

PROJETO DE MPPT PARA UMA EMBARCAÇÃO SOLAR FOTOVOLTAICA

Jefferson Ribeiro de Souza Barbosa

Universidade Federal do Rio de Janeiro

RESUMO

O presente trabalho mostra o desenvolvimento de um conversor eletrônico utilizado em uma embarcação cuja propulsão é elétrica e a fonte de energia é solar fotovoltaica. Este conversor processa a energia proveniente do arranjo fotovoltaico conectado em sua entrada e carrega um banco de baterias utilizado na propulsão da embarcação. São apresentados o projeto e a implementação do circuito de potência e do controlador do conversor. São feitas, ainda, breves revisões teóricas acerca dos principais métodos de rastreamento da máxima potência e do comportamento de baterias de chumbo-ácido. Além disso, é realizada uma descrição do Controlador Digital de Sinais utilizado para implementação do controlador e de seu ambiente de desenvolvimento. O circuito de potência consiste em um conversor *boost* projetado a partir de uma ponte trifásica de MOSFET's, já o controlador é desenvolvido através de simulações em computador e possui algoritmos para proteção do banco de baterias e para o rastreamento da máxima potência do arranjo fotovoltaico, caracterizando um MPPT. São apresentados os resultados dos testes feitos a partir implementação do projeto e, por fim, mostra-se o comportamento do MPPT durante sua utilização no Desafio Solar Brasil 2015.

Palavras Chaves: MPPT, Conversor CC-CC, Barco Solar, Rastreamento da Máxima Potência.

MPPT PROJECT FOR A PHOTOVOLTAIC SOLAR POWERED BOAT

ABSTRACT

The present work shows the development of an electronic converter used in a boat with electric propulsion and a solar photovoltaic energy source. This converter processes the energy coming from the PV array that is connected into it and loads a battery bank, which will be used to propulsion the boat. The project and the implementation of the power circuit and the converter controller are presented. There are also brief theoretical revisions about the main methods of maximum power tracking and lead acid batteries behavior. The Digital Signal Controller used to implement the controller and its development environment are described too. The power circuit consists of a boost converter designed from a three-phase MOSFET bridge. The controller is developed through computer simulations and it has algorithms to protect the battery bank and to track the maximum power of the PV array, which makes it an MPPT. The results of the tests made with the project implementation are presented and, lastly, the work shows the MPPT behavior during its use in the Brazil Solar Challenge 2015.

Keywords: MPPT, DC-DC Converter, Solar Boat, Maximum Power Tracking.

1. INTRODUÇÃO

Este artigo se destina a descrever o desenvolvimento de um dos equipamentos constituintes de uma embarcação com propulsão elétrica cuja alimentação é garantida por meio da energia solar fotovoltaica. Esta embarcação participa do Desafio Solar Brasil (DSB), uma competição que reúne barcos ainda em nível de protótipo, que tem como objetivos, entre outros, o desenvolvimento tecnológico e a popularização das fontes alternativas de energia. (DESAFIO SOLAR BRASIL, 2016)

Desde a última década, as baterias vêm sofrendo grandes mudanças de ordem tecnológica e econômica, tornando-se cada vez mais leves e com menores dimensões, além de mais baratas. Há, ainda, um novo aspecto, a preocupação ambiental, que outrora não existia e hoje está cada vez mais presente. Os sistemas de propulsão puramente elétricos não emitem localmente gás carbônico (CO₂), o gás que é apontado como um dos responsáveis pelo efeito estufa, que leva ao aquecimento global. Essa é uma razão para que desde a última década busquem-se soluções que diminuam a emissão de gás carbônico. Ressalta-se que ainda há possibilidade de emissão de CO₂ provocada pela fonte

primária da energia elétrica utilizada nos sistemas de propulsão puramente elétricos. Tal possibilidade se extingue apenas se a fonte primária for renovável.

O desenvolvimento de soluções totalmente elétricas para propulsões navais parece encontrar um contexto cada vez mais favorável. Uma possibilidade adicional, que tornaria ainda mais atrativo o uso de um sistema elétrico de propulsão seria a utilização de um sistema não poluente que recarregasse as baterias durante a utilização da embarcação, o que aumentaria a autonomia sem prejudicar o meio-ambiente.

Uma das maneiras de ter recarregamento sem emissão de poluentes durante o uso da embarcação é através da utilização de um sistema fotovoltaico. Nesse sistema, os equipamentos para propulsão são os mesmos que um sistema elétrico comum, porém são alimentados por baterias que podem ser carregadas por meio de um arranjo fotovoltaico e um controlador de carga.

O objeto deste trabalho é um tipo de controlador de carga, denominado seguidor do ponto de potência máxima (SPPM ou MPPT do inglês *maximum power point tracker*), que rastreia a máxima potência que pode ser fornecida pelo arranjo fotovoltaico interligado à sua entrada, buscando transferir essa máxima potência ao banco de baterias conectado em sua saída. (VILLALVA e GAZOLI, 2012)

O objetivo do artigo é descrever o projeto e a implementação de um conversor eletrônico CC-CC que processa a energia proveniente de um arranjo fotovoltaico e carrega um banco de baterias, para alimentar o sistema de propulsão elétrico de uma embarcação. O controle do conversor possui um algoritmo que rastreia a máxima potência do arranjo fotovoltaico, tratando-se, assim, de um rastreador do ponto de máxima potência (MPPT). (PINHO e GALDINO, 2014)

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, foi escolhida a topologia de conversor CC-CC *boost* entrelaçado, cujo chaveamento é feito por intermédio de MOSFET's.

O MPPT conta com proteções que garantem o funcionamento do banco de baterias dentro de suas especificações. Tais proteções devem desligar o MPPT caso o nível de tensão ou corrente de carga no banco de baterias superem os valores especificados pelo fabricante.

O circuito de controle do MPPT tem como principal componente um Controlador Digital de Sinais (DSC, do inglês, *Digital Signal Controller*). O modelo utilizado é o TMS320F28335 (Delfino) da Texas Instruments. É através dele que é feita a implementação digital do controlador. Há, ainda, os sensores, a placa de expansão com circuitos de condicionamento de sinais, interfaces analógicas e digitais, e o circuito de acionamentos dos MOSFET's (*gate drive*). Além disso, deve possuir, também, uma interface homem máquina (IHM) que mostre se o funcionamento está correto, que permita o desligamento/religamento manual e que possibilite o reinício do chaveamento, também, manual.

A figura 1 mostra esquematicamente como funciona o MPPT.

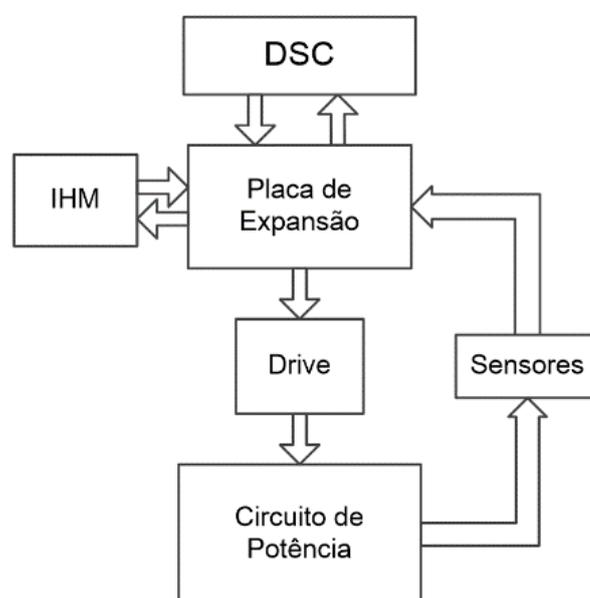


Figura 1 –Diagrama esquemático de funcionamento do MPPT

2. CIRCUITO DE POTÊNCIA

A figura 2 apresenta o circuito com o qual o trabalho foi desenvolvido. O suprimento de energia na entrada vem de um arranjo fotovoltaico e a saída a energia é conectada em um

banco de baterias. A tensão de entrada é V_{pv} (tensão nos terminais do arranjo fotovoltaico) e a tensão de saída é V_{bat} (tensão nos terminais do banco de baterias). Como será descrito a seguir, o comando (PWM) dos MOSFETs é feito de tal maneira que cada perna chaveia em um instante diferente das outras, fazendo com que se tenha um conversor que opera em modo entrelaçado.

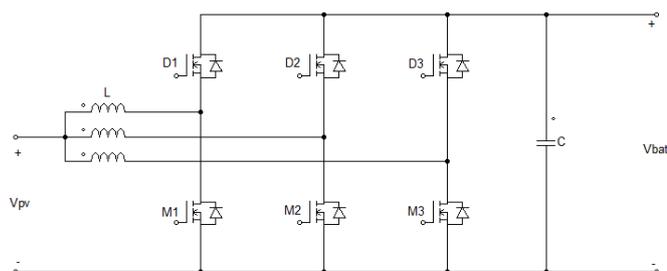


Figura 2 – Conversor boost entrelaçado

O conversor deve operar no modo de condução contínua, as relações desenvolvidas aqui vão considerar este modo de operação. Dada a frequência de chaveamento (f), o período será (RASHID, 1999)

$$T_s = \frac{1}{f} \quad (1)$$

O *duty cycle*¹ (D) é a razão, dentro de um período, entre o tempo que a chave (MOSFET) conduz e o tempo total do período. A relação entre o D e as tensões V_{pv} e V_{bat} , no modo de condução contínua, é dada por (MOHAN, 2009)

$$\frac{V_{bat}}{V_{pv}} = \frac{1}{1-D} \quad (2)$$

Para garantir que o conversor se mantenha no modo de condução contínua, cada indutor deve apresentar valor de indutância mínima dada por (MOHAN, 2009)

$$L_{mín} = \frac{T_s V_{bat}}{2I_{bat}} D(1-D)^2 \quad (3)$$

A capacitância mínima do capacitor que garante o *ripple* da tensão de saída (ΔV_{bat}) dentro dos limites estabelecidos pode ser encontrada da seguinte maneira (MOHAN, 2009)

$$C_{mín} = \frac{I_{bat} D T_s}{\Delta V_{bat}} \quad (4)$$

Ressalta-se que com o conversor *boost* operando em modo entrelaçado, o *ripple* é menor que o encontrado em um conversor *boost* simples.

As equações (1), (3) e (4) mostram que quanto maior for a frequência de chaveamento, menor será T_s e menores, também, serão a capacitância do capacitor necessária para se obter o *ripple* desejado² e a indutância do indutor para garantir a operação no modo de condução contínua³, porém o aumento da frequência de chaveamento leva ao aumento das perdas. Portanto, é necessário haver um compromisso entre esses fatores para a escolha da frequência de chaveamento.

2.1. Especificações

A potência nominal do conversor é de 1 kW (de acordo com a potência do arranjo fotovoltaico, em torno de 1 kWp, que deve ser conectado em sua entrada) e a tensão nominal de saída (V_{bat}) é de 36 V. A frequência de chaveamento (f) escolhida foi de 10 kHz, V_{pv} foi especificado entre 28,5 V e 31,1 V, já o V_{bat} , apesar do seu valor nominal, pode variar entre 31,5 V e 42 V. O valor da frequência de chaveamento foi escolhido em um compromisso para se ter um *ripple* pequeno, uma baixa corrente mínima para o modo de operação em condução contínua e ao mesmo tempo para que as perdas por chaveamento não sejam grandes. (OPTIMA YELLOWTOP D51R, 2015; JINKO JKM260-P, 2015)

A partir da equação (2), foi estabelecido que os valores implementados de D deveriam oscilar entre 0 e 0,35. Por fim, foi necessário especificar os valores da indutância (L) e da capacitância (C) utilizados no circuito da figura 2. Com auxílio das equações (3) e (4) e com especificação de *ripple* de 0,5 % e I_{bat} mínima de 0,28 A (1% da corrente nominal) foram escolhidos os seguintes valores: L igual a 1 mH e C igual a 6800 μ F.

A tabela I resume as especificações do conversor.

TABELA I – ESPECIFICAÇÕES DO CONVERSOR <i>BOOST</i>		
	Faixa de Valores	Valor Nominal

¹ Também conhecido como "ciclo de trabalho" ou "razão cíclica".

² Ou menor será o *ripple*, se a capacitância já estiver definida.

³ Ou menor será a corrente se a indutância já estiver definida.

Potência	-	1 kW
f	-	10 kHz
D	0 a 0,35	-
V_{pv}	28,5 – 31,1 V	-
V_{bat}	31,5 – 42 V	36 V
L	-	1 mH
C	-	6800 μ F

3. CIRCUITO DE CONTROLE

O controlador desenvolvido neste trabalho é implementado em um Controlador Digital de Sinais (DSC), que é um microcontrolador cuja unidade de processamento é um DSP, ou seja, conta com arquitetura específica que reduz o número de instruções e operações necessárias em algoritmos de processamento de sinais. O DSC utilizado no projeto do MPPT é o TMS320F28335 da Texas Instruments, ele também será chamado neste trabalho de F28335.(VIEIRA, 2013)

3.1. O Controlador Digital de Sinais

O F28335 possui entradas e saídas digitais (GPIO), saídas PWM, entradas de comunicação A/D, comunicação serial, entre outras características.(DSC TMS320F28335, 2016)

Para o desenvolvimento deste trabalho foi utilizado o PSIM, que é um software projetado para simulações em eletrônica de potência. Uma característica importante que o PSIM possui é que ele foi projetado para trabalhar diretamente com o F28335. Todo o circuito de potência e todo o controlador desenvolvido neste trabalho foram simulados no PSIM. (PSIM, 2016)

A programação do DSC é feita através do Code Composer Studio, software para desenvolvimento de sistemas embarcados, criado pela própria Texas Instruments, que possui otimização do compilador C/C++, editor de código fonte, ambiente de construção do projeto, depurador, entre outras características. A integração entre o Code Composer Studio e o PSIM é realizada através da ferramenta SimCoder do PSIM, nela um código contendo todo o software de controle simulado é gerado. Esse código deve ser importado para o Code Composer Studio, onde é embarcado no DSC.

3.2. A Placa de Expansão

A placa de expansão é responsável por fazer a intermediação na comunicação com o DSC. Ela traz funcionalidades que facilitam as possibilidades de uso do F28335, além de possuir circuitos que condicionam os sinais recebidos por sensores.

Entre as funcionalidades presentes na placa de expansão, estão relés cujas entradas de comando (bobinas de acionamento) estão diretamente ligadas a portas GPIO do DSC. Um desses relés é usado no projeto para acionar um LED que indica o correto funcionamento do MPPT. A placa de expansão também possui terminais destinados à conexão de botões que servem como comando, tais terminais estão interligados a portas GPIO. Um desses terminais é utilizado para a conexão de um botão de reinício manual do chaveamento do MPPT.

Existem, ainda, circuitos de instrumentação eletrônica que têm como função condicionar os sinais recebidos dos sensores de tal forma que possam ser lidos pelo conversor A/D do F28335. Além disso, as portas PWM e as portas GPIO não conectadas aos relés e aos terminais dos botões ficam disponíveis em um conector separado.

3.3. O Drive

Para controlar as chaves eletrônicas, lembrando que no presente projeto tratam-se de MOSFET's, o DSC enviará os sinais por meio das portas PWM e/ou GPIO. Entretanto, esses sinais não estão na forma adequada ou não possuem potência suficiente para o controle dos MOSFET's. Assim, o drive deve receber a informação do DSC e condicioná-la de tal forma que o controle das chaves eletrônicas possa acontecer de acordo com o sinal vindo do DSC.

4. SOFTWARE DE CONTROLE

Todo o funcionamento do MPPT é definido por um controlador que deve determinar o valor de cada parâmetro de saída a cada instante de acordo com os valores instantâneos dos parâmetros de entrada. Todo o desenvolvimento do controlador foi feito no PSIM, fazendo

uso de sua biblioteca específica de integração com o DSC TMS320F28335 da Texas Instruments.

Esse controlador é implementado internamente no MPPT, e para que funcione corretamente é necessário que as ligações dos componentes físicos do sistema que utilizará o MPPT e também nas simulações ocorram conforme mostra a figura 3.

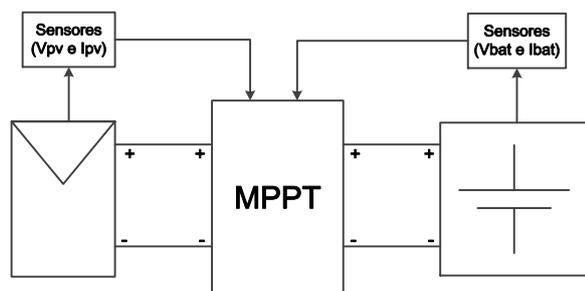


Figura 3 –Ligação dos componentes

Ressalta-se que a inserção de uma carga, como um motor, interligada ao banco de baterias não altera o correto funcionamento do MPPT.

O controlador projetado tem como objetivo controlar o chaveamento dos MOSFET's. Esse controle é feito a partir do processamento das informações de corrente e tensão do arranjo fotovoltaico e do banco de baterias. Como resultado é obtida a definição da razão cíclica de modulação de cada MOSFET do conversor CC-CC.

O controle dos MOSFET's é realizado através da modulação por largura de pulso (PWM, do inglês, *Pulse-Width Modulation*) quando o conversor está ativado, ou mantendo um único estado quando o conversor está desativado, no caso o de não condução, por meio de portas digitais. Além disso, o controlador deve manter indicado, através de um LED, o estado de funcionamento de MPPT e, por fim, deve ter um botão que permita o reinício manual. Na figura 4 há um diagrama esquemático mostrando as entradas e saídas do controlador.



Figura 4 –Diagrama esquemático do controlador

4.1. Rastreamento da máxima potência

Em um arranjo fotovoltaico a geração de energia elétrica é intermitente e sofre forte influência da nebulosidade e da temperatura. Esses fatores fazem com que o ponto de operação que leva à extração da máxima potência do arranjo fotovoltaico mude constantemente. Assim, rastrear esse ponto de máxima potência (MPP, do inglês, *Maximum Power Point*) continuamente é uma forma de garantir uma maior eficiência na conversão de energia. O método empregado no projeto do MPPT foi o P&O com modificação no algoritmo original para que se obtivesse uma rápida convergência no rastreamento do ponto de máxima potência. A escolha desse método ocorreu pela simplicidade da aplicação e pelos satisfatórios resultados obtidos em simulação. (COLLARES, 2012)

O algoritmo P&O possui uma lógica na qual se observa o efeito de uma perturbação na tensão, ou seja, a tensão é aumentada ou diminuída. Caso a potência fornecida pelo arranjo fotovoltaico aumente, a perturbação deve ser mantida no mesmo sentido, caso a potência diminua, a perturbação deve ser feita no sentido contrário. Na figura 5, encontra-se um diagrama de fluxo que mostra o funcionamento do método P&O. (SOBREIRA JR, 2011)

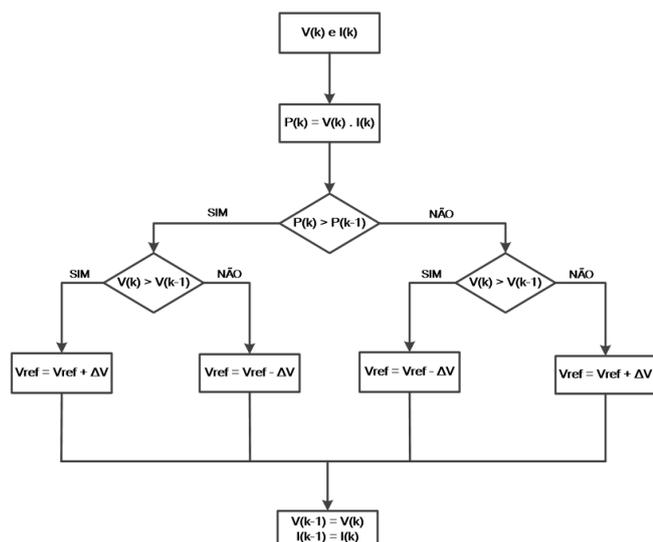


Figura 5 –Algoritmo P&O

4.1.1. Implementação do rastreamento do MPP

A implementação do algoritmo P&O foi realizada de tal forma que se perturbava o valor de referência (V_{ref}) e, em seguida, verificava-se a potência, tal qual o previsto no método escolhido. No entanto, foi incluída uma limitação em V_{ref} . Essa limitação foi necessária porque foi verificado que muitas vezes o V_{ref} assumia valores elevados, fazendo com que, quando fosse preciso inverter o sinal do incremento, houvesse uma grande demora na convergência. A limitação corrigiu esse problema.

O V_{ref} é utilizado para calcular qual o valor de razão cíclica (D) do controle por PWM deve ser implementado naquele instante. O cálculo do D a cada iteração é feito conforme a seguinte equação:

$$D = \frac{V_{bat} - V_{ref}}{V_{bat}} \quad (5)$$

Ou seja, a referência V_{ref} substitui a variável V_{pv} .

Já a potência é calculada utilizando a tensão V_{pv} medida pelo sensor e a corrente I_{pv} , também medido pelo sensor, da seguinte maneira

$$P = V_{pv} \times I_{pv} \quad (6)$$

Assim, ajusta-se o valor V_{ref} de acordo com o rastreamento da potência. Com isso o controle do chaveamento é realizado através da definição do *duty cycle*.

É importante salientar que esse controle ocorre para os MOSFET's M1, M2 e M3. Destaca-se, ainda, que cada um desses MOSFET's é acionado com uma diferença de um terço do período de chaveamento (T_s), um em relação ao outro. Isso faz com que nenhum dos três MOSFET's sejam acionados simultaneamente.

Os MOSFET's D1, D2 e D3 devem ficar na condição de bloqueio durante todo o tempo. Para que isso aconteça, são utilizadas portas digitais de saída que devem garantir que esses MOSFET's terão nível lógico baixo em seus *gates*.

Como forma de garantir que o MPPT não vai operar fora de sua faixa nominal de operação, um limitador de *duty cycle* que não permite que o D fique fora da faixa estabelecida na tabela 1 é adicionado na saída do bloco que contém o código de rastreamento da máxima potência.

Tem-se na figura 6 um gráfico obtido a partir de uma simulação do MPPT que mostra a potência máxima possível do arranjo fotovoltaico simulado e a potência que o MPPT consegue extrair. A variação da potência máxima possível foi obtida ao se variar a temperatura e a insolação na simulação.

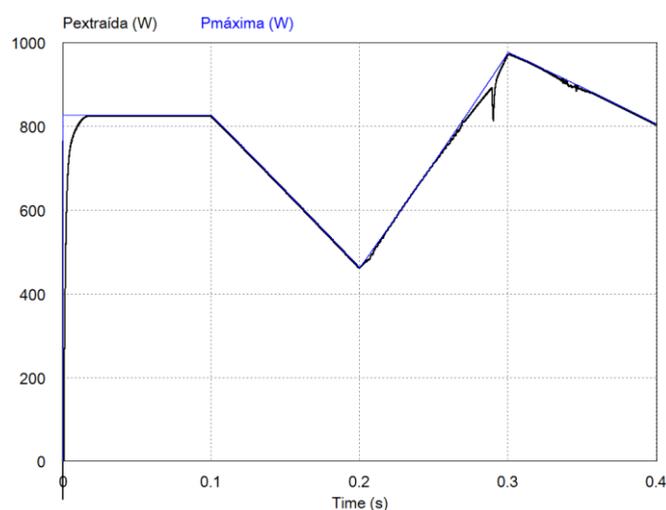


Figura 6 –Gráfico da simulação do rastreamento do MPP

4.2. Proteções do banco de baterias

O MPPT trabalha injetando corrente no banco de baterias, que, por sua vez, impõe a tensão na saída do conversor. Não

há qualquer restrição ou imposição de tensão ao banco de baterias, justamente por serem as baterias as responsáveis por definir a tensão de saída do MPPT.

Conforme é carregada, ou seja, recebe corrente, uma bateria aumenta o seu nível de tensão. Similarmente, conforme descarrega, ou seja, fornece corrente, uma bateria tem seu nível de tensão reduzido. Assim o valor de tensão é um bom indicativo da carga de uma bateria de chumbo-ácido.

O MPPT descrito nesse trabalho pode, caso não haja algo que o impeça, injetar mais corrente que o necessário para manter o estágio de flutuação nas baterias interligadas a ele. A consequência disso é que a tensão pode subir para níveis muito maiores que os limites recomendados pelos fabricantes e danificar as baterias. Outra causa de possíveis danos é o carregamento com correntes acima do recomendado pelos fabricantes

Foram projetadas proteções que limitam a corrente de carga e a tensão do banco de baterias. As proteções atuam paralisando o chaveamento, isso interrompe o fluxo de potência do arranjo fotovoltaico para o banco de baterias. Assim, as baterias param de receber corrente. Outro ponto importante projetado é que, uma vez que, uma das proteções tenha atuado, o MPPT só volta a chavear caso haja uma ação manual de reinício.

A lógica de atuação das proteções está resumida na figura 7. Para que o conversor volte a operar após a proteção atuar, é necessário que o operador reinicie o chaveamento manualmente. Isso ocorre acionando uma chave denominada I/O.

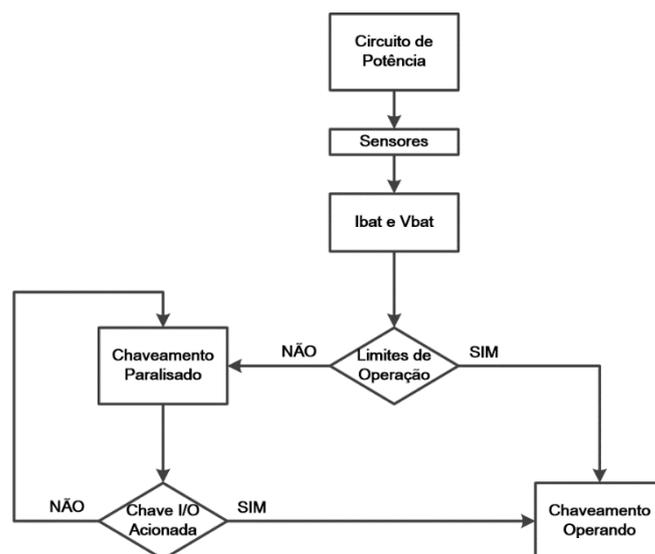


Figura 7 –Lógica de atuação das proteções

Para a verificação do funcionamento das proteções, foram realizadas simulações em que a ligação dos componentes ocorreu conforme mostrou a figura 3. Os resultados dessas simulações são apresentados nas figuras 8 e 9.

4.2.1. Proteção para excesso de tensão

A proteção só deve atuar se a bateria estiver sendo carregada. Em uma situação na qual o MPPT esteja operando, mas houver uma carga ligada ao banco de baterias que esteja consumindo a potência fornecida pelo MPPT e ainda esteja descarregando as baterias, o controlador verifica, através do sentido da corrente, que o banco de baterias está fornecendo corrente e não aciona a atuação da proteção, pois a carga que consome corrente da bateria atua diminuindo a sua tensão e não há, portanto, necessidade de paralisar o fornecimento de energia através do MPPT.

O gráfico da figura 8 mostra a atuação da proteção quando se faz necessário e, também, mostra quando a proteção não deve atuar, mesmo que o nível de tensão exceda o valor recomendado.

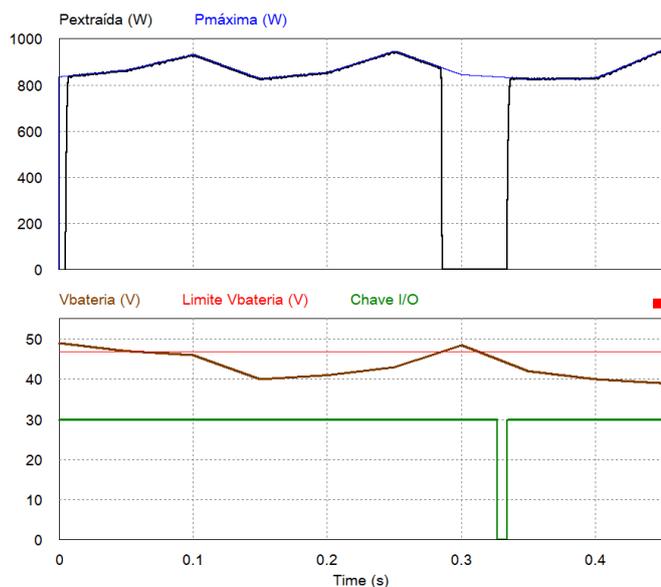


Figura 8 –Atuação da proteção de tensão

No gráfico superior da figura 8 está a potência extraída pelo MPPT do arranjo fotovoltaico e a potência máxima disponível, já no gráfico inferior é mostrado o limite de tensão para o banco de baterias simulado, além da tensão desse banco. Há ainda a representação de uma chave que define se o MPPT deve ou não chavear. Quando a chave está em nível alto, o MPPT chaveia normalmente, extraindo potência do arranjo fotovoltaico, quando está em nível baixo, não chaveia.

No início da simulação a tensão do banco de baterias é superior ao limite, no entanto, as baterias estão descarregando e, conseqüentemente, a tensão está caindo. Nessa situação, o MPPT deve permanecer operando e a proteção não deve atuar. É exatamente o que o gráfico mostra.

A partir do instante 0,284 s, a tensão do banco de baterias volta a ficar superior ao limite, porém dessa vez em condição de carregamento. Nessa situação, a proteção atua, fazendo com que o MPPT pare de extrair potência do arranjo fotovoltaico. Ele só volta a operar normalmente após ter sido reiniciado, como indica a curva da chave de controle, no instante 0,33 s.

4.2.2. Proteção para excesso de corrente

A proteção deve identificar se há uma corrente de carga acima do limite estabelecido. Caso haja, deve paralisar o chaveamento do MPPT sem a necessidade de modificar o

valor limite como acontece no caso da tensão. A única ressalva é que deve ser identificado o sentido da corrente, pois baterias possuem um limite relativamente baixo para corrente de carga, mas não para corrente de descarga. Além disso, o MPPT nunca será responsável por uma grande descarga.

Na figura 9 é apresentado o resultado da simulação para diferentes situações de corrente no banco de baterias.

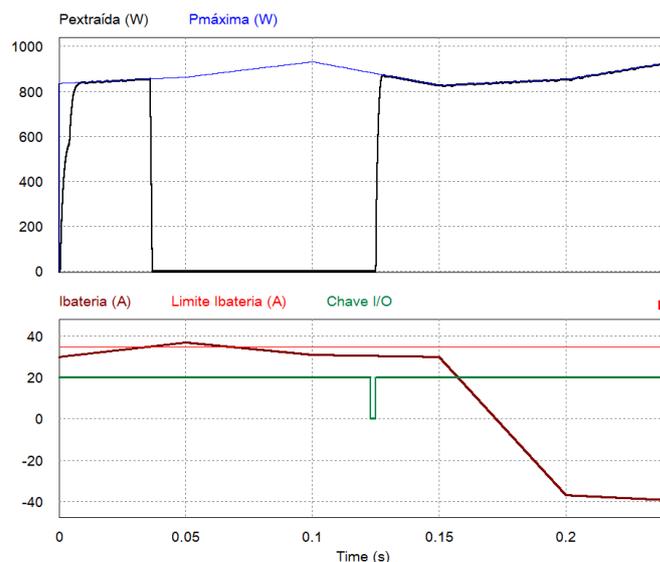


Figura 9 –Atuação da proteção de corrente

O gráfico da figura 9 mostra que a proteção de corrente atua somente quando o valor excedido é positivo. A partir de 0,2 s a corrente possui módulo superior ao limite estabelecido, porém com sinal negativo. Isso corresponde a uma situação de descarga da bateria. Nessa situação a proteção não atua e o chaveamento continua normalmente. O reinício do chaveamento do MPPT ocorre por uma ação manual, como mostra a curva da chave.

4.3. IHM (interface homem-máquina)

A interface homem-máquina (IHM) do MPPT possui duas ligações com o controlador. Essas ligações ocorrem por meio da placa de expansão, conforme pode ser observado na figura 8. Uma das ligações é a partir de uma porta digital de saída que aciona um LED que permanece aceso enquanto o MPPT está chaveando e apaga caso pare de chavear. A outra ligação se dá por uma porta digital de entrada ligada ao terminal de

um botão na placa de expansão e serve para reiniciar o chaveamento do MPPT, ou seja, é a chave I/O.

4.4. Diagrama esquemático completo

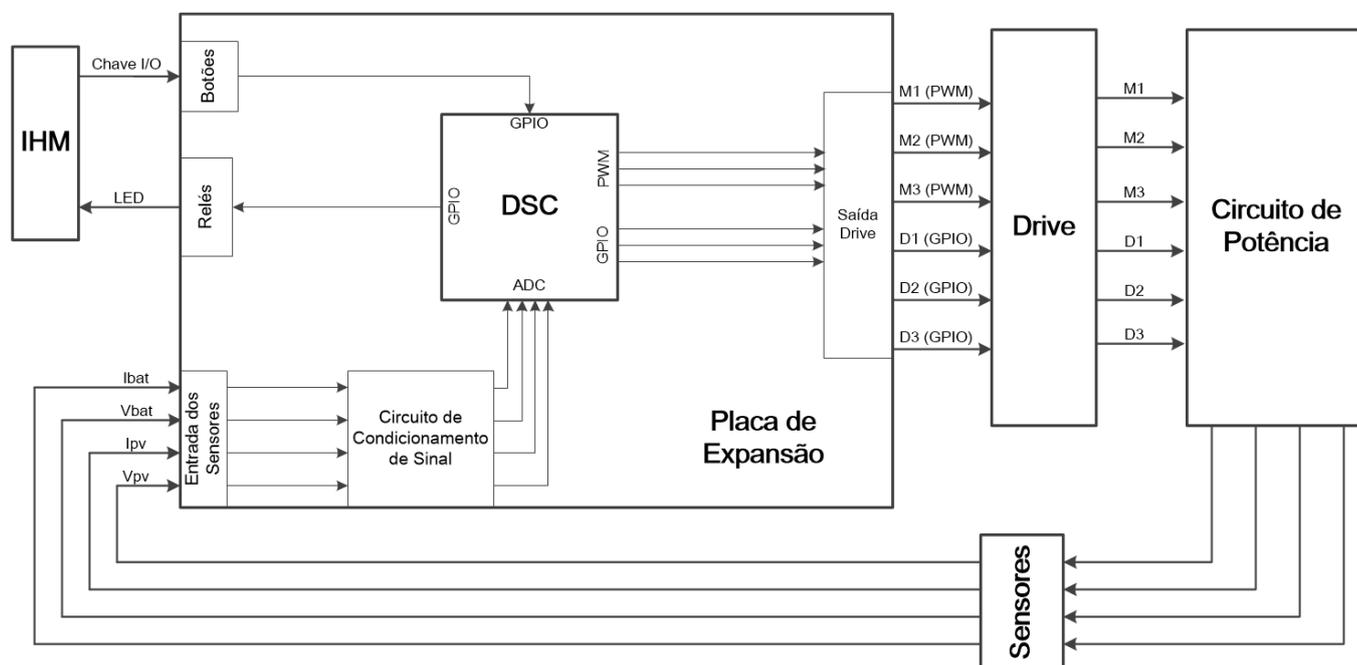


Figura 10 –Diagrama esquemático completo

5. IMPLEMENTAÇÃO

Para a implementação do controlador projetado, o código gerado no PSIM foi importado para o F28335. No entanto para que o controlador tenha as informações sobre o estado da tensão e da corrente do arranjo fotovoltaico e do banco de baterias a cada instante é necessário que haja um eficiente sistema de monitoramento. Com o código do controlador carregado no DSC e o sistema de monitoramento implementado, iniciou-se a etapa prática de testes. Os testes realizados verificaram o comportamento do conversor CC-CC, ainda sem o rastreamento da máxima potência e, também, após o rastreamento ser ativado. Foi feito, também, um breve estudo sobre a eficiência do MPPT.

Após todos os testes práticos realizados, o MPPT foi utilizado em sua destinação inicial, no caso no catamarã Mangue.

5.1. Monitoramento

A figura 10 mostra o diagrama esquemático completo de funcionamento do MPPT. Toda simulação no PSIM e implementação prática do projeto foram feitas de acordo com o que mostra o diagrama.

O sistema de monitoramento conta com sensores de tensão e corrente que utilizam como princípio de funcionamento o efeito *Hall*. Esses sensores informam em seus terminais de leitura um determinado valor de tensão para cada valor lido (seja de corrente ou tensão). Os terminais de leitura dos sensores estão interligados a circuitos de instrumentação presentes na placa de expansão. O objetivo desses circuitos é rejeitar ruídos e condicionar os valores para que sejam lidos pelo conversor A/D do DSC. Por fim, é feita a leitura no DSC e os valores ficam disponíveis para o controlador. A figura 11 é uma síntese do que foi descrito.



Figura 11 –Funcionamento do monitoramento

Antes de serem implementados, os sensores precisam ser calibrados para se encontrar, para cada sensor, uma equação

que faça a correspondência entre o valor lido pelo controlador e o valor real.

5.2. Testes

Foram realizados testes que verificaram a resposta do conversor CC-CC a diferentes situações de tensão de entrada e de carga. Foi verificado que o conversor CC-CC necessita em média de 80 W para funcionar quando opera com a potência nominal de 1 kW. A eficiência, portanto, é de 92 % nessa condição de operação.

Os testes mencionados no parágrafo anterior foram realizados sem que a função para rastrear o ponto de máxima potência fosse ativada. Após essa etapa foi realizada a última etapa de testes, já com a função de rastreamento ativada, ou seja, foi testado o MPPT, propriamente dito.

5.3. Resultados dos testes

Em virtude do exíguo tempo disponível para o desenvolvimento do MPPT, uma vez que era necessário que o projeto fosse implementado a tempo de ser utilizado no DSB 2015, não foram realizados testes na quantidade esperada para um novo equipamento

Os testes do MPPT foram feitos com duas configurações. Em ambas as configurações eram utilizados dois módulos MSX-77 da Solarex ligados em série, cujo arranjo tem as seguintes características, em STC:

- $P_{m\acute{a}x}$: 154 W
- V_{mpp} : 33,8 V
- I_{mpp} : 4,56 A

O que diferenciou as configurações foram os bancos de baterias utilizados, ambos formados por baterias OPTIMA YELLOWTOP modelo D51R. Um dos bancos possuía três baterias e tensão de 36 V, já o outro banco possuía 4 baterias e tensão de 48V.

Era importante verificar se não haveria mudança significativa no ponto de operação do arranjo fotovoltaico, mesmo que a tensão no banco de baterias fosse modificada. A tabela II exibe os resultados obtidos:

TABELA II – TESTE COM FUNÇÃO MPPT

Configuração 1		Configuração 2	
Potência (W)	130	Potência (W)	132
Tensão (V)	32,1	Tensão (V)	32,2
Corrente (A)	4,05	Corrente (A)	4,10

É notável que o rastreamento da máxima potência foi realizado em ambas as configurações. Destaca-se que os testes foram feitos com o tempo nublado, o que fez com que os valores da máxima potência fossem inferiores ao mostrado pelo fabricante em condições STC.

5.4. Funcionamento em condições reais

O MPPT foi implementado em condições reais de uso, ou seja, na embarcação para a qual se destina, no caso o catamarã Mangue. A ligação dos componentes se deu conforme apresentado na figura 3, com a diferença de haver a carga em paralelo com a bateria. Com essa implementação foi possível verificar o comportamento do MPPT durante um longo período de operação e em condições desfavoráveis de instalação, sobretudo em relação à temperatura e à vibração. Além disso, a alocação do MPPT se dá dentro da mesma caixa que conta com outros equipamentos elétricos e eletrônicos, tornando a questão da interferência no sinal dos sensores algo também relevante. Infelizmente não foram coletados dados de tensão e corrente de maneira sistematizada.

Nas condições reais de uso, o MPPT teve comportamento muito próximo com o apresentado nos testes em bancada e nas simulações, fazendo o rastreamento da máxima potência, fato verificado comparando a tensão de operação do arranjo fotovoltaico e a tensão especificada pelo fabricante do painel fotovoltaico utilizado. Essa tensão de operação não se alterava conforme a tensão da bateria oscilava, a alteração da tensão ocorria somente quando havia mudança de temperatura e insolação. Esse fato mostra que o conversor estava seguindo o ponto de máxima potência. Ressalta-se que a tensão da bateria muitas vezes sofria oscilações rápidas seja quando o nível de carga estava elevado (oscilação para cima)

ou quando o motor da embarcação estava sendo utilizado com um alto nível de potência (oscilação para baixo).

O sistema de proteção funcionou como o previsto no projeto. Por muitas vezes a tensão do banco de baterias subia para valores acima dos limites estabelecidos, tal fato ocorria porque a bateria estava totalmente carregada e continuava recebendo injeção corrente. Nessas situações, o conversor paralisava o chaveamento e só retornava com o acionamento da chave manual.

O IHM também teve funcionamento adequado. O MPPT só funcionava com a chave manual acionada e o LED ficava acesso enquanto ocorria chaveamento e apagava sempre que uma proteção atuava, paralisando o chaveamento, ou a chave manual desligava o MPPT.

Não houve qualquer problema com interferência causada por outros equipamentos elétricos e eletrônicos presentes na caixa estanque do catamarã Mangue e nem com a vibração a que o MPPT foi submetido durante o DSB 2015.

O único contratempo apresentado se deu pela alta temperatura durante a operação. Isso levou à danificação de uma trilha que interligava um dos indutores ao MOSFET's do circuito de potência. A solução encontrada foi refazer a ligação desse indutor através de uma solda direto no ponto de conexão com o circuito de potência, sem passar pela trilha. Após este fato, foi implementado um sistema de ventilação forçada para que o MPPT funcionasse adequadamente e não houvesse danos aos componentes dos circuitos. Mesmo após este incidente, o MPPT continuou a funcionar corretamente.

5. CONCLUSÃO

O MPPT foi utilizado nas provas do Desafio Solar Brasil 2015. O que permitiu uma avaliação bastante completa de seu comportamento em condições extremas e por um longo tempo. Conforme mencionado, a única questão que efetivamente trouxe problemas foi a temperatura. Por conta disso, foi necessário inserir ventilação forçada na caixa que abriga o MPPT. Após essa modificação, o funcionamento foi normal.

O rastreamento da máxima potência foi confirmado através da verificação da tensão de operação dos painéis fornecidos

pela organização da competição. As proteções também atuaram corretamente.

Assim, todas as etapas deste trabalho foram cumpridas. Desde o projeto, passando pelas simulações e testes, até chegar ao uso em condições reais do MPPT.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

COLLARES, F. S., *Comparação quantitativa de métodos de paralelismo de módulos fotovoltaicos com a rede elétrica para geração distribuída através do controle de conversores de potência*. Dissertação de Mestrado, UFMG, Belo Horizonte, MG, Brasil, 2012.

Folha de dados da bateria OPTIMA YELLOWTOP D51R. Disponível em <http://d26maze4pb6to3.cloudfront.net/optimabatteries/4713/4583/5068/YELLOWTOP_Full_Specs_Sheet.pdf> Acesso em 30/12/2015.

Folha de dados do painel JINKO JKM260-P. Disponível em <http://www.phb.com.br/PDFs/Produtos/Solar/Kits/US-MKT-260P-60B_v1.0_rev2015.pdf> Acesso em 29/12/2015.

Manual do Controlador Digital de Sinais TMS320F28335. Disponível em <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tms320f28335.pdf>> Acesso em 20/01/2016.

MOHAN, N.; UNDELAND, T. M.; Robbins, W. P.; *Eletrônica de potencia: Convertidores, aplicaciones y diseño*. 3ed. Cidade do México: McGrawHill, 2009.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A.; *Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos*. 2ed. Rio de Janeiro: CEPEL-CRESESB, 2014.

PSIM: Simulador de conversores estáticos. Disponível em <<http://intranet.ctism.ufsm.br/gsec/Apostilas/psim.pdf>> Acesso em 27/03/2016.

RASHID, M. H., *Eletrônica de potência: circuitos, dispositivos e aplicações*. 2ed. São Paulo: Makron Books,1999.

Sítio do Desafio Solar Brasil. Disponível em <<https://desafiosolar.wordpress.com/odesafio/objetivos/>>

Acesso em 20/01/2016.

SOBREIRA JR., P. A., *Conversor CC-CC boost entrelaçado aplicado no processamento da energia de arranjo solar fotovoltaico*. Dissertação de Mestrado, UFJF, Juiz de Fora, MG, Brasil, 2011.

VIEIRA, L. P., *Guia de Utilização do Controlador Digital de Sinal TMS320F28335*. Monografia, UFJF, Juiz de Fora, MG, Brasil, 2013.

VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R.; *Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações*. 1ed. São Paulo: Érica, 2012.