

ANDRÉ LUIZ CANELA

**DESENVOLVIMENTO E EXECUÇÃO DE
UM CONTROLADOR DE CARGA PARA
UM SISTEMA FOTOVOLTAICO
AUTÔNOMO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharia Elétrica e Eletrônica da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para obtenção do grau de bacharel no Curso de Engenharia Elétrica.

Orientador: Lenon Schmitz.

Co-Orientador: Roberto Francisco Coelho

**FLORIANÓPOLIS
2019**

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Canela, André Luiz

Desenvolvimento e execução de um controlador de carga para um sistema fotovoltaico autônomo / André Luiz Canela ; orientador, Lenon Schmitz, coorientador, Roberto Francisco Coelho, 2019.
101 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Graduação em Engenharia Elétrica, Florianópolis, 2019.

Inclui referências.

1. Engenharia Elétrica. 2. Controlador de carga. 3. Conversor C&Gk. 4. Rastreamento de máxima potência. 5. Geração Fotovoltaica. I. Schmitz, Lenon. II. Coelho, Roberto Francisco. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Elétrica. IV. Título.

André Luiz Canela

**DESENVOLVIMENTO E EXECUÇÃO DE UM
CONTROLADOR DE CARGA PARA UM SISTEMA
FOTOVOLTAICO AUTÔNOMO**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica e aprovado em sua forma final pelo Curso de Graduação em Engenharia Elétrica.

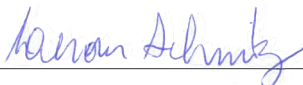
Florianópolis, 11 de Julho de 2019.



Prof. Renato Lucas Pacheco, Dr.


Coordenador do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica em exercício

Banca examinadora:



Prof. Lenon Schmitz, Me.

Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Roberto Francisco Coelho, Dr.

Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Denizar Cruz Martins, Dr.

Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Rafael Henrique Eckstein, Me.

Instituto Federal de Santa Catarina

A minha família.

Agradecimentos

Desejo expressar meu reconhecimento a todos que, de uma maneira ou outra, colaboraram na realização deste trabalho, em especial:

A equipe Vento Sul pela oportunidade de me desenvolver tanto pessoalmente quanto profissionalmente e executar esse trabalho.

Ao INEP, que viabilizou a realização deste trabalho.

Ao professor co-orientador Roberto Francisco Coelho, Dr. pela confiança, ensinamento e elaboração do projeto.

Ao professor orientador Lenon Schmitz que além de um ótimo mentor me auxiliou em todas dúvidas e problemas encontrados na realização deste projeto.

Ao corpo docente do Departamento de Engenharia Elétrica e aos demais professores pelas aulas ministradas durante a Graduação.

Aos amigos e colegas de cursos pelas ideias compartilhadas e dicas.

Aos meus familiares e minha namorada pelo incentivo, amparo e motivação para conclusão da minha formação.

"Para se ter sucesso, é necessário amar de verdade o que se faz. Caso contrário, levando em conta apenas o lado racional, você simplesmente desiste. É o que acontece com a maioria das pessoas."(Steve Jobs, 2007)

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um controlador de carga com rastreamento de máxima potência para um sistema fotovoltaico isolado, utilizado na embarcação Guarapuvu da equipe de competição Vento Sul Barcos Solares da UFSC. O controlador foi projetado em um conversor CC-CC não isolado Cúk com a utilização de um método de rastreamento de máxima potência com base na estimação de temperatura do módulo fotovoltaico. Passando, primeiramente, pelos conceitos fundamentais para o entendimento deste tipo de geração, o trabalho apresenta um estudo dos equipamentos, das topologias de conversores e os principais métodos de rastreamento de máxima potência presentes na literatura. Apresenta também o dimensionamento dos componentes para que o conversor Cúk processe a energia proveniente de um módulo fotovoltaico de 250 W, implementação do algoritmo de rastreamento e do sistema de recarga das baterias. Por fim, resultados experimentais validam o correto funcionamento do controlador de carga proposto.

Palavras-chave: Controlador de carga, Conversor Cúk, Rastreamento de máxima potência, Geração Fotovoltaica.

ABSTRACT

This work aims at the construction of a solar charge controller with MPPT (Maximum Power Point Tracking) for an isolated photovoltaic system used in the Guarapuvu vessel of the team of Vento Sul Solar Boat UFSC. The controller was designed in a DC-DC converter with maximum power point tracking method based on the temperature estimation of the photovoltaic module. Passing first on the fundamental concepts for the understanding of this type of generation, the work presents a study of the equipments, topologies of the converters and the main methods of tracking of maximum power present in the literature. In addition, its presented the dimensioning of components for the Cúk converter to process the energy from a 250 W photovoltaic module, and the mplementation of the tracking algorithm and the battery recharging system. Finally, experimental results validate the correct functioning of the proposed controller.

Keywords: Solar Charge Controller. Photovoltaic System. Maximum Power Point Tracking. Cúk converter.

Siglas

| Símbolo | Descrição |
|----------------|--|
| AM | <i>Air Mass.</i> |
| Aneel | Agência Nacional de Energia Elétrica. |
| CC-CC | Corrente contínua para corrente contínua. |
| CC-CA | Corrente contínua para corrente alternada. |
| CondInc | Condutância Incremental. |
| I-V | Corrente versus Tensão. |
| INEP | Instituto de Eletrônica de Potência. |
| MCC | Modo de Condução Contínua. |
| MPP | <i>Maximum Power Point.</i> |
| MPPT | <i>Maximum Power Point Tracker.</i> |
| MPPT-temp | MPPT baseado na medição de temperatura. |
| NOTC | <i>Nominal Operating Cell Temperature.</i> |
| OMM | Organização Mundial de Meteorologia. |

| Símbolo | Descrição |
|----------------|---|
| <i>P&O</i> | Perturba e Observa. |
| PV | <i>Photovoltaic.</i> |
| P-V | Potência versus Tensão. |
| SFCR | Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede. |
| SMD | <i>Surface Mount Device</i> |
| STC | <i>Standard Test Condition.</i> |
| UFSC | Universidade Federal de Santa Catarina. |

Unidades

| Símbolo | Descrição |
|----------------|------------------|
| °C | Grau Celsius |
| A | Ampère. |
| F | Farad. |
| H | Henry. |
| Hz | Hertz. |
| m | metro. |
| s | segundo. |
| V | Volt. |
| W | Watt. |

Prefixos

| Símbolo | Descrição |
|----------------|------------------|
| mega (M) | 10^6 |
| kilo (k) | 10^3 |

| Símbolo | Descrição |
|-----------------|------------------|
| mili (m) | 10^{-3} |
| micro (μ) | 10^{-6} |
| nano (n) | 10^{-9} |

Símbolos adotados nos equacionamentos e para referenciar elementos de circuito

| Símbolo | Descrição |
|-----------------|---|
| D | Razão Cíclica. |
| E_1 | Fonte de energia de entrada do conversor. |
| E_2 | Fonte de energia de saída do conversor. |
| f_s | Frequência de Comutação. |
| G | Ganho estático. |
| I_{mpp} | Corrente de Máxima potência do Módulo Fotovoltaico. |
| I_{sc} | Corrente de curto circuito do Módulo Fotovoltaico. |
| I_{mpp}^{STC} | Corrente de Máxima potência do Módulo Fotovoltaico operando em STC. |
| I_E | Fonte de corrente de entrada no conversor. |
| I_D | Corrente no Diodo. |
| I_s | Corrente no interruptor. |
| I_o | Corrente de carga no conversor. |
| ΔI_{Lo} | Ondulação de corrente no indutor de entrada. |
| ΔI_{LE} | Ondulação de corrente no indutor de saída. |
| I_{PV} | Corrente nos terminais do módulo PV. |
| P_{mpp} | Potência Máxima do Módulo Fotovoltaico. |
| P_{mpp}^{STC} | Potência Máxima do Módulo Fotovoltaico operando em STC. |
| P_1 | Potência de entrada do conversor. |

| Símbolo | Descrição |
|-----------------|---|
| P_2 | Potência de saída do conversor. |
| P_{PV} | Potência nos terminais do módulo PV. |
| P_o | Potência máxima. |
| T | Período de chaveamento. |
| ta | Tempo em que no qual o interruptor S permanece aberta. |
| tc | Tempo em que no qual o interruptor S permanece conduzindo. |
| t_{ca} | Tempo de leitura do microcontrolador. |
| t_{mp} | Tempo de atualização da razão cíclica. |
| V_{mpp} | Tensão de Máxima potência do Módulo Fotovoltaico. |
| V_{mpp}^{STC} | Tensão de Máxima potência do Módulo Fotovoltaico operando em STC. |
| V_{oc} | Tensão de circuito aberto do Módulo Fotovoltaico. |
| V_{oc}^{STC} | Tensão de circuito aberto do módulo PV na STC. |
| V_c | Tensão no Capacitor Ccuk. |
| V_d | Tensão no diodo. |
| V_i | Tensão de entrada. |
| V_o | Tensão de Saída. |
| V_{PV} | Tensão nos terminais do módulo PV. |
| V_{ref} | Tensão fixada pelo método. |
| μ_V | Coefficiente Térmico de tensão. |
| μ_A | Coefficiente Térmico de corrente. |
| μ_{oc} | Coefficiente térmico da V_{oc} . |

Lista de Figuras

| | | |
|------|--|----|
| 2.1 | Componentes da radiação solar. [1] | 30 |
| 2.2 | Determinação do Índice de Massa de Ar em função do ângulo zenital entre a Terra e o raio solar incidente. [2] | 31 |
| 2.3 | Curvas características I-V e P-V. [2] | 32 |
| 2.4 | Principais pontos as curvas I-V e P-V. [1] | 33 |
| 2.5 | Curvas características que relacionam a tensão e a corrente de saída de células fotovoltaicas: (a) sob temperatura constante e irradiância solar variável; (b) sob temperatura variável e irradiância solar constante. | 34 |
| 2.6 | Sistema fotovoltaico conectado à rede. [3] | 35 |
| 2.7 | Sistema fotovoltaico isolado domiciliar: A-painel fotovoltaico; B-controlador de carga; C-banco de baterias; D-inversores; E-cargas CA; F-caixa de conexão. [3] | 36 |
| 2.8 | Exemplo de controladores de carga. Da esquerda para a direita: <i>on/off</i> , PWM e MPPT. | 39 |
| 2.9 | Representação simplificada de um conversor CC-CC. [4] | 40 |
| 2.10 | Topologias dos seis conversores CC-CC básicos não isolados. [4] | 41 |
| 3.1 | Equipamentos da embarcação Guarapuvu I. [5] | 44 |

| | | |
|------|---|----|
| 3.2 | Curva I-V referente ao módulo Kyocera KC200GT: (a) sob temperatura constante e (b) sob radiação solar constante. [6] | 45 |
| 3.3 | Curva de Descarga - Corrente Constante DF1000. [7] | 46 |
| 3.4 | Conversor a acumulação capacitiva (Conversor Ćuk). [4] | 47 |
| 3.5 | Etapas de operação do conversor Ćuk. [4] | 48 |
| 3.6 | Principais formas de onda do conversor Ćuk. Onde V_c tensão no capacitor, V_s tensão no interruptor, V_D tensão no diodo, I_s corrente no interruptor, I_D corrente no diodo e I_c corrente no capacitor. [4] | 49 |
| 3.7 | Sistema típico de rastreamento de máxima potência. [2] | 53 |
| 3.8 | Característica da curva I-V para o método de tensão constante. [1] | 54 |
| 3.9 | Comparação entre o rastreamento de máxima potência para diferentes valores do passo ΔD : (a) e (b) Passo reduzido; (c) e (d) Passo elevado. [1] | 55 |
| 3.10 | Curva da potência e derivada da potência em relação à tensão para um módulo fotovoltaico. [1] | 56 |
| 3.11 | Configuração do método MPPT-temp. [1] | 57 |
| 3.12 | Configuração do método MPPT baseado na estimação da temperatura. [8] | 60 |
| 3.13 | Fluxograma do método de MPPT implementado. | 60 |
| 3.14 | Fluxograma do sistema de carregamento da bateria. | 61 |
| 4.1 | Foto da placa de circuito impresso utilizada. | 64 |
| 4.2 | Foto do andamento da fabricação. | 64 |
| 4.3 | Foto de um conversor finalizado. | 65 |
| 4.4 | Foto de todos conversores finalizados. | 65 |
| 4.5 | Esquemático simplificado do conversor Ćuk do projeto. | 66 |
| 4.6 | Carga utilizada nos testes de circuito aberto. | 67 |
| 4.7 | Tensões V_s , V_d e V_c com $D = 0,5$ e $V_{PV} = 28$ V em malha aberta. | 67 |
| 4.8 | Tensão e corrente no diodo em malha Aberta, com $D = 0,5$ e $V_{PV} = 28$ V. | 68 |
| 4.9 | Tensão e corrente no MOSFET em malha aberta, com $D = 0,5$ e $V_{PV} = 28$ V. | 68 |
| 4.10 | Ripples de corrente nos indutores de entrada e de saída do conversor, com $D = 0,5$ e $V_{PV} = 28$ V. | 69 |

| | | |
|------|--|----|
| 4.11 | V_s, V_{PV}, V_o e I_{PV} no Teste 1 com $D = 0,545$ | 70 |
| 4.12 | V_s, V_{PV}, V_o e I_{PV} no Teste 2 com $D = 0,45$ | 71 |
| 4.13 | V_s, V_{PV}, V_o e I_{PV} no Teste 3 com $D = 0,444$ | 71 |
| 4.14 | V_s, V_{PV}, V_o e I_{PV} no Teste 4 com $D = 0,407$ | 72 |
| 4.15 | Foto da realização dos testes em malha fechada. | 73 |
| 4.16 | Teste do pulso de leitura. | 73 |
| 4.17 | Teste do Rastreamento de máxima potência. | 74 |
| 4.18 | Teste do sistema de recarga de baterias. | 75 |

Lista de Tabelas

| | | |
|-----|--|----|
| 2.1 | Condições padrões de teste STC e NOTC. [2] | 31 |
| 2.2 | Ganho estático para alguns conversores cc-cc em MCC. [8] | 42 |
| 3.1 | Especificações do módulo KC200GT. [6] | 44 |
| 3.2 | Instruções de carga DF1000 a 25 °C. [7] | 45 |
| 3.3 | Especificações do conversor Ćuk. | 50 |
| 3.4 | Aspectos construtivos do indutor de entrada. | 51 |
| 3.5 | Aspectos construtivos do interruptor S. | 51 |
| 3.6 | Aspectos construtivos do capacitor Ćuk. | 51 |
| 3.7 | Aspectos construtivos diodo D. | 52 |
| 3.8 | Aspectos construtivos do indutor de saída. | 52 |
| 4.1 | Resultados experimentais dos Testes 1,2,3 e 4 | 70 |
| 4.2 | Valores teóricos das situações criadas. | 74 |

Sumário

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Introdução | 25 |
| 1.1 | Introdução | 25 |
| 1.2 | Objetivos | 26 |
| 1.2.1 | Objetivo geral | 26 |
| 1.2.2 | Objetivos específicos | 26 |
| 1.3 | Estrutura do trabalho | 27 |
| 2 | Energia solar fotovoltaica | 29 |
| 2.1 | Principais variáveis climáticas da fotogeração | 29 |
| 2.1.1 | Temperatura (T) | 29 |
| 2.1.2 | Irradiância Solar (S) | 30 |
| 2.1.3 | Massa de AR (AM) | 30 |
| 2.2 | Condições padrões de teste | 31 |
| 2.3 | Características de saída dos Módulos Fotovoltaicos | 32 |
| 2.3.1 | Principais pontos das curvas I-V e P-V | 32 |
| 2.3.2 | Família de Curvas I-V e P-V | 33 |
| 2.4 | Sistemas Fotovoltaicos | 34 |
| 2.4.1 | Sistemas conectados à rede | 35 |
| 2.4.2 | Sistemas isolados | 36 |
| 2.5 | Componentes de sistemas <i>Off-grid</i> | 36 |
| 2.5.1 | Módulos Fotovoltaicos | 37 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 2.5.2 | Banco de Baterias | 37 |
| 2.5.3 | Controlador de Carga | 38 |
| 3 | Circuito Elétrico da Embarcação | 43 |
| 3.1 | Módulo Fotovoltaico | 44 |
| 3.2 | Banco de Baterias | 45 |
| 3.3 | Controlador de Carga | 46 |
| 3.4 | Conversor CC-CC Ćuk | 47 |
| 3.4.1 | Modo de Operação e Formas de Onda | 48 |
| 3.4.2 | Especificações do conversor. | 50 |
| 3.4.3 | Dimensionamento dos componentes. | 50 |
| 3.5 | Rastreamento de máxima potência | 52 |
| 3.5.1 | Algoritmos de Rastreamento | 53 |
| 3.5.2 | Método proposto | 58 |
| 3.6 | Sistema de recarga de baterias | 61 |
| 4 | Resultados experimentais | 63 |
| 4.1 | Construção do Controlador | 63 |
| 4.2 | Resultados em Malha Aberta | 66 |
| 4.3 | Resultados em Malha Fechada | 72 |
| 4.3.1 | Verificação do Rastreamento | 72 |
| 4.3.2 | Sistema de recarga de bateiras | 75 |
| 5 | Conclusão | 77 |
| | Referências bibliográficas | 79 |
| A | Esquemático do Circuito Elétrico do Guarapuvu | 81 |
| B | Projeto do Conversor Cúk | 85 |
| C | Esquemático do controlador de carga | 93 |
| D | Código implementado | 95 |

CAPÍTULO 1

Introdução

1.1 Introdução

A demanda por energia elétrica aumentou gradativamente nos últimos anos, sendo a queima de combustíveis fósseis a principal fonte. Nesse contexto, o carvão se apresenta como o principal material de geração de energia elétrica, além da queima de gasolina e de óleo diesel na área de transporte, movimentando os veículos e gerando uma grande quantidade de poluentes na atmosfera. A solução vem por meio de novas alternativas, utilizando energias limpas e renováveis, produzindo uma quantidade insignificante de poluentes e não contribuindo para o desenvolvimento do aquecimento global.

Pensando no desenvolvimento sustentável, a equipe Vento Sul de barcos solares tem como objetivo desenvolver embarcações movidas exclusivamente por energia solar. Uma fonte de energia econômica e renovável.

A equipe é composta por estudantes da UFSC e coordenada pelo Prof. Dr. Orestes Estevam Alarcon, do Departamento de Engenharia Mecânica. Os integrantes do grupo são voluntários e se dividem em diretorias, coordenadas pelo capitão. Na Universidade Federal de

Santa Catarina – UFSC, a equipe é conhecida pela sua união e profissionalismo. Hoje, é referência nacional na construção de embarcações sustentáveis para participação em competições de ralis náuticos.

O barco “Guarapuvu I”, alvo desse projeto, é o segundo da equipe projetado em 2010 para a competição *Frisian Solar Challenge* na Holanda, sendo conhecido como o barco mais leve, um dos mais inovadores e com o melhor resultado entre os notáveis e participantes não europeus. Hoje o Guarapuvu é penta campeão do Desafio Solar Brasil e está no pódio desde de 2010. Tal competição brasileira é um rali de barcos movidos à energia solar, onde participam equipes de várias regiões do país, vinculadas a diferentes instituições de ensino.

Esse trabalho visa a construção de um controlador de carga para ser utilizado no sistema elétrico do barco Guarapuvu. Desenvolvido pelo INEP- Instituto de Eletrônica de Potência, o controlador utiliza um rastreamento de máxima com base na estimação de temperatura e um conversor Ćuk, tendo em vista um elevado rendimento e baixo custo.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Construção de um controlador de carga com método de rastreamento de máxima potência com base na estimação da temperatura do módulo fotovoltaico em um conversor CC-CC Ćuk para um sistema fotovoltaico isolado, utilizado na embarcação Guarapuvu da equipe Vento Sul braco solares.

1.2.2 Objetivos específicos

- Estudo do circuito e dos módulos fotovoltaicos utilizados no barco;
- Estudo do conversor CC-CC e do método de rastreamento de máxima potência utilizado;
- Implementação prática do projeto. Soldagem e montagem das placas em SMD;
- Elaboração e realização de testes em laboratório;
- Discussão dos resultados obtidos;

1.3 Estrutura do trabalho

Este trabalho foi dividido em introdução, energia solar fotovoltaica, circuito elétrico da embarcação, resultados experimentais e considerações finais. A introdução apresenta o contexto em que o trabalho se enquadra. O capítulo 2 apresenta os conceitos básicos relacionado ao tema energia solar fotovoltaica para entendimento do projeto: módulos fotovoltaicos, banco de baterias, controladores de carga e conversores CC-CC. O capítulo 3 apresenta o sistema onde será a implementação, e o desenvolvimento do projeto proposto. A construção do conversor e os resultados medidos em testes são apresentados no capítulo 4. Por fim, são apresentadas algumas considerações finais no capítulo 5.

Energia solar fotovoltaica

A energia solar fotovoltaica é obtida por meio da conversão da radiação solar diretamente em energia elétrica, mediante o efeito fotovoltaico. As vantagens desse tipo de geração de energia elétrica são: a inexistência de partes móveis, rápida instalação e baixa manutenção, além de ser não poluente, silenciosa e renovável.

Essa conversão ocorre nas células fotovoltaicas, que podem ser produzidas com diversas tecnologias, e são encapsuladas e unidas eletricamente para a formação de um módulo fotovoltaico, dispositivo comercialmente utilizado como gerador de energia elétrica.

2.1 Principais variáveis climáticas da fotogeração

2.1.1 Temperatura (T)

A temperatura T [°C] é um fator determinante na geração fotovoltaica, uma vez que ela tem influência no processo de recombinação ocorrido na célula fotovoltaica devido à ionização térmica dos portadores de carga do material semiconductor. Desta maneira, a temperatura afeta diretamente os níveis de tensão fotogerada.

2.1.2 Irradiância Solar (S)

A energia proveniente do Sol, conhecida como radiação solar, chega à superfície terrestre através de ondas eletromagnéticas que se propagam no espaço. Uma das maneiras de mensurar essa energia é através da irradiância solar. Medida em $[W/m^2]$, ela descreve a potência contida na radiação que incide a cada metro quadrado [1].

De acordo com a Organização Mundial de Meteorologia (OMM), a parte externa da atmosfera está exposta a uma irradiância média de $1366 W/m^2$. Porém, parte dessa energia é perdida até a superfície terrestre devido a efeitos atmosféricos como: difusão, absorção e reflexão (Figura 2.1).

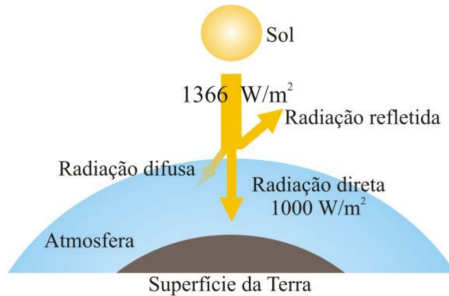


Figura 2.1: Componentes da radiação solar. [1]

Calcula-se que em um dia de céu limpo, ao meio dia, próximo à linha do equador, a irradiância média é de $1000 W/m^2$. Todavia, esse valor não é constante, variando de acordo com a latitude, a inclinação e, principalmente, a nebulosidade [1].

2.1.3 Massa de AR (AM)

A atmosfera terrestre atua como um filtro não linear à radiação solar. Uma das formas de estimar os efeitos dessa filtragem consiste em determinar a espessura da camada de ar no caminho da irradiação.

O índice de Massa de Ar (do inglês: *Air Mass* - AM) quantifica o trajeto da radiação solar através da atmosfera, regularizando em relação ao menor caminho possível, medido a partir do ângulo de zênite, conforme é descrito matematicamente por (2.1) e ilustrado pela Figura

2.2 [1].

$$AM = \frac{1}{\cos(\theta)} \quad (2.1)$$

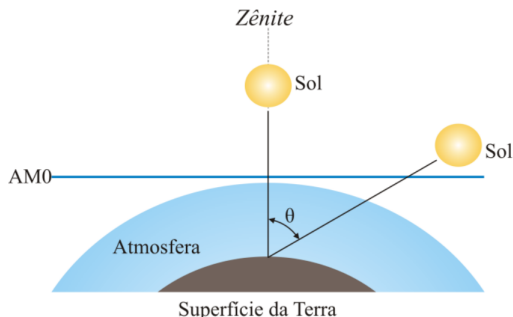


Figura 2.2: Determinação do Índice de Massa de Ar em função do ângulo zenital entre a Terra e o raio solar incidente. [2]

2.2 Condições padrões de teste

As Condições Padrões de Teste (ou *STC* – *Standard Test Conditions*) consistem na uniformização (por parte dos fabricantes de células e módulos fotovoltaicos) dos valores de radiação, temperatura e massa de ar, segundo os quais os ensaios de caracterização são realizados conforme Tabela 2.1. À medida que as medidas *STC* apresentam condições distantes das reais, muitos fabricantes também caracterizam seus geradores em condições climáticas mais próximas das encontradas em campo, mantendo as células sob temperatura nominal (do inglês: *Nominal Operating Cell Temperature* - *NOCT*)(Tabela 2.1) [2].

| | G | T | AM |
|------|--------------|----------|-----------|
| STC | 1000 W/m^2 | 25 °C | 1,5 |
| NOCT | 800 W/m^2 | 43±3 °C | 1,5 |

Tabela 2.1: Condições padrões de teste *STC* e *NOTC*. [2]

2.3 Características de saída dos Módulos Fotovoltaicos

Um módulo fotovoltaico não se comporta como uma fonte elétrica convencional. Visto que não apresenta uma tensão de saída constante em seus terminais. A tensão elétrica depende da sua corrente e vice-versa. O ponto de operação do módulo, ou seja, o valor da tensão e da corrente nos seus terminais, depende da carga. Ao conectar uma carga que demanda muita corrente, a tensão de saída do módulo tenderá a cair. Por outro lado, ao conectar uma carga que demanda pouca corrente, a tensão do módulo será mais elevada, tendendo à tensão de circuito aberto.

Os geradores são sintetizados sob forma de curvas que relacionam a corrente com a tensão (curva I-V) ou a potência com a tensão (curva P-V) reproduzido na Figura 2.3. Independente do módulo fotovoltaico estudado, tais curvas apresentam um formato típico e, por este motivo, são chamadas de curvas características I-V e P-V.

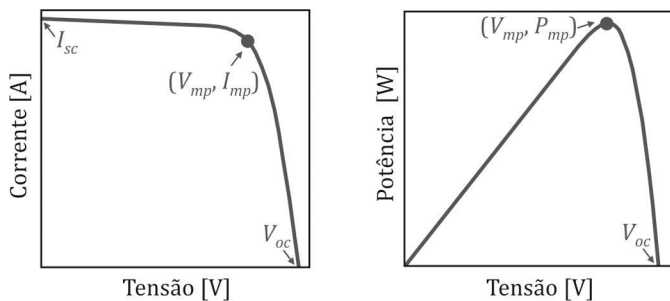


Figura 2.3: Curvas características I-V e P-V. [2]

2.3.1 Principais pontos das curvas I-V e P-V

Existem alguns pontos específicos nas curvas I-V e P-V que normalmente são fornecidos pelo fabricante, como retrata Figura 2.4:

- Tensão de Máxima Potência (do Inglês: *Maximum Power Point Voltage*) - V_{mpp} : é o valor da tensão fotografada quando o gerador fotovoltaico atua no ponto de máxima potência;

- Corrente de Máxima Potência (do Inglês: *Maximum Power Point Current*) - I_{mpp} : é o valor da corrente fotogerada quando o gerador fotovoltaico atua no ponto de máxima potência;
- Potência Máxima (do Inglês: *Maximum Power*) - P_{mpp} : refere-se à máxima potência gerada, calculada pelo produto entre V_{mpp} e I_{mpp} . Quando especificada no STC, a máxima potência é expressa em watt pico (Wp);
- Tensão de Circuito Aberto (do Inglês: *Open Circuit Voltage*) - V_{oc} : é o valor de tensão fotogerada quando os terminais do gerador fotovoltaico são mantidos abertos. Nesta condição, a corrente e a potência são nulas;
- Corrente de Curto Circuito (do Inglês: *Short Circuit Current*) - I_{sc} : é o valor de corrente fotogerada quando os terminais do gerador fotovoltaico são mantidos em curto circuito. Na presente condição, tanto a tensão quanto a potência são nulas.

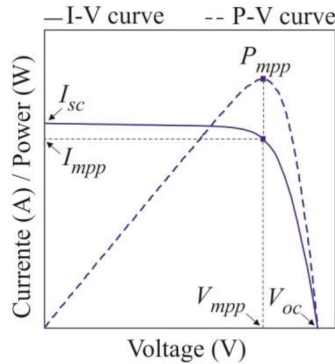


Figura 2.4: Principais pontos as curvas I-V e P-V. [1]

2.3.2 Família de Curvas I-V e P-V

Conforme já mencionado, a potência gerada por módulos fotovoltaicos é significativamente dependente de condições ambientais como irradiância e temperatura, resultando em uma fonte de energia não linear e variante no tempo. Como consequência, a caracterização dos

módulos é descrita não apenas por uma curva, mas por uma família de curvas que expressam diferentes cenários de irradiância e temperatura, tal como consta nos catálogos dos fabricantes retratadas na Figura 2.5.

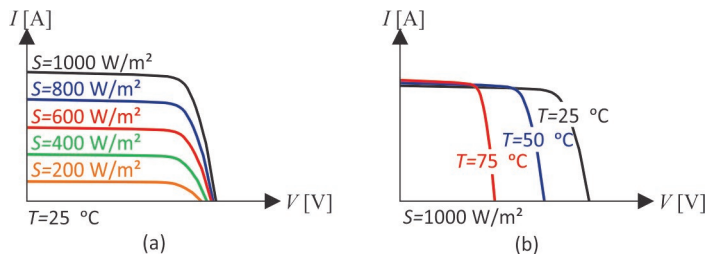


Figura 2.5: Curvas características que relacionam a tensão e a corrente de saída de células fotovoltaicas: (a) sob temperatura constante e irradiância solar variável; (b) sob temperatura variável e irradiância solar constante.

Apesar de ambas (irradiância e temperatura) estarem intimamente interligadas, a influência da irradiância predomina sobre a corrente de saída do módulo fotovoltaico, enquanto a variação da temperatura altera o valor da tensão de saída do módulo [2].

2.4 Sistemas Fotovoltaicos

Conforme demonstrado anteriormente, os geradores de energia fotovoltaica são sensíveis às condições externas de temperatura e irradiância, tendo valor variável de tensão e de corrente nos seus terminais. Sendo assim, seria natural supor que o nicho de aplicação destes geradores fosse restrito a alguns poucos tipos de carga. Entretanto, a atual tecnologia permite processar eletronicamente a energia por meio dos conversores estáticos, adequando-a em forma e amplitude às necessidades da carga.

Em termos de classificação, os sistemas fotovoltaicos podem ser enquadrados em três grandes grupos: sistemas isolados (também chamados de autônomos ou *off-grid*), sistemas conectados à rede elétrica (também denominados por *grid-connected* ou *grid-tied*) e sistemas híbridos, capazes de atuar em ambos os modos anteriores.

2.4.1 Sistemas conectados à rede

Todo sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica de energia é considerado *On-grid*. Esse tipo de sistema é caracterizado por não necessitar de um banco de baterias como elemento de armazenamento, pois a própria rede elétrica pode absorver e complementar a energia requisitada pela demanda. Neste caso o processamento de energia é feito a partir de conversores CC-CA conhecidos como inversores, os quais convertem tensões (ou correntes) contínuas de entrada em tensões (ou correntes) alternadas de saída.

No Brasil, os Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFCR) foram incluídos na regulamentação disposta pela Aneel, por meio da Resolução 482 de abril de 2012, que estabeleceu preliminarmente as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica [3]. A Figura 2.6 mostra o esquema de um SFCR.



Figura 2.6: Sistema fotovoltaico conectado à rede. [3]

2.4.2 Sistemas isolados

O sistema fotovoltaico que opera desconectado da rede elétrica da concessionária de energia é dito isolado ou *off-grid*. Tais sistemas são usualmente empregados para energizar cargas instaladas em localidades sem cobertura da concessionária local, como por exemplo: a embarcação Guarapuvu, alvo desse projeto.

A ausência da rede torna os sistemas fotovoltaicos isolados vulneráveis às condições climáticas, pois durante os intervalos sem incidência de radiação solar (períodos noturnos ou com nebulosidade), a geração é interrompida. Neste cenário, como forma de manter a carga suprida, bancos de baterias (acumuladores) são utilizados como dispositivos de *backup*, garantindo a autonomia e a disponibilidade de energia mesmo na ausência de sol.

Para conseguir uma boa adaptação entre as características do acumulador e do gerador fotovoltaico, aumentando o rendimento do conjunto e prolongando a vida útil do primeiro, deve-se instalar um controlador de carga que evite carga e descarga excessivas no acumulador [3]. A Figura 2.7 mostra o esquema de um sistema *Off-grid*.

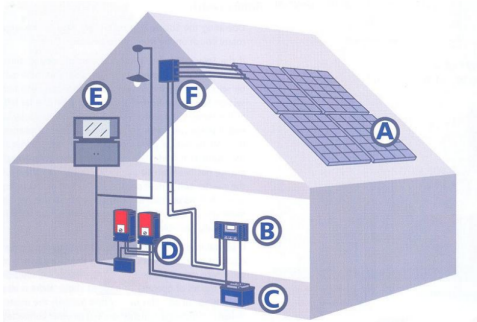


Figura 2.7: Sistema fotovoltaico isolado domiciliar: A-painel fotovoltaico; B-controlador de carga; C-banco de baterias; D-inversores; E-cargas CA; F-caixa de conexão. [3]

2.5 Componentes de sistemas *Off-grid*

O sistema *Off-grid*, por ser um sistema autônomo, pode ser construído em diferentes maneiras dependendo da carga conectada. Em

cargas que demandam um valor de tensão (ou corrente) alternado, é indispensável a utilização de um inversor, para converter a tensão contínua das baterias em tensão alternada. Diferente disso, neste projeto, a embarcação Guarapuvu utiliza somente cargas que demandam valores de tensão (ou corrente) contínuas. Dessa forma, a presença do inversor não é necessária, sendo necessário somente o módulo fotovoltaico, o banco de baterias e o controlador de carga.

2.5.1 Módulos Fotovoltaicos

Os módulos fotovoltaicos são responsáveis por transformar a energia contida na radiação solar em energia elétrica. Atualmente, as tecnologias fotovoltaicas podem ser divididas em três categorias. A primeira delas é composta pelas células fabricadas em silício policristalino (p-Si) e silício monocristalino (m-Si). São consideradas confiáveis e apresentam o maior rendimento comercialmente disponível. Outra categoria se destaca por células de silício amorfo e outros materiais como CdTe e CIGS, que utilizam camadas mais finas, por isso chamados de “filmes-finos”. A terceira categoria é composta por células fotovoltaicas de células orgânicas, materiais abundantes e não tóxicos. Contudo, estes ainda possuem custos mais elevados e baixa expectativa de vida útil quando comparados a outras tecnologias [3].

2.5.2 Banco de Baterias

Os acumuladores têm como principal função o armazenamento da energia gerada do sistema, fornecendo a energia necessária para a carga quando os módulos fotovoltaicos não fornecem o necessário. Os acumuladores de energia, mais conhecido por baterias, são dispositivos que convertem a energia química contida em seus materiais ativos, diretamente em energia elétrica, por meio de uma reação eletroquímica de oxidação e redução [9].

Escolher corretamente o tipo, o tamanho e as características do acumulador influencia diretamente na eficiência e durabilidade do sistema. Atualmente existem vários tipos de baterias, cada tipo com suas vantagens e limitações. Dentre elas, as mais utilizadas em sistemas fotovoltaicos são as baterias de chumbo estacionárias e as de lítio [9].

A bateria de chumbo-ácido é considerada ainda hoje a mais viável de

utilização por ser uma tecnologia conhecida e dominada, apresentando uma boa relação entre rendimento, custo e vida útil, além da disponibilidade. Dentre as diferentes formas construtivas desta bateria, a que se destaca é a bateria de chumbo estacionária.

Diferentemente da convencional bateria de arranque (automotivas), as baterias estacionárias (auxiliar dos sistemas de alimentação ininterrupta) são projetadas para ciclos de descargas profundos e possuem materiais internos mais nobres e placas de chumbo mais espessas, feitos para durarem muito mais tempo. Elas podem custar até o dobro do preço de uma bateria automotiva convencional de mesma capacidade (Ah ou Amperes-Hora) mas, a médio e longo prazo a estacionária sem dúvida se mostra a melhor opção.

Uma tecnologia alternativa que está tendo um rápido crescimento são as baterias de íons de Lítio. As baterias Li-Ion são uma categoria ampla que contém muitas químicas diferentes. Tipicamente, essas baterias oferecem a maior densidade de energia e o menor peso. Algumas células de Li-Ion têm uma corrente de descarga dezenas de vezes maior que sua capacidade nominal. A grande desvantagem das baterias de Li-Ion é a necessidade do uso de circuitos de proteção para carga e descarga e elevado preço no mercado [9].

2.5.3 Controlador de Carga

Os controladores de carga são dispositivos eletrônicos que têm a função de gerenciar tanto a energia gerada pelos módulos fotovoltaicos quanto a consumida pela carga para garantir que o processo de carga e descarga das baterias aconteça de forma eficiente e segura. Tipicamente, um controlador de carga apresenta uma entrada, para conexão do arranjo fotovoltaico e duas saídas, para conexão do banco de baterias e da carga a ser alimentada. Tanto a entrada quanto as saídas podem ser desligadas de forma automática, por meio de relés, independentemente umas das outras, para assegurar que o banco de baterias não seja submetido a subtensões ou sobretensões. Controladores de carga estão disponíveis no mercado em diferentes tamanhos, formas, preços e podem ser agrupados em três categorias: *on/off*, PWM e MPPT, tal como é ilustrado na Figura 2.8 e descrito a seguir.

- Controladores de carga com modulação *on/off*: são os mais básicos e baratos controladores, para maior parte das aplicações



Figura 2.8: Exemplo de controladores de carga. Da esquerda para a direita: *on/off*, PWM e MPPT.

são considerados ultrapassados. Estes dispositivos essencialmente conectam ou desconectam o arranjo fotovoltaico diretamente ao banco de baterias: o arranjo é desconectado sempre que a tensão do banco de baterias alcança seu valor máximo e volta a ser conectado quando a tensão decai abaixo de seu valor mínimo.

- Controladores de carga com modulação PWM: apesar de básicos, são mais caros e eficientes que os controladores de carga *on/off*. Estes dispositivos também conectam ou desconectam o arranjo fotovoltaico diretamente ao banco de baterias. Neste caso, realizam sua função com frequência e razão cíclica variáveis. Tais dispositivos possibilitam melhor controle sobre o estado de carga da bateria e necessitam de menor dissipação de calor.
- Controladores de carga com MPPT: diferentemente dos anteriores, estes dispositivos são constituídos por um conversor cc-cc que pode operar como rastreador do ponto de máxima potência, além de realizar o controle de carga da bateria. Controladores de carga com MPPT apresentam melhor aproveitamento da energia proveniente do módulo fotovoltaico, aumentando o rendimento do sistema, pois impõem ao módulo a tensão ótima de operação. Em contrapartida, seu melhor desempenho está atrelado à maior complexidade, implicando custo superior aos demais tipos de dispositivos.

2.5.3.1 Conversores CC-CC

Todo controlador de carga com MPPT é elaborado exclusivamente por um conversor CC-CC. Tal conversor pode ser conceituado como um sistema, formado por semicondutores de potência operando como interruptores, e por elementos passivos (normalmente indutores e capacitores) que tem por função controlar o fluxo de energia da fonte de entrada E_1 para fonte de saída E_2 conforme representado na Figura 2.9 [4].

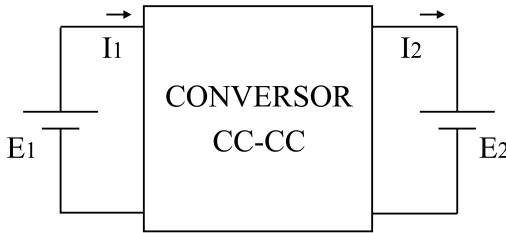


Figura 2.9: Representação simplificada de um conversor CC-CC. [4]

Em um sistema fotovoltaico isolado, a fonte de energia E_1 é caracterizada pelo módulo fotovoltaico e a saída E_2 é caracterizada pelo banco de baterias. Num conversor ideal, as perdas internas são nulas e a potência entregue à carga é igual à potência cedida pela fonte E_1 , valendo as expressões (2.2), (2.3) e (2.4).

$$P_1 = E_1 I_1 \quad (2.2)$$

$$P_2 = E_2 I_2 \quad (2.3)$$

$$E_1 I_1 = E_2 I_2 \quad (2.4)$$

Qualquer conversor CC-CC apresenta um ganho estático que é definido pela razão da tensão de saída com a tensão de entrada (expressão (2.5)) [4]. Para $G < 1$, o conversor é dito abaixador. Para $G > 1$, o conversor é dito elevador.

$$G = E_2/E_1 \quad (2.5)$$

Os conversores CC podem ser divididos em duas categorias: os conversores isolados e os conversores não isolados. No projeto do controlador de carga, devido a utilização de baixa tensão segundo a norma de segurança, não é necessário a utilização de isolamento galvânico.

Na prática, o rendimento de um conversor CC-CC não isolado pode variar entre 70% e 98%, dependendo das potências, correntes, tensões, frequências de chaveamento e das tecnologias empregadas [4].

O número de conversores CC-CC não isolados é muito grande. Dentre eles, os mais populares (buck, boost, buck-boost, Ćuk, SEPIC e zeta) estão representados na Figura 2.10. Cada topologia se difere em suas principais características como: ganho estático, reversibilidade, acumulação de energia e característica de entrada e de saída. A Tabela 2.2 apresenta o ganho estático característico em função da razão cíclica D , dos conversores cc-cc (buck, boost, buck-boost, Ćuk, SEPIC e zeta), considerando apenas os mesmos operando no modo de condução contínua (MCC).

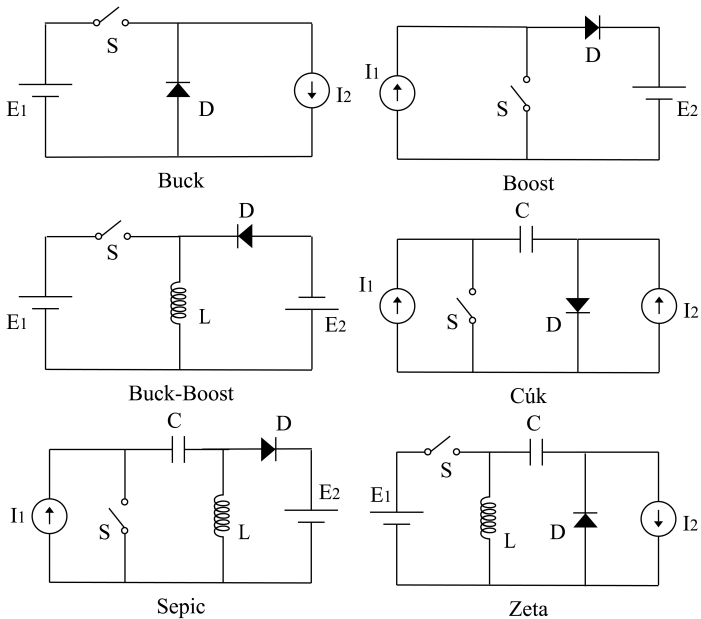


Figura 2.10: Topologias dos seis conversores CC-CC básicos não isolados. [4]

| Conversor cc-cc de potência | Ganho estático |
|------------------------------------|-----------------------|
| Buck | $G = D$ |
| Boost | $G = \frac{1}{(1-D)}$ |
| Buck-boost, Ćuk, SEPIC e zeta | $G = \frac{D}{(1-D)}$ |

Tabela 2.2: Ganho estático para alguns conversores cc-cc em MCC. [8]

Circuito Elétrico da Embarcação

Do ponto de vista de engenharia, a única fonte energética do Guarapuvu I é a energia solar fotovoltaica, O sistema de geração de energia solar é um sistema isolado, também chamado de *offgrid*, pois emprega dispositivos que utilizam acumuladores de energia (baterias) para a manutenção do sistema que não está conectado à rede elétrica. A energia elétrica gerada é armazenada em baterias e pode ser utilizada em períodos em que não há geração de energia.

Basicamente, o sistema elétrico do Guarapuvu I é constituído por módulos fotovoltaicos, por um controlador de carga conectado a cada módulo, responsável pela conversão de tensão e processamento de energia, por baterias, encarregadas pelo armazenamento de energia e, por fim, pelo motor que converte a energia elétrica em energia mecânica. Além disso para o bom funcionamento do circuito, a embarcação também utiliza de mecanismos de segurança com fusíveis e disjuntores; e controle do sistema com relês e controladores de operação. O circuito completo está em apresentado no Apêndice A.

Em questão de equipamentos, o Guarapuvu I apresenta as melhores tecnologias utilizadas nas competições, sendo um monocasco em fibra de carbono, um motor elétrico pancake de 1500 *watts*, baterias *LiFePo4*

e 4 módulos fotovoltaicos, conforme Figura 3.1

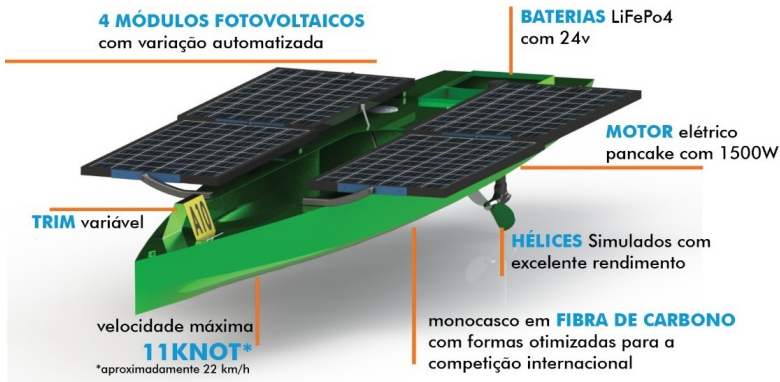


Figura 3.1: Equipamentos da embarcação Guarapuvu I. [5]

3.1 Módulo Fotovoltaico

O módulo fotovoltaico utilizado na embarcação é o **KC200GT** da *Kyocera*. Apresenta 54 células de silício policristalino (p-Si). Suas especificações no STC (*Standart Test Conditions* - Condições padrões de teste) e NOCT (*Nominal Operating Cell Temperature* - Temperatura nominal de operação da Célula) e são apresentadas na Tabela 3.1.

| | Pmax | Vmp | Imp | Voc | Isc |
|------|-------------|------------|------------|------------|------------|
| STC | 200 W | 26,3 V | 7,61 A | 32,9 V | 8,21 V |
| NOCT | 142 W | 23,2 V | 6,13 A | 29,9 V | 6,62 A |

Tabela 3.1: Especificações do módulo KC200GT. [6]

As Figura 3.2 retiradas do próprio *datasheet* do fabricante [6], mostram as curvas I-V do módulo mostrando a influência da temperatura e da irradiância solar na geração fotovoltaica.

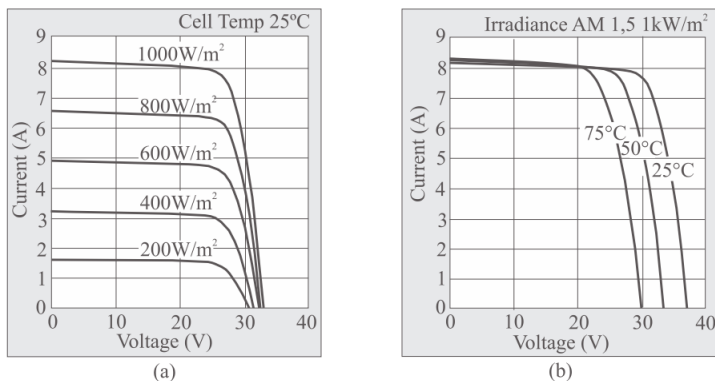


Figura 3.2: Curva I-V referente ao módulo Kyocera KC200GT: (a) sob temperatura constante e (b) sob radiação solar constante. [6]

3.2 Banco de Baterias

Mesmo projetado para operar com baterias de lítio devido sua melhor eficiência e menor peso, atualmente o Guarapuvu utiliza um banco de 2 baterias de chumbo estacionária **Freedom DF1000**, utilizadas em série com tensão de 24 V, totalizando uma carga de 60 Ah/hora.

A Figura 3.3 retirada do *datasheet* da bateria [6], mostra as curvas características de descarga das baterias estacionárias *Freedom* em diferentes valores de corrente. Além disso, a Tabela 3.2 especifica a tensão específica de carga e flutuação, as quais são essenciais para alcançar a vida útil e capacidade projetada da bateria.

| | Tensão Mínima | Tensão Máxima |
|--------------------------------|---------------|---------------|
| Tensão de flutuação | 13,2 V | 13,8 V |
| Tensão de equalização de carga | 14,4 V | 15,5 V |

Tabela 3.2: Instruções de carga DF1000 a 25 °C. [7]

Se as tensões de carga e de flutuação forem muito altas ocorrerá crescimento acelerado e corrosão da placa, reduzindo a vida útil da bateria. Se as tensões de carga ou flutuação forem muito baixas, a bateria não será mantida a plena carga, isto causará sulfatação das

placas resultando na degradação da capacidade e redução da vida útil.

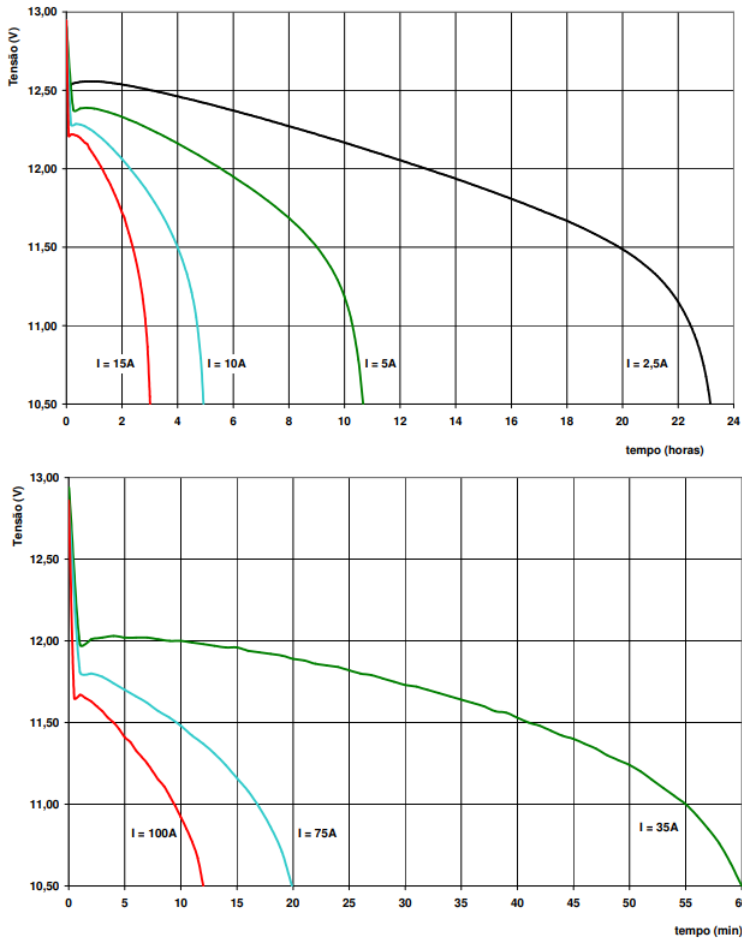


Figura 3.3: Curva de Descarga - Corrente Constante DF1000. [7]

3.3 Controlador de Carga

Neste projeto partiu-se em busca de uma solução simples, de elevado rendimento e baixo custo. Para conversão de tensão e processamento de energia de cada módulo fotovoltaico individualmente. O controlador de

carga desenvolvido nesse projeto emprega a topologia de um conversor Ćuk para a conversão da tensão.

O conversor Ćuk foi escolhido por ser um conversor abaixador-elevador. Dado que a tensão do módulo e das baterias são próximas, podendo ser uma maior que a outra. Além disso o conversor Ćuk apresenta entrada e saída com características de fonte de corrente, importante para a manutenção da vida útil da bateria e dos módulos.

Tendo em vista um maior rendimento, foram construídos quatro controladores com rastreamento de máxima potência, um para cada módulo fotovoltaico utilizado no barco, fazendo que cada módulo opere em sua potência máxima, evitando perdas por *Mismatch*, também chamado de incompatibilidade ou descasamento entre as quantidades de energia geradas, por dois ou mais módulos dentro de um arranjo fotovoltaico.

3.4 Conversor CC-CC Ćuk

O conversor Ćuk, ilustrado na Figura 3.4, é uma associação de um conversor Boost com um conversor Buck; pois ele apresenta uma entrada com características de fonte de corrente enviando energia a um capacitor (característica de fonte de tensão) e, em seguida, tem-se o capacitor transferindo energia para uma carga com característica de fonte de corrente. O conversor apresenta uma tensão de saída com polaridade invertida em relação ao terminal comum da fonte de tensão de entrada [4].

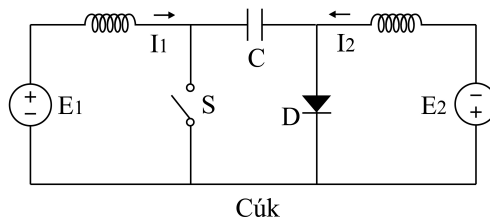


Figura 3.4: Conversor a acumulação capacitiva (Conversor Ćuk). [4]

3.4.1 Modo de Operação e Formas de Onda

O conversor Cúk em modo de condução contínua [MCC] apresenta em regime permanente duas etapas de operação representadas na Figura 3.5.

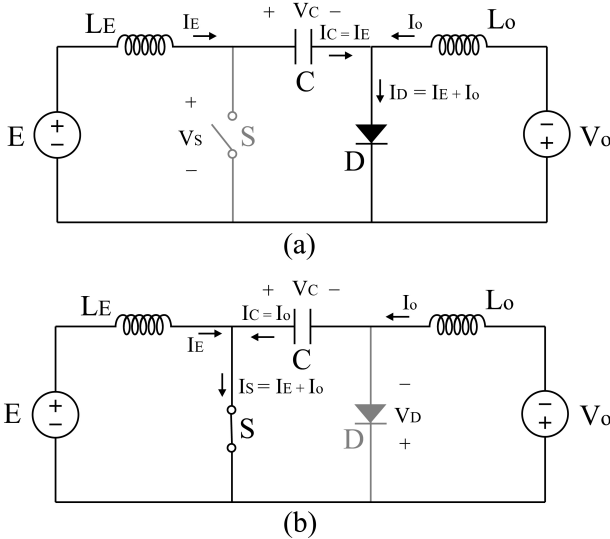


Figura 3.5: Etapas de operação do conversor Cúk. [4]

Na primeira etapa de operação o interruptor S permanece aberto e o diodo D permanece conduzindo. Dessa forma as correntes I_E e I_o circulam pelo diodo D . Durante esta etapa o capacitor C é carregado pela energia proveniente da entrada E e do indutor L_E . A corrente I_E decresce devido à tensão V_C ser maior que E . A energia armazenada em L_o é transferida para a fonte V_o ; portanto a corrente I_o também decresce, conforme ilustra a Figura 3.5 (a)

Na segunda etapa da condução o interruptor S permanece fechado e o diodo D permanece bloqueado. Dessa forma as correntes I_E e I_o circulam agora pelo interruptor S . Durante esta etapa o capacitor C é descarregado, transferindo sua energia para fonte V_o e para o indutor L_o . Neste caso a corrente I_o cresce. A fonte de entrada E alimenta o indutor L_E causando o crescimento de I_E , conforme ilustra a Figura 3.5 (b)

As principais formas de onda para a condição de regime permanente estão apresentadas na Figura 3.6, onde:

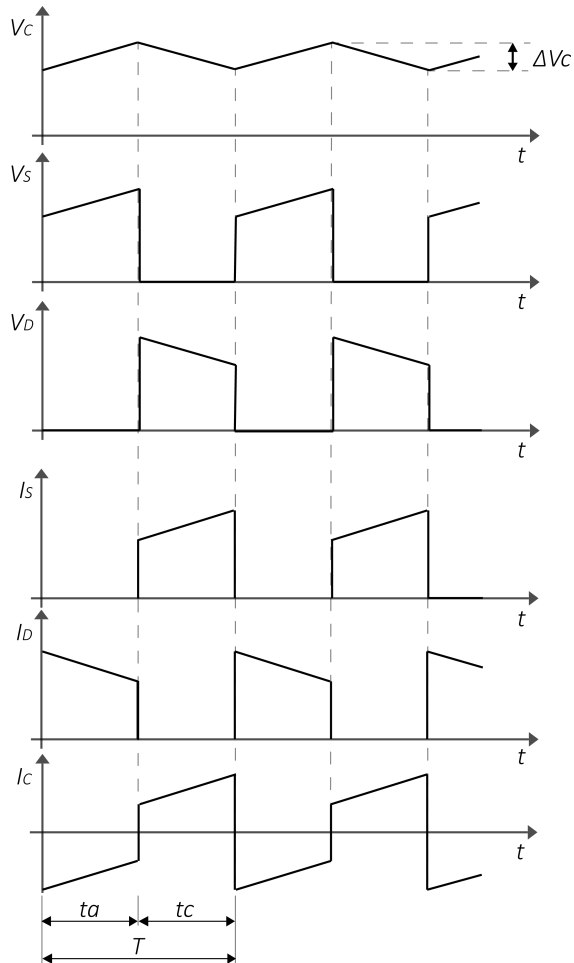


Figura 3.6: Principais formas de onda do conversor Ćuk. Onde V_c tensão no capacitor, V_s tensão no interruptor, V_D tensão no diodo, I_s corrente no interruptor, I_D corrente no diodo e I_c corrente no capacitor. [4]

- $ta \rightarrow$ tempo em que o interruptor S permanece aberta.
- $tc \rightarrow$ tempo em que o interruptor S permanece conduzindo.

- $T = tc + ta = 1/f \rightarrow$ período de chaveamento.

3.4.2 Especificações do conversor.

As especificações do conversor foram definidas a partir dos módulos fotovoltaicos e da bateria existente na embarcação. Logo, o rastreamento de máxima potência deverá ocorrer para tensão entre 25 - 35 V e o sistema de recarga operará para tensão entre 25 e 29 V. Tais especificações, são apresentadas na Tabela 3.3.

| | | |
|---|-----------------|-----------|
| Tensão de entrada | V_i | 20 - 35 V |
| Tensão de Saída | V_o | 22 - 29 V |
| Potência máxima | P_o | 250 W |
| Frequência de Comutação | f_s | 50 kHz |
| Ondulação de corrente no indutor de saída | ΔI_{Lo} | 10 % |
| Ondulação de corrente no indutor de entrada | ΔI_{LE} | 20 % |

Tabela 3.3: Especificações do conversor Ćuk.

3.4.3 Dimensionamento dos componentes.

Após as especificações apresentadas é possível dimensionar os componentes necessários para a construção de um protótipo. O Apêndice B traz o cálculo completo realizado pelo Eng^o, Thiago Perreira. Assim, nesta seção será relatado apenas os valores e resultados mais importantes obtidos.

3.4.3.1 Indutor de entrada

O indutor de entrada foi projetado de acordo com [10], A Tabela 3.4 traz as informações mais relevantes deste componente.

| | |
|------------------------|-------------|
| Indutância | 235 μ H |
| Núcleo | APH33P60 |
| Numero de espiras | 62 |
| Condutores em paralelo | 5 |
| Condutor utilizado | AWG 24 |

Tabela 3.4: Aspectos construtivos do indutor de entrada.

3.4.3.2 Interruptor S

A Tabela 3.5 apresenta os valores máximos dos esforços de tensão e de corrente do interruptor S por simulação, que resultaram na escolha do MOSFET STW75NF20 (200 V, 75 A).

| | |
|--------------------------|--------|
| Valor médio da corrente | 12.5 A |
| Valor eficaz da corrente | 16.7 A |
| Valor máximo da tensão | 85 V |

Tabela 3.5: Aspectos construtivos do interruptor S .

3.4.3.3 Capacitor Ćuk

Mediante a ondulação de tensão e as demais especificações, o capacitor de saída deve atender as restrições dos valores obtidos em simulação (Tabela 3.6) .

| | |
|------------------------|--------------|
| Capacitância | 2,86 μ F |
| Tensão máxima | 85 V |
| Corrente eficaz máxima | 11,7 A |

Tabela 3.6: Aspectos construtivos do capacitor Ćuk.

Durante a implementação, optou-se por utilizar três capacitores em paralelo: um capacitor de filme 2,2 μ F (275 V) e 2 Capacitores cerâmicos de 0,33 μ F (250 V).

3.4.3.4 Diodo D

A Tabela 3.7 apresenta os valores máximos dos esforços de tensão e de corrente no Diodo D por simulação, que resultaram na escolha do componente VS-60EPU02 (200 V, 60 A).

| | |
|-------------------------------|--------|
| Valor médio da corrente | 12,5 A |
| Valor eficaz da corrente | 16,1 A |
| Valor máximo da Tensão Máxima | 85 V |

Tabela 3.7: Aspectos construtivos diodo D.

3.4.3.5 Indutor de saída

O indutor de saída foi projetado de acordo com [10]. A Tabela 3.8 traz as informações mais relevantes deste componente.

| | |
|------------------------|-------------|
| Indutância | 315 μ H |
| Núcleo | APH33P60 |
| Numero de espiras | 71 |
| Condutores em paralelo | 7 |
| Condutor utilizado | AWG 24 |

Tabela 3.8: Aspectos construtivos do indutor de saída.

3.5 Rastreamento de máxima potência

Tento em vista que em um módulo fotovoltaico, a tensão e a corrente de saída oscilam em função da irradiância solar e da temperatura, torna-se impossível assegurar a operação do sistema em um ponto específico, sem que nenhum método ativo de busca seja dinamicamente imposto [2].

O método ativo de busca conhecido como rastreador de máxima potência, tem como objetivo que, independente das condições na qual o módulo se encontra, ele sempre opere no ponto específico de tensão e de corrente, onde o sistema forneça a maior potência possível.

Tradicionalmente, um sistema de rastreamento pode ser dividido em duas partes: um algoritmo de rastreamento, que a partir de dados do sistema calcula qual é o melhor ponto de operação para os módulos; e um estágio de potência, responsável por fazer com que o arranjo opere no ponto definido pelo algoritmo. A Figura 3.7 ilustra o exposto [2].

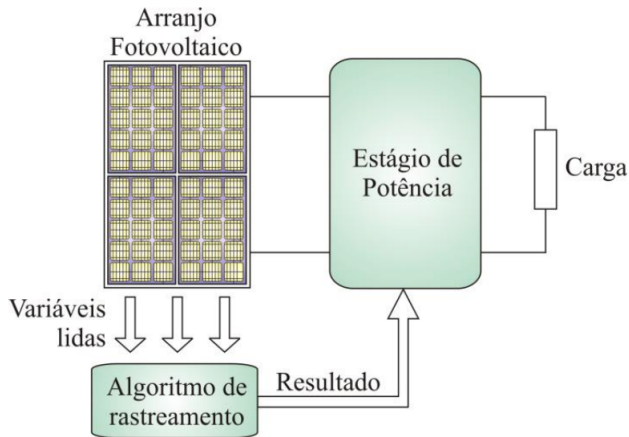


Figura 3.7: Sistema típico de rastreamento de máxima potência. [2]

3.5.1 Algoritmos de Rastreamento

Na literatura, existem diversas sugestões de métodos e técnicas de algoritmos que, de forma analógica ou digital, quando associados adequadamente a um conversor, podem levar o módulo fotovoltaico a operar no ponto de máxima potência [8]. Nessa seção serão apresentados os principais algoritmos.

3.5.1.1 Método da tensão Constante

Este método baseia-se na imposição de um valor fixo de tensão para os terminais de saída do módulo PV. Como o módulo tem baixa variação de tensão com a mudança de irradiância solar e alta variação com a temperatura. Esse método torna-se eficaz para diferentes níveis de irradiância, todavia torna-se sensível a mudança de temperatura.

A Figura 3.8 ilustra a característica de operação do algoritmo, onde

a linha tracejada conecta os pontos reais de máxima potência, enquanto a linha contínua representa o valor de tensão fixada V_{ref} .

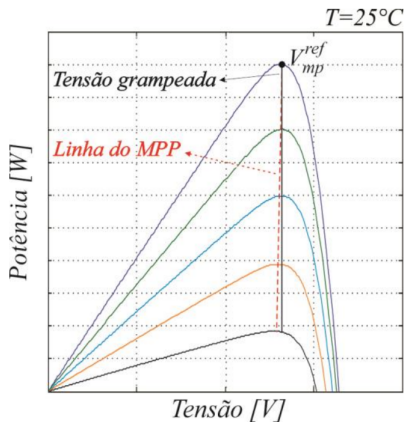


Figura 3.8: Característica da curva I-V para o método de tensão constante. [1]

Por necessitar de um apenas um sensor de tensão, este método torna-se bastante simples e barato, porém, o algoritmo possui uma grande falha de rastreamento para condições em que a temperatura do módulo varie, ou seja, para qualquer deslocamento de V_{mpp} no plano P-V, o método não opera no MPP. [8]

3.5.1.2 Método de Perturba e Observa

O Perturba e Observa (*P&O*) é um dos algoritmos de MPPT mais difundidos, no qual a resposta de rastreamento independe das condições ambientais, entretanto, sua implementação necessita do uso de pelo menos um sensor de tensão e um sensor de corrente, implicando em maior custo e maior complexidade no algoritmo [1].

O método funciona a partir de uma perturbação na razão cíclica do conversor e no cálculo da potência PV. Basicamente, é sempre calculada a potência PV após a perturbação, caso a mesma tenha aumentado, a perturbação anteriormente aplicada é repetida no mesmo sentido, caso contrário, seu sentido é invertido.

A principal desvantagem desse método é a dinâmica de rastreamento

mais lenta devido à amplitude das perturbações, tornando incapaz de operar adequadamente em mudanças rápidas de radiação solar. Além disso, devido as perturbações, o sistema tem oscilações mesmo em regime permanente, conforme evidencia a Figura 3.9.

Vale salientar que, de acordo com a Figura 3.9, o valor do passo interfere diretamente na qualidade do rastreamento. Um passo reduzido representado em (a) e (b), faz que haja uma menor variação de tensão do modulo em regime permanente, porém torna-se mais lento o rastreamento. Já com passos mais elevados representado em (c) e (d), a variação em regime permanente aumenta, porém o rastreamento torna-se mais rápido.

Uma possível correção para os problemas apresentados por esse algoritmo seria a utilização de um passo de cálculo variável, ou seja, aplicar grandes variações na razão cíclica enquanto a tensão está distante de V_{mpp} e baixos valores quando esta se aproxima da operação em regime permanente. Porém, como se pode concluir até mesmo intuitivamente, este tipo de solução apresenta alto grau de complexidade e necessita do uso de microprocessadores com bom desempenho numérico [8].

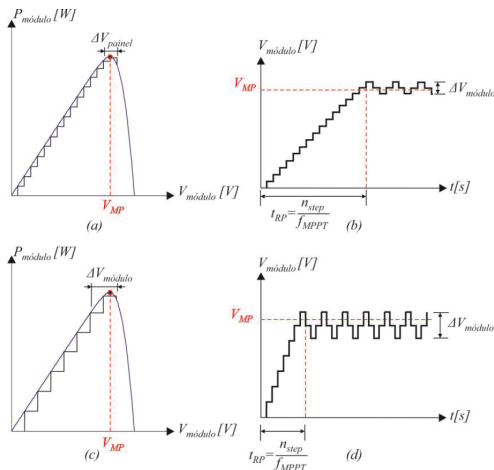


Figura 3.9: Comparação entre o rastreamento de máxima potência para diferentes valores do passo ΔD : (a) e (b) Passo reduzido; (c) e (d) Passo elevado. [1]

3.5.1.3 Método Condutância Incremental

O método da condutância Incremental (CondInc) utiliza uma abordagem parecida com a do método $P\&O$, mas ao invés de somente calcular a potência PV, o método CondInc utiliza as medidas de tensão V_{PV} e corrente I_{PV} para medir a sua derivada dP_{PV}/dV_{PV} , conforme equação (3.1) [8]. Dessa forma, segundo mostra a Figura 3.10, a operação lógica do algoritmo é dada por:

- se $dP_{PV}/dV_{PV} > 0$ (esquerda do MPP), a razão cíclica é alterada a fim de elevar a tensão do módulo fotovoltaico;
- se $dP_{PV}/dV_{PV} < 0$ (direita do MPP), a razão cíclica definida para diminuir a tensão de saída do sistema;
- se $dP_{PV}/dV_{PV} = 0$, a razão cíclica é mantida inalterada.

$$\frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} = I_{PV}(n) + V_{PV}(n) \frac{I_{PV}(n-1) - I_{PV}(n)}{V_{PV}(n-1) - V_{PV}(n)} \quad (3.1)$$

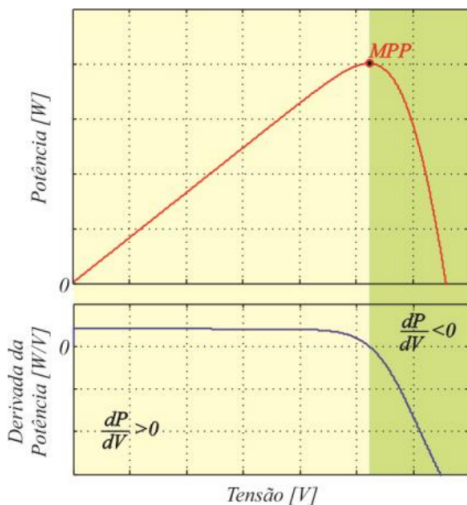


Figura 3.10: Curva da potência e derivada da potência em relação à tensão para um módulo fotovoltaico. [1]

3.5.1.4 Método de Rastreamento Baseada na Medição de Temperatura

O método de rastreamento do ponto de máxima potência baseado na medição da temperatura, nomeado MPPT-temp [1], consiste em uma variação do método da Tensão Constante, desenvolvido a partir da observação de que a tensão para a qual tal módulo opera no MPP é proporcional à temperatura em sua superfície [8].

A partir da equação de correção (3.2) do módulo fotovoltaico, onde se pode notar que a tensão em que a máxima potência é estabelecida depende exclusivamente da temperatura do módulo PV e dos parâmetros do módulo utilizado.

$$V_{mpp} = V_{mpp}^{STC} + (T - T^{STC})\mu_V \quad (3.2)$$

Dessa forma, o rastreamento MPPT-temp tem um algoritmo muito simples. Conforme a Figura 3.11, a operação tem como entrada: a temperatura T medida nos módulos fotovoltaicos, e a tensão da carga V_o , obtidos a partir de um sensor de temperatura e de tensão, respectivamente.

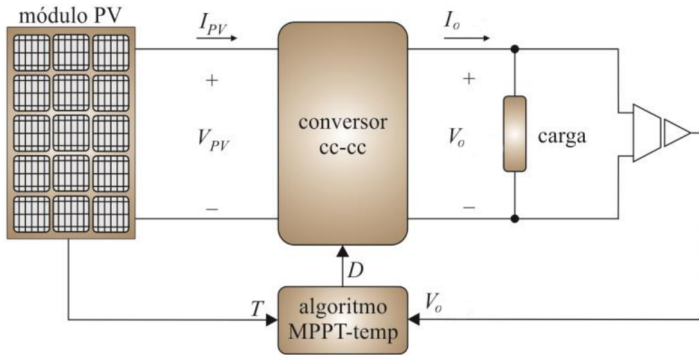


Figura 3.11: Configuração do método MPPT-temp. [1]

A saída da operação é o ganho estático do conversor cc-cc G_{mpp} , a partir da equação 3.3. Após definido o conversor utilizado, pode-se determinar a razão cíclica de operação.

$$G_{mpp} = \frac{V_o}{V_{mpp}^{STC} + (T - T^{STC})\mu_V} \quad (3.3)$$

Dessa forma, pode-se observar que o algoritmo não necessita de qualquer requisito computacional refinado, pois não utiliza procedimentos recursivos. Devido à lentidão da dinâmica associada à temperatura, o rastreamento é suave, estável e ocorre em tempo real, ou seja, o tempo necessário para o microprocessador processar os dados, para qualquer combinação de irradiância e temperatura. Porém, tendo em vista a necessidade da medição da temperatura de superfície de cada módulo, o método torna-se inviável em grandes arranjos fotovoltaicos.

3.5.2 Método proposto

O algoritmo de rastreamento utilizado neste projeto é um método inovador e consiste numa variação do método MPPT-temp. O Método de Rastreamento Baseado na estimação da Temperatura tem como objetivo eliminar qualquer tipo de sensoriamento, com exceção de simples divisores resistivos, no módulo fotovoltaico, para reduzir o custo de implementação do MPPT-temp, sem interferir nas suas características de precisão, facilidade de implementação e qualidade de rastreamento [8].

Este novo algoritmo baseia-se no fato de que a temperatura de superfície do módulo fotovoltaico pode ser estimada a partir da tensão de circuito aberto V_{oc} , medida nos terminais do mesmo. Conforme a equação de tensão de máxima potência do módulo fotovoltaico (3.4), e equação de tensão de circuito aberto (3.5) [8].

$$V_{mpp} = V_{mpp}^{STC} + (T - T^{STC})\mu_V \quad (3.4)$$

$$V_{oc} = V_{oc}^{STC} + (T - T^{STC})\mu_{oc} \quad (3.5)$$

Onde:

- V_{mpp} → Tensão de máxima potência do módulo PV;
- V_{mpp}^{STC} → Tensão de máxima potência do módulo PV na STC;
- μ_V → Coeficiente térmico da V_{mpp} .
- V_{oc} → Tensão de circuito aberto do módulo PV;
- V_{oc}^{STC} → Tensão de circuito aberto do módulo PV na STC;
- μ_{oc} → Coeficiente térmico da V_{oc} .

Isolando-se $(T - T^{STC})$ de (3.4) e substituindo em (3.5), tem-se:

$$V_{mpp} = V_{mpp}^{STC} + (V_{oc} - V_{oc}^{STC}) \frac{\mu_V}{\mu_{oc}} \quad (3.6)$$

Pode-se notar que (3.6) comprova que a temperatura da superfície pode ser estimada a partir da tensão de circuito aberto medida no módulo PV.

Considerando que neste trabalho esta sendo empregado um conversor cc-cc Ćuk, com ganho estático $D/(1 - D)$, onde a saída é tensão da bateria V_o e a entrada é a tensão do módulo operando em máxima potencia V_{mpp} , conforme a Tabela 2.2, a operação da razão cíclica é dada por (3.7).

$$D = \frac{V_o}{V_{mpp} + V_o} \quad (3.7)$$

Uma vez que, V_{mpp}^{STC} , T^{STC} e μ_V são parâmetros fornecidos pelo fabricante do módulo PV, a razão cíclica depende apenas da tensão de saída e da tensão de entrada do módulo, conforme (3.8).

$$D = \frac{V_o}{V_o + \left[V_{mpp}^{STC} + (V_{oc} - V_{oc}^{STC}) \frac{\mu_V}{\mu_{oc}} \right]} \quad (3.8)$$

Dessa maneira, diferentemente do método MPP-temp, neste método pode-se substituir o sensor de temperatura, por um simples divisor resistivo. Elimina-se, assim, também o cabo que conecta o sensor, instalado no módulo PV, ao conversor, obtendo-se, desta maneira, uma redução no custo e praticidade na implementação do sistema.

A partir do método pressuposto, o rastreamento foi realizado conforme a Figura 3.12. O algoritmo foi implementado em um microcontrolador PIC18F1320T e para as leituras utilizou-se dois divisores resistivos com ganho de 1/11. A Figura 3.13 apresenta o procedimento do método em forma de fluxograma.

O procedimento apresenta um intervalo de tempo em que o conversor deve permanecer sem transferir energia para que a tensão no módulo alcance a tensão de circuito aberto, essencial para que uma leitura adequada seja realizada. O tempo mínimo para uma leitura pode ser da ordem de microssegundos, no entanto, para facilitar a visualização durante os experimentos optou-se por utilizar $t_{oc} = 1$ s. Em

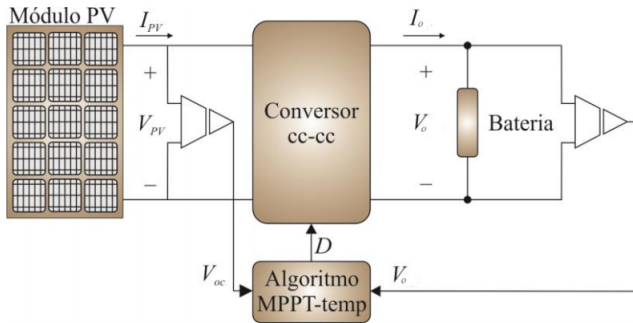


Figura 3.12: Configuração do método MPPT baseado na estimação da temperatura. [8]

virtude de a temperatura na superfície do módulo variar lentamente, as atualizações de V_{mpp} podem ser feitas em intervalos longos. Porém no experimento realizado, optou-se por $t_{mp} = 10$ s e $t_{mp} = 30$ s para facilitar a visualização.

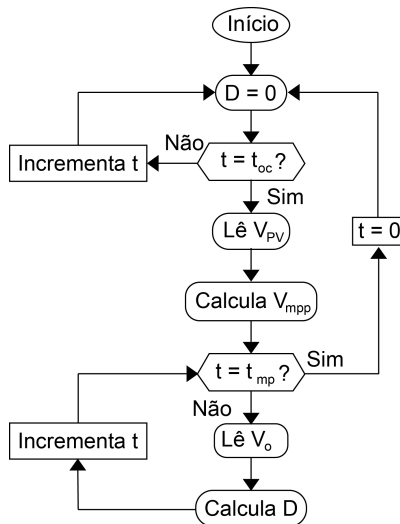


Figura 3.13: Fluxograma do método de MPPT implementado.

3.6 Sistema de recarga de baterias

Tendo em vista alcançar a vida útil e a capacidade projetada das baterias **Freedom DF1000** utilizadas no projeto. O sistema de recarga de baterias visa à operação da bateria numa faixa de tensão de de tensão de 26 V a 29 V, levando em conta as informações da Tabela 3.2. A Figura 3.14 mostra o fluxograma do sistema de recarga da bateria.

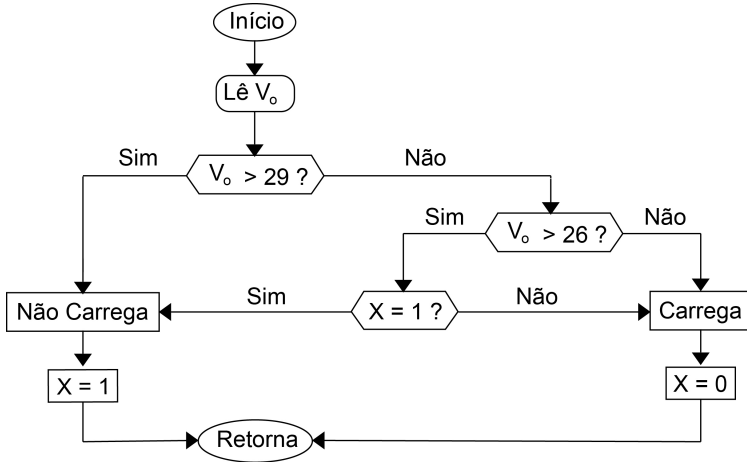


Figura 3.14: Fluxograma do sistema de carregamento da bateria.

A lógica do sistema foi dividida em dois modos: modo de carga e modo de descarga. Ambos são descritos a seguir:

Modo 1 - Carga:

- (i) $V_o \leq 26V$: Fornecimento de energia do módulo para a bateria ligado.
- (ii) $29V > V_o > 26V$:Fornecimento de energia do módulo para a bateria permanece ligado.
- (iii) $V_o \geq 29V$: O módulo é desconectado do sistema e entra no modo de descarga.

Modo 2 - Descarga:

- (i) $V_o \geq 29V$: o módulo está desconectado do sistema

- (ii) $29V > V_o > 26V$: o módulo continua desconectado do sistema
- (iii) $V_o \leq 26V$: Entra no modo de carga.

Vale ressaltar, que não é necessário um controle especial para a carga conectada à bateria, pois a embarcação Guarapuvu já apresenta um sistema para desconexão de carga, embutido no controlador do motor.

CAPÍTULO 4

Resultados experimentais

Neste capítulo serão apresentados os resultados experimentais obtidos em bancada do controlador de carga produzido, os testes foram realizados em duas operações: primeiramente em malha aberta, utilizando uma carga resistiva, para a validação do conversor Ćuk; e logo depois em malha fechada, com utilização das baterias, para a comprovação do funcionamento do algoritmo de MPPT e o sistema de recarga do banco de baterias.

4.1 Construção do Controlador

A implementação prática foi realizada no laboratório do INEP, seguindo fielmente o *layout* do controlador de carga desenvolvido pelo Eng^o Thiago Perreira, apresentado no Apêndice C.

O controlador foi produzido utilizando uma placa de circuito impresso prototipada comercialmente, projetada dispondo do *software Altium*. A Figura 4.1 apresenta a placa utilizada.

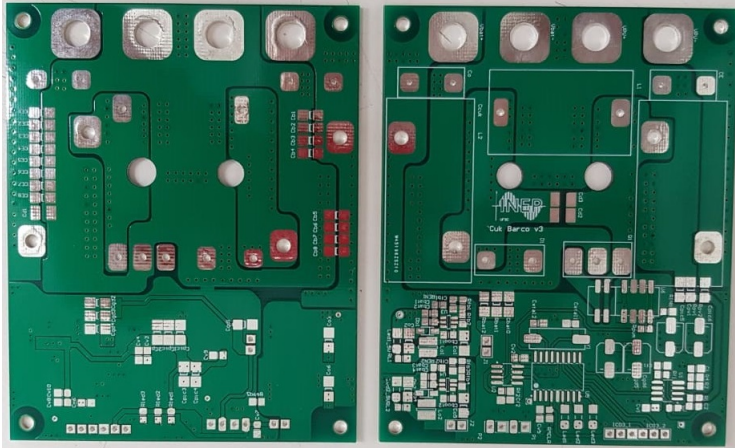


Figura 4.1: Foto da placa de circuito impresso utilizada.

Para construção foi realizado o processo de soldagem de componentes montados em superfície (*SMD - Surface Mount Device*) utilizando a bancada do laboratório do INEP. Além disso, todos os indutores do conversor \dot{C} uk foram produzidos no laboratório, seguindo exatamente o dimensionamento do conversor apresentado no Capítulo 3. A Figura 4.2 demonstra o andamento da implementação e as Figuras 4.3 e 4.4 apresentam os conversores finalizados.



Figura 4.2: Foto do andamento da fabricação.

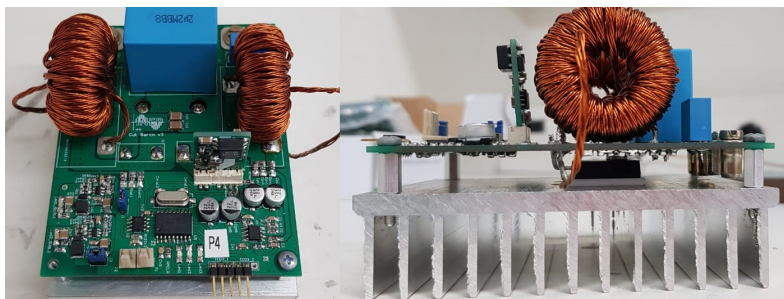


Figura 4.3: Foto de um conversor finalizado.

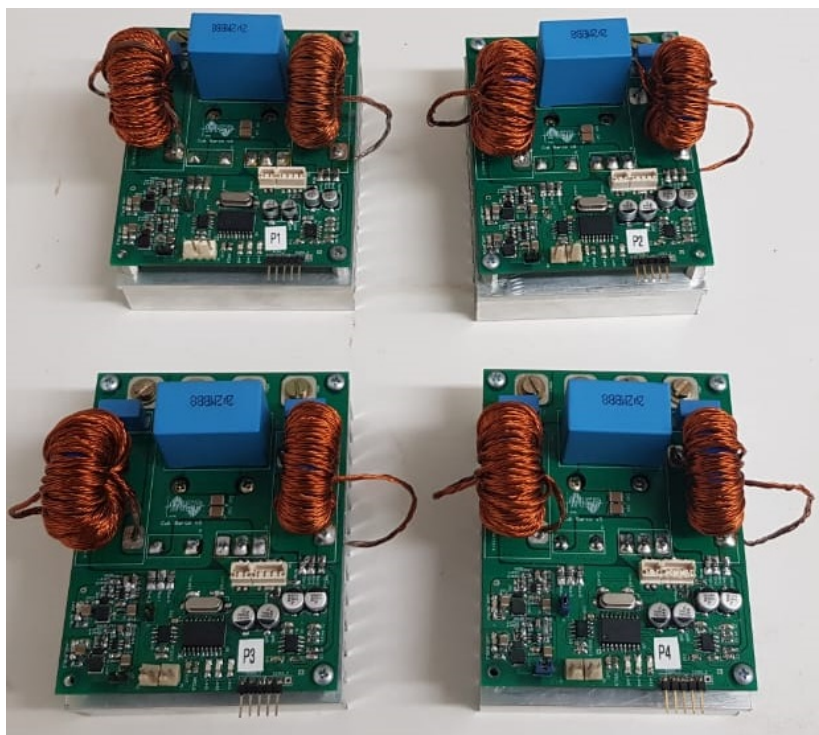


Figura 4.4: Foto de todos conversores finalizados.

4.2 Resultados em Malha Aberta

Para melhor entendimento dos resultados, a Figura 4.5 apresenta o esquemático simplificado do conversor, qual demonstra todas as medidas que foram avaliadas.

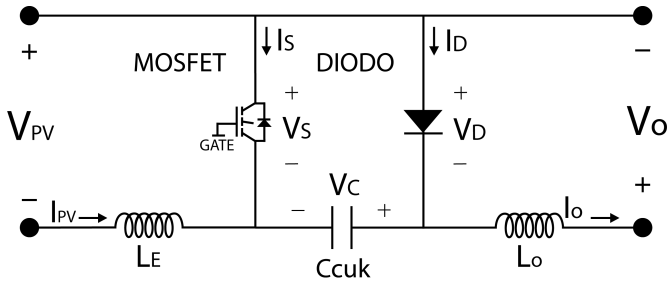


Figura 4.5: Esquemático simplificado do conversor Ćuk do projeto.

- V_{PV} → Tensão do Módulo Fotovoltaico
- I_{PV} → Corrente do Módulo Fotovoltaico
- V_o → Tensão da Bateria
- I_o → Corrente da Bateria
- V_c → Tensão no Capacitor C_{cuk}
- V_d → Tensão no diodo
- I_d → Corrente no diodo
- V_s → Tensão no MOSFET
- I_s → Corrente no MOSFET

Os testes em malha aberta foram realizados utilizando uma fonte de tensão em sua entrada simulando o módulo fotovoltaico e, em sua saída, uma carga resistiva de $3,1 \Omega$ conforme a Figura 4.6. A partir dessa configuração, foram realizados os testes para validação do conversor.

Primeiramente, para verificar o conversor Ćuk em cada etapa de operação, foi medido V_s , I_s , V_d , I_d e V_c . Atribuindo um valor de 0,5 de razão cíclica no *MOSFET* e uma tensão de entrada V_{PV} de 28 V.

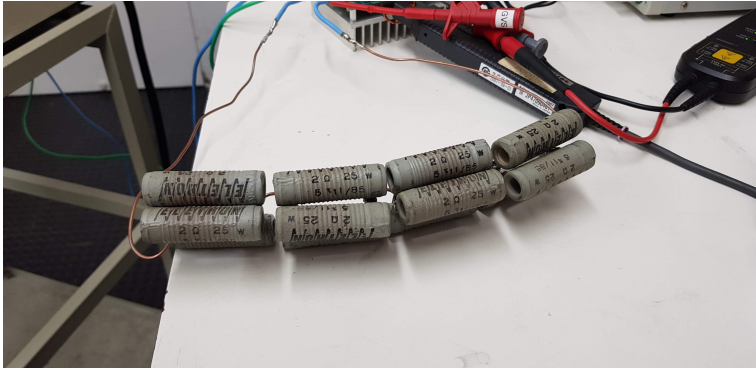


Figura 4.6: Carga utilizada nos testes de circuito aberto.

As formas de onda das tensões são apresentadas na Figura 4.7, e as Figuras 4.8 e 4.9 apresentam as formas de onda de tensão e corrente no diodo e no *MOSFET*, respectivamente.

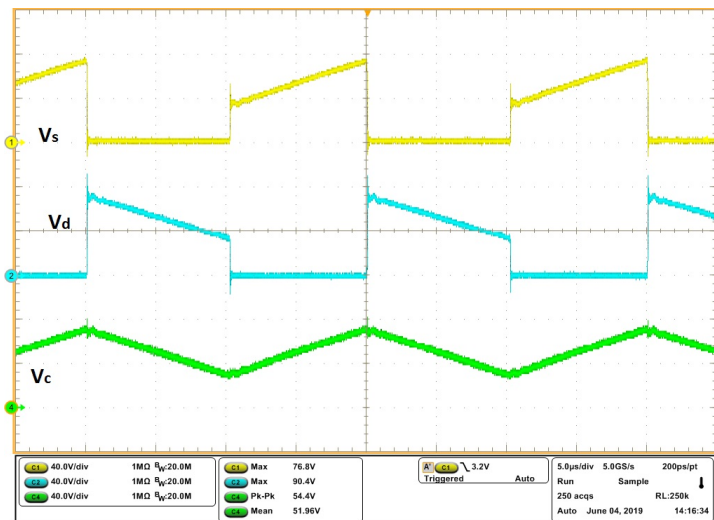


Figura 4.7: Tensões V_s , V_d e V_c com $D = 0,5$ e $V_{PV} = 28$ V em malha aberta.

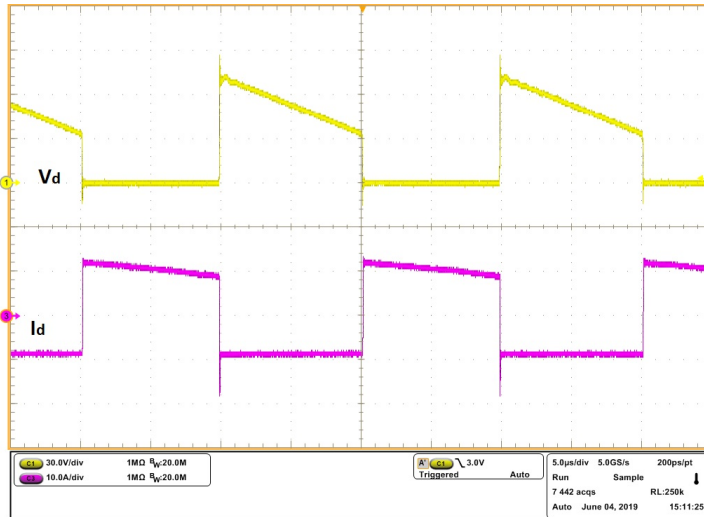


Figura 4.8: Tensão e corrente no diodo em malha Aberta, com $D = 0,5$ e $V_{PV} = 28$ V.

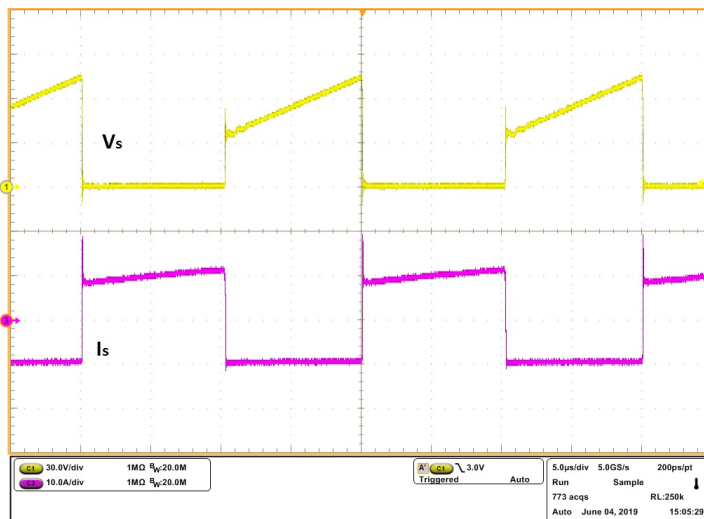


Figura 4.9: Tensão e corrente no MOSFET em malha aberta, com $D = 0,5$ e $V_{PV} = 28$ V.

Analisando as formas de onda apresentadas nas Figuras 4.7, 4.8 e

4.9 pode-se observar as duas etapas de operação do Ćuk. A primeira quando a chave está aberta, ou seja, a energia proveniente da entrada é acumulada no capacitor, aumentando a tensão V_c , aplicada no diodo D , assim a tensão no diodo V_d é zero e a tensão no *MOSFET* V_s é positiva. Na segunda etapa quando a chave está em condução, a tensão V_s é zero e o diodo fica inversamente polarizado e permanece bloqueado. Assim a energia armazenada no capacitor é liberada, diminuindo o valor V_c aplicado por meio do *MOSFET* à carga. Vale ressaltar, que o valor médio da tensão V_c é a soma dos valores médios das tensões de entrada e de saída.

Além disso, com os mesmos parâmetros de entrada e razão cíclica, foram analisados os *ripples* de correntes presentes em cada indutor $L1$ e $L2$. Conforme demonstrado na Figura 4.10, o valor dos *ripples* de corrente de entrada I_{PV} foi de 2,0 A e na corrente de saída I_o foi de 1,64 A.

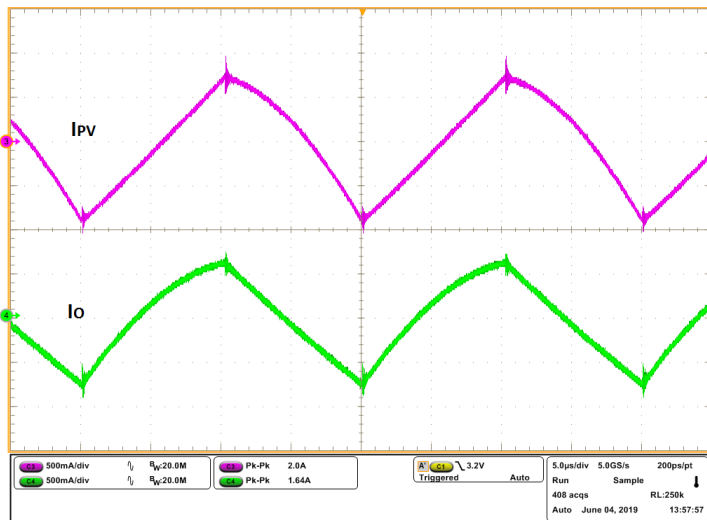


Figura 4.10: *Ripples* de corrente nos indutores de entrada e de saída do conversor, com $D = 0,5$ e $V_{PV} = 28$ V.

Posteriormente para avaliar a operação do conversor em toda a faixa de tensão de entrada, foram atribuídos quatro testes com diferentes valores de entrada V_{PV} : 20 V, 25 V, 30 V e 35 V; cada um com um valor de razão cíclica específico, calculado a partir de (3.7), para manter

uma tensão fixa de 24 V na carga V_{bat} .

As Figuras 4.11, 4.12, 4.13 e 4.14 apresentam os resultados em cada um dos testes, respectivamente. No canal 1, tem-se a tensão sobre o *MOSFET* V_s , de onde se pode observar a razão cíclica atribuída ao conversor, no canal 2, tem-se a tensão V_{PV} , imposta na entrada do conversor, no canal 4, tem-se a tensão de saída V_o e no canal 3, tem-se a corrente de entrada I_{PV} . Todos os valores obtidos estão expostos na tabela 4.1.

| | D | V_{PV} | V_o | I_{PV} |
|---------|-------|----------|---------|----------|
| Teste 1 | 0,545 | 19,81 V | 24,12 V | 12,0 A |
| Teste 2 | 0,450 | 25,34 V | 24,12 V | 9,07 A |
| Teste 3 | 0,444 | 30,81 V | 24,10 V | 7,51 A |
| Teste 4 | 0,407 | 35,02 V | 24,32 V | 6,69 A |

Tabela 4.1: Resultados experimentais dos Testes 1,2,3 e 4

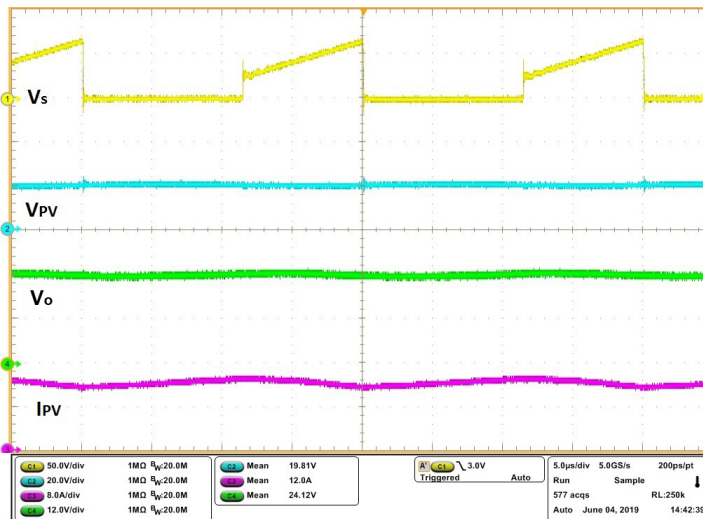


Figura 4.11: V_s , V_{PV} , V_o e I_{PV} no Teste 1 com $D = 0,545$.

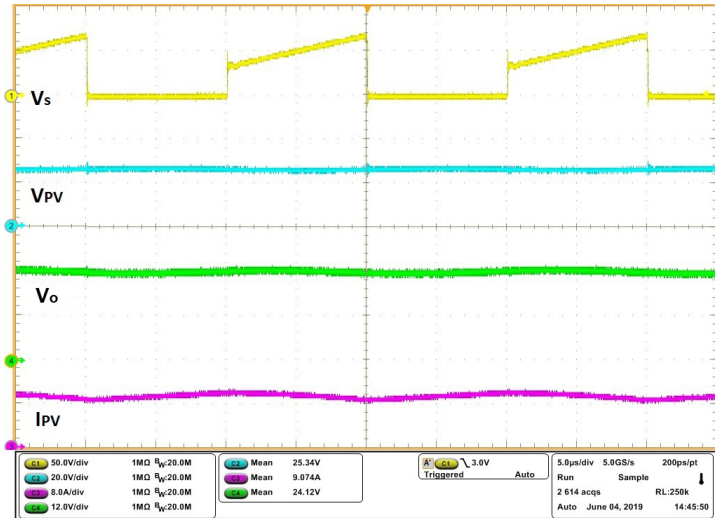


Figura 4.12: V_s , V_{PV} , V_o e I_{PV} no Teste 2 com $D = 0,45$.

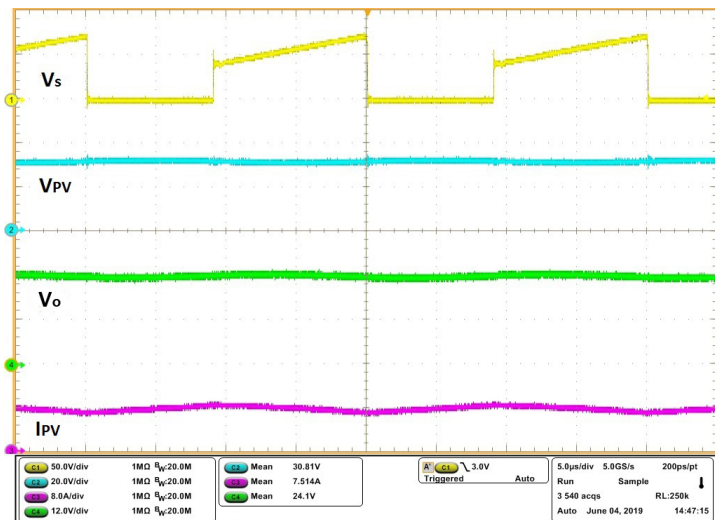


Figura 4.13: V_s , V_{PV} , V_o e I_{PV} no Teste 3 com $D = 0,444$.

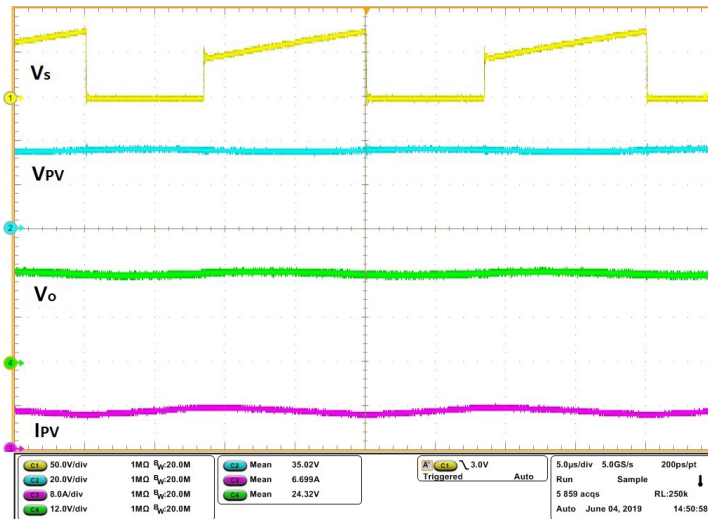


Figura 4.14: V_s , V_{PV} , V_o e I_{PV} no Teste 4 com $D = 0,407$.

Analisando as formas de onda apresentadas nos quatro testes, pode-se concluir que o $\hat{C}uk$ está operando corretamente em potência próxima a nominal com diferentes valores de entrada e razão cíclica, fixando sempre a tensão de saída sobre a carga. Assim, iniciaram-se os testes em malha fechada.

4.3 Resultados em Malha Fechada

Os testes em malha fechada tem como objetivo simular o conversor em operação real, para isso foi utilizado uma fonte de bancada para emular os módulos fotovoltaicos em diferentes tensões e correntes de operação, e o banco de baterias, retiradas do próprio barco. A Figura 4.15 mostra a bancada de teste. Para análise foi dividido os testes em dois objetivos, verificar o rastreamento de máxima potência e o controle de carregamento da bateria.

4.3.1 Verificação do Rastreamento

O método de rastreamento, conforme detalhado no capítulo anterior, utiliza um intervalo de tempo t_{oc} , no qual o conversor deve permanecer sem transferir energia, para que seja lida a tensão de circuito

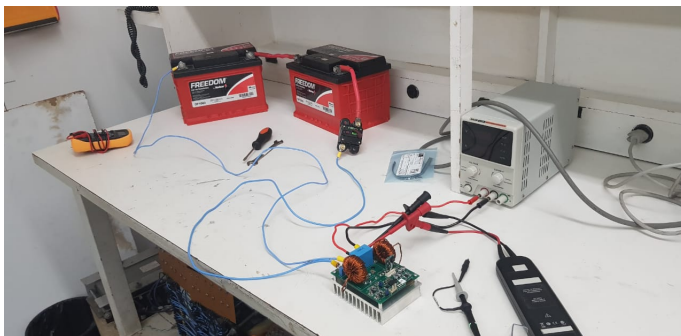


Figura 4.15: Foto da realização dos testes em malha fechada.

aberto do módulo. Já no restante do ciclo t_{mp} ele opera com base no cálculo da razão cíclica D . Para melhor visualização foi atribuído um tempo de 1 s em t_{oc} e 10 s em t_{mp} . A figura 4.16, demonstra o resultado experimental da operação.

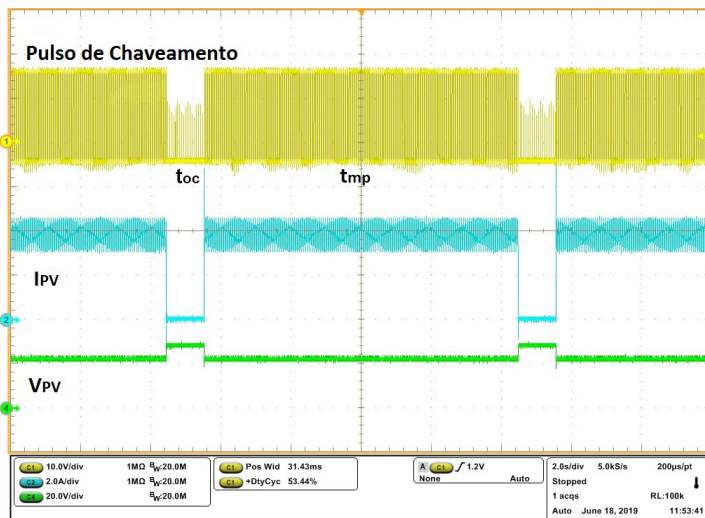


Figura 4.16: Teste do pulso de leitura.

A partir das formas de ondas Figura 4.16, observa-se que no período t_{oc} , a razão cíclica do conversor permanece nula. Dessa forma, o módulo opera em circuito aberto, com corrente I_{PV} nula e tensão V_{PV} máxima.

Posteriormente, a leitura da tensão de circuito aberto V_{oc} , o conversor começa a operar, a partir da razão cíclica D calculada por (3.8). Para analisar o funcionamento do rastreamento de máxima potência, foram impostos dois valores tensões V_{oc} diferentes na entrada do conversor, simulando duas situações de temperaturas distintas. A primeira de 30 V e a segunda 27 V. Os cálculos dos valores de T , V_{mpp} e D estão representados na Tabela 4.2.

| | T | V_{OC} | V_{mpp} | D |
|------------|-------|----------|-----------|-------|
| Situação 1 | 67 °C | 27 V | 20,48 V | 0,555 |
| Situação 2 | 47 °C | 30 V | 24,08 V | 0,516 |

Tabela 4.2: Valores teóricos das situações criadas.

A Figura 4.17 apresenta o resultado experimental do rastreamento. Analisando as formas de ondas obtidas, observa-se que a partir do V_{oc} medido, o sistema impõe a tensão de máxima potencia V_{mpp} na entrada do conversor, exatamente conforme os valores calculados dados pela Tabela 4.2, provando o funcionamento do rastreamento de máxima potencia. Para melhor visualização, neste teste t_{mp} foi ajustado para 30 s.

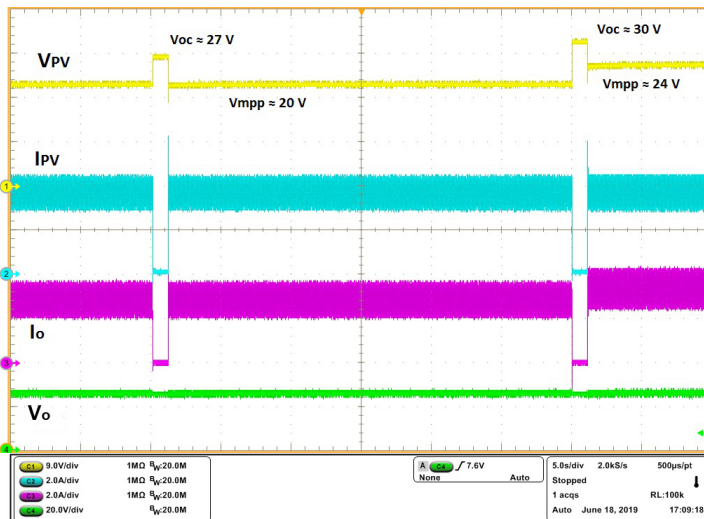


Figura 4.17: Teste do Rastreamento de máxima potência.

4.3.2 Sistema de recarga de baterias

Por último, foi verificado o sistema de recarga das baterias. Conforme detalhado no capítulo anterior, o controle é feito com base nas tensões de flutuação da bateria, 26 V e 29 V. Como as baterias utilizadas têm uma capacidade muito alta, a variação dessa tensão para os testes em laboratório demandaria muito tempo. Dessa forma, a alternativa foi simular o banco de baterias, utilizando uma fonte de tensão controlada em paralelo com a mesma carga utilizada nos testes de malha aberta, para evitar o fluxo de corrente reverso na fonte. O teste foi realizado variando a tensão de 24 V até 29 V, para analisar o sistema, na forma de descarga e recarga das baterias. A Figura 4.18 demonstra os resultados experimentais.

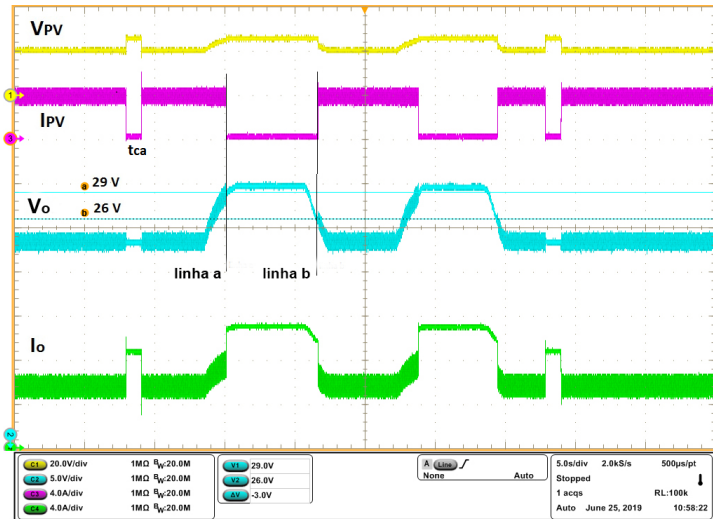


Figura 4.18: Teste do sistema de recarga de baterias.

A partir das formas de onda da Figura 4.18, observa-se que o sistema inicia com 24 V no modo de recarga de bateria, no momento que a tensão da bateria atinge 29 V (linha a), o conversor para de transferir energia, entrando no modo de descarga (entre linha a e linha b), permanecendo nessa condição até a tensão da bateria de cair a 26 V, onde o sistema volta para modo de recarga e assim sucessivamente.

Uma observação é que a tensão V_o apresenta uma variação elevada

no último teste, diferentemente do teste com o banco de baterias, isso ocorre pois fonte de tensão controlada não tem resposta rápida suficiente ao *ripple* de corrente da saída do conversor, fazendo a tensão variar.

CAPÍTULO 5

Conclusão

Este trabalho de conclusão de curso destinou-se a implementação de um controlador de carga para um sistema fotovoltaico autônomo utilizado na embarcação Guarapuvu. Foi também realizado um estudo sobre geração e processamento de energia fotovoltaica, focado principalmente nos objetivos propostos.

A partir dos estudos, o controlador de carga foi desenvolvido em um conversor \acute{C} uk capaz de processar uma potência de 250 W e operar com tensão de entrada variando entre 20 e 35 V com tensão de saída entre 22 e 29 V, utilizando um método de rastreamento com base na estimação de temperatura.

A escolha de conversor com acumulação capacitiva \acute{C} uk, apresenta boas vantagens em relação outras topologia, pois existe o fato de que tanto a corrente de entrada quanto a de saída podem ser contínuas, devido à presença dos indutores, os quais proporcionam uma ótima filtragem de entrada e saída. O capacitor intermediário possibilita uma corrente de entrada com baixa ondulação e conseqüentemente há menor perda no chaveamento, o que o torna uma boa opção para sistemas fotovoltaicos.

Com a vantagem de não necessitar de nenhuma outra forma de sen-

soriamiento, além de simples divisores de tensão, o método utilizado baseado na estimação de temperatura na superfície do módulo fotovoltaico apresentou excelentes resultados nos quesitos eficiência, preço, facilidade de implementação e qualidade de rastreamento.

Por fim, os resultados experimentais em laboratório comprovaram a correta operação do controlador de carga desenvolvido. O controlador apresentou o correto funcionamento do método de rastreamento de máxima potência e do sistema de recarga de baterias.

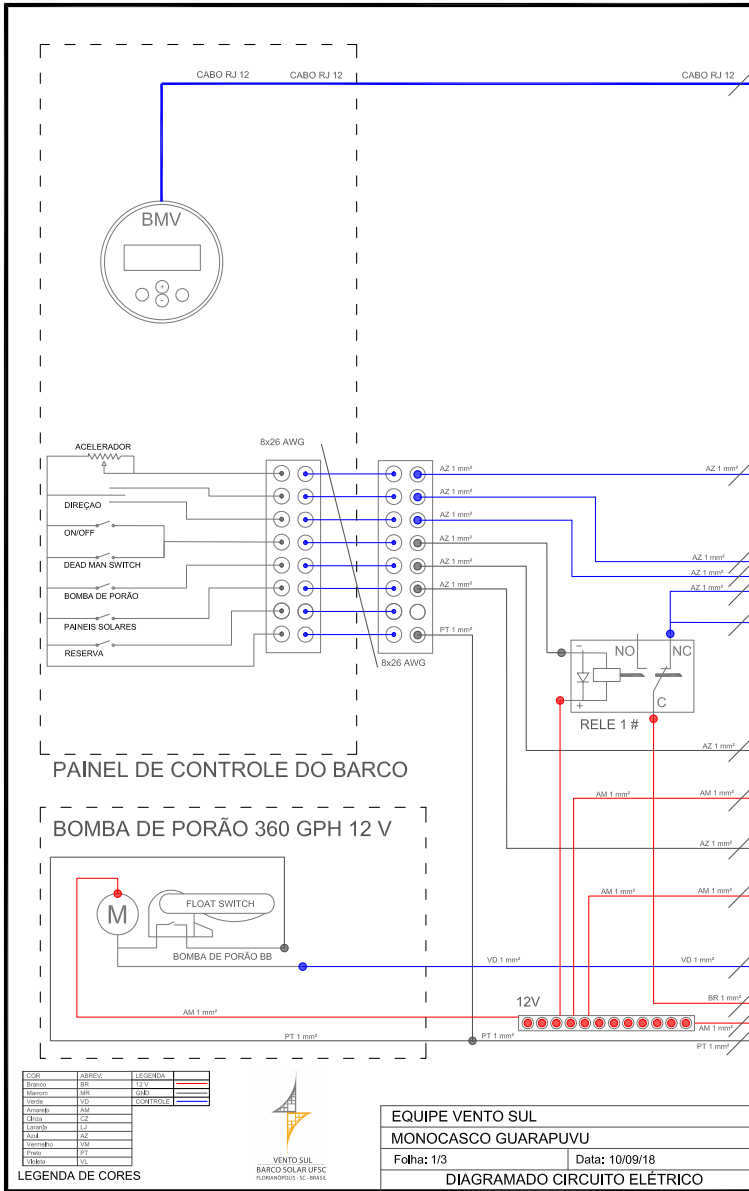
Referências bibliográficas

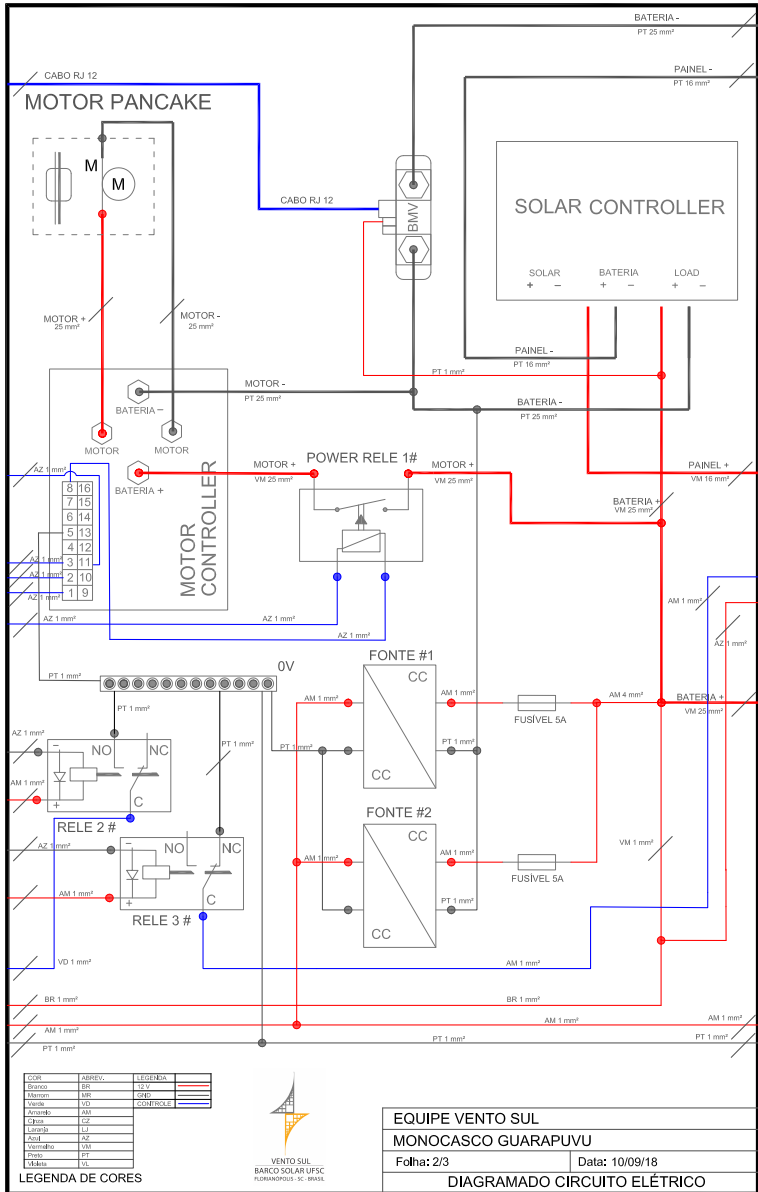
- [1] COELHO R. F. and MARTINS D. C. An optimized maximum power point tracking method based on pv surface temperature measurement. *Sustainable Energy – Recent Studies, ed: Intech Open Science*, 2012.
- [2] COELHO R. F., MARTINS D. C., and W. M. SANTOS. Técnicas de rastreamento de máxima potência para sistemas fotovoltaicos: Revisão e novas propostas. *Mini Curso, XI COBEP Congresso Brasileiro de Eletrônica de potência*, 2011.
- [3] CRESESEB. Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. *CEPEL- CRESESEB. Rio de Janeiro - Brasil*, 2014.
- [4] BARBI I. and MARTINS D. C. Conversores cc-cc básicos não-isolados. *Edição dos Autores, Florianópolis, SC - Brasil*, 2011.
- [5] VENTO SUL. Equipe de competição de barcos solares da ufsc. <http://www.barcosolar.ufsc.br/>, 2010.
- [6] JINKO SOLAR. Folha de dados referente ao módulo. *JKM260P-60*, 2015.
- [7] JHONSON CONTROLS. Manual técnico da bateria estacionária. *FREEDOM*, 2008.

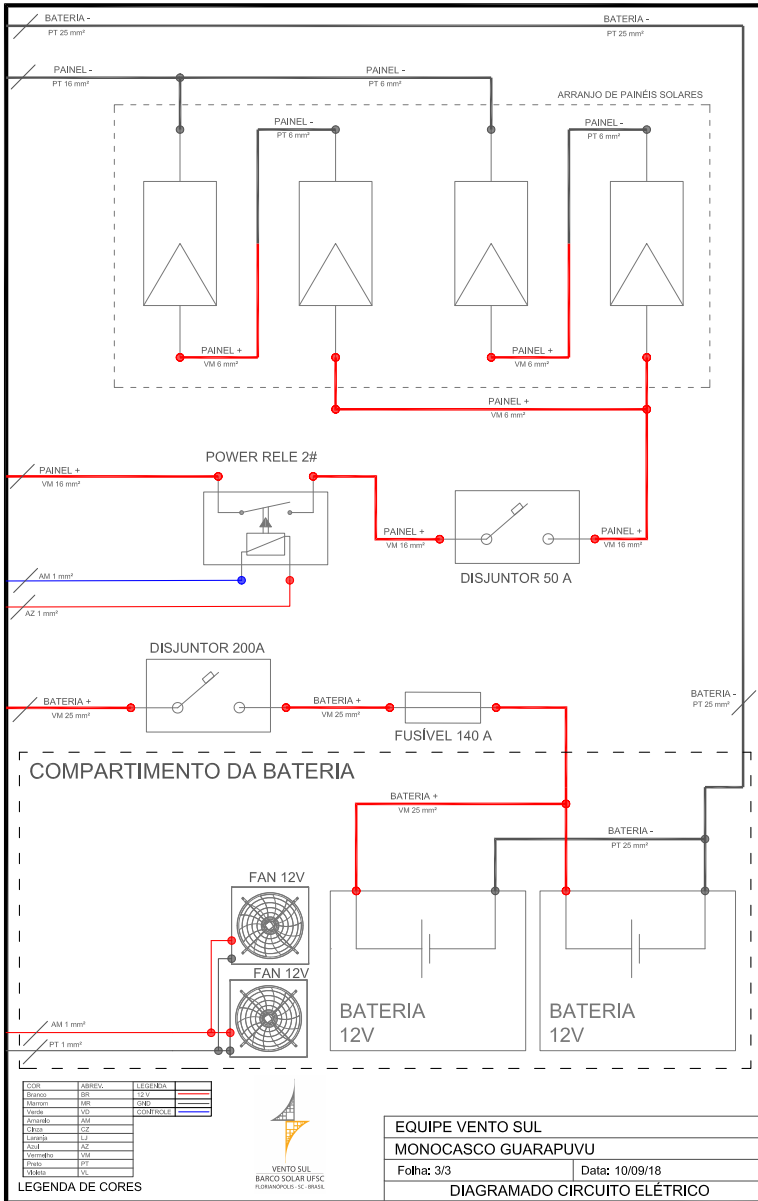
- [8] E. G. OSS-EMER. Nova técnica de rastreamento do ponto de máxima potência na geração fotovoltaica aplicada à recarga de baterias. *Trabalho de conclusão de curso*, 2014.
- [9] A. MICHELINI. Baterias recarregáveis. *S.T.A. – Sistemas e Tecnologia Aplicada Ind. Com. LTDA.*, 2017.
- [10] BARBI I., FONT C. H. I., and ALVES R. L. Projeto físico de indutores e transformadores. *Florianópolis, SC - Brasil*, 2002.

APÊNDICE A

Esquemático do Circuito Elétrico do Guarapuvu







EQUIPE VENTO SUL
MONOCASCO GUARAPUVU
 Folha: 3/3 Data: 10/09/18
DIAGRAMADO CIRCUITO ELÉTRICO

APÊNDICE B

Projeto do Conversor Cúk

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

Departamento de Engenharia Elétrica
Centro Tecnológico Científico - Eletrônica de Potência



INSTITUTO DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA

Conversor Cúk - MCC

Autor: Thiago Antonio Pereira

1) Especificações de projeto

| | |
|---|-------------------------------------|
| $V_{in_min} := 20V$ | Tensão de entrada mínima |
| $V_{in_max} := 35V$ | Tensão de entrada máxima |
| $V_{in} := 32V$ | Tensão de entrada de operação |
| $V_{o_min} := 22V$ | Tensão de saída mínima |
| $V_{o_max} := 29V$ | Tensão de saída máxima |
| $V_o := 24V$ | Tensão de saída de operação |
| $P_o := 250W$ | Potência média |
| $f_s := 5000Hz$ | Frequência de comutação |
| $I_E := 8.5A$ | |
| $G_{min} := \frac{V_{o_min}}{V_{in_max}} = 0.629$ | Ganho estático mínimo |
| $G_{max} := \frac{V_{o_max}}{V_{in_min}} = 1.45$ | Ganho estático máximo |
| $G_{op} := \frac{V_o}{V_{in}} = 0.75$ | Ganho estático no ponto de operação |
| $D_{max} := \frac{G_{max}}{1 + G_{max}} = 0.592$ | Valor máximo de razão cíclica |
| $D_{min} := \frac{G_{min}}{1 + G_{min}} = 0.386$ | Valor mínimo de razão cíclica |

$$\Delta V_{o\%} := 3$$

Valor da máxima ondulação de tensão da saída

$$\Delta V_{C\%} := 50$$

Valor da máxima ondulação de tensão no capacitor de acumulação

$$\Delta I_{Lo\%} := 10$$

Valor da máxima ondulação de tensão das saídas

$$\Delta V_{CE\%} := 5$$

Valor da máxima ondulação da tensão no capacitor de entrada

$$\Delta I_{LE\%} := 15$$

Valor da máxima ondulação da corrente no indutor de entrada

2) Cálculos Preliminares

$$D := \frac{G_{op}}{1 + G_{op}}$$

$$D = 0.429$$

$$I_o := \frac{P_o}{V_{o_min}}$$

$$I_o = 11.364 \text{ A}$$

$$R_o := \frac{V_o}{I_o}$$

$$R_o = 2.112 \ \Omega$$

$$I_{omin} := \frac{I_E}{G_{max}}$$

$$I_{omin} = 5.862 \text{ A}$$

$$I_{omax} := \frac{I_E}{G_{min}}$$

$$I_{omax} = 13.523 \text{ A}$$

$$\Delta V_o := \frac{\Delta V_{o\%} V_o}{100}$$

$$\Delta V_o = 0.72 \text{ V}$$

$$\Delta I_{Lo} := \frac{\Delta I_{Lo\%} I_{omax}}{100}$$

$$\Delta I_{Lo} = 1.352 \text{ A}$$

$$I_{oM} := I_{omax} + \frac{\Delta I_{Lo}}{2}$$

$$I_{oM} = 14.199 \text{ A}$$

$$I_{om} := I_{omax} - \frac{\Delta I_{Lo}}{2}$$

$$I_{om} = 12.847 \text{ A}$$

$$\Delta V_{CE} := \frac{\Delta V_{CE\%} V_{in}}{100}$$

$$\Delta V_{CE} = 1.6 \text{ V}$$

$$\Delta I_{LE} := \frac{\Delta I_{LE\%} I_E}{100}$$

$$\Delta I_{LE} = 1.275 \text{ A}$$

$$I_{EM} := I_E + \frac{\Delta I_{LE}}{2}$$

$$I_{EM} = 9.137 \text{ A}$$

3) Dimensionamento do Indutor de entrada

$$D_{\max} = 0.592$$

$$D_{\min} = 0.386$$

$$D = 0.429$$

$$L_E := \frac{V_{\text{in_max}} D_{\min}}{f_s \Delta I_{LE}}$$

$$L_E = 211.902 \mu\text{H}$$

4) Dimensionamento do Indutor de Saída

$$L_o := \frac{V_{\text{in_max}} D_{\max}}{f_s \Delta I_{Lo}}$$

$$L_o = 306.363 \mu\text{H}$$

5) Dimensionamento do Capacitor do Filtro de saída e de acumulação

$$C_o := \frac{V_{\text{in_max}} D_{\min}}{8 f_s^2 L_o \Delta V_o} = 3.062 \mu\text{F}$$

$$C_o = 3.062 \mu\text{F}$$

$$V_{C\text{med}} := \frac{V_{\text{in_max}}}{1 - D_{\min}}$$

$$V_{C\text{med}} = 57 \text{ V}$$

$$\Delta V_C := \Delta V_{C\%} V_{C\text{med}} 0.01$$

$$\Delta V_C = 28.5 \text{ V}$$

$$C_{C\text{úk}} := \frac{I_E (1 - D)}{f_s \Delta V_C}$$

$$C_{C\text{úk}} = 3.409 \mu\text{F}$$

6) Projeto do Indutor de Entrada

6.1) Especificações do Projeto do Indutor de entrada

$$K_w := 0.7$$

Fator de utilização da área do enrolamento

$$J_1 := 600 \frac{\text{A}}{\text{cm}^2}$$

Densidade de corrente nos condutores

$$B_{\max} := 0.85 \text{ T}$$

Densidade de fluxo magnético

$$\mu_o := 4 \pi 10^{-7} \frac{\text{H}}{\text{m}}$$

6.2) Dimensionamento do Núcleo

Considerando a ondulação de corrente no indutor suficientemente pequena, vale a seguinte aproximação:

$$I_{L\text{ef}} := I_E$$

$$I_{L\text{ef}} = 8.5 \text{ A}$$

$$\Delta I_{LE\%} := 15\%$$

$$I_{E_CA} := I_E \Delta I_{LE\%}$$

Especificações do núcleo

$$MLT := 4.75 \text{ cm}$$

$$MPL := 8.15 \text{ cm}$$

$$A_e := 0.672 \text{ cm}^2$$

$$W_a := 2.93 \text{ cm}^2$$

$$A_{p_espe} := W_a A_e = 1.969 \text{ cm}^4$$

$$B_M := 0.85 \text{ T}$$

$$K_u := 0.6$$

$$V_{\text{nucleo}} := 5.4768 \text{ cm}^3$$

$$I_{pk} := I_E + \frac{I_{E_CA}}{2} = 9.137 \text{ A}$$

Corrente de pico

$$\text{Energia} := \frac{I_E I_{pk}^2}{2} = 8.846 \times 10^{-3} \text{ J}$$

Coeficiente de condição elétrica

$$K_e := \frac{0.145 P_o B_M^2}{10^4} = 2.619 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^2 \text{ kg}^3}{\text{A}^2 \text{ s}^7}$$

Coeficiente geométrico do núcleo

$$K_g := \frac{\text{Energia}^2}{K_e \alpha} = 0.03 \frac{\text{A}^2 \text{ m}^2 \text{ s}^3}{\text{kg}}$$

$$A_p := \frac{2 \text{ Energia}}{10^4 B_M J_i K_u} = 5.782 \times 10^{-5} \text{ cm}^4$$

$$I_{\text{rms}} := \sqrt{I_E^2 + I_{E_CA}^2} = 8.595 \text{ A}$$

$$\rho_{20C} := 1.708 \cdot 10^{-6} \Omega \text{ m}$$

$$\rho := \rho_{20C} [1 + 0.00393 (T_e - 20)] = 2.245 \times 10^{-6} \Omega \text{ m}$$

$$\delta_{o2} := \sqrt{\frac{100 \rho}{\pi \mu_0 f_s}} = 0.034 \text{ m}$$

$$2 \delta_{o2} = 0.067 \text{ m}$$

$$A_{\text{WIRE}} := \frac{I_{\text{rms}}}{J_i} = 0.014 \text{ cm}^2$$

AWG := 24

$$D_{\text{AWG}} := 0.063$$

$$D_{\text{AWG_isolamento}} := D_{\text{AWG}} + 0.028 \sqrt{D_{\text{AWG}}} = 0.07$$

$$S_{\text{condutor}} := \pi \left(\frac{D_{\text{AWG}}}{2} \right)^2 \text{ cm}^2 = 3.117 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$$

$$S_{\text{condutor_isolamento}} := \pi \left(\frac{D_{\text{AWG_isolamento}}}{2} \right)^2 \text{ cm}^2 = 3.852 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$$

$$n_{\text{fios}} := \text{ceil} \left(\frac{A_{\text{WIRE}}}{S_{\text{condutor}}} \right) = 5$$

$$n_{\text{fios}} = 5$$

$$W_{\text{a_efetiva}} := 0.75 W_{\text{a}} = 2.197 \text{ cm}^2$$

$$N_{\text{espiras_max}} := \frac{0.6 J_1 W_{\text{a_efetiva}}}{I_{\text{rms}}} = 92.041$$

$$N_{\text{L}} := \text{ceil} \left(1000 \sqrt{\frac{L_{\text{E}}}{56 \cdot 10^{-3} \text{ H}}} \right) = 62$$

$$N_{\text{L}} = 62$$

$$K_{\text{u_max}} := \frac{N_{\text{L}}}{N_{\text{espiras_max}}} = 0.674$$

$$\mu_{\Delta} := \frac{10^4 B_{\text{M}} \text{ MLT}}{0.4 \pi W_{\text{a}} J_1 K_{\text{u}}} = 0.305 \frac{\text{m kg}}{\text{A}^2 \text{ s}^2}$$

$$H_{\text{oe}} := \frac{0.4 \pi N_{\text{L}} I_{\text{pk}}}{\text{MPL}} = 109.769 \text{ Oe}$$

7) Projeto do Indutor de Saída

7.1) Especificações do Projeto do Indutor de entrada

$$K_{\text{w}} := 0.7$$

Fator de utilização da área do enrolamento

$$J_1 := 600 \frac{\text{A}}{\text{cm}^2}$$

Densidade de corrente nos condutores

$$B_{\text{max}} := 0.85 \text{ T}$$

Densidade de fluxo magnético

$$\mu_{\text{o}} := 4 \pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{H}}{\text{m}}$$

7.2) Dimensionamento do Núcleo

Considerando a ondulação de corrente no indutor suficientemente pequena, vale a seguinte aproximação:

$$I_{\text{o}} = 11.364 \text{ A}$$

$$\Delta I_{\text{L}} := 10\%$$

$$I_{\text{o_CA}} := I_{\text{o}} \Delta I_{\text{L}}$$

Especificações do núcleo

$$MLT := 4.75 \text{ cm}$$

$$MPL := 8.15 \text{ cm}$$

$$A_e := 0.672 \text{ cm}^2$$

$$W_a := 2.93 \text{ cm}^2$$

$$A_{p_espe} := W_a A_e = 1.969 \text{ cm}^4$$

$$B_M := 0.85 \text{ T}$$

$$K_u := 0.6$$

$$V_{\text{nucleo}} := 5.4768 \text{ cm}^3$$

$$I_{pk} := I_o + \frac{I_{o_CA}}{2} = 11.932 \text{ A}$$

$$\text{Energia} := \frac{L_o I_{pk}^2}{2} = 0.022 \text{ J}$$

$$K_e := \frac{0.145 P_o B_M^2}{10^4} = 2.619 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^2 \text{ kg}^3}{\text{A}^2 \text{ s}^7}$$

$$K_g := \frac{\text{Energia}^2}{K_e \alpha} = 0.182 \frac{\text{A}^2 \text{ m}^2 \text{ s}^3}{\text{kg}}$$

$$A_p := \frac{2 \text{ Energia}}{10^4 B_M J_I K_u} = 1.425 \times 10^{-4} \text{ cm}^4$$

$$I_{\text{rms}} := \sqrt{I_o^2 + I_{o_CA}^2} = 11.42 \text{ A}$$

$$\rho_{20C} := 1.708 \cdot 10^{-6} \Omega \text{ m}$$

$$\rho := \rho_{20C} [1 + 0.00393 (T_e - 20)] = 2.245 \times 10^{-6} \Omega \text{ m}$$

$$\delta_{o2} := \sqrt{\frac{100 \rho}{\pi \mu_0 f_s}} = 0.034 \text{ m}$$

$$2 \delta_{o2} = 0.067 \text{ m}$$

$$A_{\text{WIRE}} := \frac{I_{\text{rms}}}{J_I} = 0.019 \text{ cm}^2$$

AWG := 24

$$D_{\text{AWG}} := 0.0632$$

$$\alpha := 1$$

$$T_e := 100$$

Corrente de pico

Coeficiente de condição elétrica

Coeficiente geométrico do núcleo

$$D_{\text{AWG_isolamento}} := D_{\text{AWG}} + 0.028 \sqrt{D_{\text{AWG}}} = 0.07$$

$$S_{\text{condutor}} := \pi \left(\frac{D_{\text{AWG}}}{2} \right)^2 \text{ cm}^2 = 3.137 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$$

$$S_{\text{condutor_isolamento}} := \pi \left(\frac{D_{\text{AWG_isolamento}}}{2} \right)^2 \text{ cm}^2 = 3.875 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$$

$$n_{\text{fios}} := \text{ceil} \left(\frac{A_{\text{WIRE}}}{S_{\text{condutor}}} \right) = 7$$

$$n_{\text{fios}} = 7$$

$$W_{\text{a_efetiva}} := 0.75 W_{\text{a}} = 2.197 \text{ cm}^2$$

$$N_{\text{espiras_max}} := \frac{0.6 J_{\text{I}} W_{\text{a_efetiva}}}{I_{\text{rms}}} = 69.271$$

$$N_{\text{L}} := \text{ceil} \left(1000 \sqrt{\frac{L_{\text{o}}}{61 \cdot 10^{-3} \text{ H}}} \right) = 71$$

$$N_{\text{L}} = 71$$

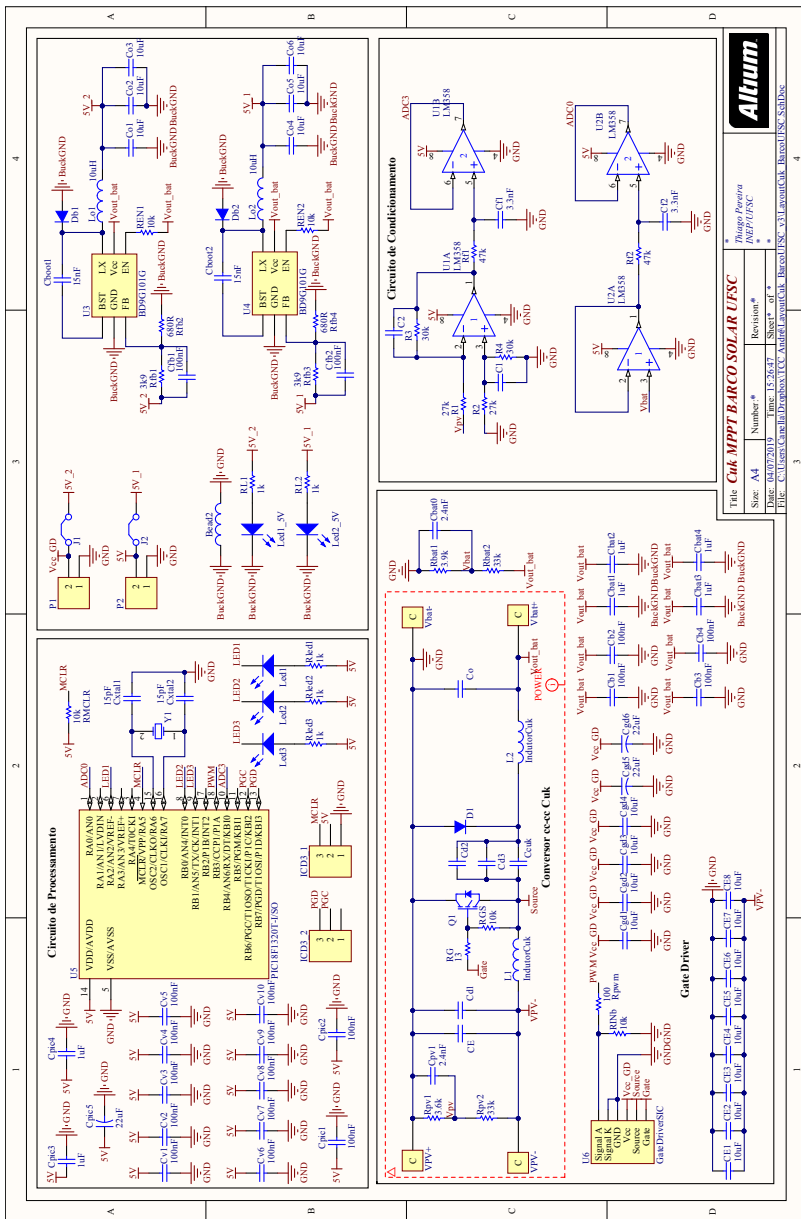
$$K_{\text{u_max}} := \frac{N_{\text{L}}}{N_{\text{espiras_max}}} = 1.025$$

$$\mu_{\Delta} := \frac{10^4 B_{\text{M}} \text{ MLT}}{0.4 \pi W_{\text{a}} J_{\text{I}} K_{\text{u}}} = 0.305 \frac{\text{m kg}}{\text{A}^2 \text{ s}^2}$$

$$H_{\text{oe}} := \frac{0.4 \pi N_{\text{L}} I_{\text{pk}}}{\text{MPL}} = 164.145 \text{ Oe}$$

APÊNDICE C

Esquemático do controlador de carga



Altium

Title: **Cuk MPPT BARCO SOLAR I/FSC**

Thiago Pereira
I/FSC / FSC

Size: A4 Number: * Revision: *
 Date: 04/07/2016 Time: 15:56:48 Sheet: 01 of *
 File: C:\Users\Gawel\Desktop\I/FSC_Altium\Layout\Cuk_Barco_I/FSC_V3.01_Layout\Cuk_Barco_I/FSC_Sch.Dwg

APÊNDICE D

Código implementado

```

1. /*
2.  * File:   main.c
3.  * Authors: André Canela
4.  *         Lenon Schmitz
5.  * Created on 11/06/2019
6.  */
7. //*****
8. #include <xc.h>
9. #include <p18f1320.h>
10. #include <math.h>
11. #include <stdio.h>
12. #include <stdlib.h>
13. //*****
14. #define _XTAL_FREQ 2000000
15. // CONFIG1H
16. #pragma config OSC = HS           // Oscillator Selection bits (HS Oscillator)
17. #pragma config FSCM = ON         // Fail-Safe Clock Monitor Enable bit (Fail-Safe Clock Monitor
    enabled)
18. #pragma config IESO = ON         // Internal External Switchover bit (Internal External Switchover
    mode enabled)
19. // CONFIG2L
20. #pragma config PWRT = OFF        // Power-up Timer Enable bit (PWRT disabled)
21. #pragma config BOR = ON         // Brown-out Reset Enable bit (Brown-out Reset enabled)
22. // BORV = No Setting
23. // CONFIG2H
24. #pragma config WDT = OFF        // Watchdog Timer Enable bit (WDT disabled (control is placed on the
    SMDTEN bit))
25. #pragma config WDTPS = 32768    // Watchdog Timer Postscale Select bits (1:32768)
26. // CONFIG3H
27. #pragma config MCLRE = ON       // MCLR Pin Enable bit (MCLR pin enabled, RA5 input pin disabled)
28. // CONFIG4L
29. #pragma config STVR = ON       // Stack Full/Underflow Reset Enable bit (Stack full/underflow will
    cause Reset)
30. #pragma config LVP = ON        // Low-Voltage ICSP Enable bit (Low-Voltage ICSP enabled)
31. // CONFIG5L
32. #pragma config CP0 = OFF        // Code Protection bit (Block 0 (00200-000FFFh) not code-protected)
33. #pragma config CP1 = OFF        // Code Protection bit (Block 1 (001000-001FFFh) not code-protected)
34. // CONFIG5H
35. #pragma config CPB = OFF        // Boot Block Code Protection bit (Boot Block (000000-0001FFh) not
    code-protected)
36. #pragma config CPD = OFF        // Data EEPROM Code Protection bit (Data EEPROM not code-protected)
37. // CONFIG6L
38. #pragma config WRT0 = OFF       // Write Protection bit (Block 0 (00200-000FFFh) not write-protected)
39. #pragma config WRT1 = OFF       // Write Protection bit (Block 1 (001000-001FFFh) not write-
    protected)
40. // CONFIG6H
41. #pragma config WRTC = OFF       // Configuration Register Write Protection bit (Configuration
    registers (300000-3000FFFh) not write-protected)
42. #pragma config WRTB = OFF       // Boot Block Write Protection bit (Boot Block (000000-0001FFh) not
    write-protected)
43. #pragma config WRTD = OFF       // Data EEPROM Write Protection bit (Data EEPROM not write-protected)
44. // CONFIG7L
45. #pragma config EBTR0 = OFF      // Table Read Protection bit (Block 0 (00200-000FFFh) not protected
    from table reads executed in other blocks)
46. #pragma config EBTR1 = OFF      // Table Read Protection bit (Block 1 (001000-001FFFh) not protected
    from table reads executed in other blocks)
47. // CONFIG7H
48. #pragma config EBTRB = OFF      // Boot Block Table Read Protection bit (Boot Block (000000-0001FFh)
    not protected from table reads executed in other blocks)
49. #define Led1 PORTAbits.RA2
50. #define Led2 PORTBbits.RB0
51. #define Led3 PORTBbits.RB1
52. unsigned long int cont = 0, Tmppt = 30, Tvca = 1, Timer = 76; // timer that will increment 4 times
    per second
53.
54. //*****
55. //Function to Read given ADC channel (0-13)
56. unsigned int ADCRead(unsigned char ch)
57. {
58.     if(ch>7) return 0; //Invalid Channel
59.     ADCON0=0x00;

```

```

60.  ADCON0=(ch<<2);    //Select ADC Channel
61.  ADON=1;           //switch on the adc module
62.  GODONE=1;         //Start conversion
63.  while(GODONE);    //wait for the conversion to finish
64.  ADON=0;           //switch off adc
65.  return ADRES;
66. }
67.
68. void interrupt ISR(void)
69. {
70.  if (TMR0IF && TMR0IE) // if Timer 0's interrupt flag has been raised
71.  {
72.      cont++; // increment the seconds counter
73.      TMR0IF = 0; // Lower the interrupt flag
74.  }
75. }
76. void main(void)
77. {
78.     //*****
79.     //Variaveis
80.     unsigned int i, j, r, x=0;
81.     float kPVI = 10.40;
82.     float kBatI = 9.48;
83.     float ValorADC_TensaoEntrada = 0;
84.     float ValorADC_TensaoSaida = 0;
85.     float Vmp_ref = 0, Vbat = 0, Vca=0, Vpv = 0;
86.     float D = 0;
87.     //Kc200Gt
88.     float Vca_STC = 32.9;
89.     //float alfa_Vca = -0.123;
90.     //float alfa_Vmp = -0.140;
91.     float k_PV = 1.138211382; //k_PV = alfa_Vmp/alfa_Vca
92.     float Vmp_STC = 26.3;
93.     //3Km260P
94.     //float Vca_STC = 38.1;
95.     //float alfa_Vca = -0.118;
96.     //float alfa_Vmp = -0.146;
97.     //float k_PV = 1.23728814; //k_PV = alfa_Vmp/alfa_Vca
98.     //float Vmp_STC = 31.1;
99.     //*****
100.    //Setup Ports: 1 - entrada e 0 = saida
101.    TRISAbits.RA0 = 1; //AD0
102.    TRISBbits.RB4 = 1; //AD3
103.    TRISAbits.RA2 = 0; //LED1
104.    TRISBbits.RB0 = 0; //LED2
105.    TRISBbits.RB1 = 0; //LED3
106.    TRISBbits.RB3 = 0; //PWM
107.    //*****
108.    //Setup PWM
109.    PR2 = 99; //define periodo - 50 kHz
110.    T2CON = 0b0000100;
111.    CCP1CON = 0b10101100;
112.    CCP1L = 0; //duty cycle
113.    //*****
114.    // Setup ADC
115.    // We use default value for +/- Vref
116.    // VCFG0=0,VCFG1=0
117.    // That means +Vref = Vdd (5v) and -Vref=GEN
118.    // Part Configuration
119.    // We also use default value here too
120.    // ALL ANx channels are Analog
121.    //
122.    // Our FOSC = 20MHz
123.    // Therefore our FOSC = 1/20MHz = 50nS
124.    // 32 TOSC = 32 x 50 nS = 1600nS = 1.6uS
125.    // 1.6 uS is more than the minimum requirement.
126.    // * TACQ_min = 15uS
127.    // * TACQ = 12 x TAD = 19.2uS - Maior que o minimo
128.    // * ADCON2
129.    // *ADC Result Right Justified.
130.    // *Acquisition Time = 12 TAD

```

```

131. // *Conversion Clock = 32 Tosc
132. ADCON1bits.PCFG0 = 0; //Habilita AN0 como canal analógico
133. ADCON1bits.PCFG6 = 0; //Habilita AN6 como canal analógico
134. ADCON2bits.ADFM = 1;
135. ADCON2bits.ACQT0 = 1;
136. ADCON2bits.ACQT1 = 0;
137. ADCON2bits.ACQT2 = 1;
138. ADCON2bits.ADCS0 = 0;
139. ADCON2bits.ADCS1 = 1;
140. ADCON2bits.ADCS2 = 0;
141. ADCON2 = 0b10101010;
142. ADCON0bits.VCFG1 = 0; //Coloca Referências em Vdd e Vss (Linhas 233 e 234)
143.
144. //*****
145. //Setup Timer 0
146. TMR0ON = 1; // enable Timer 0, part of the T0CON register (datasheet page 211)
147. T0CONbits.PSA = 0; // enable prescaler for Timer 0
148. T0CONbits.T0PS = 0b111; // prescale TMR0 to 1:256
149. T0CONbits.T0CS = 0; // //Prescaler gets clock from FCPU (5MHz)
150. T0CONbits.T08BIT = 1; //8 BIT MODE
151. // alternatively, you can set the 3 previous commands in one Line, Like this:
152. // T0CON = 0b10000110;
153. // enable Timer 0's interrupt
154. TMR0IE = 1;
155. // enable general interrupts
156. GIE = 1;
157. // and you can set those last 2 in one Line, Like this:
158. // INTCON = 0b10100000;
159. //*****
160. while (1)
161. {
162.     if ((cont >= 0) && (cont <= Tvca*Timer))
163.     {
164.         Led1= 0;
165.         Led2= 0;
166.         Led3= 0;
167.         CCP1L = 0; //Para abrir o circuito, é necessário configurar a razão cíclica
168.         em 0 (CCP1L = 99).
169.         if (cont == Tvca*Timer)
170.         {
171.             for(i = 0; i <100 ; i++)
172.             {
173.                 ValorADC_TensaoEntrada = (ValorADC_TensaoEntrada + (ADCRead(6)*0.0048875
174.                 85533))/2; // Média de 100 amostras, duas a duas
175.             }
176.             Vca = (ValorADC_TensaoEntrada*kPVI); //Medição Vca
177.             Vmp_ref = Vmp_STC + ((Vca - Vca_STC)*k_PV); //Calculo do Vmp_ref
178.         }
179.         else
180.         {
181.             //Leituras
182.             //*****
183.             for(j = 0; j <100 ; j++)
184.             {
185.                 ValorADC_TensaoEntrada = (ValorADC_TensaoEntrada + (ADCRead(6)*0.0048875
186.                 85533))/2; // Média de 100 amostras, duas a duas
187.             }
188.             for(r = 0; r <100 ; r++)
189.             {
190.                 ValorADC_TensaoSaida = (ValorADC_TensaoSaida + (ADCRead(0)*0.00488758553
191.                 3))/2; // Média de 100 amostras, duas a duas
192.             }
193.             //*****
194.             Vpv = (ValorADC_TensaoEntrada*kPVI); //Medição Vpv
195.             Vbat = (ValorADC_TensaoSaida*kBatI); //Medição Vbat
196.         }
197.         if (Vpv < 15)
198.         {
199.             CCP1L = 0;
200.         }

```

```
198.         else
199.         {
200.             if(Vbat > 29)
201.             {
202.                 Led1= 0;
203.                 Led2= 0;
204.                 Led3= 0;
205.                 CCPR1L = 0;
206.                 x = 1;
207.             }
208.
209.             else
210.             {
211.                 if(x==1 && Vbat>26)
212.                 {
213.                     Led1= 0;
214.                     Led2= 0;
215.                     Led3= 1;
216.                     CCPR1L = 0;
217.                     x = 1;
218.                 }
219.                 else
220.                 {
221.                     D = 99*Vbat/(Vbat + Vmp_ref); //Razão cíclica do Cuk
222.
223.                     //Limitação da razão cíclica
224.                     if (D>70)
225.                     {
226.                         D = 70;
227.                     }
228.                     if (D<30)
229.                     {
230.                         D = 30;
231.                     }
232.
233.                     Led1= 1;
234.                     Led2= 0;
235.                     Led3= 1;
236.                     CCPR1L = D;
237.                     x = 0;
238.                 }
239.             }
240.
241.             if (cont > Tmppt*Timer)
242.             {
243.                 cont = 0;
244.             }
245.         }
246.     }
247. }
248. }
```