

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-
62 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, e à professora Vanessa Seriacopi pelo apoio durante a escrita do TCC.

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

Martin Fowler

SILVA, M. F.; LOPES, V. H. D. **Traçador de curva I-V para painéis fotovoltaicos.** 2019. Trabalho de conclusão de curso (Superior em Tecnologia em Automação Industrial) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, Câmpus Guarulhos, Guarulhos. 2019.

RESUMO

Após a crise hídrica de 2010, houve um aumento de investimento em pesquisa de fontes de energia limpa e renováveis, dentre elas, a fotovoltaica proveniente da irradiação solar. O trabalho apresentado, traz um instrumento de medida de baixo custo capaz de traçar a curva $I \times V$ (corrente por tensão) de um painel fotovoltaico e tem como objetivo analisar o comportamento de um painel fotovoltaico. A importância de obter essas medidas vem da necessidade de identificar possíveis problemas, defeitos e/ou anormalidades no painel. Para a elaboração deste instrumento de medida, foi utilizado uma carga eletrônica para simular a variação de resistência nos terminais do painel, e a plataforma de prototipagem Arduino com um microcontrolador Atmega328p para controle, processamento e armazenamento de dados. Após a montagem do circuito, efetuou-se diversos testes de medição solar, a fim de constatar a alteração da curva em diferentes níveis de potência de irradiação solar, analisar distorções quando parte do painel foi sombreada e medir a diminuição da potência gerada devido ao aquecimento da superfície do painel. Após os teste e a análise de dados, constatou-se a funcionalidade do projeto, tendo em foco o emprego dele na área acadêmica, impulsionando futuros pesquisadores a desenvolver tecnologias na área de geração de energia solar, e na área industrial sendo de grande importância na identificação de qualquer anormalidade tanto de circuito quanto na superfície do painel.

Palavras-chave: Fotovoltaico. Traçador. IV. Carga. Eletrônica.

SILVA, M. F.; LOPES, V. H. D. **Traçador de curva I-V para painéis fotovoltaicos.** 2019. Trabalho de conclusão de curso (Superior em Tecnologia em Automação Industrial) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, Câmpus Guarulhos, Guarulhos. 2019.

ABSTRACT

After the 2010 water crisis, there was an increase in investment in research on clean and renewable energy, among them is the photovoltaic solar energy. This paper presents a low cost measurement instrument, capable of measuring the I_xV (current per voltage) curve of a photovoltaic panel. The importance of obtaining these measures comes from the need to identify possible problems, defects and / or abnormalities on the panel. For the elaboration of this instrument of measurement, an electronic resistance was used to simulate the resistance variation in the panel terminals, Arduino prototyping platform with an Atmega328p microcontroller for control, processing and storage of data. After assembling the circuit, several solar measurement tests were carried out in order to verify the change of the curve in different levels of solar radiation power, to analyze distortions when part of the panel was shaded, and to measure the power decrease generated due to the heating of the panel surface. After testing and the data analysis, it was found that the project has functionality, focusing on its use in the academic area, encouraging new researchers to develop technologies in the area of solar energy and in the industrial area. The project has demonstrated great importance in the identification of any abnormality of both circuit and panel surface.

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 em operação segundo a ANEEL. Fonte:< http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm > (ANEEL, 2019).	22
Figura 4 – Curva IxV Característica de um painel fotovoltaico. Fonte: (GAO et al., 2018).	23
Figura 5 – Variação na temperatura de células fotovoltaicas em um arranjo em curto-circuito. 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).	26
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).	27
Figura 10 – Exemplos de Arduinos Uno. Fonte: arduino.cc	28
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 > . .	29
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 >	30
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.	33
Figura 18 – Exemplo comunicação SPI. Fonte: Leens (2009)	34
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).	35
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.	36
Figura 23 – Arduino utilizado. Fonte: Elaborado pelo Autor.	37
Figura 24 – Ligações I2C e SPI do Arduino. Fonte: Elaborado pelo Autor.	38
Figura 25 – Dispositivos I2C e SPI utilizado pelo Arduino. Fonte: Elaborado pelo Autor.	38
Figura 26 – Carga eletrônica. Fonte: Elaborado pelo Autor.	39
Figura 27 – Lâmpada de 500W utilizada. Fonte: Elaborado pelo Autor.	39
Figura 28 – Circuito eletrônico completo. Fonte: Elaborado pelo Autor.	40
Figura 29 – Circuito eletrônico, foco nos componentes mais próximos ao Arduino. Fonte: Elaborado pelo Autor utilizando a biblioteca <i>Arduino Library for Proteus</i> disponível em < https://www.theengineeringprojects.com/2015/12/arduino-library-proteus-simulation.html >.	41
Figura 30 – Circuito eletrônico, foco nas conexões com o módulo. Fonte: Elaborado pelo Autor.	42
Figura 31 – Circuito eletrônico, foco na carga eletrônica. Fonte: Elaborado pelo Autor.	42
Figura 32 – Circuito eletrônico, foco no conjunto de LEDs. Fonte: Elaborado pelo Autor.	43
Figura 33 – 30 diferentes valores de tensão e comparação entre o sensor e um multímetro comercial. Fonte: Elaborado pelo Autor.	44
Figura 34 – Lâmpada utilizada. Fonte: Elaborado pelo Autor.	44
Figura 35 – Curva inicial utilizando o conversor AD interno do Arduino e um sinal de PWM com uma resolução de 255 pontos diferentes. Fonte: Elaborado pelo Autor.	46
Figura 36 – Curva IV deformada utilizando ADS1115 e PWM com resolução de 14 bits . Fonte: Elaborado pelo Autor.	47
Figura 37 – Curva IV com diferente resistências em série. Fonte: (PINHO, 2004).	47
Figura 38 – Imagem durante a leitura. Fonte: Elaborado pelo Autor.	48

Figura 39 – Curva IV com poucos pontos entre 5000 mV e 15000 mV. Fonte: Elaborado pelo Autor.	48
Figura 40 – Curva IV deformada devido ao capacitor utilizado. Fonte: Elaborado pelo Autor.	49
Figura 41 – Curva IV final. Fonte: Elaborado pelo Autor.	49
Figura 42 – Valores de Corrente de curto-circuito do painel em relação a irradiação. Fonte: Elaborado pelo Autor.	50
Figura 43 – Valor dado no solarímetro durante os testes iniciais e o teste final. Fonte: Elaborado pelo Autor.	51
Figura 44 – Valores de corrente esperados. Fonte: Elaborado pelo Autor.	51
Figura 45 – Valores de corrente quando comparado com os coletados pelo traçador. Fonte: Elaborado pelo Autor.	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tabela do hardware do microcontrolador do Arduino Uno(Atmega328p)	28
Tabela 2 – Combinação dos LEDs de sinalização	45

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

1D	Uma dimensão
2D	Duas dimensões
3D	Três dimensões
RS	Resistor Shunt
LED	<i>Light-Emitting Diode</i> , Diodo Emissor de Luz

LISTA DE SÍMBOLOS

α Letra grega minúscula Alfa

β Letra grega minúscula Beta

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	Justificativa	18
1.2	Objetivos	19
1.2.1	Objetivo Geral	19
1.2.2	Objetivos Específicos	19
1.3	Metodologia	19
2	REVISÃO DA LITERATURA	20
2.1	Componentes	27
2.1.1	Arduino	27
2.1.1.1	PWM	29
2.1.1.2	ADC	30
2.1.2	ADS1115	31
2.1.2.1	I2C	31
2.1.3	Cartão SD	32
2.1.3.1	SPI	33
2.1.4	Carga Eletrônica	34
2.1.4.1	MOSFET	34
2.1.4.2	Amplificador Operacional	35
3	MATERIAIS E MÉTODOS	37
3.1	Arduino	37
3.1.1	I2C e SPI	38
3.2	Carga Eletrônica	38
3.3	Lâmpada Halógena	39
3.4	Circuito Completo	40
3.4.1	Conexões com o Arduino	41
3.4.2	Conexões Módulos	41
3.4.3	Carga Eletrônica	42
3.4.4	Conjunto de LEDs	43
3.5	Controle de Variáveis	43
3.5.1	Comportamento do Protótipo	44
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
5	CONCLUSÕES	53

REFERÊNCIAS	54
APÊNDICES	56
APÊNDICE A – CIRCUITO COMPLETO	58
APÊNDICE B – TÍTULO DO APÊNDICE B	59
ANEXOS	60
ANEXO A – DATASHEET ADS1115	61
ANEXO B – TÍTULO DO ANEXO B	62

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 algumas tecnologias que permitam uma geração eficiente, como o uso MPPT, *Maximum Power Point Tracker*, ou Rastreador de Máxima Potência, de forma a garantir que seja extraída a maior potência do sistema fotovoltaico.

Tendo este aspecto em mente, este trabalho tem como premissa 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 módulo ou painel em análise.

1.1 JUSTIFICATIVA

No Brasil, cerca de 90,9% da geração de energia total foram por meio de energias renováveis, sendo a matriz hidráulica se mantém dominante com 81,0%, e tendo 8,2% as usinas eólicas e 0,6% as solares, em janeiro de 2019 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 painéis fotovoltaicos;

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. Comparações 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 IS92, ao final do século XXI a maior parte da geração de energia deverá ser estritamente de fontes não emissoras de CO_2 .

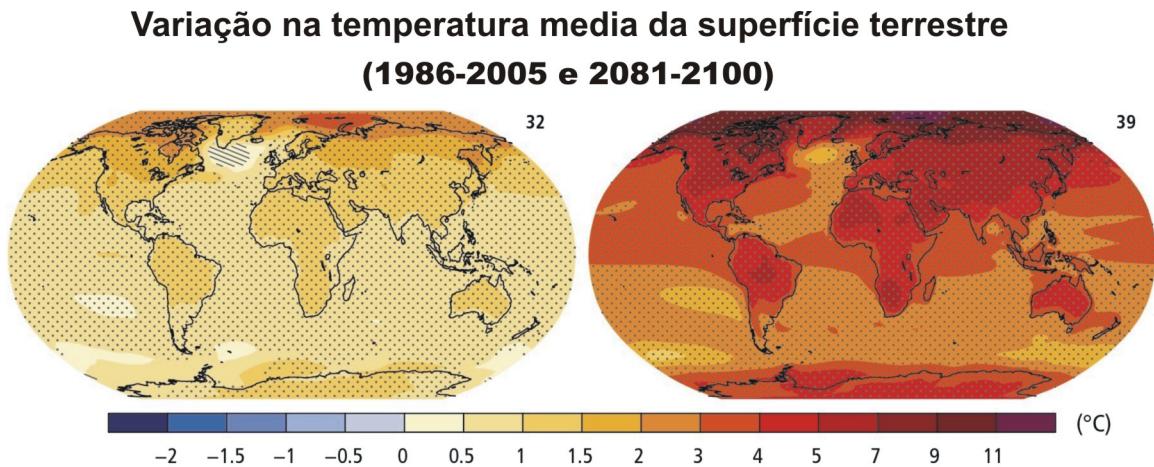


Figura 1 – Variação na temperatura geral da superfície da Terra durante os anos de 1986-2005 para 2081-2100. Fonte: IPCC(2003).

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.

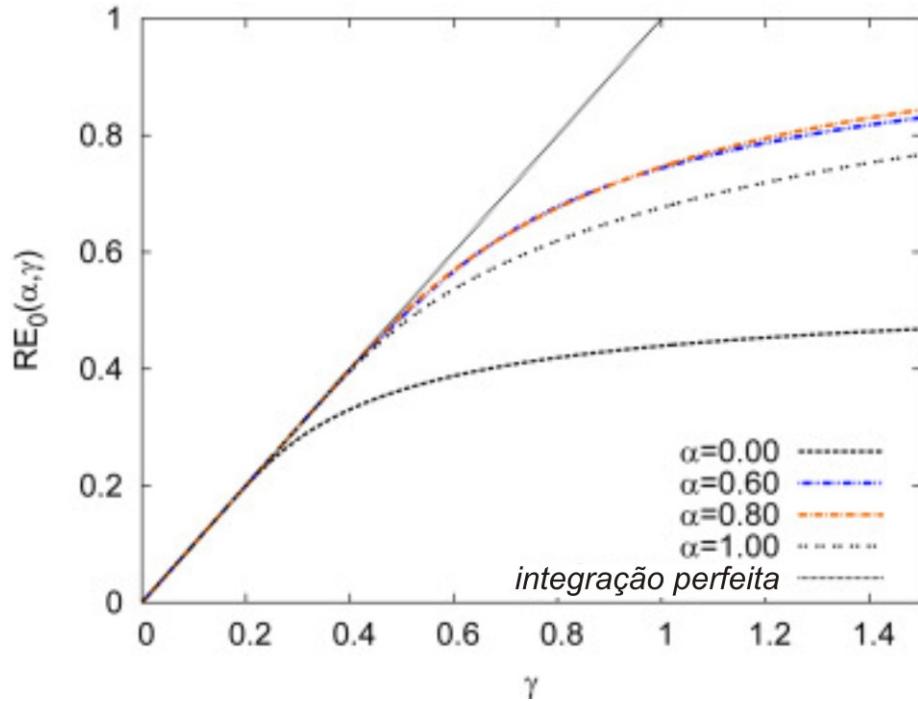


Figura 2 – Simulação do uso de energias renováveis na Alemanha, utilizando-se diferentes ponderações na divisão entre fontes de geração solar e eólica. Fonte: Weitemeyer et al. (2015)

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 64% de sua produção, e 0,1% através das undelétricas(Geração através das ondas do mar) de acordo com Banco de Informações da ANEEL 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.

CAPACIDADE DE GERAÇÃO DO BRASIL - POTÊNCIA FISCALIZADA

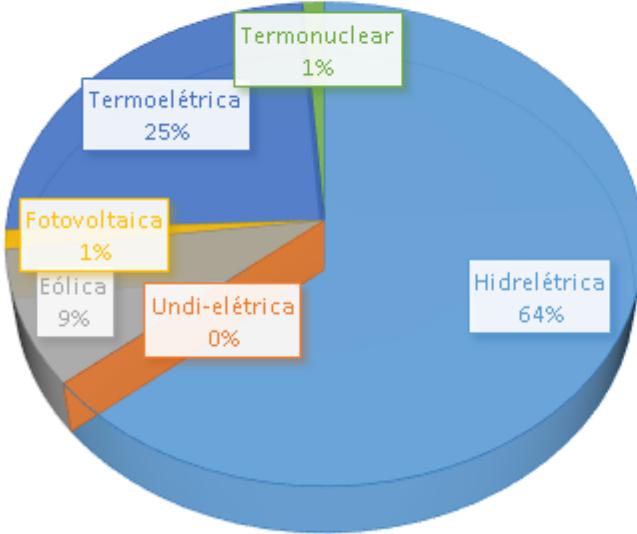


Figura 3 – Distribuição da matriz energética em operação segundo a ANEEL.

Fonte:<<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>> (ANEEL, 2019).

O grande impasse para a construção de usinas solares é o alto custo para sua construção 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 $4.000 MWh$ ao ano, seria necessário um investimento de aproximadamente $R\$22.000.000,00$ ou seja, $7,30 R\$/Wp$; no artigo citado, foram considerados 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 melhoria da potência entregue pelos painéis através no melhoramento da curva 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).

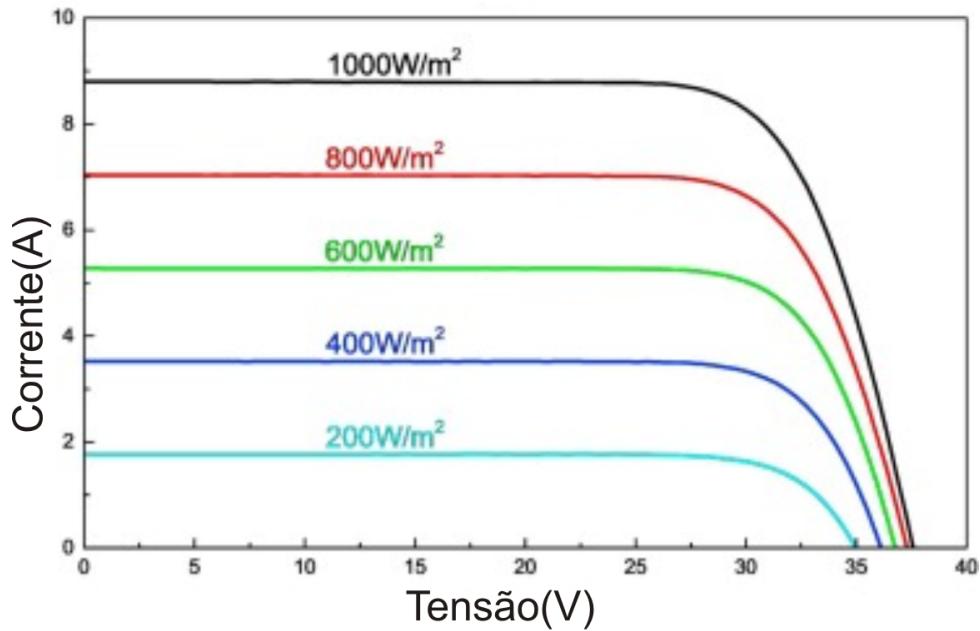


Figura 4 – Curva IxV Característica de um painel fotovoltaico. Fonte: (GAO et al., 2018).

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 modificará sua inclinação de modo a estar sempre perpendicular a incidência dos raios solares, tendo assim uma eficiência 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 composta 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 GWp 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 $1,5 \text{ kWh/m}^2$ 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.

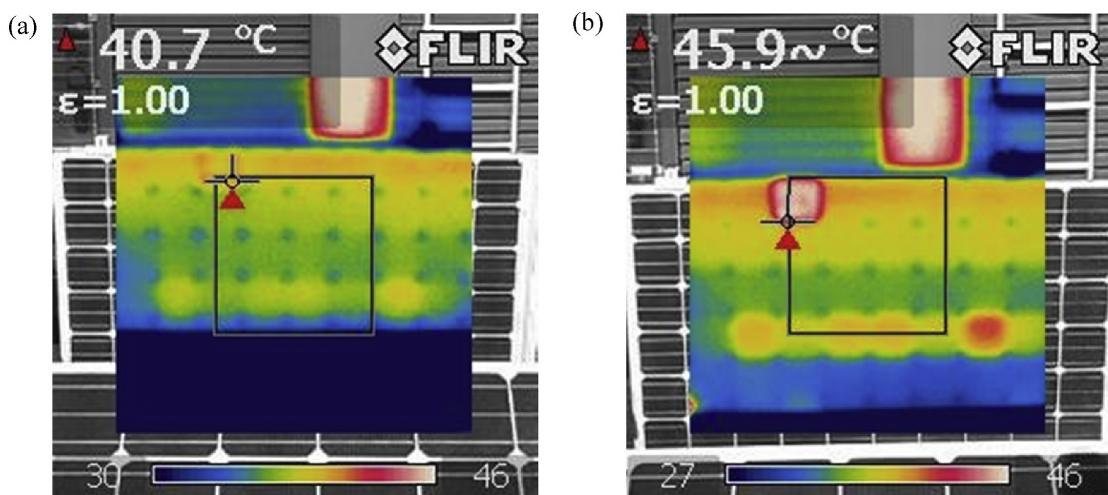


Figura 5 – Variação na temperatura de células fotovoltaicas em um arranjo em curto-círcuito. Fonte: Bressan et al. (2016)

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.

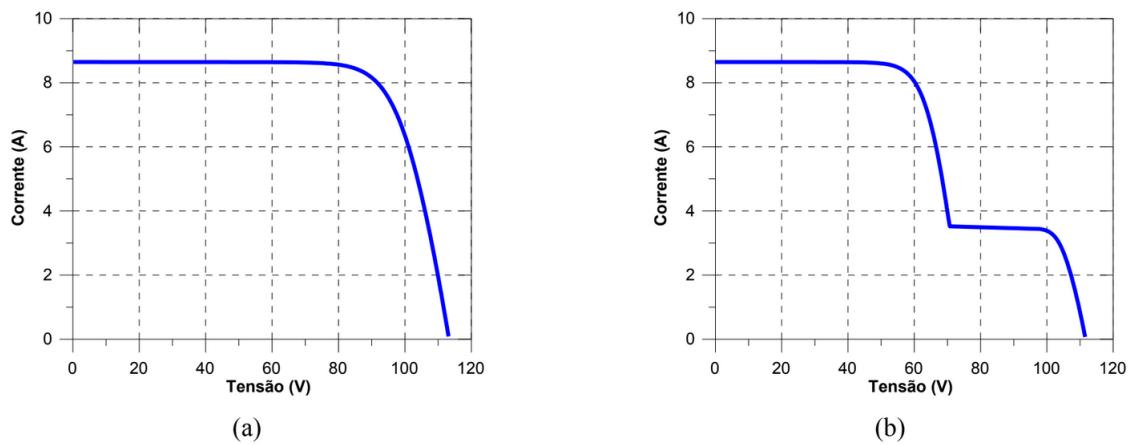


Figura 6 – Curva característica de um sistema composto por 3 módulos de 245 W: (a) módulos sobre uma mesma irradiação com funcionamento pleno; (b) ao sombrear mais de 50% de sua área, há uma grande diferença em sua curva característica. Fonte: Oliveira, Rampinelli e Krenzinger (2016)

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 verificada e monitorada 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.

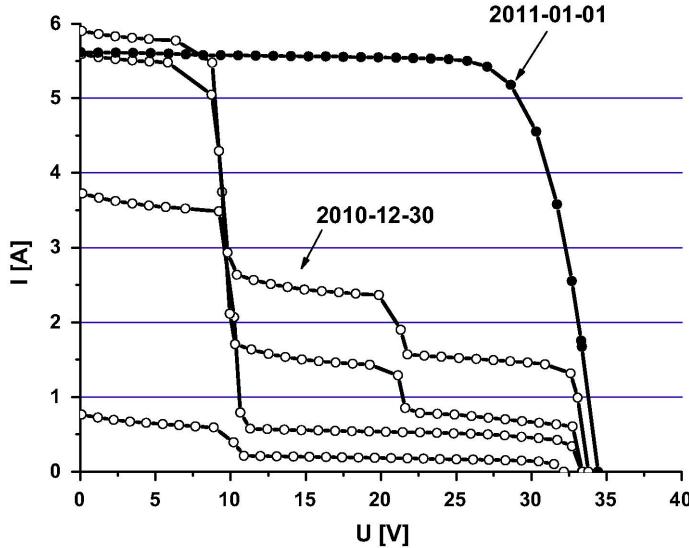


Figura 7 – Curva característica I-V de painéis fotovoltaicos sobre influência de neve, a qual foi removida no dia 01/01. Fonte: Schill, Brachmann e Koehl (2015).

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

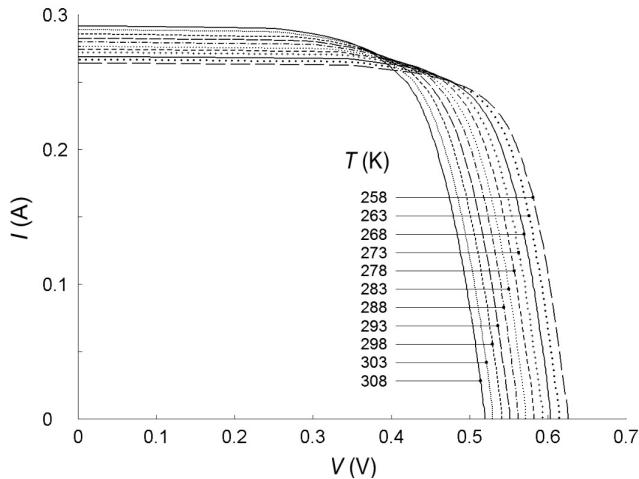


Figura 8 – Curva característica I-V de painéis fotovoltaicos sobre diferentes temperaturas. Fonte: Martin, Vladislav e Pavel (2017).

Assim como apontado por Schill, Brachmann e Koehl (2015), uma das formas para a obtenção 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 detectar a diferença de geração devido a meios

externos como nuvens ou variações climáticas, (WILLOUGHBY; OSINOWO, 2018).

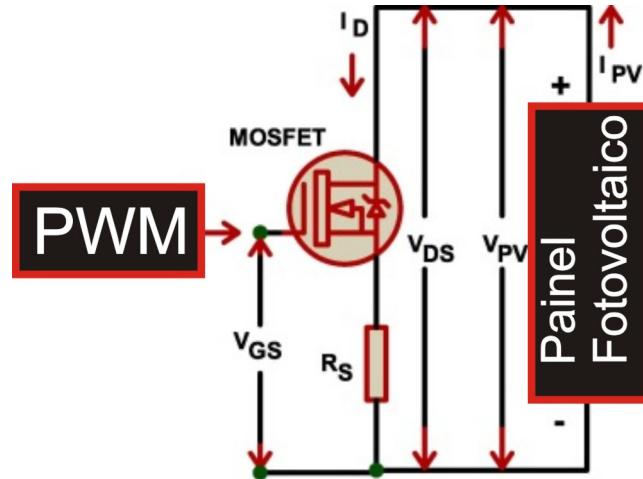


Figura 9 – Uso de MOSFET como carga eletrônica para uso em painéis fotovoltaicos.

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 .

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 chaveia 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.

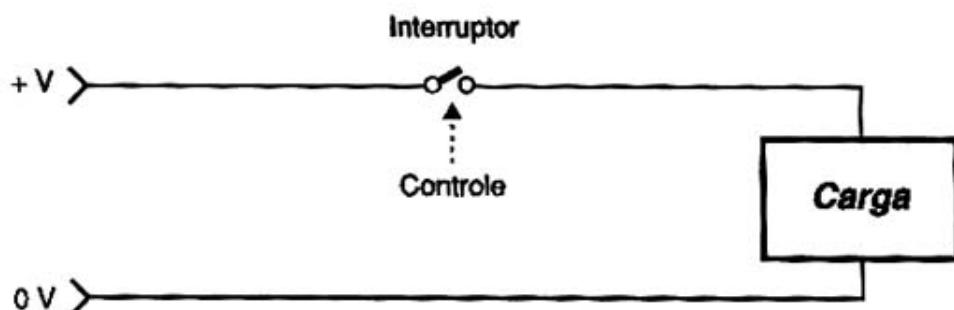


Figura 11 – Exemplo simplificado de um sistema de interruptor como chaveando a tensão sobre a carga, simulando assim o sinal PWM .Fonte:<<http://www.newtoncbraga.com.br/index.php/robotica/5169-mec071a>>

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 tensão e metade do tempo sem tensão, tendo assim uma tensão média de 50 por cento da nominal, assim como visto na Figura 12.

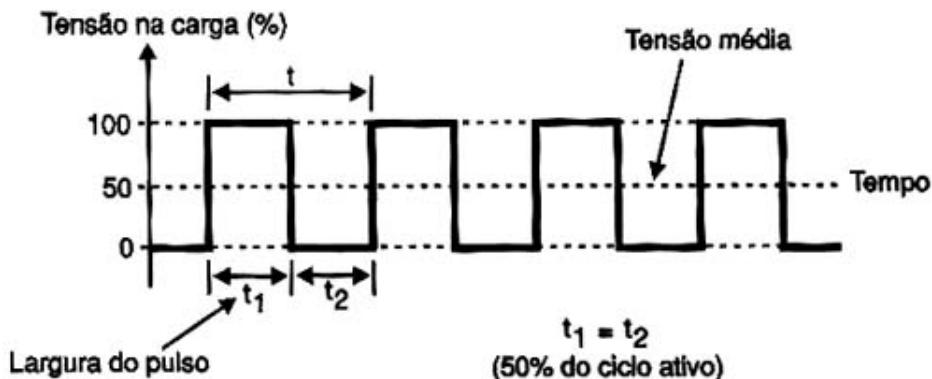


Figura 12 – Chaveamento do sinal PWM e sua tensão média. Fonte:<<http://www.newtoncbraga.com.br/index.php/robotica/5169-mec071a>>

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.

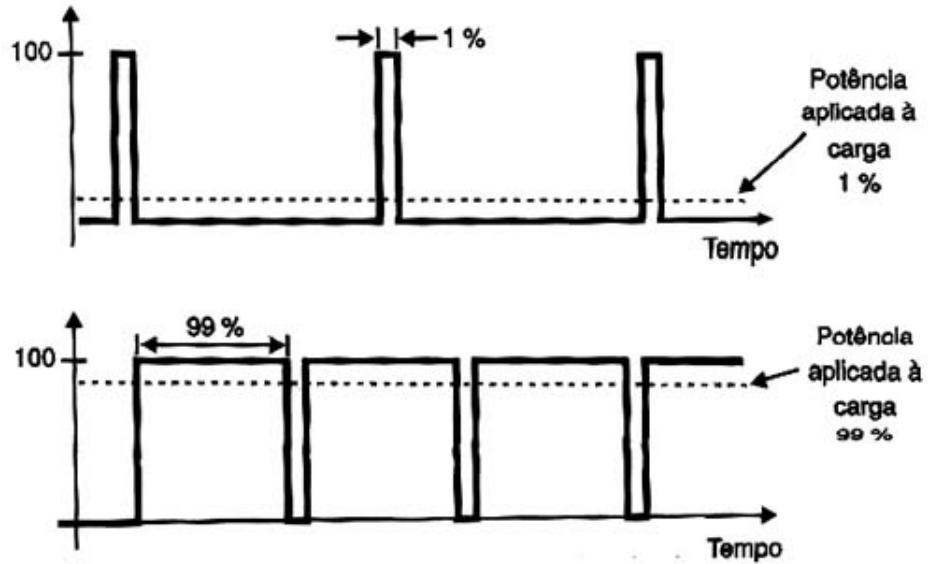


Figura 13 – Diferentes tempos de tensão alta para diferentes valores médios de tensão. Fonte: <<http://www.newtoncbraga.com.br/index.php/robotica/5169-mec071a>>

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 tem-se um exemplo de um circuito que faz o controle do PWM.

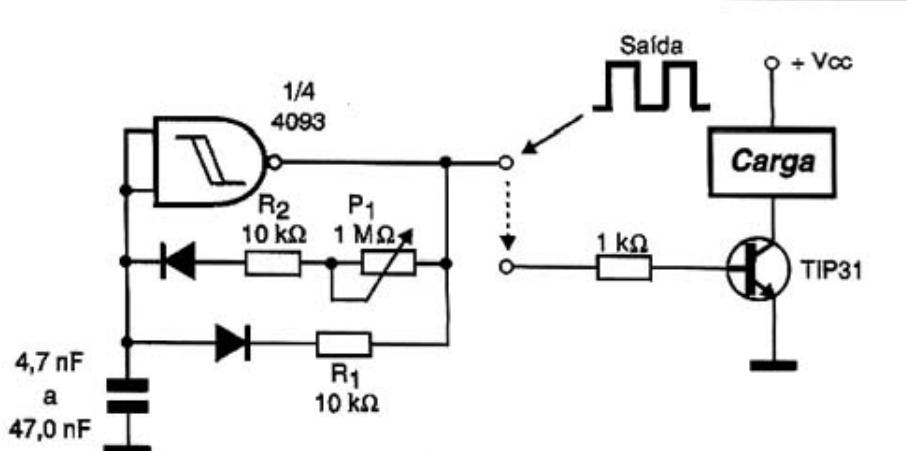


Figura 14 – Exemplo de gerador de sinal PWM. Fonte: <<http://www.newtoncbraga.com.br/index.php/robotica/5169-mec071a>>

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 (CAPUANO, 2018).

2.1.2 ADS1115

O módulo ADS1115 da Adafruit é um módulo ADC com resolução de 16-Bits e utiliza a comunicação I2C. 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 o fundo de escala de $4,9 \text{ mV}$ do ADC proveniente do Arduino.

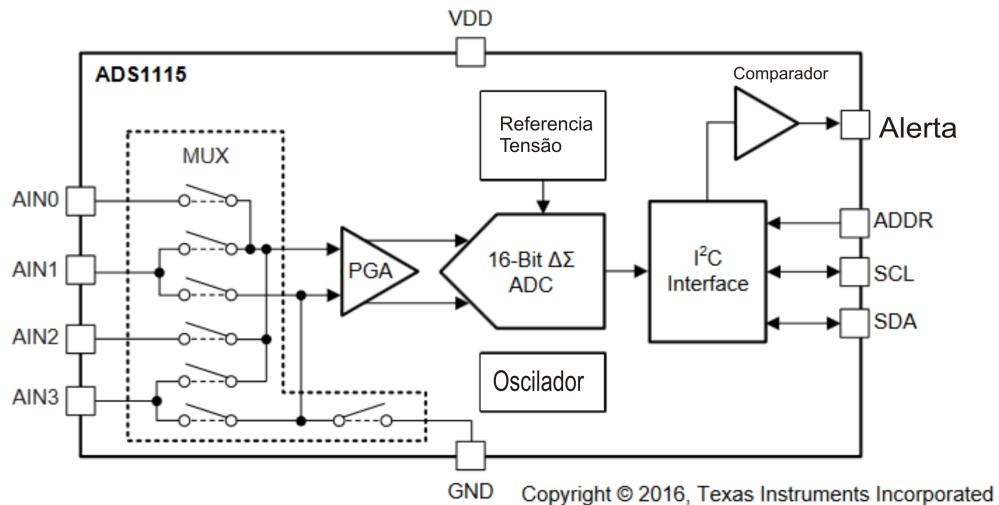


Figura 15 – Diagrama de blocos. Fonte: Datasheet do fabricante(Texas Instruments).

O módulo ADS1115 utiliza o barramento de comunicação I2C, o qual possui grande compatibilidade com grande parte dos microcontroladores do mercado.

2.1.2.1 I2C

O barramento I2C ou IIC, forma pela qual o módulo ADS1115 se comunica com o protótipo, *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 rádio e vídeo. A comunicação por I2C permite uma taxa de transferência de 100kbit/s a até $3,4\text{Mbits/s}$ no modo *High-speed mode*, modo de alta velocidade, tendo um máximo de 127 sensores (SEMICONDUCTORS, 2000).

O I2C 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 I2C 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.

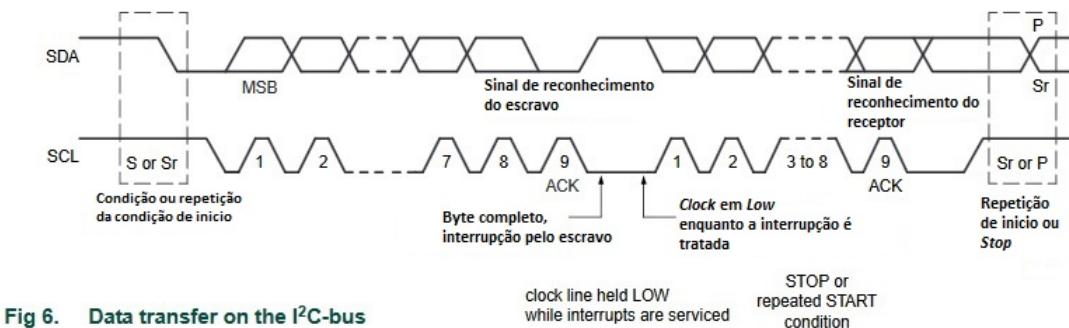


Fig 6. Data transfer on the I²C-bus

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 liberar 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.

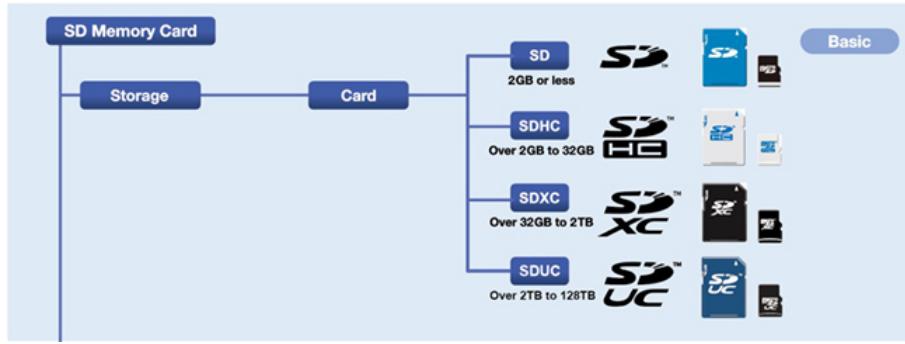


Figura 17 – Modelos de Cartão SD. Fonte: SD Association.

2.1.3.1 SPI

O protocolo SPI, utilizado pelo cartão SD, 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 do mestre para o 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.

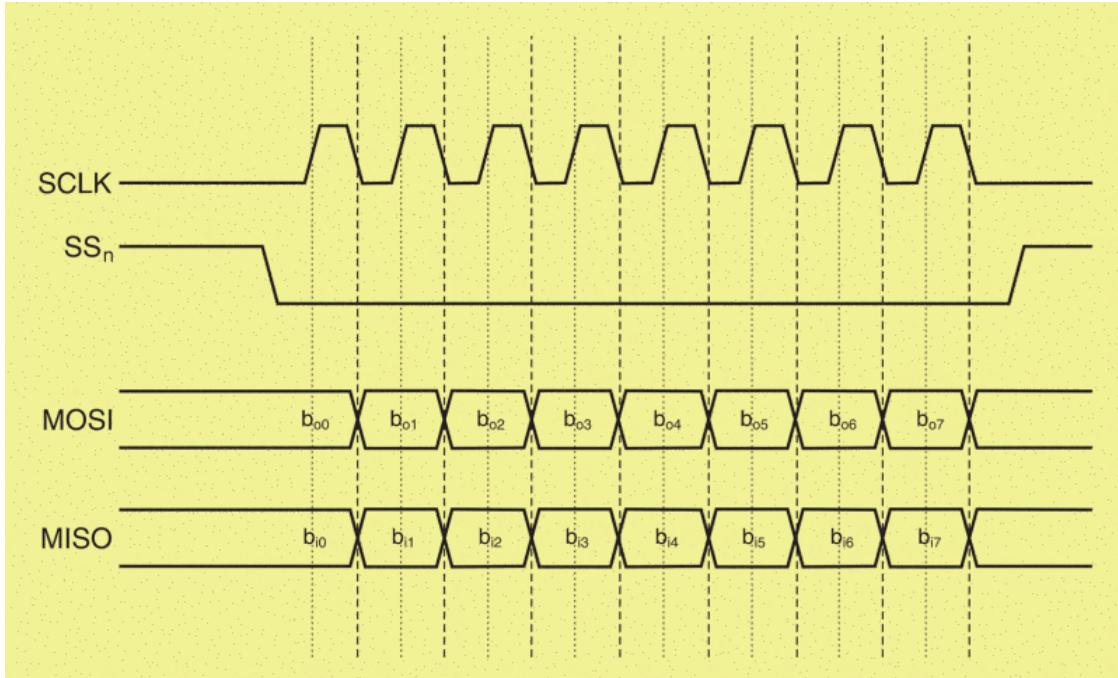


Figura 18 – Exemplo comunicação SPI. Fonte: Leens (2009)

2.1.4 Carga Eletrônica

O uso da carga eletrônica tem grande importância para o funcionamento do traçador de curva I-V. Ao se utilizar uma carga eletrônica, é possível simular diversas cargas e dessa forma, obter o par correspondente à corrente e tensão para cada valor de carga.

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).

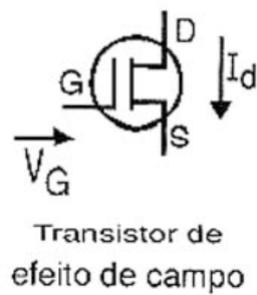


Figura 19 – Representação de um transistor de efeito de campo(FET). Fonte: Braga (2016).

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 mostrado na figura 20,

tornando esse componente uma ótima opção para acionamento de cargas altas utilizando microcontroladores.

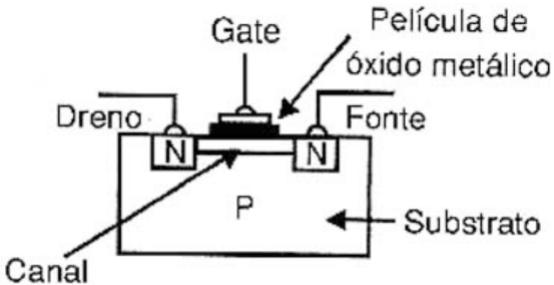


Figura 20 – Exemplo simplificado de um *MOSFET*. Fonte: Braga (2016).

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.

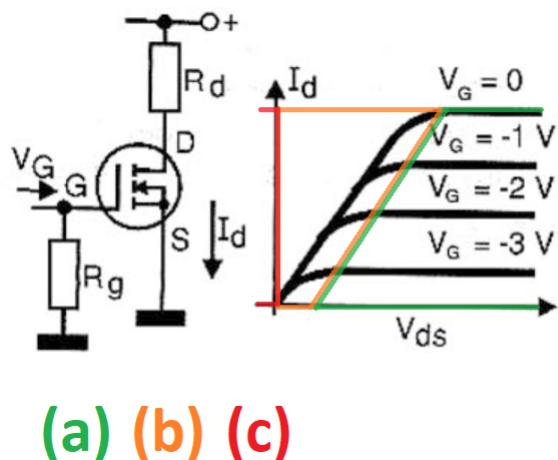


Figura 21 – Acionamento de um *MOSFET* e seus 3 estados:(a)chave aberta, (b)amplificador de corrente e (c)chave fechada. Fonte: Braga (2016) adaptado.

2.1.4.2 Amplificador Operacional

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

Como mostrado na figura 22, o amplificador operacional tem seu pino não inversor conectado a um resistor R7. Sendo este o responsável pela limitação da corrente da carga, (BRAGA, 2008).

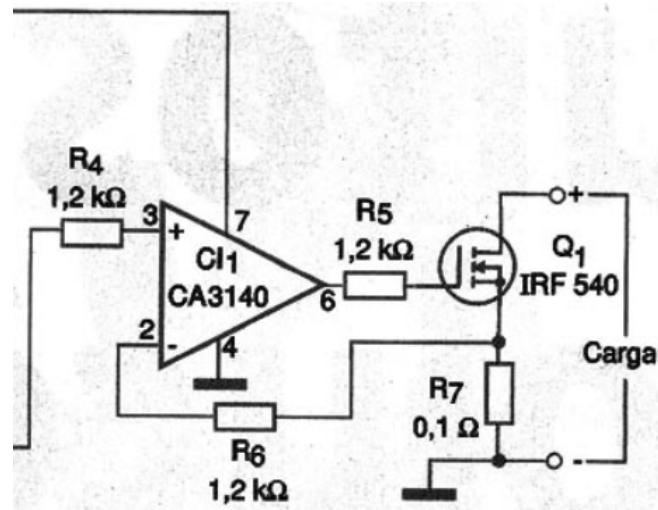


Figura 22 – Amplificador operacional no circuito de carga eletrônica. Fonte: Braga (2008) adaptado.

Utilizando o amplificador operacional é possível fazer com que a corrente da carga seja alterada utilizando uma tensão como referência.

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 do protótipo;
- Armazenamento da amostragem coletada;
- Análise e tratamento da amostra;
- Verificação e resolução de erros e/ou problemas.

3.1 ARDUINO

A plataforma Arduino, figura 23, foi utilizada de maneira centralizar o controle de todos os periféricos necessários para a prototipagem. Foi utilizado as saídas PWM, Barramento I2C e SPI.



Figura 23 – Arduino utilizado. Fonte: Elaborado pelo Autor.

3.1.1 I2C e SPI

As comunicações I2C e SPI, figura 24, permitiram o uso de ferramentas não disponíveis no hardware original do Arduino, como a utilização de um ADC de 16 bits ou do cartão SD para armazenamento dos dados, figura 25.

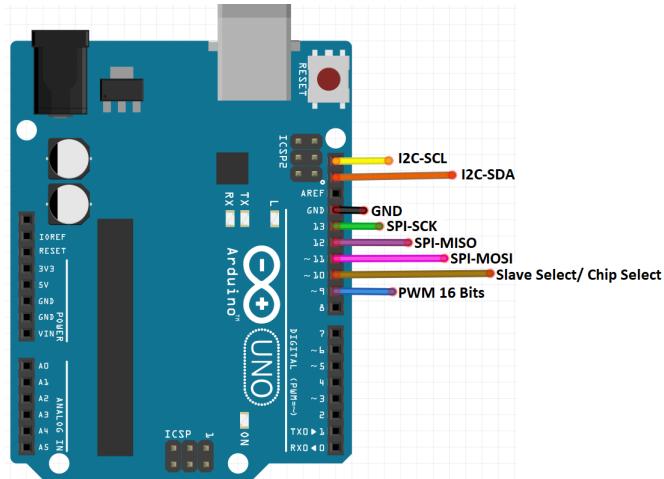


Figura 24 – Ligações I2C e SPI do Arduino. Fonte: Elaborado pelo Autor.

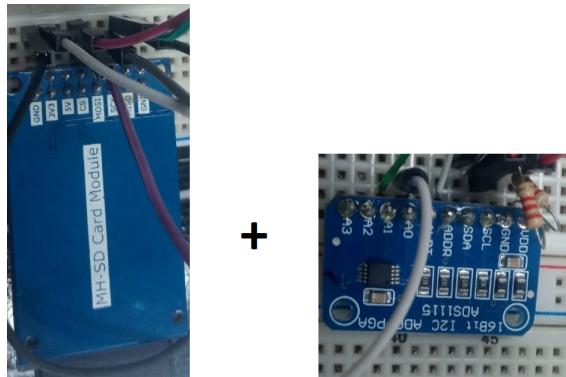


Figura 25 – Dispositivos I2C e SPI utilizado pelo Arduino. Fonte: Elaborado pelo Autor.

3.2 CARGA ELETRÔNICA

A carga eletrônica, figura 26, permitiu a variação dos valores de corrente e tensão do painel, fator indispensável para a ação do traçador.

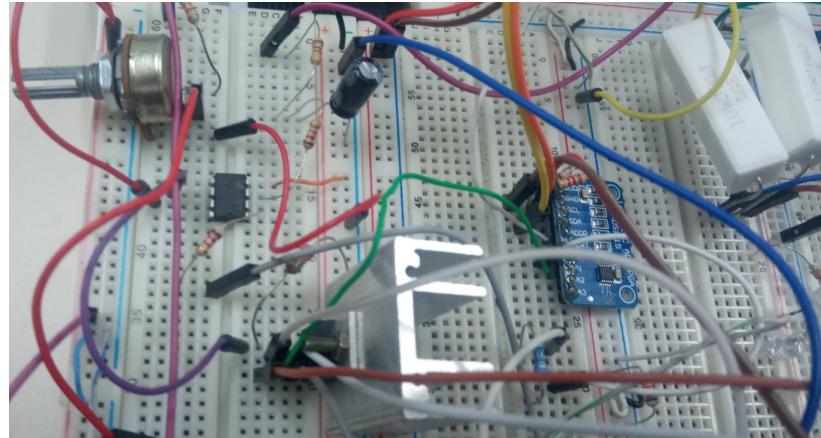


Figura 26 – Carga eletrônica. Fonte: Elaborado pelo Autor.

3.3 LÂMPADA HALÓGENA

Houve o uso da lâmpada halógena de 500W, o qual simulou a luz solar, figura 27, para permitir a realização dos experimentos em dias com pouca insolação.

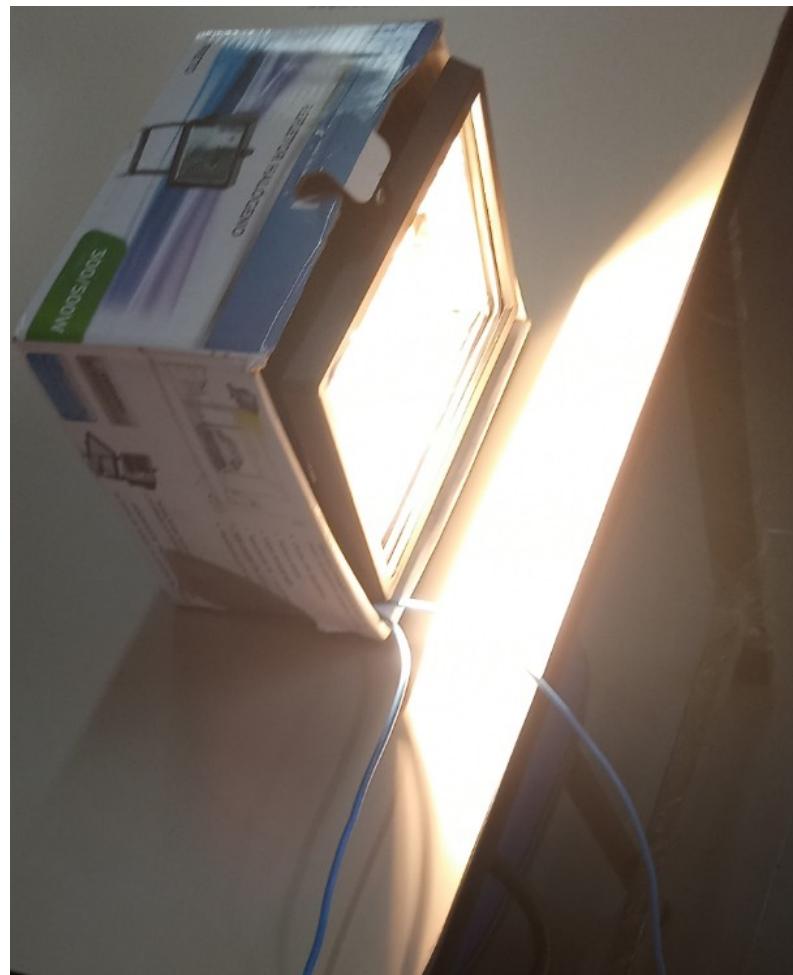


Figura 27 – Lâmpada de 500W utilizada. Fonte: Elaborado pelo Autor.

3.4 CIRCUITO COMPLETO

Se observa na figura 28, assim como no apêndice A, como se assemelha o circuito eletrônico completo do traçador de curvas I-V.

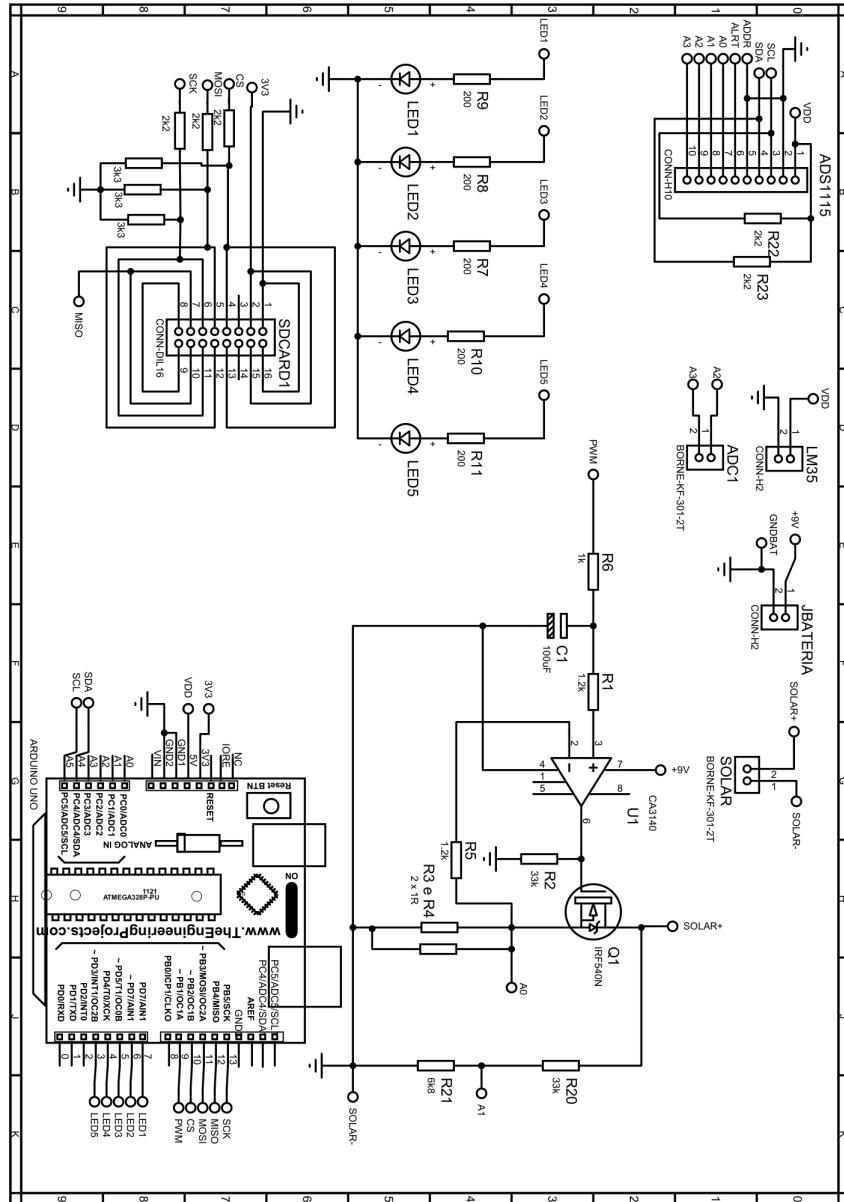


Figura 28 – Circuito eletrônico completo. Fonte: Elaborado pelo Autor.

O circuito poder se dividido em:

1. Conexões com o Arduino;
2. Conexões Módulos;
3. Carga Eletrônica;

4. LEDs para sinalização.

3.4.1 Conexões com o Arduino

A primeira parte do circuito, figura 29, as entradas e saídas disposta pelo Arduino e utilizadas para os acionamentos e sensoriamentos.

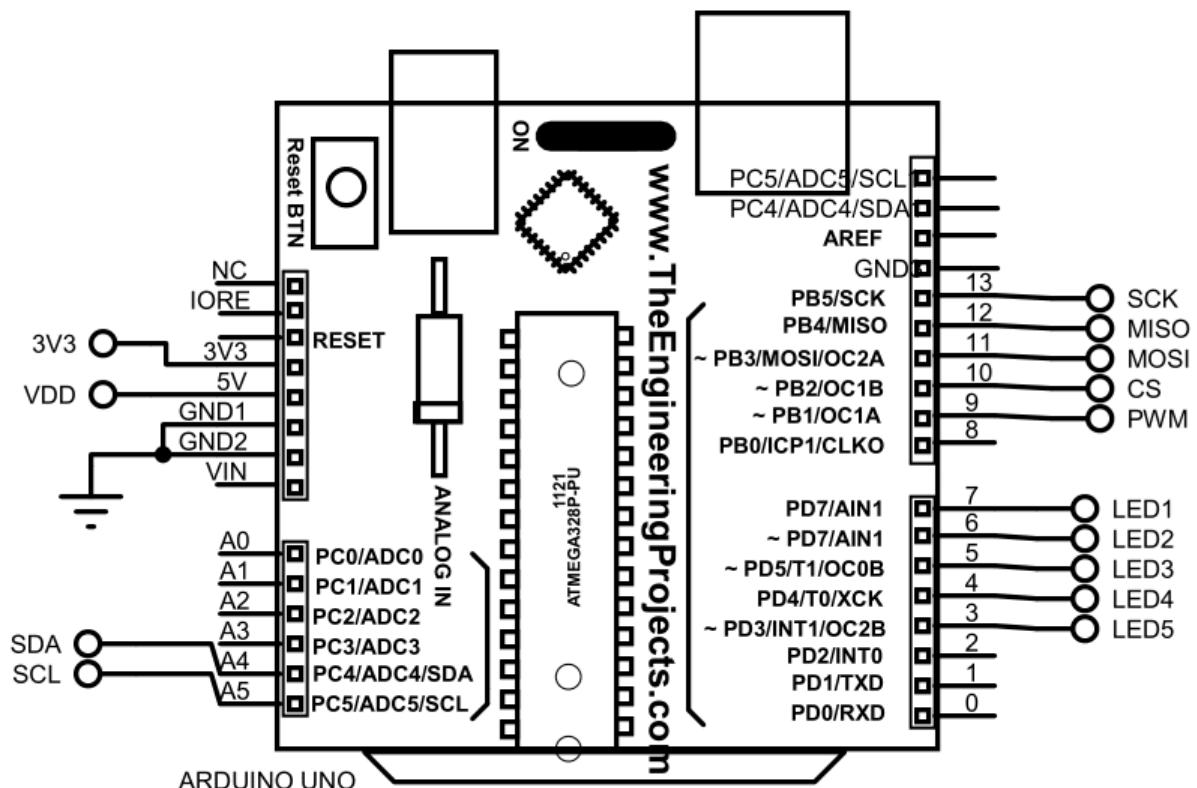


Figura 29 – Circuito eletrônico, foco nos componentes mais próximos ao Arduino.

Fonte: Elaborado pelo Autor utilizando a biblioteca *Arduino Library for Proteus* disponível em <<https://www.theengineeringprojects.com/2015/12/arduino-library-proteus-simulation.html>>.

Na figura 29 se observa as conexões de alimentação dos módulos, os pinos das conexões de diferentes redes, sendo elas I₂C e SPI. Há também os pinos conectados aos LEDs e ao botão que inicia o processo.

3.4.2 Conexões Módulos

A segunda parte do circuito, figura 30, diz respeito aos conectores que serão utilizados para os módulos auxiliares para o processo da carga eletrônica.

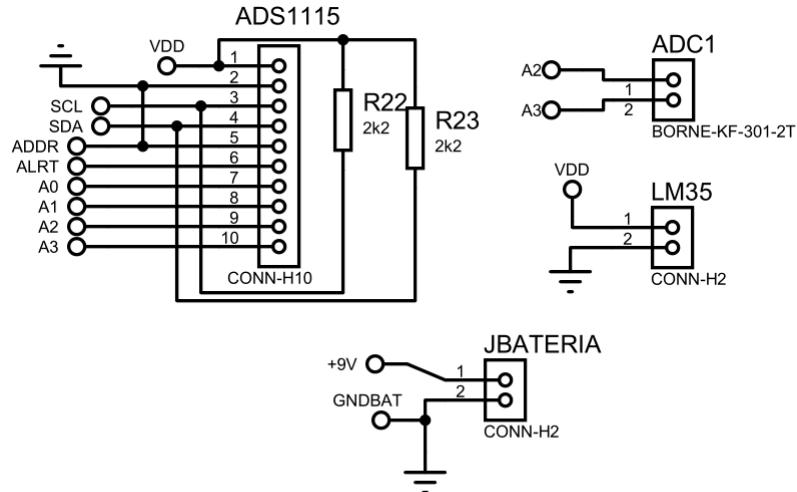


Figura 30 – Circuito eletrônico, foco nas conexões com o módulo. Fonte: Elaborado pelo Autor.

Na figura 30 se observa as conexões para os módulos, Cartão SD e ADS1115, além de conexões auxiliares para a o LM35, sensor de temperatura e para os sinais de entrada do módulo ADS1115.

3.4.3 Carga Eletrônica

A terceira parte do circuito, figura 31, a carga eletrônica, principal circuito para o funcionamento do protótipo.

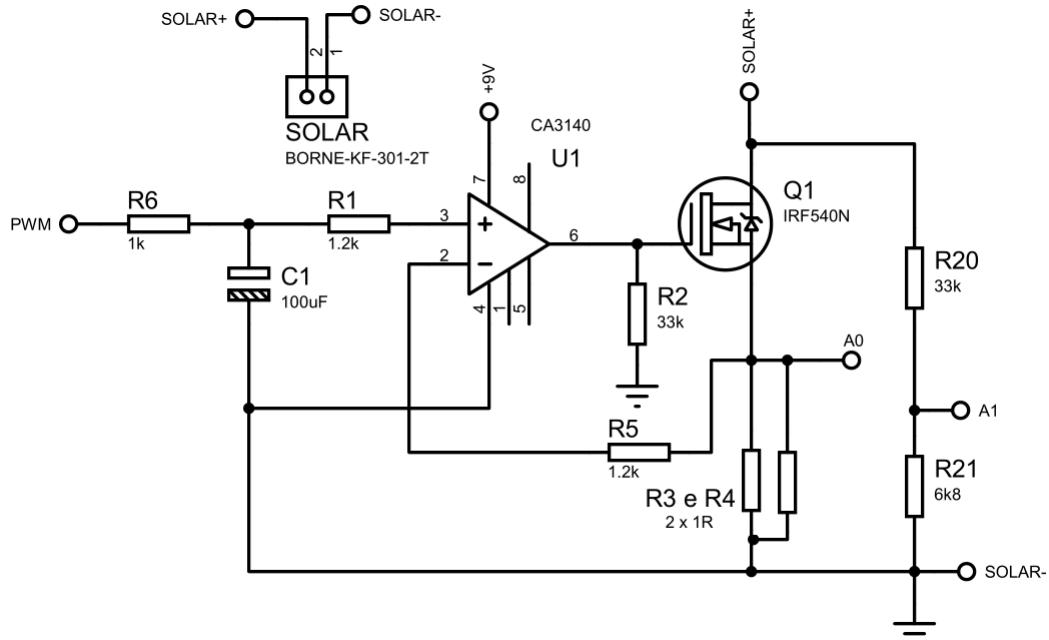


Figura 31 – Circuito eletrônico, foco na carga eletrônica. Fonte: Elaborado pelo Autor.

Na figura 31 se observa os componentes para o uso da carga eletrônica. Há também a presença dos conectores para os cabos provenientes do painel solar.

3.4.4 Conjunto de LEDs

A parte final do circuito, figura 32, o conjunto de LEDs, *Light-Emitting Diode*, Díodo Emissor de Luz, o qual tem como principal função garantir uma interface visual para o usuário, permitindo assim se encontrar durante o processo e erros ocorridos.

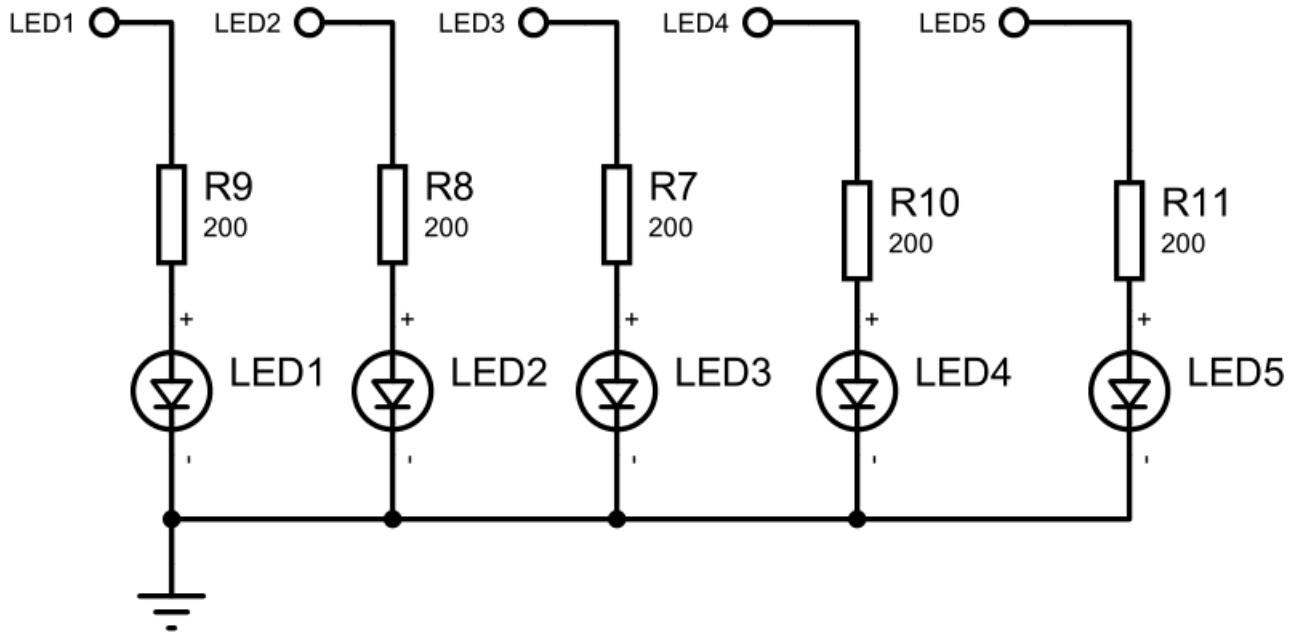


Figura 32 – Circuito eletrônico, foco no conjunto de LEDs. Fonte: Elaborado pelo Autor.

Na figura 32 se observa os cinco LEDs utilizados para o informativo ao usuário.

3.5 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 acuracidade e precisão na coleta de dados, foi realizado um teste com 30 diferentes valores a serem coletados pelo sensor utilizando ADS1115 e um multímetro de alta precisão. Ao se comparar os dados do multímetro e do ADS1115, nota-se os valores correspondentes do sensor em relação ao multímetro, como pode ser observado na figura 33.

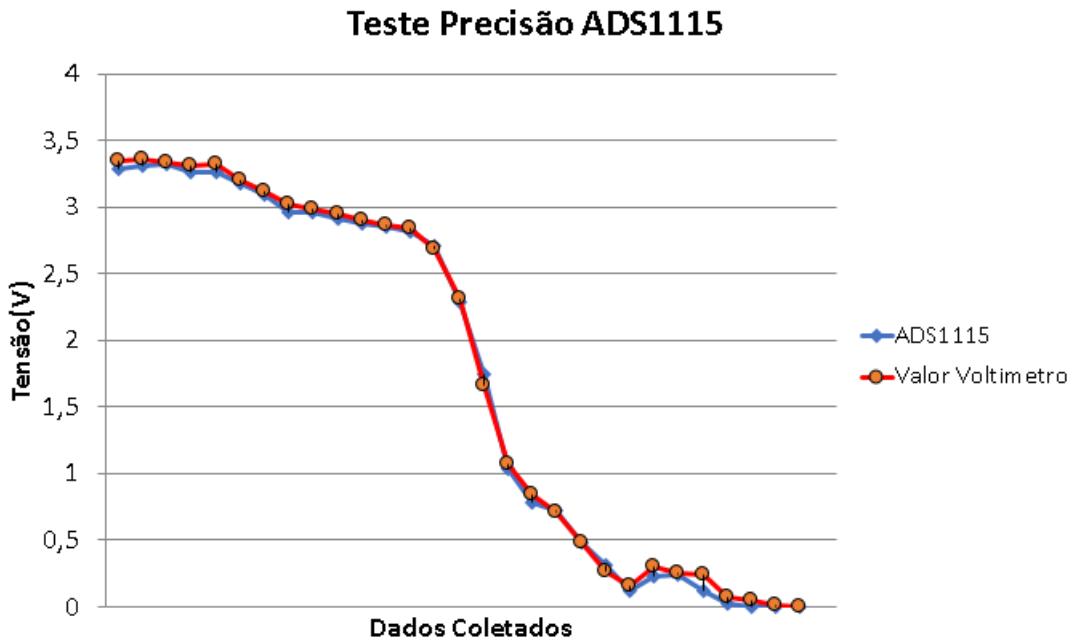


Figura 33 – 30 diferentes valores de tensão e comparação entre o sensor e um multímetro comercial. Fonte: Elaborado pelo Autor.

Considerando a necessidade de testes do traçador I-V, foi utilizado lâmpada halógena como fonte de irradiação. Desta forma foi possível viabilizar os testes mesmo em dias com pouca irradiação e foi possível manter uma irradiação sempre constante durante os testes, figura 34.



Figura 34 – Lâmpada utilizada. Fonte: Elaborado pelo Autor.

3.5.1 Comportamento do Protótipo

Para mostrar o estágio de execução da medição, 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

Ao se utilizar da interface através dos LEDs foi possível tornar a coleta de dados mais dinâmica, de maneira a facilitar o uso do usuário e a verificação das etapas e o possível aparecimento de erros.

Tendo a interface pronta, e o circuito montado pronto para os testes, houve então a primeira verificação. Os primeiros experimentos foram feitos utilizando uma Resistência *Shunt*(RS) de aproximadamente 3 Ohms, o que causou uma grande deformação na curva proveniente dos valores coletados.

Após novos testes com diferentes resistências, foi possível chegar ao resultado mais próximo do esperado ao se utilizar dois resistores de 1 Ohm em paralelo. Houve também a necessidade de alterar alguns pontos da programação tendo a finalidade de se obter mais pontos e garantir uma melhor resolução da curva.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os primeiros circuitos de testes foram construídos em uma Matriz de Contato (*Protoboard*), de modo a facilitar ajustes e adequações de projeto. Para os experimentos foi utilizado a lâmpada halógena, possibilitando um ambiente controlado para testes, de modo a não depender das condições climáticas ideias para efetuar o experimento. O primeiro teste foi feito utilizando o ADC, Conversor de Analógico para Digital (*Analog-to-Digital Converter*), interno do Arduino para a coleta de valores referentes ao painel, figura 35.

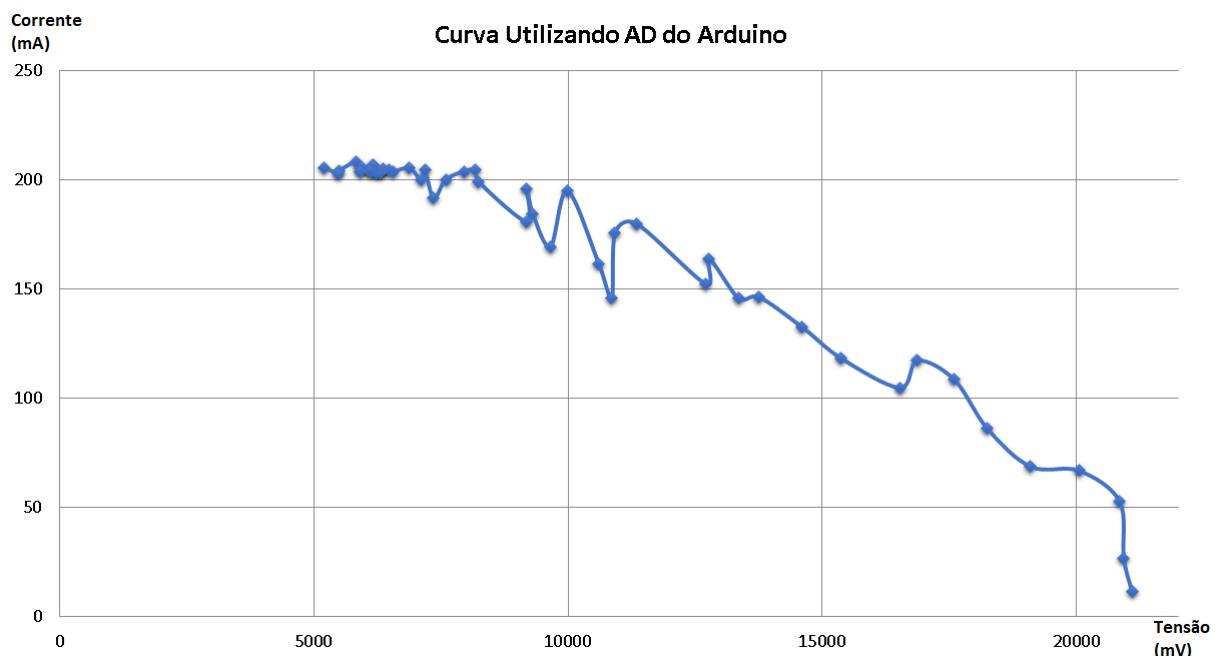


Figura 35 – Curva inicial utilizando o conversor AD interno do Arduino e um sinal de PWM com uma resolução de 255 pontos diferentes. Fonte: Elaborado pelo Autor.

Após a coleta da curva referente a figura 35 foi necessário a adaptação do circuito de maneira a gerar uma curva mais próxima à curva teórica do módulo fotovoltaico. Para isso houve o uso do sensor ADS1115, tendo como objetivo a diminuição do ruído em relação ao gerado pelo ADC do Arduino, além da possibilidade do uso de uma resolução de 16 bits, tendo assim uma maior sensibilidade no sensoriamento. Tendo como objetivo aumentar a quantidades de pontos para coleta e teste do circuito, houve a configuração de resolução do PWM Atmega328p de 8 bits para 14 bits, após configura o 16-bit *Timer/Counter1* do microcontrolador, gerando o gráfico visto na figura 36;



Figura 36 – Curva IV deformada utilizando ADS1115 e PWM com resolução de 14 bits .
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Após os testes foi possível observar a estabilidade do ADS1115 em relação ao ADC do Arduino. Tendo em consideração a curva da figura 36, houve a necessidade de alterar o circuito. Como mostrado por Pinho (2004), há a necessidade de uma resistência com valor muito baixo em série com o painel para que se possa obter uma melhor curva IV, figura 37.

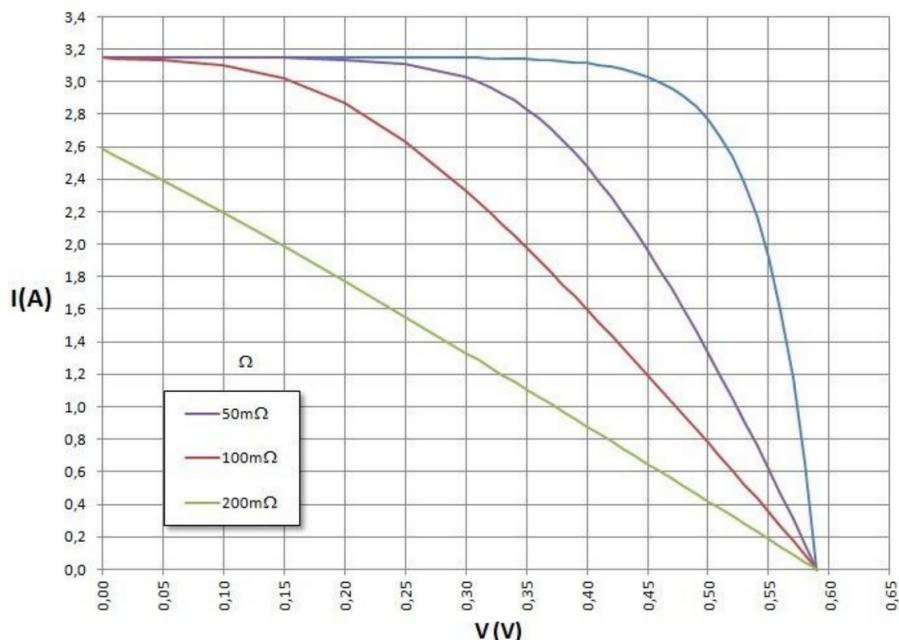


Figura 37 – Curva IV com diferente resistências em série. Fonte: (PINHO, 2004).

Tendo trocado os valores dos resistores e após retornar o sinal PWM para o padrão do Arduino foram feitos novos testes, figura 38. A figura 39 mostra os resultados do novo teste.

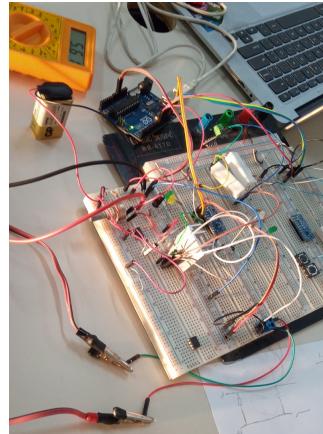


Figura 38 – Imagem durante a leitura. Fonte: Elaborado pelo Autor.

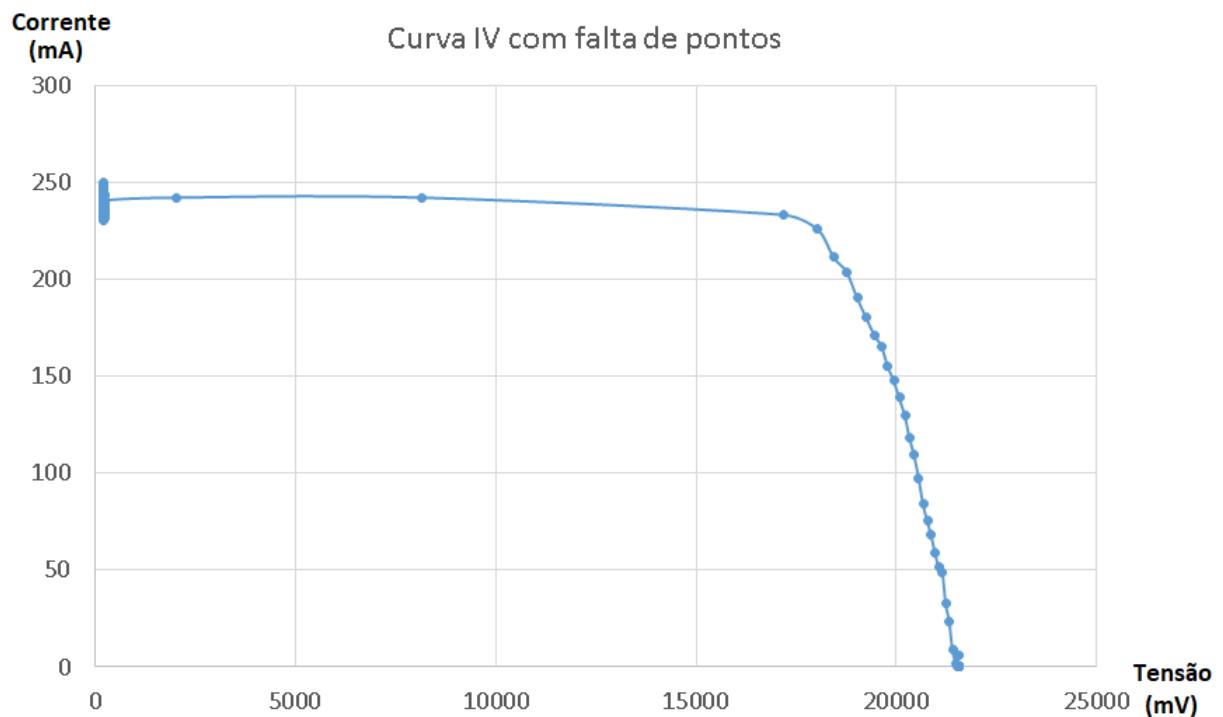


Figura 39 – Curva IV com poucos pontos entre 5000 mV e 15000 mV. Fonte: Elaborado pelo Autor.

Após a troca do resistor de 3 Ohms para três resistores em paralelo, dois de 1 ohm e 1 resistor de 0,100 ohms, foi possível obter uma curva mais próxima da curva IV esperada, entretanto foi possível notar um grande acúmulo de pontos no início da curva e poucos pontos antes de 15000 mV. Tendo como objetivo melhorar esse problema foi feito novamente o uso do PWM do Atmega328p configurado por fora da padrão do Arduino, como pode ser observado na figura 40.

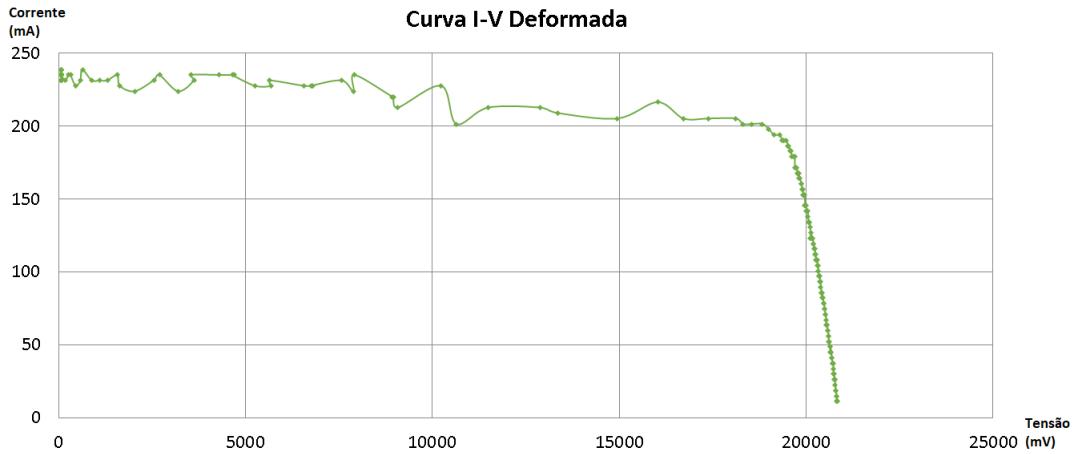


Figura 40 – Curva IV deformada devido ao capacitor utilizado. Fonte: Elaborado pelo Autor.

Com uma resolução de PWM maior foi possível obter uma quantidade de pontos aceitável, entretanto houve a presença de uma variação nos valores coletados. Tendo esse problema em mente foram feitos testes utilizando capacitores no filtro utilizado no sinal PWM. Alterando o valor do capacitor de $10\mu F$ para $100\mu F$ e refeito o teste se deu o gráfico da figura 41.

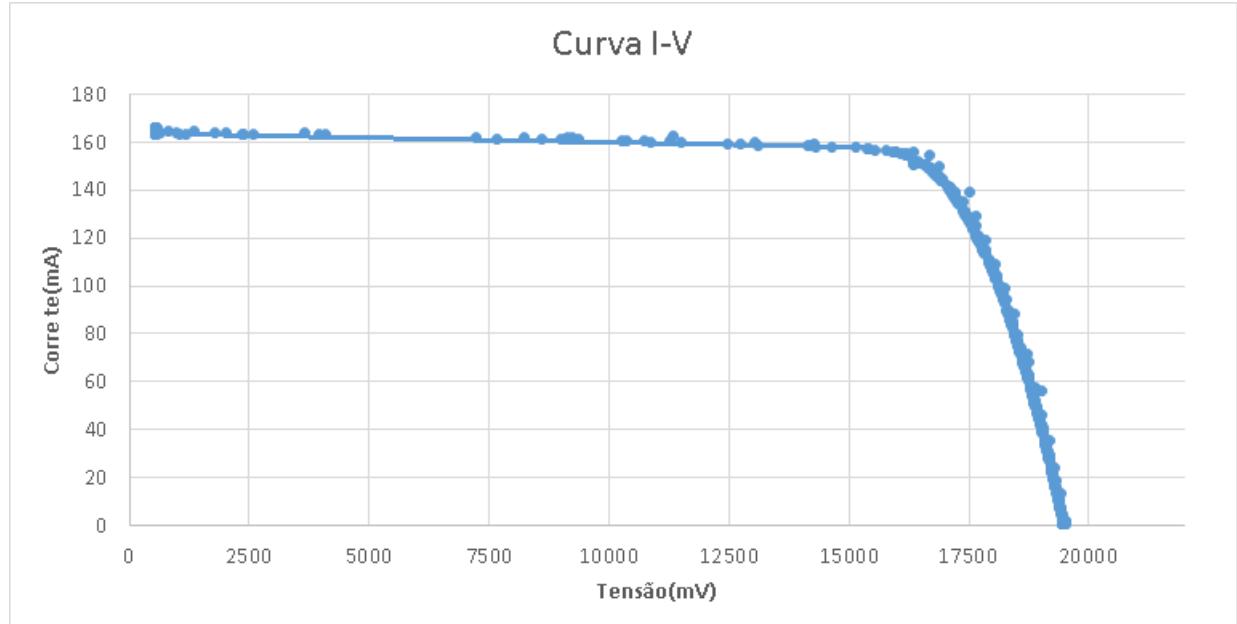


Figura 41 – Curva IV final. Fonte: Elaborado pelo Autor.

Após a alteração do circuito e da programação foi possível adquirir uma curva IV dentro do esperado, semelhante ao reportado na literatura, Pinho (2004). Considerando também os valores de irradiância dos testes da figura 42 é possível observar que o valor de Corrente de Curto-círcuito encontrado na figura 41 está próximo do esperado.

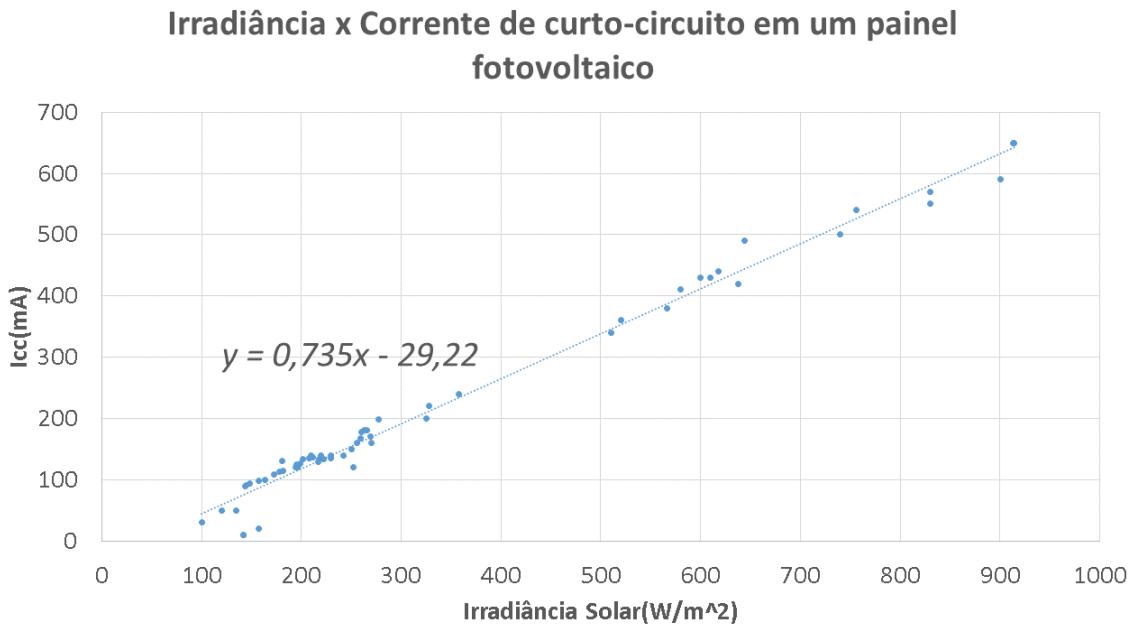


Figura 42 – Valores de Corrente de curto-círculo do painel em relação a irradiância. Fonte: Elaborado pelo Autor.

A figura 42 foi elaborada em um teste durante uma pesquisa de iniciação científica no IFSP campus Guarulhos. A pesquisa teve como objetivo observar se há relação entre os valores de irradiância solar e os valores de corrente de curto-círculo no painel fotovoltaico sobre influência dessa irradiância. Foram coletados valores de irradiância solar e da corrente de curto-círculo no mesmo instante, esse dados foram mesurados durante diferentes dias e horários. É possível observar a correlação desses valores ao se fazer um diagrama de dispersão como visto na figura 42. Utilizando a ferramenta Excel do pacote Office da Microsoft foi possível desenvolver o gráfico relacionando a irradiância solar com a corrente de curto-círculo da placa fotovoltaica, além da equação da reta de tendência. Ao se observar a figura 43 e ao se utilizar da equação da figura 42, observa-se que aos valores de corrente de curto-círcito dos testes inciais se encontra próximo do esperado.



Testes Iniciais

Testes Finais

Figura 43 – Valor dado no solarímetro durante os testes iniciais e o teste final. Fonte: Elaborado pelo Autor.

Tendo os valores de irradiação coletados através do solarímetro durante os testes, como vistos na figura 43, é possível comparar os valores de corrente esperados, figura 44, com os obtidos durante os testes.

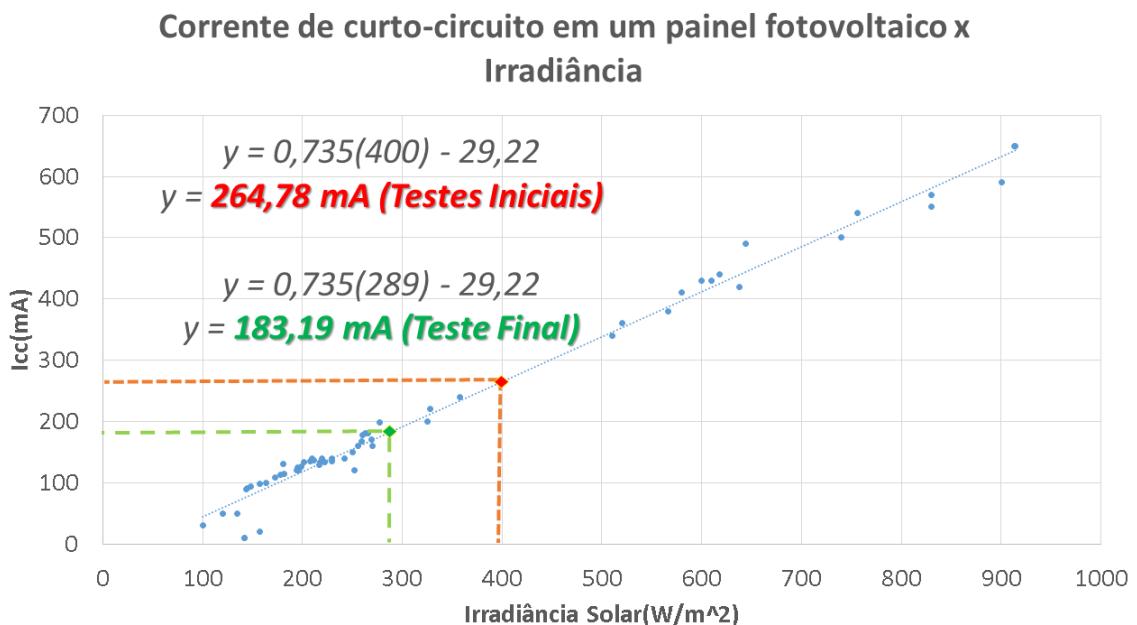


Figura 44 – Valores de corrente esperados. Fonte: Elaborado pelo Autor.

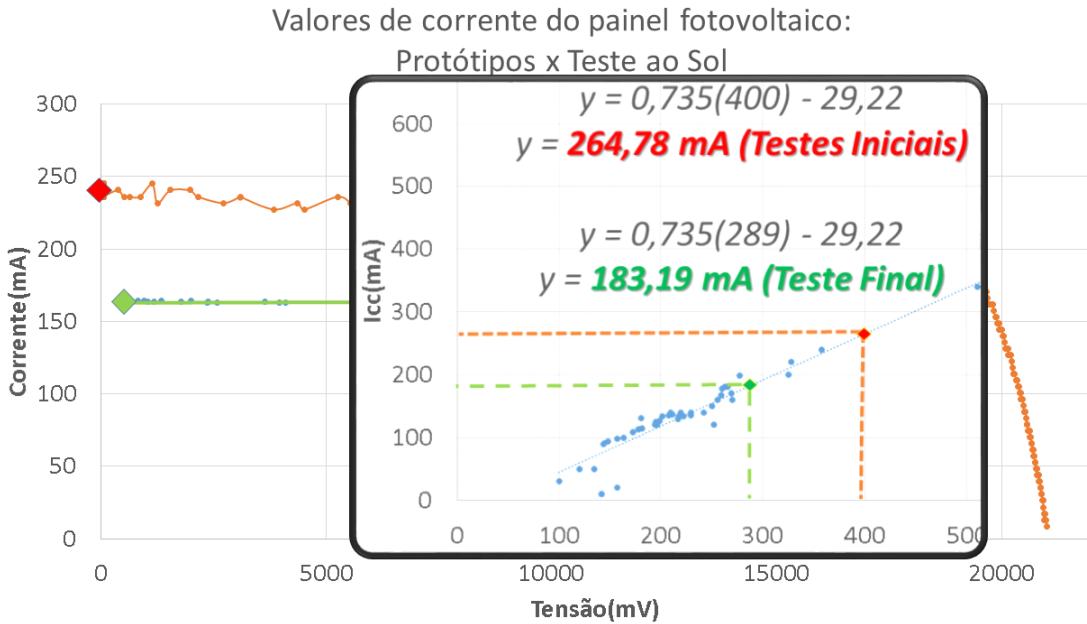


Figura 45 – Valores de corrente quando comparado com os coletados pelo traçador. Fonte: Elaborado pelo Autor.

Pode-se observar na figura 45 que os valores obtidos pelo protótipo do traçador IV estão muito próximos dos valores esperados quando comparado com a figura 44, estando entre 10 e 20 mA abaixo do esperado.

5 CONCLUSÕES

A maior contribuição deste projeto se dá no processo de criação de um traçador de curvas IV para painéis fotovoltaicos de baixa potência, desde a importância por trás do seu uso para atestar o funcionamento correto, bem como para seu uso em estudos e testes de sombreamento e defeitos sobre painéis fotovoltaicos. O trabalho também apresentou a possibilidade de ocorrer erros durante o desenvolvimento e teste dos circuitos, desta maneira facilitando o processo de replicação e melhoria do traçador aqui apresentado, garantindo assim o incentivo ao uso e estudo de energia fotovoltaica. Outro aspecto se dá no baixo custo do protótipo, como visto no Anexo A, o qual apresenta o valor total gasto em componentes para replicar o projeto.

A fim de viabilizar o estudo foi utilizado um ambiente de testes estático para o desenvolvimento do traçador utilizando lâmpada halógena de 500 W, esse ambiente permitiu testes contínuos e com variáveis controladas, de maneira a proporcionou a verificação e correção de defeitos pontualmente. O projeto atual não considera problemas como variações de temperatura, irradiação, nuvens e outros aspectos climáticos. Há também a restrição quanto a potência do painel, 25 V e 8 A, devido ao uso dos resistores divisores de tensão para a diminuição da tensão medida pelo conversor AD, a qual é facilmente transposta pelo uso de diferentes valores para o divisor de tensão. Entretanto, há o valor máximo devido ao MOSFET IRF540N, $V_{DSS} = 100$ V e $I_D = 33$ A, de acordo com o Datasheet do fabricante.

No que se diz respeito a esses limitadores, é possível a produção de trabalhos futuros com o uso de componentes que permitam painéis de diferentes potências. Há também a possibilidade de testes com painéis com defeitos internos e conjuntos de painéis tendo entre eles defeituosos e plenos. Outra possibilidade está no uso de um traçador utilizando capacitores e uma possível comparação entre a curva do painel por carga eletrônica e a curva do painel por capacitor.

Outros possíveis trabalhos podem ser modelados a partir do uso da lâmpada halógena, com o uso de formas diferentes das utilizadas neste trabalho, posicionada paralelamente em relação ao painel, é possível simular a projeção do sol durante o dia em diferentes horários do dia, além da simulação de diferentes climas, sendo assim adicionado mais variáveis como temperatura externa, temperatura sobre o painel, etc.

Como outra sugestão de possíveis trabalhos se dá na criação de um algoritmo de MPPT, o qual tem como princípio a curva IV do painel fotovoltaico. Ao se utilizar um MPPT é possível garantir que o painel possa gerar sua máxima potência em um dado período de tempo no qual está sendo testado.

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.
- ANEEL. **BIG-Banco de Informações de Geração**. 2019. <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acessado: 15/06/2019. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 22.
- BRAGA, N. C. **Carga eletrônica**. 2008. [Online; Stand 01. November 2018]. Disponível em: <<http://www.newtoncbraga.com.br/index.php/robotica/5169-mec071a>>. Citado 3 vezes nas páginas 11, 35 e 36.
- 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 3 vezes nas páginas 11, 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 3 vezes nas páginas 10, 22 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 2 vezes nas páginas 31 e 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 23.
- LEENS, F. An introduction to i2c and spi protocols. **IEEE Instrumentation & Measurement Magazine**, v. 12, p. 8–13, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 34.
- 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 2 vezes nas páginas 10 e 25.

PINHO, M. A. G. J. T. Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. **CRÉSCER**, Rio de Janeiro, 2004. Citado 3 vezes nas páginas 11, 47 e 49.

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.

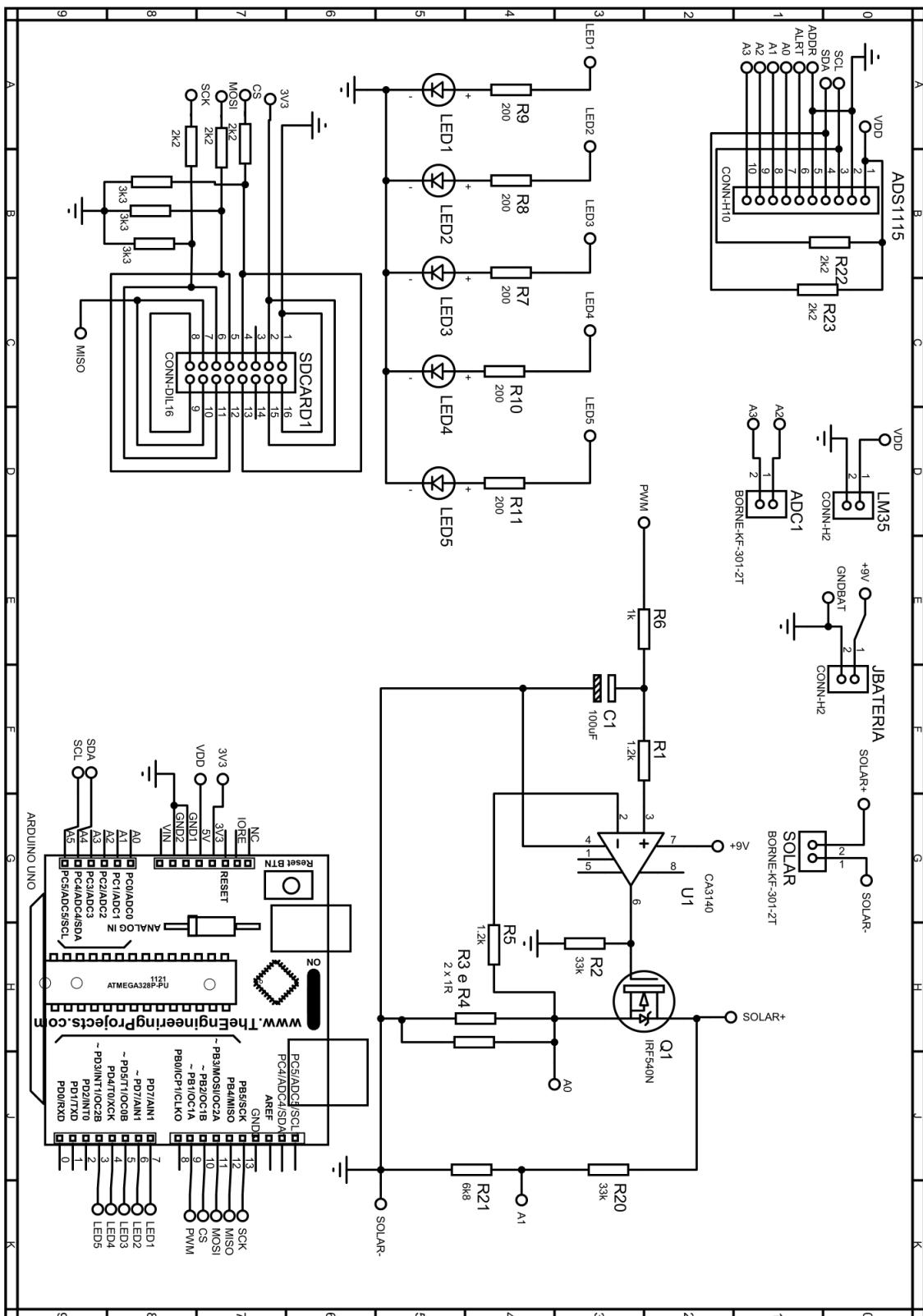
SEMICONDUCTORS, P. The I2C-bus specification. **Philips Semiconductors**, v. 9397, n. 750, p. 00954, 2000. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 32.

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 4 vezes nas páginas 10, 22, 23 e 27.

Apêndices

APÊNDICE A - CIRCUITO COMPLETO



APÊNDICE B – TÍTULO DO APÊNDICE B

Tabela com o valor gasto para desenvolver um traçador de curva IV.

Produto	Qtde.	Unitário	Total
Arduino Uno Rev3 R3 Atmega328Smd	1	R\$ 26,99	R\$ 26,99
Amplificador Operacional CA3140	1	R\$ 3,70	R\$ 3,70
Barra de Pinos 40 vias 15mm	2	R\$ 1,50	R\$ 3,00
Barra de Soquetes Header Fêmea 40 vias 180 Graus	2	R\$ 0,80	R\$ 1,60
Borne 2 polos - KF-301 2T	2	R\$ 0,70	R\$ 1,40
Capacitor Eletrolítico 100uF / 25V	1	R\$ 0,15	R\$ 0,15
Placa De Fenolite Virgem 10X30 c	1	R\$ 9,50	R\$ 9,50
Resistor 1K	1	R\$ 0,08	R\$ 0,08
Resistor 1K2	2	R\$ 0,15	R\$ 0,30
Resistor 2K2	5	R\$ 0,08	R\$ 0,40
Resistor 33K	2	R\$ 0,08	R\$ 0,16
Resistor 3K3	3	R\$ 0,08	R\$ 0,24
Resistor 6K8	1	R\$ 0,08	R\$ 0,08
Transistor IRF540N - Mosfet de Canal N	1	R\$ 3,05	R\$ 3,05
Baseado nos sites mercadolivre.com.br e baudaelectronica.com.br			
Total		R\$ 50,65	

Anexos

ANEXO A – DATASHEET ADS1115

 Product Folder  Order Now  Technical Documents  Tools & Software  Support & Community



ADS1113, ADS1114, ADS1115

SBAS444D – MAY 2009 – REVISED JANUARY 2018

ADS111x Ultra-Small, Low-Power, I²C-Compatible, 860-SPS, 16-Bit ADCs With Internal Reference, Oscillator, and Programmable Comparator

1 Features

- Ultra-Small X2QFN Package: 2 mm × 1.5 mm × 0.4 mm
- Wide Supply Range: 2.0 V to 5.5 V
- Low Current Consumption: 150 µA (Continuous-Conversion Mode)
- Programmable Data Rate: 8 SPS to 860 SPS
- Single-Cycle Settling
- Internal Low-Drift Voltage Reference
- Internal Oscillator
- I²C Interface: Four Pin-Selectable Addresses
- Four Single-Ended or Two Differential Inputs (ADS1115)
- Programmable Comparator (ADS1114 and ADS1115)
- Operating Temperature Range: -40°C to +125°C

2 Applications

- Portable Instrumentation
- Battery Voltage and Current Monitoring
- Temperature Measurement Systems
- Consumer Electronics
- Factory Automation and Process Control

3 Description

The ADS1113, ADS1114, and ADS1115 devices (ADS111x) are precision, low-power, 16-bit, I²C-compatible, analog-to-digital converters (ADCs) offered in an ultra-small, leadless, X2QFN-10 package, and a VSSOP-10 package. The ADS111x devices incorporate a low-drift voltage reference and an oscillator. The ADS1114 and ADS1115 also incorporate a programmable gain amplifier (PGA) and a digital comparator. These features, along with a wide operating supply range, make the ADS111x well suited for power- and space-constrained, sensor measurement applications.

The ADS111x perform conversions at data rates up to 860 samples per second (SPS). The PGA offers input ranges from ±256 mV to ±6.144 V, allowing precise large- and small-signal measurements. The ADS1115 features an input multiplexer (MUX) that allows two differential or four single-ended input measurements. Use the digital comparator in the ADS1114 and ADS1115 for under- and overvoltage detection.

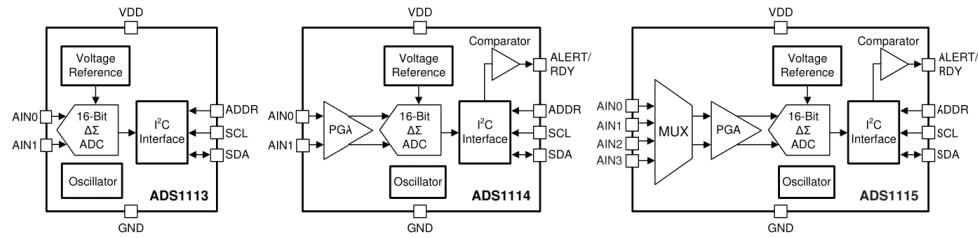
The ADS111x operate in either continuous-conversion mode or single-shot mode. The devices are automatically powered down after one conversion in single-shot mode; therefore, power consumption is significantly reduced during idle periods.

Device Information⁽¹⁾

PART NUMBER	PACKAGE	BODY SIZE (NOM)
ADS111x	X2QFN (10)	1.50 mm × 2.00 mm
	VSSOP (10)	3.00 mm × 3.00 mm

(1) For all available packages, see the package option addendum at the end of the data sheet.

Simplified Block Diagrams



Copyright © 2016, Texas Instruments Incorporated



An IMPORTANT NOTICE at the end of this data sheet addresses availability, warranty, changes, use in safety-critical applications, intellectual property matters and other important disclaimers. PRODUCTION DATA.

Disponível em:<<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads1115.pdf>>.

ANEXO B – TÍTULO DO ANEXO B

15. 16-bit Timer/Counter1 with PWM

15.1 Features

- True 16-bit design (i.e., allows 16-bit PWM)
- Two independent output compare units
- Double buffered output compare registers
- One input capture unit
- Input capture noise canceler
- Clear timer on compare match (auto reload)
- Glitch-free, phase correct pulse width modulator (PWM)
- Variable PWM period
- Frequency generator
- External event counter
- Four independent interrupt sources (TOV1, OCF1A, OCF1B, and ICF1)

15.2 Overview

The 16-bit Timer/Counter unit allows accurate program execution timing (event management), wave generation, and signal timing measurement.

Most register and bit references in this section are written in general form. A lower case "n" replaces the Timer/Counter number, and a lower case "x" replaces the output compare unit channel. However, when using the register or bit defines in a program, the precise form must be used, i.e., TCNT1 for accessing Timer/Counter1 counter value and so on.

A simplified block diagram of the 16-bit Timer/Counter is shown in [Figure 15-1 on page 90](#). For the actual placement of I/O pins, refer to [Section 1-1 "Pinout" on page 3](#). CPU accessible I/O registers, including I/O bits and I/O pins, are shown in bold. The device-specific I/O register and bit locations are listed in the [Section 15.11 "Register Description" on page 108](#).

The PRTIM1 bit in [Section 9.11.3 "PRR – Power Reduction Register" on page 38](#) must be written to zero to enable Timer/Counter1 module.

Datasheet Atmega328p, Disponível em:<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-7810-Automotive-Microcontrollers-ATmega328P_Datasheet.pdf>.