

DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA ELÉTRICO PARA PROPULSÃO DE EMBARCAÇÃO SOLAR

Marcela Salomão Lopes Costa, Pedro Henrique Franklin da Silva, Pedro Mattos de Souza Santos,
Rhenan Botamedi Captivo, Stephanie Carolina Maia Pereira, Rafael de Oliveira Rodrigues,
Luís Guilherme Barbosa Rolim

Universidade Federal do Rio de Janeiro

RESUMO

Participar de competições durante o período de formação acadêmica fornece a ocasião perfeita para produção de projetos práticos que poderiam não ser exercidos em outra oportunidade. Desde a edição de 2015 do Desafio Solar Brasil a equipe iniciou modificações em seu catamarã de competição com os principais objetivos de se apropriar da tecnologia empregada e disseminar o caráter científico nos alunos durante a graduação. As modificações são realizadas de forma gradativa, apresentando inovações a cada ano de competição. O presente artigo objetiva mostrar os trabalhos iniciados na parte elétrica da embarcação em 2016 e que ainda sofrerão aprimoramentos para os anos posteriores. As principais modificações iniciadas englobam o desenvolvimento de um sistema de rastreamento da máxima potência disponibilizada pelo módulo fotovoltaico e desenvolvimento do dispositivo carga eletrônica para realização de testes do estado do banco de baterias que será utilizado.

Palavras Chaves: Carga Eletrônica, Rastreamento Máxima Potência, Fotovoltaica.

DEVELOPMENT OF AN ELECTRICAL SYSTEM FOR A SOLAR BOAT

ABSTRACT

Taking part in competitions as an undergraduate student supplies perfect occasions for the development of practical projects one wouldn't have otherwise. Since the 2015 edition of Desafio Solar Brasil, our team started working on modifying our competition boat with the main purpose of the technology used, as well as disseminating scientific curiosity as undergrads. These modifications are being conducted gradually, bringing new developments to the competition year after year. This article's objective is to show the projects which are currently being developed for the electrical system of the boat we will be taking to this year's competition. The main modifications started include a Maximum Power Point Tracker for the photovoltaic module and the development of an electronic load which will be used in tests of the battery bank used.

Keywords: Electronic Load, Maximum Power Point Tracking.

I. INTRODUÇÃO

A preocupação ambiental, amplamente presente nas discussões tecnológicas, propulsiona a busca de novas técnicas, limpas e eficientes para os meios de transporte, como embarcações. Mesmo com a utilização de motores elétricos, a garantia de uma energia limpa acontece apenas se a fonte primária for renovável.

Motivado pelo Desafio Solar Brasil, competição de barcos movidos à propulsão solar, a equipe do Laboratório de Fontes Alternativas de Energia (LAF AE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), desenvolve elementos tecnológicos aplicáveis a embarcações. Para este trabalho, utilizaremos a energia solar fotovoltaica transformando a radiação solar em energia elétrica.

O objetivo principal deste trabalho é modificar e aprimorar tecnologicamente o conversor CC-CC, que conecta o painel solar à bateria, otimizando seu tamanho, eficiência e utilizando o algoritmo de rastreamento de máxima potência da radiação solar. Este dispositivo é necessário para compatibilizar as diferentes tensões existentes entre os painéis solares e o banco de bateria. Será discutido também um conversor para análise e teste de bancos de baterias [2].

II. MATERIAIS E MÉTODOS

A. Conversor Boost

A conversão de energia nos sistemas fotovoltaicos é irregular, visto que o sistema depende majoritariamente de fatores como temperatura e radiação solar são condições

climáticas descontínuas. Além disso, o rendimento desta conversão ainda é baixo. Sendo assim, é muito importante que durante as etapas da competição, os conversores assegurem que o arranjo fotovoltaico opere sempre no seu ponto de máxima potência, com o propósito de garantir uma alta eficiência durante o processo de conversão de energia solar em eletricidade.

Dessa forma, implementa-se um sistema MPPT operando em conjunto com o conversor *boost* (figura 1) [4]. O controle do conversor será modulado por largura de pulso de acionamento do interruptor (*Pulse-Width Modulation - PWM*) [8].



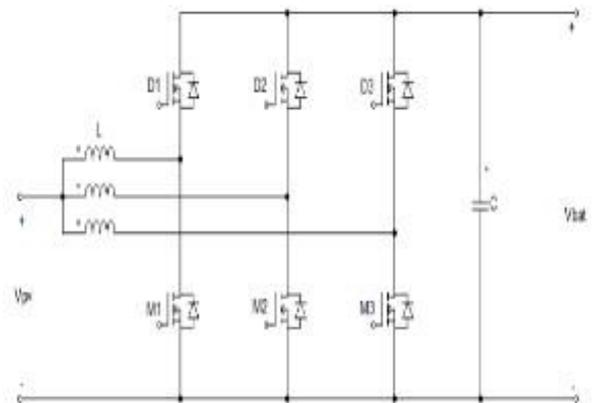
Figura 1 – Conversor Boost entrelaçado desenvolvido pela equipe LAFAB

Estrutura do Boost Entrelaçado

A estrutura do conversor *boost* entrelaçado foi escolhida em função dos valores nominais de tensão especificados para o arranjo fotovoltaico e para o banco de baterias, bem como para reduzir o *ripple* da corrente absorvida do arranjo fotovoltaico, utilizando MOSFETs para chaveamento. A implementação foi realizada de forma que o valor de referência (V_{ref}) foi perturbado e, após isso, a potência foi verificada. No entanto, uma limitação na tensão de referência foi incluída, pois muitas vezes valores elevados eram obtidos, fazendo com que quando fosse preciso inverter o sinal do incremento, houvesse uma grande demora na convergência [1][5].

A topologia utilizada (figura 2) apresenta um inversor de ponte H trifásica utilizado para implementar um conversor *boost* entrelaçado. Neste formato, os MOSFETs inferiores agem como chaves normais e os MOSFETs superiores, utilizam o diodo acima da ponte, mantendo-se as chaves permanentemente abertas.

Figura 2 – Topologia do Boost DC-DC Entrelaçado



Técnica de Rastreamento Perturba e Observa

Os dois métodos de rastreamento mais utilizados são o algoritmo da condutância incremental e o algoritmo de perturba e observa (P&O). Na condutância incremental, temos que a derivada da potência em relação à tensão é nula no ponto de máxima potência. Com isso, precisa-se saber as duas variáveis de entrada do nosso algoritmo, que neste caso seriam tensão e corrente. No algoritmo P&O, a lógica é um pouco mais simples, necessitando apenas de uma variável – a tensão. Esse método consiste na observação de uma perturbação na tensão, de forma que esta seja aumentada ou diminuída. Caso a potência fornecida pelo arranjo aumente, a perturbação deverá se manter no mesmo sentido. Caso contrário, a perturbação deverá ser feita no sentido contrário da curva de potência versus tensão. O algoritmo de rastreamento escolhido para este trabalho foi o P&O e tem seu algoritmo apresentado a seguir [9] (figura 3).

Figura 3 – Algoritmo de Rastreamento da Técnica P&O



B. Carga Eletrônica

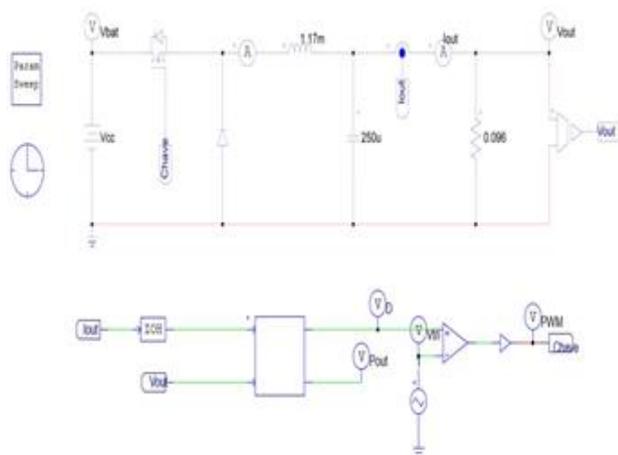
A análise do banco de baterias é fundamental para ampliar a eficiência de toda a embarcação. Para este projeto: desenvolver uma carga eletrônica compatível com o ciclo de descarga das baterias; simular condições de descarga análogas às do banco de baterias utilizado no DSB; montar um conversor CC-CC utilizando micro controlador que funcione como carga eletrônica; realizar teste e validação do equipamento no banco de baterias a ser utilizado no Desafio Solar Brasil.

Como condição inicial foi fixado que o teste deveria ocorrer a potência constante de 1.5kW. Este valor foi baseado na regra da competição. Como a energia armazenada na bateria das embarcações deve ser de 1.5kWh, caso o teste de descarga seja realizado à potência constante de 1.5kW, o mesmo deverá ter duração de aproximadamente 1 hora, considerando os erros inerentes ao ensaio.

Outro valor fixado foi a tensão de entrada, onde sabe-se que as equipes participantes do DSB utilizam, em sua maioria, baterias à base de chumbo ácido, cujos valores nominais de tensão e corrente acumulada são, em geral, 12V e 40Ah respectivamente. De acordo com a regra, a tensão máxima permitida é de 60V. Assim, considerando as topologias possíveis para baterias de chumbo dentro da regra da competição.

No que diz respeito ao circuito da carga eletrônica, foi escolhido um conversor CC-CC *Buck* para realizar o controle de descarga da bateria (Figura 4).

Figura 4 – topologia conversor CC-CC Buck



III. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A. Conversor Boost

Dimensionamentos

O dimensionamento do conversor *boost* e dos MOSFET's utilizados foi baseado nos valores do sistema de embarcação da equipe LAFABE (painéis e baterias). Os dados de ambos podem ser visualizados nas tabelas I e II [3].

TABELA I- DADOS DA BATERIA MODELO LiFePO4

Tensão do banco de bateria V_{OUT}	
Tensão nominal	52V
Tensão de saída mínima	32,2V
Tensão de saída máxima	58,8V
Corrente da bateria (I_{OUT})	10A

TABELA II – ESPECIFICAÇÕES DO PAINEL SOLAR JINKO JKM260P

Máxima potência (P_{max})	260 W
Tensão de máxima potência (V_{mp})	31,1V
Corrente de máxima potência (I_{mp})	8,25V
Tensão de circuito aberto (V_{oc})	38,1V
Corrente de circuito aberto (I_{sc})	8,98A
Irradiância	1000 $\frac{W}{m^2}$

TABELA III- DIMENSIONAMENTO DOS PARÂMETROS DO CONVERSOR BOOST

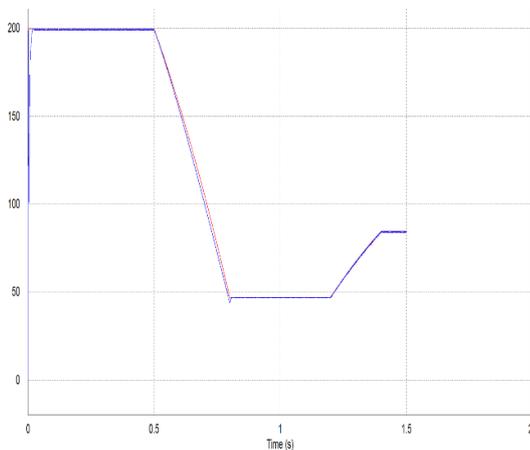
	Faixa de valores	Valor Nominal
Potência	-	1 kW
Duty Cycle	0 a 0,35	-
Tensão de entrada	28,5-31,1V	
Tensão de saída	31,5- 42V	
Capacitor (C)		6800 μF
Indutor (L)		1 mH
Frequência de chaveamento (f)	-	10 kHz
Periodo de chaveamento (T_s)	-	0,005 s

Os dimensionamentos dos parâmetros calculados para o conversor estão mostrados na Tabela III. Valores de capacitor e indutor foram escolhidos conforme proximidade do que está disponível comercialmente.

Simulações

O gráfico a seguir (figura 5), mostra uma simulação feita no programa PSim, de uma variação de irradiância no painel solar com o algoritmo de rastreamento de máxima potência funcionando.

Figura 5– Gráfico de Rastreamento de Máxima Potência – MPP.



Tabelas Comparativas e Considerações Referentes aos Boosts Simples e Entrelaçados

Visando expor a escolha do *boost* entrelaçado, apresentamos valores quantitativos (tabelas 4 e 5), baseadas em nossos testes e equações, comparando o *boost* simples com o *boost* entrelaçado. Nas considerações a seguir, não foram relevadas as perdas por comutação das chaves [5].

Tabela 4 – Comparativo Boost Entrelaçado e Boost Simples

	Entrelaçado	Simples
$P_{L1} = R_L I_{L,rms}^2$ (W) $P_{LT} = 3P_{L1}$ (no entrelaçado)	0.465821	3.7246
$P_D = V_F I_D + \frac{R_F}{M} I_{L,rms}^2$ (W)	3.3348	8.8301
$P_S = R_{DS} I_{S,rms}^2$ (W)	0.01259	0.1084
$P_X = C_X V_0^2 f_S$ (W)	0.122	0.122
$\eta = \frac{P_o}{P_o + P_{LT} + P_D + P_S + P_X} \cdot 100$ (%)	98.46%	95.13%

Tabela 5 – Comparativo Boost Entrelaçado e Boost Simples

	Entrelaçado	Simples
I_{in} (A)	2.7867	8.3661
I_{out} (A)	1.7061	5.1185
ΔI_L (A)	0.1393	0.4183
$I_{L,rms}$ (A)	2.7863	8.3609
I_S (A)	1.0804	3.2415
$I_{S,rms}$ (A)	1.7347	5.2062
$I_{D,rms}$ (A)	2.1804	6.5421

Considerações

Vantagens de um *boost* entrelaçado:

As correntes distribuídas pelos indutores são menores e isso faz com que as perdas relacionadas também sejam menores. A dissipação de potência sobre cada uma das chaves, também se torna menor por conta da divisão de corrente, devido ao entrelaçamento.

- ✓ Diminuir o *ripple* de saída da placa.
- ✓ Diminuir perdas.

O *boost* é o tipo de conversor que utiliza o menor número de componentes. Na aplicação específica, em que utilizamos uma tensão de painel menor que a tensão de bateria, ele se torna vantajoso. A escolha pela configuração entrelaçado, apesar de aumentar o número de chaves, diminui as perdas gerais, conforme mostrado na tabela.

B. Carga Eletrônica

Geralmente, os testes de descarga em baterias são feitos a partir de três métodos diferentes: descarga a corrente constante, potência constante ou resistência constante. O primeiro método é em geral realizado pelos fabricantes e divulgados nos manuais de operação. As curvas de descarga a corrente constante mostram o desempenho das baterias em uma série de regimes de descarga. Peixoto [10], sugere

métodos para a montagem e estimação de ciclos de descarga a corrente constante.

Apesar da amplamente utilizado pelos fabricantes de baterias, as especificações da comissão técnica do DSB sugerem que as melhores escolhas para avaliar as baterias que participam da competição são os testes constantes e à potência constante.

O primeiro porque o método se assemelha àquele já utilizado na Dutch Solar Challenge, competição que serviu de inspiração para a criação do DSB. Nesta, uma resistência fixa é calculada a partir do valor nominal do banco de baterias e da potência estabelecida para a competição [11]. A equação abaixo nos dá resistência de referência:

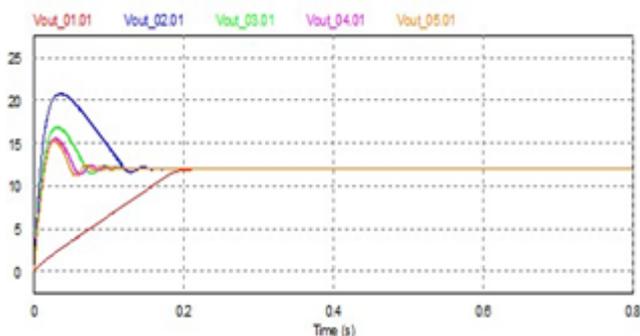
$$R_{ref} = \frac{V_{nom}^2}{P_{ref}}$$

Análises e Simulações

Uma forma alternativa a descarga constante é fazer o ensaio utilizando a potência constante. Se fixarmos uma potência de referência, nesse caso os 1,5 kW estabelecidos pela regra da competição. A vantagem de se fazer o ensaio à potência constante é que não é necessário estabelecer um valor diferente de resistência para cada configuração de tensão diferente.

A análise das tensões de entrada (Figura 6), ou seja, tensões fornecidas pelas baterias nas configurações de 12V (vermelho), 24V(azul), 36V(verde), 48V(rosa) e 60V(laranja) conforme foram escolhidos seguindo as especificações da competição, expostos anteriormente. Analisando as tensões de saída, é possível perceber que elas convergem para o valor de tensão que dão a descarga à potência de referência.

Figura 6 – Tensões de saída



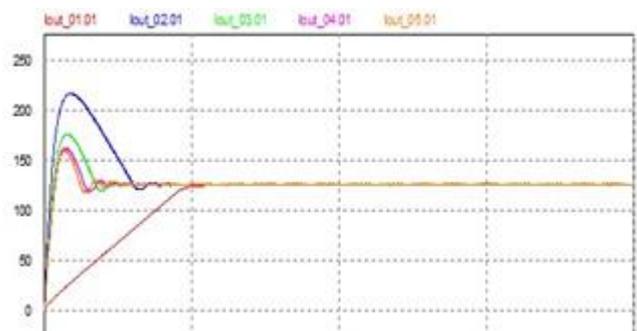
Assim como a tensão de saída, a potência também apresenta um regime transitório curto e posteriormente estabiliza em 1500W conforme pretendido. É nesta potência constante que a bateria deverá ser descarregada (Figura 7).

Figura 7 – Potência de saída



A corrente de saída (Figura 8), que segue qualitativamente a mesma tendência das curvas de potência, já que o projeto utiliza uma carga resistiva. O transitório também dura 0,2 segundos, no entanto, a maior corrente de pico excede os 200A. É necessário que os componentes eletrônicos a serem montados suportem esta brusca variação e corrente.

Figura 8 – Corrente de saída



Por fim, o controle de *gate* da chave *MOSFET* foi feito por PWM (Pulse Width Modulation) a partir de um bloco de código de linguagem de programação C. Como deve-se manter uma potência a descarga constante, o código funciona a partir do rastreamento do ciclo de trabalho, baseado em uma potência de referência, assemelhando-se com o método P&O utilizado anteriormente.

IV. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os projetos desenvolvidos ao longo do ano corrente terão continuidade após o término das competições no Desafio Solar Brasil, tendo em vista o melhoramento da

tecnologia, sempre buscando soluções mais eficientes no que concerne a maximização da energia disponível. Alguns dos trabalhos serão objeto de estudo de monografias de integrantes da equipe, fomentando a pesquisa científica. A documentação e publicação do material produzido servirá como embasamento para que futuros membros da equipe desenvolvam o trabalho de tornar a embarcação mais competitiva a cada ano.

V.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] MOHAN, Ned; UNDELAND, Tore M. **Power electronics: converters, applications, and design**. John Wiley & Sons, 2007.
- [2] PINHO, João T.; GALDINO, Marco A. Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. **Rio de Janeiro: Cepel-Cresesb**, 2014.
- [3] DE SOUZA, Jefferson Ribeiro. **PROJETO DE MPPT PARA UMA EMBARCAÇÃO SOLAR FOTOVOLTAICA**. 2016. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- [4] MOÇAMBIQUE, Nilton Eufrazio Martinho. **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**. 2012. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- [5] JÚNIOR, P. A. S. **Conversor CC-CC Boost Entrelaçado Aplicado no Processamento de Energia de Arranjo Solar Fotovoltaico**. 2011. Tese de Doutorado. Dissertação de Mestrado.
- [6] SALAMONI, Isabel et al. O Potencial dos sistemas fotovoltaicos integrados à rede edificação e interligados à rede elétrica em centros urbanos do Brasil: Dois estudos de caso. **Universidade Federal de Santa Catarina**, 2004.
- [7] COELHO, ROBERTO F.; CONGER, FILIPE M.; MARTINS, DENIZAR C. Estudo Comparativo Entre Conversores Estáticos Operando como Rastreadores de Máxima Potência em Sistemas Fotovoltaicos. In: **Research Article presented in XVIII Congresso Brasileiro de Automatica-September**. 2010.
- [8] DE ENERGIA-NPEE, Núcleo de Processamento. Conversor CC-CC Bidirecional em Corrente ZVZCS PWM com Grampeamento Ativo.
- [9] PATEL, UmaShankar; SAHU, MsDhaneshwari; TIRKEY, Deepkiran. Maximum power point tracking using perturb & observe algorithm and compare with another algorithm. In: **International Journal of Digital Application & Contemporary Research Conference**. 2013.
- [10] PEIXOTO, Rafael Lima. **Monitoramento da Descarga de Bateria com o uso de Microprocessador ARM**. 2012. Tese de Doutorado. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO.
- [11] <http://www.dutchsolarchallenge.nl/media/cms_page_media/11/Technical%20Regulations%202016%20version%2024-May-15.pdf> Acesso em: 15.mar.2016