

ESTUDO DAS CONEXÕES DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS APLICADOS EM BARCOS SOLARES

Clovis Antonio Petry – petry@ifsc.edu.br

Flávio Alberto Baldemaker Batista – flabio@ifsc.edu.br

André Dzis Giacomini – andregiacomini@gmail.com

Guilherme Goularte da Silva – guilherme.goularte@yahoo.com.br

Rodolfo Levien Corrêa – rodo.levien@gmail.com

Instituto Federal de Santa Catarina, Campus Florianópolis, Departamento Acadêmico de Eletrônica

Resumo. Este artigo apresenta um estudo sobre as possíveis configurações de conexões de módulos fotovoltaicos aplicados em barcos solares. Um conjunto de quatro módulos de baixa potência (10 Watts) foram conectados de diferentes modos e ensaios foram realizados, por meio de um sistema de aquisição de dados elaborado para esta finalidade. Foram realizados ensaios conectando os módulos (aos pares) em série e em paralelo, comparando-se os resultados obtidos com o desempenho do módulo individual. Ao final, pode-se concluir sobre a potência gerada pelo sistema sob diferentes condições de sombreamento e irradiação solar, além das variações paramétricas de elementos de mesmas características. Constatou-se que o arranjo em paralelo permite obter maiores potências em comparação com o arranjo série e série-paralelo de módulos fotovoltaicos.

Palavras-chave: Conexão de Módulos Fotovoltaicos, Circuito Série e Paralelo com Módulos Fotovoltaicos, Barco Solar

1. INTRODUÇÃO

No cenário atual de geração de energia elétrica, o Brasil depende do fluxo de água dos rios para suprir a demanda nacional. Isto ocorre devido à existência de fatores geográficos que facilitam a construção de usinas hidrelétricas, como o grande volume de água existente na bacia hidrográfica do país. De acordo com o Ministério de Minas e Energia, a matriz de energia elétrica mais utilizada no Brasil em 2012, foi a hidráulica, com 76,9% de participação na produção total de energia (Brasil, 2013). Essa dependência na energia hidroelétrica é benéfica no sentido da não utilização de combustíveis fósseis, fato que coloca o Brasil entre os países que menos emitem gases de efeito estufa. Em contra ponto, essa dependência é prejudicial em duas situações. Primeiramente em períodos do ano quando o fluxo de água não é suficiente para suprir a quantidade de energia demandada. Em segundo lugar, quando se consideram os grandes impactos ambientais que estão relacionados à implantação de usinas hidrelétricas. Ambas as desvantagens mencionadas são dilemas da atualidade do Brasil, este que, por ser considerado uma economia emergente, precisará cada vez mais de energia elétrica e não poderá ignorar outros meios de geração de energia (Hinrichs, 2011).

A substituição de uma matriz energética limpa, como a energia hidráulica, pela energia proveniente de matérias-primas não-renováveis como o carvão, petróleo, gás natural e urânio, pode ser a melhor opção para o Brasil em relação custo-benefício em comparação a fontes de energias renováveis. Porém é preciso ressaltar que a geração de energia elétrica através da utilização de combustível fóssil é fortemente criticada por ambientalistas, comunidade acadêmica e mídia, devido a emissões de gases de efeito estufa e ao recente caso da contaminação radioativa causado pelo super aquecimento dos reatores nucleares da usina de Fukushima, após o tsunami de 2011 no Japão.

Por esses motivos, estudos atuais em universidades de todo o mundo tem o objetivo de aumentar a relação custo-benefício no uso de energia renovável, sendo que esta relação só pode crescer se a eficiência na geração desse tipo de energia também aumentar (Villalva, 2012 & Hinrichs, 2011).

A utilização de combustível fóssil no setor de transportes é outro fator que destaca a importância dos estudos para o desenvolvimento da energia renovável. De acordo com o balanço energético nacional de 2013, 31,3% da energia obtida através de fontes não renováveis foi parcela do setor de transportes. Além deste fato, o setor foi responsável por 48,8% das emissões totais de gás carbônico (Brasil, 2013).

Influenciado pelo atual interesse em energias renováveis aplicadas ao setor de transportes, o Pólo Náutico da Universidade Federal do Rio de Janeiro lançou em 2009 o Desafio Solar, uma competição de corrida entre barcos movidos a energia solar. No ano de 2013, o Instituto Federal de Santa Catarina teve sua primeira participação no Desafio Solar em Búzios com a equipe Zênite Solar (DSB, 2013).

Este trabalho consiste no estudo do arranjo de módulos fotovoltaicos a serem conectados em série ou paralelo para suprirem energia para um barco solar, com potência da ordem de 1.000 Watts. O enfoque dado à pesquisa é a investigação do comportamento dos módulos e suas associações sob mesmas condições de temperatura e iluminação, mas considerando-se suas variações paramétricas reais. Assim, pretende-se concluir sobre qual associação de módulos tem melhor desempenho e buscar identificar as possíveis variações paramétricas dos elementos e que afetam a potência final do sistema.

A principal motivação para a realização do presente trabalho consiste na falta de estudos sobre as variações paramétricas de módulos fotovoltaicos em condições reais de operação e sua influência na potência total de um conjunto de módulos associados em série, paralelo ou série/paralelo.

Este trabalho está organizado nos seguintes tópicos: Capítulo 2 – Apresentação de uma síntese sobre o circuito elétrico de um barco solar, com suas principais partes e elementos constituintes; Capítulo 3 – Abordagem teórica sobre módulos fotovoltaicos e suas conexões; Capítulo 4 – Metodologia e *setup* para a realização dos testes com os módulos fotovoltaicos; Capítulo 5 – Resultados obtidos; Capítulo 6 – Conclusões.

2. BARCO SOLAR

Um barco propulsado por energia solar é formado por um conjunto de subsistemas e elementos que tornam possível a captura da energia elétrica gerada pelos módulos fotovoltaicos e seu armazenamento em elementos armazenadores específicos. No diagrama de blocos mostrado na Fig. 1, podem-se notar os principais elementos de um barco solar:

- Conjunto de módulos fotovoltaicos – sistema formado por um (1) ou mais módulos fotovoltaicos;
- Controlador de carga – circuito eletrônico responsável por processar a energia gerada pelos módulos fotovoltaicos realizando a carga dos elementos armazenadores de energia (baterias);
- Acionamento – circuito para acionar o motor de corrente contínua a partir da energia disponibilizada pelos módulos fotovoltaicos e baterias;
- Motor de corrente contínua – motor específico para prover o torque necessário à movimentação da embarcação. Pode ser submerso ou não, dependendo de sua tecnologia de fabricação;
- Baterias – elementos responsáveis por armazenar a energia gerada pelos módulos fotovoltaicos;
- Sistema de transmissão – acoplamento mecânico entre o motor de corrente contínua e o hélice responsável por provocar a força de deslocamento do barco;
- Sistema de segurança – circuitos e elementos responsáveis pela proteção do usuário, especificamente o piloto da embarcação;
- Sistemas de direção – são os elementos necessários para a direção (esquerda, direita, frente e ré) do barco, atuando no acionamento do motor de corrente contínua;
- Sistema de supervisão – circuitos eletrônicos responsáveis pela comunicação entre o usuário, visto que o barco será tripulado;
- Casco da embarcação – elemento estrutural de suporte e abrigo aos demais componentes anteriormente descritos. Pode ser de fibra de vidro, fibra de carbono, ou outro material que seja leve e resistente mecanicamente.

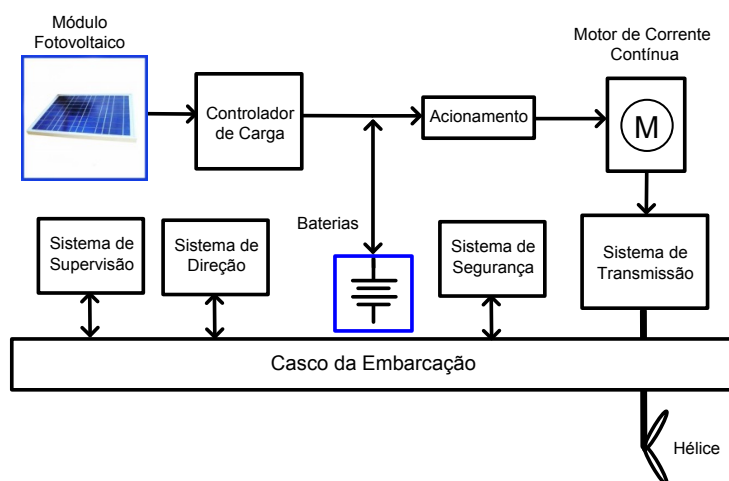


Figura 1 – Diagrama de blocos de um barco solar.

Por sua vez, o circuito elétrico, na forma de diagrama de blocos, de um barco solar, é mostrado na Fig. 2, onde podem-se notar o conjunto de módulos fotovoltaicos, os elementos armazenadores de energia (baterias) e a carga (motor de corrente contínua).

3. ASSOCIAÇÃO DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Os elementos fotovoltaicos que geram corrente elétrica são denominadas de células fotovoltaicas (Coelho, 2008). As células são associadas formando módulos e sua associação constitui um módulo fotovoltaico. Na Fig. 3 é mostrada a fotografia de um módulo fotovoltaico de 240 W da Kyocera Solar, modelo KD240GH-2PB. Estes módulos foram utilizados no Desafio Solar Brasil 2013 na cidade de Búzios, Rio de Janeiro. Assim, a potência do conjunto de quatro módulos resulta em 960 W, suficiente para o sistema elétrico do Barco Solar, que é estimado para 1.000 W.

A partir das especificações de cada módulo fotovoltaico, pode-se conceber a conexão do conjunto, sendo possível arranjos do tipo série, paralelo e misto, ou seja, alguns módulos conectados em série, outros em paralelo, e suas sub-associações novamente conectadas em série e/ou paralelo.

Em (Coelho, 2008) foi realizada uma análise teórica, considerando o circuito elétrico equivalente dos módulos e suas associações, concluindo-se que: Conexão série – a tensão resultante do conjunto é a soma das tensões individuais de cada módulo. A corrente do conjunto será determinada pelo módulo de menor corrente; e Conexão paralela – a corrente do conjunto será a soma das correntes individuais dos módulos. A tensão resultante será determinada pelo módulo com menor tensão.

A análise realizada em (Coelho, 2008) não leva em conta variações paramétricas entre os módulos e/ou condições de sombreamento. Assim, em (Oliveira Reiter, 2012) foi realizado um estudo comparativo das conexões série e paralela de doze módulos, permitindo 8 configurações distintas. O foco daquele trabalho foi estudar o comportamento do conjunto sob condições de sombreamento parcial. Conforme esperado, com diversos módulos em série, quando alguns ficam cobertos parcialmente, a potência resultante do conjunto diminui, visto a corrente na conexão série ser determinada pelo elemento de menor corrente.

O trabalho aqui proposto visa realizar o estudo da conexão série e paralela de módulos, medindo-se seu desempenho instantaneamente por meio de circuito eletrônico especialmente construído para este fim. Percebeu-se em estudos prévios que as condições ambiente afetam em demasia os ensaios realizados em estudos comparativos de conexão série e paralela de módulos, pois os mesmos são sujeitos à variações de irradiação solar e de temperatura (Chamberlin, 1995).

De acordo com os estudos teórico e prático de (Heckheuter, 2001), existem perdas de potência na associação de elementos fotovoltaicos devido a não identidade dos módulos associados. Estas perdas são amplificadas quando existe sombreamento nos módulos associados, ou seja, quando um ou mais módulos do arranjo recebem menor radiação solar comparado aos demais módulos, as perdas do conjunto de módulos serão maiores que a soma das perdas dos módulos separados. Isto ocorre devido ao surgimento de pontos quentes em algumas regiões dos módulos que irão funcionar como parte da carga aos módulos mais iluminados, gerando perdas de potência ou até danificando as células fotovoltaicas definitivamente (Quaschnig & Hanitsch, 1996). Há também o efeito conhecido pelo termo em inglês de *Mismatch losses* (perdas por incompatibilidade), o qual sugere a existência de diferentes magnitudes em perdas de potência em arranjos série comparada à arranjos em paralelo, porém não tão significativos segundo o experimento realizado por Chamberlin (1995).

Por isso, o *setup* proposto permitirá realizar testes em um conjunto de módulos de pequena (10 W) e média (240 W) potência, terá capacidade para operar com dois arranjos fotovoltaicos simultaneamente, medindo-se a corrente e tensão do arranjo, além de sua temperatura.

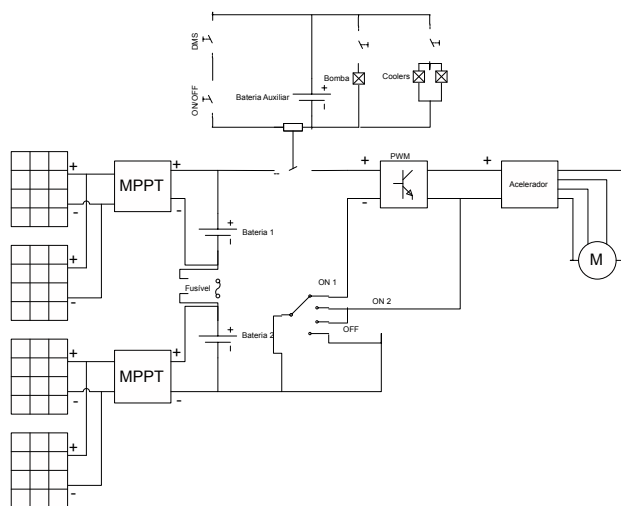


Figura 2 – Circuito elétrico de um barco solar.

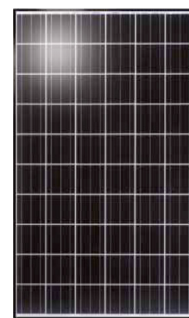


Figura 3 – Imagem de um módulo fotovoltaico.

Fonte: <http://www.kyocerasolar.com.au>

4. METODOLOGIA E *SETUP* PARA TESTES

4.1 Metodologia

A realização deste trabalho seguiu algumas grandes etapas, denominadas aqui de diretrizes metodológicas, descritas a seguir.

Inicialmente foram realizados experimentos com módulos de pequena potência, visto serem de menor custo e estarem acessíveis, enquanto os módulos efetivamente utilizados nas competições dos barcos solares só estarem à disposição das equipes durante as competições e serem de alto custo. Assim, a partir dos testes iniciais, desenvolvidos

medindo-se corrente e tensão nos módulos, empregando multímetros convencionais, notou-se a necessidade de implementar um circuito para medição destas características elétricas dos módulos, além de sua temperatura, visando a realização de testes cuidadosos e com os diversos módulos associados submetidos à mesma condição de iluminação e temperatura. Estes testes iniciais não serão apresentados neste documento, visto não permitirem se extrair uma conclusão cientificamente válida sobre qual associação de módulos fotovoltaicos teria melhor desempenho conforme os objetivos propostos para o projeto.

A seguir realizou-se uma revisão da literatura, notando-se que as publicações abordam essencialmente o comportamento dos módulos sob diferentes condições de iluminação, mas não permitem se concluir sobre seu comportamento sob mesma iluminação e temperatura, sob influência apenas das variações paramétricas dos elementos constituintes do conjunto. Assim, concebeu-se um circuito de aquisição de dados para ensaio de módulos e suas associações sob condições de mesma temperatura e iluminação.

A partir da construção do circuito proposto, parte-se para a realização de ensaios com os módulos fotovoltaicos, inicialmente realizando-se uma validação do *setup* montado, a partir de medições em módulos de pequena potência, comparando-se os valores obtidos com aqueles divulgados pelo fabricante na folha de dados dos elementos. Esta fase de testes é denominada de “validação dos testes”. A seguir, realiza-se testes visando a comparação de resultados de potência obtida com arranjos similares de módulos fotovoltaicos, mas sob condições diferentes de iluminação. Por sua vez, testes objetivando a comparação entre associações de módulos fotovoltaicos conectados em série e paralelo, sob condições de diferenças de temperatura e iluminação são realizados. Por fim, realizam-se os testes com os arranjos de módulos fotovoltaicos conectados em série e em paralelo sob condições de mesma temperatura e iluminação, visando o estudo de diferenças paramétricas entre os mesmos.

4.2 Setup para Testes

Os módulos analisados dentro do escopo deste trabalho foram diferentes para cada etapa de estudo. Na primeira etapa de análise de associação de módulos fotovoltaicos, foram utilizados módulos pequenos de 10 W sendo que a situação ideal seria a utilização dos módulos usados no desafio, porém não é possível o acesso a tais módulos devido ao seu elevado custo. Além disto, o uso de módulos de pequeno porte facilita o manejo e a disposição dos mesmos na área de testes. Os módulos considerados na segunda etapa foram os mesmos utilizados na etapa do desafio de Búzios em 2013. A Tab. 1 apresenta as especificações técnicas de cada módulo.

Tabela 1 – Características elétricas dos módulos fotovoltaicos ensaiados.

	KS10T – Primeira etapa	KD240GX – Segunda etapa
Potência Máxima	10 W	240 W
Tensão de Máxima Potência	17,4 V	29,8 V
Corrente de Máxima Potência	0,58 A	8,06 A
Tensão de Circuito Aberto	21,7 V	36,9 V
Corrente de Curto-Circuito	0,63 A	8,59 A

O diagrama de blocos do circuito desenvolvido para os testes de campo está mostrado na Fig. 4, onde nota-se a presença dos sensores de corrente, em número de dois, para permitir a medição de corrente simultaneamente em dois módulos ou dois conjuntos deles (arranjo). Tem-se a presença de quatro sensores de tensão, que permitirão a medição de tensão sobre quatro elementos distintos. Além disso, o sistema possui medição de temperatura.

A interface com o usuário é realizada por meio da plataforma de desenvolvimento Arduino (Lima e Villaça, 2012) que permitirá ao usuário alterar as configurações do sistema e ter acesso aos dados medidos por meio do terminal do computador pessoal. Já na Fig. 5 mostra-se o esquemático do circuito desenvolvido, onde pode-se notar a presença dos elementos descritos acima.

Ainda, é importante destacar que para se obter a corrente e tensão de um módulo fotovoltaico sob condições de carga, deve-se variar a impedância conectada em seus terminais, ou nos terminais do conjunto de módulos. Por isso, o circuito desenvolvido incorpora uma fonte de corrente controlada por tensão, que recebendo do microcontrolador (Arduino) um sinal de referência, aplicará no módulo uma determinada carga, permitindo a obtenção dos diversos pontos de sua curva, como foi descrito por (Santos, Petry e Lima, 2011).

a) Medição de Corrente

O sensor de corrente utilizado foi o LTS6-NP. Este sensor mede a corrente fornecendo uma tensão proporcional em sua saída, com valores na faixa de 0,5 a 4,5 V, sendo zero Ampères a tensão de 2,5 V. Se a corrente variar negativamente nas bobinas do sensor a tensão passa para valores abaixo de 2,5 V, e vice-versa para correntes positivas. A Eq. (1) define a tensão de saída do sensor em função de sua corrente:

$$V_{out}=2,5\pm\left(\frac{0,625\cdot I}{3}\right) \quad (1)$$

Assim,

$$\pm I = \frac{(V_{out}-2,5) \cdot 3}{0,625} \quad (2)$$

A entrada em tensão do microcontrolador tem o limite de tensão de 3,3 V, então:

$$I = \frac{(3,3-2,5) \cdot 3}{0,625} = 3,84A \quad (3)$$

$$-I = \frac{(0-2,5) \cdot 3}{0,625} = -12A \quad (4)$$

O alcance do sensor de corrente vai de -12 A até 3,84 A, com esta informação pode-se calcular a precisão do sensor tendo também a informação da resolução da entrada do A/D (12 bits), resultando em: $-12A \rightarrow 3,84A = 15,84A$. A precisão do sensor será:

$$\text{Precisão do Sensor} = \frac{15,84}{4096} = 3,86mA \quad (5)$$

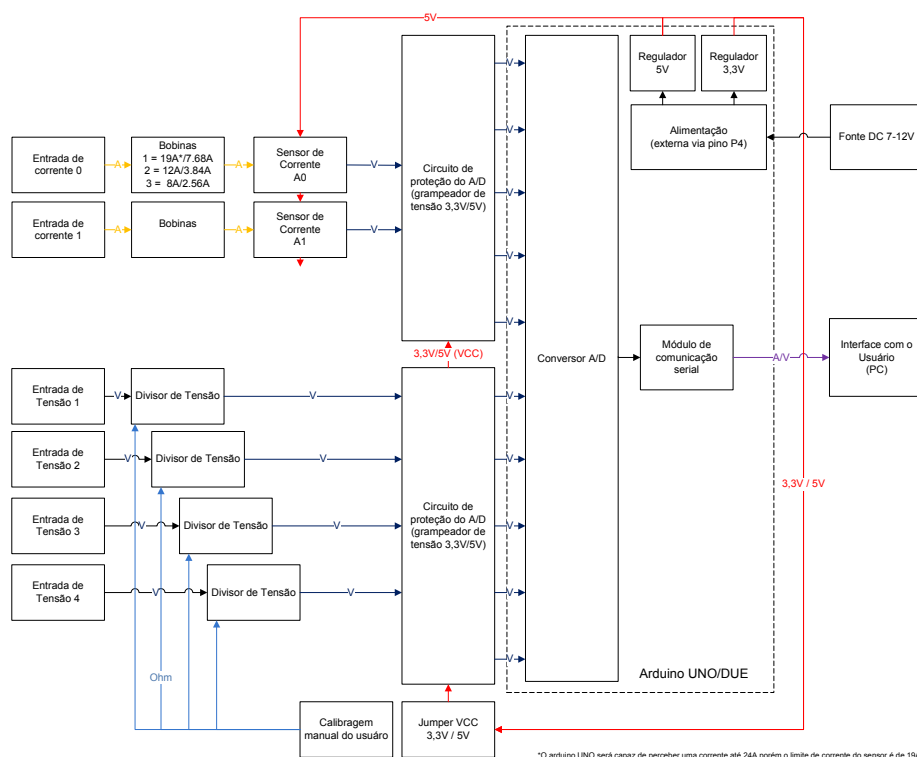


Figura 4 – Diagrama de blocos do *setup* para ensaio de módulos fotovoltaicos.

b) Medição de Tensão

A tensão máxima de entrada nos testes se dará na associação de dois módulos em série sendo o somatório das tensões de circuito aberto de cada, ou seja, $21,7V + 21,7V = 43,4V$. O sistema de aquisição de dados deve ser capaz de medir tensões até essa magnitude. Como já mencionado anteriormente, a entrada de tensão nos conversores A/D tem o limite em 3,3 V, então será necessário um divisor de tensão que adeque os altos níveis de tensão dos módulos para dentro da escala de tensão de 0 V a 3,3 V.

c) Fonte de Corrente Controlada Por Tensão

Enquanto os dados de tensão e corrente são armazenados é necessário que a carga do módulo em teste seja alterada ao ponto de $R_{carga} = \infty$ até $R_{carga} = 0$. O circuito da Fig. 6 possibilita que a corrente nos coletores nos transistores seja controlada através de um sinal de tensão em sua base. A magnitude deste sinal é controlada pela variação da razão cíclica de um sinal de PWM (modulação por largura de pulsos) na entrada positiva do amplificador operacional.

d) Filtro de Ruído de Alta Frequência nas Entradas A/D

Considerando o grande uso da eletricidade em equipamentos eletroeletrônicos, qualquer ambiente está sujeito a presença de campos eletromagnéticos. Não havendo a possibilidade de isolar totalmente cada circuito ou equipamento destes campos eletromagnéticos, resta a opção de projetá-los de modo a não interferir no funcionamento de um ao outro, ou, desenvolvê-los com a capacidade de filtrar interferências externas e através desta, obter somente o resultado esperado. Este problema ocorre nos sensores de tensão e corrente da placa de aquisição, sendo que a leitura dos conversores A/D fica instável sem a devida filtragem, ou seja, a variação do sinal em relação a sua magnitude real é muito elevada em decorrência de ruídos de alta frequência.

Existe uma solução simples para este problema que pode ser realizada em *software*, onde o filtro de média móvel irá somar N valores de entrada no A/D e realizar a média a fim de filtrar entradas ruidosas. O vetor de N valores irá sempre retirar o valor mais antigo e adicionar o valor mais novo no somatório e na média. A Fig. 7 a seguir mostra o mesmo sinal de tensão da leitura de um sensor de temperatura (LM35) em entradas analógicas diferentes (um com filtro de média móvel e outra sem o filtro).

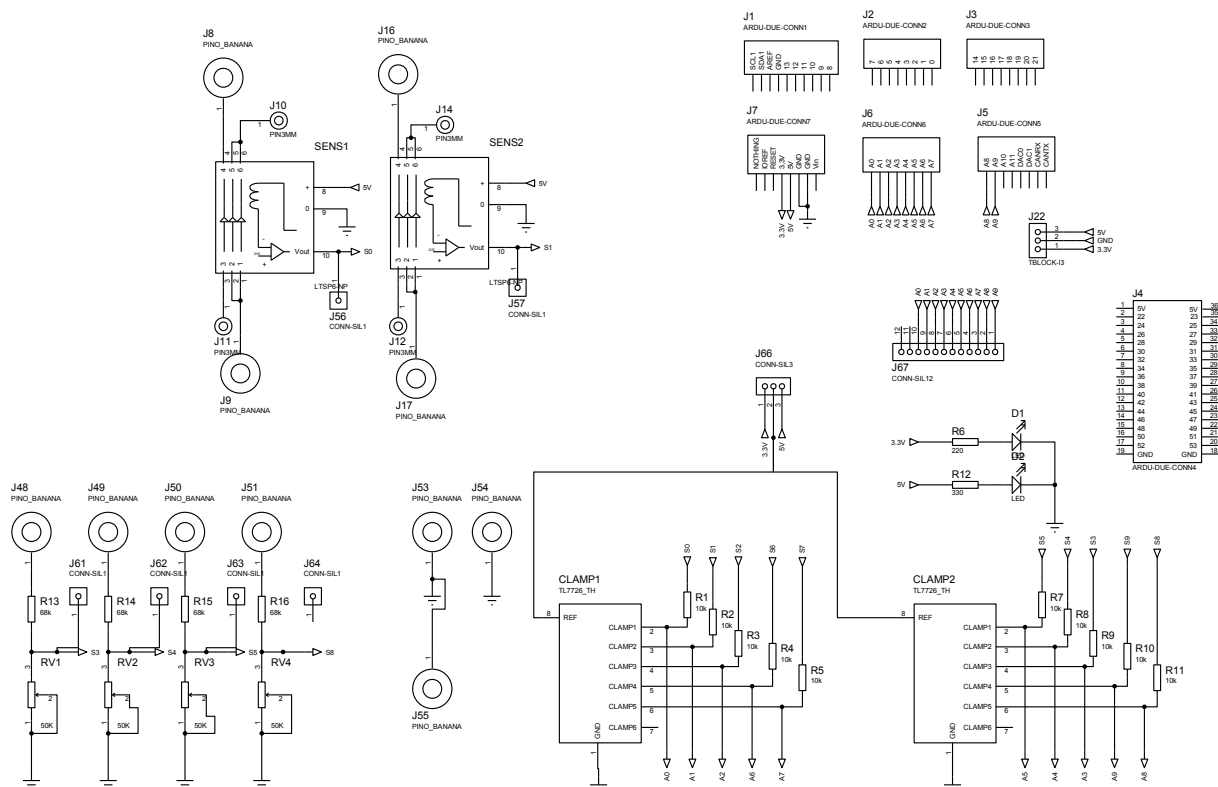


Figura 5 – Esquemático do *setup* para ensaio de módulos fotovoltaicos.

5. ENSAIOS DE LABORATÓRIO E CAMPO

5.1 Metodologia Empregada

O método aplicado consiste na aquisição de dados de potência de dois arranjos fotovoltaicos ao mesmo tempo e em condições similares de temperatura, iluminação e carga. Os dados de tensão e corrente serão enviados através de uma porta serial e armazenados na memória de um microcomputador. Duas fontes de corrente com características similares serão ativadas por um mesmo sinal PWM, ou seja, a carga de ambos os arranjos será variada de forma similar e ao mesmo tempo. Desta maneira, salvo interferências externas, os dois arranjos serão testados em condições similares, podendo-se assim retirar conclusões de eficiência na transmissão energética de um arranjo comparado ao outro. Para fins de praticidade, os módulos fotovoltaicos em teste serão chamados de “Arranjo A” e “Arranjo B” como mostra a Fig. 8, a seguir.

Esta figura representa à bancada de teste que foi montada a partir dos componentes da placa da aquisição de dados. A figura serve como complemento do diagrama detalhado da Fig. 5. O método de análise dos dados recebidos consiste em comparar os dados de potência sempre e somente dos dois arranjos em teste.

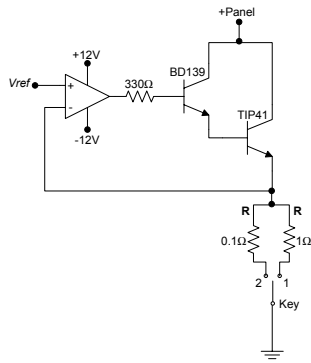


Figura 6 – Circuito da fonte de corrente controlada por tensão.

Fonte: (Santos, Petry e Lima, 2011).

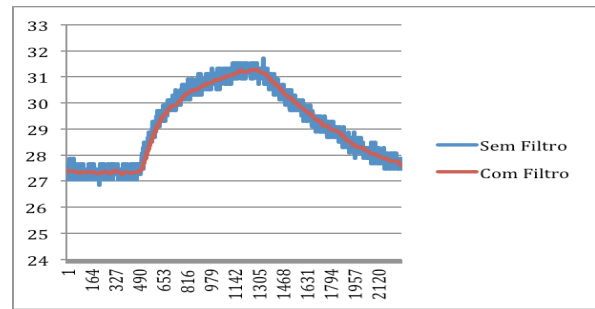


Figura 7 – Sinal de tensão sem e com filtro de média móvel.

5.2 Validação do Teste

As duas plataformas que irão testar os arranjos (fonte de corrente, sensores de tensão e de corrente) devem ter características iguais, ou seja, a leitura de tensão e corrente em uma plataforma deve ser a mesma leitura da outra. Seguindo o mesmo princípio, a fonte de corrente deve variar a corrente dos arranjos igualmente. Para garantir a confiabilidade nos resultados do teste, é necessário primeiramente validar e calibrar a plataforma de teste. Primeiramente será comparada a curva de potência adquirida pelo sistema com as curvas simuladas no *software* PSIM (<http://powersimtech.com>). O resultado obtido pode ser observado na Fig. 9. Nota-se que a curva da potência obtida na prática (real) confirma os resultados de simulação, o que caracteriza que o *setup* pode ser utilizado para os testes desejados. Também foram realizados testes sequencias, visando comparar os resultados obtidos em diferentes instantes de tempo. Nestes testes os resultados obtidos permitiram concluir sobre o funcionamento adequado do circuito implementado.

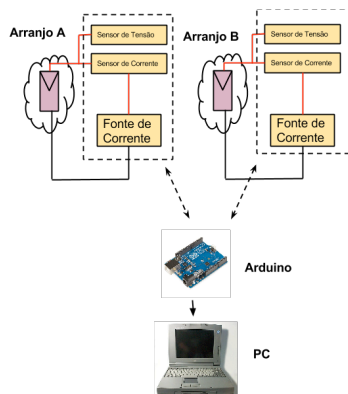


Figura 8 – Bancada de testes dos arranjos fotovoltaicos.

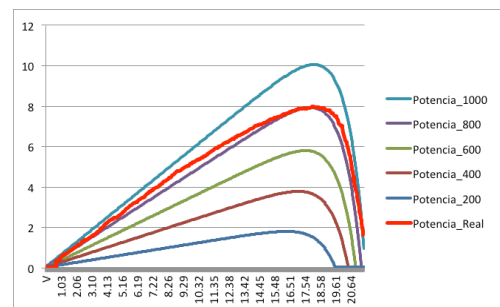


Figura 9 – Curvas de potência simuladas versus curva real medida em laboratório.

5.3 Calibração do Sistema

Ao adquirir os dados de cada módulo, foi possível calcular o erro de leitura entre os Arranjos A e Arranjos B. Este erro já era esperado, pois mesmo com os sensores e a fonte de corrente devidamente calibrados, não foi possível controlar todos os fatores externos do campo de teste, por exemplo, a temperatura de cada módulo era diferente, pois o vento resfriava os módulos de forma heterogênea. Os dados a seguir mostram como foi calculado o erro percentual de leitura do Arranjo A em relação ao Arranjo B. Por questão de praticidade, o ponto de comparação das curvas características dos módulos está situado onde sua máxima potência pode ser adquirida, já que a média do somatório entre os vários pontos da curva de potência resulta proporcionalmente no mesmo valor. Foram feitos três testes diferentes com dois módulos distintos aos testes anteriores para garantir um valor confiável para a calibração de erro de similaridade entre Arranjos. Tem-se que: MPA (A) → Máxima Potência Adquirida do Arranjo A; e MPA (B) → Máxima Potência Adquirida do Arranjo B.

Assim, foram realizados três testes, obtendo-se para o primeiro teste $MPA(A)=9,22W$ e $MPA(B)=8,69W$,

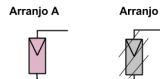
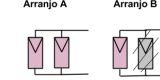
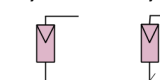
$$\text{Erro de leitura (\%)} = \left(1 - \frac{MPA(A)}{MPA(B)} \right) \cdot 100\% = \left(1 - \frac{9,22}{8,69} \right) \cdot 100\% = 6\% \quad (6)$$

Os erros dos testes 2 e 3 foram de 4%. O erro do Arranjo A em relação ao Arranjo B é de 4,66%, isto significa que ao final de cada teste, os resultados provenientes do Arranjo A foram considerados 4,66% menores que os resultados obtidos no Arranjo B.

5.4 Teste 1 – Comparação entre Potências Resultantes de Arranjos Similares em Diferentes Condições de Radiação Solar

Este teste foi concebido utilizando configurações de associações fotovoltaicas similares nos Arranjos A e B, porém com diferentes níveis de radiação solar sobre cada arranjo. A diferença de radiação aplicada a cada arranjo foi possível com o auxílio de um filtro composto por uma malha de fibra de vidro. Com este artifício, os raios de sol não foram totalmente bloqueados, pois o tecido atuou como uma “peneira”; dessa maneira a radiação em um dos arranjos foi atenuada sem os efeitos de sombreamento para com o mesmo. A Tab. 2 mostra os resultados dos testes realizados. É necessário ressaltar que as perdas foram calculadas em relação às perdas dos módulos sombreados separadamente. Assim, os testes com um ou mais módulos associados puderam ser comparados à situação de um módulo separado, lembrando que cada resultado dos testes do arranjo A e B tem utilidade de comparação somente com valores da mesma amostra de teste (método do teste de dois arranjos testados ao mesmo tempo em condições similares).

Tabela 2 – Ensaios realizados com os módulos fotovoltaicos sob diferentes condições de radiação solar.

Situação de Teste		P(A)	P(B)	(P(B) < P(A)) %
1 - Um módulo em Teste		8,75 W	5,37 W	39 %
2 – Dois módulos em Paralelo		8,52 W*	4,76 W**	44 %
3 – Dois painéis em Série		8,73 W*	2,75 W**	68 %
4 – Quatro módulos em Série-Paralelo		7,7 W ***	2,13 W *****	72 %

Onde:

$$* \left(\frac{P(A)_{TOTAL}}{2} \right) \quad ** \left(P(B)_{TOTAL} - \frac{P(A)_{TOTAL}}{2} \right) \quad *** \left(\frac{P(A)_{TOTAL}}{4} \right) \quad **** \left(\frac{P(B)_{TOTAL}}{2} - \frac{P(A)_{TOTAL}}{2} \right)$$

A última coluna da Tab. 2 expõe a perda percentual do arranjo B (menor radiação) em relação ao arranjo A (maior radiação), os dados do teste na situação 1 indicam que o módulo com menos radiação teve sua potência 39% menor que o módulo exposto à radiação maior. Na segunda situação (dois módulos em paralelo) a variação de potência no módulo sombreado foi 5% maior que a situação 1. Da mesma forma, as variações de potências foram ainda maiores para as situações em série e série-paralelo, indicando assim os efeitos de perdas de potência na variação de radiação em módulos associados.

5.5 Teste 2 – Comparação entre Potências Resultantes entre Associações Série e Paralelo de Módulos Fotovoltaicos com Diferentes Condições de Radiação Solar e Sombreamento

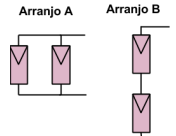
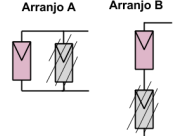
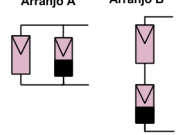
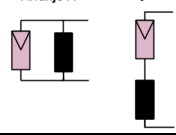
O intuito deste teste é comparar os arranjos série e paralelo de dois módulos fotovoltaicos similares em condições de radiação solar e sombreamento diferente. A Situação de teste 1 comparou a potência resultante dos Arranjos série e paralelo com radiação plena em todos os módulos, a situação 2 teve um dos módulos de cada arranjo com radiação menor em relação ao módulo da mesma associação, a situação 3 foi de sombreamento parcial em um dos módulos dos arranjos, e por fim, a situação 4 foi de sombreamento total em um dos módulos de cada arranjo. A Tab. 3 mostra os resultados do teste. A última coluna da tabela apresenta o ganho percentual do arranjo A (paralelo) em relação ao arranjo B (série). Pode-se notar que em todas as situações de teste o arranjo em paralelo teve potências resultantes superiores ao arranjo em série.

A fim de ilustrar os efeitos de cada situação de teste, o gráfico da Fig. 9 a seguir mostra a compilação dos dados do teste dois.

5.6 Conclusões Parciais (Testes 1 e 2)

A partir dos resultados obtidos com os testes 1 e 2, podem-se extrair algumas conclusões, quais sejam: Perdas maiores em lugares suscetíveis a sombreamento. Este fenômeno espera-se ser minimizado durante o rali de barcos solares, visto nesta competição não existir muito sombreamento entre os módulos; e Módulos em teste são menores do que os módulos utilizados na competição de barcos solares, o que diminui a possibilidade de sombreamento total.

Tabela 3 – Ensaios realizados com os módulos fotovoltaicos sob diferentes condições de radiação solar e sombreamento.

Situação de Teste		P(A)	P(B)	(P(A) > P(B)) %
1 - Radiação idêntica		17,55 W	17,47 W	0,4%
2 - Radiações díspares		12,66 W	11,56 W	9,5%
3 - Sombreamentos Parciais		9,21 W	5,90 W	56%
4 - Sombreamentos Totais		3,47 W	0,56 W	619%

6. CONCLUSÕES

Neste trabalho se propôs o estudo e desenvolvimento de um circuito de medição para testes de módulos fotovoltaicos sob diferentes condições de operação. O circuito proposto foi desenvolvido e ensaiado em laboratório e posteriormente em condições reais de operação, com os módulos expostos a radiação solar. Os resultados obtidos permitiram validar a metodologia sugerida, além do funcionamento adequado do circuito.

Foram realizados testes para validar os resultados obtidos e ajustar o erro das medições realizadas. Inicialmente realizaram-se ensaios com os módulos sob diferentes condições de irradiação, apenas. Este teste permitiu obter-se a potência das associações de módulos em diferentes regiões de operação de sua curva de corrente versus tensão. A seguir, testes foram realizados comparando-se os resultados com os módulos sob diferentes condições de irradiação luminosa e de sombreamento, permitindo-se verificar a potência do conjunto nestas condições de operação.

Os resultados obtidos permitem concluir que a associação de módulos em paralelo resulta em maior potência do que a associação em série ou do que a associação série-paralelo.

Estão sendo realizados ensaios com os módulos submetidos às mesmas condições, visando se determinar as variações paramétricas entre os mesmos, ou seja, pretende-se responder a seguinte pergunta: módulos de mesma potência, tamanho, fabricante e mesma vida útil, quando submetidos às mesmas condições de operação apresentam resultados similares ou diferentes para a potência obtida?

A partir destes resultados obtidos será possível determinar, a priori, qual associação permite obter melhores resultados em campo, ou seja, no projeto em questão, para a operação na geração de energia em barcos solares.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC) pela concessão de apoio financeiro a Equipe Zênite Solar. Também à FAPESC – Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina pelo apoio na viabilização da criação do Laboratório de Processamento Eletrônico de Energia - LPPE. Ainda, agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pela concessão de bolsas de iniciação científica aos alunos participantes do projeto.

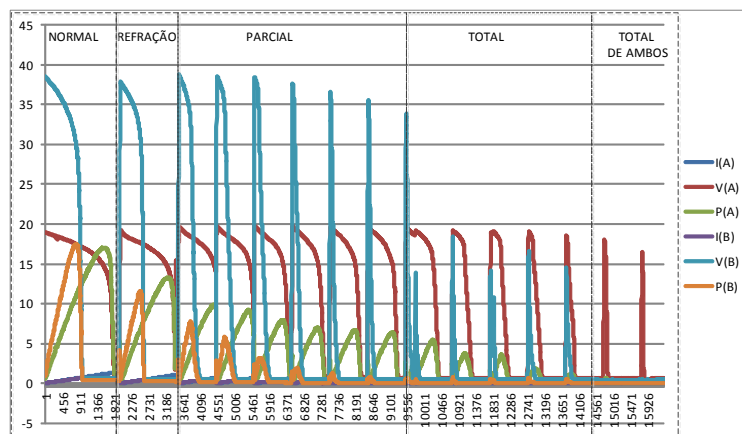


Figura 9 – Compilação dos resultados do teste dois.

REFERÊNCIAS

- Brasil. Empresa de Pesquisa Energética. Balanço Energético Nacional 2013 – Ano base 2012: Relatório Síntese. Rio de Janeiro: EPE, 2013.
- Chamberlin, C. E., Et All. Environmental Resources Engineering, Humboldt State University, Arcata, CA 95521, U.S.A. (1995).
- Charles E. C., Peter L. Et All. Effects Of Mismatch Losses In Photovoltaic Arrays Environmental Resources Engineering. Humboldt State University, Arcata, CA 95521, U.S.A., 1995.
- Coelho, R. F. Estudo dos Conversores Buck e Boost Aplicados ao Rastreamento de Máxima Potência de Sistemas Solares Fotovoltaicos. 2008. 169 f. Dissertação de mestrado - Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.
- DSB. Desafio Solar Brasil. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: <http://desafiosolar.wordpress.com>. Visitado em: 26/11/2013.
- Heckheuter, L. A. Análise de associação de módulos fotovoltaicos. Tese de doutorado, UFRG, Porto Alegre, 2001.
- Hinrichs, R. A., Kleinbach, M., Reis dos, L. B. Energia e Meio Ambiente. São Paulo: Cengage Learning, 2011.
- Lima, C. B. e Villaça, M. A. AVR e Arduino – Técnicas de Projeto. 2ª Edição, Editora Clube dos Autores, São Paulo, 2012.
- Oliveira Reiter, R. D. De, Et All. Comparative analysis of series and parallel photovoltaic arrays under partial shading conditions. Industry Applications (INDUSCON), 2012 10th IEEE/IAS International Conference on. Fortaleza, CE. November, 2012.
- Quaschnig, V., Hanitsch, R. Numerical Simulation of Current-Voltage characteristics of photo voltaic systems with shaded solar cells, Solar Energy, 1996, pp 56,513-520.
- Santos, B. R., Petry, C. A. e Lima, C. B. A new low cost V x I tracer for photovoltaic panels. Industry Applications (INDUSCON), 2010 9th IEEE/IAS International Conference on. São Paulo, SP. November, 2010.
- Villalva, M. G., Gazoli, J. R. Energia Solar Fotovoltaica – Conceitos e Aplicações. 1. Ed. São Paulo: Érica, 2012.
- Zilles, R. Macêdo, W. N. Et All. Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

STUDY OF THE CONNECTIONS OF PHOTOVOLTAIC MODULES APPLIED IN SOLAR BOATS

Abstract. This article presents a study on the possible configurations of photovoltaic solar modules applied in solar boats. An array of four modules of low power (10 Watts) was connected in different ways and tests were conducted using a data acquisition system designed for this purpose. Assays were performed by connecting modules (pairs) in series and in parallel, comparing the results with the performance of the individual module. Finally, it can be concluded on the power generated by the system under different conditions of sunlight and shade, in addition to parametric variations of elements of the same characteristics. The experimental results show that the array in parallel allows obtaining greater powers in matching with the array series and series-parallel of photovoltaic modules.

Key words: Photovoltaic Modules Connections, Series and Parallel Photovoltaic Modules Circuits, Solar Boat.