

Desenvolvimento de um controlador de carga modular aplicado à uma embarcação movida a energia solar fotovoltaica

Flabio Alberto Bardemaker Batista; João Antônio Cardoso, Flávio Júnior de Faveri, Alessandro Gehlen

Instituto Federal de Santa Catarina

RESUMO

Este trabalho versa sobre o desenvolvimento de um controlador de carga modular aplicado ao sistema eletroeletrônico de uma embarcação movida à energia solar fotovoltaica. A aplicação desse dispositivo objetiva controlar individualmente o ponto de máxima potência dos painéis fotovoltaicos com módulos/conversores independentes. Esse sistema também possibilita a operação com diferentes níveis de tensão e a limitação da corrente de carga das baterias. O desenvolvimento do controlador de carga passou pelas seguintes etapas: estudo das soluções tecnológicas para o controlador de carga modular e baterias, pré-projeto e simulação de conversores de energia, estudo dos controladores digitais e algoritmos para o rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT) dos painéis fotovoltaicos, projeto do controlador de carga modular, elaboração do layout, a prototipagem e montagem de placas de circuito impresso, elaboração dos programas de controle e MPPT, integração do sistema e realização de testes de funcionamento, documentação e redação dos materiais de divulgação. Além do rendimento e da confiabilidade, foi considerada a robustez do produto. Desta forma, constata-se que a implementação de um sistema modular melhora essas características, sendo que cada painel tem um controlador próprio e os outros elementos do sistema continuarão operando em caso de falha de algum painel ou conversor. A topologia selecionada para o conversor de potência foi a *Ćuk* e isso permite a operação com diferentes níveis de tensão nas baterias.

Palavras Chaves: Painéis Fotovoltaicos, Energia Solar, Controlador de Carga.

DEVELOPMENT OF A MODULAR CHARGE CONTROLLER APPLIED TO A SOLAR BOAT

ABSTRACT

*This article presents the development of a modular charge controller, applied to the electronic system of a boat powered by photovoltaic solar energy. The application of this device aims to control the maximum power point of the photovoltaic panels individually, with independent modules/converters. In addition, this system allows the operation with different voltage levels as well as the limitation of batteries' current charge. The controller's development went through this steps: studies of technological solutions applied to the charge controller and the batteries, pre-project and energy converters simulation, studies of digital controllers and algorithms for maximum power point tracking (MPPT) of the photovoltaic panels, modular charge controller project, layout elaboration, prototyping and assembly of printed circuit boards, MPPT control programs elaboration, system integration and operating tests, documentation and creation of promotional materials. Besides performance and reliability, it was considered the robustness of the product. Thus, it is noticed that the modular system application increases the referred characteristics, once each panel has its own controller and the other system's elements will keep working in case of some panel or converter failure. The selected topology for the power converter was the *Ćuk* and it allows the operation with different levels of batteries' voltage.*

Keywords: Photovoltaic Panels, Solar Energy, Electric Vehicles.

⁽¹⁾ Professor Pesquisador Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina; Florianópolis, Santa Catarina; flabio@ifsc.edu.br;

⁽²⁾ Estudante Bolsista Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina;

I. INTRODUÇÃO

Em uma embarcação movida à energia solar fotovoltaica, é importante o aproveitamento máximo da energia disponível proveniente da radiação solar, que, na superfície terrestre, tem seu ponto considerado ótimo em 1000 W/m^2 . A viabilidade da embarcação limita a área acessível à obtenção da energia, de modo que, para o atual desempenho do sistema, são utilizados quatro painéis fotovoltaicos de 260W.

Visando um melhor desempenho, propõe-se o desenvolvimento de um controlador de carga modular aplicado ao sistema eletroeletrônico da embarcação, que, de forma autônoma, aplique um controle individual ao ponto de máxima potência de cada painel fotovoltaico, utilizando assim conversores independentes, com suas entradas ligadas a painéis separados e suas saídas ligadas ao mesmo banco de baterias. O desempenho do controlador de carga, nesse caso, é de suma importância para o melhor aproveitamento de energia. Sendo assim, conhecendo-se as especificidades de um sistema, pode-se construir um controlador com parâmetros e características próprios para o caso em que opera. Objetivando este melhor desempenho para a embarcação em questão, partiu-se então para o desenvolvimento de uma solução própria e otimizada para a embarcação.

Para o controlador carregar a bateria a partir da energia obtida em um painel fotovoltaico tendo controle sobre a corrente e tensão aplicadas, são amplamente utilizadas estruturas denominadas conversores eletrônicos de potência. Os conversores são sistemas formados por semicondutores de potência operando como interruptores e por elementos passivos armazenadores de energia, como indutores e capacitores, que têm por função controlar o fluxo de potência de uma fonte de entrada para uma carga de saída. (PETRY, 2011). A escolha adequada da topologia do conversor de potência fará com que seja possível a operação com diferentes níveis de tensão nas baterias, permitindo diferentes configurações para os sistemas da embarcação, como por exemplo, a operação com um banco de baterias de 24V ou 36V (DE BRITO, 2011; GEISLER, 2012; FERNANDEZ,

2012; BATISTA, 2012; GIACOMINI, 2014).

Técnicas de rastreamento do ponto de máxima potência (*maximum power point tracking* - MPPT) são necessárias para manter o ponto de funcionamento do arranjo fotovoltaico no conversor CC-CC. Muitas técnicas de MPPT têm sido propostas na literatura; dentre as mais utilizadas pode-se destacar a técnica perturbar e observar (P & O) e a Condutância Incremental (IC) (MARTINS; COELHO; SANTOS, 2011).

Para cada valor de irradiação solar existe apenas um ponto onde é entregue a máxima potência para carga. Esse valor é o “ponto de máxima potência” ou MPP (Maximum Power Point) (CARVALHO, 2016). Algoritmos MPPT são de extrema importância para a utilização otimizada da energia solar disponível. O algoritmo MPPT objetiva determinar o ponto de operação de maior geração de energia elétrica da célula, módulo ou painel fotovoltaico em particular, ou do sistema fotovoltaico em geral, para as variações instantâneas de irradiação ou temperatura (MOÇAMBIQUE, 2012).

A caracterização de um painel fotovoltaico pode ser efetuada a partir das curvas I-V e P-V. Mas como construí-las é um problema a solucionar, existem alguns modelos de cálculos, que permitem a construção das referidas curvas. A curva I-V exibe o comportamento corrente-tensão de uma célula para diversas cargas resistivas de valores variáveis conectadas em seus terminais. Cada uma determina um ponto de operação, que pode ser relacionado com uma tensão e corrente específicas. O produto dessas duas grandezas é a potência que a célula entrega a essa carga (CARVALHO, 2014).

O fator de forma (FF) ou fator de enchimento é uma grandeza que expressa o quanto a curva característica se aproxima de um retângulo no diagrama I x V. Quanto melhor a qualidade das células do módulo, mais próxima da forma retangular será sua curva (GNOATTO, 2016).

Este trabalho apresentará o desenvolvimento de um sistema controlador de carga modular para uma embarcação movida a energia solar fotovoltaica específica. Esta

embarcação conta com um motor de corrente contínua imã permanente 12-48V, com potência de 4800 W e 4800 rpm, modelo ME0909 da marca Motenergy. Ainda são usadas três baterias *Optima Yellow Top D35 12 V* e 48 Ah, além de quatro painéis fotovoltaicos da marca Jinko Solar de 260 W, cada um, doados pela organização do DSB 2015. No decorrer do relato serão mostradas as etapas de estudos da tecnologia, os parâmetros e figuras de mérito escolhidas para a aplicação bem como os cálculos desenvolvidos para as mesmas, simulações visando o refinamento do projeto, a escolha da topologia adequada à aplicação proposta, o desenvolvimento do protótipo e seus testes e, por fim, a topologia final e seus resultados.

II. METODOLOGIA

Como dito anteriormente, o objetivo principal deste trabalho é o desenvolvimento de um controlador de carga modular aplicado a uma embarcação movida à energia solar fotovoltaica. Para a implantação do projeto, consideram-se as seguintes etapas:

- Estudos de conversores CC-CC mais utilizados;
- Projetar e simular cada um deles para uma situação hipotética dentro de possíveis realidades da embarcação;
- Recriar a topologia escolhida para o projeto;
- Estudos de algoritmos MPPT;
- Simulação do conversor CC-CC com painel fotovoltaico na entrada e implantação do algoritmo MPPT;
- Análise das curvas do conversor;
- Desenvolvimento e teste do protótipo.

Foram realizados estudos sobre as soluções tecnológicas para controladores de carga modulares e, com isso, seis topologias de conversores CC-CC foram estudadas (*Buck, Boost, Buck-Boost, Ćuk, Sepic* e *Zeta*). Com os parâmetros do painel fotovoltaico e tensão do banco de baterias pré-definidos, as topologias tiveram seus elementos calculados e simulados para análise das suas formas de ondas. Também foram estudados os tipos de controladores digitais para introdução de algoritmos MPPT para o controle dos conversores CC-CC. Com a definição da topologia houve um re-projeto do conversor levando em consideração as

condições reais da embarcação, gerando, desta forma, uma simulação com o painel fotovoltaico na entrada e carga resistiva na saída, operando em malha fechada com um algoritmo MPPT.

2.1 Conversor CC-CC Ćuk

A Figura 1 mostra a topologia Ćuk escolhida para o projeto por melhor se adequar às premissas do mesmo, das quais destacam-se o fato de que a topologia apresenta características de abaixador e elevador de tensão. Um ponto crítico desta topologia é que a transferência de energia da fonte para a carga é feita por meio de um capacitor, o que torna necessário o uso de um componente que suporte correntes relativamente elevadas.

Como vantagem, há o fato de que tanto a corrente de entrada quanto a de saída podem ser contínuas, devido à presença dos indutores. Além disso, ambos indutores estão sujeitos ao mesmo valor instantâneo de tensão, de modo que é possível construí-los num mesmo núcleo. Este eventual acoplamento magnético permite, com projeto adequado, eliminar a ondulação de corrente em um dos enrolamentos. Os interruptores devem suportar a soma das tensões de entrada e saída. Outro fator relevante na aplicação deste conversor é que a tensão de saída possui polaridade invertida em relação à tensão de entrada (POMILIO, 2014).

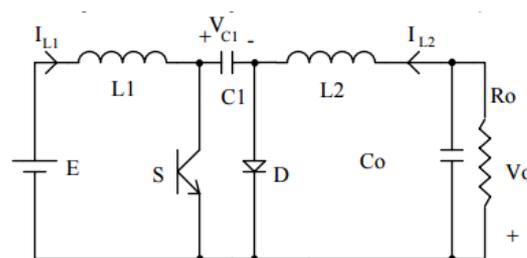


Figura 1 – Topologia Ćuk

Fonte: BARBI, 2000

Na tabela I são mostrados os parâmetros utilizados para o cálculo dos elementos passivos do circuito. Na tabela II são mostrados os valores dos componentes passivos dimensionados para o sistema em acordo com os cálculos desenvolvidos.

TABELA I – PARÂMETROS UTILIZADOS NOS CÁLCULOS

Potência de entrada – Pin	260W
Potência de saída – Po	260W
Tensão de entrada – E	31,1V
Tensão de saída – Vo	46,8V
Corrente máxima – Imp	8,37A
Frequência – f	100kHz
Resistor de carga nominal – Ro	7,3166Ω

TABELA II – VALOR DOS ELEMENTOS PASSIVOS DIMENSIONADOS

Indutor de entrada – L1	109uH
Indutor de saída – L2	146uH
Capacitor de acoplamento – C1	4,93uF
Capacitor de saída – Co	3,4uF

2.2 Algoritmo de Rastreamento de Ponto de Máxima Potência (MPPT)

Dentre os algoritmos MPPT estudados, optou-se pelo P&O (perturbar e observar), o qual tem por característica principal a simplicidade e facilidade de implantação e manutenção, o que também faz dele um dos mais utilizados. O seu funcionamento consiste em perturbar periodicamente (aumentar ou diminuir) a tensão de saída ou a corrente de saída do painel fotovoltaico a partir da diferença (δ) encontrada entre a leitura atual e a leitura passada da potência do painel. Sempre que δ é variado, calcula-se o novo valor de potência de saída $Po(k)L$ e este é comparado ao valor anteriormente existente $Po(k-1)$, onde k é um número natural. Se o valor da tensão mudar e existir um aumento na potência produzida, o controlador move o ponto de MPP nesta direção. No próximo ciclo, a próxima perturbação será nesse mesmo sentido se Po se mantiver igual ou crescente. Se Po diminuir, a perturbação é efetuada no sentido inverso (MARTINS; COELHO; SANTOS, 2011).

O valor da perturbação introduzida tem um valor fixo, o qual é dependente da tensão de saída do painel (<1% de V_o) e ocorre a cada ciclo de funcionamento. Essa situação faz com que o MPPT nunca seja estável. O valor das perturbações introduzidas provoca uma oscilação em torno deste ponto, ou seja, a tensão V_o está sempre a variar, o que implica em perdas em Po . Essa situação é particularmente notória quando as condições de irradiação variam muito lentamente (caso de um dia normal de verão), por outro lado,

no caso de variações bruscas nas condições atmosféricas, o sistema pode falhar, perdendo a sua posição na curva $P - V$.

A Figura 2 mostra o fluxograma de funcionamento para este método. Como já foi referido, se uma perturbação conduz ao aumento de Po , a próxima perturbação manterá o sentido da anterior, caso contrário, a perturbação será na outra direção. A variação da tensão é obtida alterando o ciclo tarefa (δ) do conversor, onde as setas (\downarrow, \uparrow) equivalem a uma diminuição ou aumento do mesmo, tornando-se evidente a oscilação provocada em torno do MPPT por constantes variações de δ (BONIFÁCIO, 2010).

2.3 Cálculos do Projeto do Conversor Cúk

Os cálculos dos elementos da topologia Cuk foram baseados em (BARBI,2000), a partir do qual foram respeitadas algumas premissas de projeto para o dimensionamento da topologia. As premissas de projeto são mostradas na tabela I. Para o cálculo do ciclo tarefa do chaveamento, foram usadas as equações 01,02 e 03.

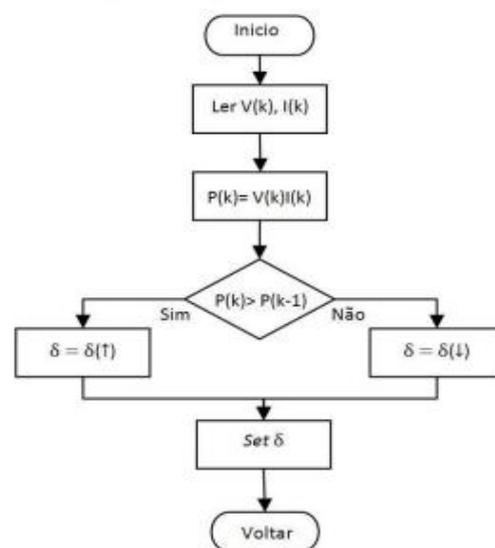


Figura 2 – Fluxograma P&O

Fonte: MARTINS, COELHO e SANTOS (2011)

$$D = \frac{V_o}{V_o + V_i} = 0,6008 \quad (01)$$

$$D_{max} = \frac{V_o}{V_o + V_{imin}} = 0,8239 \quad (02)$$

$$D_{min} = \frac{V_o}{V_o + V_{imax}} = 0,5512 \quad (03)$$

Estes valores calculados de ciclo tarefa são os limites de variação na chave da topologia Ćuk. Para os cálculos dos indutores de entrada e saída da topologia foi estipulada uma ondulação de corrente de 20%. Ao final obtiveram-se os seguintes valores de indutores, conforme mostram as equações 04 e 05.

$$L_i = \frac{V_o * (1 - D_{min})}{f * \Delta I L_i} = 109,09 \mu H \quad (04)$$

$$L_o = \frac{D * V_i}{f * \Delta I L_o} = 146,04 \mu H \quad (05)$$

Para os cálculos do capacitor de acoplamento foi utilizada uma ondulação de 10% da tensão de entrada. Os valores obtidos são demonstrados nas equações 06, 07 e 08.

$$V_{c_{med}} = \frac{V_o}{D} = 77,9V \quad (06)$$

$$\Delta V_c = \frac{V_{c_{med}} * 0,1}{100} = 7,79V \quad (07)$$

$$C = I L_{imed} * \frac{1 - D}{f * \Delta V_c} = 4,93 \mu F \quad (08)$$

Já para o capacitor de saída foi estipulada uma variação de 1% da tensão de saída. As equações 09, 10 e 11 mostram os resultados obtidos.

$$V_{c_{o_{med}}} = V_o = 46,8V \quad (09)$$

$$\Delta V_{c_o} = V_{c_{o_{med}}} * \frac{0,01}{100} = 0,468V \quad (10)$$

$$C_o = \frac{D * V_i}{8 * f^2 * L_o * \Delta V_{c_o}} = 3,41 \mu F \quad (11)$$

As equações 12, 13, 14 e 15 mostram os cálculos para especificação da chave e do diodo utilizados na topologia Ćuk.

$$I_{s_{max}} = I L_{i_{max}} + I L_{o_{max}} = 17,62A \quad (12)$$

$$V_{s_{max}} = V_{c_{max}} = 81,79V \quad (13)$$

$$I_{d_{max}} = I L_{i_{max}} + I L_{o_{max}} = 17,62A \quad (14)$$

$$I_d = I L_{i_{max}} + I L_{o_{max}} = 17,62A \quad (15)$$

2.4 Simulações do Sistema

Para realização das simulações foi utilizado o software PSIM. Para estas simulações foram realizadas a integração do conversor CC-CC, do algoritmo MPPT e um painel fotovoltaico na entrada com e sem variação de luminosidade. A Figura 3 mostra o circuito do conversor CC-CC Ćuk simulado com os elementos calculados, conforme mencionado anteriormente.

No primeiro quadro da Figura 4 pode-se observar a ondulação da potência de saída (em vermelho) e sua média (em verde) em relação à potência máxima do painel (em azul). O segundo quadro da Figura 4 mostra a ondulação da potência de entrada (em vermelho) e sua média (em verde) em relação à potência máxima do painel (em azul). A eficiência máxima do algoritmo em simulação é apresentada no terceiro quadro da Figura 4, enquanto a eficiência (da entrada à saída) máxima do conversor em simulação é mostrado no quarto quadro da Figura 4.

Por meio da Figura 4, percebe-se também que a potência de entrada tem uma ondulação muito maior que a de saída, tendo em vista que uma pequena ondulação na saída foi levada em consideração na escolha da topologia, pois existem equipamentos que não funcionam na melhor condição com a ondulação. Ainda, nota-se que a potência de saída quase se compara com a potência do painel, que pode ser melhor analisada na Figura 5.

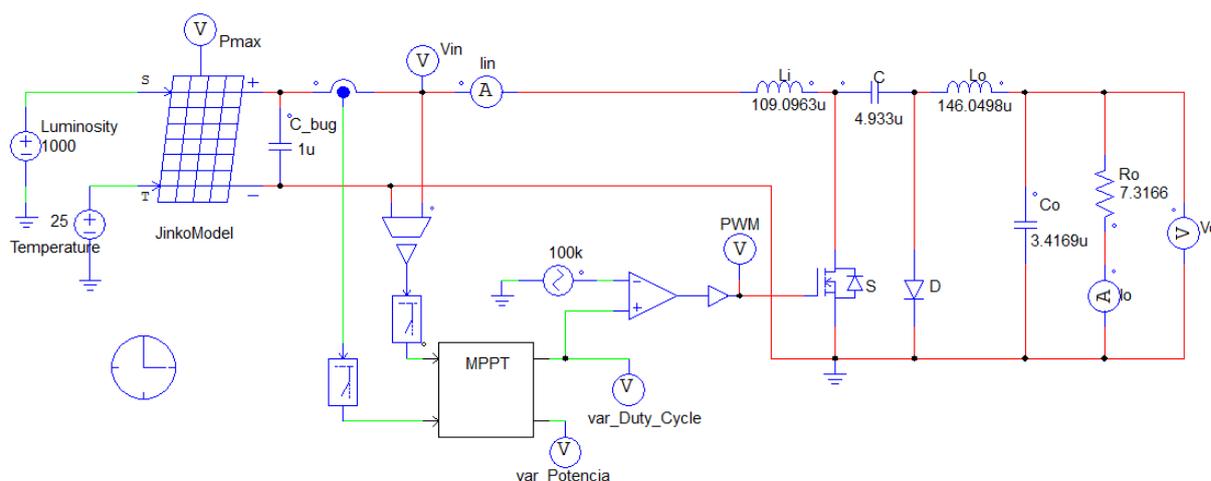


Figura 3 – Circuito do conversor CC-CC, com a topologia Ćuk e algoritmo MPPT

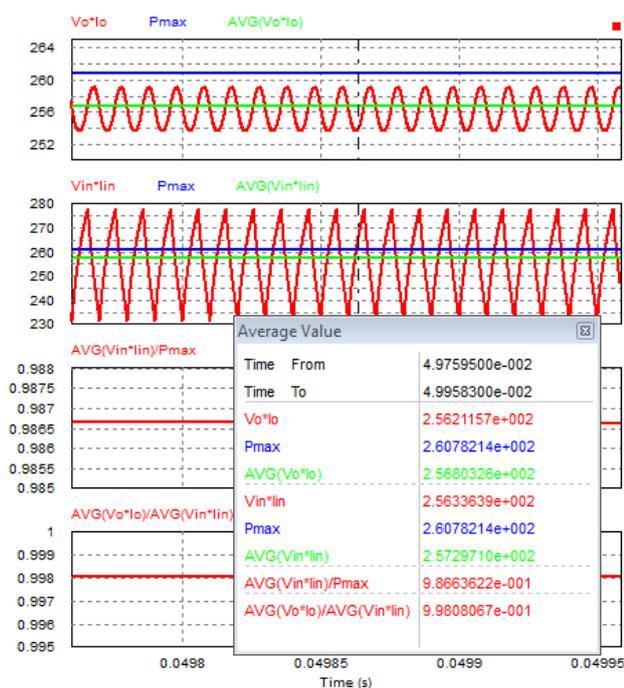


Figura 4 – Ondulação e comparativo de potência de entrada e saída

Percebe-se que a eficiência do conversor tem um período transitório no início da simulação e, após isso, sua curva de eficiência chega aos 97%.

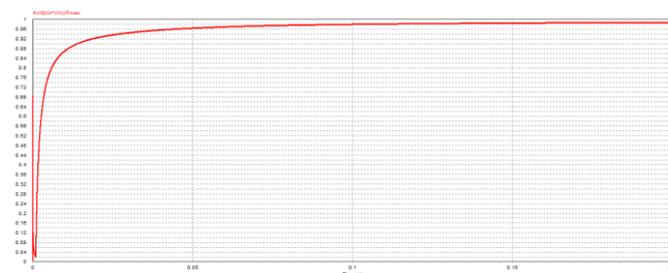


Figura 5 – Rendimento do sistema em simulação

Depois das simulações sem variação de luminosidade, incrementou-se no circuito apresentado na Figura 3 a variação de luminosidade no decorrer do tempo. Para fins de teste em simulação, a variação da luminosidade foi implementada como sendo uma senóide com variação temporal. Conforme mostra a Figura 6, o algoritmo aplicado (P&O) persegue continuamente a variação buscando o ponto de máxima potência do painel.

A Figura 7 mostra a curva de eficiência do algoritmo MPPT utilizado nas simulações, onde se apresenta a eficiência do rastreamento do algoritmo em relação à variação da potência de entrada.

A figura 8 apresenta a curva de eficiência do conversor com a variação sinusoidal, e percebe-se que a eficiência do conversor está atrelada à eficiência do algoritmo.

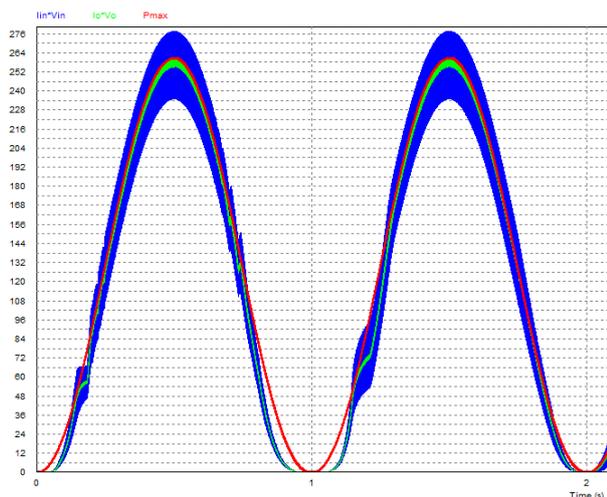


Figura 6 – Variação da potência de forma sinusoidal, potência de entrada (azul), potência de saída (verde) e potência do painel (vermelha)

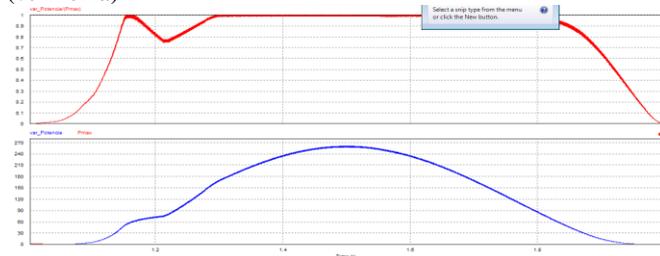


Figura 7 – Eficiência do algoritmo MPPT (vermelho) e curva da variação da potência de forma senoidal (azul)

Também foi simulada uma análise comparativa entre sistemas não modulares e sistemas modulares (um controlador de carga para cada painel fotovoltaico) utilizando a mesma topologia (Ćuk) e mesma metodologia de projeto (mantendo-se as características de ondulação e níveis de tensão e corrente de entrada e saída).

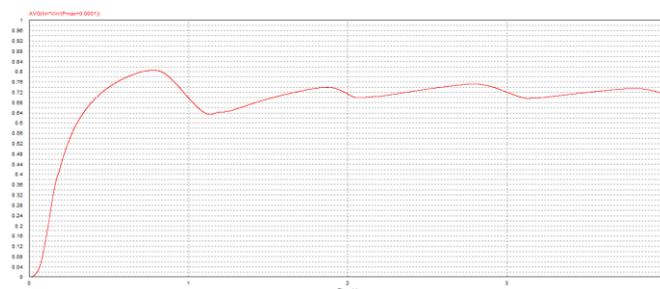


Figura 8 – Curva de eficiência do conversor Ćuk

Desse modo, foi projetado um conversor antagônico à proposta modular, ou seja, um sistema que opera com os quatro painéis fotovoltaicos conectados a um mesmo conversor, acumulando quatro vezes mais potência no conversor e buscando o ponto de máxima potência do

conjunto de painéis conectados a ele (em paralelo) ao invés de o ponto específico de cada painel. A tabela III expõe os elementos dos dois conversores.

TABELA III – ELEMENTOS DOS CONVERSORES SIMULADOS

Parâmetro	Conversor 1 (modular)	Conversor 2 (não modular)
Potência de entrada	260W	1040W
Indutor de magnetização	109,0963μH	27,2741 μH
Indutor de saída	146,0498 μH	36,5124 μH
Capacitor de acoplamento	4,933μF	19,7319 μF
Capacitor de Saída	3,4169 μF	13,6676 μF

Abrangendo a operação de ambos os conversores operando em diferentes situações de radiação, formulou-se quatro casos distintos, os quais são descritos a seguir:

- Caso 1: Para uma luminosidade, temperatura e carga fixadas respectivamente em 1000W/m², e 1040W na carga.
- Caso 2: Para níveis de luminosidade diferentes para cada painel (1000, 750, 500 e 250 [W/m²]), totalizando 650,75[W] na carga.
- Caso 3: Para níveis de luminosidade diferentes para cada painel (1000, 1000, 1000 e 100 [W/m²]), totalizando 806,95[W] na carga.
- Caso 4: Para níveis de luminosidade diferentes para cada painel (1000, 750, 500 e 250 [W/m²]), com variações sinusoidais de 25% à 20 Hz, totalizando 806,95[W] na carga.

Nestas simulações, para que comparações justas sejam possíveis, foram obtidos os valores máximos de potência disponível pelo conjunto de painéis, potência extraída dos painéis, potência entregue à carga, valores de eficiência, tanto do conversor (relação entre entrada e saída do conversor) quanto da extração energética dos painéis (relacionando potência disponível e potência extraída). Como conclusão verificou-se que, embora os componentes utilizados nas simulações sejam todos ideais, e os conversores não alcancem a eficiência unitária em nenhum dos casos, nem mesmo o algoritmo MPPT extraia 100% da potência teoricamente disponível pelos painéis, pode-se perceber alguma diferença entre tais valores: o conversor modular obtém um melhor resultado para todos os casos. Sendo assim, há indícios de que a estratégia de buscar o ponto de máxima potência individualmente para cada painel se mostra mais eficiente em seus princípios.

Para a variação escolhida de 25% de luminosidade à 20Hz (caso 4) em relação ao caso equivalente sem variação (caso 2), percebe-se uma deficiência do algoritmo P&O simulado, em acompanhar tais variações nesta frequência. No contexto desta embarcação solar para competições, na qual o objetivo é obter o melhor rendimento possível do sistema, uma melhora média de 1,8% pode ser significativa, já que o custo-benefício não tem grande peso. É importante notar que estes resultados dizem respeito às simulações de conversores ideais, e que, em um estudo futuro, é importante que se contabilize a diferença em relação às perdas nos componentes (indutores, capacitores, chaves e diodos) para as duas propostas.

2.5 Confeção da Placa de Circuito Impresso

Enquanto o layout da placa de circuito impresso (PCI) era produzido, as especificações dos componentes integrantes dos módulos de potência, controle, fontes e driver de corrente do controlador de carga já estavam prontas. Sendo assim, uma lista de materiais foi encaminhada para compra. Foram então produzidas placas para o driver de corrente (que é encaixado na placa próximo à chave) e para o controlador de carga, na qual, como visto, são integrados todos os módulos.

Inicialmente foram produzidos os indutores. Tanto L1 quanto L2 foram enrolados manualmente com ajuda de uma bobinadeira mecânica em um núcleo 40/20 da Thornton. Ambos foram testados com uma ponte RLC até que as indutâncias estivessem de acordo com o projeto. Também foram medidas as resistências de cada um, que ficaram na casa de mΩ. Na segunda versão da placa de teste, foram enrolados mais dois indutores, para as mesmas indutâncias e frequências do projeto, porém agora em um núcleo 30/15 com vistas a tentar minimizar o tamanho da placa e destes componentes.

Com a PCI do *driver* pronta e os componentes comprados começou o processo de solda da mesma. Para o *driver* de corrente, inicialmente, buscou-se uma solução própria, porém, concluído que haveria otimização do tempo de desenvolvimento buscando-se uma solução já consolidada, decidiu-se por usar um *driver* desenvolvido no Instituto de

Eletrônica de Potência (INEP) da Universidade Federal de Santa Catarina. A PCI do driver pode ser vista na Figura 9.



Figura 9 – Driver de corrente

A primeira PCI de protótipo para testes de bancada foi produzida de maneira compartimentalizada, com cada módulo separado afim de criar flexibilidade em caso de necessidade de modificações e ajustes em componentes. Na Figura 10 pode-se ver a PCI de condicionamento de sinais tomados dos sensores de tensão e corrente. A mesma possui ainda saída para os canais de conversão analógico/digital do microcontrolador ATMEGA328 da Microchip/Atmel. Neste primeiro protótipo, por questões práticas, o microcontrolador foi utilizado embarcado na placa de desenvolvimento Arduino UNO.



Figura 10 – PCI de condicionamento de sinais

A Figura 11 mostra a PCI que abriga todos os componentes de potência: chave (MosFET IRFP4321), diodo de potência (60APU06), indutores, capacitores, sensores de tensão (LV20-P) e de corrente (LTSP25-NP) e o driver de corrente para polarização da chave. Na extremidade esquerda é possível ver também as entradas para a bateria, para o painel fotovoltaico e pino de referência para ambos.

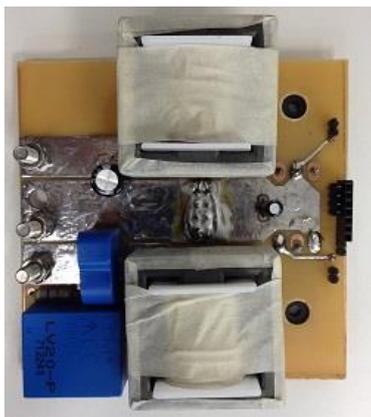


Figura 11 – PCI de potência do primeiro protótipo

Após os testes terem sido realizados neste primeiro protótipo, foram verificados vários pontos de falha, bem como possíveis melhorias a serem feitas. Sendo assim, partiu-se para um segundo protótipo mais refinado e mais próximo do controlador de carga final. A Figura 12 mostra o segundo protótipo já com todas as diferentes partes integradas e também com um conjunto de fontes para gerar as tensões necessárias para a alimentação dos componentes integrados a PCI. Estas fontes foram projetadas a partir de reguladores de tensão aproveitando o fato de que toda a PCI é percorrida por tensão contínua.

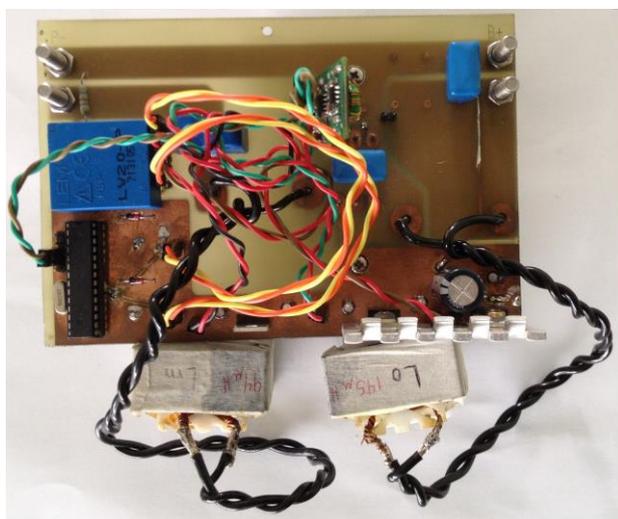


Figura 12 – PCI do segundo protótipo completa

Como se pode observar, neste novo modelo a entrada de tensão vinda do painel fotovoltaico está em linha com a saída de tensão para a bateria, melhorando assim o fluxo de energia de potência. Os indutores foram ajustados de modo que seus fluxos magnéticos se cancelem diminuindo a fonte de interferência eletromagnética nos demais componentes,

principalmente nos sensores. Todo o condicionamento de sinais e circuitos necessários ao microcontrolador são montados com componentes SMD (*surface mount device*) que normalmente possuem tolerâncias menores (ou seja, mais precisos) que componentes PTH (*plate through hole*), além de minimizarem a área necessária para a PCI.

III. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os primeiros testes foram executados em bancada no Laboratório de Processamento Eletrônico de Energia (LPEE) do campus Florianópolis – IFSC. Nesse caso não foram utilizados painéis fotovoltaicos e baterias, pois o objetivo era verificar o funcionamento da PCI montada. Sendo assim, três fontes CC de bancada foram ligadas em paralelo para manter a tensão de 31,1V (tensão de ponto de máxima potência do painel fotovoltaico) e corrente de até 9A, e para a carga foi utilizado uma combinação resistiva que chegava próximo do valor calculado para o conversor Ćuk, conforme tabela I, visto que o conversor não pode ser ligado sem carga sob pena de danificá-lo. Inicialmente houve problemas com sinais de ruído que foram minimizados com o trançamento dos fios que conectavam os módulos do controlador, porém ainda com interferência significativa. Optou-se então por captar os sinais para os sensores de tensão e corrente em pontos da curva onde houvesse menor impacto do sinal de ruído envolvido.

Após estes testes, três baterias de chumbo-ácido foram adicionadas à saída do conversor, ainda com fontes CC na entrada tendo sua tensão sendo variada manualmente no potenciômetro da mesma, para verificar se as baterias estavam sendo carregadas e também a eficiência do primeiro protótipo. Importante ressaltar que o banco de baterias utilizado não foi sempre o mesmo. Usou-se um banco de Optima Yellow Top (conforme descrito acima) e também um banco de baterias estacionárias Freedom 12 V da marca Heliar. O controlador funcionou corretamente, carregando as baterias, tanto com um banco como com outro. Como resultado, as baterias estavam sendo carregadas, mas, medindo-se tensão e corrente da entrada e saída, concluiu-se que a eficiência do controlador de carga girava entre 60% a 70%.

Com os resultados do primeiro protótipo foram então discutidas as mudanças necessárias para a segunda versão da PCI. Os primeiros testes da segunda versão também foram feitos em bancada, agora com uma fonte de maior capacidade e com possibilidade de implementar uma variação de tensão automática para mimetizar o sol, e com o banco de três baterias na saída. Verificou-se que o segundo protótipo estava funcionando adequadamente e assim, partiu-se para um teste com painéis fotovoltaicos e baterias. A Figura 13 mostra a bancada de teste com as baterias, o painel fotovoltaico ficou no lado externo da sala, como é mostrado na Figura 14.

Como se pode ver na Figura 13, para o teste foram medidos tensão e corrente na entrada e saída de modo que se pudesse calcular as potências de entrada e saída e verificar a eficiência do controlador de carga. Também foi medida, com o auxílio de um termômetro infravermelho, a temperatura dos principais componentes a fim de se assegurar que todos estivessem dentro de faixas seguras de operação.

Inicialmente, observou-se melhor eficiência relativamente ao primeiro protótipo, em torno de 75% a 80%, com a variação do sol e nuvens em horário próximo do meio dia (sol em zênite), conforme se pode verificar nas formas de onda das Figuras 15 (entrada do controlador de carga) e 16 (saída do controlador de carga).

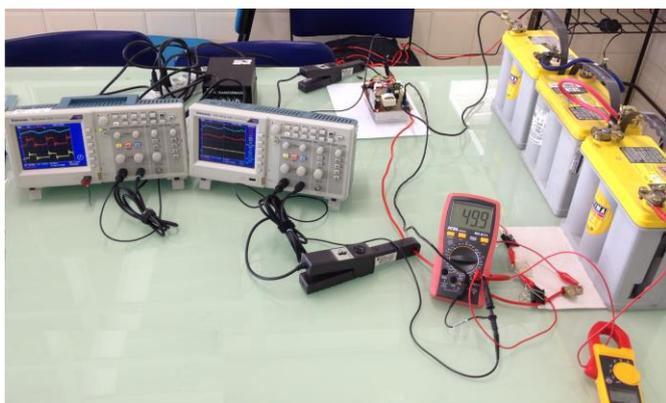


Figura 13 – Bancada de testes com o controlador de carga ligado ao banco de baterias e equipamentos de medição acompanhando o comportamento do sistema



Figura 14 – Painel Fotovoltaico ligado ao controlador de carga durante o teste

Porém, com o passar do tempo também foi verificado que os indutores estavam aquecendo demasiadamente, próximo de 100°C (bem acima do calculado em projeto). Foram então estudadas as possíveis causas para tal fenômeno e concluiu-se que o núcleo utilizado (30/15) não suportava a frequência de chaveamento de corrente imposta pelo projeto, causando assim aquecimento excessivo. Como não havia, no momento, núcleos específicos para a frequência utilizada, decidiu-se utilizar um núcleo maior (42/20), o que resolveu o problema de aquecimento e aumentou a eficiência do controlador de carga, chegando então a até 85% em condição climática parecida com a anterior.

Verificou-se também que a condição climática produz forte variação na potência de saída do controlador de carga. As Figuras 17 e 18 foram capturadas com uma hora e trinta minutos de diferença no início da manhã, com o painel fotovoltaico postado na mesma posição. Verifica-se que a medida que o tempo passa e o Sol avança em seu movimento aparente em torno da Terra, a potência de saída do controlador de carga aumenta, melhorando seu desempenho.

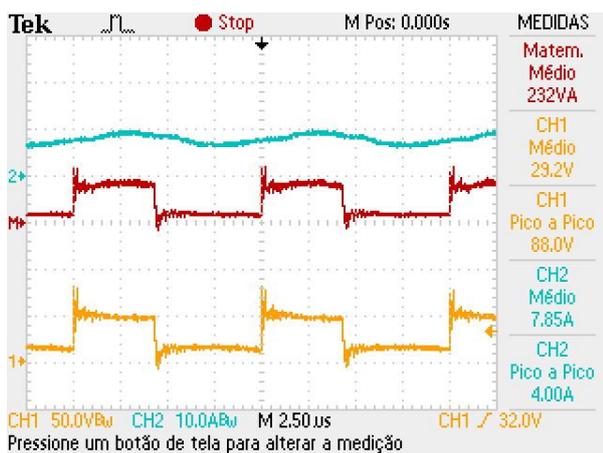


Figura 15 – Formas de onda da entrada do Controlador de Carga

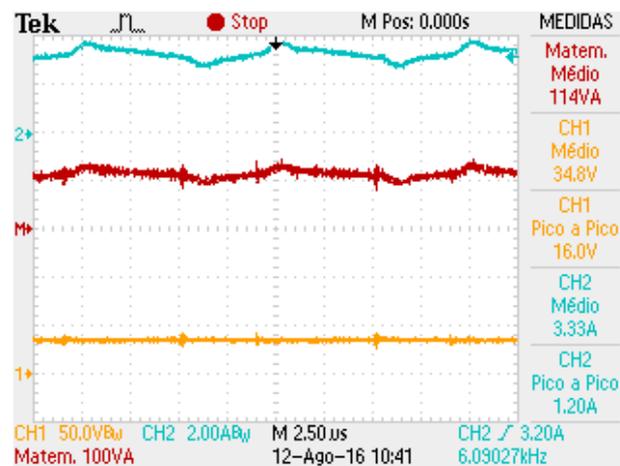


Figura 18 – Formas de onda da saída do Controlador de Carga às 10h41min

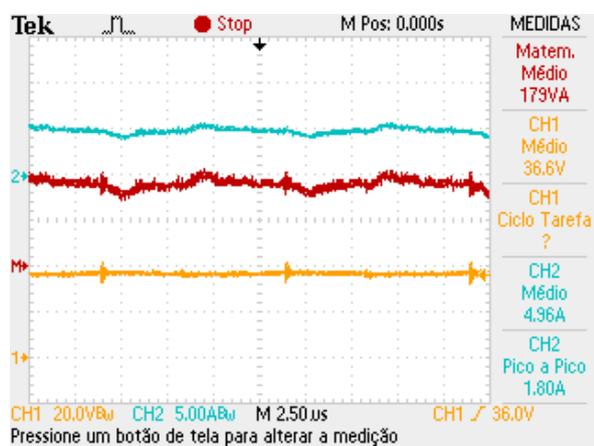


Figura 16 – Formas de onda da saída do Controlador de Carga

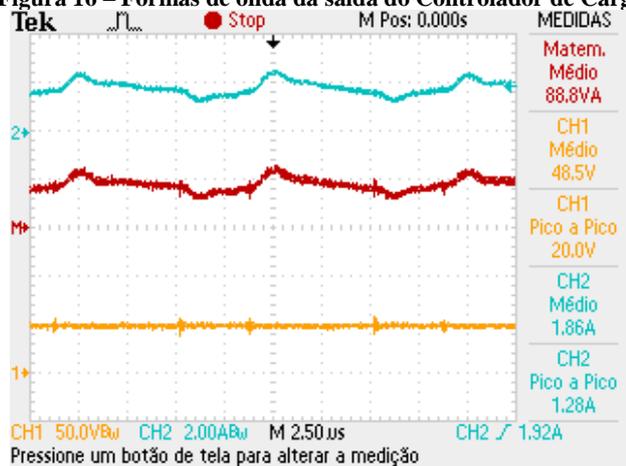


Figura 17 – Formas de onda da saída do Controlador de Carga às 09h14min

III. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após a realização dos testes, verificou-se que o controlador de carga funciona de maneira satisfatória por um período de, no mínimo quatro horas: tempo máximo dos testes realizados. Porém, percebe-se que ainda há pontos por melhorar que devem elevar sua eficiência, quais sejam: o algoritmo de busca de MPPT e as fontes que transformam a tensão da bateria em níveis adequados para os dispositivos embarcados na PCI.

O algoritmo P&O tem uma fragilidade em relação a mudança climática brusca, por exemplo quando uma nuvem entra em frente ao sol, ocasionando perdas no sistema devido ao tempo que ele toma para voltar ao ponto de máxima potência. Com isso, pretende-se testar o algoritmo Condutância Incremental, que tem um comportamento melhor para sistemas dinâmicos e assim buscar uma resposta mais rápida do sistema às mudanças climáticas a que a embarcação está sujeita. Já as fontes então funcionando bem, mas percebe-se alta dissipação de energia através de aquecimento. Com isso, pretende-se testar novas fontes projetadas a partir de circuitos integrados próprios para conversão CC-CC para baixas potências e que entreguem a tensão desejada com menor dissipação e gasto de energia.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina (Edital de Apoio aos

Grupos de Pesquisa nº 06/2015/PROPI) e à FAPESC (Chamada Pública 04/2012 – T.O.11.340/2012-9) pelo apoio financeiro para o desenvolvimento do projeto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARBI, I., MARTINS, D. C. **Eletrônica de Potência: conversores CC-CC básicos não isolados**. 1. ed. Florianópolis: Ed. Dos Autores, 2000. 377p.

BATISTA, F. A. B.; PERAÇA, M. T., PETRY, C. A. . Low power photovoltaic system for energy supplying for small loads. **IEEE/IAS International Conference on Industry Applications INDUSCON 2012**, Fortaleza.

BONIFÁCIO, P. J. D. S. Seguidor Fotovoltaico: uma variação do P&O – simulação e prototipagem. **Dissertação de Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e Computadores, Universidade Nova Lisboa**. Lisboa, 2010.

CARVALHO, A. L. de C. Metodologia para análise, caracterização e simulação de células fotovoltaicas. **Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais**. Belo Horizonte, 2014.

CARVALHO, E. de P., CARDOSO, R. de A. **Controle do Ponto de Máxima Potência em Painéis Fotovoltaicos com Microcontrolador PIC** Disponível em:< <http://www.aedb.br/seget/arquivos/artigos12/59816477.pdf>>. Acesso em 26 setembro. 2016.

DE BRITO, M. A. G. Main Maximum Power Point Tracking Strategies Intended for Photovoltaics. **Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência**, Natal-RN, 2011.

FERNANDES, A. P. Desenvolvimento de um sistema de gerenciamento de baterias de chumbo-ácido seladas. **Trabalho de Conclusão de Curso, IF-SC**. Florianópolis, SC – Brasil, 2012.

GEISLER, R. A. Sistema de monitoração de painéis fotovoltaicos autossuficiente. **Trabalho de Conclusão de Curso, IF-SC**. Florianópolis, SC – Brasil, 2012.

GNOATTO, E., et al. **Determinação da curva característica de um painel fotovoltaico em condições reais de trabalho** Disponível em:< http://www2.unemat.br/rivanildo/docs/artigos/2005_04.pdf>. Acesso em 26 setembro. 2016.

MARTINS, Denizar Cruz; COELHO, Roberto Francisco; SANTOS, Walbermark Marques dos. **Técnicas de Rastreamento de Máxima Potência para Sistemas Fotovoltaicos: Revisão e Novas Propostas**. Natal: 2011. 101p.

MOÇAMBIQUE, N. E. M. Aplicação de Algoritmos de Busca do Ponto de Máxima Potência e controladores lineares

e/ou Fuzzy para a regulação da tensão terminal de Painéis Fotovoltaicos. **Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Universidade de São Paulo**. São Carlos, 2012.

PETRY, C. **INTRODUÇÃO AOS CONVERSORES CC-CC**. Disponível em:< http://www.professorpetry.com.br/Bases_Dados/Apostilas_Tutoriais/Introducao_Conversores_CC_CC.pdf>. Acesso em 1 junho. 2016.

POMILIO, J. A. **Fontes chaveadas**. Disponível em:< <http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/>>. Acesso em 1 abril. 2016.