

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA
CAMPUS ALEGRETE**

RAFHAEL MELO GALVÃO

**ESTUDO, PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM
EMULADOR ELETRÔNICO DE PAINÉIS SOLARES
FOTOVOLTAICOS**

**Alegrete
2024**

RAFHAEL MELO GALVÃO

ESTUDO, PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM
EMULADOR ELETRÔNICO DE PAINÉIS SOLARES
FOTOVOLTAICOS

**Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia
Elétrica da Universidade Federal do
Pampa, como requisito parcial para
obtenção do Título de Bacharel em
Engenharia Elétrica.**

Orientador: Felipe Bovolini Grigoletto.

Alegrete, fevereiro de 2024

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

ESTUDO, PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM EMULADOR ELETRÔNICO DE
PAINÉIS SOLARES FOTOVOLTAICOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 06 de março de 2024.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Felipe Bovolini Grigoletto
Orientador
UNIPAMPA

Prof. Dr. Guilherme Sebastião da Silva
UNIPAMPA

Prof. Dr. Giovani Guarienti Pozzebon
UNIPAMPA

Alegrete, 06 de março de 2024



Assinado eletronicamente por **GUILHERME SEBASTIAO DA SILVA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 06/03/2024, às 11:56, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **FELIPE BOVOLINI GRIGOLETTO, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 06/03/2024, às 13:27, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **GIOVANI GUARIENTI POZZEBON, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 07/03/2024, às 09:28, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1385359** e o código CRC **8973D1B2**.

Agradecimentos

Gostaria de expressar minha profunda gratidão aos meus pais, cujo apoio inabalável e amor incondicional foram fundamentais em cada passo desta jornada acadêmica. Agradeço também aos meus estimados professores, cuja orientação, sabedoria e dedicação foram indispensáveis para o meu crescimento pessoal e profissional. Sem o apoio e orientação de vocês, este trabalho não teria sido possível. Obrigado por serem minha fonte de inspiração e por acreditarem em mim.

Resumo

O método de geração de energia elétrica obtida através da incidência de raios solares sobre painéis fotovoltaicos tem se difundido na última década e está suprindo significativamente instalações residenciais, comerciais e industriais. Com o grande advento destes sistemas, as companhias de geração, transmissão e distribuição passaram a exigir normas adequadas e específicas para a geração e distribuição. Tendo em vista que parte da energia gerada é transferida ao sistema de distribuição e transmissão de energia elétrica, é necessário a obtenção de modelos adequados de sistemas de geração fotovoltaica e testes de inversores. Os ensaios de sistemas de geração solar fotovoltaica requerem repetibilidade que muitas vezes se tornam inviáveis devido a características intermitentes da natureza. O objetivo deste trabalho é desenvolver um sistema de emulação eletrônica solar de painéis fotovoltaicos a fim de facilitar o ensaio dos conversores estáticos que processam a energia oriunda dos painéis. Diferente dos demais trabalhos, este está focado em um controle baseado em um microcontrolador ESP32WROOM com linguagem C++ através da interface de programação Arduino IDE junto de uma tela *Touchscreen* Nextion para controle e análise de dados do conversor. O emulador consiste em um conversor CC-CC buck que disponibiliza tensão e corrente na saída a fim de comportar como um painel PV comercial. Por fim, resultados de simulação e experimentais são obtidos para demonstrar a operação do emulador em termos de síntese de tensão e corrente de saída.

Palavras-chave: Microcontrolador; Emulador Eletrônico; Conversor Buck.

Abstract

The method of generating electrical energy obtained through the incidence of sunlight on photovoltaic panels has been spreading in the last decade and is significantly supplying residential, commercial, and industrial installations. With the significant advent of these systems, power generation, transmission, and distribution companies have begun to demand appropriate and specific standards for generation and distribution. Considering that part of the energy generated is transferred to the electrical power distribution and transmission system, obtaining adequate models of photovoltaic generation systems and inverter tests is necessary. Tests on photovoltaic solar generation systems require repeatability, which often becomes unfeasible due to intermittent nature characteristics. The objective of this work is to develop a solar photovoltaic panel electronic emulation system to facilitate testing of static converters processing energy from the panels. Unlike other works, this one is focused on a control based on an ESP32WROOM microcontroller with C++ language through the Arduino IDE programming interface along with a Nextion Touchscreen for control and data analysis of the converter. The emulator consists of a buck CC-CC converter that provides voltage and current at the output to behave like a commercial PV panel. Finally, simulation and experimental results are obtained to demonstrate the operation of the emulator in terms of output voltage and current synthesis.

Keywords:Microcontroller; Electronic Emulator; Buck Converter.

Lista de ilustrações

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Circuito Elétrico equivalente de uma célula PV. | 21 |
| Figura 2 – Circuito Conversor Buck do EF. | 22 |
| Figura 3 – Circuito do Conversor Buck contendo o microcontrolador com uma tela. | 24 |
| Figura 4 – Circuito do conversor buck com fonte de corrente. | 26 |
| Figura 5 – Circuito do conversor buck modelo de pequenos sinais. | 27 |
| Figura 6 – Circuito do modelo médio de pequenos sinais. | 28 |
| Figura 7 – Circuito do modelo médio de pequenos sinais simplificado. | 28 |
| Figura 8 – Diagrama de blocos para controle da tensão de saída V_{out} | 29 |
| Figura 9 – Circuito desenvolvido para análise dos dados e controle da tensão no conversor buck. | 30 |
| Figura 10 – Diagrama de Bode da $FTLA_C(s)$, <i>Matlab</i> | 32 |
| Figura 11 – Conversor do tipo Buck, <i>PSIM</i> | 33 |
| Figura 12 – Dados e gráficos do PV adotado, <i>PSIM</i> | 34 |
| Figura 13 – Circuito da Lookup Table de Corrente, <i>PSIM</i> | 34 |
| Figura 14 – Circuito da Lookup Table de Tensão, <i>PSIM</i> | 35 |
| Figura 15 – Circuito do C-Block, <i>PSIM</i> | 36 |
| Figura 16 – Circuito do Sistema PV e Chaveamento de Cargas do PV, <i>PSIM</i> | 37 |
| Figura 17 – Circuito do Esquema de Malha Fechada, <i>PSIM</i> | 38 |
| Figura 18 – Simulação do degrau na função $FTLA_C$, <i>Matlab</i> | 40 |
| Figura 19 – Esquemático do Conversor Buck, <i>Proteus</i> | 41 |
| Figura 20 – Sensor de Corrente, <i>Allegro</i> | 41 |
| Figura 21 – Sensor de Corrente com Amplificador Operacional subtrator. | 42 |
| Figura 22 – Esquemático do Sensor de Corrente, <i>Proteus</i> | 42 |
| Figura 23 – Sensor de Tensão | 43 |
| Figura 24 – Sensor de Tensão com Amplificador Operacional subtrator | 43 |
| Figura 25 – Esquemático do Sensor de Tensão, <i>Proteus</i> | 44 |
| Figura 26 – Circuito do Driver. | 45 |
| Figura 27 – Esquemático do Circuito do Driver, <i>Proteus</i> | 45 |
| Figura 28 – Microcontrolador ESP32. | 46 |
| Figura 29 – Esquemático do Microcontrolador <i>ESP32</i> , <i>Proteus</i> | 47 |
| Figura 30 – Tela Touchscreen Nextion NX3224T024-011. | 48 |
| Figura 31 – Esquemático da TTS Nextion, <i>Proteus</i> | 48 |
| Figura 32 – <i>Layout</i> da placa confeccionada, <i>Proteus</i> | 49 |
| Figura 33 – Esquemático da entrada de alimentação de 5V CC da placa, <i>Proteus</i> | 50 |
| Figura 34 – <i>Layout</i> da entrada de alimentação de 5V CC da placa, <i>Proteus</i> | 50 |
| Figura 35 – <i>Layout</i> da área do Conversor Buck, <i>Proteus</i> | 51 |

| | |
|---|----|
| Figura 36 – <i>Layout</i> da área do Circuito do Driver, <i>Proteus</i> | 52 |
| Figura 37 – <i>Layout</i> da área do Sensor de Corrente, <i>Proteus</i> | 52 |
| Figura 38 – <i>Layout</i> da área do Sensor de Tensão, <i>Proteus</i> | 53 |
| Figura 39 – <i>Layout</i> da área do Microcontrolador e da TTS <i>Nextion</i> , <i>Proteus</i> | 54 |
| Figura 40 – PCI do projeto, região superior (esquerda) e região posterior (direita). | 54 |
| Figura 41 – Placa do projeto com todos os seus componentes implementados. | 55 |
| Figura 42 – Posterior da Placa do projeto com todos os seus componentes imple- mentados. | 56 |
| Figura 43 – Placa do projeto montada sobre a bancada. | 57 |
| Figura 44 – Cargas implementadas na placa do projeto. | 58 |
| Figura 45 – Simulação contendo os dados de <i>IBuck</i> , <i>IPainel</i> , <i>VBuck</i> , <i>VRTestCode</i> , <i>VPainel</i> , <i>uc</i> e <i>SaidaChaveamento</i> , <i>PSIM</i> | 60 |
| Figura 46 – Dados referentes ao <i>DutyCycle</i> Manual para 50 V. | 61 |
| Figura 47 – Dados referentes ao <i>DutyCycle</i> Automatizado para 50 V. | 62 |
| Figura 48 – Gráfico da entrada de alimentação de 50V com uma carga de 5 Ω , <i>PSIM</i> | 63 |
| Figura 49 – Dados referentes ao <i>DutyCycle</i> Manual para 50 V. | 64 |
| Figura 50 – Dados referentes ao <i>DutyCycle</i> Automatizado para 50 V. | 64 |
| Figura 51 – Gráfico da entrada de alimentação de 50V com uma carga de 5 Ω no início e 3,333 Ω no final, <i>PSIM</i> | 65 |
| Figura 52 – Gráfico da entrada de alimentação de 50V com uma carga de 5 Ω no início e 3,333 Ω no final, <i>PSIM</i> | 65 |

Lista de tabelas

| | |
|---|----|
| Tabela 1 – Especificações das grandezas e componentes das figuras 1 e 2. | 25 |
| Tabela 2 – Dados dos componentes das figuras 1 e 2. | 25 |
| Tabela 3 – Especificações das grandezas e componentes da figura 9. | 30 |
| Tabela 4 – Parâmetros adotados para a análise do conversor buck. | 39 |
| Tabela 5 – Dados dos componentes do Circuito Conversor Buck. | 41 |
| Tabela 6 – Dados dos componentes do Circuito do Sensor de Corrente. | 43 |
| Tabela 7 – Dados dos componentes do Circuito do Sensor de Tensão. | 44 |
| Tabela 8 – Dados dos componentes do Circuito do Driver. | 46 |
| Tabela 9 – Dados dos componentes acompanhados do microcontrolador. | 47 |
| Tabela 10 – Dados dos componentes acompanhados da TTS. | 48 |
| Tabela 11 – Tabela elaborada com fonte de alimentação de 54V e corrente de 9A, com uma carga de 3,367 Ω | 61 |
| Tabela 12 – Tabela elaborada com fonte de alimentação de 54V e corrente de 9A, com uma carga de 5 Ω | 62 |

Lista de abreviaturas e siglas

CC – Corrente Continua.

CI – Circuito Integrado.

EF – Emulador Fotovoltaico.

$FTLA$ – Função de Transferência de Laço Aberto.

$FTLA_C$ – Função de Transferência de Laço Aberto Compensada.

$FTLA_{NC}$ – Função de Transferência de Laço Aberto Não Compensada.

GND – Ground.

I-V – Corrente - Tensão.

IGBT – Insulated Gate Bipolar Transistor.

Imed – Corrente medida após o indutor do conversor;

IPainel – Corrente do painel fotovoltaico utilizado como teste;

MPPT – Momento de Máxima Potência.

P-V – Potência - Tensão.

PV – Fotovoltaico.

PCI – Placa de Circuito Impresso.

PWM – Pulse With Modulation.

SaidaChaveamento – Sinal de saída para a chave IGBT.

SC – Sensor de Corrente.

ST – Sensor de Tensão.

TTS – Tela Touchscreen.

Uc1 – Sinal PWM da saída do bloco C-Block;

Vmed – Tensão sobre a carga;

VPainel – Tensão do painel fotovoltaico utilizado como teste;

VRTestCode – Tensão da saída da *Look-up Table*;

Sumário

| | | |
|------------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 19 |
| 1.1 | Objetivo | 20 |
| 1.1.1 | Objetivo Geral | 20 |
| 1.1.2 | Objetivos Específicos | 20 |
| 2 | DESCRIÇÃO DO EMULADOR FOTOVOLTAICO | 21 |
| 2.1 | Introdução | 21 |
| 2.2 | Emulador Eletrônico Solar Fotovoltaico | 21 |
| 2.2.1 | Modelo Elétrico de uma Célula Solar Fotovoltaica | 21 |
| 2.3 | Projeto do conversor Buck | 22 |
| 2.4 | Modelagem do Conversor | 24 |
| 2.4.1 | Obtenção da Função de Transferência da Tensão de Saída pela Razão Cíclica | 28 |
| 2.4.2 | Projeto do Controlador | 29 |
| 2.5 | Metodologia de Controle | 30 |
| 2.5.1 | Elaboração do Esquemático dos Circuitos | 32 |
| 2.5.1.1 | Simulação em Software PSIM | 33 |
| 2.5.1.2 | Conversor do tipo Buck | 33 |
| 2.5.1.3 | Bloco <i>Look-up Table</i> $I_{in} - V_{out}$ | 33 |
| 2.5.1.4 | Bloco <i>Look-up Table</i> $V_{in} - I_{out}$ | 35 |
| 2.5.1.5 | Circuito do C-Block | 36 |
| 2.5.1.6 | Circuito do Painel Solar Fotovoltaico | 37 |
| 2.5.1.7 | Controle em Malha Fechada | 37 |
| 3 | SIMULAÇÕES E TESTES DE BANCADA | 39 |
| 3.1 | Introdução | 39 |
| 3.2 | Simulações com <i>Matlab</i> | 39 |
| 3.3 | <i>Simulações no PSIM</i> | 39 |
| 3.4 | Testes e Estudo dos Componentes | 40 |
| 3.4.1 | Conversor Buck | 40 |
| 3.4.2 | Sensor de Corrente | 41 |
| 3.4.3 | Sensor de Tensão | 42 |
| 3.4.4 | Circuito do Driver | 44 |
| 3.4.5 | Microcontrolador | 46 |
| 3.4.6 | Tela <i>Touchscreen</i> Nextion | 47 |
| 4 | ELABORAÇÃO DA PLACA DO PROJETO | 49 |

| | | |
|------------|--|-----------|
| 4.1 | Introdução | 49 |
| 4.2 | Montagem do Layout | 49 |
| 4.2.1 | Especificações da Placa | 49 |
| 4.2.2 | <i>Layout</i> Conversor Buck | 50 |
| 4.2.3 | <i>Layout</i> Circuito do Driver | 51 |
| 4.2.4 | <i>Layout</i> Sensor de Corrente | 51 |
| 4.2.5 | <i>Layout</i> Sensor de Tensão | 51 |
| 4.2.6 | <i>Layout</i> Microcontrolador e TTS Nextion | 53 |
| 4.3 | Confecção e Testes | 53 |
| 4.3.1 | Introdução | 53 |
| 4.3.2 | Especificação e Montagem | 53 |
| 4.3.3 | Protótipo e Bancada de Testes | 55 |
| 5 | RESULTADOS | 59 |
| 5.1 | Introdução | 59 |
| 5.2 | Simulações e Implementação | 59 |
| 5.2.1 | Experimento com uma carga de $3,367 \Omega$ | 59 |
| 5.2.1.1 | Alimentação de 50 V no conversor | 60 |
| 5.2.2 | Experimento com uma carga de 5Ω | 61 |
| 5.2.2.1 | Alimentação de 50 V no conversor | 62 |
| 5.2.3 | Transitório de uma carga de 5Ω para $3,333 \Omega$ | 63 |
| 5.3 | Conclusão do capítulo | 64 |
| 6 | CONCLUSÕES FINAIS | 67 |
| A | CÓDIGO MATLAB | 69 |
| | REFERÊNCIAS | 73 |

1 Introdução

Com o avanço em tecnologias e pesquisas na área de sistemas de geração e distribuição de energia elétrica, sendo eles de energia proveniente da incidência de raios solares em painéis fotovoltaicos (PV) ou através da geração eólica obtido através da diferença de pressão atmosférica, médios e pequenos consumidores passaram a usufruir destes métodos de geração. Apesar disso, os custos de implementação de um sistema fotovoltaico ainda são altos [MAGNO et al. 2019], algo que acarretou em um grande investimento buscando uma maior eficiência dentro de um menor custo e com margens aceitáveis para a concessionária de distribuição de energia elétrica e ao consumidor final, visto que os conversores buscam o ponto de máxima potência (MPPT: maximum power point tracking) [Moçambique 2012].

Em decorrência dos impactos ambientais gerados pela industrialização e geração de energia através de fontes não renováveis e poluentes [Goldemberg e Lucon 2007], tornou-se necessário acelerar o desenvolvimento tecnológico e econômico, o qual implica em um aumento no consumo de energia elétrica [Cupertino 2015]. O Brasil tem um grande benefício quanto à utilização de energia solar visto que o país obtém uma grande área promissora para energia solar [Diniz et al. 2006]. Tendo em vista os fatos citados anteriormente, muitos dispositivos carecem de sistemas interativos e, ao mesmo tempo, analíticos para análise e operação dos sistemas conversores de energia gerada a partir de sistemas solares fotovoltaicos. Há estudos voltados emuladores semelhantes no entanto operando com *Digital Signal Processor* (DSP), como é o caso do [Viglius 2015] o qual utilizou um conversor *Full-Bridge* Trifásico. Assim como metodologias utilizando conversores do tipo CC-CC Buck-Boost de Quatro Interruptores com a finalidade de obter parâmetros desejáveis na entrada, na saída e com uma boa resposta na inicialização [CARRALERO et al. 2019].

A emulação de sistemas de geração PV é composta por um conversor estático que opera em malha fechada a fim de se comportar tal qual um ou mais painéis PV. São obtidas as características de tensão em função da corrente de um painel PV comercial e armazenadas na memória de um microcontrolador. As variáveis armazenadas servem de referência para o controle do emulador eletrônico, às quais são comparadas com a tensão e corrente medidas na saída do conversor CC-CC.

A curva $I-V$ é armazenada em forma de tabela em que um algoritmo de *Look-up Table* é empregado para a busca das variáveis de interesse. A partir da corrente medida na saída do conversor, o algoritmo busca na tabela um valor correspondente de tensão à curva $I-V$, que é o valor de referência para uma malha de controle de tensão de saída.

1.1 Objetivo

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é implementar e obter resultados de um emulador eletrônico de painéis solares fotovoltaicos, controlando a tensão de saída através dos dados da corrente de saída do conversor Buck com o objetivo de se obter uma tensão sobre uma carga desejada e estável na saída do emulador. Tendo como aspecto principal facilitar a interação entre o sistema de geração elétrica e conversão elétrica.

O sistema contendo o microcontrolador e a TTS terá como foco demonstrar através de sua interface os dados de saída e análise presentes no microcontrolador, sendo eles tensão elétrica e corrente elétrica, do EF de acordo com as especificações desejadas de cada painel solar fotovoltaico o qual o usuário deseja analisar o comportamento. Assim como será possível interagir com os gráficos gerados, $I-V$ (corrente elétrica [I] e tensão elétrica [V]), para se conferir os valores presentes em cada gráfico.

1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos do trabalho são:

- Obtenção de um modelo de painel solar fotovoltaico para extração da curva $I-V$;
- Projeto de um emulador eletrônico de painéis solares fotovoltaicos baseados em um conversor CC-CC rebaixador do tipo buck;
- Implementação de circuitos de condicionamento, interface com microcontrolador, programação em Arduíno IDE e tela Nextion.

2 Descrição do Emulador Fotovoltaico

2.1 Introdução

Este capítulo descreve o emulador eletrônico PV. Para isso é apresentado brevemente o modelo de uma célula solar fotovoltaica a ser emulada e a modelagem do conversor CC-CC do tipo Buck. Além disso, é apresentado o projeto do controlador de tensão de saída do emulador.

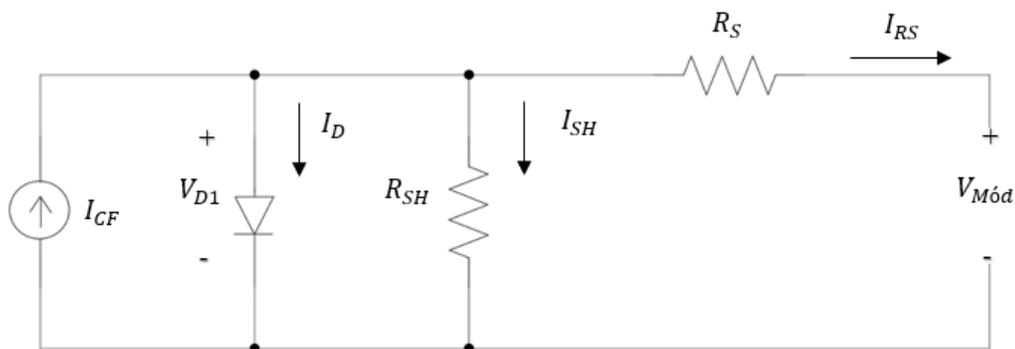
2.2 Emulador Eletrônico Solar Fotovoltaico

O emulador eletrônico presente neste trabalho será baseado a partir de dados da curva $I-V$ e $P-V$ de um módulo solar fotovoltaico, neste caso será utilizado um do modelo *KD210GX-LP* com uma potência nominal de 210 *Watts* da fabricante *Kyocera*. Com os seguintes dados técnicos gerais da Tabela 4 utilizados para a elaboração dos parâmetros do conversor Buck, sendo os mesmos, estando correlacionados ao ponto de máxima potência (MPPT) do módulo solar fotovoltaico estudado nas condições padronizadas de teste:

2.2.1 Modelo Elétrico de uma Célula Solar Fotovoltaica

A Figura 1 mostra o circuito que representa o modelo de uma célula fotovoltaica. Este circuito será implementado devido à não-linearidade e inviabilidade matemática simplificada como fonte de tensão constante ou fonte de tensão controlada por corrente [Kishor et al. 2010].

Figura 1 – Circuito Elétrico equivalente de uma célula PV.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 3 especifica as grandezas e unidades presentes na Figura 1. O circuito da Figura 1 é regido pelas seguintes fórmulas para obtenção dos valores de potência, corrente e tensão, partindo das leis de Kirchoff e aplicando elas ao circuito da Figura 1, tem se as seguintes equações:

$$I_{RS} = I_{CF}^{ref} - I_O^{ref} \left[e^{\frac{qR_S I_{RS} + V_{md}}{AkT_K}} - 1 \right] - R_S I_{RS} + \frac{V_{md}}{R_{SH}} \quad (2.1)$$

$$I_{CF}^{ref} = \frac{R_{SH} + R_S}{R_{SH}} I_{SC} \quad (2.2)$$

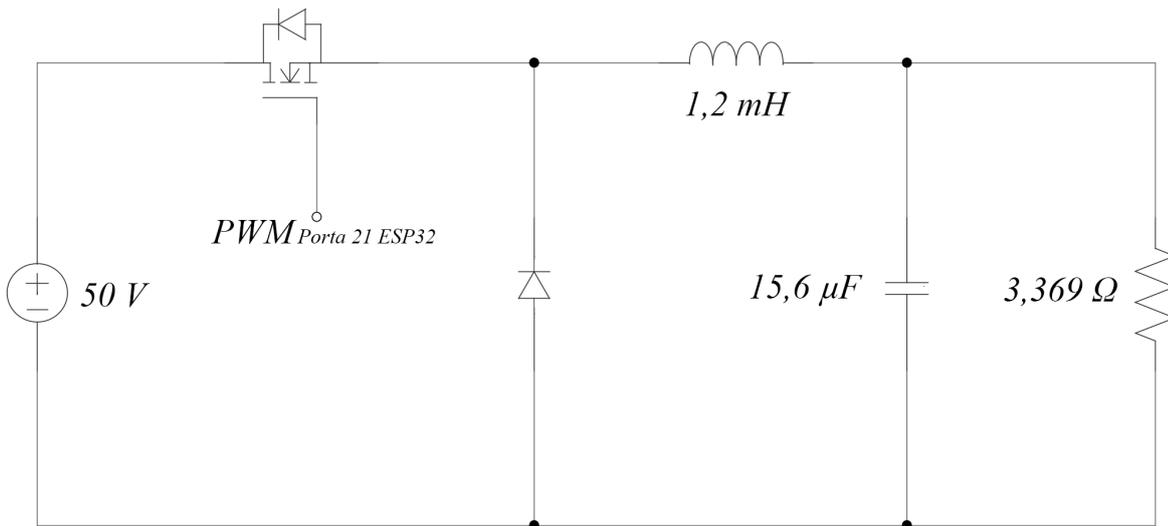
$$P_{max,m} = V_{mp} \left(I_{RS} - I_O^{ref} \left[\exp \frac{V_{mp} + R_S I_{mp}}{AV_T} - 1 \right] - \frac{V_{mp} + R_S I_{mp}}{R_{SH}} \right) \quad (2.3)$$

[Moura 2020] [Villalva, Gazoli e Filho 2009]

Onde, I_{RS} é a corrente de saída do conversor, I_{CF} remete à corrente elétrica da fotocorrente e P_{max} está relacionado ao ponto de máxima potência obtida segundo os dados da placa solar presente no estudo.

Partindo do circuito da Figura 2, o qual terá a saída interligada à entrada do EF, o circuito do emulador passa a contar com uma tensão de alimentação proveniente do circuito elétrico equivalente de uma fonte de alimentação em corrente contínua (CC) de 50V (Volts) neste caso.

Figura 2 – Circuito Conversor Buck do EF.



Fonte: Elaborado pelo autor.

2.3 Projeto do conversor Buck

Utilizando as seguintes equações de capacitância [C], indutância [L] e razão cíclica [D]:

$$C = \frac{\Delta L}{8\Delta V_C f_s} \quad (2.4)$$

[Erickson e Maksimovic 2007]

$$L = \frac{V_{in}(1-D)D}{\Delta I_L f_s} \quad (2.5)$$

$$D = \frac{V_{out}}{V_{in}} \quad (2.6)$$

[Moura 2020]

$$I_{rip} = \frac{V_{out} \cdot (1-D)}{f_s \cdot L} \quad (2.7)$$

$$V_{rip} = \frac{V_{out} \cdot D}{f_s \cdot L} \quad (2.8)$$

[Kazimierczuk 2015] [Mohan, Undeland e Robbins 2003]

Obtém-se os valores de capacitância, indutância e resistência utilizando f_s da Tabela 4:

$$L = 1,2mH \quad (2.9)$$

$$C = 15,6\mu F \quad (2.10)$$

$$R_O = 3,369\Omega \quad (2.11)$$

Utilizando os dados da Tabela 2 e das equações (2.9) e (2.10), tem-se o *ripple* da corrente (2.12) e da tensão (2.13):

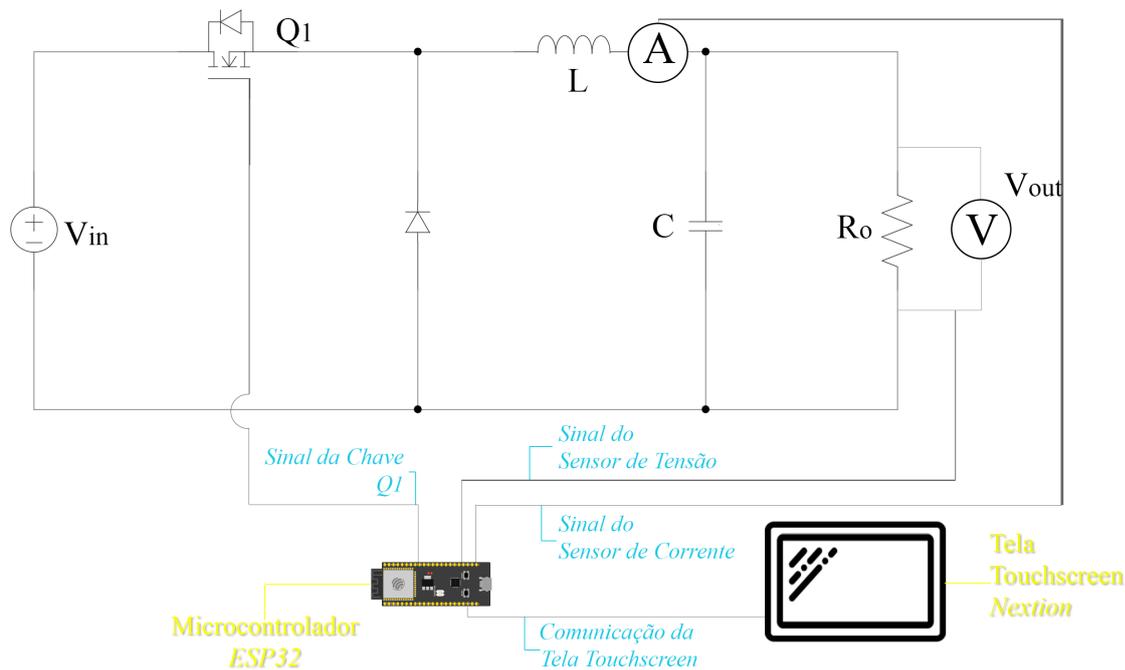
$$I_{rip} = 0,3900A \quad (2.12)$$

$$V_{rip} = 0,4433V \quad (2.13)$$

As especificações das Figuras 1 e 2 estão presentes na Tabela 1 [Moura 2020] [Villalva, Gazoli e Filho 2009].

A Figura 3 ilustra a elaboração do circuito do tipo conversor buck, utilizando referências de [Moura 2020], no entanto para este estudo será utilizado um microcontrolador *ESP32* em conjunto com uma tela Touchscreen da marca Nextion.

Figura 3 – Circuito do Conversor Buck contendo o microcontrolador com uma tela.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Demais dados são obtidos através do datasheet do módulo solar fotovoltaico *KD210GX-LP* Tabela 2.

A tensão e corrente são medidas na saída do conversor por meio de sensores e circuitos de instrumentação e enviadas ao microcontrolador ESP32. Um painel fotovoltaico Kyocera KD210CX-LP foi empregado para a obtenção da curva IV e os valores armazenados na memória do ESP32. O valor de corrente medido entra na *Look-up Table* que retorna o valor de tensão equivalente a curva do painel. Esta tensão de referência retornada pela *Look-up Table* é comparada com a tensão medida na saída do conversor, para gerar um valor de erro e finalmente uma ação de controle. A ação de controle, por sua vez é armazenada em um registrador que dará origem ao sinal PWM de acionamento da chave IGBT.

As variáveis envolvidas no emulador PV são enviadas a uma tela LCD NEXTION. Por ser do tipo *Touch-screen*, podem ser selecionadas diversas variáveis a escolha do usuário, como tensão de saída, corrente de saída, ciclo de trabalho e tensão de saída da *Look-up Table*.

2.4 Modelagem do Conversor

Com base nos parâmetros do *datasheet* do painel fotovoltaico utilizado no trabalho, Tabela 2 e baseando-se no circuito da Figura 2 onde é utilizado uma fonte de corrente no lugar da chave $Q1$ como representado na figura 4.

Utilizando o conceito de pequenas perturbações para simplificação da análise, as variáveis serão descritas como um valor constante mais uma pequena perturbação, de acordo com as

Tabela 1 – Especificações das grandezas e componentes das figuras 1 e 2.

| Grandeza | Símbolo | Unidade |
|--|-------------|----------|
| Fotocorrente. | I_{CF} | A |
| Tensão no Diodo da Célula Fotovoltaica. | V_{D1} | V |
| Corrente no Diodo. | I_D | A |
| Resistência Paralela. | R_{SH} | Ω |
| Corrente sobre a Resistência Paralela. | I_{SH} | A |
| Resistência Série. | R_S | Ω |
| Corrente sobre a Resistência Série. | I_{RS} | A |
| Tensão do Módulo da Célula Fotovoltaica. | V_{Md} | V |
| Tensão de Entrada do EF. | V_{in} | V |
| Corrente de Entrada do EF. | I_{in} | A |
| Tensão do ESP32 aplicada sobre as chaves IGBT do EF. | V_{ESP32} | V |
| Tensão no Diodo do EF. | V_{Md} | V |
| Corrente sobre o Indutor | I_L | A |
| Corrente sobre o Capacitor | I_C | A |
| Corrente de Saída. | I_{out} | A |
| Tensão de Saída. | V_{out} | V |
| Chave IGBT | Q1 | - |
| Indutor | L | H |
| Capacitor | C | F |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 2 – Dados dos componentes das figuras 1 e 2.

| Parâmetro [$1000W/m^2$] | Valor |
|--|-------------------------|
| Potência Máxima ($P_{max,e}$). | 210 Watts +5 / -5 % |
| Corrente de máxima potência (I_{mp}). | 7,90 A |
| Tensão de máxima potência (V_{mp}). | 26,6 V |
| Corrente de curto-circuito (I_{SC}) | 8,58 A |
| Tensão de circuito aberto (V_{OC}) | 33,2 V |
| Coeficiente de temperatura de corrente (K_I) | 0,00515 % / $^{\circ}C$ |
| Coeficiente de temperatura de tensão (K_V) | -0,120 % / $^{\circ}C$ |
| Número de células em série (N_S) | 54 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

seguintes equações [Erickson e Maksimovic 2007]:

$$v_{in} = V_{in} + \widehat{v}_{in}$$

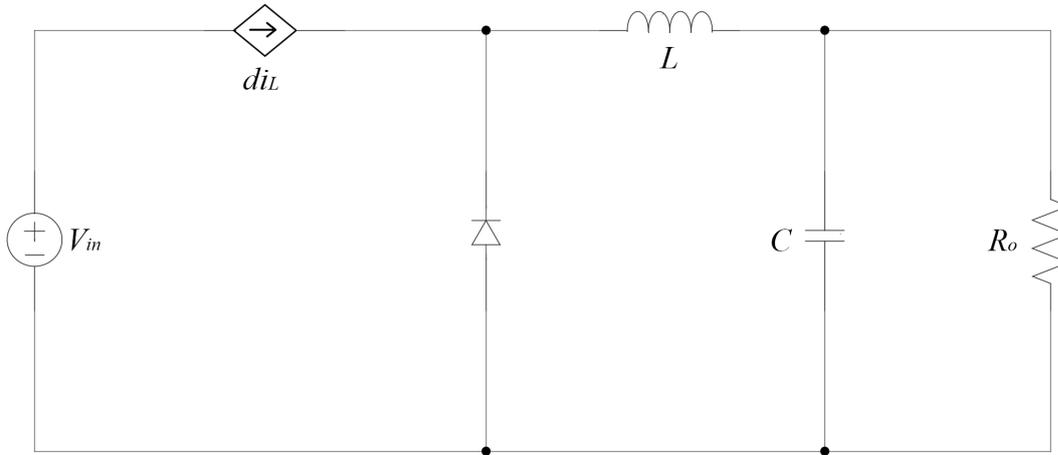
$$i_L = I_L + \widehat{i}_L$$

$$d = D + \widehat{d}$$

$$v_{out} = V_{out} + \widehat{v}_{out}$$

$$i_{in} = I_{in} + \widehat{i}_{in}$$

Figura 4 – Circuito do conversor buck com fonte de corrente.



Fonte: Elaborado pelo autor.

$$i_{Q1} = I_{Q1} + \widehat{i}_{Q1}$$

Onde D , V_{out} , I_{in} e I_{Q1} são os valores CC da razão cíclica, tensão de saída, corrente de entrada e corrente de chave, respectivamente. As pequenas perturbações aplicadas a estas variáveis são: \widehat{d} , \widehat{v}_{out} , \widehat{i}_{in} e \widehat{i}_{Q1} . Efetuando a manipulação das equações anteriores, obtém-se:

$$i_{in} = i_L \cdot d \quad (2.14)$$

$$I_L + \widehat{i}_L = (I_L + \widehat{i}_L)(D + \widehat{d}) \quad (2.15)$$

$$v_{out} = v_C \cdot d \quad (2.16)$$

$$V_{out} + \widehat{v}_{out} = (V_C + \widehat{v}_C)(D + \widehat{d}) \quad (2.17)$$

Partindo do mesmo para a corrente sobre a chave $Q1$, e considerando as grandezas \widehat{x} muito menores que x tem-se:

$$i_{Q1} = i_{in} \cdot d \quad (2.18)$$

$$I_{Q1} + \widehat{i}_{Q1} = I_{in} + \widehat{i}_{in} \cdot D + \widehat{d} \quad (2.19)$$

Simplificando todas as equações, de (2.14) até a equação (2.19), obtém-se:

$$I_{Q1} = I_{in} D \quad (2.20)$$

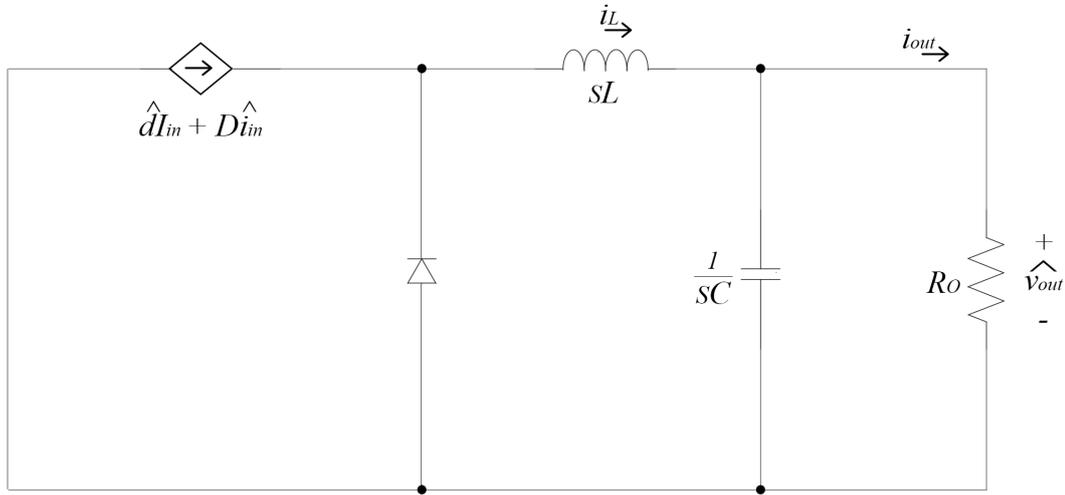
$$V_{out} = V_C D \quad (2.21)$$

$$i_{Q1} = I_{in} \hat{d} + \hat{v}_{in} D \quad (2.22)$$

$$\hat{v}_{out} = V_C \hat{d} + \hat{v}_C D \quad (2.23)$$

Utilizando as equações (2.22) e (2.23), obtém-se o modelo médio de pequenos sinais, figura 5:

Figura 5 – Circuito do conversor buck modelo de pequenos sinais.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Considerando uma impedância Z_{eq} em relação sem a associação do indutor com o paralelo com o capacitor e a carga R_o , demonstrado na seguinte equação (2.24) [Berger et al. 2018]:

$$Z_{eq} = \frac{\frac{1}{sC} R_o}{\frac{1}{sC} + R_o} \quad (2.24)$$

A equação (2.25) mostra a representação da perturbação da corrente sobre o indutor:

$$\hat{i}_L = \frac{V_{in} \hat{d}}{Z_{eq}} \quad (2.25)$$

Relacionando as equações (2.24) e (2.25), temos a função de transferência desejada para o sistema estudado [Carralero et al. 2019]:

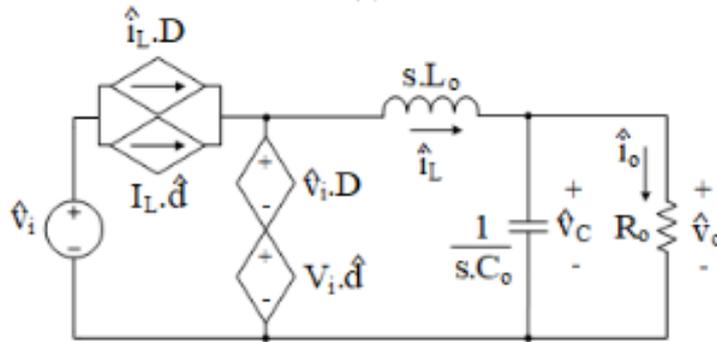
$$F_i(s) = \frac{\hat{i}_L}{\hat{d}} = V_{in} \frac{\frac{s}{L} + \frac{1}{R_o LC}}{s^2 + \frac{s}{R_o C} + \frac{1}{LC}} \quad (2.26)$$

2.4.1 Obtenção da Função de Transferência da Tensão de Saída pela Razão Cíclica

Para controlar a tensão de saída de um conversor $CC-CC$ é necessário obter uma função de transferência que relaciona as pequenas variações da tensão de saída $\hat{v}_o(s)$ com as da razão cíclica $\hat{d}(s)$. Razão pela qual o controlador atua na razão cíclica do modulador PWM de modo a regular a tensão de saída do conversor. [Kazimierczuk 2015]

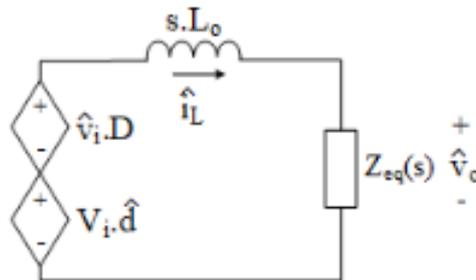
A partir disso, simplificando o circuito da Figura 6 que retrata o modelo médio de pequenos sinais o qual já está com a transformada de Laplace, e utilizando a equação (2.24) resulta na Figura 7 [Caio Moraes 2018].

Figura 6 – Circuito do modelo médio de pequenos sinais.



Fonte: Caio Moraes 2018.

Figura 7 – Circuito do modelo médio de pequenos sinais simplificado.



Fonte: Caio Moraes 2018.

Analisando o circuito da Figura 7, nota-se que a tensão de saída pode ser obtida aplicando-se a teoria de divisor de tensão, segundo a seguinte equação (2.27):

$$\hat{v}_o(s) = [\hat{v}_i(s).D + V_i\hat{d}(s)].\left[\frac{Z_{eq}(s)}{s.L_o + Z_{eq}(s)}\right] \quad (2.27)$$

Logo,

$$\hat{v}_o(s) = \frac{V_i}{L_o.C_o.s^2 + \frac{L_o}{R_o}.s + 1}.\hat{d}(s) + \frac{D}{L_o.C_o.s^2 + \frac{L_o}{R_o}.s + 1}.\hat{v}_i(s) \quad (2.28)$$

[Caio Moraes 2018]

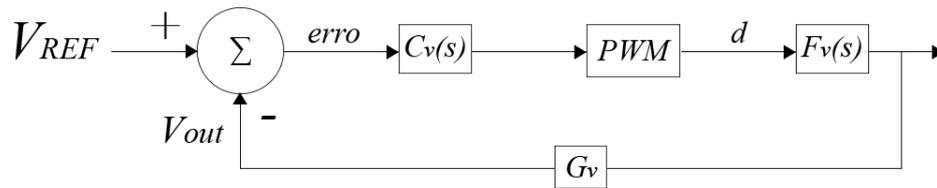
Partindo de (2.28) conclui-se que as variações da tensão de saída não dependem somente das variações na razão cíclica, como também das variações na tensão de entrada $\hat{v}_i(s)$. No entanto, agora se tratando de um sistema linear, é possível analisar cada perturbação de forma independente. Com isso, para se obter a função de transferência que relaciona a tensão saída com a corrente de entrada $F_v(s)$, considerando a razão cíclica constante $\hat{d}(s) = 0$, resultando em (2.29):

$$F_v(s) = \frac{\hat{v}_o(s)}{\hat{i}_i(s)} = \frac{C_o \cdot s + \frac{1}{R_o}}{L_o \cdot C_o \cdot s^2 + \frac{L_o}{R_o} \cdot s + 1} \quad (2.29)$$

2.4.2 Projeto do Controlador

A seguinte ilustração, Figura 8, demonstra o diagrama de blocos para o controle da tensão de saída v_{out} do conversor.

Figura 8 – Diagrama de blocos para controle da tensão de saída V_{out} .



Fonte: Elaborado pelo autor.

O objetivo do diagrama de blocos é determinar o compensador de tensão $V_v(s)$ que faça o sistema em regime permanente tender a zero, assim como ter uma resposta dinâmica desejada. Entretanto, é essencial conhecer o modelo da planta (2.29), o ganho do sensor de tensão e o ganho do modulador PWM .

Considerando que o ganho do controlador K_{pwm} , pode ser dado pela equação (2.30), onde V_P é o valor de pico da portadora. Para este estudo será considerado $V_P = 1$, com isso:

$$K_{PWM} = \frac{1}{V_P} \quad (2.30)$$

$$K_{PWM} = 1$$

[Moura 2020]

Se tratando do ganho do sensor de tensão G_v , considera-se:

$$G_v = \frac{1}{V_B} \quad (2.31)$$

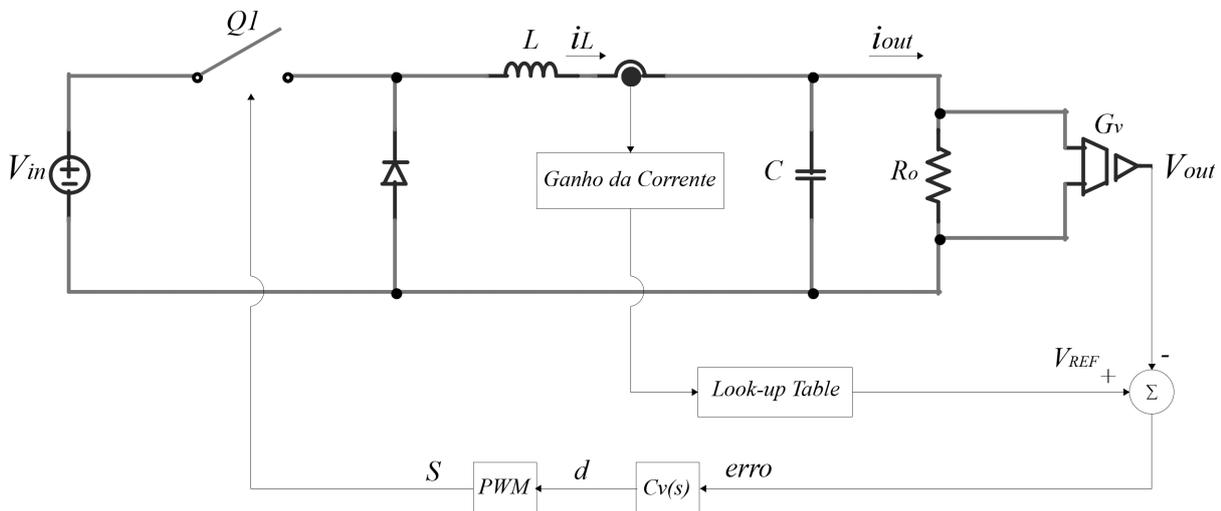
Onde V_B representa o valor base da tensão, considerando o dado de tensão no ponto de máxima potência (MPPT) do painel solar utilizado no trabalho presente na Tabela 2, e ainda, Considerando uma margem de 50% devido a possíveis transitórios, conclui-se que:

$$G_v = \frac{1}{(0,5 * 26,6) + 26,6} = 0,02506 \quad (2.32)$$

2.5 Metodologia de Controle

A Figura 9 representa o esquemático de controle que será implementado no trabalho, na tabela estão os dados de cada termo presente na figura.

Figura 9 – Circuito desenvolvido para análise dos dados e controle da tensão no conversor buck.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 3 – Especificações das grandezas e componentes da figura 9.

| Símbolo | Descrição |
|-----------|---|
| G_v | Ganho em relação ao sensor de tensão |
| V_{REF} | Tensão de referência obtida dos dados processados na Look-up Table, cuja sua finalidade é compara os dados de tensão vindos do conversor e encontrar a sua respectiva tensão. |
| erro | Diferença entra a tensão de referência V_{REF} e a tensão sobre a carga R_O . |
| $C_V(s)$ | Compensador de tensão. |
| PWM | Modulador por largura de pulso para chavear a chave $Q1$ |

Fonte: Elaborado pelo autor.

A fim de possibilitar uma representação da curva $I - V$ (Corrente vs Tensão) do módulo solar presente no atual estudo com base na equação geral (2.1) com a leitura do valor instantâneo

de i_{out} , existirá um único valor correspondente de tensão que é obtido através da curva $I - V$ do painel, cujos valores são armazenados em uma *Look-up Table* na memória do microcontrolador. A partir disto, o valor de V_{REF} é comparado com o valor V_{out} obtido pelo sensor de tensão sobre a carga R_o , com isso gerando um sinal de erro. O sinal de erro passa pelo controlador PI , gerando um sinal de controle que após comparado com uma portadora triangular dará origem ao sinal de acionamento da chave.

O projeto do compensador é realizado a partir do método de resposta em frequência. Esse método consiste em determinar a frequência de cruzamento e a margem de fase para garantir a estabilidade do sistema. De princípio analisa-se a função de transferência de malha fechada obtida a partir da Figura 8 determinada pela seguinte equação (2.33) [Dorf e Bishop 2001].

$$FTMF(s) = \frac{v_{out}}{V_{REF}} = \frac{G_v(s) \cdot K_{PWM} \cdot C_v(s)}{1 + C_v(s) \cdot K_{PWM} \cdot G_v(s) \cdot G_v} \quad (2.33)$$

Sendo (2.34) e (2.35) os polos de malha fechada.

$$1 + C_v(s) \cdot K_{PWM} \cdot G_v(s) \cdot G_v = 0 \quad (2.34)$$

$$C_v(s) \cdot K_{PWM} \cdot G_v(s) \cdot G_v = -1 \quad (2.35)$$

Considerando a Figura 8, a função de transferência de laço aberto não compensada $FTLA_{NC}(s)$ (2.36) é o produto dos termos da malha aberta sem considerar o compensador $C_v(s)$. Já a equação (2.37) representa a função de transferência de laço aberto compensada considerando o compensador $FTLA_C(s)$. Será utilizado ($s = j\omega$) com o sistema operando em regime permanente senoidal para análise segundo o método da resposta em frequência.

$$FTLA_{NC}(\omega) = K_{PWM} \cdot G_v(s) \quad (2.36)$$

$$FTLA_C(s) = C_v(s) \cdot K_{PWM} \cdot G_v(s) \quad (2.37)$$

Como o $FTLA_{NC}(s)$ não apresenta polos em sua origem, o compensador deve integralizar o sinal de erro a fim de se obter um erro nulo para entrada em degrau. Com isso, se optou pela utilização do compensador proporcional-integral (PI) presente na equação (2.38), para que seja possível determinar a margem de fase do sistema após a compensação, garantindo dois graus de liberdade (K_c) e (ω_z) [Moura 2020].

$$C_v(s) = K_c \cdot \frac{(s + \omega_z)}{s} \quad (2.38)$$

[Caio Moraes 2019]

Substituindo $C_v(s)$ da equação (2.38) na (2.37), tem-se:

$$FTLA_C(s) = K_c \cdot \frac{(s + \omega_z)}{s} \cdot FTMA_{NC}(s) \quad (2.39)$$

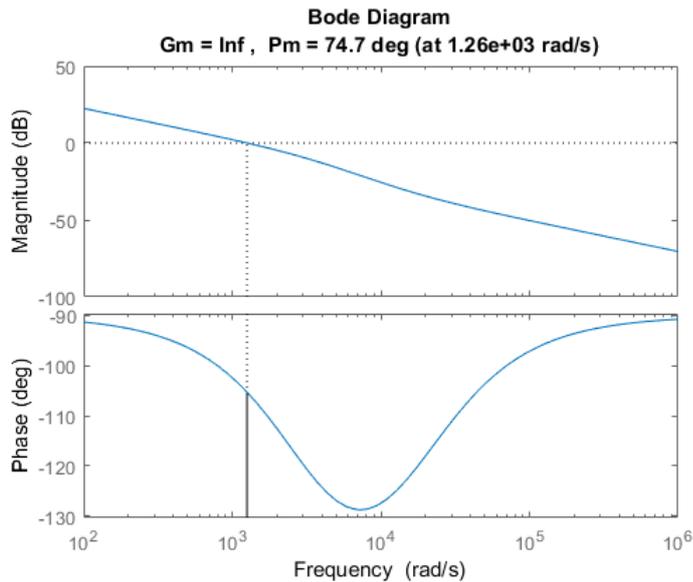
Com isso, é possível determinar o ganho do controlador K_c e a frequência do zero ω_z como demonstrado nas seguintes equações:

$$K_c = \frac{\omega_c}{\sqrt{\omega_c^2 + \omega_z^2}} \cdot \frac{1}{|FTLA_{NC}(j\omega_c)|} \quad (2.40)$$

$$\omega_z = \frac{\omega_c}{\tan[PM - 90 - \angle FTMA_{NC} \cdot \omega_c]} \quad (2.41)$$

O seguinte gráfico da Figura 10 retrata o comportamento do diagrama de bode para as características implementadas da $FTLA_C(s)$ obtida através do software *Matlab*. Nota-se que a malha aberta apresenta um comportamento estável, visto que a margem de fase é positiva e a margem de ganho se apresenta infinita visto que a fase não ultrapassa os -180 .

Figura 10 – Diagrama de Bode da $FTLA_C(s)$, *Matlab*.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com isso, a frequência de cruzamento equivalente a 10% da frequência de chaveamento, onde $f_c = 2kHz$ e margem de fase de 60° , com isso resulta os valores das equações (2.40) e (2.41):

$$K_c = 0,0071 \quad (2.42)$$

$$\omega_z = 1,2566 \cdot 10^4 \text{ rads/s} \quad (2.43)$$

2.5.1 Elaboração do Esquemático dos Circuitos

Este tópico terá como finalidade demonstrar os dados obtidos através do Software PSIM, utilizado para a elaboração dos circuitos do conversor buck, do *Look-up Table* e do código de malha para chaveamento do IGBT. Também será utilizado os parâmetros obtidos do tópico anterior para modelagem dos blocos *Look-up Table* e *C-Block* destes circuitos.

2.5.1.1 Simulação em Software PSIM

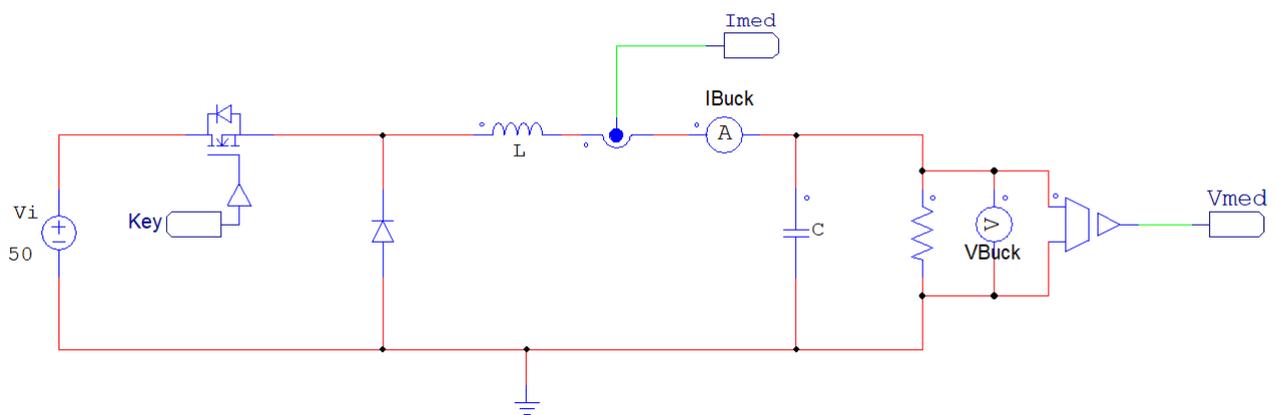
Após a modelagem e projeto dos controladores, foi desenvolvido um circuito que fosse capaz de simular o comportamento de todo o sistema, este sistema é composto do circuito contendo o conversor buck, circuito do *Look-up Table* para tensão e corrente, do Sistema PV de teste e do circuito do código de malha. Foi utilizado um circuito modelo de um painel solar fotovoltaico com as características semelhantes ao modelo utilizado neste projeto, *KD210GX-LP*, com a finalidade de simular e comparar os valores com o circuito do trabalho.

2.5.1.2 Conversor do tipo Buck

O conversor buck da Figura 11 é responsável em converter a tensão de 50V na entrada para 20V, referente ao MPPT, na saída. Os sinais de gate para o conversor são oriundos do controlador implementado em linguagem C, como mostra a Figura 15.

Figura 11 – Conversor do tipo Buck, *PSIM*.

Conversor Buck

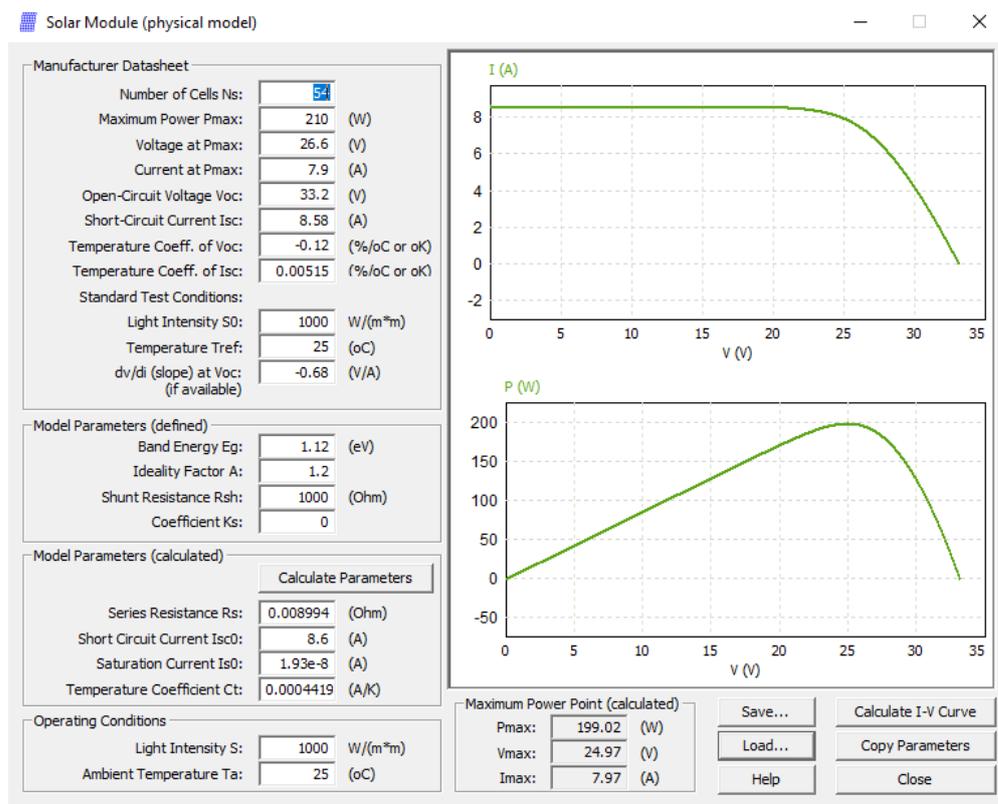


Fonte: Elaborado pelo autor.

Na saída do conversor está presente o sensor de tensão *VBuck*, e o sensor de corrente *IBuck* que se encontra em série com o indutor. Os sensores são responsáveis em enviar seus sinais para os blocos de *Look-up Table* Figura 13 através dos caminhos *Imed* e *Vmed*. A entrada *Key* corresponde ao sinal proveniente do C Block Figura 15. Os dados de corrente provenientes do sensor de corrente irá compara-lo com os dados de tensão e corrente armazenados, obtidos a partir dos dados da placa solar utilizado no trabalho Figura 12, e por fim irá enviar os dados de corrente obtido do sensor de corrente e os dados de tensão obtido da *Look-up Table* para o circuito do C-Block Figura 15.

2.5.1.3 Bloco *Look-up Table* $I_{in} - V_{out}$

O bloco de *Look-up Table* da Figura 13 é responsável por obter os dados do sensor de corrente e compara-los com os dados armazenados de tensão e corrente do painel solar fotovoltaico

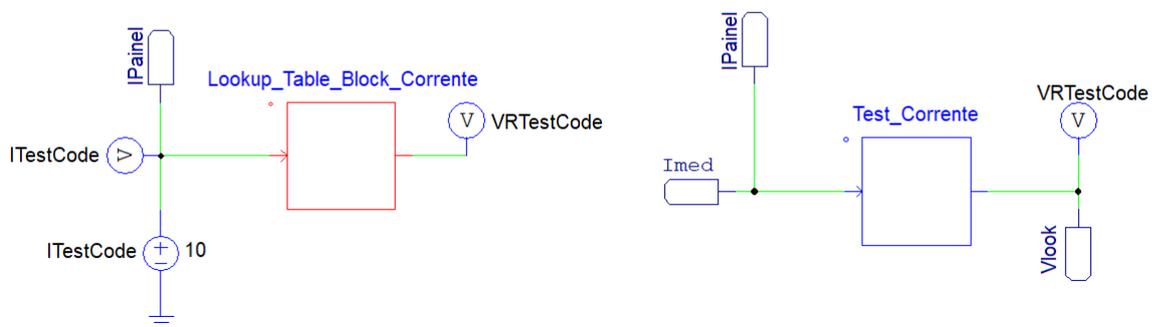
Figura 12 – Dados e gráficos do PV adotado, *PSIM*.

Fonte: Elaborado pelo autor.

utilizado neste projeto. Por fim, a *Look-up Table* seleciona um valor de tensão correspondente à respectiva corrente na curva *I-V*. Esse valor de tensão V_{Look} é a referência para a malha de controle de tensão computada no bloco *C-Block* e envia ao Bloco *C-Block* Figura 15. Estes dados de tensão do painel e corrente do painel estão armazenados em vetores no bloco da *Look-up Table*.

Figura 13 – Circuito da Lookup Table de Corrente, *PSIM*.

C Block's com Lookup Table lin - Vout



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os termos da Figura 13 estão especificados no seguinte item:

- *ITestCode* - Unidade de referência;

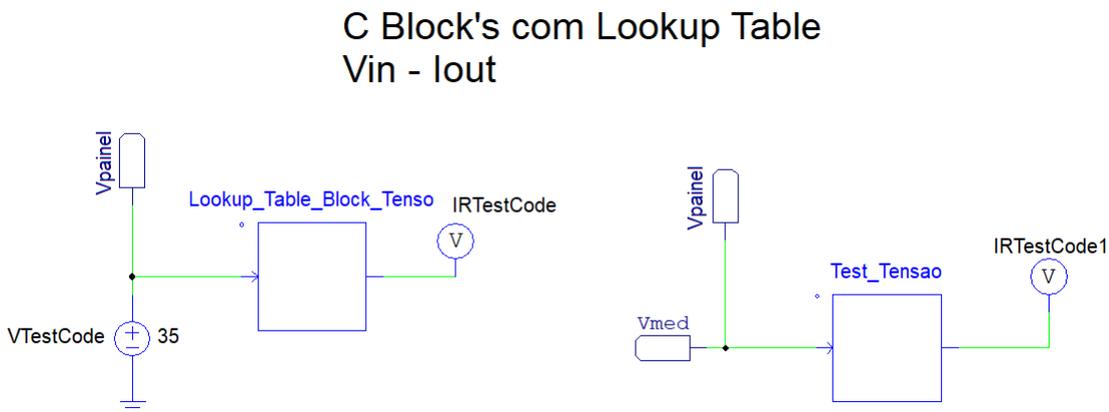
- $IPainel$ - Corrente do painel solar utilizado de modelo Figura 16;
- $VRTestCode$ - Leitura da tensão de saída do bloco;
- $Vlook$ - Saída de tensão para o bloco *C-Block* Figura 15;
- $Imed$ - Corrente da saída do conversor Figura 11.

O bloco *Lookup Table Block Corrente* foi utilizado para analisar os dados obtidos do bloco *Sistemas PV - Teste* da Figura 16, já o bloco *Test Corrente* foi utilizado como modelo final para a implementação no bloco *C-Block*.

2.5.1.4 Bloco *Look-up Table $V_{in} - I_{out}$*

Este bloco presente na Figura 14 é utilizado para controlar a corrente de saída através da tensão de entrada do conversor, o inverso do bloco debatido anteriormente. No entanto este bloco foi utilizado apenas para testes e comparações a fim de se obter os resultados esperados no bloco da Figura 13.

Figura 14 – Circuito da Lookup Table de Tensão, *PSIM*.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Semelhante ao caso do Bloco *Look-up Table $V_{in} - I_{out}$* detalhado anteriormente, neste caso será a tensão de entrada manipulando a corrente de saída.

Os termos da Figura 14 estão especificados no seguinte item:

- $VTestCode$ - Unidade de referência;
- $VPainel$ - Tensão do painel solar utilizado de modelo Figura 16;
- $IRTestCode$ - Leitura da corrente de saída do bloco;
- $Vmed$ - Tensão da saída do conversor Figura 11.

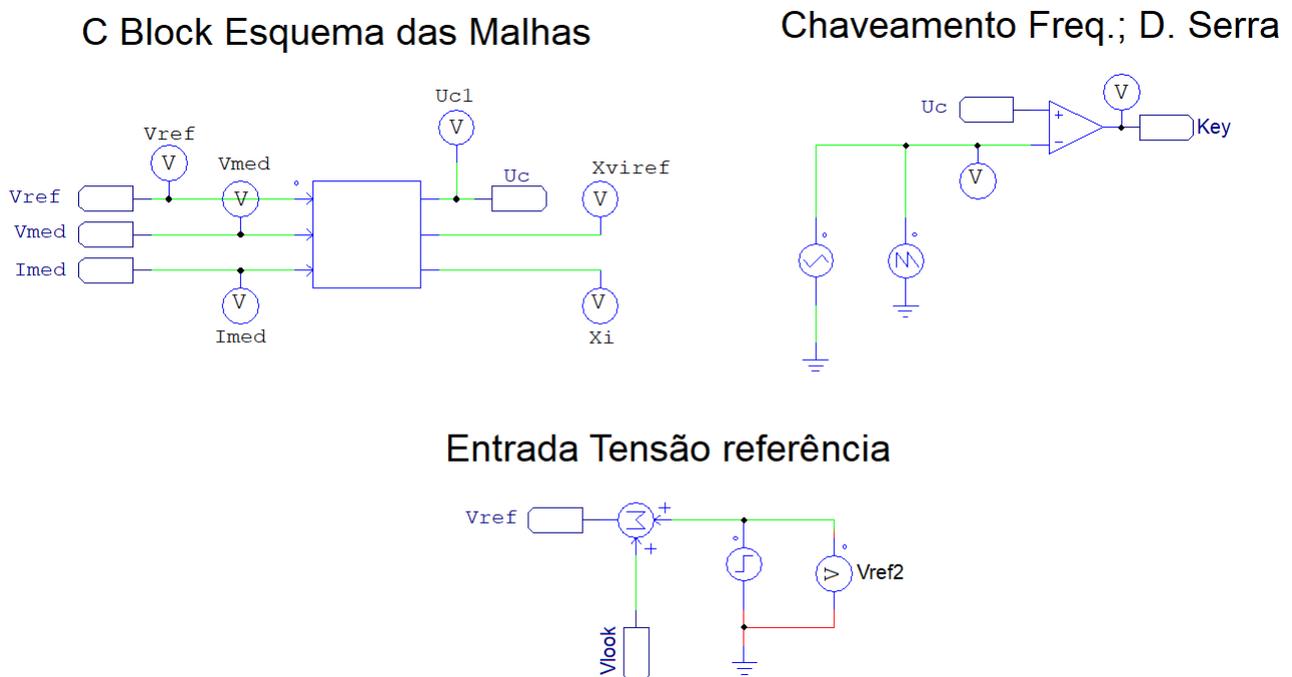
O bloco *Lookup Table Block Tenso* foi utilizado para analisar os dados obtidos do bloco *Sistemas PV - Teste* da Figura 16, e o bloco *Test Tensão* foi utilizado como modelo final para a

implementação no bloco *C-Block*. Ambos blocos foram utilizados apenas para calibrar o bloco de corrente da Figura 13, visto que este bloco utiliza a corrente de entrada para controlar a tensão de saída.

2.5.1.5 Circuito do C-Block

O circuito do C-Block Figura 15, acompanhado do circuito da "Entrada Tensão Referência" e do circuito de "Chaveamento Freq. D. Serra", irá receber os dados de corrente do circuito da *Look-up Table* e de tensão do sensor de tensão do conversor V_{med} , irá processá-los com os parâmetros de K_{pv} , K_{iv} , K_{pi} e K_{ii} obtidos do *Matlab*. Após estes processos, este circuito estará encarregado de comutar a chave IGBT através de sinais de *PWM* presente no circuito.

Figura 15 – Circuito do C-Block, *PSIM*.



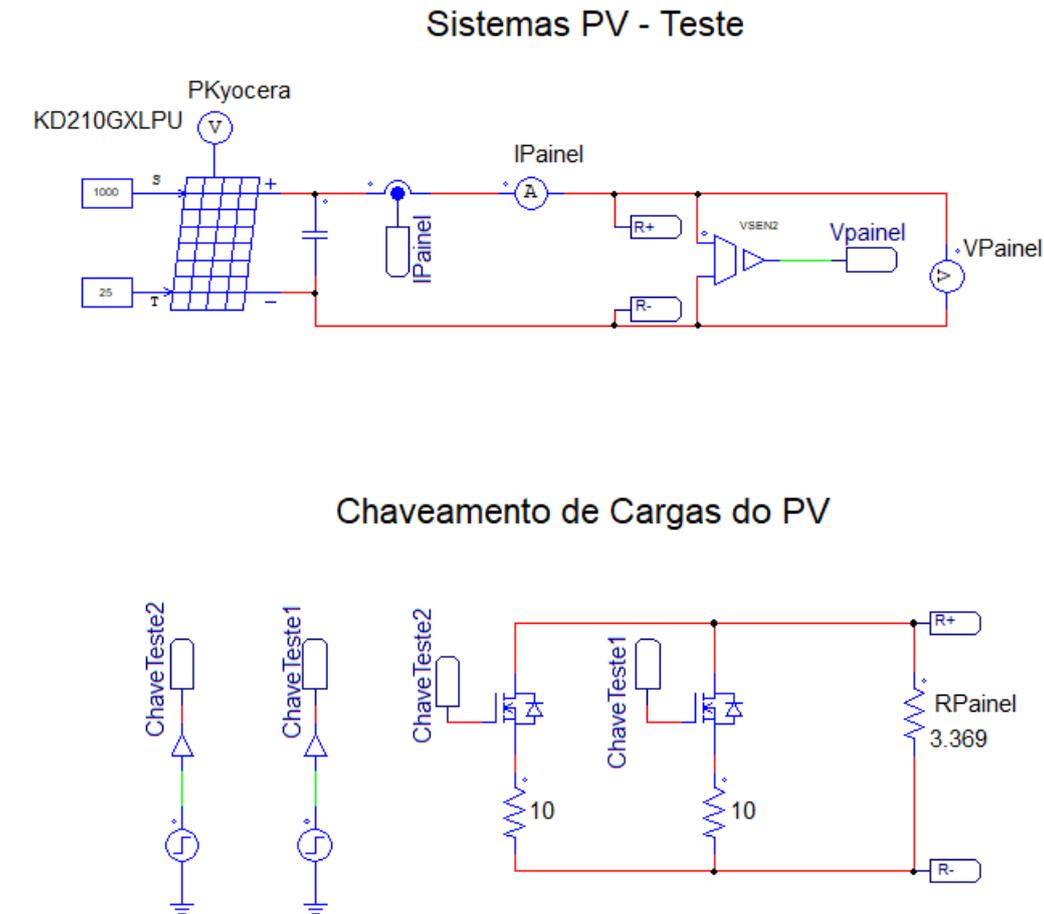
Fonte: Elaborado pelo autor.

A tensão da *Look-up Table* chega no bloco *Entrada Tensão referência* onde será somada com uma tensão de degrau unitário programada para acionar após determinado tempo após o início da simulação, com a finalidade de comparar o comportamento do gráfico de saída do conversor buck. Após esta comparação, os dados V_{ref} serão encaminhados ao bloco *C Block Esquema da Malhas*. O bloco *C Bloc Esquema das Malhas* conta com a tensão de referência V_{ref} descrita anteriormente, da tensão V_{med} obtida do sensor do conversor e da corrente I_{med} obtida também do conversor. A partir deste ponto, os dados serão comparados para gerar um dado correspondente para encaminhar ao bloco *Chaveamento Freq. D. Serra* através de U_c para então comutar o IGBT presente no conversor. O bloco *Chaveamento Freq. D. Serra* junto com um comparador presente no circuito, compara o dado de U_c com um sinal modulado com dente de serra para então enviar este sinal à chave IGBT.

2.5.1.6 Circuito do Painel Solar Fotovoltaico

O circuito de "*Sistemas PV - Teste*" e "*Chaveamento de Cargas do PV*" Figura 16 foram utilizados para testes e comparações com o circuito do *Lookup Table*, C-Block e do conversor buck. Este circuito simula o comportamento do painel fotovoltaico KD210GX-LP utilizado como modelo neste trabalho.

Figura 16 – Circuito do Sistema PV e Chaveamento de Cargas do PV, *PSIM*.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Utilizando os parâmetros ideais de teste na entrada do PV, com $1000 \text{ Watts}/\text{m}^2$ de irradiância e $25 \text{ }^\circ\text{C}$ de temperatura da célula, para testes, e utilizando 3 (três) cargas uma se comportando como uma carga ideal de $3,369 \text{ }\Omega$ para o PV e as outras duas de $10 \text{ }\Omega$ conectadas em paralelo com uma chave de acionamento *ChaveTeste1* e *ChaveTeste2* por tempo em cada carga. Este método de chaveamento de cargas em paralelo foi utilizado apenas para analisar o comportamento do PV com o implemento de demais cargas. Os dados obtidos desta análise, *IPainel* e *VPainel* são enviados ao bloco *Look-up Table* tanto de tensão quanto de corrente a fim de se calibrar os códigos presente nestes blocos.

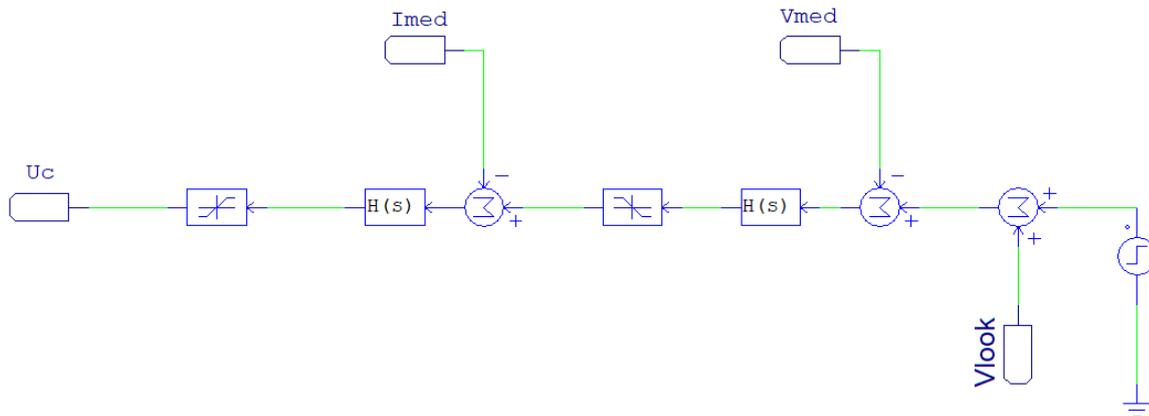
2.5.1.7 Controle em Malha Fechada

O diagrama de blocos "*Controle em Malha Fechada*" foi utilizado para simular o comportamento do C Block e ajustar o código do mesmo para chaveamento da chave IGBT presente no

conversor buck Figura 17.

Figura 17 – Circuito do Esquema de Malha Fechada, *PSIM*.

Esquema Malha Fechada



Fonte: Elaborado pelo autor.

Este circuito tem o mesmo papel que bloco *C-Block*, a diferença é que este circuito apresenta os resultados de acordo com entradas através de funções, presente nos quadrados denominado por $H(s)$, pelo próprio software *PSIM*, já o bloco *C-Block* Figura 15 utiliza um código gerado na linguagem *C* de programação. Ele utiliza os dados *Imed*, *Vmed* e *Vlook* como entrada e utiliza *Uc* como sinal de saída, este sinal é encaminhado ao circuito *Chaveamento Freq. D. Serra*, assim como faz o bloco *C-Block*.

Na próxima seção será detalhado os dados das simulações obtidas destes circuitos.

3 Simulações e Testes de Bancada

3.1 Introdução

Nesta seção será apresentado o resultado das simulações obtidas através dos softwares *PSIM* e *Matlab*, ao final da seção será demonstrado os testes de bancada que foram efetuados durante a elaboração do trabalho.

A Tabela 4 com os dados do conversor Buck será utilizada para a elaboração das simulações seguintes.

Tabela 4 – Parâmetros adotados para a análise do conversor buck.

| Parâmetro | Valor |
|---|--|
| Tensão de Alimentação | $V_{in} = 50 V$ |
| Frequência de Chaveamento | $f_s = 20 kHz$ |
| Potência de Saída | $P_O = 210 W$ |
| Tensão de Saída | $V_O = 26,6 V$ |
| Corrente de Saída | $I_O = 7,9 A$ |
| Ondulação da Corrente no Indutor | $\Delta I_L = 10\%$ da corrente de saída |
| Ondulação da Tensão no Capacitor | $\Delta V_C = 1\%$ da tensão de saída |
| Amplitude da onda portadora triangular do PWM | $V_m = 1 V$ |

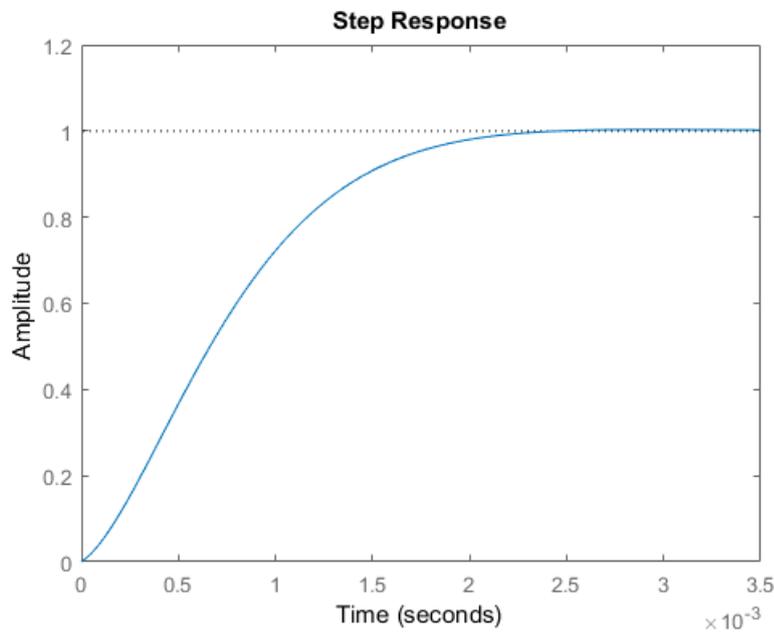
Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2 Simulações com *Matlab*

A seguinte Figura 18 mostra a resposta ao degrau do sistema de controle em malha fechada presente na simulação obtida pelo *Matlab*. É possível notar um comportamento amortecido com tempo de acomodação em torno de 2,5 ms de acordo com o projeto.

3.3 Simulações no *PSIM*

O software *PSIM* foi empregado para a simulação dos circuitos desenvolvidos nas seções anteriores. Utilizando os dados das equações (2.9), (2.10) e (2.11) implementadas na simulação, assim como demais códigos presentes nos blocos da Figura 14 e Figura 15 com uma tensão de alimentação CC de 50V na entrada do conversor buck, obteve-se a seguinte simulação da Figura 45. Esta imagem demonstra o comportamento da tensão de saída do conversor sobre o sensor de tensão V_{Buck} e da tensão de saída $V_{RTTestCode}$ do bloco da *Look-up Table C Block's com Lookup Table In - Vout*.

Figura 18 – Simulação do degrau na função $FTLA_C$, *Matlab*.

Fonte: Elaborado pelo autor.

A componente uc corresponde ao sinal encaminhado para chaveamento proveniente do bloco *C-Block*, seu produto com uma onda portador no circuito *Chaveamento Freq. D. Serra* resulta no sinal *SaidaChaveamento* o qual está efetuando a comutação da chave IGBT. Nota-se também o comportamento das correntes de saída $IBuck$ do conversor em comparação com a corrente obtida no painel solar fotovoltaico *IPainel* utilizado no projeto. Na figura está presente uma tabela contendo os valores de cada componente presente no gráfico.

Ainda sobre a Figura 45, o gráfico presente na ilustração compara os dados de tensão de saída do conversor $VBuck$, de saída da *Look-up Table VRTestCode* e da saída $VPainel$ do circuito da Figura 16. Nota-se que o conversor está se comportando quase que igualmente ao painel solar utilizado no projeto.

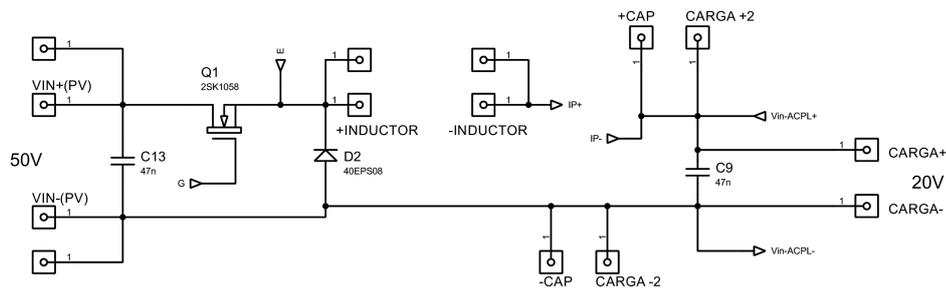
3.4 Testes e Estudo dos Componentes

Esta seção apresenta a elaboração dos circuitos presentes na placa que será confeccionada.

3.4.1 Conversor Buck

O conversor buck Figura 19 apresenta uma entrada de 50V resultando uma saída de 20V a 26,6V aproximadamente que corresponde ao valor de tensão de MPPT do painel fotovoltaico utilizado no trabalho.

Os conectores com o número (1) foram utilizados apenas para demarcar os furos na placa confeccionada, pois os componentes como capacitor, indutor, entrada do conversor buck, saída do

Figura 19 – Esquemático do Conversor Buck, *Proteus*.

Fonte: Elaborado pelo autor.

conversor buck, entrada da carga e saída da carga não acompanham as medidas fornecidas pelo software *Proteus*.

A seguinte Tabela 5 detalha cada componente presente no esquemático da Figura 19.

Tabela 5 – Dados dos componentes do Circuito Conversor Buck.

| Componente | Característica |
|---------------------------|---------------------|
| 6x Terminal c/ parafuso | Fixação dos cabos |
| 2x Capacitor Cerâmico | 680V L474J |
| 1x Diodo Schottky | 1508 1560G |
| 1x Capacitor Eletrolítico | 200V 1000 μ F |
| 1x Indutor | 2mH |
| 1x IGBT | Chave |

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.4.2 Sensor de Corrente

O sensor de corrente estará presente na saída do indutor presente no conversor buck. Será utilizado o CI *ACS712-20A* [Allegro 2021] Figura 20, capaz de ler até 20A, com uma sensibilidade de 100 mV/A.

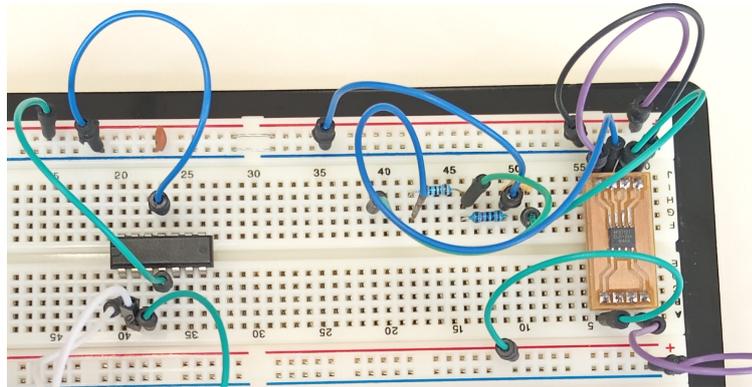
Figura 20 – Sensor de Corrente, *Allegro*

Fonte: Allegro 2021.

A seguinte Figura 21 ilustra o circuito montado do sensor de corrente com a saída conectada a um amplificador operacional com a finalidade de diminuir a tensão de operação do sensor de corrente que inicia em 2,5V para 1V a fim de evitar complicações com o microcontrolador.

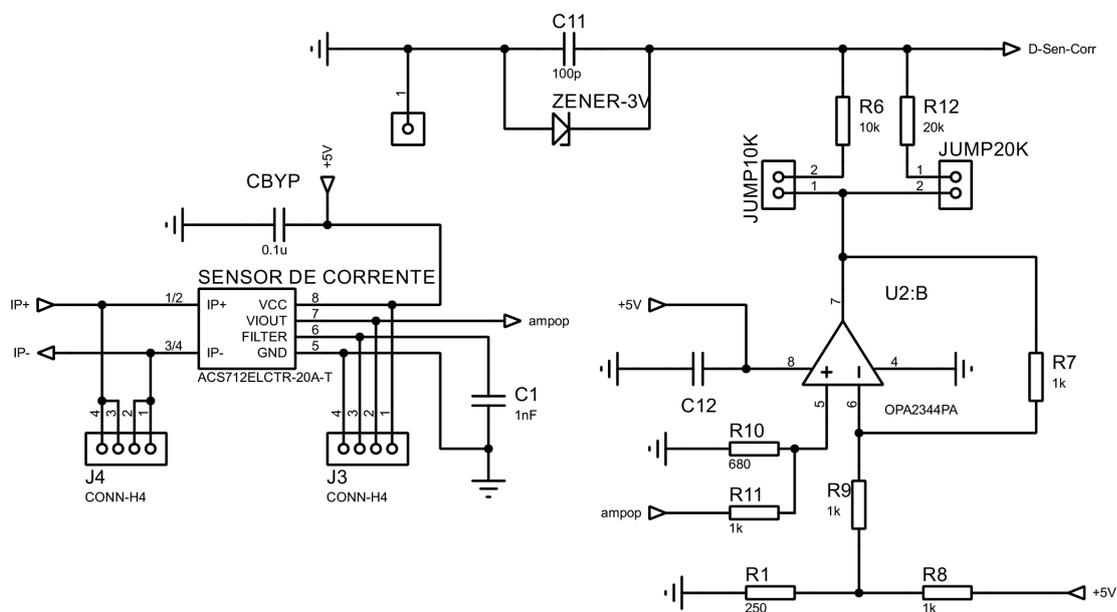
Em seguida, foi elaborado um esquemático através do software *Proteus*, onde é possível observar os componentes utilizados e seus respectivos valores e esquemas Figura 22.

Figura 21 – Sensor de Corrente com Amplificador Operacional subtrator.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 22 – Esquemático do Sensor de Corrente, *Proteus*.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A seguinte Tabela 6 detalha cada componente presente no esquemático da Figura 22.

3.4.3 Sensor de Tensão

O sensor de tensão estará presente sobre a carga do conversor buck. O CI utilizado será o sensor de tensão *ACPL-C87A* [BROADCOM 2017] Figura 23. Este CI suporta de 0V até 2V em sua entrada de leitura, sendo necessário efetuar um divisor resistivo que limitasse sua tensão de entrada. Neste trabalho se optou por uma tensão máxima de saída de 35V, visto que a tensão de circuito aberto do painel utilizado será de 33,2V.

A seguinte Figura 24 ilustra o circuito montado do sensor de corrente com a saída conectada a um amplificador operacional com a finalidade de diminuir a tensão de operação do sensor de tensão a fim de evitar complicações com o microcontrolador.

Tabela 6 – Dados dos componentes do Circuito do Sensor de Corrente.

| Componente | Característica |
|-----------------------|--------------------------|
| ACS712-20A | Sensor de Corrente |
| OPA2344 | Amplificador Operacional |
| 4x Resistores | 1 $k\Omega$ |
| 1x Resistor | 680 Ω |
| 1x Resistor | 250 Ω |
| 1x Resistor | 10 $k\Omega$ |
| 1x Resistor | 20 $k\Omega$ |
| 1x Diodo Zener | 3V |
| 1x Capacitor Cerâmico | 100 ρF |
| 2x Capacitor Cerâmico | 0,1 μF |
| 1x Capacitor Cerâmico | 1 ηF |

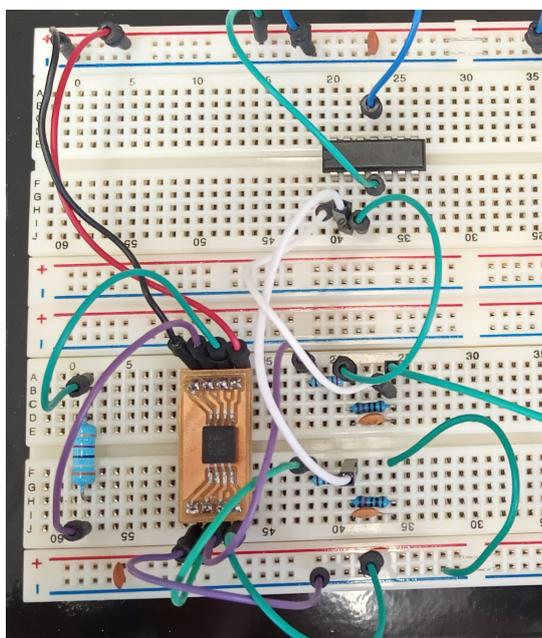
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 23 – Sensor de Tensão



Fonte: BROADCOM 2017.

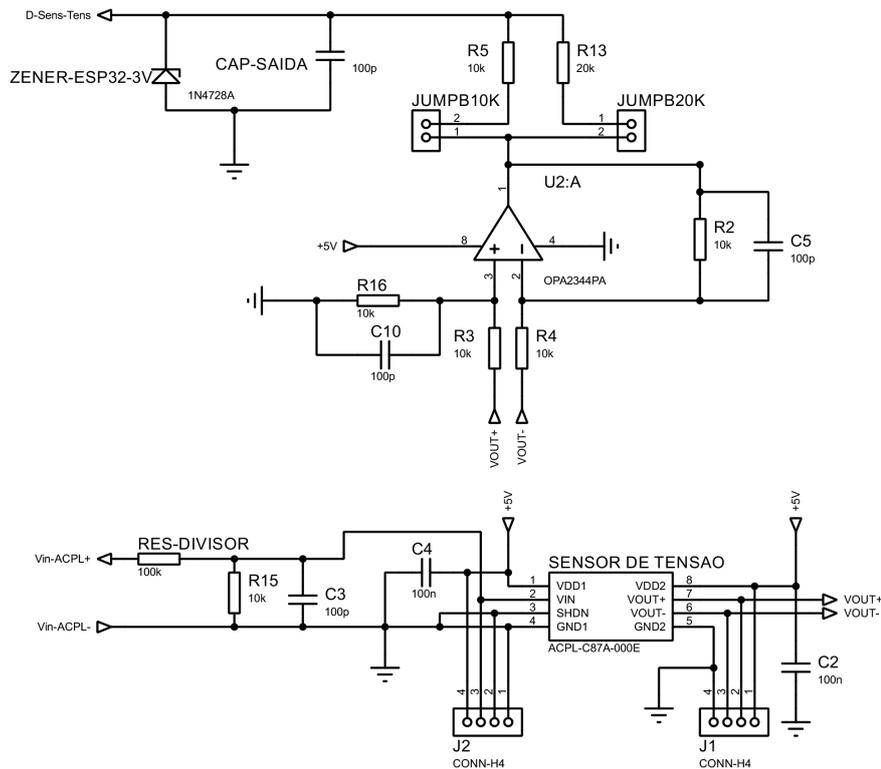
Figura 24 – Sensor de Tensão com Amplificador Operacional subtrator



Fonte: Elaborado pelo autor.

Em seguida, foi elaborado um esquemático através do software *Proteus*, onde é possível observar os componentes utilizados e seus respectivos valores e esquemas Figura 25.

A seguinte Tabela 7 detalha cada componente presente no esquemático da Figura 25.

Figura 25 – Esquemático do Sensor de Tensão, *Proteus*

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 7 – Dados dos componentes do Circuito do Sensor de Tensão.

| Componente | Característica |
|-----------------------|--------------------------|
| ACPL-C87A | Sensor de Tensão |
| OPA2344 | Amplificador Operacional |
| 6x Resistores | 10 $k\Omega$ |
| 1x Resistor | 100 $k\Omega$ |
| 1x Resistor | 20 $k\Omega$ |
| 1x Diodo Zener | 3V |
| 4x Capacitor Cerâmico | 100 ρF |
| 2x Capacitor Cerâmico | 100 ηF |

Fonte: Elaborado pelo autor.

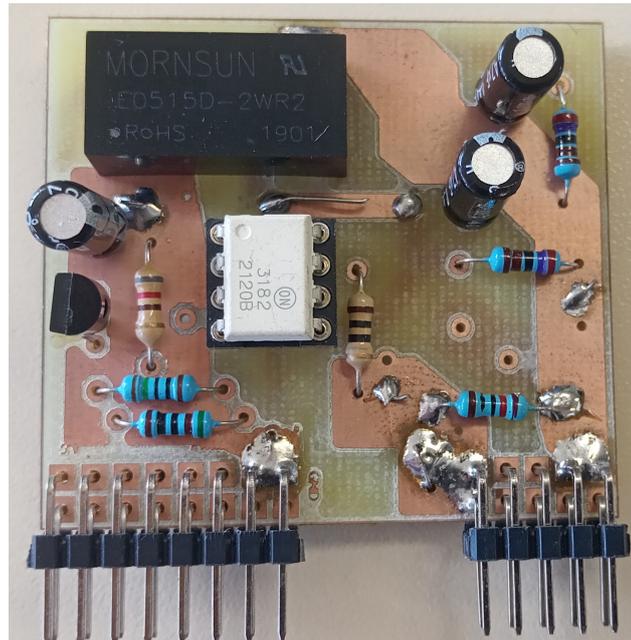
3.4.4 Circuito do Driver

O circuito do driver estará responsável por receber os dados modulados em *PWM* provindos do microcontrolador, amplifica-los e envia-los à chave *IGBT* do conversor. Será utilizado um CI *Optocoupler* IX3120, uma fonte *MORNSUN* F0515D-2WR2 e um transistor 2N2222. A seguinte Figura 26 retrata uma placa contendo o circuito do driver utilizada para testes de bancada neste projeto.

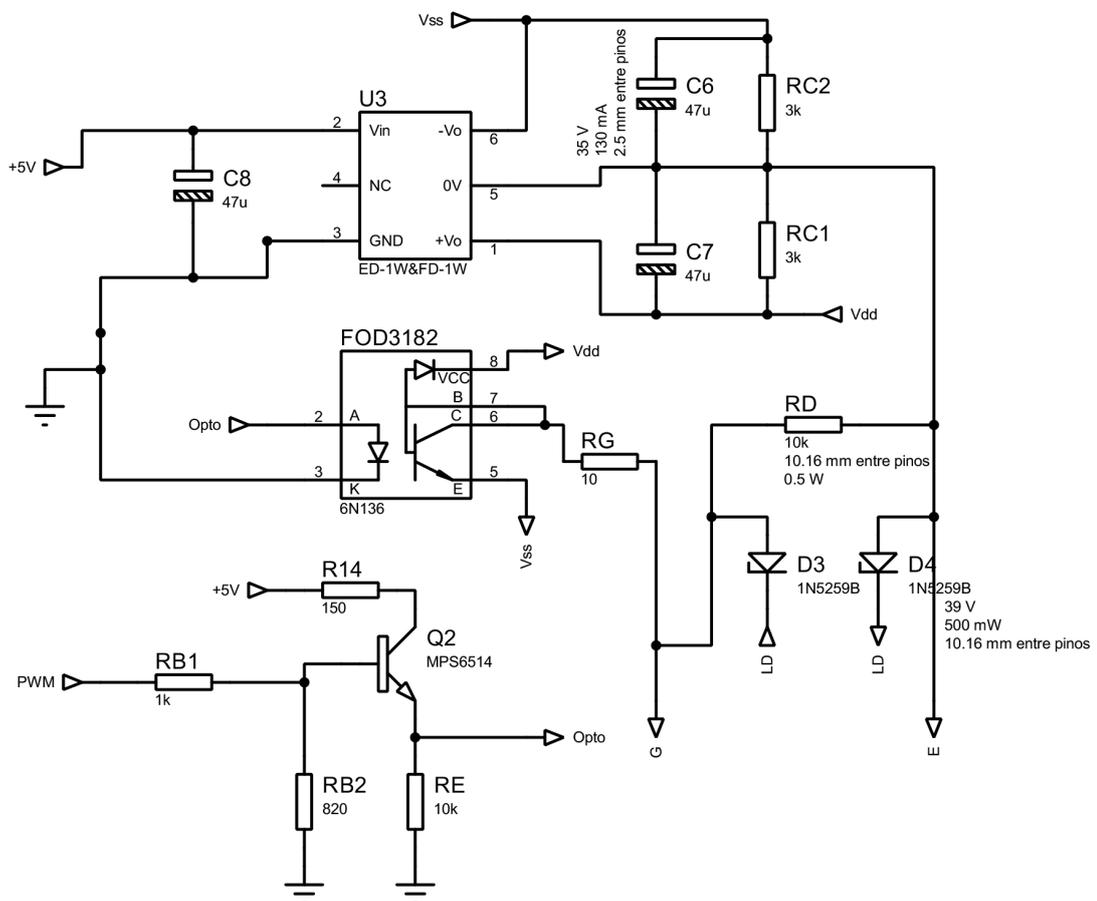
O esquemático está ilustrado na seguinte Figura 27:

A seguinte Tabela 8 detalha cada componente presente no esquemático da Figura 27.

Figura 26 – Circuito do Driver.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 27 – Esquemático do Circuito do Driver, *Proteus*.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 8 – Dados dos componentes do Circuito do Driver.

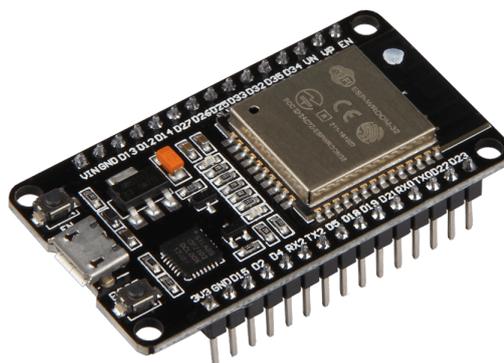
| Componente | Característica |
|--------------------------------|----------------------------------|
| MORNSUN F0515D-2WR2 | Fonte Amplificadora +15V/ - 15V |
| IX3120 | Driver de gate com infravermelho |
| 2N2222 | Transistor NPN |
| 2x Resistor | 10 <i>kOhm</i> |
| 2x Resistor | 2,8 <i>kOhm</i> |
| 1x Resistor | 1 <i>kOhm</i> |
| 2x Resistor | 10 <i>Ohm</i> |
| 1x Resistor | 150 <i>Ohm</i> |
| 1x Resistor | 820 <i>Ohm</i> |
| 2x Diodo Zener (Não Utilizado) | 3V |
| 3x Capacitor Eletrolítico | 47 μ F |

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.4.5 Microcontrolador

O sistema de análise e controle está disposto em uma placa confeccionada especificamente para este projeto, contendo um microcontrolador ESP32, Figura 28, conectado a uma TTS Nextion Figura 30, interligando o EF a dois sensores, um de tensão (ST) e outro de corrente (SC), os quais enviam sinais de tensão, de 0V à 3V, para o ESP32 e, por fim, um circuito do driver utilizado para obtenção do sinal proveniente do ESP32 de chaveamento da chave IGBT.

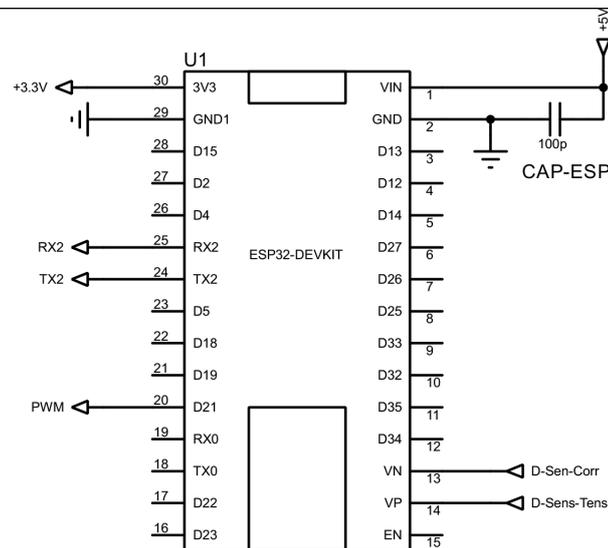
Figura 28 – Microcontrolador ESP32.



Fonte: Espressif 2024.

A seguinte Figura 29 representa o esquemático do microcontrolador *ESP32* utilizado no projeto. Por se tratar de um componente que apenas receberá e enviará comandos, o mesmo não possui muitos componentes externos, apenas um capacitor cerâmico presente na sua entrada de alimentação de 5V.

Figura 29 – Esquemático do Microcontrolador *ESP32*, *Proteus*



Fonte: Elaborado pelo autor.

A seguinte Tabela 9 detalha os componentes presentes no esquemático da Figura 29.

Tabela 9 – Dados dos componentes acompanhados do microcontrolador.

| Componente | Característica |
|-----------------------|------------------|
| ESP32 | Microcontrolador |
| 1x Capacitor Cerâmico | 100pF |

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.4.6 Tela *Touchscreen* Nextion

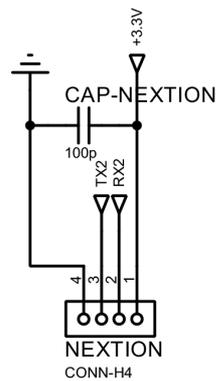
A TTS Nextion estará encarregada de obter os dados do ESP32 e reproduzi-los em forma numérica e através de gráficos no seu visor, com a finalidade de informar o usuário sobre o comportamento das variáveis presente no código e sobre os dados presentes na entrada e saída do conversor buck.

Figura 30 – Tela Touchscreen Nextion NX3224T024-011.



Fonte: Nextion 2024.

Por estar conectado apenas ao microcontrolador, a TTS Nextion não apresenta um esquemático complexo como mostra a Figura 31, apenas uma entrada de 4 pinos direcionadas à alimentação externa de 3,3V fornecida diretamente pelo *ESP32*, ao *GND* e a dois pinos, um *TX* e outro *RX* para comunicação serial com o microcontrolador.

Figura 31 – Esquemático da TTS Nextion, *Proteus*

Fonte: Elaborado pelo autor.

A seguinte Tabela 10 detalha os componentes presentes no esquemático da Figura 29.

Tabela 10 – Dados dos componentes acompanhados da TTS.

| Componente | Característica |
|------------------------|-------------------------|
| Nextion NX3224T024-011 | Tela <i>Touchscreen</i> |
| 1x Capacitor Cerâmico | 100pF |

Fonte: Elaborado pelo autor.

4 Elaboração da Placa do Projeto

4.1 Introdução

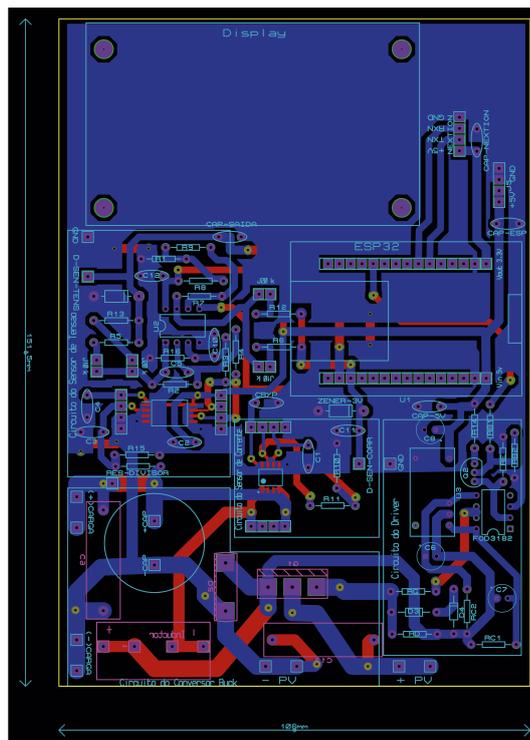
Nesta seção será descrita a elaboração da PCI que irá comportar todos os componentes e circuitos mostrados anteriormente, será utilizado o software *Proteus* para a montagem dos esquemáticos de projeto e confecção do *Layout* da placa do projeto.

4.2 Montagem do Layout

4.2.1 Especificações da Placa

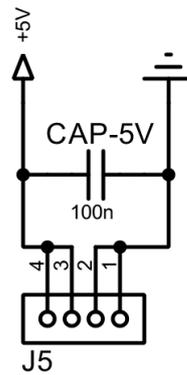
A placa conta com 151,5mm de altura e 106mm de largura, será confeccionada com trilhas de cobre em ambos os lados, frente e verso Figura 32. Conta com uma tensão de alimentação de 5V CC para alimentação dos componentes que será conectado à porta de pinos de nomenclatura *J5* Figura 33, esta entrada estará localizada no canto superior direito da placa como mostra a Figura 34, esta entrada estará próxima a entrada de alimentação e de dados da TTS Nextion como ilustra a mesma figura.

Figura 32 – *Layout* da placa confeccionada, *Proteus*.



Fonte: Elaborado pelo autor.

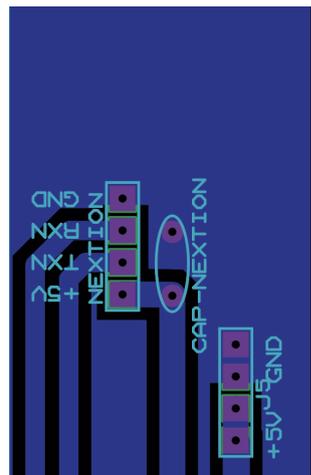
Figura 33 – Esquemático da entrada de alimentação de 5V CC da placa, *Proteus*.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Nesta porta de 4 pinos, os dois pinos inferiores será para a alimentação positiva de 5V CC e os dois pinos restantes será para sua ligação com o *Ground*.

Figura 34 – *Layout* da entrada de alimentação de 5V CC da placa, *Proteus*.



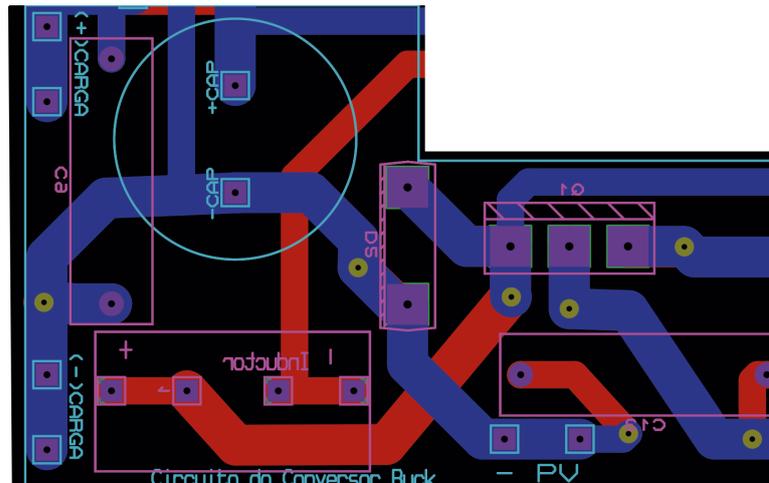
Fonte: Elaborado pelo autor.

A placa está demarcada por zonas, sendo estas zonas: o circuitos do conversor buck, sensor de tensão, sensor de corrente, placa do driver, zona da TTS e a zona do microcontrolador. Estas zonas serão separadas e nomeadas como mostra a Figura 32.

4.2.2 *Layout* Conversor Buck

O conversor buck está localizado na região inferior da placa, por se tratar do circuito de maior potência, estará afastado dos demais componentes assim como terá um espaçamento maior entre as trilhas e malhas de cobre. A seguinte Figura 35 retrata o *Layout* do conversor buck.

Nota-se na parte inferior os contatos de nomenclatura *+PV* e *-PV*, os quais correspondem a entrada de tensão do conversor que estará conectada uma fonte CC da marca *Supplier* de modelo que terá sua saída de 36V CC à 50V CC, para que os dados de saída da carga atendam aos critérios do gráfico do painel solar fotovoltaico utilizado neste trabalho. Na região esquerda

Figura 35 – *Layout* da área do Conversor Buck, *Proteus*.

Fonte: Elaborado pelo autor.

da Figura 35 nota-se a saída da carga $(+)$ Carga e $(-)$ Carga, a qual corresponde aos dados da tensão de saída da *Look-up Table*, como citado anteriormente. Na parte posterior desta região estará conectado dois capacitores cerâmicos, o Diodo, a chave IGBT e o Indutor com a finalidade de despoluir a região superior da placa.

4.2.3 *Layout* Circuito do Driver

A Figura 36 ilustra o circuito do driver demarcado na região inferior direita da Figura 32.

Nesta região o componente de nomenclatura $U3$ se refere a fonte $E0515D-2WR2$. O resistor denominado RE foi retirado do circuito montado na placa.

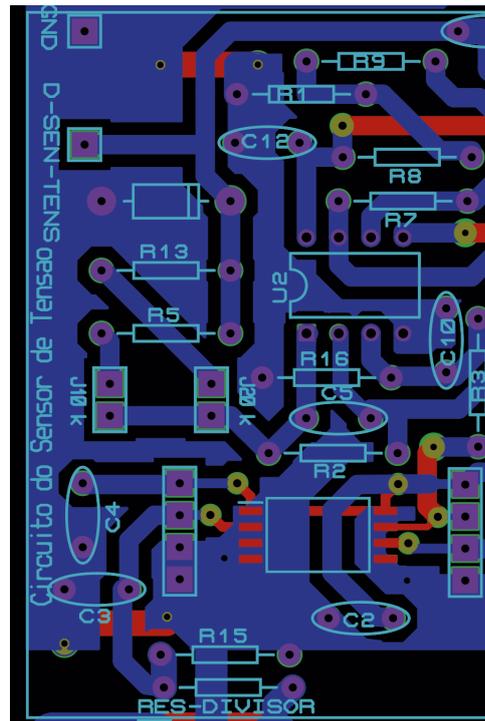
4.2.4 *Layout* Sensor de Corrente

A Figura 37 ilustra o circuito do sensor de corrente demarcado na área inferior ao centro da placa da Figura 32.

Nesta região foi implementado um pino denominado $D-SEN-CORR$ o qual será utilizado para obtenção dos valores que estarão chegando na porta VN de pino 39 do $ESP32$. Há também a ausência do amplificador operacional, durante a elaboração do *Layout* da placa ele acabou ficando próximo ao sensor de tensão devido a um melhor aproveitamento arquitetônico da placa.

4.2.5 *Layout* Sensor de Tensão

A Figura 38 ilustra o circuito do sensor de corrente demarcado na área superior esquerda da placa da Figura 32. Nesta região está presente o amplificador operacional utilizado na saída tanto do sensor de corrente quanto do sensor de tensão Figura 38

Figura 38 – *Layout* da área do Sensor de Tensão, *Proteus*.

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.6 *Layout* Microcontrolador e TTS Nextion

A Figura 39 ilustra o circuito do microcontrolador e da TTS Nextion demarcado na área superior direita da placa da Figura 32. Os contatos da TTS *Nextion* estão localizados ao lado direito da região de encaixe da tela Figura 34, visto que a saída *TX* da tela deve ser conectada a entrada *RX* do microcontrolador e a entrada *RX* da tela deve ser conectada a saída *TX* do microcontrolador, a nomenclatura dos pinos foi confeccionada com esse auxílio, onde o pino *TXN* se refere a saída *TX* da tela e pino *RXN* se refere à entrada *RX* da tela.

4.3 Confeção e Testes

4.3.1 Introdução

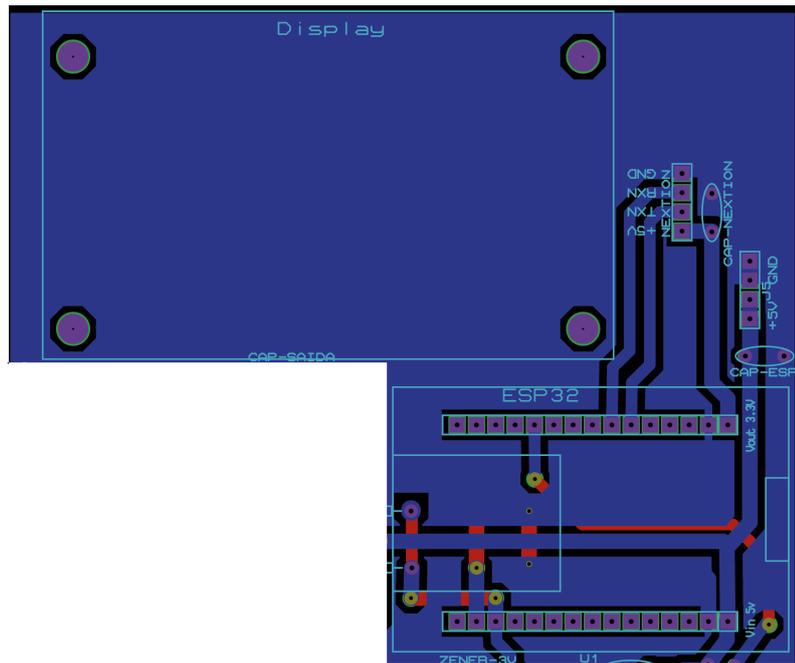
Nesta seção será retratado a confeção da PCI assim como sua montagem e especificação para a execução de testes na bancada.

4.3.2 Especificação e Montagem

A Figura 40 mostra a PCI confeccionada, esta placa não está envernizada e possui trilhas de cobre na região superior e inferior.

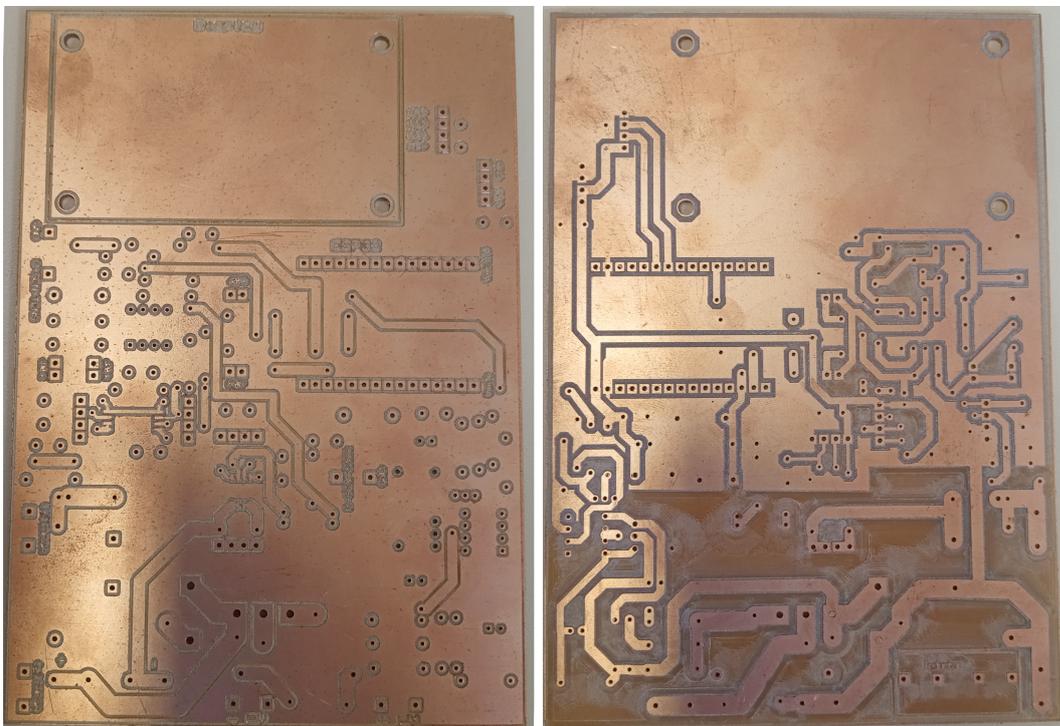
A Figura 41 ilustra a PCI com todos os seus componentes soldados e posicionados.

Figura 39 – *Layout* da área do Microcontrolador e da TTS *Nextion*, *Proteus*.



Fonte: Elaborado pelo autor.

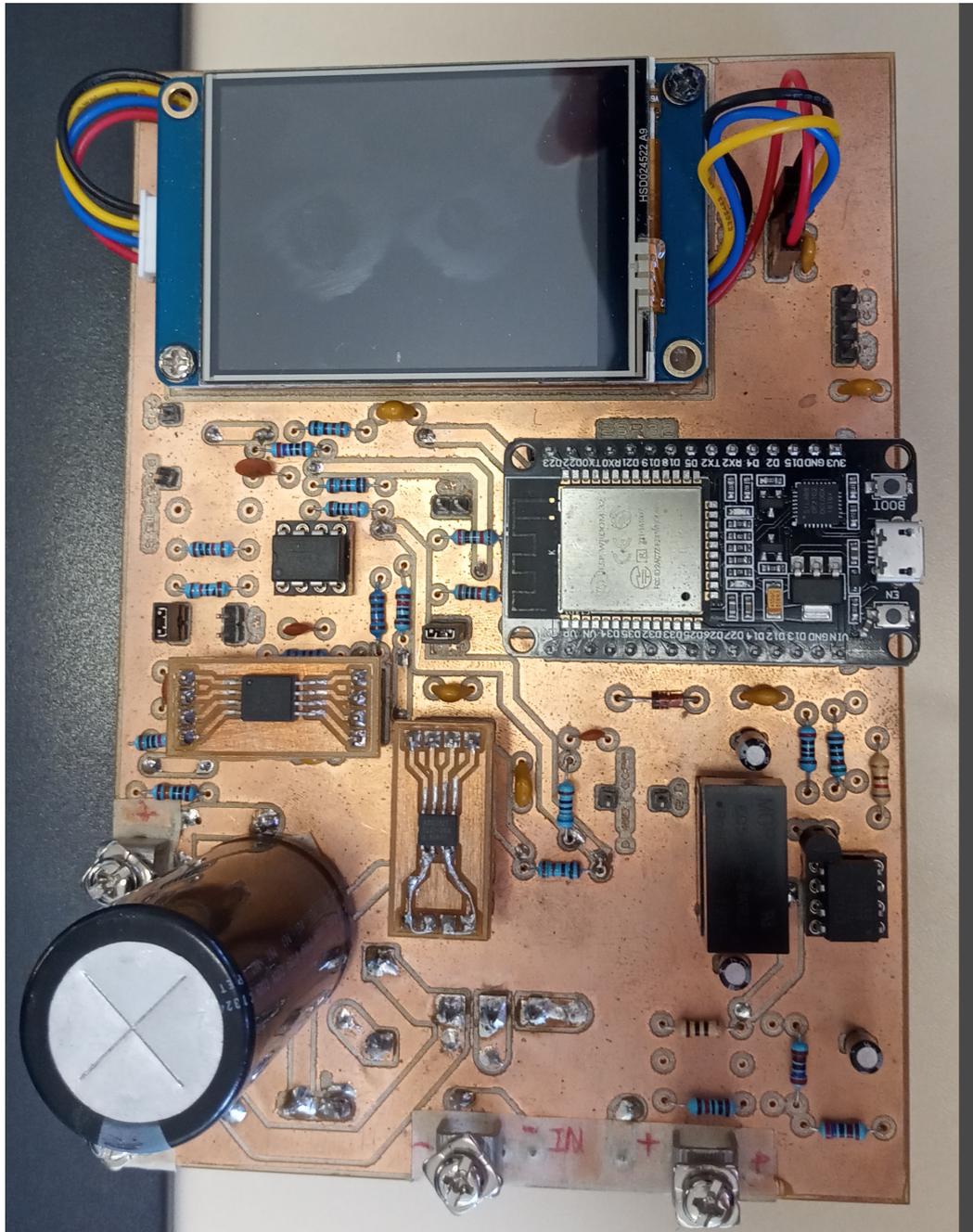
Figura 40 – *PCI* do projeto, região superior (esquerda) e região posterior (direita).



Fonte: Elaborado pelo autor.

A chave IGBT, o diodo *Shottky* e o indutor ficam sob a parte posterior da placa como ilustra a Figura 42.

Figura 41 – Placa do projeto com todos os seus componentes implementados.

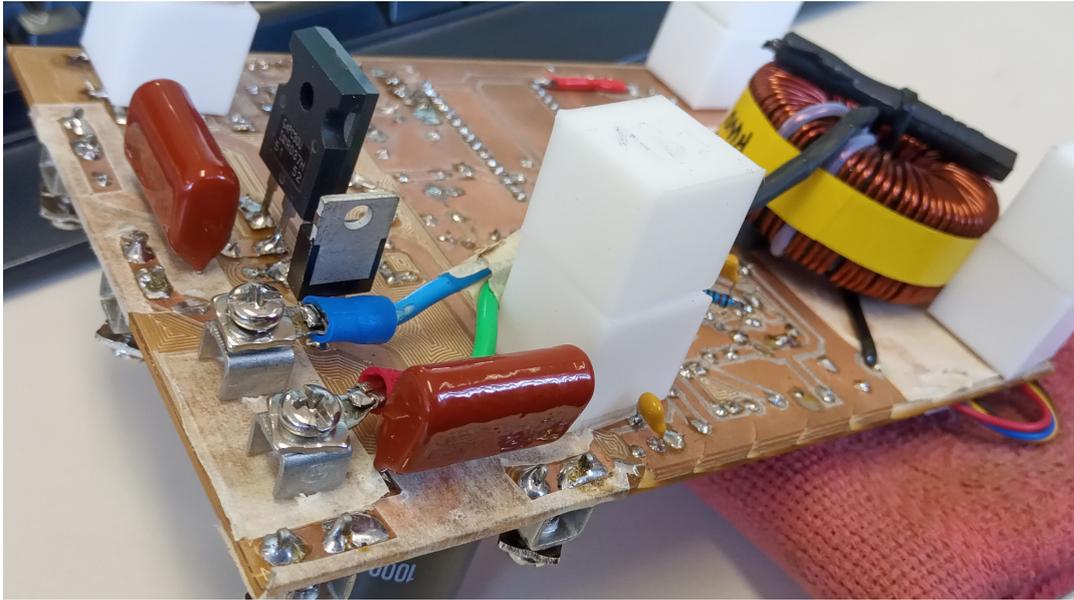


Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3.3 Protótipo e Bancada de Testes

As seguintes figuras retratam o funcionamento da placa do projeto, demonstrando suas entradas e saídas, assim como suas funções também. A Figura 43 retrata a placa totalmente montada sob a bancada de testes. Para que fosse possível os testes sobre a placa do projeto foram necessários 2 (dois) multímetros atuando como amperímetros com a finalidade de monitorar a corrente de entrada e a corrente de saída do conversor e um osciloscópio para monitorar a entrada e saída de tensão, assim como a tensão sobre os sensores de corrente e tensão, a corrente de saída e o sinal direcionado a chave IGBT;

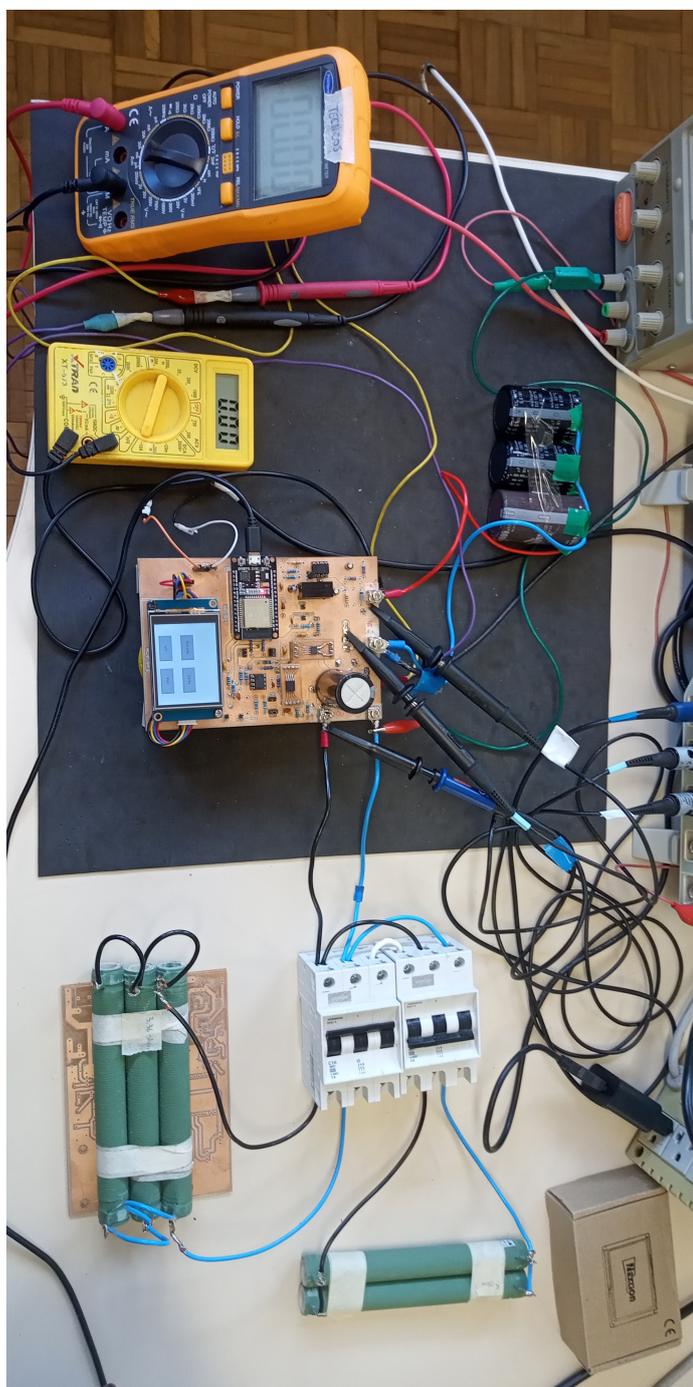
Figura 42 – Posterior da Placa do projeto com todos os seus componentes implementados.



Fonte: Elaborado pelo autor.

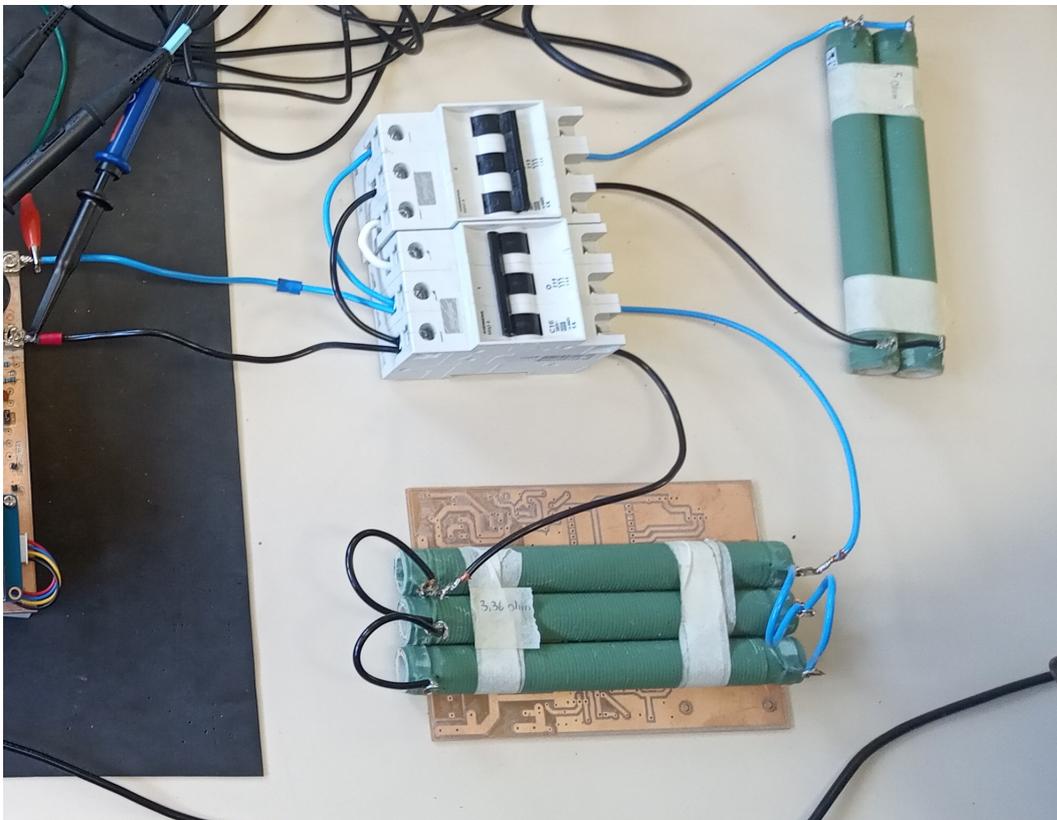
e, por fim, o conjunto contendo duas cargas Figura 44 , a primeira com 3 (três) resistores de 10Ω e 100 Watts cada, ligados em paralelo resultando em $3,367 \Omega$, já a segunda contém apenas 2 (dois) resistores em paralelo resultando em 5Ω . Os dois disjuntores foram utilizados para chavar as cargas independentemente, usando $3,367 \Omega$ para um teste e 5Ω para outro teste.

Figura 43 – Placa do projeto montada sobre a bancada.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 44 – Cargas implementadas na placa do projeto.



Fonte: Elaborado pelo autor.

5 Resultados

5.1 Introdução

Esta seção apresenta os resultados das simulações efetuadas, assim como os resultados obtidos experimentalmente a partir do protótipo. A fim de verificar o comportamento do emulador, são empregados três valores de cargas, o primeiro estudo será com uma carga de $3,333 \Omega$, o segundo caso será com uma carga de 5Ω e o último estudo ocorrerá com uma carga de 5Ω na inicialização com o chaveamento manual de uma carga de 10Ω em paralelo através do disjuntor presente na bancada. Os dois primeiros casos serão feitos com o método manual e automatizado de *DutyCycle* e o último estudo será com o *DutyCycle* automatizado, pois será necessário uma correção momentânea ao acionar a outra carga em paralelo.

5.2 Simulações e Implementação

5.2.1 Experimento com uma carga de $3,367 \Omega$

Através do software *PSIM* utilizando uma tensão de alimentação CC de $50V$ tem-se os resultados obtidos do gráfico da Figura 45 demonstrado anteriormente, estes dados então foram utilizados para calibrar o código do microcontrolador assim como os componentes presentes na PCI.

O objetivo desta seção é de demonstrar o comportamento do emulador eletrônico desenvolvido neste projeto trabalhando com um parâmetros de entrada de alimentação CC de $50V$ com um carga de $3,367 \Omega$ a qual é muito próxima dos $3,369 \Omega$ da carga obtida do painel utilizado neste trabalho. Tanto na simulação do *software PSIM* quanto na fonte de alimentação da placa do projeto foi variada a tensão de alimentação do conversor com os três valores de alimentação, $30V$, $40V$ e $50V$, para observar o comportamento do projeto em comparação à simulação.

Na bancada de testes estará três cargas de 10Ω com 100 Watts cada, ligadas através de uma relação em paralelo.

5.2.1.1 Alimentação de 50 V no conversor

A Figura 45 ilustra a simulação com uma entrada de 50V na alimentação do conversor, o circuito apresenta uma carga de 3,367 Ω .

Figura 45 – Simulação contendo os dados de I_{Buck} , I_{Painel} , V_{Buck} , $V_{RTestCode}$, V_{Painel} , uc e $SaidaChaveamento$, PSIM.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A seguinte Tabela 11 retrata os resultados obtidos do experimento prático.

A Figura 46 foi captada de um osciloscópio utilizado no experimento, nela está os dados do *DutyCycle* Manual, da Tabela 11.

A legenda dos parâmetros do osciloscópio são as seguintes:

- (1) V_{in} - Tensão de entrada do conversor;
- (2) $V_{Chaveamento}$ - Sinal de chaveamento da chave IGBT;
- (3) V_{out} - Tensão de saída do conversor;
- (4) I_{out} - Corrente de saída do conversor.

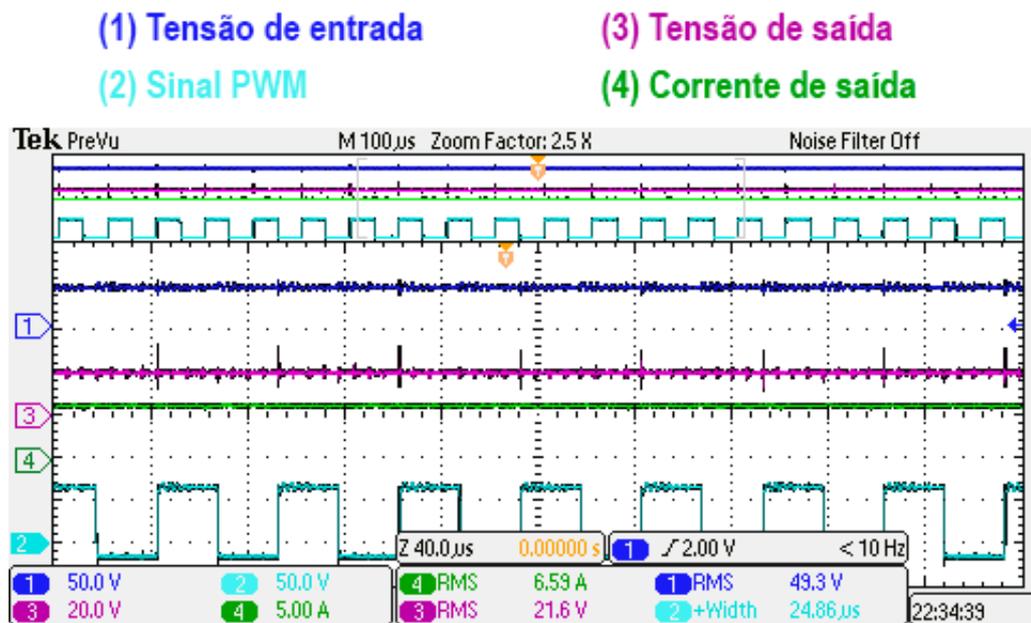
Já a Figura 47 se refere aos dados do *DutyCycle* Automatizado utilizado no experimento.

Tabela 11 – Tabela elaborada com fonte de alimentação de 54V e corrente de 9A, com uma carga de 3,367 Ω .

| Parâmetros | DutyCycle Manual | DutyCycle Automatizado |
|----------------------------------|------------------|------------------------|
| V_{in} Conversor [V] | 51,40 | 51 |
| I_{in} Conversor [A] | 3,13 | 3,6 |
| V_{out} Conversor [V] | 22,90 | 24,40 |
| I_{out} Conversor [A] | 6,35 | 6,79 |
| V_{out} Sensor de Tensão [V] | 23,98 | 30,30 |
| I_{out} Sensor de Corrente [A] | 6,49 | 6,91 |
| Valor <i>DutyCycle</i> | 128 | 137 |
| V_{out} Look-up Table [V] | 28,17 | 27,72 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

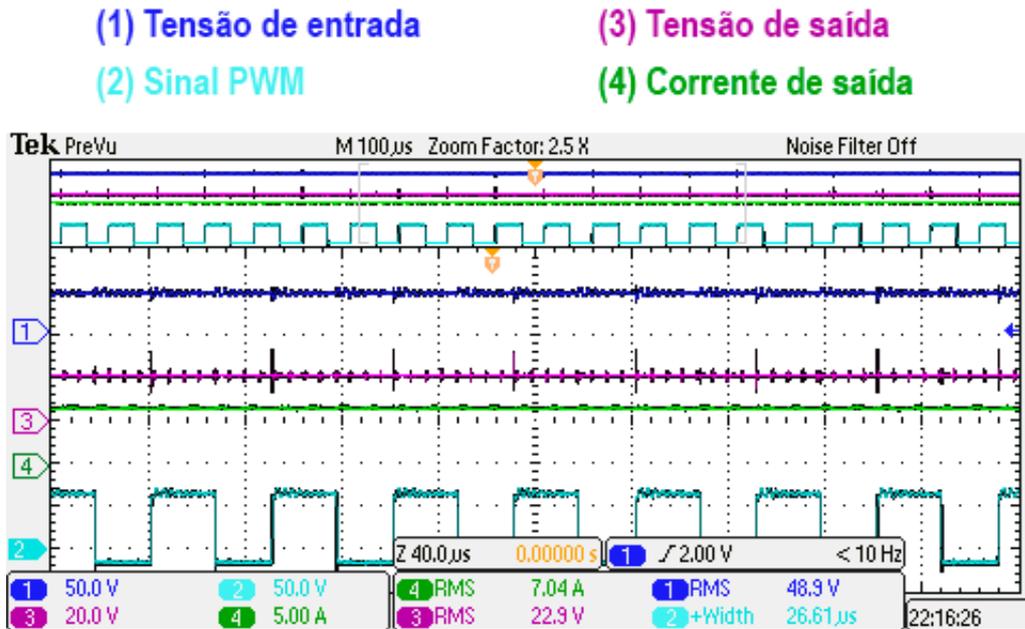
Figura 46 – Dados referentes ao *DutyCycle* Manual para 50 V.



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.2.2 Experimento com uma carga de 5 Ω

Neste tópico será retratado os experimentos voltados a uma carga de 5 Ω , semelhante ao tópico anterior, porém com diferenças numéricas e de implementação. Na bancada de testes estará duas cargas de 10 Ω com 100 *Watts* cada, ligadas através de uma relação em paralelo resultando em 5 Ω na carga.

Figura 47 – Dados referentes ao *DutyCycle* Automatizado para 50 V.

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.2.2.1 Alimentação de 50 V no conversor

A Figura 48 ilustra a simulação com uma entrada de 50V na alimentação do conversor contendo uma carga de 5 Ω , resultando no seguinte gráfico:

A seguinte Tabela 12 retrata os resultados obtidos do experimento prático.

Tabela 12 – Tabela elaborada com fonte de alimentação de 54V e corrente de 9A, com uma carga de 5 Ω .

| Parâmetros | DutyCycle Manual | DutyCycle Automatizado |
|----------------------------------|------------------|------------------------|
| V_{in} Conversor [V] | 51,50 | 51,50 |
| I_{in} Conversor [A] | 2,94 | 2,72 |
| V_{out} Conversor [V] | 27,70 | 26,60 |
| I_{out} Conversor [A] | 5,14 | 4,95 |
| V_{out} Sensor de Tensão [V] | 29,21 | 29 |
| I_{out} Sensor de Corrente [A] | 6,28 | 6,23 |
| Valor <i>DutyCycle</i> | 148 | 142 |
| V_{out} Look-up Table [V] | 28,37 | 28,42 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 49 foi captada de um osciloscópio utilizado no experimento, nela está os dados do *DutyCycle* Manual, da Tabela 12.

Já a Figura 50 se refere aos dados do *DutyCycle* Automatizado utilizado no experimento.

Nota-se que ambas as figuras resultam em condições próximas, visto que os dados automatizado estão seguindo uma tendência semelhante à Figura 49.

Figura 48 – Gráfico da entrada de alimentação de 50V com uma carga de 5 Ω , PSIM.

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.2.3 Transitório de uma carga de 5 Ω para 3,333 Ω

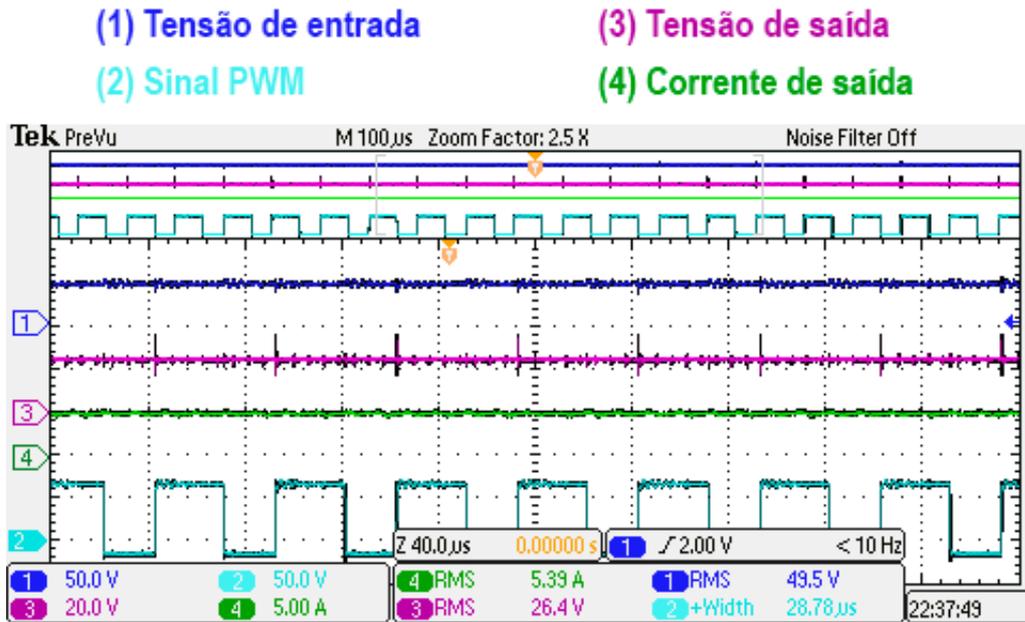
A Figura 51 ilustra a simulação com uma entrada de 50V na alimentação do conversor, ao início o circuito apresenta uma carga de 5 Ω , após 2 milissegundos da simulação é acionado uma carga de 10 Ω em paralelo resultando no seguinte gráfico:

Observa-se que tanto o painel quanto o conversor se comportam de maneira similar.

Com isso, os resultados obtidos do teste de bancada implementados no conversor, iniciando com uma carga de 5 Ω e em seguida chaveando uma carga de 10 Ω em paralelo com a carga anterior, obtém-se 3,333 Ω aproximadamente na saída do conversor. A Figura 52 retrata o resultado obtido no osciloscópio deste procedimento:

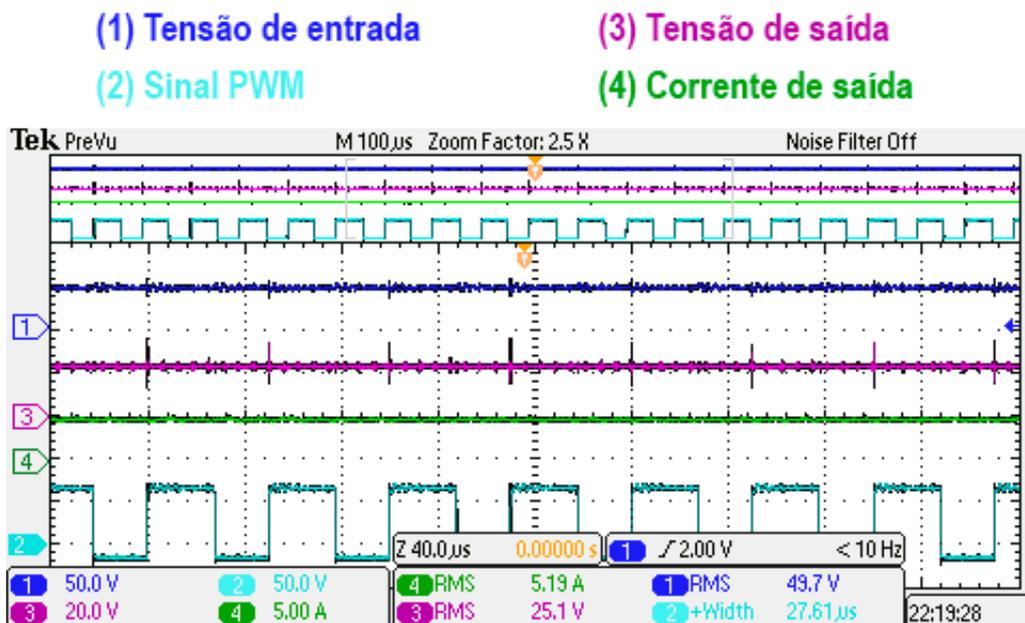
É possível notar que os resultados de ambas as figuras se comportam de maneira semelhante, o quê está de acordo com os parâmetros da simulação.

Figura 49 – Dados referentes ao *DutyCycle* Manual para 50 V.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 50 – Dados referentes ao *DutyCycle* Automatizado para 50 V.

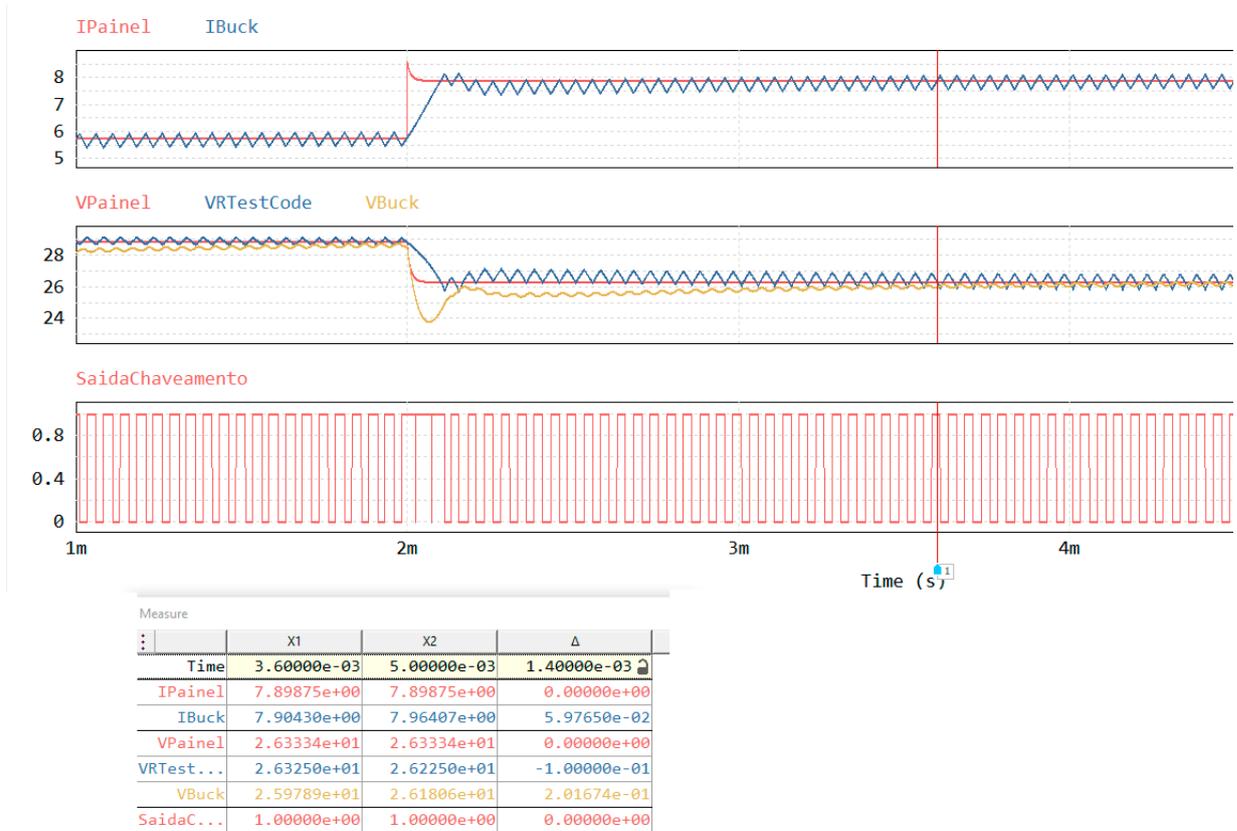


Fonte: Elaborado pelo autor.

5.3 Conclusão do capítulo

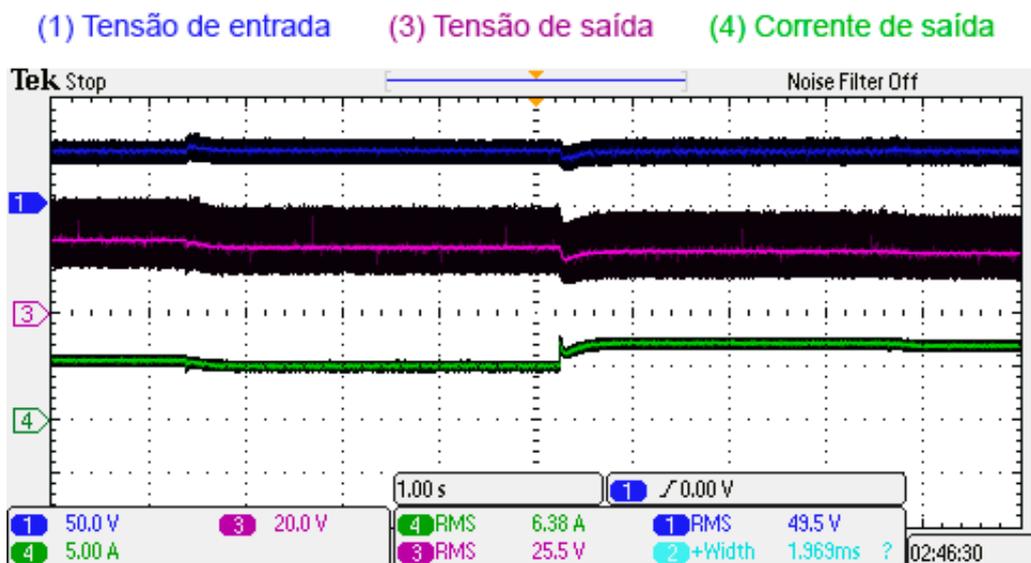
Os resultados obtidos no experimento prático de bancada se aproxima em alguns termos do simulado através do software *PSIM*, para os testes executados com a carga de $3,367 \Omega$ os resultados ficaram mais próximos das simulações, já os estudos envolvendo a carga de 5Ω tiveram valores variando cerca de duas unidade para tensão e quase três unidades para a medição de corrente.

Figura 51 – Gráfico da entrada de alimentação de 50V com uma carga de 5 Ω no início e 3,333 Ω no final, PSIM.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 52 – Gráfico da entrada de alimentação de 50V com uma carga de 5 Ω no início e 3,333 Ω no final, PSIM.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Há a necessidade de refinamento do código para melhor interpretar os valores lidos pelo conversor do projeto, visto que os valores tendem a variar para algumas entradas de energia no conversor, como também ajudaria a implementação de componentes com uma melhor precisão para leitura dos dados. Por se tratar de um protótipo, os resultados acabaram atingindo boas expectativas.

6 Conclusões Finais

Ao longo deste trabalho foi detalhado os métodos utilizados para o projeto de um emulador eletrônico que atendesse os requisitos de um painel de energia solar fotovoltaica, utilizando diversas referências e pesquisas ao longo deste projeto tornou-se possível a confecção da PCI para estudos práticos dos dados técnicos obtidos através de simulações.

A implementação do conversor buck neste trabalho se mostrou bastante eficaz, visto que se comportou de maneira satisfatória com as variações de tensão na sua entrada. O circuito do driver precisou de algumas modificações em relação ao divisor resistivo na entrada do transistor em comparação com o modelo original de implementação. O circuito do sensor de corrente apresenta uma tensão de $2,5V$ na saída do conversor, sendo necessário uma correção com o amplificador operacional na saída a fim de se evitar complicações com a entrada do microcontrolador limitada em $3,3V$. O sensor de tensão, por apresentar uma configuração com um amplificador operacional na saída recomendada pelo fabricante, não apresentou muitas complicações quanto sua implementação, visto que limita sua saída até $3V$ para segurança do microcontrolador. A implementação da tela nextion apresentou complicações com uma alimentação de $5V$ algo que teve de ser corrigido para uma alimentação de $3,3V$ advinda do microcontrolador.

Por fim, a placa acomodou adequadamente cada componente, e cada conector de entrada ou saída funcionou corretamente. Componentes como o microcontrolador, sensor de corrente, sensor de tensão, fonte de alimentação da placa do driver, Tela *Touchscreen*, *optocoupler*, amplificador operacional e indutor ficarão de fácil acesso e substituição visto que estão apenas conectados e não soldados.

Concluindo, para trabalhos futuros, sugere-se aprimorar o código de controle e inicialização das variáveis, assim como uma forma de implementar dados de gráficos $I-V$ de outras placas solares disponíveis no mercado. Como também aproveitar a fácil compatibilidade do microcontrolador com banco de dados externos e dispositivos móveis.

A Código Matlab

Código elaborado no Matlab para Modelagem de pequenos sinais do conversor Buck - equivalente Thevenin

```
%Modelagem de pequenos sinais do conversor Buck - equivalente Thevenin
close all
clear all
clc

s=tf('s');
D=0.4;          %Utilizando Vin = 50V e Vout = 20V
d=D*0.02;
Vi=50;
L=1.2e-3;      %Indutância
C=15.6e-6;     %Capacitância
Ro=3.369;      %Resistência da Carga Ro

%VB=Vo        %Tensão base a ser controlada na saída
              % A tensao VB será utilizada com relação à tensão do
              % microcontrolador dado em pu

%%%%%%%%Gvd=Vi/(L*C*s^2+s*L/Ro+1)          %FT de Tensão do Conversor em
                                           %função da razão cíclica
Gid=Vi*(s*C+1/Ro)/(L*C*s^2+s*L/Ro+1)     %FT de Corrente no Indutor em
                                           %função da razão cíclica
%%%%%%%%Gvv=D/(L*C*s^2+s*L/Ro+1)          %FT de tensão em função da tensão
                                           %de entrada.
%Giv=D*(s*C+1/Ro)/(L*C*s^2+s*L/Ro+1)     %FT de Tensão em função da corrente
                                           %de entrada.

% frequencia angular de cruzamento
wc = 2*pi*200;
%wc = 2*pi*2000;

% frequencia angular do " zero do PI"
Wz=wc/0.1      %p/ tensao
%Wz=wc/2      %p/ corrente
```

```

%-----Editado - Encontrar Wz-----
%Kpwm = 1;           %uso de DSP!
%vo = 20;
%Kv = 1/ (1.3*VB);   % 30% de margem de erro
%FTLanc = Kpwm*Gvd*Kv;
%MF = (1*pi/3);
%Wz = wc/(tan[MF-(pi/2)- angle(FTLanc))
%-----

%funcao de tranferencia PI+PLANTA sem ganho GMA_pi

%Calcular o ganho do PI [p/ Corrente e tensão cte ou Razão Ciíclica CTE]
%GMA_ant=Giv*(s+Wz)/s;
GMA_ant=Gid*(s+Wz)/s;

val = evalfr(GMA_ant,j*wc);

%Ganho do PI (Kv ou Kc) Tensão
K=1/abs(val)

%funcao de transferencia em malha aberta compensada
GMA=K*GMA_ant;

%funcao de transferencia em malha aberta não compensada
GMAn=GMA_ant;

%funcao de transferencia em malha fechada
%GMF=minreal(GMA*(1+GMA));
GMF=feedback(GMA,1);

figure(1)
margin(GMA)

figure(2)
margin(GMAn)

figure(3)
step(GMF)

% %calculo angulo
% angulo=180+angle(val2)*180/pi;
%
```

```
% figure
% margin(K*GMA_pi)
% figure
% step(K*GMA_pi/(1+K*GMA_pi))
```

```
Cv = K*(s+Wz)/s
```


Referências

- ALLEGRO. *ACS712 Datasheet*. 2021. Disponível em: <<https://www.alldatasheet.es/datasheet-pdf/pdf/168326/ALLEGRO/ACS712.html>>. Acesso em: 19 de fevereiro 2024. Citado na página 41.
- BERGER, F. et al. Metodologia para modelagem de conversores utilizando o circuito equivalente de thévenin. *Eletrônica de Potência, Joinville*, v. 23, n. 2, p. 151–160, 2018. Citado na página 27.
- BROADCOM. *ACPL-C87A Datasheet*. 2017. Disponível em: <<https://docs.broadcom.com/doc/AV02-3563EN>>. Acesso em: 19 de fevereiro 2024. Citado 2 vezes nas páginas 42 e 43.
- Caio Moraes. *Modelo Dinâmico do Conversor Buck*. 2018. Disponível em: <<https://eletronicadepotencia.com/modelagem-dinamica-do-conversor-buck/>>. Acesso em: 16 de fevereiro 2024. Citado na página 28.
- Caio Moraes. *Controlando a Tensão de Saída de um Conversor Buck*. 2019. Disponível em: <<https://eletronicadepotencia.com/controle-de-tensao/>>. Acesso em: 17 de fevereiro 2024. Citado na página 31.
- CARRALERO, L. L. et al. Pv emulator based on a four-switch buck-boost dc-dc converter. In: IEEE. *2019 IEEE 15th Brazilian Power Electronics Conference and 5th IEEE Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC)*. [S.l.], 2019. p. 1–5. Citado na página 27.
- CARRALERO, L. L. O. et al. Emulador pv baseado em um conversor cc-cc buck-boost de quatro interruptores. In: *Congresso Brasileiro de Automática-CBA*. [S.l.: s.n.], 2019. v. 1, n. 1. Citado na página 19.
- CUPERTINO, A. F. Desenvolvimento de um simulador de módulos fotovoltaicos para testes de conversores estáticos. Universidade Federal de Minas Gerais, 2015. Citado na página 19.
- DINIZ, A. et al. The important contribution of photovoltaics in a rural school electrification program. In: IEEE. *2006 IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conference*. [S.l.], 2006. v. 2, p. 2528–2531. Citado na página 19.
- DORF, R.; BISHOP, R. *Sistemas de controle moderno; 8ª. Ed, LTC, Rio de Janeiro*, 2001. Citado na página 31.
- ERICKSON, R. W.; MAKSIMOVIC, D. *Fundamentals of power electronics*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2007. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 25.
- ESPRESSIF. *ESP32 Microcontroler*. 2024. Disponível em: <<https://www.espressif.com/>>. Acesso em: 07 de março 2024. Citado na página 46.
- GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. Energias renováveis: um futuro sustentável. *Revista Usp*, n. 72, p. 6–15, 2007. Citado na página 19.
- KAZIMIERCZUK, M. K. *Pulse-width modulated DC-DC power converters*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 28.
- KISHOR, N. et al. Modeling of pv module with consideration of environmental factors. In: IEEE. *2010 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe)*. [S.l.], 2010. p. 1–5. Citado na página 21.

- MAGNO, L. C. C. et al. Emulador fotovoltaico de baixo custo, a partir de um conversor buck, empregando regulador linear quadrático com mppt p&o. In: *Congresso Brasileiro de Automática-CBA*. [S.l.: s.n.], 2019. v. 1, n. 1. Citado na página 19.
- MOÇAMBIQUE, N. E. M. *Aplicação de Algoritmos de Busca do Ponto de Máxima Potência e controladores lineares e/ou Fuzzy para a regulação da tensão terminal de Painéis Fotovoltaicos*. Tese (Mestrado) — Universidade de São Paulo, 2012. Citado na página 19.
- MOHAN, N.; UNDELAND, T. M.; ROBBINS, W. P. *Power electronics: converters, applications, and design*. [S.l.]: John wiley & sons, 2003. Citado na página 23.
- MOURA, P. H. M. d. V. Projeto de um emulador fotovoltaico empregando o conversor buck síncrono. Universidade Federal do Pampa, 2020. Citado 4 vezes nas páginas 22, 23, 29 e 31.
- NEXTION. *Display Nextion*. 2024. Disponível em: <<https://nextion.tech/datasheets/nx3224t024/>>. Acesso em: 07 de março 2024. Citado na página 48.
- VIGLUS, F. J. *Projeto e desenvolvimento de um emulador de arranjo fotovoltaico utilizando um conversor CC-CC trifásico PWM*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2015. Citado na página 19.
- VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R.; FILHO, E. R. Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays. *IEEE Transactions on power electronics*, IEEE, v. 24, n. 5, p. 1198–1208, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 23.