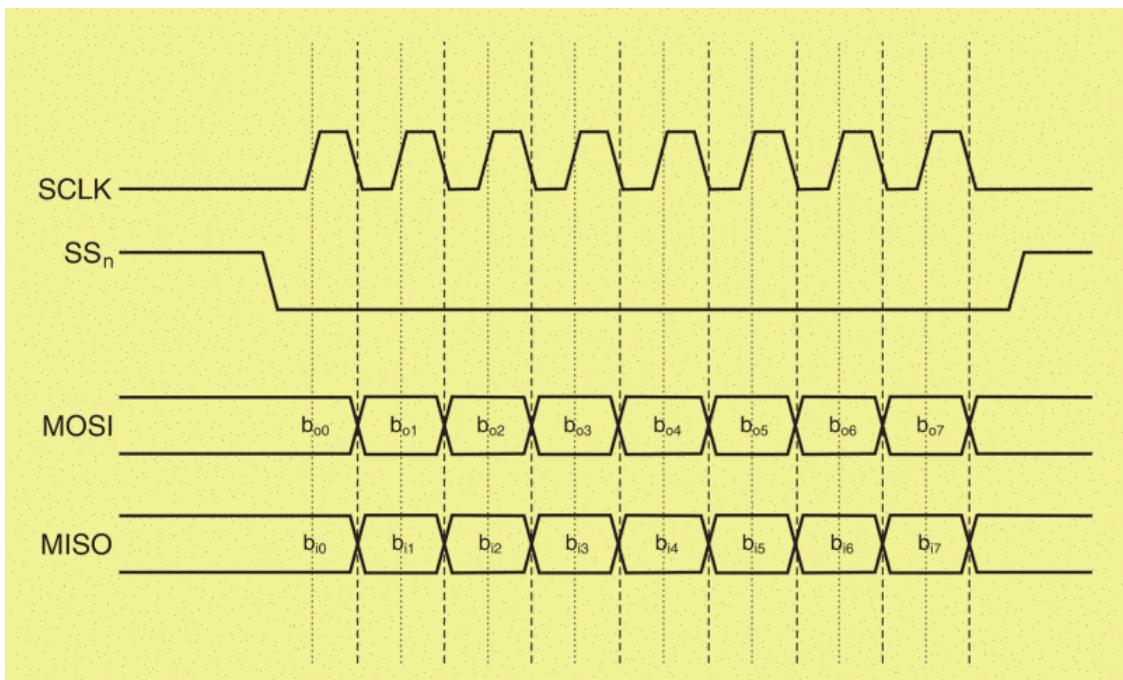


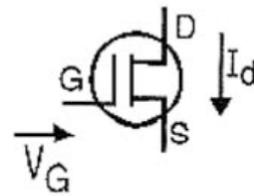
Figura 18 – Exemplo comunicação SPI.

#### 2.1.4 Carga Eletrônica

O uso da carga eletrônica tem grande importância para o funcionamento do traçador. Ao se utilizar uma carga eletrônica, é possível simular diversas cargas e subsequentemente simular diferentes valores corrente(I) e tensão(V).

##### 2.1.4.1 MOSFET

O MOSFET, *Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*, é um variante dos conhecidos como transistores de efeito de campo, visto na figura 19, entretanto em uma versão para altas potências, (BRAGA, 2016).



Transistor de efeito de campo

Figura 19 – Representação de um transistor de efeito de campo(FET). Fonte: Braga (2016).

Entre suas principais características, se faz presente o isolamento galvânico entre seu pino de *gate*, em relação aos seus pinos de Dreno e Fonte, como demonstrado na figura 20, tornando esse componente uma ótima opção para acionamento de cargas altas utilizando microcontroladores.

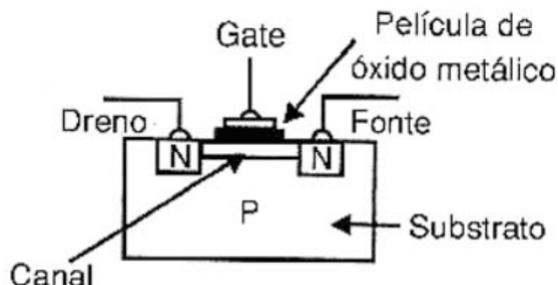
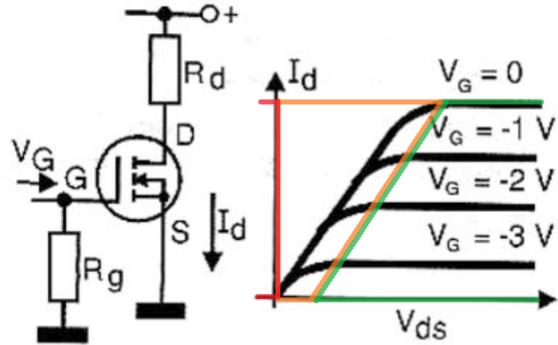


Figura 20 – Exemplo simplificado de um *MOSFET*. Fonte: Braga (2016).

Como mostra Braga (2016), para polarizar um *MOSFET* e permitir que haja a passagem de corrente entre os pinos de Dreno e Fonte, há a necessidade da presença de uma tensão no *Gate*, podendo assim apresentar 3 estados como demonstrado na figura 21: (a)chave aberta, ,(b)amplificador de corrente e (c)chave fechada.



**(a) (b) (c)**

Figura 21 – Acionamento de um *MOSFET* e seus 3 estados:(a)chave aberta, ,(b)amplificador de corrente e (c)chave fechada. Fonte: Braga (2016) adaptado.

#### 2.1.4.2 Amplificador Operacional

De acordo com Capuano (2018), as principais características de um amplificador operacional são: 1.Tensão de saída 0 volts, quando a diferença de potencial em sua entrada for de 0 volts; 2.Altas impedâncias de entrada e saída.

Como demonstrado na figura 22, o amplificador operacional tem seu pino não inversor conectado a um resistor  $R_7$ . Sendo este o responsável pela limitação da corrente da carga, (BRAGA, 2008).

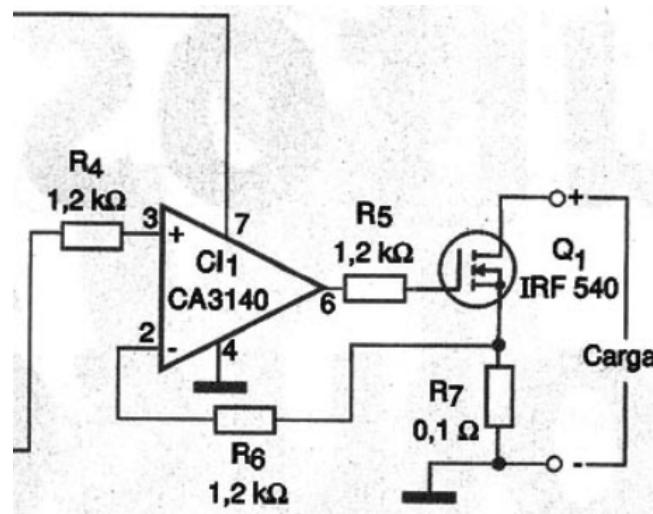


Figura 22 – Amplificador operacional no circuito de carga eletrônica. Fonte: Braga (2008) adaptado.

# 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a prototipagem do traçador I-V houve a necessidade de se seguir as seguintes etapas:

- Integração entre os componentes do protótipo sendo eles:
  - Arduino;
  - Carga eletrônica;
  - Painel solar;
  - Sensor ADS1115;
  - Cartão SD.
- Teste de precisão na coleta de dados;
- Padronização e fixação do ambiente de testes;
- Teste de do protótipo;
- Armazenamento da amostragem coletada;
- Análise e tratamento da amostra;
- Verificação e resolução de erros e/ou problemas.

## 3.0.1 Arduino

A plataforma Arduino foi utilizada de maneira centralizar o controle de todos os periféricos necessários para a prototipagem. Foi utilizado as saídas PWM, Barramento I2C e SPI.

IMAGEM que será adicionada

## 3.0.2 I2C e SPI

As comunicações I2C e SPI permitiram o uso de ferramentas não disponíveis no hardware original do Arduino, como a utilização de um ADC de 16bits ou do cartão SD para armazenamento dos dados.

Imagen SDCARDMOD

### 3.0.3 Carga Eletronica

A carga eletrônica permitiu a variação dos valores de corrente e tensão do painel, fator indispensável para a ação do traçador.

Imagen Carga eletrônica

### 3.0.4 Circuito Completo

Se observa na figura ?? como se assemelha o circuito completo do traçador de curvas I-V.

### 3.0.5 Métodos

#### 3.0.5.1 Controle de Variáveis

Durante os experimentos foram necessários atestar alguns aspectos, garantindo maior estabilidade no processo de aquisição de dados:

- Irradiância solar fixa;
- Uso de sensores Precisos

Para garantir maior veracidade e precisão na coleta de dados, foi realizado um teste com diferentes valores a serem coletados pelo sensor utilizando o ADS1115 e um multímetro de alta precisão, ao se comparar os dados do multímetro e do ADS1115, nota-se a os valores contíguos do sensor em relação ao multímetro, como observável na figura 23.

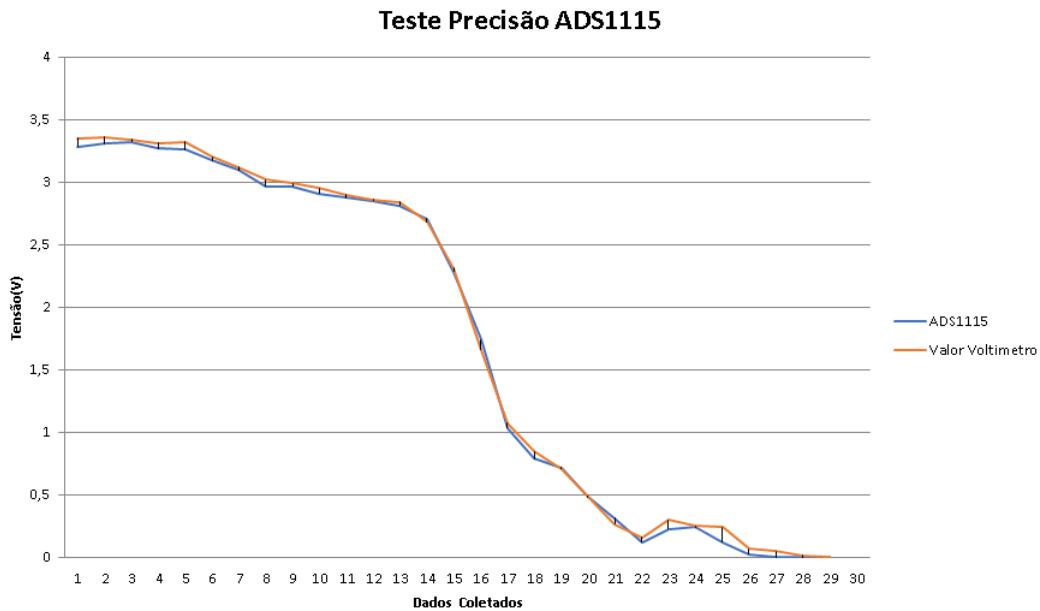


Figura 23 – Diferentes valores de tensão e comparação entre o sensor e um multímetro comercial. Fonte: Elaborado pelo Autor.

Considerando o clima e tempo instável oscilando entre dias chuvosos, nublados e alguns ensolarados, houve a necessidade de uma maneira de viabilizar os testes ainda que houvesse clima desfavorável. O engenho que permitiu tal feito foi o uso de uma lampada halogênea, que teve como papel gerar e simular a mesma irradiância que seria gerada pelo Sol em um dia sem nuvens.

Imagen Da Lampada ...

### 3.0.5.2 Comportamento do Protótipo

De maneira a torna o uso do traçador mais acessível e funcional, foram instalados LEDs que apresentam em qual parte do processo de aquisição de dados o traçador se encontra, e um LED para sinalização de erros durante a aquisição de dados, sendo suas cores:

- Amarelo;
- Branco;
- Verde 1;
- Verde 2;
- Vermelho.

Foram utilizadas diferentes combinações de LEDs para sinalizar as diferentes etapas, assim como reproduzido na tabela 2.

Tabela 2 – Combinação dos LEDs de sinalização

Combinações de Cores	Função
Vermelho	Erro durante a coleta
Amarelo,Verde1	Aguardando habilitação pelo usuário para a coleta
Verde2	Coleta de dados habilitada
Branco	Coletando de dados
Branco,Verde1,Vermelho	Finalização da coleta

**Fonte:** Elaborada pelo autor

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Texto dos resultados.

## 5 CONCLUSÕES/CONCLUSÕES PARCIAIS

Texto das conclusões (as conclusões parciais são para a graduação na qualificação).

## 6 CRONOGRAMA

Cronograma (para a graduação na qualificação)

## REFERÊNCIAS

- ALIAGA, R. et al. Experimental implementation of an electronic load for global maximum power point tracking. In: IEEE. **Power Electronics Conference (SPEC), IEEE Annual Southern**. [S.l.], 2016. p. 1–6. Citado na página 26.
- BRAGA, N. C. **Carga eletrônica**. 2008. [Online; Stand 01. November 2018]. Disponível em: <<http://www.newtoncbraga.com.br/index.php/robotica/5169-mec071a>>. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 35.
- BRAGA, N. C. **Como funciona o MOSFET**. 2016. [Online; Stand 01. November 2018]. Disponível em: <<http://www.newtoncbraga.com.br/index.php/robotica/5169-mec071a>>. Citado 4 vezes nas páginas 11, 33, 34 e 35.
- BRESSAN, M. et al. A shadow fault detection method based on the standard error analysis of i-v curves. **Renewable Energy**, v. 99, p. 1181 – 1190, 2016. ISSN 0960-1481. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148116307297>>. Citado 4 vezes nas páginas 10, 22, 23 e 24.
- CALDEIRA, K.; JAIN, A. K.; HOFFERT, M. I. Climate sensitivity uncertainty and the need for energy without co2 emission. **Science**, American Association for the Advancement of Science, v. 299, n. 5615, p. 2052–2054, 2003. Citado na página 20.
- CAPUANO, F. G. **Elementos de eletrônica digital**. [S.l.]: Editora Saraiva, 2018. Citado na página 35.
- GAO, Q. et al. A direct current-voltage measurement method for smart photovoltaic modules with submodule level power optimizers. **Solar Energy**, v. 167, p. 52 – 60, 2018. ISSN 0038-092X. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X18303141>>. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 22.
- LI, X. et al. Reduction of solar photovoltaic resources due to air pollution in china. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, National Acad Sciences, p. 201711462, 2017. Citado na página 22.
- MARTIN, L.; VLADISLAV, P.; PAVEL, K. Temperature changes of iv characteristics of photovoltaic cells as a consequence of the fermi energy level shift. **Research in Agricultural Engineering**, v. 63, n. 1, p. 10–15, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 26.
- OLIVEIRA, F. S. de; RAMPINELLI, G. A.; KRENZINGER, A. Desenvolvimento de um traçador de curvas IV para arranjos fotovoltaicos. **Revista Brasileira de Energia Solar**, v. 7, n. 2, p. 82–90, 2016. Citado 3 vezes nas páginas 10, 24 e 25.
- RIBEIRO, R. G. A. et al. Proposição de uma metodologia para análise de viabilidade econômica de uma usina fotovoltaica. **Revista Principia**, Directory of Open Access Journals, v. 1, n. 34, p. 84–92, 2017. Citado na página 22.

SCHILL, C.; BRACHMANN, S.; KOEHL, M. Impact of soiling on iv-curves and efficiency of pv-modules. **Solar Energy**, v. 112, p. 259 – 262, 2015. ISSN 0038-092X. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X1400591X>>. Citado 3 vezes nas páginas 10, 25 e 26.

SEMICONDUCTORS, P. The I2C-bus specification. **Philips Semiconductors**, v. 9397, n. 750, p. 00954, 2000. Citado 3 vezes nas páginas 10, 31 e 32.

WANDERLEY, A. C. F. **Perspectivas de inserção da energia solar fotovoltaica na geração de energia elétrica no Rio Grande do Norte**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 21.

WEITEMEYER, S. et al. Integration of renewable energy sources in future power systems: The role of storage. **Renewable Energy**, Elsevier, v. 75, p. 14–20, 2015. Citado 3 vezes nas páginas 10, 20 e 21.

WILLOUGHBY, A. A.; OSINOWO, M. O. Development of an electronic load i-v curve tracer to investigate the impact of harmattan aerosol loading on pv module performance in southwest nigeria. **Solar Energy**, v. 166, p. 171 – 180, 2018. ISSN 0038-092X. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X18302792>>. Citado 3 vezes nas páginas 10, 22 e 26.

# Apêndices

# APÊNDICE A – TÍTULO DO APÊNDICE A

Texto do apêndice A.

## APÊNDICE B – TÍTULO DO APÊNDICE B

Texto do apêndice B.

## Anexos

# ANEXO A – TÍTULO DO ANEXO A

Texto do anexo A.

## ANEXO B – TÍTULO DO ANEXO B

Texto do anexo B.