

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

HENRIQUE DE LIMA KURTA

**DESENVOLVIMENTO DE UM CIRCUITO DE CARGA ELETRÔNICA PARA
OBTENÇÃO DA CURVA CARACTERÍSTICA DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS**

PATO BRANCO

2023

HENRIQUE DE LIMA KURTA

**DESENVOLVIMENTO DE UM CIRCUITO DE CARGA ELETRÔNICA PARA
OBTENÇÃO DA CURVA CARACTERÍSTICA DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS**

**Development of an electronic load circuit to obtain the characteristic curve of
photovoltaic modules**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentada como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Elétrica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Prof. Dr. Carlos Marcelo de Oliveira Stein.

PATO BRANCO

2023



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

HENRIQUE DE LIMA KURTA

**DESENVOLVIMENTO DE UM CIRCUITO DE CARGA ELETRÔNICA PARA
OBTENÇÃO DA CURVA CARACTERÍSTICA DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Elétrica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 03 / 05 / 2023

Carlos Marcelo de Oliveira Stein
Doutor
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Juliano de Pelegrini Lopes
Doutor
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Marcelo Flavio Guepfrih
Doutor
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

PATO BRANCO

2023

Dedico este trabalho à minha família e amigos, por sempre me apoiarem a seguir meus sonhos e darem suporte em todos os momentos. Sem eles, nada seria possível.

AGRADECIMENTOS

Estes parágrafos, inevitavelmente, não irão atender a todos, pois muitos estiveram presentes desde o início desta jornada. Portanto, peço desculpa àqueles que não foram citados diretamente nestas palavras, mas tenham certeza da minha gratidão.

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus por me prestigiar com saúde e condições favoráveis para tornar-me capaz de concluir o trabalho de conclusão de curso. Uma etapa importante na graduação em engenharia elétrica.

Agradeço a minha família, pai, mãe, irmã, cunhado e namorada, por todo incentivo de seguir meus sonhos. Por todo amparo emocional e financeiro que foi depositado em mim. Espero estar atendendo a todas as expectativas.

Ao meu orientador Prof. Dr. Carlos Marcelo de Oliveira Stein, pela sabedoria compartilhada com que me guiou nesta trajetória. Pelo tempo disponibilizado no auxílio deste trabalho.

Ao meu padrinho, engenheiro eletricitista egresso da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, que me incentivou a ingressar nessa graduação.

Aos meus colegas de turma, por todos esses anos de companheirismo.

A Secretaria e Coordenação do curso, pela cooperação.

Enfim, a todos que fizeram parte de alguma maneira a realização desta pesquisa.

RESUMO

Nos últimos anos, com o aumento da geração de energia elétrica a partir de sistemas fotovoltaicos, diferentes modelos de módulos fotovoltaicos estão sendo utilizados e cada um possui parâmetros próprios de operação, como tensão de circuito aberto, corrente de curto-circuito e ponto de operação para geração da máxima potência. Fatores os quais podem ser observados com o comportamento da curva característica do módulo fotovoltaico, também conhecida por curva da tensão pela corrente. A fim de verificar a curva característica de módulos, este trabalho dedica-se ao desenvolvimento de um circuito de carga eletrônica, o qual funciona como uma fonte de corrente controlada, em que é possível obter os dados do desempenho da tensão a partir da variação de corrente do módulo fotovoltaico. Para obter os dados é utilizado um microcontrolador, que adquire valores de tensão, corrente e temperatura, tornando possível, a partir dos pontos obtidos, traçar esta curva. Com o desenvolvimento deste circuito eletrônico, baseado em artigos científicos, trabalhos acadêmicos, *datasheets* e simulações, pode-se obter o comportamento da curva característica do módulo.

Palavras-chave: carga eletrônica; curva característica; módulo fotovoltaico.

ABSTRACT

Followed by the increase in photovoltaic electric generation systems, in the latest years, many different photovoltaic modules are being used, each one of them having its own operational parameters, such as open circuit voltage, short circuit current and maximum power operation point. These factors are noticeable in the characteristic photovoltaic module curve, also known as voltage versus current curve. In order to verify these parameters, this work aims to develop an electronic load system, which operates as a controlled current source, in order to collect data related to the voltage performance affected by the solar module's current variation. A microcontroller will be used to obtain the data result, voltage, current and temperature, then, it will be trace the characteristic curve. As a result, based on scientific articles, academic works and software simulations, the developed electronic system made possible to analyze, through software simulation, the module's characteristic behavior curve.

Keywords: electronic load; characteristic curve; photovoltaic module.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Curva característica de um módulo fotovoltaico.	14
Figura 2 - Curva da potência de um módulo fotovoltaico.....	14
Figura 3 - Curvas característica e de potência de um modulo fotovoltaico.....	15
Figura 4 - Ilustração do módulo conectado a fonte de corrente controlada.....	16
Figura 5 - Modelo de carga eletrônica.	19
Figura 6 - Ilustração do fluxo de sinais entre a carga eletrônica e o microcontrolador.....	20
Figura 7 - Transistor MOSFET	21
Figura 8 - Regiões de operação do MOSFET de canal tipo N.....	22
Figura 9 - Pinout do ESP32 WROOM.	24
Figura 10 - Circuito para variação da corrente sobre o módulo.	25
Figura 11 - Circuito de carga eletrônica.	26
Figura 12 – Circuito equivalente.	30
Figura 13 - Resistência térmica pela velocidade do ar.	31
Figura 14 - Esquemático do módulo transistor e relé.....	32
Figura 15 - Esquemático do sensor de tensão.	33
Figura 16 - Esquemático do sensor de corrente.	35
Figura 17 - Sensor de temperatura.	36
Figura 18 – Circuito simulado no LTspice.	39
Figura 19 - Simulação da curva característica do módulo fotovoltaico.	40
Figura 20 - Sensor de tensão.	40
Figura 21 - Sensor de corrente.....	41
Figura 22 - Visualização 3D da placa.	42
Figura 23 - Placa montada.....	43
Figura 24 - Placa montada aproximada.....	43
Figura 25 - Gráfico do comportamento da tensão da fonte pela tensão lida no microcontrolador.....	45
Figura 26 - Gráfico do fator de correção pela tensão da fonte.....	45
Figura 27 - Gráfico comparativo da calibração do sensor de tensão.....	46
Figura 28 - Gráfico da corrente lida no microcontrolador pela corrente da fonte.	47
Figura 29 - Gráfico do fator de correção pela corrente da fonte.....	47
Figura 30 - Gráfico comparativo do sensor de corrente.....	48
Figura 31 – Circuito simulado no PSIM.	49
Figura 32 - Curva característica obtida pelo circuito no primeiro teste.	50
Figura 33 - Curvas características obtida e ideal no primeiro teste.	50
Figura 34 - Curva da potência pela tensão no primeiro teste.....	51
Figura 35 - Curvas de potência pela tensão obtida e ideal no primeiro teste....	51
Figura 36 - Curva característica do segundo teste.	53
Figura 37 – Curva característica obtida e ideal para o segundo teste.	54
Figura 38 - Curva da potência pela tensão no segundo teste.	54
Figura 39 - Curvas de potência pela tensão obtida e ideal no segundo teste. ..	55
Figura 40 - Curva característica do terceiro teste.	56
Figura 41 - Curvas características obtida e ideal para o terceiro teste.	57
Figura 42 - Curva da potência pela tensão no terceiro teste.....	57
Figura 43 - Curvas de potência pela tensão obtida e ideal no terceiro teste.	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros do modulo fotovoltaico RSM060P.	23
Tabela 2 - Parâmetros do IRF540N	28
Tabela 3 - Características térmicas do IRF540N.....	29
Tabela 4 - Dados do dissipador HS 11450.....	31
Tabela 5 - Comparação entre os resultados obtidos e ideais no primeiro teste.	52
Tabela 6 - Parâmetros do módulo fotovoltaico para o segundo teste.....	53
Tabela 7 - Comparação entre os resultados obtidos e ideais no segundo teste.	55
Tabela 8 - Parâmetros do módulo fotovoltaico para o terceiro teste.	56
Tabela 9 - Comparação entre os resultados obtidos e ideais no terceiro teste.	58

LISTA DE SÍMBOLOS

A_v	Área do ventilador
$f a_v$	Fluxo de ar do ventilador
I_D	Corrente de dreno
I_G	Corrente na porta
I_{SC}	Corrente de curto-circuito
I_{mp}	Corrente para máxima potência
P	Potência
$P_{máx}$	Potência máxima
P_{MOSFET}	Potência do MOSFET
Q_G	Carga total da porta
R	Resistor
R_{thCH}	Resistência térmica do encapsulamento para o dissipador
R_{thHA}	Resistência térmica do dissipador para o ambiente
R_{thJC}	Resistência térmica da junção para o encapsulamento
T	Temperatura
T_A	Temperatura ambiente
T_{jmax}	Temperatura máxima de junção
t_r	Tempo de subida da tensão
V_{DS}	Tensão dreno-fonte
Vel_{ar}	Vazão de ar
V_{GS}	Tensão porta-fonte
V_{in}	Tensão de entrada
V_{OC}	Tensão de circuito aberto
V_{mp}	Tensão para máxima potência
V_{mod+}	Tensão do módulo fotovoltaico
V_{mod-}	Tensão de referência do módulo fotovoltaico
V_{micro}	Tensão na saída do microcontrolador
V_{th}	Tensão <i>threshold</i> , tensão limite

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Objetivos	16
1.1.1	Objetivo geral.....	16
1.1.2	Objetivos específicos.....	16
1.2	Estrutura do trabalho	17
2	CARGA ELETRÔNICA	18
2.1	MOSFET	21
3	PROJETO	23
3.1	Carga eletrônica	23
3.2	Microcontrolador	23
3.3	Circuito	24
3.4	Dissipador de calor	28
3.5	Instrumentação.....	32
3.5.1	Tensão do módulo fotovoltaico	33
3.5.2	Corrente do módulo fotovoltaico	34
3.5.3	Sensor de temperatura	36
3.6	Código	37
4	SIMULAÇÃO E IMPLEMENTAÇÃO	39
4.1	Simulações	39
4.2	Projeto da placa.....	41
4.3	Calibração	44
4.3.1	Calibração do sensor de tensão	44
4.3.2	Calibração do sensor de corrente.....	46
4.4	Resultados experimentais	48
4.4.1	Primeiro teste.....	49
4.4.2	Segundo teste.....	52
4.4.3	Terceiro teste	56
5	CONCLUSÃO	60
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	62
	REFERÊNCIAS.....	63
	APÊNDICE A – Código fonte	65
	APÊNDICE B – Esquemático do projeto no KiCAD	69
	APÊNDICE C – Esquemático da placa do projeto no KiCAD.....	70

1 INTRODUÇÃO

A geração fotovoltaica, no Brasil, vem crescendo de maneira significativa em relação a anos anteriores. Em 2019 a potência instalada era de 4600 MW, já em 2020 passou para 7834 MW, um crescimento de aproximadamente 70% no período de um ano (ABSOLAR, 2021).

O crescimento da potência instalada vem acontecendo desde 2012, quando era de 7MW instalados, ano em que a ANEEL publicou a normativa nº482, na qual adotou normas para micro e minigeração distribuída. Segundo o infográfico do mês de março de 2022 (ABSOLAR, 2022), a potência instalada de geração fotovoltaica chegou à marca de 14G W, igualando a potência instalada da usina hidrelétrica de Itaipu, atualmente, usina com maior capacidade de geração nacional.

A energia solar é convertida em energia elétrica a partir da incidência de raios luminosos do sol em um módulo fotovoltaico. Um módulo é formado por células fotovoltaicas, em que ocorre o efeito fotoelétrico. Com esse efeito, a energia provinda do sol é convertida em energia elétrica excitando elétrons para um estado de maior energia, resultando em uma diferença de potencial elétrico (DA BEZERRA, 2018).

O módulo fotovoltaico é constituído por várias células fotovoltaicas ligadas em série, em paralelo, ou nas duas formas. O tipo de ligação para o agrupamento das células é definido pela finalidade. Para tensões elevadas, as células são ligadas em série, enquanto que para correntes elevadas é utilizada a ligação em paralelo (VALENTE, 2011).

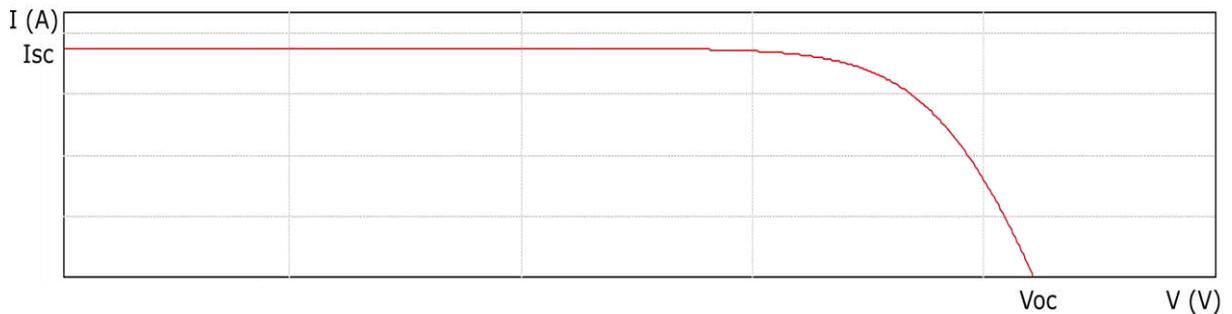
A curva característica, também conhecida como curva corrente versus tensão, do módulo fotovoltaico relaciona a tensão pela corrente. A partir desta curva pode-se definir o ponto de máxima potência, corrente de curto-circuito e tensão em circuito aberto do módulo em operação. Estes parâmetros são importantes para entender o funcionamento do módulo fotovoltaico e buscar o melhor ponto de operação para garantir a máxima geração possível. A temperatura e a irradiação solar são fatores que influenciam significativamente o comportamento da curva característica (VILLALVA, 2009). Outros fatores influentes são: fluxo de energia incidente, condutividade, energia para movimentação de elétrons, entre outros.

Os dados obtidos da curva característica de um módulo fotovoltaico são importantes para determinar a qualidade do módulo e sua caracterização elétrica. Faz-se necessário os dados das curvas características e de potência para estudos

científicos e de viabilidade econômica no dimensionamento de sistemas fotovoltaicos (GASPARIN, 2009).

O comportamento da curva característica de um módulo fotovoltaico está representado na figura 1. Pode-se observar a corrente de curto (I_{SC}) e a tensão de circuito aberto (V_{OC}).

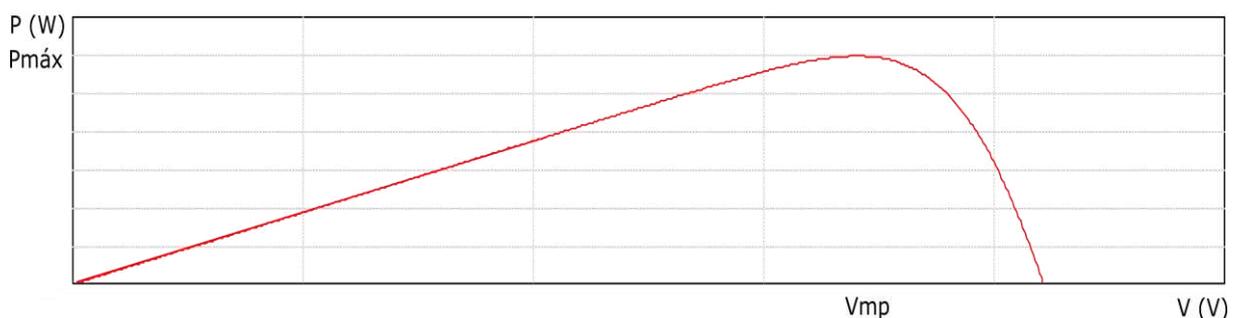
Figura 1 - Curva característica de um módulo fotovoltaico.



Fonte: Autoria própria.

A figura 2 apresenta o comportamento da curva da potência *versus* tensão, onde P_{max} é a potência máxima e V_{mp} é a tensão para máxima potência.

Figura 2 - Curva da potência de um módulo fotovoltaico.

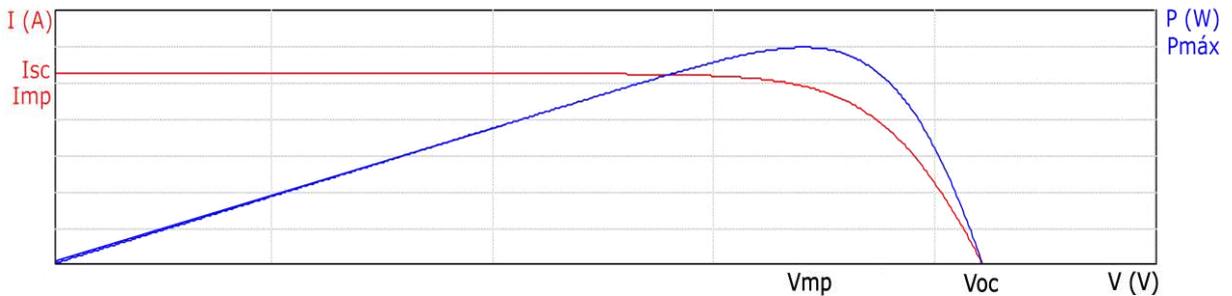


Fonte: Autoria própria.

Para avaliar o ponto de máxima potência, analisa-se a curva da I-V sobreposta a curva P-V, como está representado na figura 3, é possível observar o ponto de máxima potência, em que a corrente no ponto de máxima potência está representado

por I_{mp} . A curva I-V está representada em azul, enquanto a curva P-V está em vermelho.

Figura 3 - Curvas característica e de potência de um módulo fotovoltaico.



Fonte: Autoria própria.

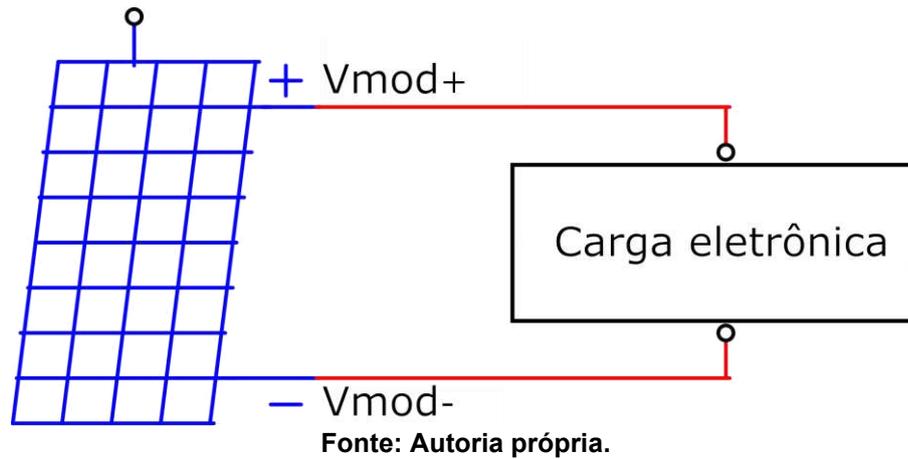
A tensão de circuito aberto e a corrente de curto-circuito podem ser obtidas utilizando um multímetro. Pode-se obter I_{SC} ajustando o multímetro para leitura de corrente e conectando-o nos terminais do módulo em condições de operação. Para adquirir V_{OC} ajusta-se o multímetro para leitura de tensão e conecta-o ao módulo fotovoltaico.

Utilizar o multímetro para aquisição desses dados é simples, porém, este método é incapaz de obter o comportamento da curva característica em toda faixa de operação.

Neste trabalho propõe-se desenvolver um circuito para a obtenção da curva característica e de potência de módulos fotovoltaicos. Este circuito opera como uma fonte de corrente controlada conectada nos terminais de um módulo fotovoltaico, representado na figura 4.

O circuito é capaz de variar a corrente de um módulo e obter os valores de tensão. Assim, torna-se possível fazer a aquisição da curva característica e de potência do módulo fotovoltaico para análise de seu comportamento em toda a faixa de operação do mesmo.

Figura 4 - Ilustração do módulo conectado a fonte de corrente controlada.



1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Obter a curva característica e a curva de potência de um módulo fotovoltaico a partir do desenvolvimento de um circuito de carga eletrônica que irá funcionar como fonte de corrente controlada nos terminais do módulo fotovoltaico.

1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Desenvolver um circuito de carga eletrônica.
- Simular o circuito de carga eletrônica.
- Projetar a instrumentação de sensores de tensão e corrente.
- Simular os sensores de tensão e corrente.
- Projetar uma placa de circuito impresso.
- Desenvolver um *script* para controle e obtenção de dados por um microcontrolador.
- Implementar os circuitos para obtenção da curva característica e de potência de um módulo fotovoltaico.

1.2 Estrutura do trabalho

A estrutura do trabalho é dividida em cinco capítulos. No primeiro é realizada a introdução sobre as curvas característica e de potência de um módulo fotovoltaico e sua importância. O segundo capítulo trata sobre a carga eletrônica e as principais características da mesma. No terceiro capítulo são relatadas as características do projeto e como cada elemento foi dimensionado.

O quarto capítulo se dá pelas simulações realizadas para validar o circuito proposto, o projeto da placa, a calibração do circuito e os resultados experimentais.

No quinto capítulo é apresentada uma análise conclusiva sobre o desenvolvimento e a implementação do trabalho, também trata de sugestões para trabalhos futuros.

2 CARGA ELETRÔNICA

Neste capítulo são discutidas as vantagens de uma carga eletrônica em relação a uma carga resistiva. Também são apresentados os principais componentes de um circuito de carga eletrônica e feita uma introdução sobre os mesmos.

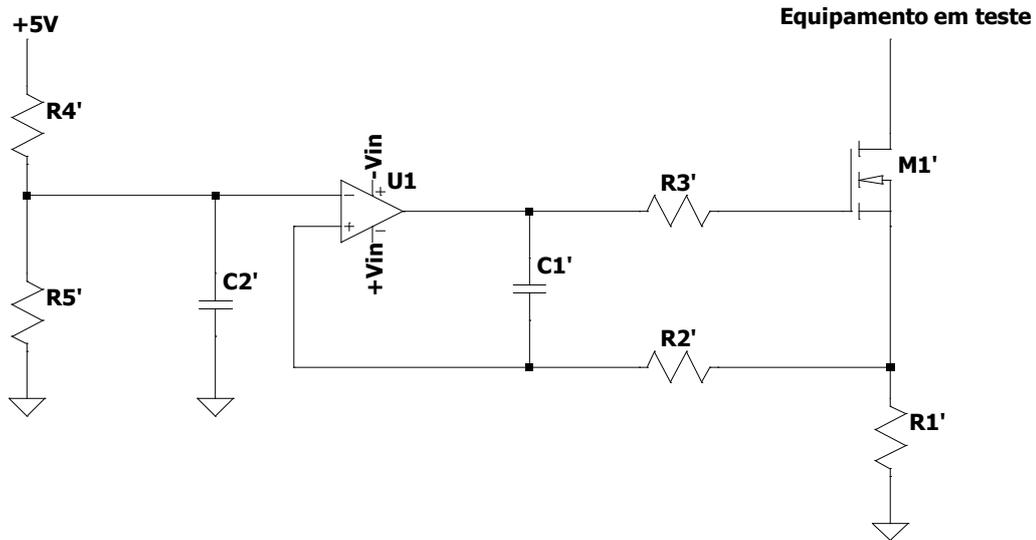
Para analisar o comportamento de um sistema de potência é possível utilizar diferentes tipos de cargas. O estudo sobre o comportamento de equipamentos é importante para aproveitar as funcionalidades dos mesmos de maneira eficaz. Assim, poder controlar a carga do equipamento resulta em estudar e validar aparelhos em diferentes condições de uso.

Pode-se conectar uma resistência que demanda uma corrente específica, onde a corrente exigida da fonte será inversamente proporcional ao valor de resistência, segundo a Lei de Ohm. A carga resistiva possui baixa precisão em razão da elevação da temperatura proveniente da passagem de corrente, sendo necessário equipamentos para controle térmico do sistema (HAIYING, 2011).

Outra possível carga é um circuito de carga eletrônica, em que é possível fazer o controle da corrente exigida do equipamento em teste. Esta carga é formada por componentes eletrônicos, como transistores, resistores de potência e circuitos integrados. A partir de um sinal de comando, torna-se possível variar a intensidade e forma de onda da corrente demandada do elemento em teste, ao contrário da carga resistiva, que permanece constante. Assim, a carga eletrônica possibilita ampliar o estudo sobre a dinâmica de equipamentos (VYAVAHARE, 2014).

O esquema de uma simples carga eletrônica de corrente contínua (CC) está representado na figura 5. A carga eletrônica funciona ajustável por um sinal externo, como uma tensão analógica, aplicada na entrada não inversora do amplificador operacional.

Figura 5 - Modelo de carga eletrônica.



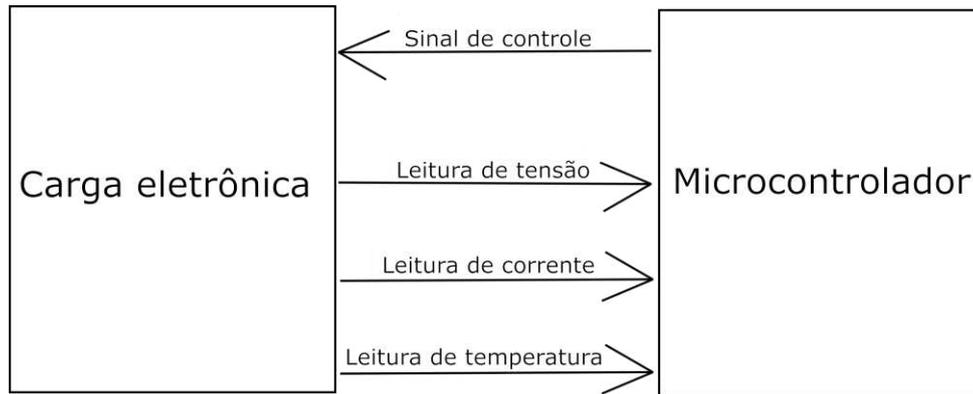
Fonte: Adaptado de VYAVAHARE, 2014.

O sinal de saída do AmpOp é a tensão aplicada no transistor para sua operação. Uma das entradas do amplificador recebe o sinal de referência que vem do microcontrolador, na outra entrada está a tensão aplicada no resistor *shunt*, com um ganho, ou seja, representa a corrente atual do módulo. Neste modelo de carga é utilizado um transistor de efeito de campo, transistor MOSFET.

Nessa configuração do AmpOp, as duas entradas tendem a ficar com o mesmo valor de tensão. Assim, a corrente do módulo fotovoltaico ficará com o valor de referência, configurado no microcontrolador.

O sinal de referência pode ser regulado por um microcontrolador (ASBAYOU1, 2021) a partir da saída de um terminal de conversão digital-analógico. Para adequar o sinal da saída do microcontrolador à faixa de carga esperada no aparelho em teste, faz-se necessário adicionar um ganho no sinal, podendo ser obtido por amplificadores operacionais. Na figura 6 está representada a ligação entre a carga eletrônica e o microcontrolador.

Figura 6 - Ilustração do fluxo de sinais entre a carga eletrônica e o microcontrolador.



Fonte: Autoria própria.

O valor da corrente extraída do aparelho em teste pode ser mensurado pela queda de tensão sobre o resistor de potência, resistor *shunt*, ou por transformadores de corrente. Para escolher a forma de leitura de corrente entre resistor *shunt* ou transformador de corrente, deve-se levar em consideração a faixa de corrente que a carga eletrônica será capaz de extrair.

Para mensurar a corrente utilizando resistor *shunt* é possível projetar um sensor a partir de um arranjo de amplificadores operacionais. Um amplificador operacional diferencial obtém a diferença de tensão entre os terminais do *shunt* e incrementa um ganho para adequar a um microcontrolador.

O transformador de corrente obtém o valor da corrente através do Efeito Hall. Este efeito ocorre pela variação de um campo eletromagnético ocasionado pela passagem de corrente em um condutor. O sensor obtém o valor do campo eletromagnético e converte em um sinal referente a corrente do condutor.

As aplicações para cargas eletrônicas são diversas, de modo a verificar a corrente que fontes são capazes de ofertar. Exemplos de equipamentos sujeitos a verificação da dinâmica de seu comportamento são fontes controladas, fontes chaveadas, baterias, módulos fotovoltaicos e demais fontes de corrente contínua.

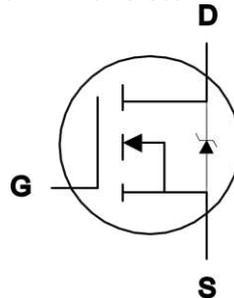
Para verificar o funcionamento de módulos fotovoltaicos após longos períodos de uso faz-se necessário a análise do comportamento da curva característica. Assim é possível averiguar se o mesmo permanece com características de fábrica. Também é necessário obter as curvas corrente *versus* tensão e potência *versus* tensão de módulos fotovoltaicos que se desconhece o *datasheet*, documento que reúne especificações do equipamento.

Para a Implementação e estudo de módulos é fundamental conhecer os valores da tensão de circuito aberto, da corrente de curto-circuito e o ponto ótimo de operação para a máxima potência. Estes parâmetros são possíveis de obter utilizando a carga eletrônica, assim, pode-se analisar toda a faixa de operação do módulo fotovoltaico.

2.1 MOSFET

O MOSFET é um transistor de efeito de campo, seu funcionamento é controlado pela tensão sobre seus terminais *gate* (G) e *source* (S), em português, porta e fonte, respectivamente (HART, 2012). O esquema que representa o MOSFET intensificação de canal tipo N está representado na figura 7. O transistor também conta com o terminal *drain* (D), dreno, em português.

Figura 7 - Transistor MOSFET



Fonte: VREJ BARKHORDARIAN, et al.

O transistor é usualmente utilizado como chave eletrônica, em que, caso a tensão *gate-source* (V_{GS}) for maior que a tensão de *threshold* (V_{th}) permite o fluxo de elétrons nos terminais *drain* e *source*. Caso a tensão V_{GS} for menor que V_{th} , idealmente, o canal *drain-source* não conduz.

Este transistor possui três modos de operação, a região de corte, região de triodo e região de saturação. Para esta aplicação o componente será utilizado na região de saturação, também conhecida como região ativa.

Na região de corte, a tensão $V_{GS} < V_{th}$ e o canal *drain-source* permanece sem conduzir.

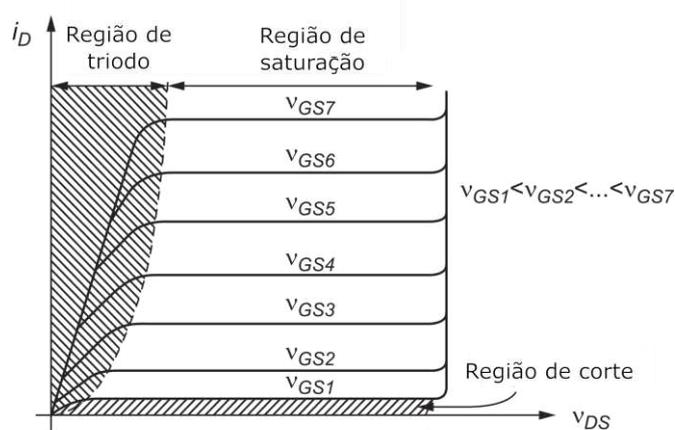
A região de triodo, também conhecida como região ôhmica, ocorre quando $V_{GS} > V_{th}$ e $V_{GS} - V_{th} > V_{DS}$, com V_{DS} sendo a tensão *drain-source*. O canal *drain-*

source permite o fluxo de corrente e é controlado pela tensão V_{GS} , assim, o MOSFET opera como um resistor.

A região de saturação, ou região ativa, ocorre quando $V_{GS} > V_{th}$ e $V_{GS} - V_{th} < V_{DS}$, deste modo, o canal *drain-source* permite a passagem de elétrons, ligando a chave. Nesta região de operação, a corrente *drain-source* é controlada apenas pela tensão V_{GS} e não depende da tensão V_{DS} (BUSARELLO, 2017).

A figura 8 mostra o gráfico da corrente de *drain* pela tensão *gate-source* e cada região de operação do transistor MOSFET.

Figura 8 - Regiões de operação do MOSFET de canal tipo N.



Fonte: Adaptado de BUSARELLO, 2017.

Neste capítulo foram apresentadas as principais características de um circuito de carga eletrônica e seus principais componentes. Também foi brevemente discorrido sobre o funcionamento do transistor MOSFET de canal tipo N, um dos principais elementos vistos. No próximo capítulo será determinado e projetado o circuito de carga eletrônica.

3 PROJETO

A carga eletrônica terá seus parâmetros definidos a partir de um módulo fotovoltaico comercial. Serão projetados sensores para aquisição dos valores de tensão e corrente, os quais serão processados por um microcontrolador. Também serão adquiridos valores de temperatura do transistor do circuito.

3.1 Carga eletrônica

Para o desenvolvimento do trabalho são definidos valores de corrente, tensão e potência, compatíveis ao módulo fotovoltaico da Resun RSM060P, em que se encontram na tabela 1. A partir da definição destes parâmetros, será desenvolvido o circuito de carga eletrônica.

Tabela 1 - Parâmetros do modulo fotovoltaico RSM060P.	
Parâmetro	Valores
Potência máxima (P_{max})	60 W
Tensão de circuito aberto (V_{OC})	22,68 V
Corrente de curto-circuito (I_{SC})	3,75 A
Tensão de máxima potência (V_{mp})	18,54 V
Corrente de máxima potência (I_{mp})	3,36 A

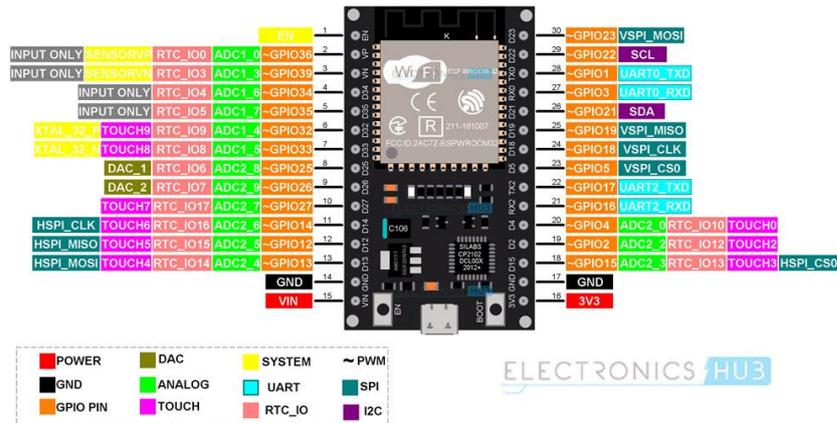
Fonte: Resun Solar Energy CO.

3.2 Microcontrolador

Para o controle dos valores de corrente do circuito e a obtenção dos dados utiliza-se um microcontrolador. Considerando a necessidade de obter os valores de tensão e corrente do módulo, temperatura do transistor, controlar a corrente do módulo e acionar o ventilador, faz-se necessário um dispositivo com 3 conversores analógico-digitais (ADC) para entrada, 1 ADC e 1 conversor digital-analógico (DAC) para saída. Assim, o microcontrolador escolhido para implementação foi o ESP32 WROOM.

O *pinout* do microcontrolador escolhido está representado na figura 9.

Figura 9 - Pinout do ESP32 WROOM.



Fonte: [Electronicshub.org](http://www.electronicshub.org)

A obtenção dos parâmetros é feita através dos valores em bits de entrada do conversor ADC e convertidos, a partir da lógica de programação, para os valores reais. Os ADCs do microcontrolador escolhido apresentam 12 bits para entradas, logo, os valores de leitura são de 0 a 4095. Para a tensão, este valor é convertido e fica entre valores de 0,0 a 22,68 V, já para corrente, entre 0,00 e 3,75 A. Os valores de temperatura são obtidos a partir de um sensor que tem resistência variável dependente da temperatura, NTC 10 K Ω .

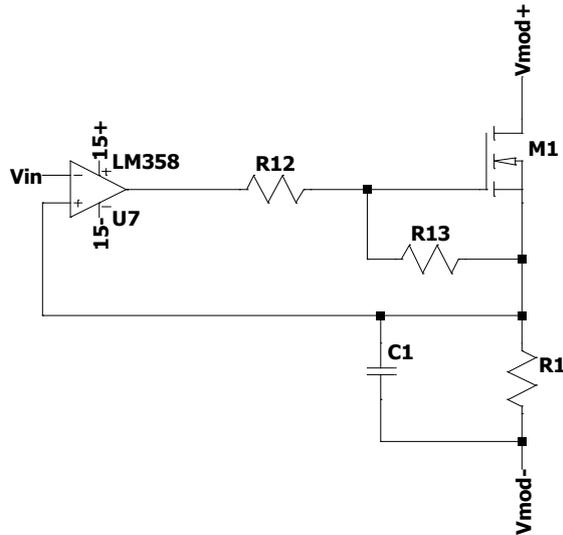
O controle da corrente é feito através do conversor DAC com a variação da tensão da entrada do circuito de 0 a 3,3 V, resultando na variação da corrente do módulo de 0,0 a 3,75 A. A saída é de 10 bits, logo, varia entre valores de 0 e 1023.

3.3 Circuito

O circuito de carga eletrônica funciona como uma fonte de corrente controlada. Assim, faz-se possível variar a corrente de uma fonte a partir de variações em parâmetros do circuito, e verificar o comportamento da tensão e da corrente do mesmo.

Os principais componentes que constituem o circuito proposto são: circuitos integrados, transistor MOSFET e um resistor de potência, em que se pode observar na figura 10. A fonte em aplicação é um módulo fotovoltaico, representado por Vmod+ e Vmod-, respectivamente, os terminais positivo e negativo do módulo.

Figura 10 - Circuito para variação da corrente sobre o módulo.



Fonte: Autoria própria.

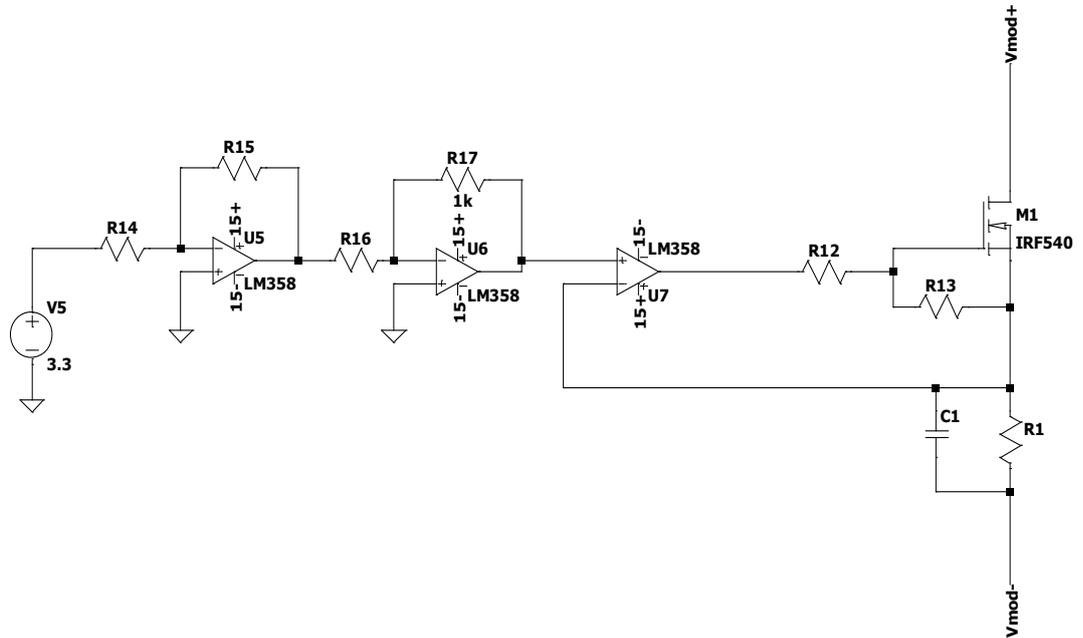
O sinal de tensão V_{in} tem origem na saída de um microcontrolador, definido como o sinal de referência para a corrente do módulo. A tensão sobre a entrada não inversora do amplificador operacional é a mesma de sua entrada inversora, assim, V_{in} é o sinal de tensão sobre o resistor *shunt* R1, referência para controle da corrente.

Como o resistor tem resistência constante, com a variação da tensão do microcontrolador, varia-se a tensão na entrada do AmpOp. Assim, torna-se possível fazer o controle da corrente do módulo através da variação do sinal na saída do amplificador operacional, seguindo a referência de tensão sobre o resistor R1.

Para filtrar ruídos no sinal de tensão que controla a corrente no resistor *shunt*, foi adicionado um capacitor paralelo a R1, entre a entrada inversora do amplificador operacional e o terminal negativo do módulo fotovoltaico, V_{mod-} . Como a tensão das entradas do AmpOp são iguais, foi retirado o capacitor da entrada não inversora do circuito, visto na figura 5 como C2'.

O esquema do circuito completo para controle da tensão aplicada no resistor *shunt* para variação da corrente no módulo pode ser observado na figura 11.

Figura 11 - Circuito de carga eletrônica.



Fonte: Autoria própria.

Os amplificadores operacionais U5 e U6 condicionam o sinal do microcontrolador para a faixa de tensão alvo. O ganho do sinal é menor que 1, logo, faz-se necessário utilizar um amplificador operacional inversor para o ganho e outro para inverter o sinal de tensão.

A corrente do módulo, que variada pelo circuito proposto para obtenção da curva característica, é controlada a partir da variação da tensão entre 0 e 3,3 V, que está simbolizada por “V5”, com referência a tensão proveniente de um microcontrolador.

A corrente máxima da fonte de corrente será a corrente de curto-circuito do módulo, ou seja, I_{SC} . Uma vez que a resistência de potência em série escolhida possui $0,1 \Omega$, pode-se determinar a tensão máxima sobre o resistor R1 conforme as equações (1) e (2).

$$V = R1 \cdot I_{SC} \quad (1)$$

$$V = 0,1 \cdot 3,75 = 375 \text{ mV} \quad (2)$$

O amplificador operacional (AmpOp) “U5” opera como inversor. Seu ganho é determinado considerando que, para a tensão de entrada máxima (3,3 V), a tensão

de saída deve ser de -375m V, assim, foi escolhido o resistor R14 (10 kΩ) e calculado a o valor do resistor R15. A equação (3) mostra o cálculo.

$$R15 = \left| \frac{V_{out}}{V_{in}} \right| \cdot R14 = \left| \frac{-0,375}{3,3} \right| \cdot 10000 = 1136 \Omega \quad (3)$$

Para utilizar valores comerciais de resistores, foi escolhido o valor de resistência de 1150 Ω em R15, esta decisão resulta em uma diferença no ganho do amplificador operacional U5, alterando o sinal de saída.

O objetivo do amplificador operacional “U6” é inverter a polaridade do sinal de tensão. Assim, seu ganho é unitário, conforme mostrado pela equação (4), foram escolhidos resistores de 1 kΩ (R16 e R17) para tal fim.

$$Ganho U6 = \frac{1000}{1000} = 1 \quad (4)$$

Assim, a saída V_o do amplificador “U6” é o inverso do valor de entrada V_i , segundo a equação (5).

$$V_o = -\frac{R16}{R17} \cdot V_i \quad (5)$$

O Amplificador “U7”, em sua entrada não inversora, tem a tensão de interesse que deve ser aplicada no resistor de potência, assim, sua entrada inversora está ligada diretamente no resistor “R1”, resistor de 0,1 Ω. Todos os amplificadores operacionais tem alimentação de +12 volts e -12 volts.

A saída do amplificador operacional “U7” está ligada no terminal *gate* do transistor MOSFET de canal tipo N. O *drain* é ligado no terminal positivo no módulo enquanto o *source* no resistor de potência “R1”, que faz conexão ao terminal negativo do módulo. Para a escolha do MOSFET foi considerado a corrente máxima do módulo e a potência dissipada, assim, foi escolhido o modelo IRF540N. Os principais parâmetros deste componente eletrônico, considerando temperatura ambiente de 25 °C, estão relacionados na tabela 2 e foram obtidos em seu *Datasheet*.

Tabela 2 - Parâmetros do IRF540N

Parâmetros	Valores
Corrente de dreno (I_D)	33 A
Potência dissipada (P_{max})	120 W
Tensão de threshold (V_{th})	2 ~ 4 V
Tensão entre dreno e source (V_{DS})	100 V
Carga total de gate (Q_G)	79 nC

Fonte: International Rectifier.

Para garantir a proteção do MOSFET, foi adicionado um resistor de 100 k Ω (R13) em paralelo de *gate* e *drain*. O resistor em série no terminal Gate de 100 Ω (R12) protege contra curtos entre os terminais *gate* e *source*, também define o tempo de subida (t_r) da tensão *gate-source* através da corrente no *gate* (I_G), calculado pelas equações (5), (6) e (7).

$$V_{GS} = I_G \cdot R_G \quad (5)$$

$$I_G = \frac{V_{GS}}{R_G} = \frac{4}{100} = 40 \text{ mA} \quad (6)$$

$$t_r = \frac{Q_G}{I_G} = \frac{79 \cdot 10^{-9}}{40 \cdot 10^{-3}} = 2 \cdot 10^{-6} \text{ s} = 2 \text{ } \mu\text{s} \quad (7)$$

O valor de t_r define o tempo para carga do capacitor intrínseco entre os terminais *gate-source* do transistor MOSFET.

Com o intuito de amenizar o ruído do sinal de tensão sobre o resistor de 0,1 Ω foi inserido um capacitor cerâmico de 470 pF (C1) em paralelo ao mesmo.

3.4 Dissipador de calor

A carga eletrônica projetada é capaz de dissipar 60 W de potência, assim, esta potência é consumida entre o MOSFET IRF540N e o resistor de potência de 0,1 Ω .

Considerando a corrente de curto-circuito do módulo, a potência máxima do resistor é de 1,41 W, calculada na equação (8).

$$P_{R1} = R \cdot I_{SC}^2 = 0,1 \cdot 3,75^2 = 1,41 \text{ W} \quad (8)$$

Com isso, a potência dissipada sobre o transistor MOSFET durante a carga máxima é de 58,59 W, calculada pela equação (9).

$$P_{MOSFET} = P_{max} - P_{R1} = 60\text{W} - 1,41\text{W} = 58,59 \text{ W} \quad (9)$$

Para melhor dissipar o calor originado pelo efeito da passagem de corrente no transistor, utiliza-se um dissipador de calor. Os valores dos parâmetros do sistema transistor, dissipador e ambiente necessários para cálculo da resistência térmica do dissipador para o ambiente (R_{thHA}) foram retirados do *datasheet* do transistor MOSFET IRF540N e estão na tabela 3.

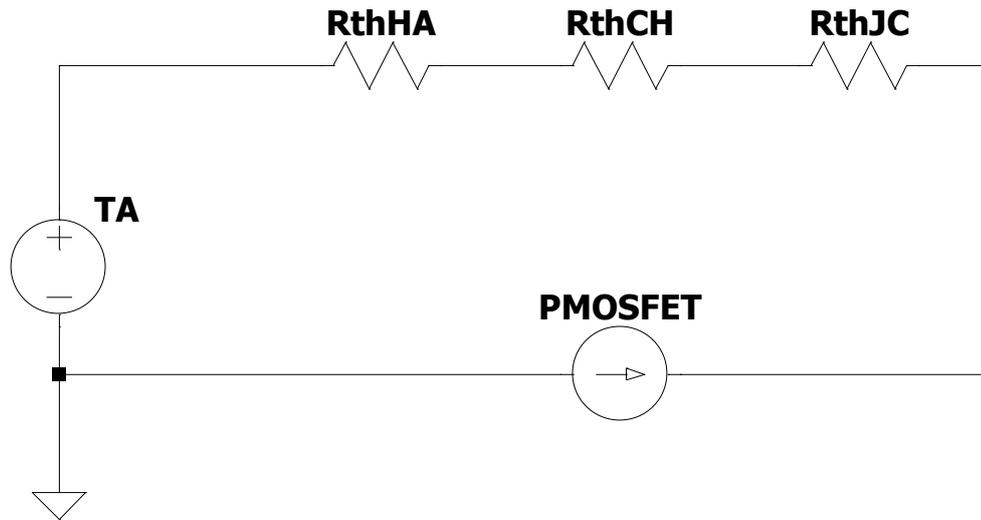
Tabela 3 - Características térmicas do IRF540N.

Parâmetros	Valores
Resistência térmica da junção para o encapsulamento (R_{thJC})	1,25 °C/W
Resistência térmica do encapsulamento para o dissipador (R_{thCH})	0,5 °C/W
Temperatura máxima da junção ($T_{jmáx}$)	175 °C
Temperatura ambiente (T_A)	25 °C

Fonte: International Rectifier

O circuito equivalente está representado na figura 12.

Figura 12 – Circuito equivalente.



Fonte: Autoria própria.

Para o cálculo da resistência térmica do dissipador é utilizada a equação (10), com os valores listados na equação (11). A temperatura máxima de junção foi considerada de 150 °C, como recomendação do *datasheet*, para proteção térmica do componente.

$$R_{thHA} = \frac{T_{Jmáx} - T_A}{P_{MOSFET}} - R_{thJC} - R_{thCH} \quad (10)$$

$$R_{thHA} = \frac{150 - 25}{58,59} - 1,25 - 0,5 = 0,38 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}} \quad (11)$$

Assim, para dissipar a potência que estará sendo requisitada pela carga no transistor e manter a temperatura do componente abaixo do determinado é necessário utilizar um dissipador de calor conectado ao mesmo. Com o intuito de melhorar a eficiência do fluxo de calor entre o transistor, dissipador e ambiente, pode-se adicionar um ventilador a fim de forçar a ventilação sobre o dissipador de calor.

O ventilador a ser utilizado é o modelo AD0812UB-A76GL, com tensão de alimentação de 12 V, corrente de 0,30 A, e velocidade de 3600 rpm, valores retirados do *datasheet* (ADDA). O fluxo de ar ($f a_v$) do ventilador é de $0,189 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ e tem área (A_v) de $0,0064 \text{ m}^2$, logo, a ventilação forçada tem velocidade de aproximadamente $3 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, calculada na equação (12).

$$Vel_{ar} = \frac{f a_v}{A_v} = 2,9595 \frac{m}{s} \quad (12)$$

Como a ventilação forçada catalisa a dissipação de calor no dissipador, é aplicado um fator de correção da resistência térmica do mesmo. Este fator é característico do modelo do dissipador.

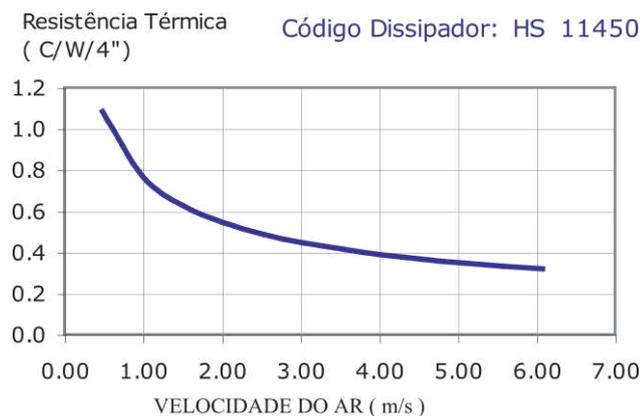
Dentre os dissipadores disponíveis, optou-se por utilizar neste projeto o HS 11450. Os principais dados estão presentes na tabela 4.

Parâmetros	Valores
Perímetro	1087 mm
Resistência Térmica	1,42 °C / W
Peso Linear	5,5 kg / m
Capacidade Térmica	921 J / kg K

Fonte: Catálogo HS Dissipadores, 2023.

O gráfico da relação entre Resistência térmica do dissipador e velocidade do ar está representado na figura 13.

Figura 13 - Resistência térmica pela velocidade do ar.



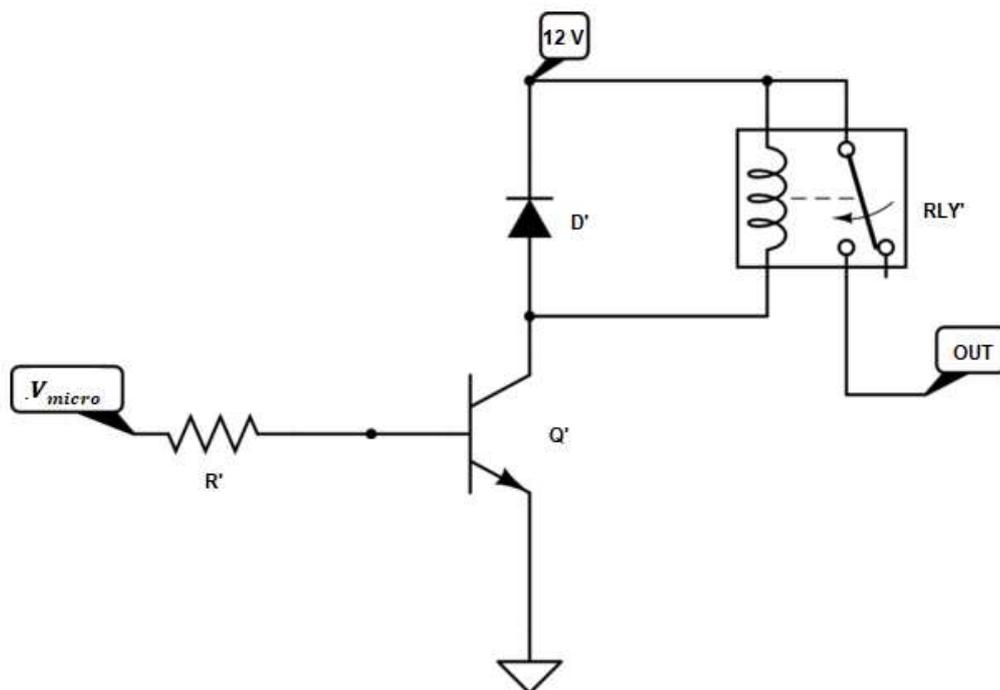
Fonte: Catálogo HS Dissipadores, 2023.

A velocidade do ar calculada é de 2,9595 m/s, assim, o fator a ser multiplicado pela resistência térmica do dissipador é aproximadamente 0,45 °C/W/4". Logo, a

resistência do dissipador com ventilação forçada é de $0,639 \text{ } ^\circ\text{C/W/4}$ ", maior do que a necessária.

Para o acionamento do ventilador, será enviado um sinal de nível lógico alto ao módulo de transistor e relé JQC-3FF-S-Z, que fechará seu contato e energizará o ventilador em 12V. A representação deste circuito está na figura 14, em que o transistor é nomeado como Q', o relé como RLY', o resistor da base como R' e o diodo como D'.

Figura 14 - Esquemático do módulo transistor e relé.



Fonte: Autoria própria.

O sinal V_{micro} representa o sinal que o microcontrolador envia para o acionamento do ventilador na base do transistor. 12 V é a tensão de 12 volts utilizada como fonte para o acionamento do relé e alimentação do ventilador. A saída do relé, *out*, alimenta em 12 volts o ventilador do projeto.

3.5 Instrumentação

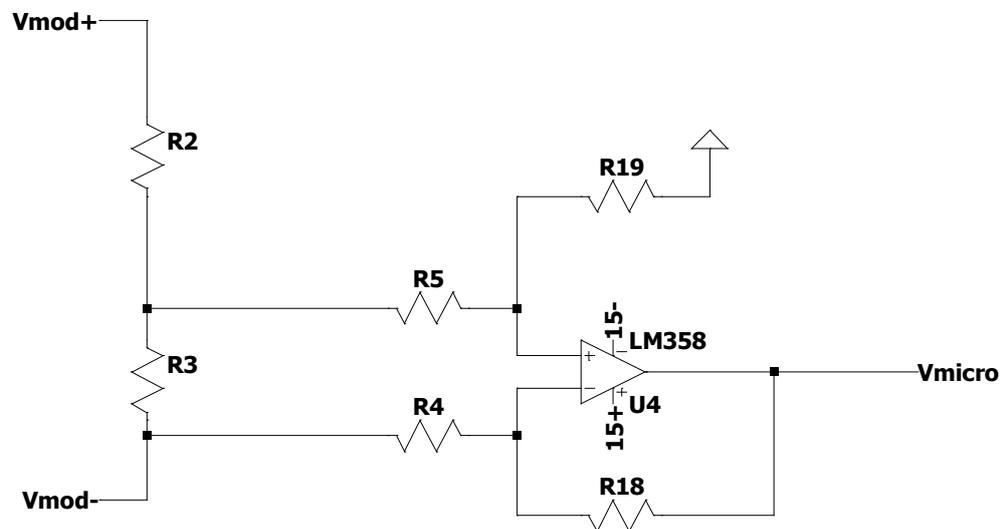
Para adquirir o comportamento da curva característica do módulo fotovoltaico, faz-se necessário obter pontos de tensão e corrente do mesmo. Para isso são

projetados sensores de tensão e corrente, também é implementado o sensor de temperatura.

3.5.1 Tensão do módulo fotovoltaico

É necessário adequar o nível de tensão do módulo fotovoltaico (0 a V_{oc}) ao nível de tensão admissível pelo AD do microcontrolador (0 a 3,3 V). O circuito é formado por AmpOp e resistores, e ligado em paralelo com os terminais do módulo fotovoltaico. Na figura 15 pode-se observar o esquemático do sensor.

Figura 15 - Esquemático do sensor de tensão.



Fonte: Autoria própria.

Os resistores “R2” e “R3” formam um divisor de tensão, e são escolhidos de modo a fazer com que a tensão no resistor “R3” seja de 10 V quando o módulo estiver com 22,68 V. O resistor “R3” está sujeito a impedância de entrada do amplificador diferencial “U4”, com isso, o divisor resistivo será idealmente projetado mas deve ser ajustado ao implementar o sensor.

O resistor “R2” é definido como 13 kΩ e “R3” é calculado utilizando a equação (13) do divisor resistivo, reorganizada na equação (14).

$$V_{r3} = \left(\frac{R_3}{R_2 + R_3} \right) \cdot V_{R3} \quad (13)$$

$$R_3 = \left(\frac{V_{R3}}{V_{in} - V_{R3}} \right) \cdot R_2 = \left(\frac{10}{22,68 - 10} \right) \cdot 13000 = 10252 \Omega \quad (14)$$

Com a finalidade de usar resistores comerciais é utilizada uma associação de resistores com resistência equivalente de 10251 Ω , o que não acarretou mudanças significativas no resultado final.

Paralelo ao divisor resistivo está o circuito de condicionamento que adequa essa tensão à entrada do microcontrolador, um intervalo de 0V a 3,3 V. O AmpOp “U4”, juntamente com seus resistores, trabalha como um amplificador diferencial, isto é, sua saída é a diferença de potencial entre suas entradas multiplicada por um ganho que relaciona as resistências. Para isso é calculado o ganho necessário para condicionar a tensão a 3,3 V, visto na equação (15).

$$Ganho U4 = \frac{3,3 V}{10 V} = 0,33 \quad (15)$$

A partir da definição do ganho é possível dimensionar os valores das resistências, para isso são escolhidos os valores dos resistores R4 e R5 (33k Ω) e calculados os valores dos resistores R18 e R19. A equação (16) representa o ganho e o cálculo da resistência está representada pela equação (17).

$$Ganho U4 = \frac{R18}{R4} \quad (16)$$

$$R18 = R4 \cdot (Ganho U4) = 33000 \cdot 0,33 = 10890 \Omega \quad (17)$$

A tensão de entrada do microcontrolador fica entre 0 e 3,2787 V, compatível à faixa de tensão desejada, calculada na equação (18).

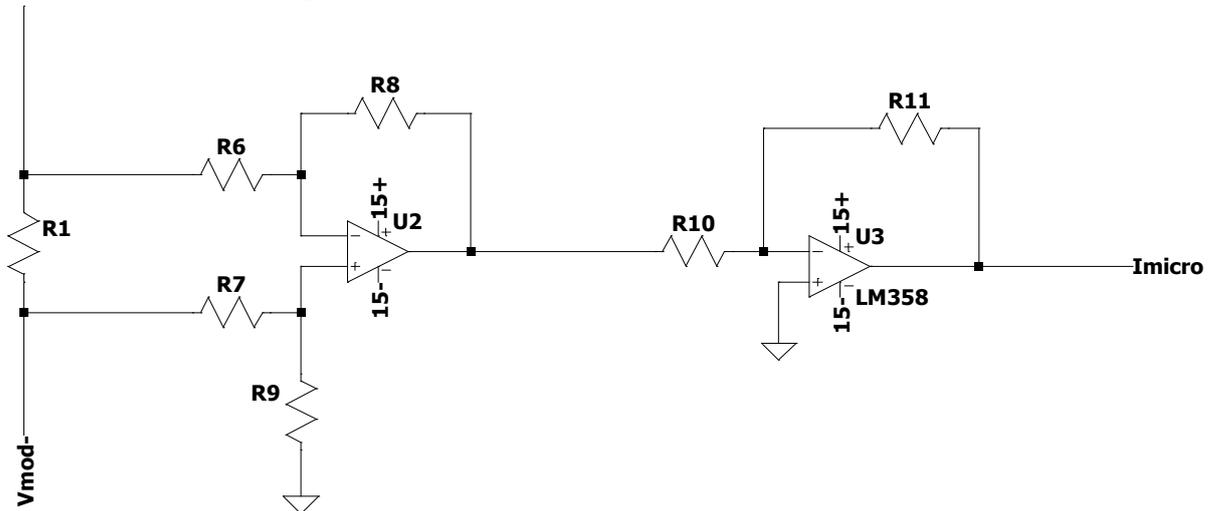
$$V_{0out} U4 = \frac{R18}{R4} \cdot V_i = \frac{10820}{33000} \cdot 10 = 3,2787 V \quad (18)$$

3.5.2 Corrente do módulo fotovoltaico

Outro parâmetro necessário para obtenção da curva característica é a corrente que passa pelo módulo. Para aquisição do valor de corrente é desenvolvido um sensor de corrente que é conectado em paralelo ao resistor *shunt*, representado

na figura 16. O sensor obtém o valor da tensão sobre o resistor e, com um ganho, converte o valor da tensão sobre o resistor no valor da corrente. Após este ganho, o sinal é adequado para valores entre 0 e 3,3 V, entrada do microcontrolador.

Figura 16 - Esquemático do sensor de corrente.



Fonte: Autoria própria.

Neste circuito, o amplificador operacional “U2” recebe a tensão sobre o resistor “R1”. Este sinal é amplificado para representar a corrente que circula pelo módulo. Uma vez que o resistor é de 0,1 Ω , o ganho é ajustado em 10. Desta forma, a tensão na saída de U2 representa a corrente de saída do módulo, e o acesso a esse ponto do circuito facilita o ajuste dos ganhos do circuito. Para R8 e R9 foram escolhidos resistores de 10k Ω , e assim, os resistores R6 e R7 são calculados pela equação (19).

$$R_6 = R_7 = \frac{V_{out}}{V_{in}} \cdot R_8 = \frac{3,75}{0,375} \cdot 10k = 100k \Omega \quad (19)$$

Assim, a tensão de saída do amplificador diferencial “U2” tem um ganho de 10, e seu intervalo fica entre 0 e 3,75 V, calculado na equação (12).

$$V_{out} = -V_{in} \frac{R_6}{R_8} = -0,375 \cdot \frac{100k}{10k} = -3,75 V \quad (10)$$

O AmpOp “U3” é um inversor com ganho calculado para garantir uma tensão compatível com a entrada do microcontrolador, entre 0 e 3,3 V, este ganho está caracterizado na equação (21).

$$Ganho U3 = -\frac{V_{out}}{V_{in}} = -\frac{3,3}{-3,75} = 0,88 \quad (21)$$

Definindo o resistor “R10” com valor de 10 kΩ, calcula-se “R11” em 8800 Ω pela equação (22).

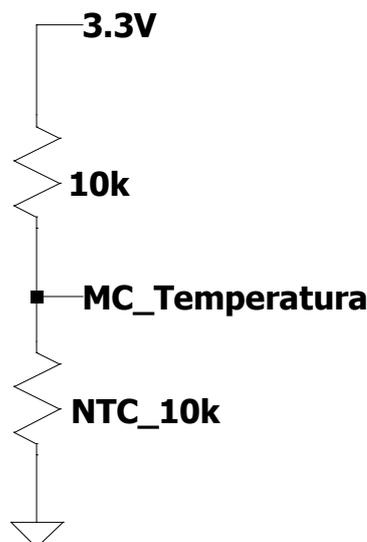
$$R11 = R10 \cdot (Ganho U3) = 10000 \cdot 0,88 = 8800 \Omega \quad (22)$$

3.5.3 Sensor de temperatura

O sensor de temperatura NTC 10 kΩ varia a resistência de maneira não linear à variação de temperatura, assim, ao associar um resistor de 10 kΩ em série, é possível, pela variação da tensão sobre o resistor, calcular a temperatura. Este sinal de tensão sobre o termistor NTC é o sinal que vai para o microcontrolador (MARTINAZZO, 2016).

O esquema deste circuito está representado na figura 17.

Figura 17 - Sensor de temperatura.



Fonte: Autoria própria.

Uma tensão de 3,3 V é aplicada sobre o resistor de 10 k Ω e o NTC 10 k Ω , assim, com a variação da temperatura, a resistência do termistor varia, logo, a tensão sobre o mesmo também varia. O sinal da tensão sobre o termistor NTC é enviado ao microcontrolador, em que é feita a conversão para graus celsius.

A conversão da variação da resistência em relação a temperatura é realizada utilizando uma variação da Equação de Steinhart-Hart, equação empírica matemática com boa aproximação da temperatura real. Nesta equação, através do valor da resistência do termistor e da constante beta do termistor, calcula-se a temperatura (ELETROGATE, 2022).

3.6 Código

O programa para controle do sistema é desenvolvido no software IDE Arduino, o qual tem compatibilidade com o microcontrolador ESP32 WROOM. A estrutura é dividida em funções para os sensores de tensão, corrente e temperatura, e acionamento do ventilador. O controle da tensão de saída do microcontrolador é feito com o incremento de 0 até 3,3 V.

Para os sensores de tensão e corrente, os pinos ADC 13 e 12, com resolução de 12 bits, foram definidos como entradas analógicas. Assim, o microcontrolador percebe os sinais vindos do circuito entre 0 e 3,3 V e converte para valores de 0 a 4095. Estes valores são transformados para as escalas reais a partir da lógica de programação, entre 0 e 22,68 V para tensão e 0 e 3,75 A para a corrente.

Foi implementada uma função em que se a temperatura do transistor ultrapassar 115 °C, a saída do microcontrolador é desabilitada, zerando a corrente do circuito. Também é retornado a mensagem de “Sobret temperatura no MOSFET”. Essa ação ocorre para proteção do transistor devido ao limite térmico do mesmo.

A função de obtenção dos dados prescreve os valores dos parâmetros de interesse no monitor serial da IDE Arduino. Os valores obtidos são de corrente, tensão e temperatura no MOSFET.

O ventilador é acionado pelo terminal digital 33, o qual envia sinal de nível lógico alto para ligar o ventilador e nível lógico baixo para desligar.

O sinal para o controle da corrente é feito pelo pino DAC 25, de 8 bits de resolução.

O código fonte desenvolvido para o projeto está comentado no Apêndice A.

Neste capítulo foram dimensionados os elementos que compõem o circuito da carga eletrônica, tanto a parte de controle de corrente quanto do processamento dos sinais dos parâmetros da curva. Também foi definido o microcontrolador que enviará sinais de comandos e receberá os dados de interesse. Nos próximos capítulos serão abordados os resultados do circuito projetado.

4 SIMULAÇÃO E IMPLEMENTAÇÃO

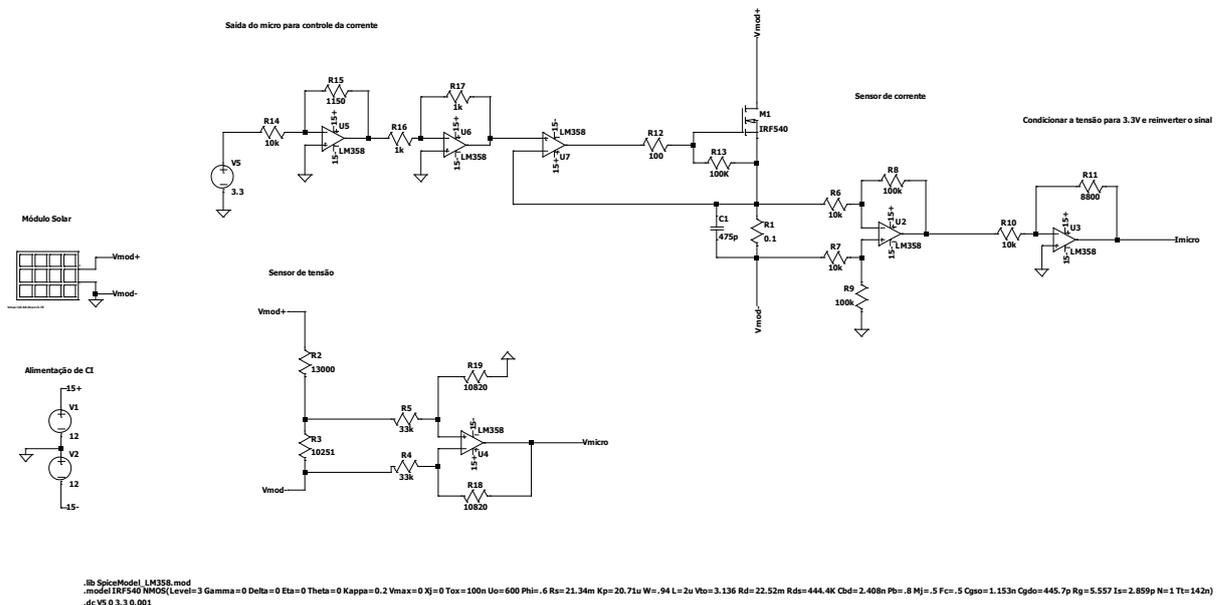
Após a definição dos elementos do projeto do circuito, serão relatados os resultados obtidos em simulações da carga eletrônica, projeto da placa, calibração do circuito e resultados experimentais. Os mesmos serão abordados em quatro divisões, vistas a seguir.

4.1 Simulações

Para a simulação do circuito em um modelo de módulo fotovoltaico, foi utilizado o modelo RSM060P. Suas características estão representadas na tabela 1, visto anteriormente.

Após o desenvolvimento do circuito proposto, o circuito foi simulado no programa LTspice, software de livre acesso dedicado a simulações de circuitos. O esquemático simulado está representado na figura 18.

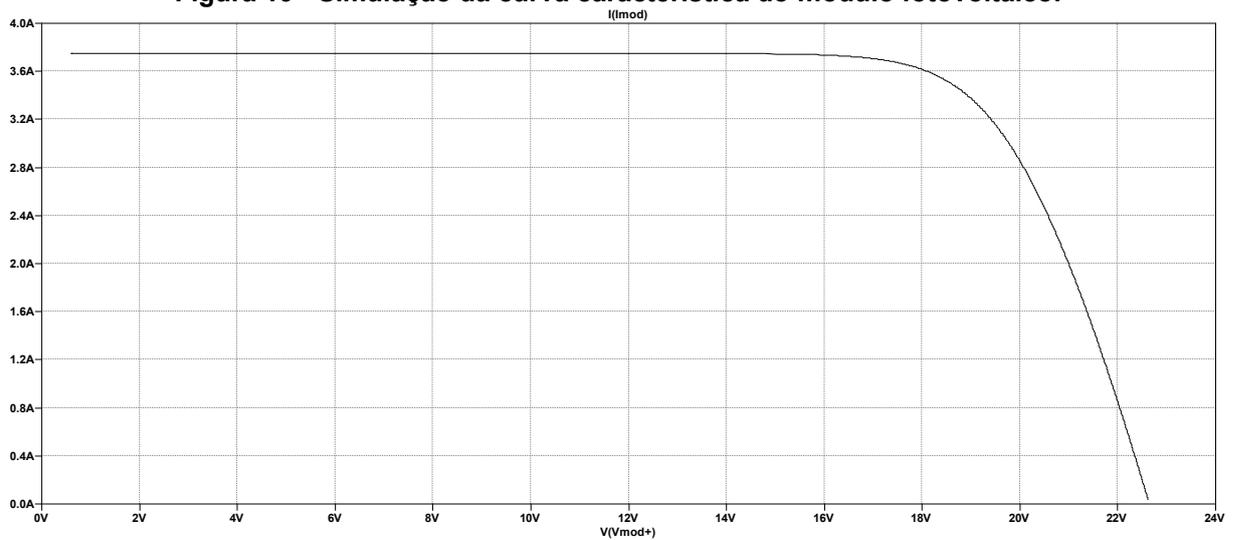
Figura 18 – Circuito simulado no LTspice.



Fonte: Autoria própria.

O resultado obtido foi condizente com as particularidades da curva característica do módulo fotovoltaico, e pode ser observado na figura 19.

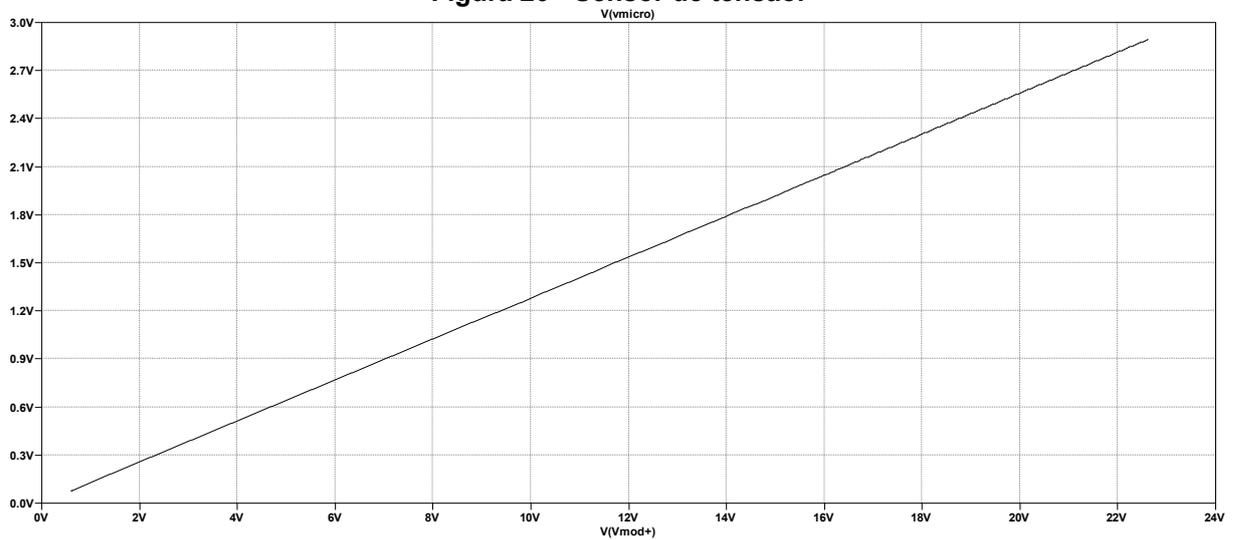
Figura 19 - Simulação da curva característica do módulo fotovoltaico.



Fonte: Autoria própria.

A figura 20 mostra os valores de tensão condicionados para a faixa de valores para o microcontrolador (V_{micro}) em relação a tensão do módulo (V_{mod+}), nota-se a linearidade entre a relação e que os valores estão dentro da faixa de tensão calculada.

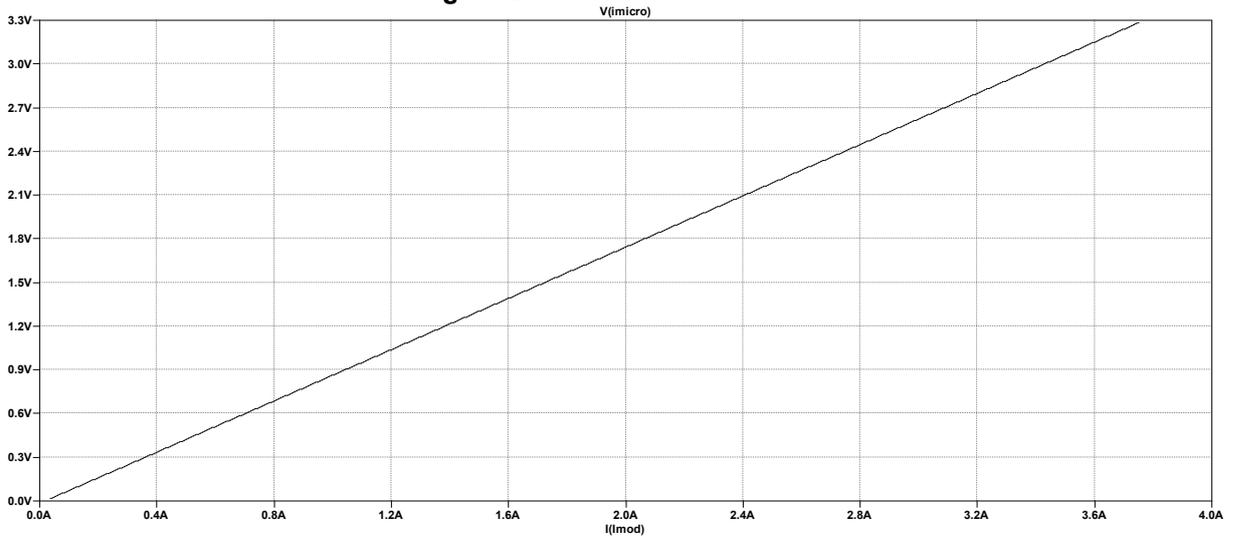
Figura 20 - Sensor de tensão.



Fonte: Autoria própria.

O condicionamento do valor da corrente do módulo (I_{mod}) para a tensão de entrada do microcontrolador (I_{micro}) pode ser observado na figura 21. Este circuito possui linearidade e condiz com os valores de tensão esperados.

Figura 21 - Sensor de corrente.



Fonte: Autoria própria.

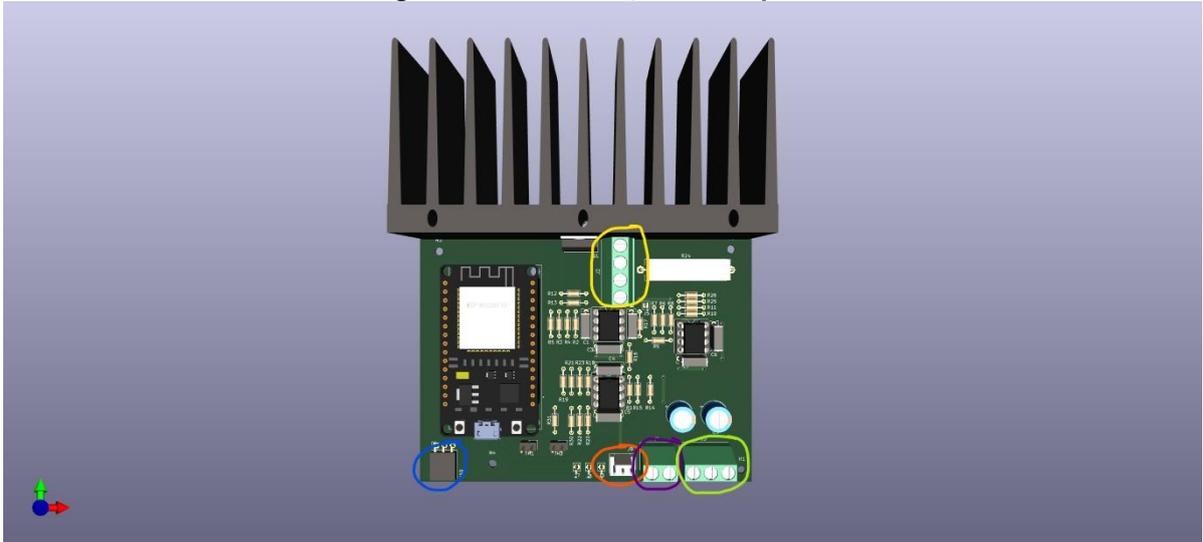
Com as validações dos circuitos por simulações, a sequência deste projeto é a prototipagem da placa e implementação do microcontrolador, que irá controlar a tensão que varia a corrente do módulo, e obter os valores de tensão e corrente.

4.2 Projeto da placa

Para a modelagem do circuito é utilizado o *software* KiCAD, devido ao seu livre acesso, recursos e bibliotecas disponíveis de componentes. O projeto do circuito está representado nos Apêndices B e C.

Busca-se por uma placa compacta e organizada, o modelo de circuito impresso final do projeto está ilustrado na figura 22. Foram adicionados capacitores eletrolíticos de 220 μ F na entrada das alimentações +/- 12 V e capacitores cerâmicos de 471 pF nos pinos de alimentação dos circuitos integrados para filtrar variações de tensão.

Figura 22 - Visualização 3D da placa.

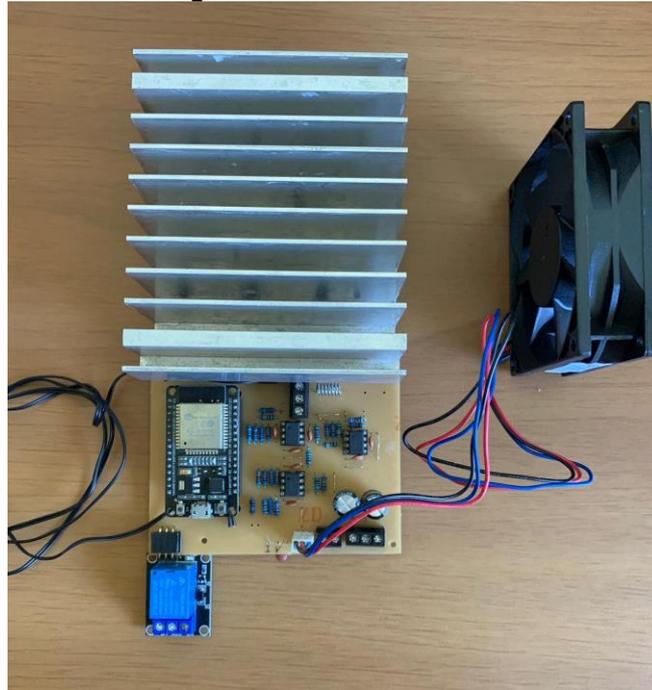


Fonte: Autoria própria.

O conector dedicado para a alimentação dos amplificadores operacionais está indicado pelo círculo verde. O círculo amarelo indica o conector em que é conectado o módulo fotovoltaico e conectores para o resistor *shunt*, caso seja necessária a alteração do mesmo. O círculo azul indica o conector para ligação do módulo relé, em que sua saída é conectada no conector indicado em roxo. Em laranja está indicado o conector para o ventilador.

A placa foi confeccionada na prototipadora pelos responsáveis da sala de apoio da UTFPR-PB, a montagem dos componentes foi realizada pelo estudante em que realiza o desenvolvimento do trabalho. Nas figuras 23 e 24 estão imagens da placa montada.

Figura 23 - Placa montada.



Fonte: Autoria própria.

Figura 24 - Placa montada aproximada.



Fonte: Autoria própria.

Ao montar a placa, verificou-se algumas melhorias de projetos a serem feitas em futuras versões. Algumas delas são: deixar mais espaço entre o resistor *shunt* e

os conectores; deixar o MOSFET próximo a borda da placa e usar conectores maiores e mais robustos.

4.3 Calibração

Inicialmente, os testes são realizados para verificar o funcionamento do circuito de carga eletrônica e a linearidade dos sensores. O circuito é testado em uma fonte de corrente controlada, tendo em vista a praticidade e segurança ao limitar a tensão e corrente da fonte.

Foram efetuados vários testes em diversos pontos e obtidos os valores de tensão sobre o resistor *shunt* e da fonte, assim, observou-se o funcionamento da carga eletrônica e a linearidade dos sensores. Foram adicionados capacitores de 22 pF na saída de ambos os sensores com a finalidade de minimizar os ruídos.

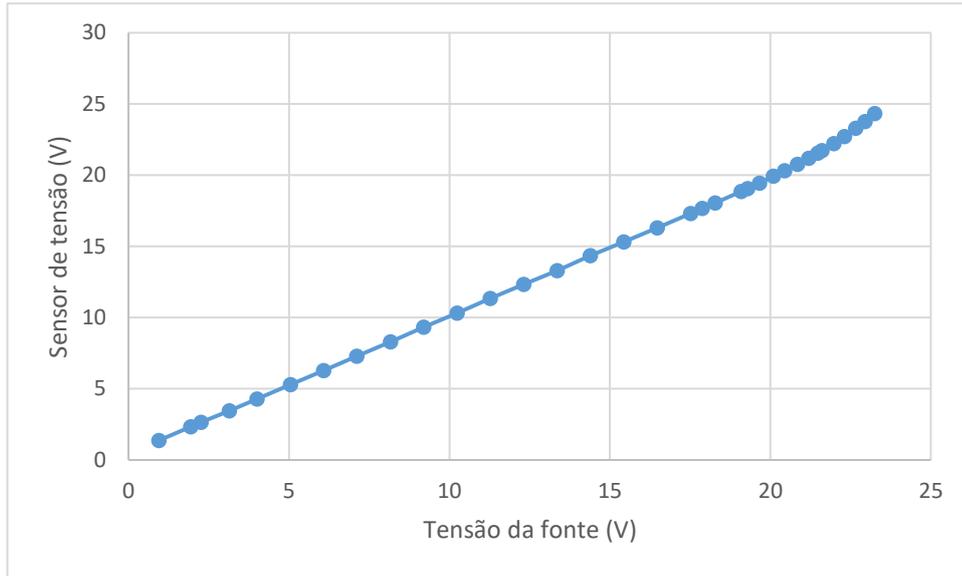
O sinal de entrada do sensor de corrente é proporcional a saída e seus valores são condizentes com os calculados, idem para o sensor de tensão. Porém, os conversores do microcontrolador não apresentam linearidades em certos pontos, isso faz com que as leituras dos dados estivessem erradas.

Como verificado que os sinais que chegam nos terminais dos conversores são condizentes, indicando problema na conversão do micro, são levantados diversos pontos em leituras de corrente e tensão para calibrar os sensores.

4.3.1 Calibração do sensor de tensão

Para a calibração do sensor de tensão é variada a tensão de uma fonte controlada e obtido os valores lidos pelo sensor e os valores reais, mostrados na fonte e confirmados com um multímetro. O gráfico da figura 25 mostra o comportamento do sensor em diferentes faixas de tensão.

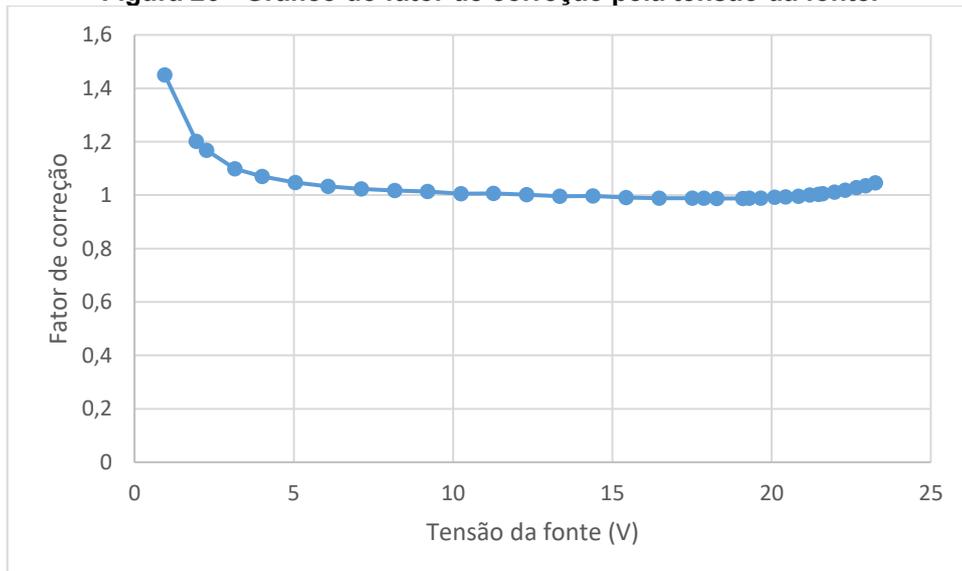
Figura 25 - Gráfico do comportamento da tensão da fonte pela tensão lida no microcontrolador.



Fonte: Autoria própria.

A calibração do sensor é feita com a razão do valor lido pelo valor real, o inverso deste fator é aplicado ponto a ponto para a correção do sensor. O comportamento do fator de correção pela tensão real pode ser visto no gráfico da figura 26.

Figura 26 - Gráfico do fator de correção pela tensão da fonte.



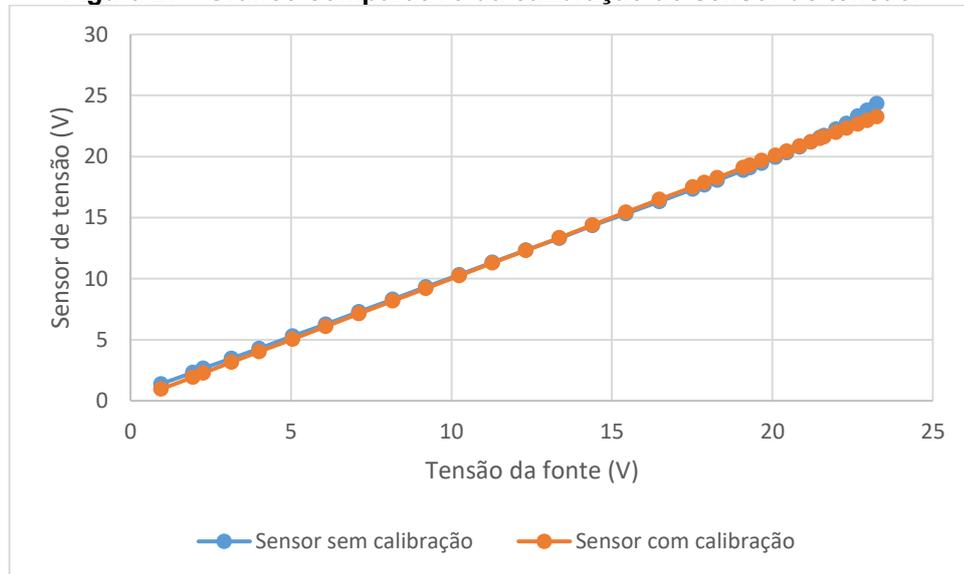
Fonte: Autoria própria.

No gráfico acima, nota-se a não linearidade dos valores de tensão na faixa de 0 a 7 volts, aproximadamente. Na faixa de valores entre 7 e 22 volts, o sensor

apresenta boa exatidão. Após 22 volts o sensor apresenta um início de não linearidade novamente.

O gráfico da figura 27 compara os valores de tensão do sensor sem e com calibração.

Figura 27 - Gráfico comparativo da calibração do sensor de tensão.

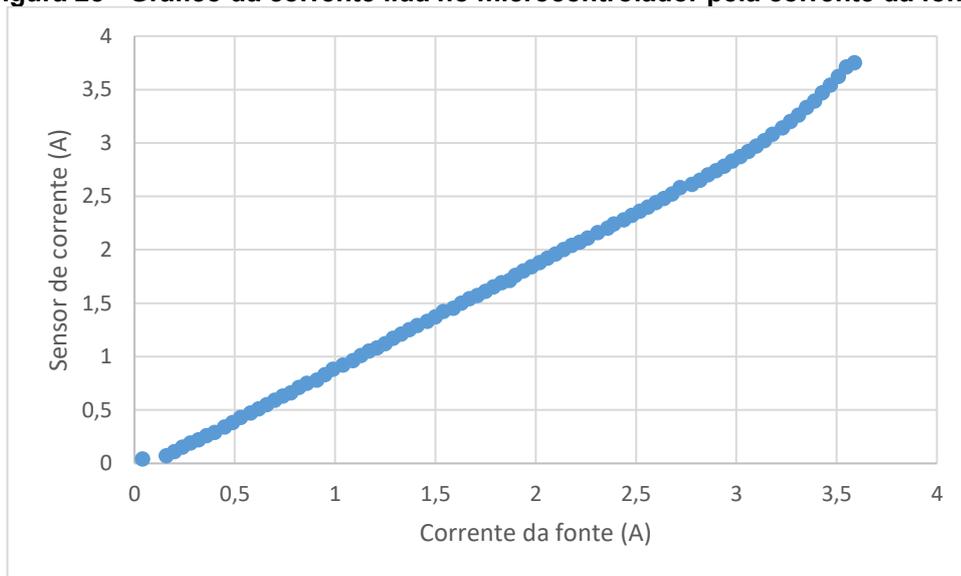


Fonte: Autoria própria.

4.3.2 Calibração do sensor de corrente

Para a calibração do sensor de corrente, varia-se a corrente em toda a faixa que o circuito opera e obtido os valores de corrente lidos pelo microcontrolador e pela fonte em teste. O gráfico que relaciona essas duas leituras de corrente está representado na figura 28.

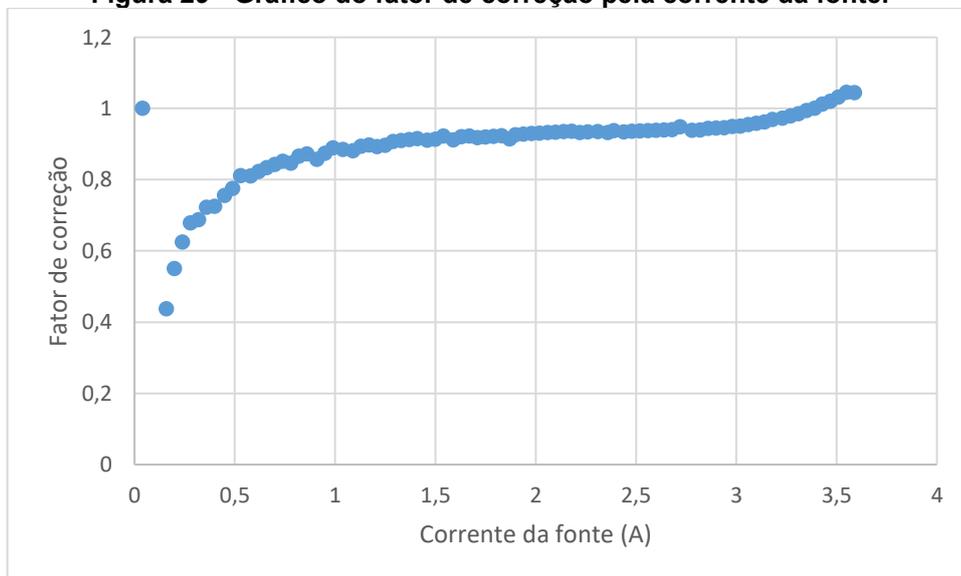
Figura 28 - Gráfico da corrente lida no microcontrolador pela corrente da fonte.



Fonte: Autoria própria.

Para calibrar o sensor é feita a razão entre a corrente lida no microcontrolador pela corrente da fonte, em que o inverso deste fator é aplicado ponto a ponto. O gráfico do fator de correção pela corrente da fonte está representado na figura 29.

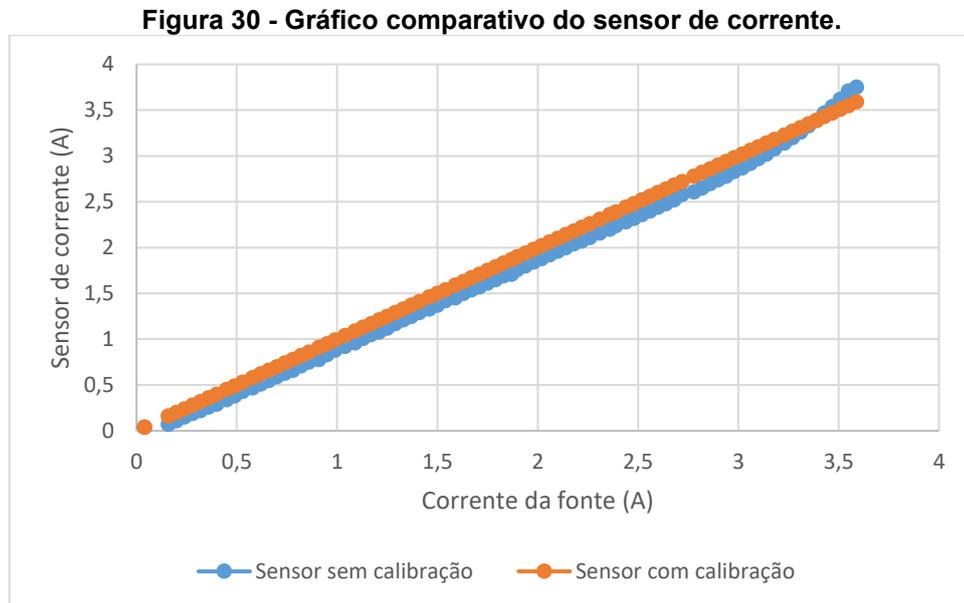
Figura 29 - Gráfico do fator de correção pela corrente da fonte.



Fonte: Autoria própria.

Nota-se a não linearidade em valores baixos de corrente, entre valores de 0 e 1 ampere, aproximadamente. Entre 1 e 3 amperes a corrente apresenta linearidade, com razão pouco abaixo do valor real. Após 3 amperes, aumenta a razão entre as correntes lidas.

O gráfico da figura 30 mostra a comparação do sensor de corrente sem e com a calibração.



Fonte: Autoria própria.

Após a realização dos testes do sensor de corrente, notou-se que a corrente máxima que o circuito é capaz de extrair da fonte é menor do que o esperado. O projeto indicava valor máximo de corrente de 3,75 A, porém, foi possível obter 3,58 A.

A diferença entre esses valores ocorre devido ao microcontrolador não entregar 3,3 V em sua saída. Idealmente, a saída do ESP32 tem saída de 3,3 V, entretanto, foi verificado que a tensão de saída máxima do pino em uso é de 3,16 V.

O valor de corrente esperado para o sinal de tensão de 3,16 volts é condizente, visto a equação (23).

$$I_{3,16V} = \frac{3,16}{3,3} * 3,75 = 3,59 A \quad (23)$$

4.4 Resultados experimentais

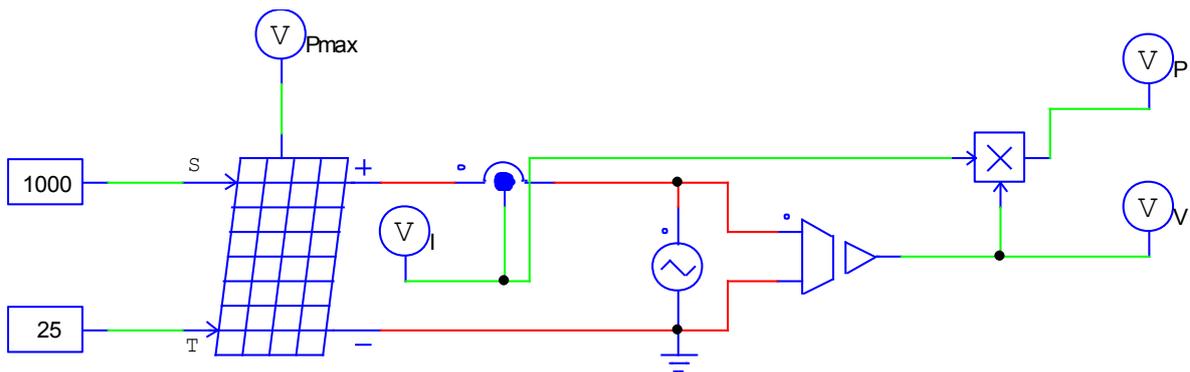
Os testes para obtenção da curva característica do módulo fotovoltaico são realizados com o equipamento ITECH Bi-directional Power Supply do modelo IT6018C-800-60. Este equipamento é uma fonte programável, em que se pode emular módulos fotovoltaicos e baterias.

O equipamento em modo de módulo fotovoltaico permite selecionar a tensão de circuito aberto, corrente de curto-circuito, pontos de máxima potência, radiação e nuvens sobre o módulo. Para os testes são consideradas condições ideais de funcionamento, irradiação de 1000 W/m^2 , temperatura de $25 \text{ }^\circ\text{C}$ e sem nuvens.

O circuito é conectado aos terminais do equipamento e habilitado para fazer a varredura da tensão e corrente.

Para obter as curvas característica e de potência dos módulos fotovoltaicos ideais, foi utilizado o *software* PSIM, em que é possível definir os parâmetros V_{mp} , I_{mp} , V_{OC} , I_{SC} , irradiação solar e temperatura. O PSIM é um programa para simulação de circuitos eletrônicos e foi utilizado com licença para estudante, a figura 31 mostra o circuito simulado.

Figura 31 – Circuito simulado no PSIM.

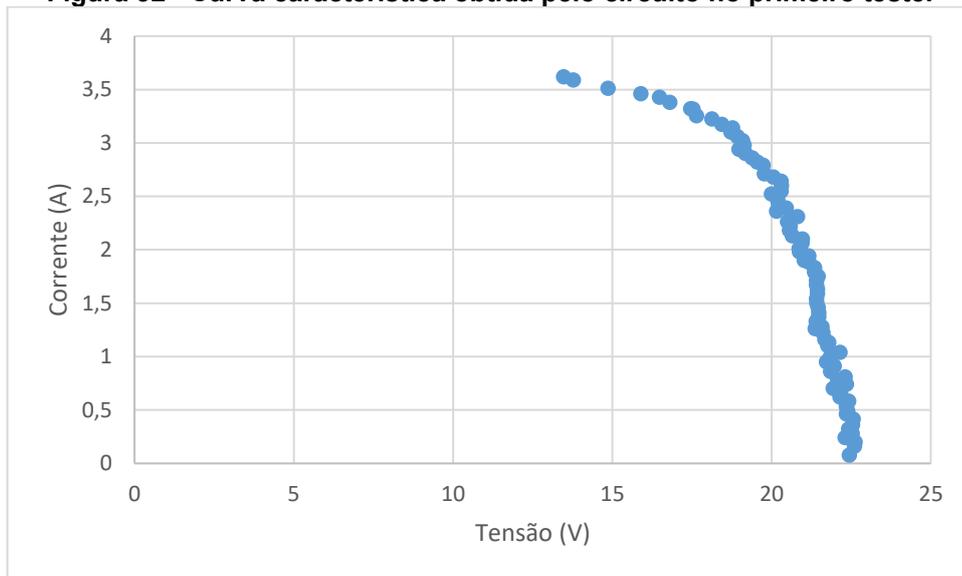


Fonte: Autoria própria.

4.4.1 Primeiro teste

Inicialmente, o teste é realizado com os parâmetros do módulo RSM060P, descritos anteriormente na tabela 1. O gráfico na figura 32 mostra o resultado do teste experimental.

Figura 32 - Curva característica obtida pelo circuito no primeiro teste.

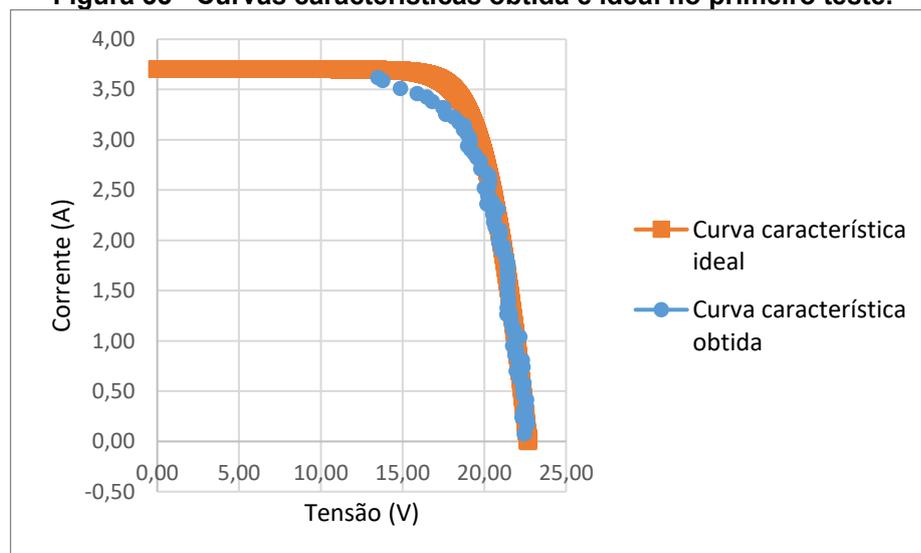


Fonte: Autoria própria.

Devido a limitação da saída do microcontrolador, não foi possível chegar na corrente máxima projetada de 3,75 A, com isso, a obtenção da curva foi comprometida na faixa de corrente entre 3,59 A e 3,75 A.

Utilizando o PSIM é possível obter a curva característica ideal para o módulo. O gráfico da curva ideal é sobreposto sobre a curva obtida pelo circuito, esta comparação está representada na figura 33.

Figura 33 - Curvas características obtida e ideal no primeiro teste.

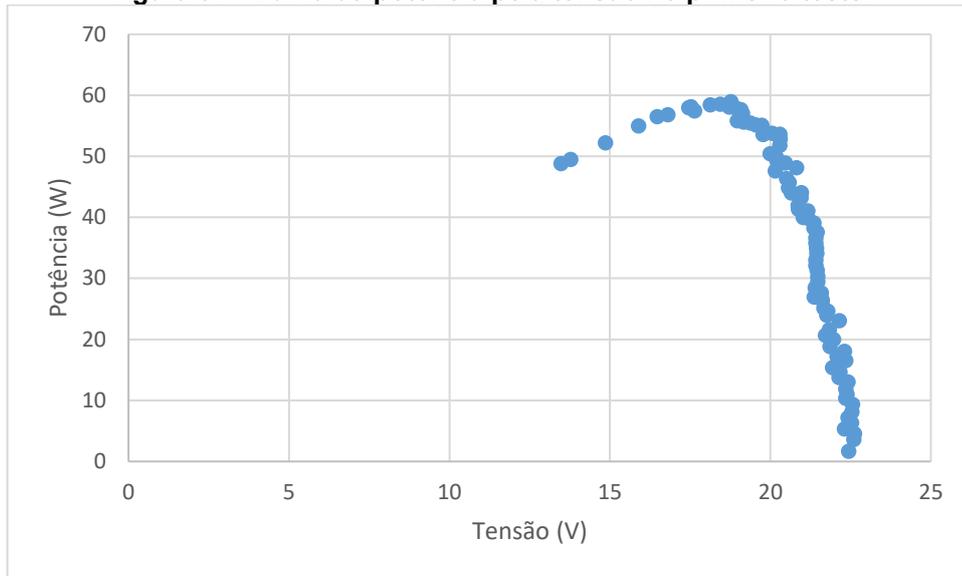


Fonte: Autoria própria.

A curva característica obtida é condizente com a curva esperada, foi possível observar a curvatura próximo ao ponto de máxima potência.

A partir da curva característica se obtém a curva da potência *versus* tensão, em que é possível verificar o ponto de máxima potência. A figura 34 mostra a curva da potência obtida pelo circuito.

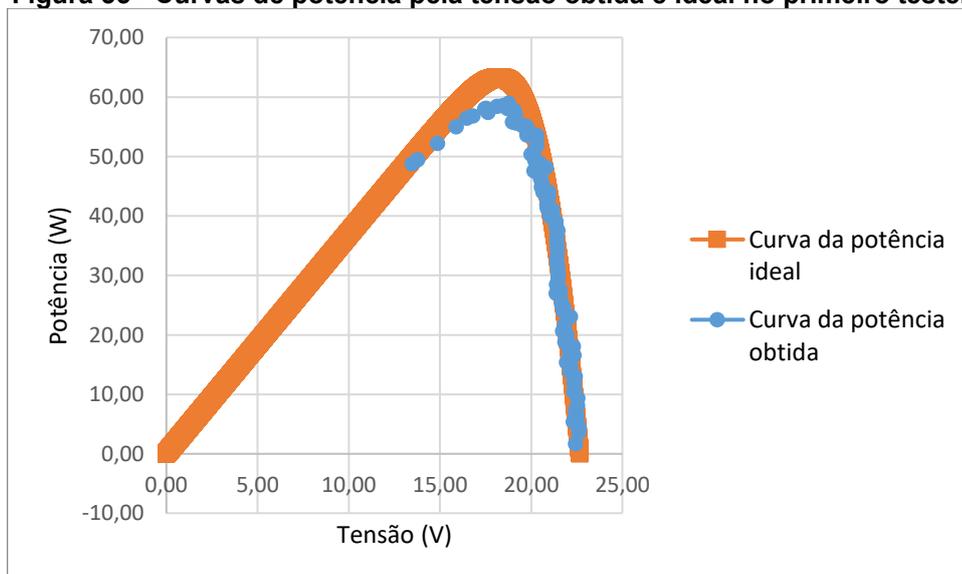
Figura 34 - Curva da potência pela tensão no primeiro teste.



Fonte: Autoria própria.

A curva ideal é obtida utilizando o PSIM e sobreposta na curva levantada, a figura 35 apresenta esta comparação.

Figura 35 - Curvas de potência pela tensão obtida e ideal no primeiro teste.



Fonte: Autoria própria.

A curva da potência do módulo fotovoltaico obtida está condizente com a curva esperada. Observando os picos dos gráficos, nota-se que o ponto de máxima potência obtido está muito próximo do ponto esperado, mesmo com a diferença de -4,24% da potência máxima obtida. Na tabela 5 estão as comparações entre os principais dados obtidos pelo circuito, os ideais e as diferenças percentuais entre os mesmos.

Tabela 5 - Comparação entre os resultados obtidos e ideais no primeiro teste.

Parâmetros	Valores obtidos	Valores ideais	Diferença percentual
P_{max}	58,97 W	61,58 W	-4,24 %
V_{OC}	22,44 V	22,68 V	-1,06 %
I_{SC}	3,59 A	3,75 A	-4,26 %
V_{mp}	18,77 V	18,54 V	1,24 %
I_{mp}	3,14 A	3,36 A	-6,55 %

Fonte: Autoria própria.

Comparando os resultados obtidos no primeiro teste, nota-se que os valores de tensão são muito próximos dos ideais, com diferença percentual na casa de +/-1 %. Enquanto os valores obtidos de corrente apresentaram maior erro percentual, por volta de 5 %. O valor obtido da potência máxima teve erro percentual de -4,24 %, sofrendo grande influência do erro da corrente, levando em consideração que a potência é obtida pela leitura da tensão e da corrente.

4.4.2 Segundo teste

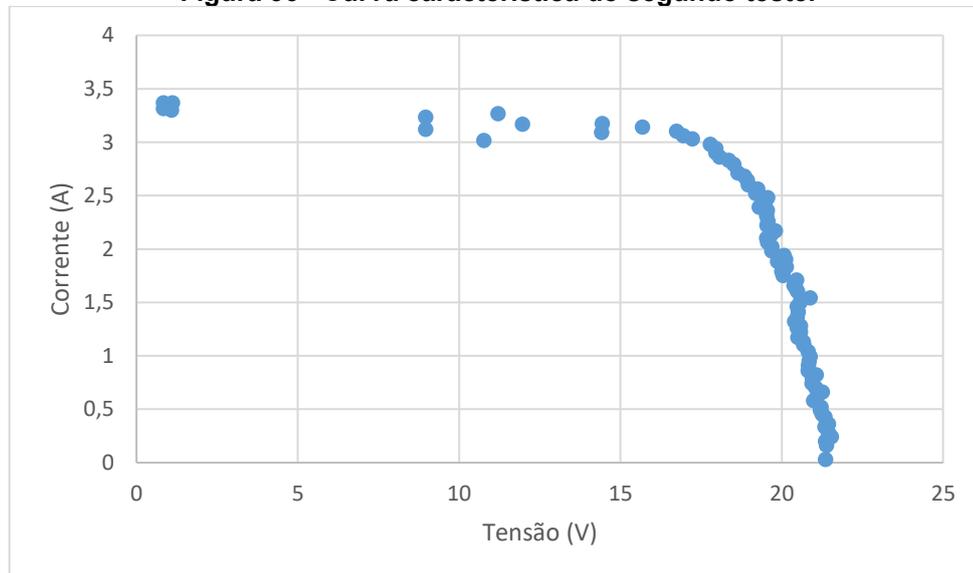
No segundo teste, para conseguir traçar a curva em toda faixa de corrente são alterados os parâmetros do módulo no IT6018C-800-60. A tabela 6 mostra os valores definidos para o segundo teste.

Tabela 6 - Parâmetros do módulo fotovoltaico para o segundo teste.

Parâmetros	Valores
V_{OC}	21,50 V
I_{SC}	3,20 A
V_{mp}	18,00 V
I_{mp}	2,85 A

Fonte: Autoria própria.

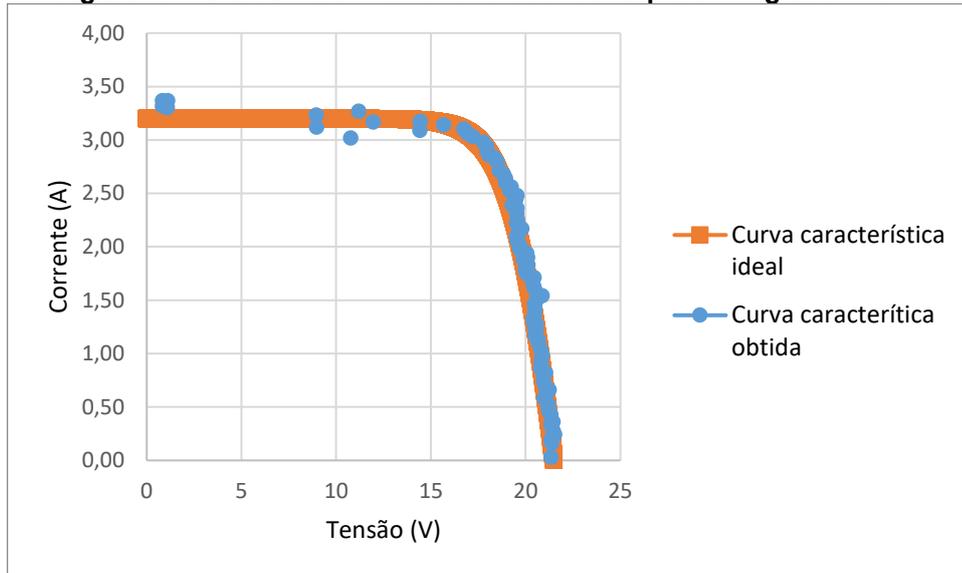
O gráfico da figura 36 mostra a curva característica obtida pelo circuito.

Figura 36 - Curva característica do segundo teste.

Fonte: Autoria própria.

Para verificar se o resultado obtido condiz com a curva características do um módulo fotovoltaico é simulada a curva ideal. A figura 37 mostra a curva característica do módulo em teste sobreposta à curva obtida pelo circuito.

Figura 37 – Curva característica obtida e ideal para o segundo teste.

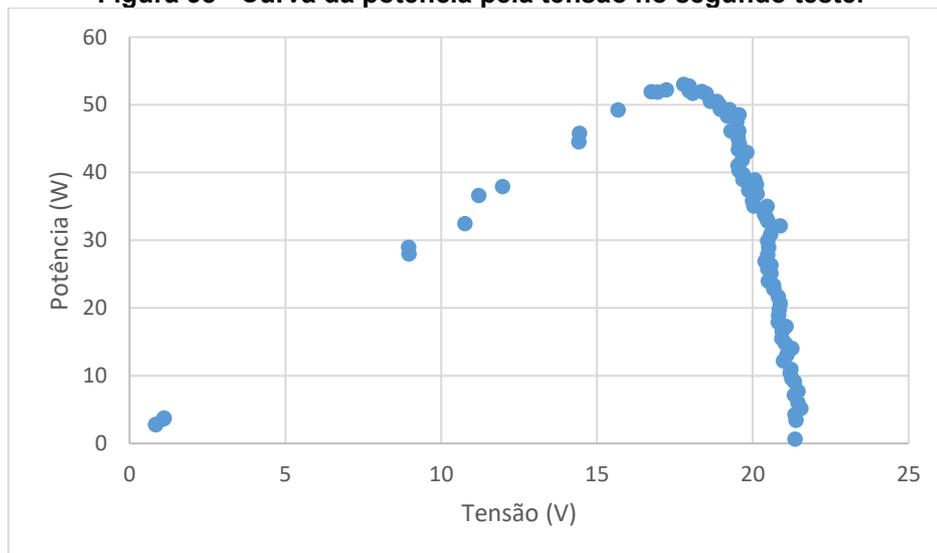


Fonte: Autoria própria.

Os resultados obtidos no segundo teste foram satisfatórios, em que foi possível obter boa parte da curva com alta precisão. Foi possível identificar nitidamente a corrente de curto-circuito e a tensão de circuito aberto.

A figura 38 mostra a curva da potência sobre tensão obtida pelo circuito no segundo teste.

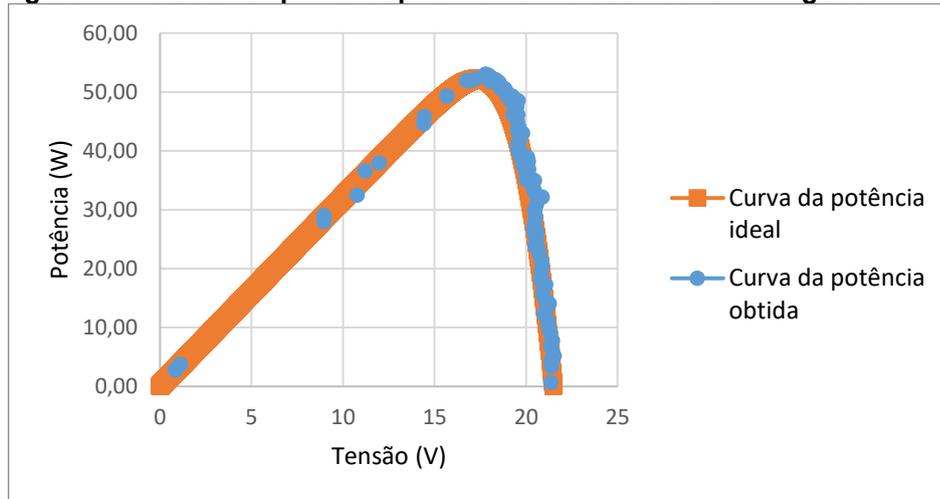
Figura 38 - Curva da potência pela tensão no segundo teste.



Fonte: Autoria própria.

Utilizando o PSIM é possível obter a curva de potência ideal, a qual é sobreposta na curva obtida. A figura 39 apresenta a comparação entre as curvas.

Figura 39 - Curvas de potência pela tensão obtida e ideal no segundo teste.



Fonte: Autoria própria.

O resultado da obtenção da curva de potência obtida foi satisfatório em comparação com o esperado. Foi possível identificar os pontos de corrente e tensão para a máxima potência com alta precisão.

Na tabela 7 estão as comparações entre os principais dados obtidos pelo circuito, os ideais e as diferenças percentuais entre os mesmos.

Tabela 7 - Comparação entre os resultados obtidos e ideais no segundo teste.

Parâmetros	Valores obtidos	Valores reais	Diferença percentual
P_{max}	52,79 W	52,25 W	1,03 %
V_{oc}	21,36 V	21,5 V	-0,65 %
I_{sc}	3,27 A	3,20 A	2,19%
V_{mp}	17,96 V	18,00 V	-0,22%
I_{mp}	2,94 A	2,85 A	3,15%

Fonte: Autoria própria.

Comparando os resultados, nota-se boa precisão nos resultados obtidos, com diferenças percentuais absolutas menores do que 1 % para valores de tensão. Enquanto a diferença máxima para valores de corrente foi na casa de 3 % e para potência de 1 %.

4.4.3 Terceiro teste

Em seguida é realizado o terceiro teste, em que são variados os dados do módulo. A tabela 8 apresenta os parâmetros utilizados no terceiro teste.

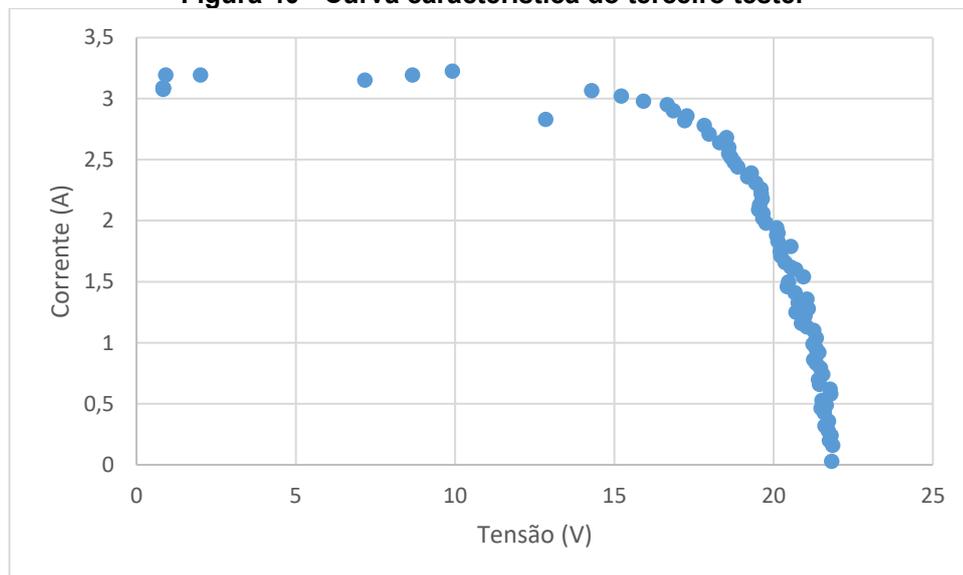
Tabela 8 - Parâmetros do módulo fotovoltaico para o terceiro teste.

Parâmetros	Valores
V_{OC}	22,00 V
I_{SC}	3,10 V
V_{mp}	18,00 V
I_{mp}	2,70 A

Fonte: Autoria própria.

O resultado da obtenção da curva característica está representado no gráfico da figura 40.

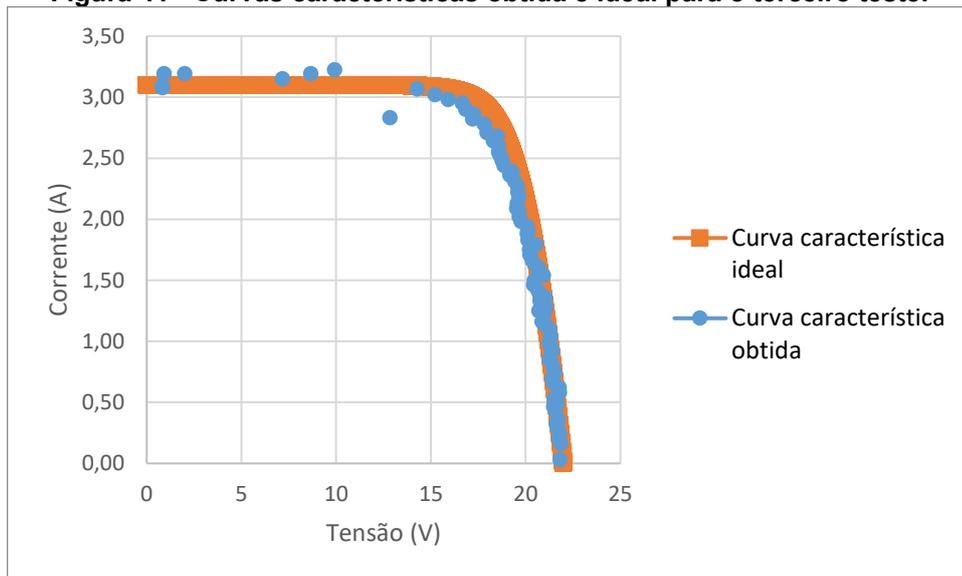
Figura 40 - Curva característica do terceiro teste.



Fonte: Autoria própria.

A curva característica ideal é simulada no PSIM e sobreposta na obtida, a figura 41 mostra o resultado desta comparação.

Figura 41 - Curvas características obtida e ideal para o terceiro teste.

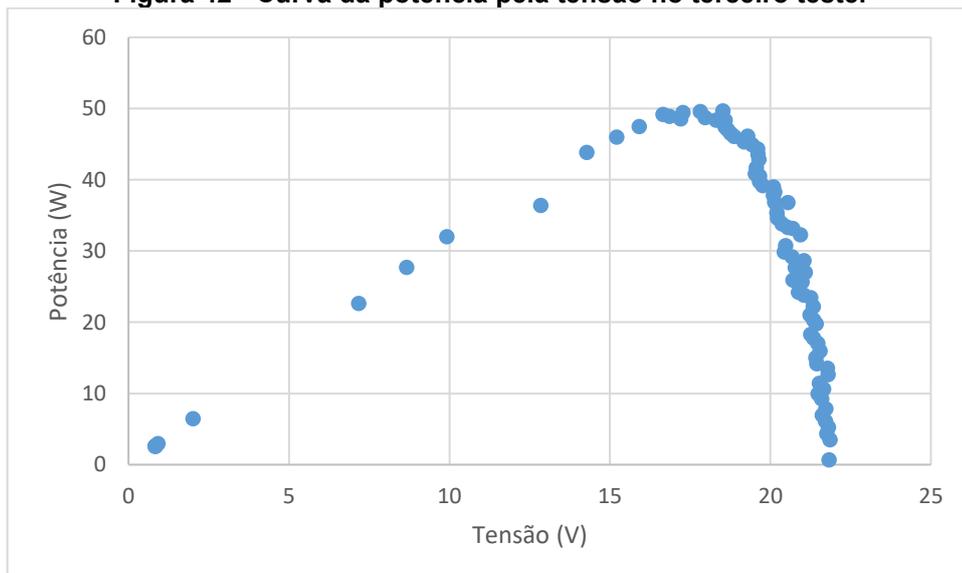


Fonte: Autoria própria.

Comparando as curvas características obtida e ideal, nota-se que foi possível obter um resultado semelhante ao esperado. Os pontos de corrente de curto-circuito e de tensão de circuito aberto foram bem definidos.

A curva da potência sobre a tensão obtida no terceiro teste está representada na figura 42.

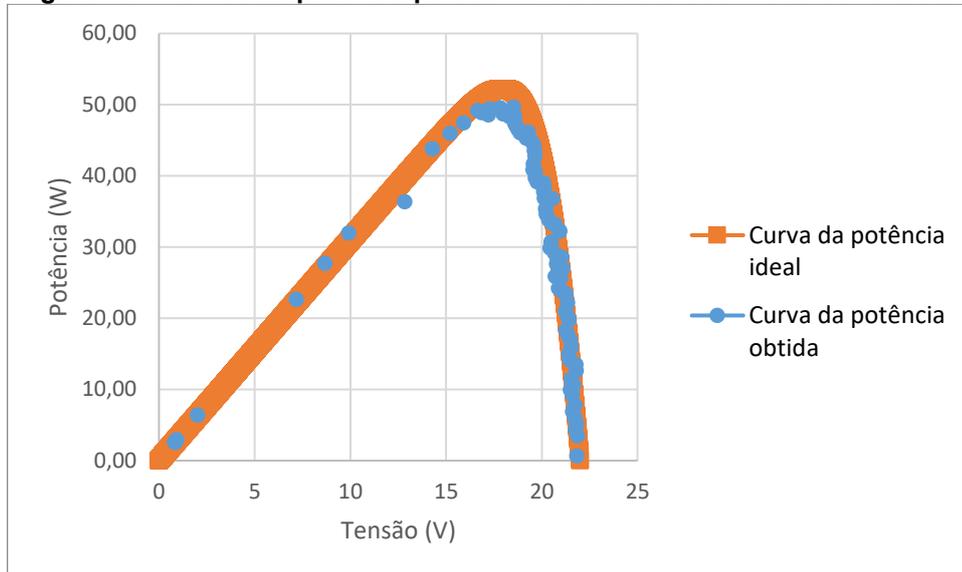
Figura 42 - Curva da potência pela tensão no terceiro teste.



Fonte: Autoria própria.

A curva de potência ideal é obtida utilizando o PSIM e sobreposta na curva obtida pelo circuito. A figura 43 mostra o resultado desta sobreposição das curvas.

Figura 43 - Curvas de potência pela tensão obtida e ideal no terceiro teste.



Fonte: Autoria própria.

A curva de potência obtida está condizente com a curva esperada no terceiro teste. Nota-se que os picos de potência são próximos, resultando em boa precisão nos dados obtidos.

Na tabela 9 estão as comparações entre os principais dados obtidos pelo circuito, os ideais e as diferenças percentuais entre os mesmos.

Tabela 9 - Comparação entre os resultados obtidos e ideais no terceiro teste.

Parâmetros	Valores obtidos	Valores ideais	Diferença percentual
P_{max}	49,50 W	52,20 W	-5,17 %
V_{OC}	21,83 V	22,00 V	-0,77 %
I_{SC}	3,18 A	3,10 A	2,58 %
V_{mp}	17,83 V	18,00 V	-0,94 %
I_{mp}	2,78 A	2,70 A	2,96 %

Fonte: Autoria própria.

Comparando os valores dos principais parâmetros obtidos e ideais, nota-se a boa precisão dos resultados. As diferenças percentuais dos valores de tensão são

menores que 1 %, de corrente estão em torno de 3 % e da máxima potência de 5 %, mostrando a boa precisão dos dados obtidos.

Os valores de temperatura foram obtidos no mesmo intervalo de tempo em que os valores de corrente e tensão, sendo as temperaturas iniciais dos testes de 26,40 °C. O sensor de temperatura obteve a temperatura máxima de 57,28 °C durante as varreduras das curvas características. Os testes duraram em torno de 50 segundos, curto período de tempo em que o circuito permaneceu habilitado com carga máxima, fazendo com que o MOSFET não esquente em temperaturas próximas dos limites máximos.

Neste capítulo, foram relatados os resultados obtidos nas simulações, o desenvolvimento da placa, a calibração para a obtenção da tensão e corrente, e por fim os resultados experimentais do circuito. As discussões e conclusões sobre os resultados do projeto serão relatados no próximo capítulo.

5 CONCLUSÃO

O projeto do circuito é satisfatório visto que a montagem da placa ocorreu como esperado, tendo como base a placa modelada no *software* KiCAD. Melhorias podem ser feitas em um segundo projeto, como conectores mais robustos e maiores espaçamentos entre alguns componentes.

As simulações do circuito desenvolvido foram satisfatórias, em que os resultados de corrente da fonte de corrente controlada foram condizentes com os inicialmente projetados.

A carga desenvolvida possui limitação em corrente, tensão e potência, contudo entrega o proposto. Seu funcionamento é validado com aplicação em fontes controlada e programável, a qual funcionou como módulo fotovoltaico.

A corrente máxima do circuito deveria ser de 3,75 A para o sinal de saída do microcontrolador em 3,3 V. Contudo, devido a limitação de tensão máxima no conversor do ESP32 em uso de 3,16 volts, a aplicação ficou restrita a faixas menores da corrente projetada, por volta de 3,59 A.

Os sensores de tensão e corrente funcionam de maneira esperada, entretanto, o conversor do microcontrolador apresenta não linearidades na leitura, visto nos gráficos apresentados. Assim, faz-se necessário aplicar uma calibração ponto a ponto em cada sensor, reduzindo o erro do valor lido para o valor obtido.

Para contornar as limitações em que o microcontrolador ESP32 WROOM apresenta, deve-se estudar a implementação de outros modelos. Outros fabricantes como Smart Projects e ST possuem microcontroladores com características semelhantes aos requisitados, como o Arduíno UNO e o STm32, respectivamente.

O *script* desenvolvido funcionou adequadamente, em que se obteve os valores de corrente e tensão do módulo, e temperatura do MOSFET.

Nos testes realizados foram consideradas condições ideais de temperatura e irradiação solar. Assim, os resultados não sofreram influência de variações destes dois parâmetros e os valores obtidos são para condições ideais de uso.

Foram utilizadas fontes controladas simétricas para alimentação dos amplificadores operacionais do circuito. Para trabalhos futuros, pode ser feito o projeto de fonte para alimentação dos circuitos integrados. Baterias podem ser utilizadas para as alimentações dos amplificadores operacionais, facilitando o transporte do circuito para ambientes externos.

Os resultados experimentais obtidos são condizentes com o esperado, podendo ser observadas as propriedades das curvas características e de potência. Em regiões próximas da corrente de curto-circuito, I_{sc} , não foi possível obter vários pontos devido a baixa resolução da saída do conversor do ESP32, pois a variação de corrente é baixa em relação a variação da tensão. Já para a região próxima da tensão de circuito aberto, V_{OC} , e ponto de máxima potência, P_{max} , foi possível obter a maior quantidade de pontos, podendo ser feitas comparações mais precisas.

Os resultados obtidos para as tensões de circuito aberto, V_{oc} , tem diferença percentual máxima de -1,06% em relação ao seu respectivo valor ideal. Enquanto para a tensão de máxima potência, V_{mp} , é de 1,24%. Assim, pode-se concluir que o circuito para obtenção da tensão funcionou com boa precisão.

A máxima diferença percentual para a corrente de curto-circuito, I_{sc} , em relação a ideal foi de -4,26%, enquanto da corrente para máxima potência, I_{mp} , foi de -6,55%. Assim, a obtenção da corrente teve maior erro percentual em relação a obtenção da tensão, isto pode ser explicado pelo comportamento que o conversor ligado ao pino escolhido teve, visto na calibração anteriormente.

Os resultados para a máxima potência tiveram erro percentual máximo de -5,17%. Como a potência depende da corrente, parte deste erro está atrelado ao erro obtido na leitura de corrente.

Observando as diferenças percentuais máximas, nota-se que quatro dos cinco parâmetros analisados são do primeiro teste. Este fato pode ser explicado pela limitação da corrente máxima da carga eletrônica, em que foi possível obter 3,59 A, em vez de 3,75 A projetados.

Analisando apenas o segundo e terceiro teste, as diferenças percentuais máximas em relação às ideais para P_{max} , V_{OC} , I_{sc} , V_{mp} e I_{mp} são, respectivamente, 5,17%, 0,77%, 2,58%, 0,94% e 3,15%. Consideravelmente menores em relação ao primeiro teste.

A partir da análise dos resultados apresentados, conclui-se que o circuito de carga eletrônica desenvolvido é capaz de obter as curvas característica e de potência de módulos fotovoltaicos com boa precisão.

O custo para manufatura deste projeto de carga eletrônica, levando em consideração todos os componentes utilizados, é de aproximadamente 160 reais, cotados em março de 2023.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Com o intuito de solicitar melhorias para trabalhos que tenham como referência este documento, esta divisão é dedicada a sugestões para trabalhos futuros.

Inicialmente, ao escolher o microcontrolador deve-se testar o funcionamento e linearidade de seus conversores, visto a necessidade de calibração ponto a ponto feita nesse trabalho. Também deve-se medir a tensão de saída do microcontrolador, se realmente entrega o valor estipulado.

Para o projeto da placa, deixar mais espaçamento entre conectores e componentes do circuito. Durante os testes, componentes muito próximos dificultaram a conexão de cabos nos *bornes*. Também deve-se buscar por conectores robustos para não correr o risco de danificá-los nas execuções dos experimentos.

Pode-se desenvolver fontes para as alimentações dos circuitos integrados de amplificadores operacionais, uma opção é o projeto de uma fonte chaveada, por exemplo. Outra alternativa para a alimentação dos circuitos integrados são baterias, as quais tornam a carga eletrônica portátil, podendo ser transportada para diferentes lugares sem depender da alimentação da rede elétrica para alimentação de fontes.

Para obter as curvas característica e de potência em diferentes condições ambiente, irradiação e temperatura, deve ser adicionado um sensor de irradiação e um sensor de temperatura ambiente. Pode-se adicionar um sensor para obter a temperatura no módulo fotovoltaico também.

Com o intuito de melhorar a leitura e tratamento dos dados obtidos pelo microcontrolador, pode-se mudar a plataforma de programação e gravação dos dados. Uma opção é desenvolver o *script* em *python* e fazer a interação dos dados obtidos com um arquivo dedicado.

REFERÊNCIAS

ABSOLAR. Energia solar no Brasil. Infográfico ABSOLAR – Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica, n. 35, 2021.

ABSOLAR. Energia solar no Brasil. Infográfico ABSOLAR – Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica, n. 41, 2021.

ADDA. AD8025 Series. Disponível em: <https://octopart.com/datasheet/ad0812ub-a70gl-adda-807284>.

ASBAYOU, Abdellah et al. Utilization of MOSFET transistor as an electronic load to trace I-V and P-V curve of a solar panel. International Conference of Computer Science and Renewable Energies, ICCSRE'2020, E3S Web of Conferences 299, 2021.

BUSARELLO, Tiago D. C.; POMILIO, José A.; SIMOES, Marcelo G. Semiconductor Diodes and Transistors. Power Electronics Handbook, 2017.

DA BEZERRA, Erick C.; TEIXEIRA, Gerson P.; ROCHA, Murilo Fraga; MARIMON, Gabriel C. Conversão de Energia. Porto Alegre: Grupo A, 2018.

DE ARAUJO, Ana L. P. L.; LOPES, Arthur V.; MOREIRA, Adson B.; Topologia em Traçador de Curva I-V Para Módulos fotovoltaicos. VIII Congresso Brasileiro de Energia Solar, 2020.

ELETROGATE. Termistor NTC para Controle de Temperatura. Blog Eletrogate. 2022. Disponível em: <https://blog.eletrogate.com/termistor-ntc-para-controle-de-temperatura/>.

ELECTRONICSHUB.ORG. ESP32 Pinout | ESP-WROOM-32 Pinout. 2021. Disponível em: <https://www.electronicshub.org/esp32-pinout/>

GASPARIN, Fabiano P.; KRENZINGER, Arno. Sistema Traçador de Curvas Características De Módulos fotovoltaicos. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente; vol. 13. 2009.

HAIYING, Lu.; JING, Wu.; SONGLING, Huang.; WEI, Zhao. Design Of The Feedback Type DC Electronic Load Hardware Circuit Using IPM. Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, IEEE CCECE, 2011.

HART, Daniel W. Eletrônica de potência: análise e projetos de circuitos. Grupo A, 2012. E-book. ISBN 9788580550474. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788580550474/>.

HS DISSIPADORES. Catálogo HS Dissipadores 2023 (PDF). Disponível em: <https://www.hsdissipadores.com.br/catalogo.pdf>

INTERNATIONAL RECTIFIER. IRF540NPbF *Datasheet* (PDF) - International Rectifier. Disponível em https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-IRF540N-Datasheet-v01_01-EN.pdf?fileId=5546d462533600a4015355e39f0d19a1

MARTINAZZO, Claodomir A.; ORLANDO, Tailan. Comparação Entre Três Tipos de Sensores de Temperatura em Associação Com Arduíno. PERSPECTIVA, Erechim. v. 40, n.151, p. 93-104, set. 2016.

RESUN. RSM060P *Datasheet* (PDF) - Resun Solar Energy Co. Disponível em: <https://cdn.awsli.com.br/816/816887/arquivos/Datasheet%20Painel%20Resun%2060W.pdf>

VALENTE, Miguel A. S. Caracterização automática de um painel fotovoltaico. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2011.

VILLALVA, Marcelo. G.; GAZOLI, Jonas. R.; FILHO, Ernesto R. Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays. IEEE Transactions on power electronics, IEEE, v. 24, n. 5, 2009.

VREJ BARKHORDARIAN, INTERNATIONAL RECTIFIER, EL SEGUNDO, CA. Power MOSFET Basics (PDF) – International Rectifier. Disponível em <https://www.infineon.com/dgdl/mosfet.pdf?fileId=5546d462533600a4015357444e913f4f>. Acesso 05 dez. 2022.

VYAVAHARE, Smita.; SALOKHE, B. T. Web-based Electronic Load To Test DC Power Supply. IOSR Journal of Electronics and Communication Engineering, IOSR-JECE, Volume 9, Issue 1, 2014.

APÊNDICE A – CÓDIGO FONTE

O Apêndice A apresenta o código fonte desenvolvido para controle e obtenção de dados.

```
// Código do TCC - Desenvolvimento de um circuito de carga eletrônica para obtenção
da curva característica de módulos fotovoltaicos
// Henrique de Lima Kurta
```

```
//-----
```

```
// Definição do canal DAC0 (GPIO 25)
```

```
#define CANAL_DAC0 25
```

```
// Inclusão de bibliotecas para identificação do ESP32
```

```
#include <driver/adc.h>
```

```
#include <esp_adc_cal.h>
```

```
#include <freertos/FreeRTOS.h>
```

```
#include <freertos/task.h>
```

```
#include <esp_err.h>
```

```
#include <esp_log.h>
```

```
//Estrutura de calibração para sensor de temperatura
```

```
esp_adc_cal_characteristics_t adc_cal;
```

```
// Definição de variáveis globais
```

```
float Vout = 25; // Tensão de acionamento do circuito
```

```
float Vm = 13; // Tensão do módulo
```

```
float Im = 12; // Corrente do módulo
```

```
int Vent = 33; // Acionamento ventilador
```

```
float VoutValue; //Saída do microcontrolador
```

```
// Variáveis sensor de tensão
```

```
int Valor_Analog_Vm; // Valor de tensão lido no conversor
```

```
float Valor_Vm; // Valor de tensão convertido para 0~3,3 V
```

```
float Vmodulo; // Valor de tensão convertido para 0~22,68 V
```

```
// Variáveis sensor de corrente
```

```
int Valor_Analog_Im; // Valor de corrente lido no conversor
```

```
float Valor_Im; // Valor de corrente convertido para 0~3,3 V
```

```
float Imodulo; // Valor de corrente convertido para 0~3,75 A
```

```
// Sensores de temperatura
```

```
bool esp32 = true; // Identificação do ESP32
```

```
int ThermistorPin; // Definição da variável do thermistor
```

```

double adcMax; // Definição da máxima resolução
double Vs; // Definição da variável de tensão

String TempReal;
double R1 = 20000.0; // definição do resistor de 10k
double Ro = 20000.0; // resitor 10k
double Beta = 3950.0; // Valor de beta, constante para calculo da conversão de
temperatura
double To = 298.15; // temperatura de 25 graus Celsius em Kelvin

//-----

void setup() {

// seta os pinos de saída
pinMode(Vout, OUTPUT); // pino de saída para controle da tensão de entrada do
circuito
pinMode(Vent, OUTPUT); // pino para acionamento do ventilador

// seta os pinos de entrada
pinMode(Vm, INPUT); // pino de entrada do sensor de tensão
pinMode(Im, INPUT); // pino de entrada do sensor de corrente

Serial.begin(9600); // Abre a porta serial com taxa de dados de 9600bps

// configurações de inicialização do sensor de temperatura
adc1_config_width(ADC_WIDTH_BIT_12);
adc1_config_channel_atten(ADC1_CHANNEL_6, ADC_ATTEN_DB_0); //define o
pin 35, canal 6, do esp para obtenção da temperatura.
esp_adc_cal_value_t adc_type = esp_adc_cal_characterize(ADC_UNIT_1,
ADC_ATTEN_DB_0, ADC_WIDTH_BIT_12, 1100, &adc_cal); //Inicializa a estrutura
de calibracao

// temperatura
ThermistorPin = 35; // Definição da variável no pin 35
adcMax = 4095.0; // ADC 12-bit (0-4095)
Vs = 3.3; // Tensão sobre os resistores

VoutValue == 0; // Seta o valor de saída do micro em 0
}

//-----

void loop() {

for(int i = 0; i <= 85; i++){ // Loop para aumentar a tensão de saída gradativamente.

VoutValue = VoutValue + (255/85); // Saída de 8 bits dividido para tensão de 3.3V.

```

```
dacWrite(Vout, VoutValue); // Habilitando saída do microcontrolador no valor
VoutValue
```

```
//Sensor de tensão
```

```
Valor_Analog_Vm = analogRead(13); // lê o valor entre 0 e 4095
```

```
Valor_Vm = (3.3*Valor_Analog_Vm)/4095; //converte os bits para valor entre 0V e
3.3V
```

```
Vmodulo = ((22.68*Valor_Vm)/3.3); //converte para a escala entre 0 e 22.68V
```

```
//SensorCorrente();
```

```
Valor_Analog_Im = analogRead(12); // lê o valor entre 0 e 4095
```

```
Valor_Im = (3.3*Valor_Analog_Im)/4095; //converte os bits para valor entre 0V e 3.3V
```

```
Imodulo = ((3.75*Valor_Im)/3.3); //converte para a escala entre 0 e 3.75A
```

```
//SensorTemperatura();
```

```
uint32_t AD = 0; //variável ad recebe 0 para inteiro de 32 bits
```

```
for (int i = 0; i < 100; i++) // Loop para a leitura de temperatura
```

```
{
```

```
  AD += adc1_get_raw(ADC1_CHANNEL_6); // Obtém o valor RAW do ADC
```

```
  ets_delay_us(30); // Delay para a leitura
```

```
}
```

```
AD /= 100;
```

```
double Vouts = 0; //Tensão da porta analógica do termistor
```

```
double Rt = 0; // Resistência na porta analógica do termistor
```

```
double T = 0; // Temperatura em Kelvin
```

```
double Tc = 0; // Temperatura em Celsius
```

```
double adc = 0;
```

```
adc = analogRead(ThermistorPin); // leitura da tensão no pin de temperatura
```

```
// Cálculo pela equação de Steinhart-Hart.
```

```
Vouts = adc * Vs / adcMax;
```

```
Rt = R1 * Vouts / (Vs - Vout); //
```

```
T = 1 / (1 / To + log(Rt / Ro) / Beta); // Valor da temperatura em Kelvin
```

```
Tc = T - 273.15; // Valor da temperatura em Celsius
```

```
// Ventilador
```

```
digitalWrite(Vent, HIGH); // habilita o ventilador
```

```
if(Tc>115) { //se a temperatura do MOSFET for maior que 115, zera a saída do micro
e retorna "sobret temperatura"
```

```
  dacWrite(Vout, 0);
```

```
  Serial.println("Sobret temperatura");
```

```
}
```

```
delay(800);

// Obtenção dos parâmetros pelo monitor serial.

//Serial.print("Corrente:");
Serial.print(Imodulo);
Serial.print("A");
Serial.print("\t");
Serial.print("Tensão:");
Serial.print(Vmodulo);
Serial.print("V");
Serial.print("\t");
Serial.print("Temperatura do mosfet: ");
Serial.print(Tc);
Serial.print(" *C ");
Serial.print("\t");
Serial.println(VoutValue);
Serial.println();
delay(50);

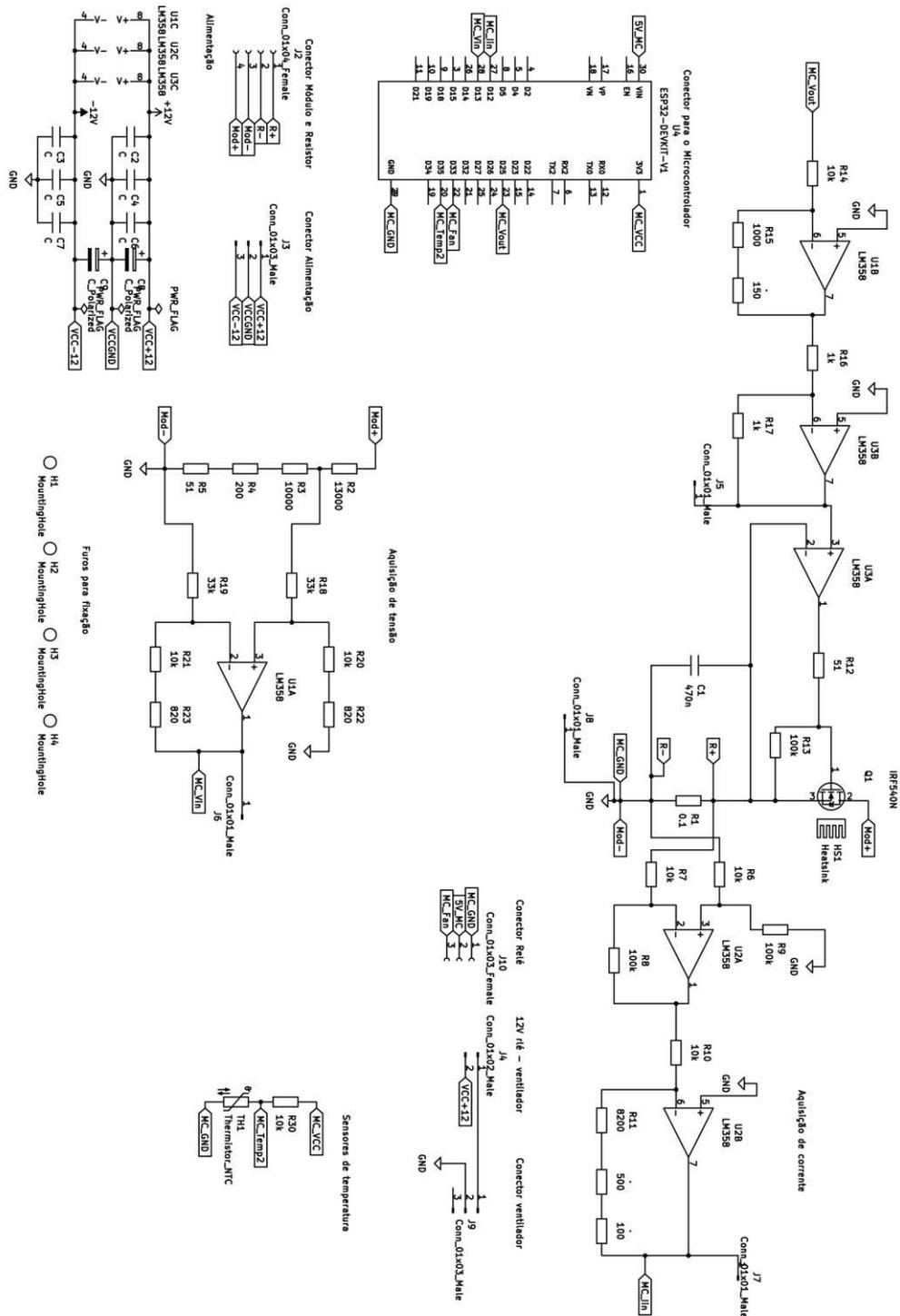
}
// Fim da execução do programa
dacWrite(Vout, 0);
Serial.print("\t");
Serial.print("Fim. ");
delay(1000);

}
```

Fonte: Autoria Própria.

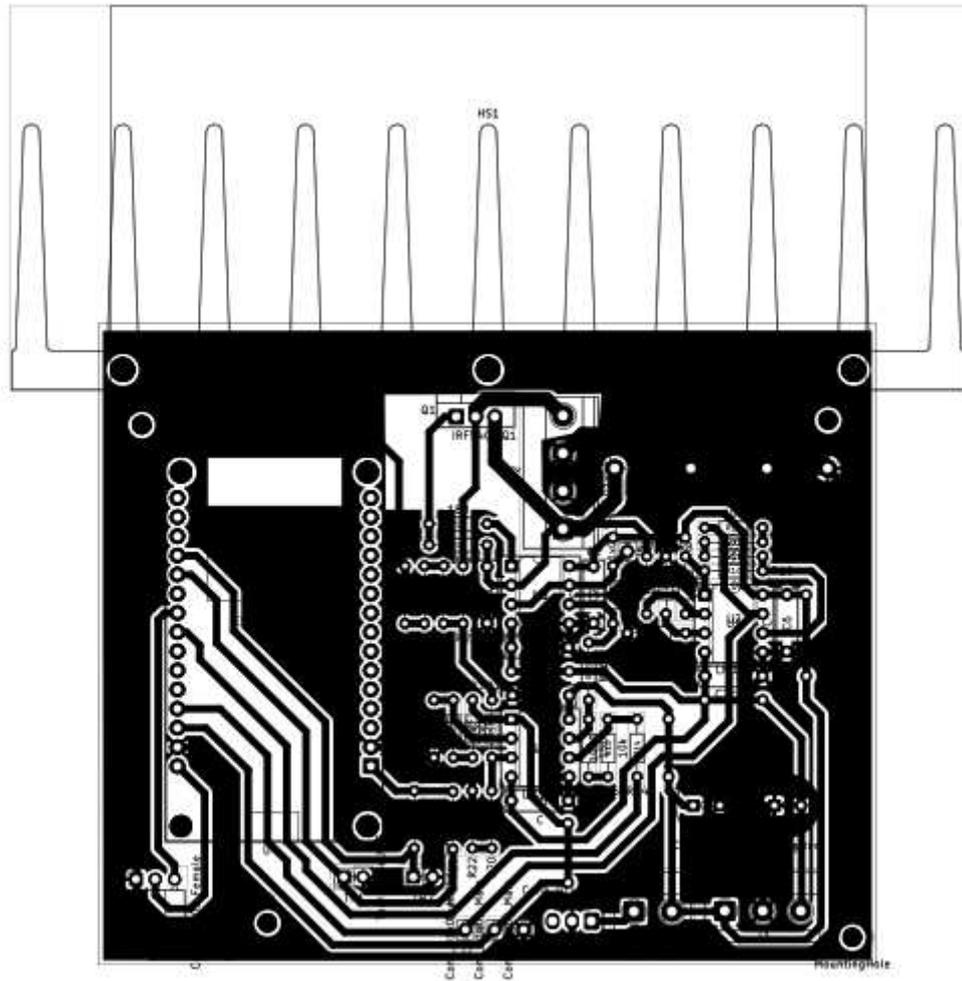
APÊNDICE B – ESQUEMÁTICO DO PROJETO NO KICAD

O Apêndice B apresenta o esquemático do projeto realizado no KiCAD.



Fonte: Autoria própria.

APÊNDICE C – ESQUEMÁTICO DA PLACA DO PROJETO NO KICAD



Fonte: Autoria própria.