UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO

PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO

CENTRO MULTIDISCIPLINAR DE MOSSORÓ

BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

JOSÉ FILIPE DE LIMA

PROJETO DE CONTROLADOR SOLAR DE CARGA PARA OPERAÇÃO AUTÔNOMA DO *GHOST SWIMMER*®

MOSSORÓ – RN
2020

.

JOSÉ FILIPE DE LIMA

PROJETO DE CONTROLADOR SOLAR DE CARGA PARA OPERAÇÃO AUTÔNOMA DO *GHOST SWIMMER*®

Monografia apresentada à Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA, Centro Multidisciplinar de Mossoró para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Olympio Cipriano da Silva Filho – UFERSA.

MOSSORÓ – RN
2020

.

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei n° 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei n° 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

L734p Lima, José Filipe de .
Projeto de controlador solar de carga para operação autônoma do Ghost Swimmer / José Filipe de Lima. - 2020.
41 f. : il.

Orientador: Olympio Cipriano da Silva Filho.
Coorientador: Adalberto Veronese da Costa.
Monografia (graduação) - Universidade Federal Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia Elétrica, 2020.

1. Natação. 2. Conversor CC - CC. 3. Rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT). 4. Controlador solar de carga. I. Silva Filho, Olympio Cipriano da , orient. II. Costa, Adalberto Veronese da, co-orient. III. Título.

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC´s) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO – UFERSA
CENTRO DE ENGENHARIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA E TECNOLOGIA

ATA DE DEFESA DE PROJETO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Às 16:00 horas do dia cinco de fevereiro de dois mil e vinte, no Laboratório de Energias Renováveis – LENERG do campus leste da Universidade Federal Rural do Semi-árido – UFERSA, reuniu-se a Banca Examinadora do Projeto de Engenharia Elétrica de autoria do aluno **José Filipe de Lima**, aluno do curso de Engenharia Elétrica desta universidade, sob matrícula , com o título **Projeto de controlador solar de carga para a operação autônoma do Ghost Swimmer.** A Banca Examinadora ficou constituída por quatro membros: Prof. Dr. Olympio Cipriano da Silva Filho (UFERSA), Prof. Dr. Adriano Aron Freitas de Moura (UFERSA), Prof. Dr. Adalberto Veronese da Costa (UERN), Prof. Me. Herick Talles (UFERSA). Concluída a defesa, procedeu-se ao julgamento pelos membros da banca, tendo o aluno obtido as seguintes notas: 9,0 ; 10 ; 9,5 : 10 . Apuradas as notas verificou-se que o aluno foi APROVADO com média geral 9,6 . E para constar, eu Olympio Cipriano da Silva Filho, lavrei a presente ata que, após lida e aprovada pelos membros da banca examinadora, será assinada por todos.

Mossoró, 05 de fevereiro de 2020

Assinatura dos membros da Banca Examinadora

Olympio Cipriano da Silva Filho
Prof. Dr. Olympio Cipriano da Silva Filho
Presidente e orientador

Prof. Me. Herick Talles
Primeiro Membro

Adriano Aron Freitas de Moura
Prof. Dr. Adriano Aron Freitas de Moura
Segundo Membro

Prof. Dr. Adalberto Veronese da Costa
Terceiro Membro

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelas maravilhas que têm feito em minha vida e pelas oportunidades que vem me proporcionando.

Aos meus colegas João Victor, Jackson, Hevla, Neemias, Lillian, Amanda, Jurandi, Rosângela, Romeu, Keliany, Rafael, Anna Paula, Géssica, João Antônio e Anderson. Muito obrigado pelo apoio, jamais esquecerei os momentos compartilhados.

Aos meus familiares e amigos pela ajuda e apoio que possibilitaram a conclusão de mais uma etapa. Gostaria de agradecer aos meus pais, em especial a minha mãe Maria Elisabete de Lima, que fez tudo o que estava ao seu alcance, para que eu pudesse alcançar mais esse objetivo.

A todos os meus professores, não só os da universidade, mas todos que contribuíram para minha formação e por terem me transmitido o seu conhecimento.

Ao meu orientador, o professor Olympio Cipriano da Silva Filho, pela paciência e que tem tido comigo e pelo apoio.

A Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA).

.

“O coração do homem planeja o seu caminho, mas o senhor lhe dirige os passos.”

(Provérbios 16 : 9)

.

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo desenvolver um controlador de carga utilizando um conversor CC – CC topologia *buck*. Para fazer o rastreamento do ponto de máxima potência de um painel solar de 10 W, que irá alimentar uma bateria para o funcionamento de um equipamento aquático denominado *Ghost Swimmer*®, que tem a finalidade de fazer a avaliação do desempenho de nadadores amadores e profissionais. São apresentados o projeto e a implementação do circuito de potência e do controlador do conversor. É feita uma breve revisão do método utilizado para o rastreamento do ponto de máxima potência. Neste trabalho optou-se por usar o método da condutância incremental. O algoritmo de rastreamento foi implementado utilizando-se um Arduino UNO®. São apresentados os resultados da simulação do projeto do controlador bem como os resultados obtidos na sua implementação, estando alimentando uma bateria de 12 V e o próprio *Ghost Swimmer*®. O controlador apresentou um funcionamento adequado, suprindo de forma adequada às cargas que foram conectadas a sua saída. Chegou-se a conclusão de que o controlador funcionou de forma adequada, funcionando conforme os resultados da simulação.

Palavras-chave: Natação, Conversor CC – CC, Rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT), Controlador solar de carga.

.

ABSTRACT

This work aims to develop a load controller using a buck topology CC - CC converter. To track the maximum power point of a 10 W solar panel, which will power a battery for the operation of an aquatic equipment called Ghost Swimmer®, which has the purpose of assessing the performance of amateur and professional swimmers. The design and implementation of the power circuit and the converter controller are presented. A brief review of the method used to track the maximum power point is made. In this work we chose to use the method of incremental conductance. The tracking algorithm was implemented using an Arduino UNO®. The results of the controller project simulation are presented, as well as the results obtained in its implementation, being powered by a 12 V battery and the Ghost Swimmer® itself. The controller has provided adequate operation, supplying the loads that were connected to its output. It was concluded that the controller worked properly, working according to the simulation results.

Keywords:. Swimming, DC - DC Converter, Maximum Power Point Tracking (MPPT), Solar Load Controller.

.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 9

1.1 Objetivo do trabalho 9

1.2 Organização do trabalho 10

2. CIRCUITO DE POTÊNCIA 11

2.1 Conversor CC – CC *Buck* 11

2.1.1 Topologia 11

3. CIRCUITO DE CONTROLE 15

3.1 Partes que constituem o circuito de controle 16

3.1.1 Sensores de corrente 16

3.1.2 Sensores de tensão 16

3.1.3 Arduino UNO 18

4. SOFTWARE DE CONTROLE 20

4.1 Rastreamento da máxima potência 20

4.1.1 Método de rastreamento do ponto de máxima potência 22

4.2 Simulação 24

4.3 Resultados da Simulação 25

5. IMPLEMENTAÇÃO 27

6. CONCLUSÃO 33

6.1 Objetivo alcançado 33

6.2 Trabalhos futuros 33

REFERÊNCIAS 35

APÊNDICE A: CÓDIGO DO MPPT 36

.

1. INTRODUÇÃO

1.1 Objetivo do trabalho

É uma prática comum o uso da energia solar fotovoltaica como fonte de energia autônoma para equipamentos elétricos. Sistemas desse tipo encontram-se cada vez mais comuns e acessíveis no dia a dia (BLOCKER, 2018). Sistemas autônomos utilizam bancos de baterias para armazenar a energia gerada pelos painéis fotovoltaicos, para que a mesma seja utilizada quando não há incidência de radiação solar. Segundo Agresta e Mikolajczak (2017), quando o banco de bateria não recebe uma potência adequada dos painéis solares para o seu carregamento, o resultado é uma falha prematura ou uma baixa capacidade de descarga do mesmo. Assim, este projeto tem a finalidade de desenvolver um sistema de alimentação autônomo através do uso da energia solar fotovoltaica. O sistema conta com um controlador de carga que fará o rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT) do painel solar utilizado, evitando assim a ocorrência do problema mencionado anteriormente. Esse sistema será utilizado para alimentar um equipamento de desempenho aquático, que faz a avaliação de nadadores amadores ou profissionais, denominado *Ghost Swimmer*®. Grande parte dos equipamentos que fazem avaliação de desempenho no esporte necessitam de energia, fazendo a utilização de cabos pela ausência de uma fonte autônoma como a proposta neste trabalho.

O *Ghost Swimmer*® foi um equipamento desenvolvido utilizando plataformas *open source* de prototipagem pelo Laboratório de Avaliação do desempenho aquático (LADA), da Universidade do Estado do Rio Grande do Norte (UERN) (SOUSA, 2019). Este equipamento integra as tecnologias dos esportes aquáticos por meio de estímulos visuais, possibilitando treino e avaliação do desempenho físico dos nadadores no controle do ritmo de nado e avaliação do consumo máximo de oxigênio. O *Ghost Swimmer*® utiliza lâmpadas de LED para auxiliar os nadadores. Inicialmente o mesmo foi idealizado para ser conectado à rede elétrica em 220 V. Entretanto, isso gerou certa preocupação para os nadadores que iriam utilizá-lo, pois o mesmo estaria em contato direto com a água (SOUSA, 2019). Como solução optou-se pela utilização de LED’s de endereçamento digital. O sistema passou a ser alimentado por um *power bank* com

.

tensão de 5 V em corrente contínua. Atualmente o *Ghost Swimmer*® encontra-se na sua terceira versão. Novas funcionalidades foram incorporadas ao mesmo tornando o sistema mais robusto. O mesmo opera agora em tensão de 12 V em corrente contínua e sua alimentação é feita por meio de um banco contendo 8 pilhas AA (SOUSA, 2019). O *Ghost Swimmer*® fica em funcionamento por períodos de tempo consideráveis. Assim, as pilhas que alimentam o mesmo acabam descarregando rapidamente, necessitando serem substituídas por novas. O objetivo do projeto é tornar o *Ghost Swimmer*® totalmente autônomo através do uso da energia solar e de um pequeno banco de baterias. Assim, os treinos e avaliações de desempenho não necessitam serem interrompidos pela falta de energia do equipamento. Isso proporciona maior eficiência e rapidez nas atividades dos profissionais que trabalham com o mesmo.

1.2 Organização do trabalho

Este trabalho está organizado da seguinte forma:

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO: Faz uma breve introdução sobre os objetivos do trabalho.

CAPÍTULO 2 – CIRCUITO DE POTÊNCIA: Fala sobre a parte de potência que compõe o circuito de potência do controlador de carga. É apresentado o princípio de funcionamento do conversor CC – CC *Buck*, bem como as equações que regem o dimensionamento do mesmo.

CAPÍTULO 3 – CIRCUITO DE CONTROLE: Apresenta o circuito de controle do controlador de carga. É discutida a parte de sensoriamento do sistema bem como o controlador do mesmo.

CAPÍTULO 4 – SOFTWARE DE CONTROLE: Apresenta o algoritmo utilizado para o rastreamento do ponto de máxima potência do painel. É apresentada a parte de simulação do controlador e comentado os resultados obtidos.

CAPÍTULO 5 – IMPLEMENTAÇÃO: Apresentada a parte de montagem do circuito e os resultados obtidos com os vários testes realizados.

CAPÍTULO 6 – CONCLUSÃO: Apresentadas as conclusões do projeto e as possíveis melhorias no mesmo.

.

REFERÊNCIAS: Todas as fontes consultadas estão aqui.

2. CIRCUITO DE POTÊNCIA

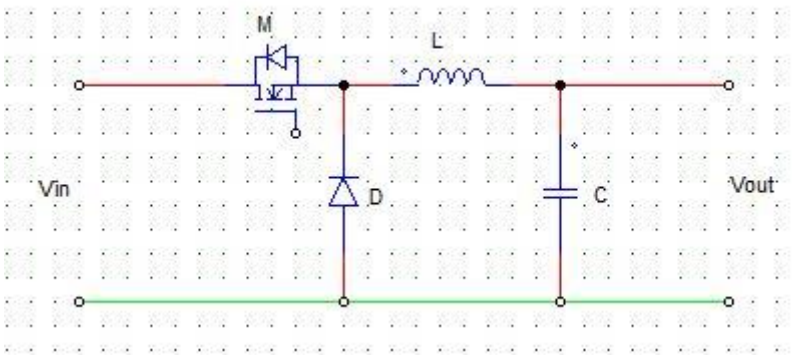
Neste capítulo será apresentado o circuito de potência do controlador de carga. O mesmo é composto por um conversor CC – CC com topologia *Buck*. São apresentadas as equações que regem o funcionamento deste conversor, bem como as especificações do projeto do mesmo.

2.1 Conversor CC – CC *Buck*

2.1.1 Topologia

A topologia do conversor *Buck* é apresentada na Figura 1.

Figura 1. Topologia do conversor *Buck*.



Fonte: Filipe Lima (2020).

No circuito da Figura 1 uma tensão de entrada V_{in} é aplicada e na saída é obtida uma tensão menor V_{out}. O circuito é composto por uma chave M, um diodo D, um indutor L e um capacitor C. O chaveamento é feito através do MOSFET M. A análise do circuito da Figura 1 considera as seguintes condições (HART, 2001):

1. O circuito opera em regime permanente;

2. A corrente na bobina é permanente (sempre positiva, sendo o modo de condução contínua);

.

3. O valor do capacitor é muito grande de forma que o valor da tensão de saída mantem-se constante, sendo V_{out};

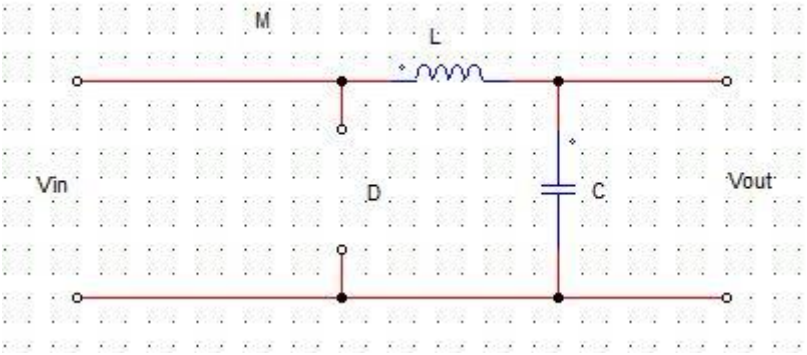
4. O período de comutação é T, a chave estará fechada em um tempo DT e aberta por um tempo (1 - D)T. D é a razão cíclica da chave ou *duty cycle*;

5. Os componentes são ideais.

A análise considera duas situações para o conversor:

Análise com a chave fechada: Com a chave fechada o diodo é polarizado de forma reversa e o circuito equivalente é mostrado na Figura 2. A tensão no indutor é:

Figura 2: Circuito equivalente com a chave fechada.



Fonte: Filipe Lima (2020).

$$V_L = V_{in} - V_{out} = L\frac{di_L}{dt} \quad (1)$$

Reorganizando os termos têm-se:

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_{in} - V_{out}}{L} \quad (2)$$

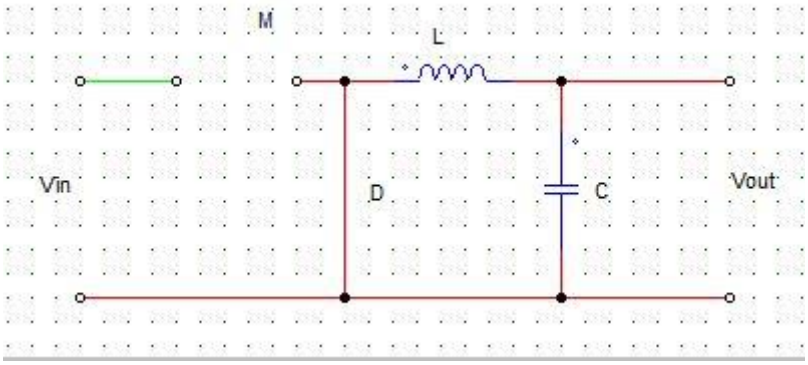
Como a derivada da corrente é uma constante positiva a mesma aumenta linearmente. A partir da Equação 2 obtêm-se a variação da corrente no indutor com a chave fechada.

$$\Delta i_{Lfechado} = \left(\frac{V_{in} - V_{out}}{L}\right) DT \quad (3)$$

Análise com a chave aberta: Com a chave aberta o indutor se polariza diretamente deixando passar a corrente do indutor, sendo o circuito equivalente apresentado na Figura 3. A tensão no indutor é:

.

Figura 3: Circuito equivalente com a chave aberta.



Fonte: Filipe Lima (2020).

$$V_L = -V_{out} = L\frac{di_L}{dt} \tag{4}$$

Reorganizando têm-se

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{-V_L}{L} \tag{5}$$

A derivada da corrente é uma constante negativa, logo a mesma decai linearmente. A variação da corrente na bobina é

$$\Delta i_{Laberto} = \left(\frac{-V_{out}}{L}\right)(1-D)T \tag{6}$$

A operação em regime permanente exige que a corrente seja a mesma no inicio e no final de cada ciclo de comutação, sendo que a variação da corrente em um período é igual à zero. Têm-se

$$\Delta i_{Lfechado} + \Delta i_{Laberto} = 0$$

$$\left(\frac{V_{in}-V_{out}}{L}\right)DT + \left(\frac{-V_{out}}{L}\right)(1-D)T = 0$$

Donde

$$V_{out} = V_{in}D \tag{7}$$

Logo, o conversor *Buck* produz uma saída menor ou igual à entrada. Na saída do conversor será conectado um banco de baterias com tensão V_{out} = 12 V. Segundo o datasheet do fabricante do painel, o mesmo tem uma tensão de máxima potência de V_{mpp} = 16,6 V. O conversor apresentará essa situação de trabalho durante a maior parte do tempo. Assim, a partir da Equação 7 têm-se:

.

$$D = \frac{12}{16,6} = 0,72$$

Para garantir que o conversor opere no modo de condução contínua o indutor deve ter o valor mínimo dado por:

$$L_{min} = \frac{(1-D)V_{out}}{\Delta_{i_c} f} \quad (8)$$

Onde Δ_{i_c} é a variação da corrente na saída do conversor e f é a frequência de chaveamento. O painel solar tem uma potência de $P_{painel} = 10\ W$ e a tensão do banco de baterias é $V_{bat} = 12\ V$. Assim, a corrente na saída do conversor é:

$$I_{bat} = \frac{P_{painel}}{V_{bat}} = \frac{10\ W}{12\ V} = 833\ mA$$

Admitindo uma variação de até 10% na corrente de saída tem-se $\Delta_{i_c} = 0,1 x I_{bat} = 0,0833\ A$. A frequência de chaveamento será de f = 31250 Hz, pois é uma frequência padrão das saídas PWM do Arduino UNO®. Assim o valor mínimo do indutor é:

$$L_{min} = \frac{(1-0,72)x12}{0,0833x31250} = 1,12\ mH$$

Por disponibilidade de material, será utilizado um indutor de 2,8 mH.

Na análise feita anteriormente foi admitido que o capacitor era muito grande de forma que a tensão de saída mantinha-se constante. Na prática é impossível conseguir isto com uma capacitância finita (HART, 2001). A variação da tensão de saída pode ser dada por:

$$\Delta V_{out} = \frac{(1-D)V_{out}}{8LCf^2} \quad (9)$$

Onde C é o valor da capacitância do capacitor do conversor. Admitindo uma variação da tensão de saída de $\Delta V_{out} = 0,36\ V$ e rearranjando a Equação 9 tem-se que:

$$C = \frac{(1-D)V_{out}}{\Delta V_{out} 8Lf^2} = \frac{(1-0,72)x12}{0,36x8x0,0028x31250^2} = 3,41\ \mu F$$

Será utilizado um capacitor de 100 μF, de forma que a análise feita considerando-se uma capacitância muito grande seja válida.

.

Para fazer o chaveamento será utilizado um transistor de alta frequência modelo MJE 13007, pois este possui uma resistência interna menor que os MOSFET´s diminuindo as perdas por condução. O mesmo ainda suporta uma tensão entre coletor e emissor de até 400 V_{cc} e uma corrente de coletor de até 16 A. O diodo utilizado será um IN4007. As especificações dos componentes do conversor estão apresentadas no Quadro 1.

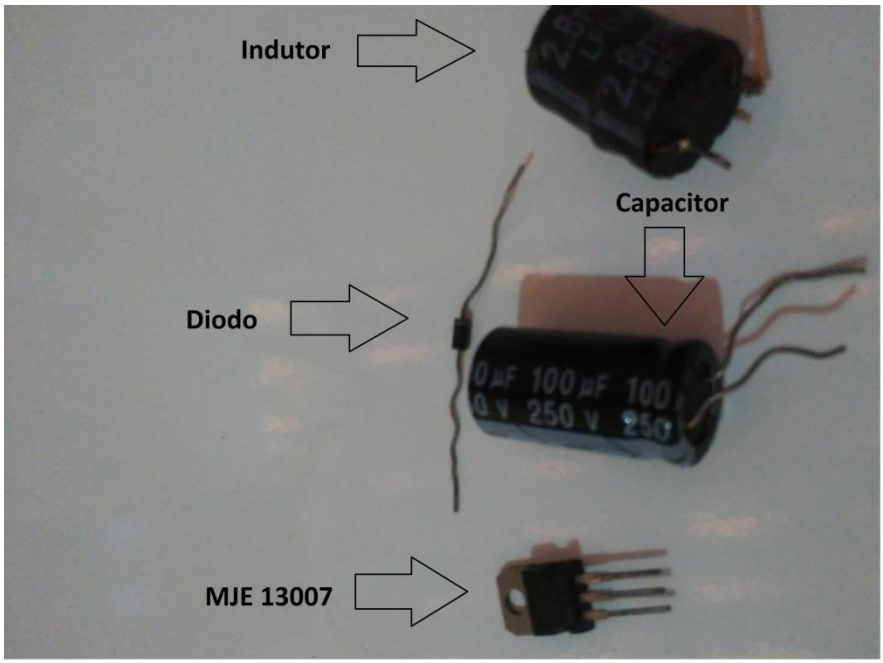
Quadro 1. Especificações do conversor *Buck*.

Potência	10 W
Frequência	31250 Hz
Indutor	2,8 mH
Capacitor	100 μF
Diodo	IN4007
Chaveamento	MJE 13007

Fonte: Filipe Lima (2020).

Os componentes utilizados estão apresentados na Figura 4.

Figura 4: Componentes utilizados na montagem do conversor. Têm-se o indutor, capacitor, transistor MJE 13007 e o diodo.



Fonte: Filipe Lima (2020).

3. CIRCUITO DE CONTROLE

.

Neste capítulo será apresentado o *hardware* utilizado para fazer o controle do controlador de carga. Neste trabalho foi utilizado o Arduino UNO® que possui o microcontrolador ATmega328 da ATMEL. No mesmo será implementado o código que fará o rastreamento do ponto de máxima potência do painel.

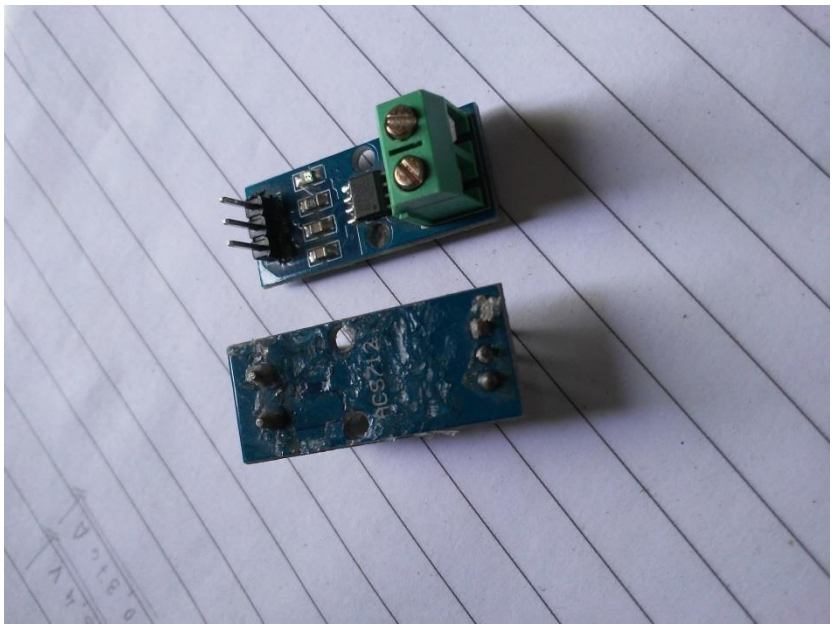
3.1 Partes que constituem o circuito de controle

A seguir são apresentadas as partes que constituem o circuito de controle do controlador de carga.

3.1.1 Sensores de corrente

Serão utilizados dois sensores de corrente, de forma a se monitorar tanto a corrente do painel solar quanto a do banco de baterias. O sensor de corrente utilizado foi ACS712 ELCTR-30-T. O mesmo suporta uma corrente de até 30 A conforme o datasheet do fabricante. Os sensores são apresentados na Figura 5.

Figura 5: Sensores de corrente utilizados.



Fonte: Filipe Lima (2020).

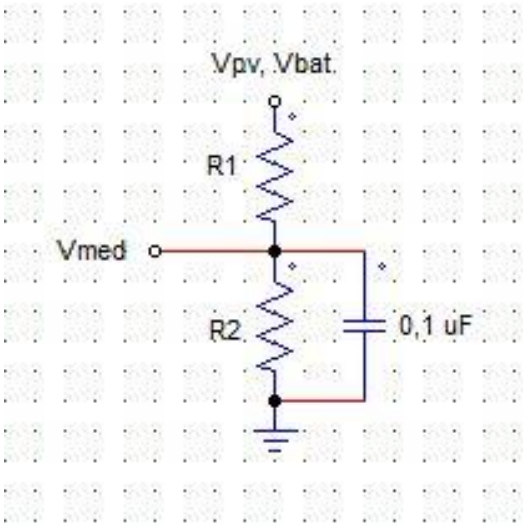
3.1.2 Sensores de tensão

Para fazer os sensores de tensão foi utilizado divisores de tensão. A entrada analógica do Arduino tem um range de 0 a 5 V. O painel solar tem uma tensão de circuito aberto de V_{oc} = 22,1 V. Já o banco de baterias tem uma tensão máxima de

.

V_{maxbat} = 12,5 V. Assim os sensores de tensão devem ter uma calibragem diferente. Para estabilizar a tensão foi utilizado um pequeno capacitor. O esquema utilizado para fazer o divisor de tensão é apresentado na Figura 6.

Figura 6: Divisor de tensão utilizado para sensor.



Fonte: Filipe Lima (2020).

Usando o principio do divisor de tensão para o sensor do painel solar tem-se:

$$V_{med} = \frac{R2}{R1+R2} V_{pv} \quad (10)$$

Rearranjando a Equação 10 para isolar R1 vem:

$$R_1 = \frac{R_2(V_{pv} - V_{med})}{V_{med}} \quad (11)$$

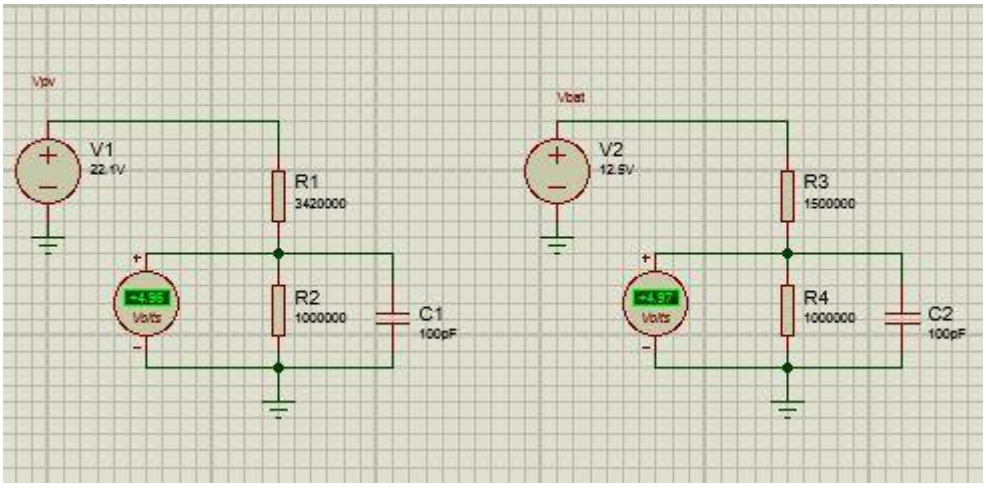
Os resistores R1 e R2 devem ter um resistência alta para que a corrente que flua pelos mesmos seja mínima, dissipando a menor quantidade de potência possível. Definindo R2 = 1 MΩ, V_{pv} = 22,1 V e V_{med} = 5 V têm-se que:

$$R_1 = \frac{1\ M\Omega(22{,}1\ V - 5\ V)}{5\ V} = 3{,}42\ M\Omega$$

Para o cálculo do divisor de tensão do banco de baterias substitui-se na Equação 11 V_{pv} por V_{bat} = 12,5 V, obtendo R4 = 1 MΩ e R3 = 1,5 MΩ. Os divisores de tensão foram simulados usando um software para prototipagem de circuitos eletrônicos. A simulação dos sensores de tensão está apresentada na Figura 7.

.

Figura 7: Simulação dos sensores de tensão.



Fonte: Filipe Lima (2020).

3.1.3 Arduino UNO

No Arduino UNO® será implementado o software que fará o rastreamento do ponto de máxima potência do painel. Essa versão do Arduino tem um microcontrolador ATmega328 da ATmel AVR. O ambiente de programação é baseado em Wiring e C. As características principais do hardware do Arduino UNO® são apresentadas a seguir:

- Portas digitais: 14;
- Portas PWM: 6;
- Portas analógicas: 8;
- Memória: 32 k (0,5 k usado pelo bootloader);
- Clock: 16 MHz;
- Conexão: USB;
- Tensão de operação: 5 V;
- Alimentação: 7 – 12 V.

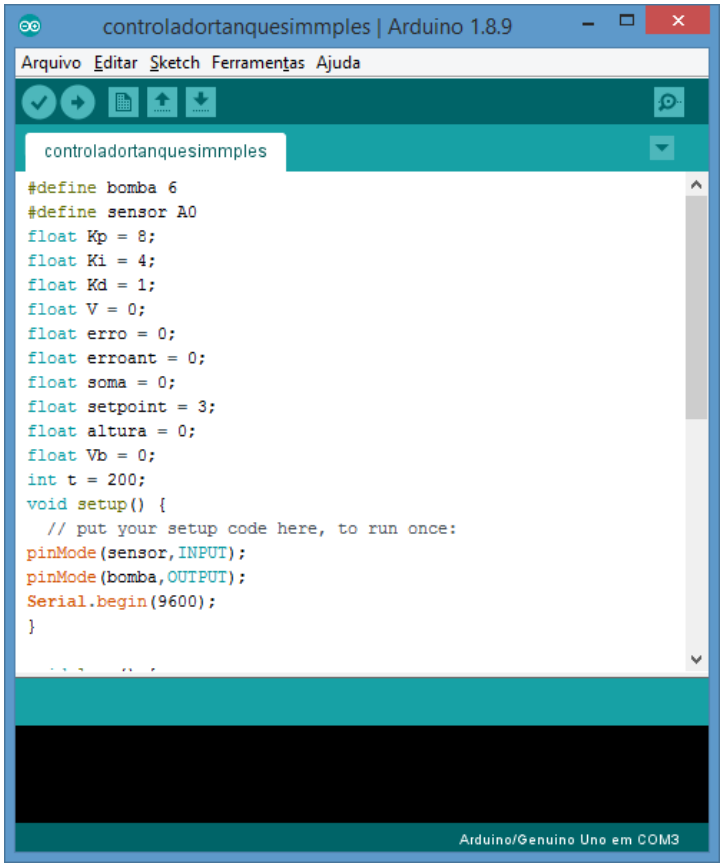
O ambiente para programação do Arduino consiste no *software* Arduino IDE. Entre as principais funcionalidades do IDE estão:

- Escrita do código do programa;
- Compilar o código do programa;
- Transferir o código do programa para a placa do Arduino.

.

A interface do IDE é apresentada na Figura 8.

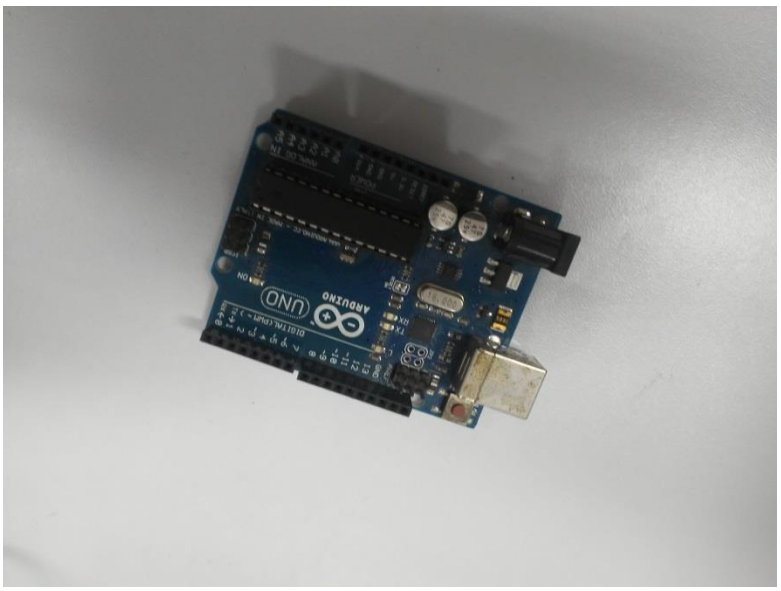
Figura 8: Ambiente de desenvolvimento IDE do Arduino.



Fonte: Filipe Lima (2020).

O Arduino UNO® utilizado no projeto é apresentado na Figura 9.

Figura 9: Arduino UNO® utilizado no projeto do controlador.



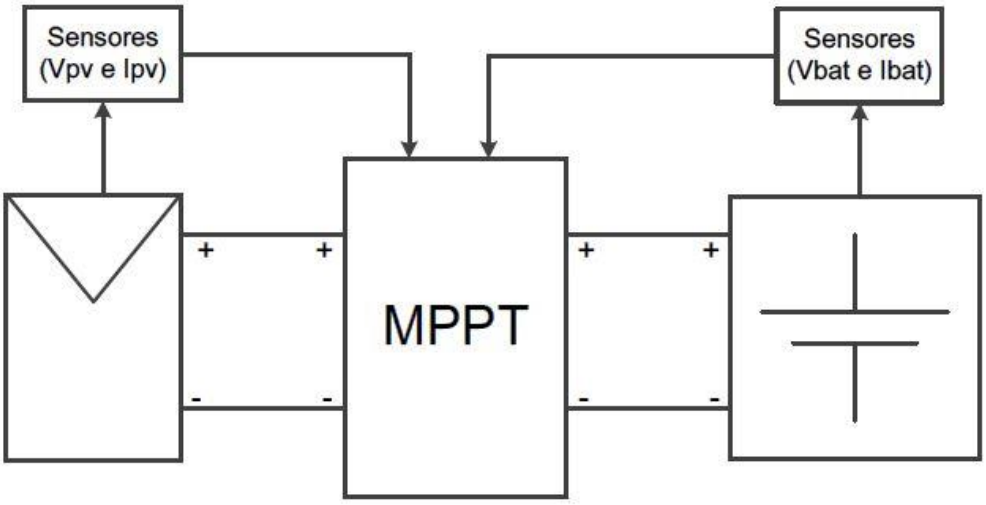
Fonte: Filipe Lima (2020).

.

4. SOFTWARE DE CONTROLE

O funcionamento do MPPT é definido pelo controlador do Arduino que determina a razão cíclica do sinal PWM que chaveia o transistor com base nos valores de tensão e corrente do painel lido pelos sensores. O código usado encontra-se no Apêndice A. Para fazer a proteção do banco de baterias é necessário fazer a leitura dos valores de tensão e corrente da saída do conversor. A Figura 10 mostra como deve ser a ligação física dos componentes.

Figura 10: Ligação física dos componentes do controlador de carga.



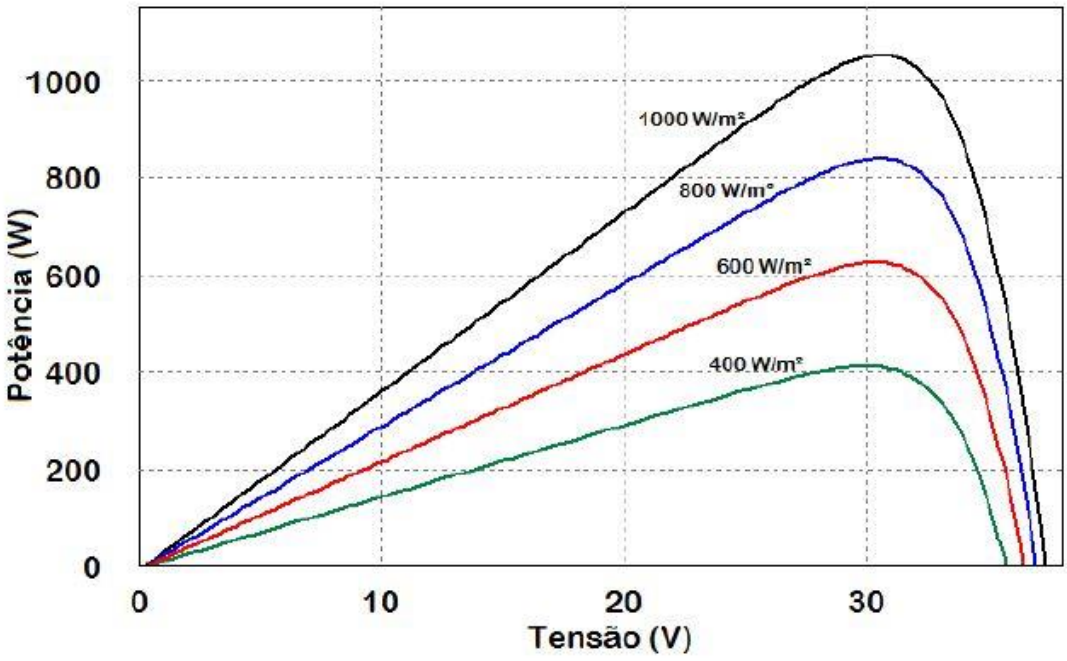
Fonte: Souza (2016).

4.1 Rastreamento da máxima potência

Em um arranjo fotovoltaico a geração de energia elétrica é intermitente e sofre uma forte influência da nebulosidade e da temperatura. Esses fatores fazem com que o ponto de operação que possibilita a extração da máxima potência do arranjo mude de forma constante (SOUZA, 2016). Fazer o rastreamento desse ponto de máxima potência faz com que a extração de energia seja mais eficiente possível. A Figura 11 apresenta a variação do ponto de máxima potência com a irradiância. Já a Figura 12 apresenta a variação em função da temperatura. Os valores apresentados nas Figuras 11 e 12 são para um painel solar típico.

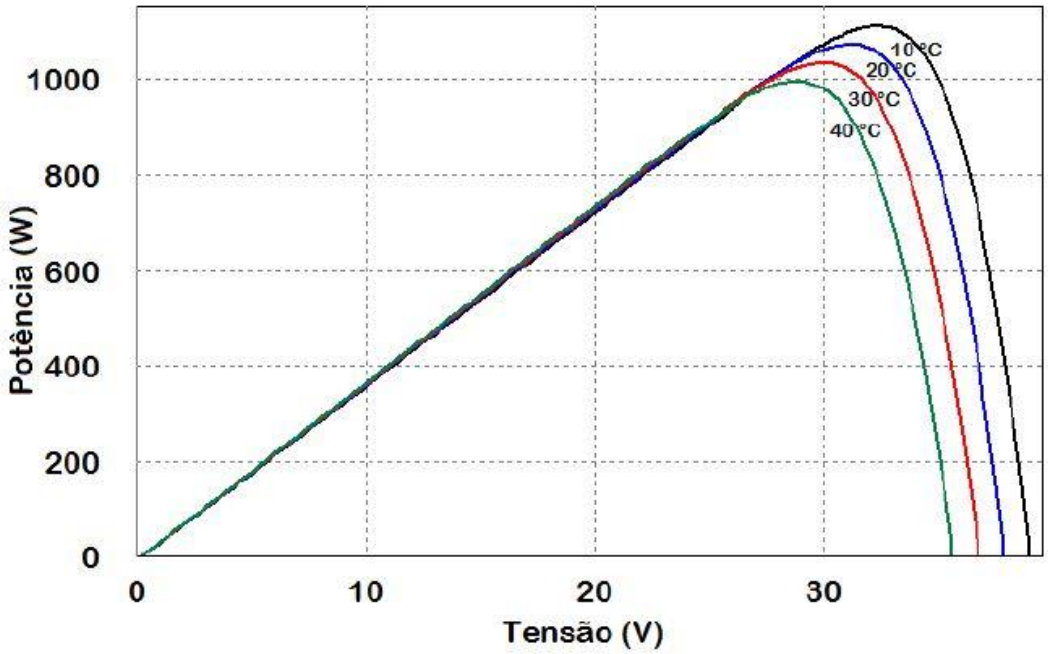
.

Figura 11: Variação do ponto de máxima potência com a irradiância.



Fonte: Souza (2016).

Figura 12: Variação do ponto de máxima potência com a temperatura.



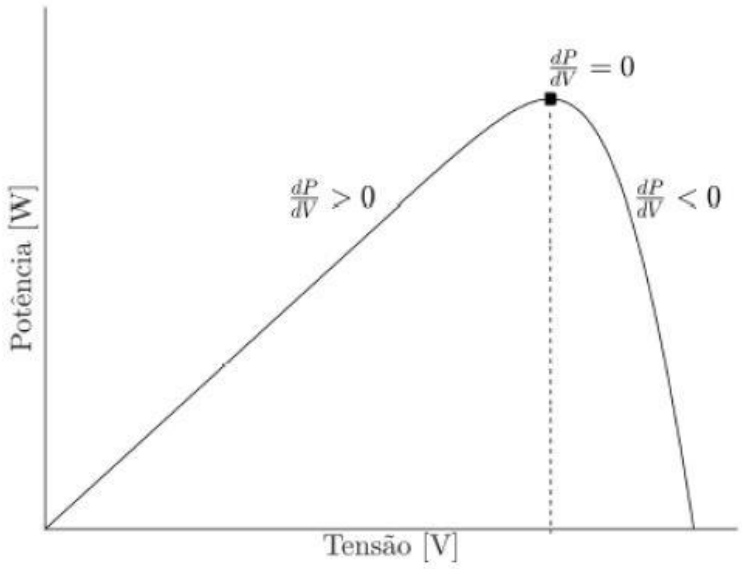
Fonte: Souza (2016)

.

4.1.1 Método de rastreamento do ponto de máxima potência

Segundo Souza (2016) os dois algoritmos mais amplamente utilizados para se fazer o rastreamento do ponto de máxima potência é o da condutância incremental e o pertuba e observa (P&O). No projeto foi utilizado o algoritmo da condutância incremental pois, segundo Agresta e Mikolajczak (2017) o mesmo apresenta uma eficiência melhor que o P&O para irradiações na faixa 300 à 1000 W/m^2. A Figura 13 será utilizada para uma melhor compreensão do funcionamento do algoritmo da condutância incremental.

Figura 13: Relação entre potência e tensão no painel solar.



Fonte: Tenório (2017).

A partir da Figura 13 têm-se que:

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(IV)}{dV} = I\frac{dV}{dV} + V\frac{dI}{dV} = I + V\frac{dI}{dV} = 0 \quad (12)$$

Calculando as derivadas da Equação 12 de forma discreta ΔI e ΔV com valores atuais e anteriores de tensão e corrente, pode-se desenvolver a seguinte lógica para o algoritmo da condutância incremental:

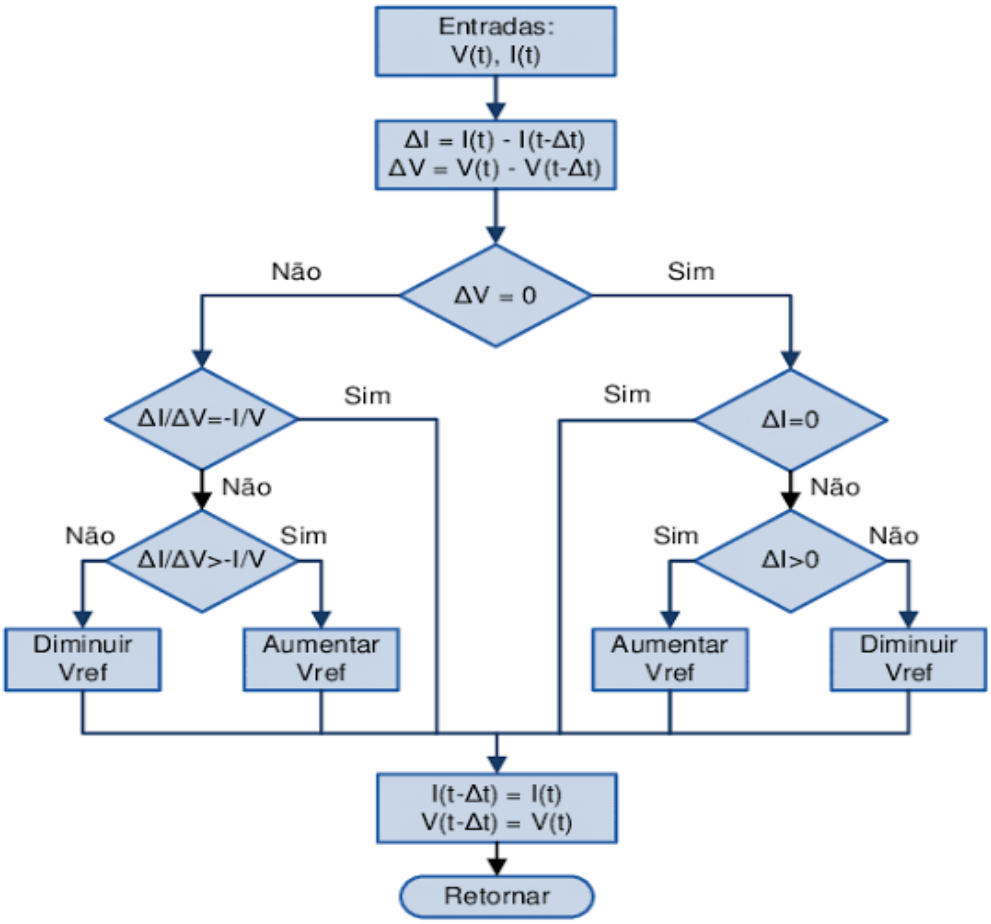
- $\frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I}{V}$: O ponto de operação é o de máxima potência;

.

- $\frac{\Delta I}{\Delta V} > -\frac{I}{V}$: O ponto de operação esta à esquerda do ponto de máxima potência;
- $\frac{\Delta I}{\Delta V} < -\frac{I}{V}$: O ponto de operação está à direita do ponto de máxima potência.

Um fluxograma contendo o algoritmo da condutância incremental é apresentado na Figura 14. Inicialmente são lidos os valores de tensão e corrente do painel solar. Em seguida é calculada a variação da tensão e da corrente. Se não houver variação de tensão corrente então o algoritmo retorna para o início. Caso não haja variação de tensão, porém a corrente sofra uma variação, então é verificado se a corrente aumentou ou diminuiu e a partir dai aumenta-se ou diminui-se a tensão de referência. Caso haja uma variação na tensão, as condições do método da condutância incremental são verificadas. A partir daí a tensão de referência é incrementada ou diminuída. Na prática, para aumentar a tensão de referência deve-se diminuir a razão cíclica da chave e vice-versa.

Figura 14: Fluxograma do método da condutância incremental.



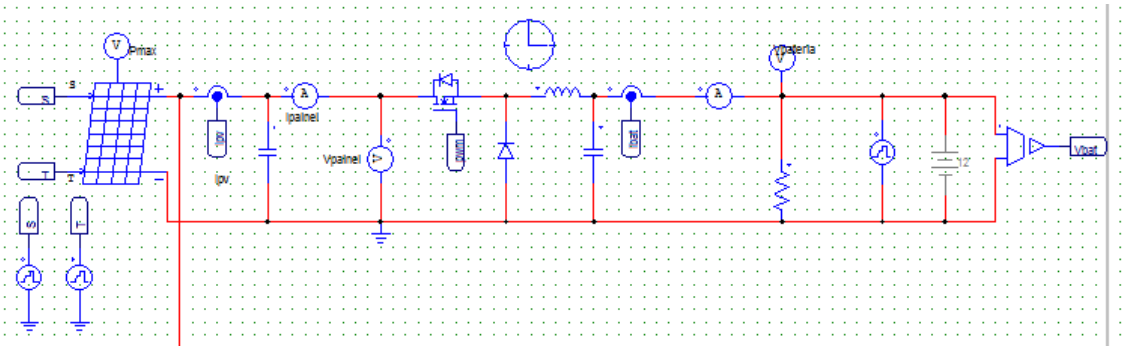
Fonte: www.researchgate.net (2016).

.

4.2 Simulação

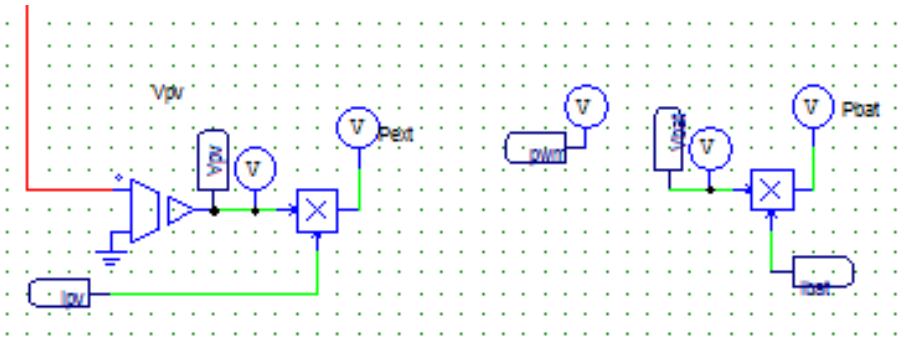
Para verificar se o controlador de carga seria capaz de realizar o rastreamento do ponto de máxima potência, a simulação do mesmo foi realizada em um software apropriado para eletrônica de potência. O mesmo é amplamente utilizado para a simulação de circuitos de eletrônica de potência. O mesmo apresenta os resultados de simulação na forma de gráficos. O circuito de potência simulado está apresentado na Figura 15. Nela está presente o modelo do painel fotovoltaico e uma fonte de tensão que modela o banco de baterias e o seu carregamento. É possível ver também os sensores de corrente de tensão. Para realizar a simulação é preciso fornecer os valores de irradiância e temperatura para o modelo do painel, bem como fornecer os parâmetros do mesmo. A potência máxima gerada pelo painel é calculada a cada instante de tempo. Na Figura 16 é apresentada a parte da simulação onde é calculada a potência extraída do painel, bem como a potência que chega ao banco de baterias.

Figura 15: Circuito de potência simulado.



Fonte: Filipe Lima (2020).

Figura 16: Cálculo da potência extraída e da potência no banco de baterias.

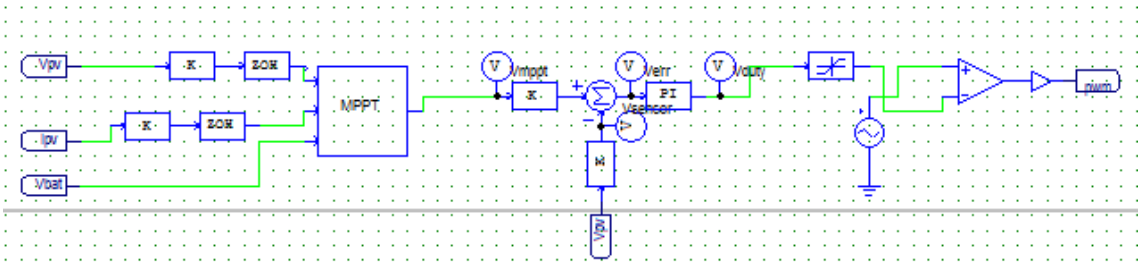


Fonte: Filipe Lima (2020).

.

Na Figura 17 está apresentada a parte de controle da simulação, que na prática é feita pelo Arduino UNO®. No bloco MPPT está implementado o algoritmo da condutância incremental. A programação do bloco MPPT é feita em linguagem C. Também é incluído um controlador PI para zerar o erro que é gerado pela diferença entre a tensão de referência que sai do bloco MPPT e a tensão de saída do painel. Com o erro zerado o mesmo vai para um comparador que irá gerar o sinal pwm que irá fazer o chaveamento do transistor.

Figura 17: Circuito de controle na simulação.



Fonte: Filipe Lima (2020).

4.3 Resultados da Simulação

A simulação do controlador de carga foi feita durante 1 s. Foram introduzidas variações de irradiância e temperatura no modelo do painel, bem como variação no nível de tensão da bateria. O Quadro 2 apresenta as variações mencionadas anteriormente e o instante de tempo em que ocorrem.

Quadro 2. Variações utilizadas para a simulação do controlador de carga.

Tempo [s]	0	0.1	0.3	0.4	0.5	0.7	1
Irradiância [w/m²]	800	900	800	700	400	200	200
Temperatura [ºC]	37	35	37	32	31	29	29
Tensão da bateria [V]	11	11.5	12.5	13	13.5	13	13

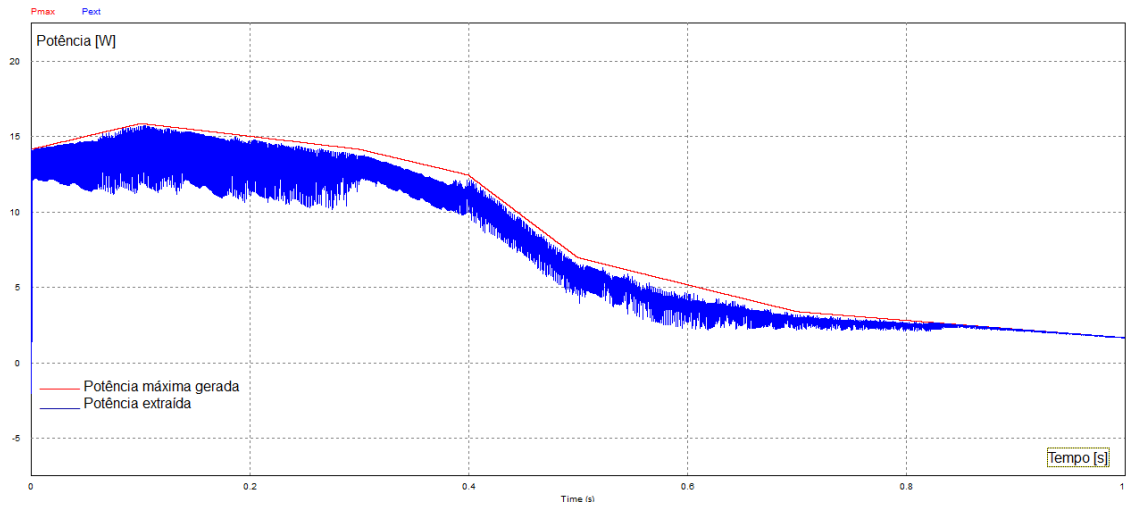
Fonte: Filipe Lima (2020).

A Figura 18 apresenta o resultado da simulação. Em vermelho está a máxima potência que é gerada pelo painel a cada instante de tempo e em azul a potência que é

.

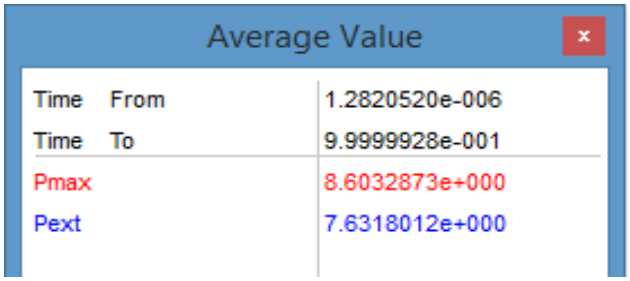
extraída devido o funcionamento do controlador. Nota-se que o controlador consegue rastrear o ponto de máxima potência do painel. Percebe-se que o mesmo apresenta oscilações no início do funcionamento, mas apresenta estabilidade com menos de 1s de funcionamento. A Figura 19 apresenta a potência média gerada durante 1s e a potência que o controlador conseguiu extrair durante o mesmo intervalo de tempo. O controlador conseguiu extrair uma potência satisfatória, capaz de suprir as necessidades de potência do equipamento aquático.

Figura 18: Potência máxima que é gerada pelo painel e potência extraída pelo controlador.



Fonte: Filipe Lima (2020).

Figura 19: Valor médio da potência gerada durante a simulação.



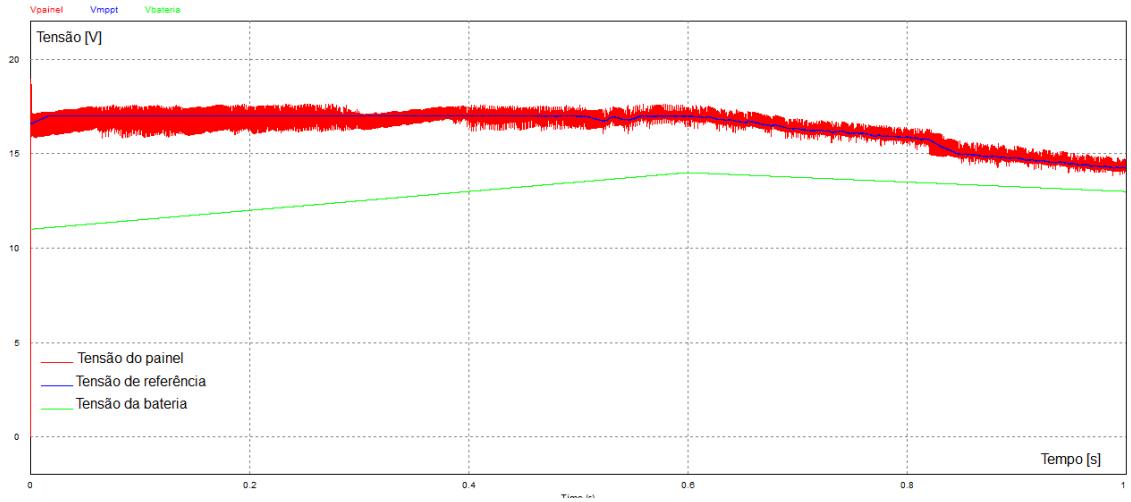
Fonte: Filipe Lima (2020).

A Figura 20 apresenta as tensões do sistema. Em vermelho está a tensão do painel, em azul a tensão de referência que sai do bloco MPPT (tensão do ponto de máxima potência a cada instante de tempo) e em verde está à tensão do banco de baterias. É

.

possível ver que o controlador ajusta a tensão do painel conforme a tensão de referência, fazendo assim o rastreamento do ponto de máxima potência.

Figura 20: Gráficos das tensões durante a simulação do controlador.

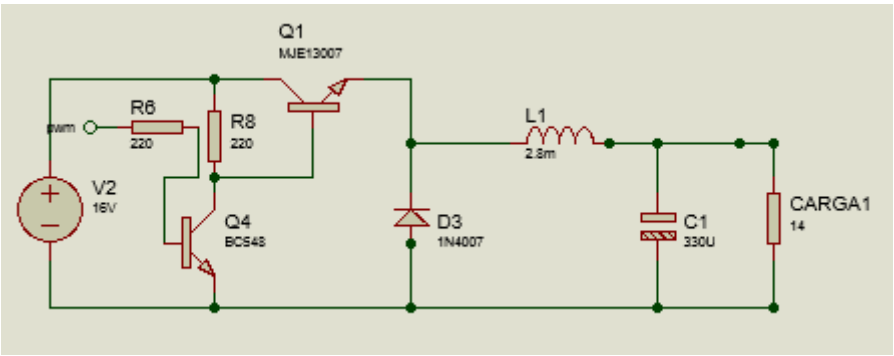


Fonte: Filipe Lima (2020).

5. IMPLEMENTAÇÃO

Para a implementação do controlador, o código contendo o algoritmo da condutância incremental foi exportado para o Arduino. Devido a saída pwm do Arduino ter uma corrente baixa e tensão máxima de 5 V, foi utilizado um transistor de baixo consumo BC 548 polarizado como amplificador de corrente para que o chaveamento do MJE 13007 fosse feito de forma eficiente. A Figura 21 apresenta a configuração do conversor, sem estar conectado à placa. Na simulação verificou-se que o chaveamento estava ocorrendo de forma correta.

Figura 21: Configuração de implementação do controlador de carga.

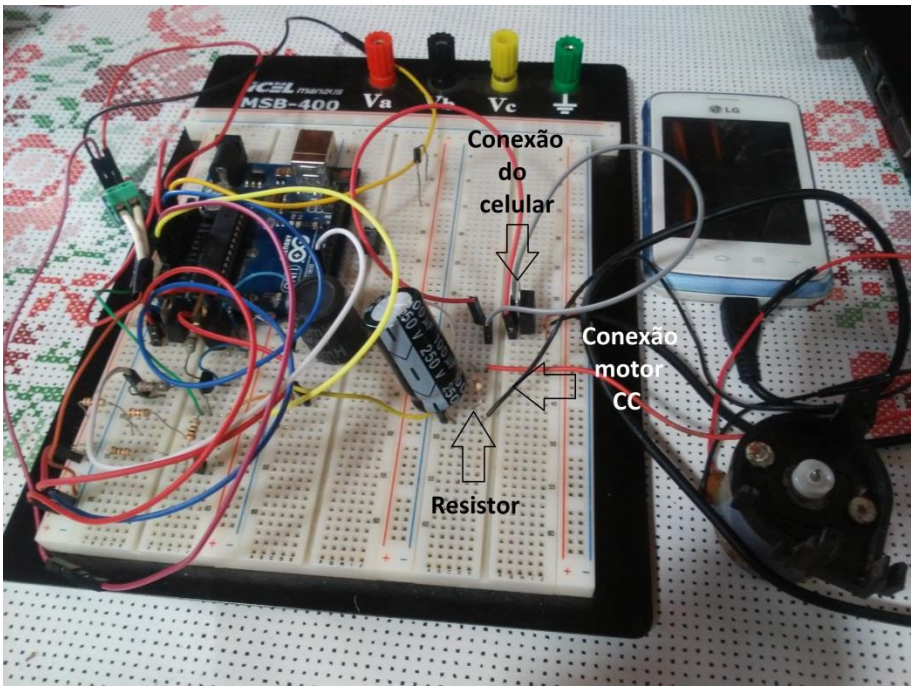


Fonte: Filipe Lima (2020).

.

Com o código no Arduino iniciou-se a etapa de testes do controlador. Incialmente o controlador foi testado sem estar conectado ao *Ghost Swimmer*®. Foi utilizado como carga um resistor, um pequeno motor cc e também um celular para que o mesmo fosse carregado. A Figura 22 apresenta o protótipo do controlador usado na etapa de testes. É possível ver as três cargas mencionadas anteriormente conectadas na saída do controlador de carga. As três cargas foram conectadas simultaneamente e o controlador continuou funcionado de forma adequada.

Figura 22: Protótipo para testes do controlador de carga.



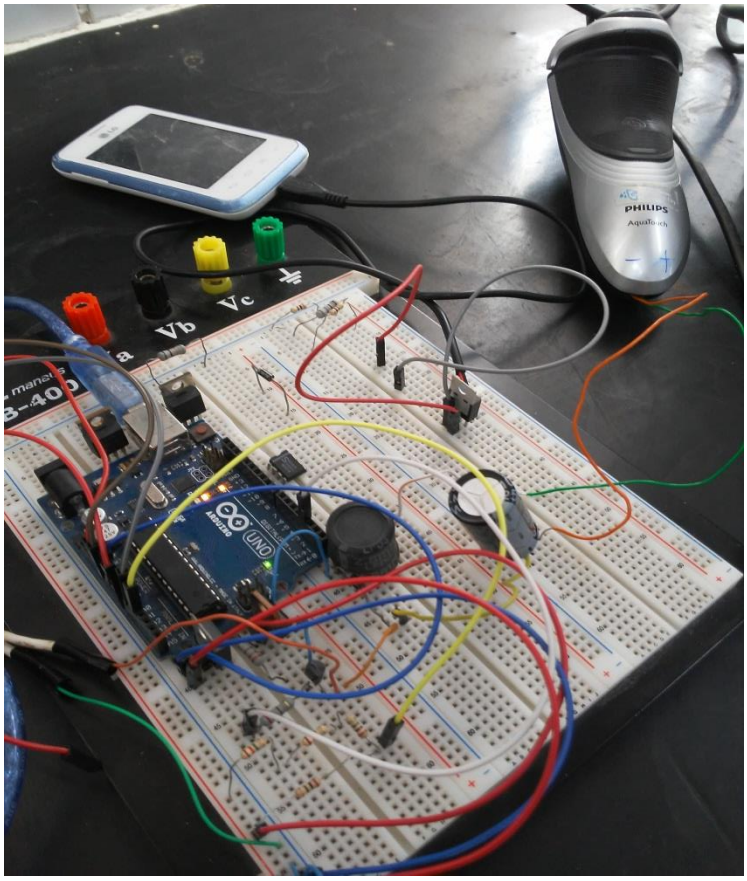
Fonte: Filipe Lima (2020).

Também foi realizado um teste com um barbeador elétrico recarregável cuja tensão da bateria é de 12 a 15 V. Esse teste é bem semelhante com finalidade do controlador, uma vez que o equipamento aquático será alimentado com uma bateria 12 V que deverá ser carregada pelo controlador. O controlador apresentou um funcionamento adequado, carregando a bateria de forma bastante eficiente. A Figura 23 apresenta a montagem do carregador durante o carregamento do barbeador. A Figura 24 apresenta os dados de tensão no painel, corrente no painel, a potência extraída no instante de tempo e a razão cíclica. No momento dos testes havia a presença de algumas nuvens e a temperatura estava bem acima das condições padrão dos testes de laboratório do painel. Isso fez com que a potência que o painel fornecia fosse reduzida, como pode

.

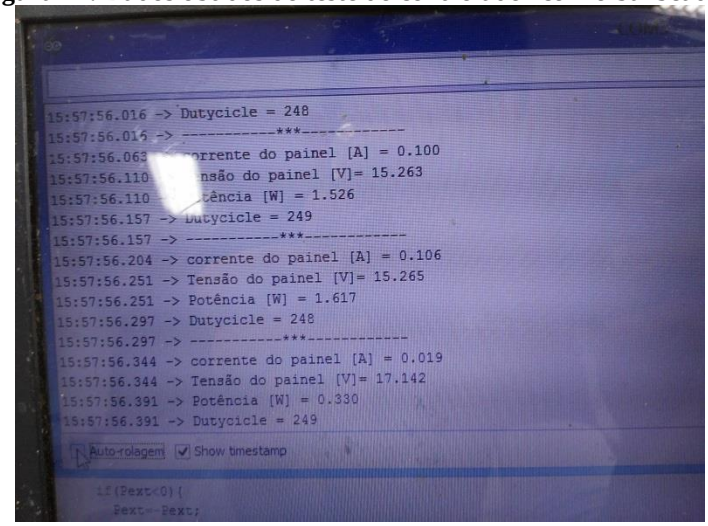
ser visto na Figura 24. A Figura 25 apresenta a tensão na chave durante os testes e a Figura 26 apresenta os parâmetros da mesma, obtidos com um osciloscópio. A Figura 27 apresenta a tensão na saída do controlador, ou seja, a tensão que está sendo aplicada a bateria.

Figura 23: Montagem para teste de carregamento do barbeador.



Fonte: Filipe Lima (2020).

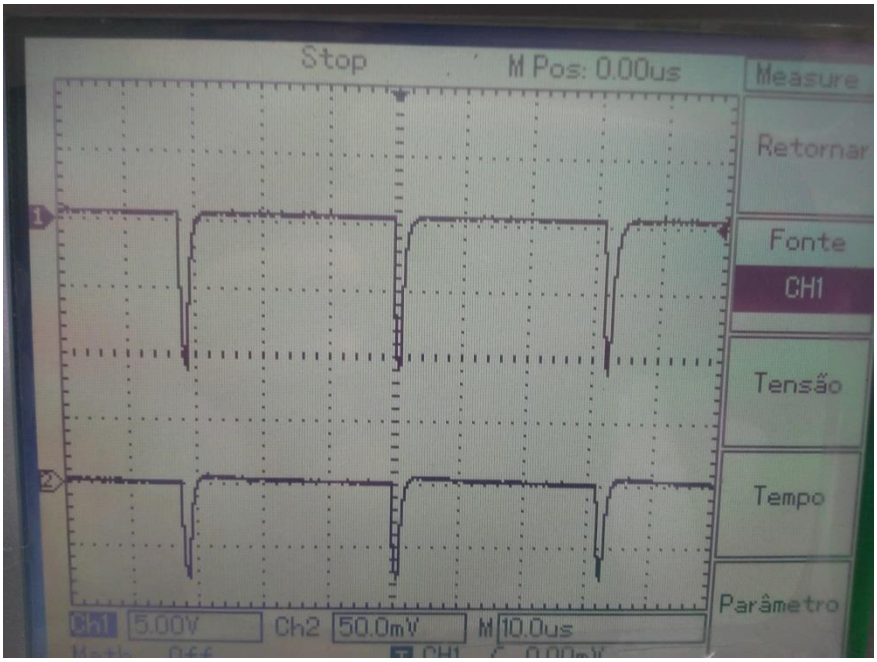
Figura 24: Dados obtidos do teste do controlador com o barbeador.



Fonte: Filipe Lima (2020).

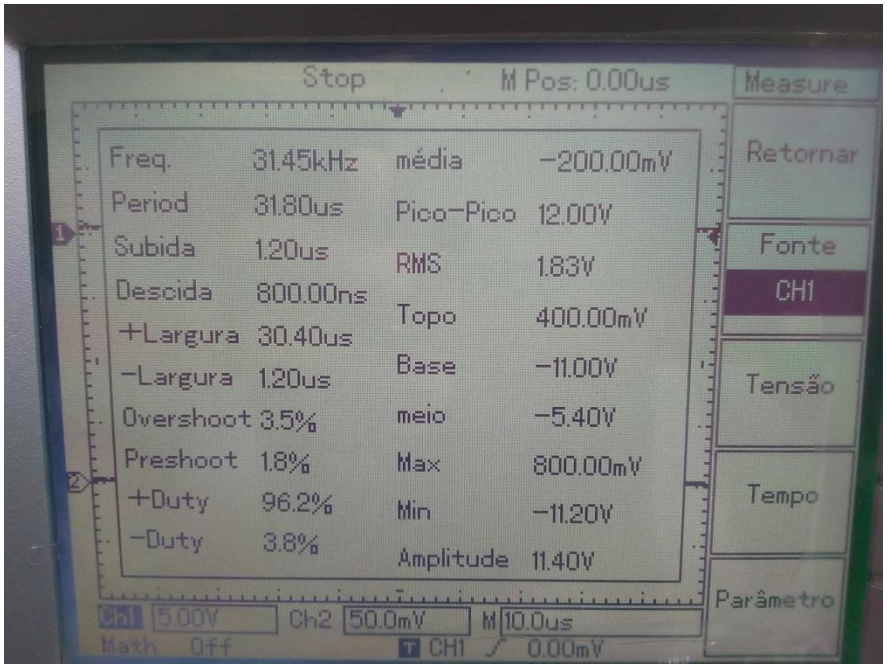
.

Figura 25: Tensão na chave durante os testes de carregamento da bateria de 12 V.



Fonte: Filipe Lima (2020).

Figura 26: Parâmetros da tensão na chave durante o carregamento da bateria de 12 V.



Fonte: Filipe Lima (2020).

.

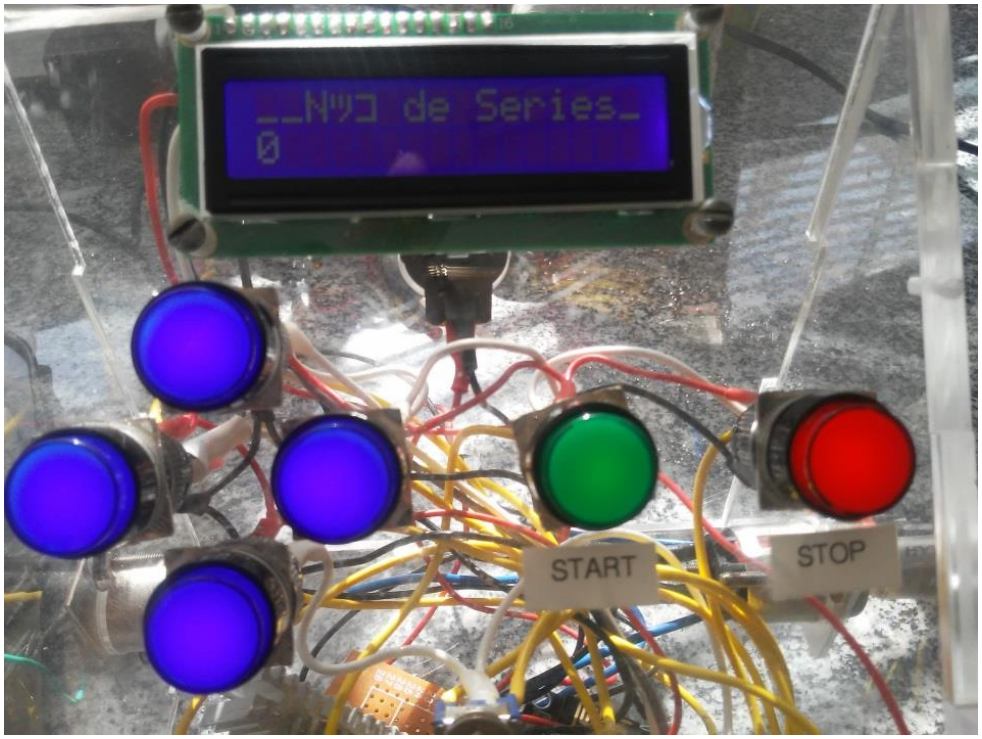
Figura 27: Tensão na saída do controlador, aplicada à bateria.

Fonte: Filipe Lima (2020).

Como último teste para o controlador, o mesmo foi testado conectado ao equipamento *Ghost Swimmer*®. Como ainda não havia sido dimensionada a bateria de 12 V, o teste foi realizado alimentando-se o equipamento diretamente do painel solar. O controlador apresentou o comportamento esperado, alimentando o equipamento corretamente. A função MPPT do controlador mostrou-se bastante eficiente, extraindo mais de 9 W de potência, sendo que a potência de pico do painel, segundo o datasheet, é de 10 W. A Figura 28 apresenta o controlador conectado ao equipamento para realização do teste. A Figura 29 apresenta os dados de corrente, tensão e potência extraída do painel. Também é apresentada a razão cíclica do chaveamento. Durante os testes verificou-se que o transistor de chaveamento apresentou um aquecimento excessivo. Assim, na elaboração do projeto final será adicionado um dissipador de calor no transistor.

.

Figura 28: *Ghost Swimmer*® conectado ao controlador de carga.



Fonte: Filipe Lima (2020).

Figura 29: Dados obtidos durante os testes com o *Ghost Swimmer*®.

```
08:29:51.246 -> Tensão do painel [V]= 15.083
08:29:51.279 -> Potência [W] = 9.305
08:29:51.313 -> Dutycicle = 239
08:29:51.347 -> -----------***------------
08:29:51.347 -> corrente do painel [A] = 0.613
08:29:51.382 -> Tensão do painel [V]= 15.166
08:29:51.416 -> Potência [W] = 9.299
08:29:51.449 -> Dutycicle = 240
08:29:51.449 -> -----------***------------
08:29:51.483 -> corrente do painel [A] = 0.605
08:29:51.516 -> Tensão do painel [V]= 15.278
08:29:51.550 -> Potência [W] = 9.243
08:29:51.584 -> Dutycicle = 241
08:29:51.584 -> -----------***------------
08:29:51.617 -> corrente do painel [A] = 0.614
08:29:51.653 -> Tensão do painel [V]= 15.183
```

Fonte: Filipe Lima (2020).

.

6. CONCLUSÃO

Este capítulo conclui o trabalho abordando como os objetivos foram alcançados e apresentando melhorias futuras para o trabalho.

6.1 Objetivo alcançado

O controlador de carga apresentou o funcionamento esperado, conforme o projeto previu. O único problema apresentado na implementação foi o aquecimento do transistor de chaveamento. No entanto o mesmo pode ser resolvido facilmente com a utilização do dissipador de calor. O *Ghost Swimmer*® funcionou corretamente sendo alimentado através do painel solar com o uso do controlador. Assim, o equipamento apresenta autonomia de energia.

O rastreamento da máxima potência foi confirmado com o teste realizado no *Ghost Swimmer*®, através dos dados obtidos durante a realização dos mesmos. Assim, todas as etapas do trabalho foram cumpridas. Desde as simulações e testes até a verificação do funcionamento em condições reais.

6.2 Trabalhos futuros

Algumas melhorias podem ser feitas no controlador e as mesmas serão elencadas aqui. Quando a bateria estiver dimensionada, será necessário implementar no código a proteção do banco de baterias. Também será necessário fazer o controle de tensão no banco de baterias, tornando o controlador mais completo. O controlador foi desenvolvido com o intuito de fazer a autonomia de um equipamento aquático. No entanto o mesmo pode ser utilizado para alimentar outros equipamentos que necessitem de corrente contínua. O projeto do controlador pode ser adaptado para trabalhar em potências maiores, bastando para isso fazer um dimensionamento adequado do circuito de potência.

Há também a possibilidade de usar o tempo em que o controlador não está sendo solicitado para o carregamento da bateria do *Ghost Swimmer*®, para que o mesmo alimente equipamentos de monitoramento das condições da água da piscina. Esse controle de escolha da carga a ser alimentada pode ser feito via rádio, através do uso de

.

antenas. Assim o controlador poderia ser comandado à distância, sem a necessidade de deslocamento para ir até o mesmo.

.

REFERÊNCIAS

AGRESTA, Joseph A.; MIKOLAJCZAK, Nicole A. **An MPPT Charger Controller For Solar Powered Portable Devices.** 2017. 100 f. TCC (Graduação) - Curso de Electrical Engineering, Centro Tcnológico, Worcester Polytechnic Institute Major Qualifying Project, Worcester, 2017.

BLOCKER, Phillip Canabarro. **Aproveitamento Inteligente de Energia Solar.** 2018. 62 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2018.

HART, Daniel W. **Eletrônica de Potência.** Madrid: Pearson, 2001. 472 p.

SOUSA, Thiago Alefy Almeida de. **Ghost Swimmer:** Tecnologia aplicada à natação. 2019. 41 f. TCC (Graduação) - Curso de Ciência da Computação, Universidade do Estado do Rio Grande do Norte, Mossoró, 2019.

TENÓRIO, Anderson Nunes de O. L. **Simulação de um conversor *boost* para rastreamento de máxima potência em sistemas fotovoltaicos.** 2017. 64 f. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia de Energia, Universidade de Brasília, Brasília DF, 2019.

.

APÊNDICE A: CÓDIGO DO MPPT

```
#define pwm 3
 const int sensorPin = A0;
 const int sensorPin1 = A1;
 float sensorValor=0;
 float sensorValor1=0;
 float Ipv=0;
 float Vpv=0;
 float voltsporunidade=0.0048875855327468;
 float ruido=0.00;
 float ruido1=-0.72;
 float Pext=0;
 float Vpvant=0;
 float Ipvant=0;
 float deltaVpv;
 float deltaIpv;
 float a1;
 float a2;
 int n=100;
 int dutycicle;
 int dtclk;
void setup() {
```

.

```
 // put your setup code here, to run once:
dutycicle = 191;
Serial.begin(9600);
pinMode(3,OUTPUT);
TCCR2B = TCCR2B & 0b11111000 | 0b1;
//TCCR2A=0xA3;
//TCCR2B=2;
}
void loop() {
 // put your main code here, to run repeatedly:
//código para os sensores
Ipv=0;
Vpv=0;
 for(int index =0;index<n;index++){
  sensorValor=analogRead(sensorPin);
  sensorValor1=analogRead(sensorPin1);
  sensorValor=(sensorValor -510)*voltsporunidade;
  sensorValor1=(sensorValor1)*voltsporunidade*(22.1/5);
  Ipv=Ipv+(sensorValor/66)*1000;
  Vpv= Vpv + sensorValor1;
  //delay(1);
 }
  Ipv=Ipv/n;
```

.

```
Vpv=Vpv/n;
Ipv=Ipv-ruido;
Vpv=Vpv-ruido1;
//Algoritmo da condutância incremental
 deltaVpv=Vpv-Vpvant;
 deltaIpv=Ipv-Ipvant;
  if(deltaVpv !=0)
    a1=deltaIpv/deltaVpv;
  if(Vpv !=0)
    a2=-(Ipv/Vpv);
//início do algoritmo
 if(deltaVpv==0){
   if(deltaIpv==0){
     dutycicle=dutycicle;
   }
   if(deltaIpv !=0){
     if(deltaIpv>0){
       dutycicle=dutycicle-1;
     }
     if(deltaIpv<0){
       dutycicle=dutycicle+1;
     }
   }
```

.

```
}
if(deltaVpv !=0){
 if(a1==a2){
   dutycicle=dutycicle;
 }else{
   if(a1>a2){
     dutycicle=dutycicle-1;
   }
   if(a1<a2){
     dutycicle=dutycicle+1;
   }
 }
}
Vpvant=Vpv;
Ipvant=Ipv;
 if(dutycicle > 255){
  dutycicle=255;
 }
 if(dutycicle < 15){
  dutycicle = 15;
 }
dtclk = 255-dutycicle;
analogWrite(pwm,dtclk);
```

.

```
  Serial.print("corrente do painel [A] = ");
  Ipv=Ipv-ruido;
  Serial.print(Ipv, 3);
  Serial.print("\n");
    Serial.print("Tensão do painel [V]= ");
  Vpv=Vpv-ruido1;
  Serial.print(Vpv, 3);
  Serial.print("\n");
  Pext=Vpv*Ipv;
   if(Pext<0){
     Pext=-Pext;
   }
  Serial.print("Potência [W] = ");
  Serial.print(Pext, 3);
  Serial.print("\n");
  Serial.print("Dutycicle = ");
  Serial.print(dutycicle);
  Serial.print("\n");
  Serial.print("-----------***------------");
  Serial.print("\n");
}
```

.