

BANCADA EDUCACIONAL DE MONITORAMENTO E CONTROLE EM ENSAIOS DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA

Fransérgio Carvalho – sergioquantica@hotmail.com

Cleonor Neves – cleonor.cneves@gmail.com

Felipe Yoshino – felipekiy@hotmail.com

Walter Barra Júnior – walbarra@ufpa.br

Universidade Federal do Pará, Departamento de Engenharia Elétrica, Laboratório de Controle e Automação em Sistema de Potência (LACSPOT)

Resumo. Este artigo apresenta o desenvolvimento e testes de uma interface de monitoramento e controle para uma bancada de módulos fotovoltaicos (FV) em escala reduzida com intuito de oferecer um ambiente laboratorial para estudo de geração FV. A unidade geradora FV, em conjunto com o sistema de monitoramento desenvolvido, habilita a execução de testes avançados de controle automático para essa classe de sistemas de geração. A interface permite executar experimentos sob diferentes condições operacionais. Além disso, todas as variáveis de operação mais importantes podem ser monitoradas em tempo real e registradas para estudos posteriores. A bancada PV possui dois módulos fotovoltaicos com sensores que medem as grandezas físicas pertinentes a geração fotovoltaica como: temperatura dos módulos, temperatura ambiente e irradiância. As grandezas elétricas como tensão e corrente são medidas por meio de sensores. Há uma carga c.c. que consome a energia gerada pelos módulos. Ela é composta por reostato, por LEDs, por motor elétrico c.c. e por acumulador eletroquímico. A interface permite também o acionamento de relés que ligam ventiladores para controle de temperatura, controlam a irradiância das lâmpadas que iluminam os módulos e mudam a associação entre os módulos fotovoltaicos. Assim, a proposta do artigo visa atender testes de bancada em condições controladas com intuito de fornecer ao estudante conhecimentos práticos acerca de geração FV em diferentes situações e da influência do meio físico.

Palavras-chave: Geração Fotovoltaica, Interface de Controle, Monitoração.

1. INTRODUÇÃO

A aquisição de competências por meio de experimentos laboratoriais é uma parte importante do ensino de engenharia (Persechini e Mendes, 2014). Contudo, o estudo de sistemas fotovoltaicos ainda precisa de infraestruturas que permitam o seu estudo prático. Propõe-se o uso de uma bancada de ensaio de painéis fotovoltaicos em condições controladas que proporcionem aos alunos de graduação e pós-graduação uma maneira prática para entenderem o funcionamento dos módulos. Estudar geração fotovoltaica em ambiente laboratorial, além de poder ser mais didático, tem a vantagem de degradar menos as células fotovoltaicas quando comparado aos casos em que o módulo fica exposto (Osterwald, 2005).

A operação de painéis fotovoltaicos exige cuidado e segurança, já que são fontes de energia elétrica. Essa segurança só pode ser proporcionada em uma situação na qual o usuário possa realizar as conexões elétricas via comandos por interface. Por exemplo, mudar automaticamente a associação dos módulos durante seu funcionamento. Além de seguro, possui valor didático.

Uma justificativa plausível para o uso de uma bancada para ensaio de módulos fotovoltaicos sob condições controladas é o fato de que a energia solar é uma fonte primária sazonal e os parâmetros físicos em campo que são cruciais para geração não podem ser controlados (Freitas *et al.*, 2012). Em Pinheiro Neto *et al.* (2012) faz-se a monitoração de grandezas físicas e elétricas, contudo sob condições aleatórias de campo, não permitindo o controle da irradiância que possui importância significativa para a geração fotovoltaica.

Em Pinheiro Neto *et al.* (2012) aborda-se acumulador eletroquímico em sistema fotovoltaico, porém com fim de geração distribuída. No trabalho proposto, os estudantes podem conhecer a importância do acumulador em sistemas autônomos comuns na Amazônia (Macêdo *et al.*, 2011).

Portanto, faz-se neste trabalho uma descrição técnica tanto em *hardware* quanto em *software* da bancada didática presente no LACSPOT e apresenta-se ensaios que a bancada permite e sua proposta educacional.

2. REQUISITOS E PRÓPOSITOS DA BANCADA DIDÁTICA

Uma bancada didática para ensino de geração fotovoltaica deve permitir ao estudante conhecer o comportamento da tensão e corrente do gerador fotovoltaico nas associações série e paralelo, bem como os efeitos de irradiância e temperatura sobre o desempenho dos módulos fotovoltaicos. O controle sobre o brilho das lâmpadas conduz o usuário

ao conhecimento da geração fotovoltaica que acontece em operações de campo. Ajuste de luminosidade de lâmpadas pelo usuário é realizado também em Brito *et al.* (2012).

A bancada deverá oferecer condições para se ensaiar e estudar até condições não desejadas na geração fotovoltaica como o sombreamento de uma ou várias células que pode danificar a célula e, conseqüentemente o módulo todo (Zil les *et al.*, 2012).

Nos sistemas autônomos de geração fotovoltaico, as cargas são alimentadas pelo acumulador via controlador de carga e os módulos carregam o acumulador eletroquímico via controlador de carga. Contudo, deve haver também a possibilidade de ligar o gerador fotovoltaico diretamente nas cargas c.c..

3. DESCRIÇÃO DA BANCADA DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA

Na Fig. 1 é apresentada uma fotografia de um dos conjuntos (há dois idênticos) que possui o módulo fotovoltaico, indicando as 5 lâmpadas usadas para iluminar o módulo e o sensor de irradiância. Os módulos fotovoltaicos são da Atersa e possuem as especificações presentes na Tab. 1 e as lâmpadas são de modelo ULTRA -VITALUX da OSRAM de 300 W e 230 V usadas para simular luz do sol (Svetila, 2015). Na Fig. 1, estão presentes também os ventiladores que são ligados para resfriar os módulos fotovoltaicos. A ação de utilizar ventiladores para resfriar módulo fotovoltaico é observada também em Prieb e Krenzinger (2003).

O espectro de radiação similar ao do sol e o ângulo de incidência de radiação direta próximo de zero graus são elementos essenciais para conhecer melhor o desempenho do módulo fotovoltaico como se mostra em King *et al.* (1997).

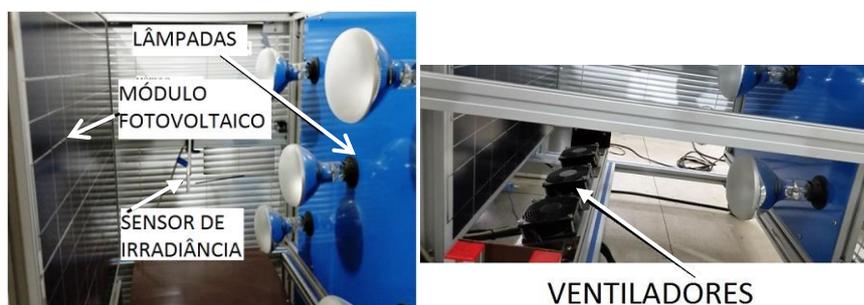


Figura 1- Elementos da bancada.

Tabela 1 - Especificações do módulo fotovoltaico Atersa em 1000 W/m², 25 °C e AM 1,5.

CARACTERÍSTICA	VALOR
Máxima Potência	70 W
Tensão de Máxima Potência	17,54 V
Corrente de Máxima Potência	3,99 A
Tensão de Circuito Aberto	22,3 V
Corrente de Curto-Circuito	4,21 A

3.1 Sensores

O sensor de grandeza física como irradiância da Fig. 1 consiste em uma célula fotovoltaica que libera uma corrente de curto circuito proporcional a irradiância incidente. Há três sensores de temperatura utilizados: dois que medem temperatura de costa dos módulos e um que mede temperatura ambiente. Esses sensores (Fig. 2) são RTD (*Resistance Temperature Detector*) que são alimentados por uma fonte de tensão e sua resistência varia linearmente com a temperatura (National Instruments, 2015).

Além desses, tem-se o que mede corrente elétrica cujo modelo é LA25-NP e o que mede a tensão elétrica cujo modelo é LV25-P usados também para monitorar variáveis de estado em Casaro e Martins (2010). Esses sensores estão mostrados também na Fig. 2, em um circuito que é utilizado no sistema da bancada para condicionamento de sinal.

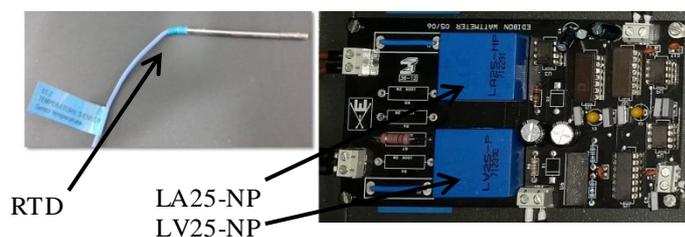


Figura 2- Sensor de temperatura e sensores de corrente e tensão.

3.2 Relés de acionamento do gerador fotovoltaico e de proteção

A bancada de ensaio oferece a possibilidade de associar os dois módulos fotovoltaicos em série ou em paralelo no momento em que eles estão energizados. Isso é feito pelo circuito da Fig. 3 que possui cinco relés de modelo RT424012. O circuito possui para cada relé um circuito de sinal de disparo composto por um resistor, transistor e diodo de roda livre. No lado esquerdo da Fig. 5 há uma fiação para alimentação das bobinas dos relés, outra para os sinais digitais de controle e outra a direita para entrada e saída da geração fotovoltaica.

Os sinais digitais gerados funcionam como uma lógica sequencial de acionamento dos relés que é efetuada por meio de comandos do sistema de supervisão desenvolvido nesta pesquisa.

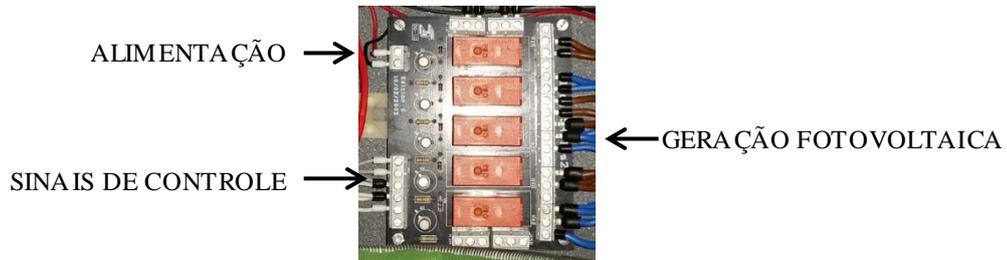


Figura 3- Relés para associação dos módulos fotovoltaicos.

Os sinais digitais utilizados são o P0.0, P0.1 e P0.2 conforme mostra a simulação no programa computacional Proteus Isis na Fig. 4. Quando os módulos estão em série, P0.0, P0.1 estão em nível alto e P0.2 está em nível baixo, enquanto na associação em paralelo todos estão em nível alto.

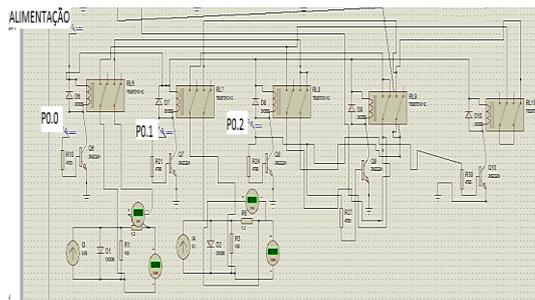


Figura 4- Relés para associação dos módulos com os sinais digitais de controle.

Há outro circuito semelhante ao da Fig. 3 que por meio de um sinal de controle digital chamado P0.3 modifica a configuração do sistema que ora pode alimentar cargas diretamente pelo gerador fotovoltaico ora pelo acumulador eletroquímico via controlador de carga. O controlador de carga e o acumulador eletroquímico estão na Fig. 5.



Figura 5- Acumulador eletroquímico e controlador de carga.

O consumo de energia elétrica é feito por um reostato em paralelo com LEDs, ou por um motor elétrico c.c. de 36 W e 12 V ou pelo próprio acumulador eletroquímico de 12 V, via controlador de carga. A carga escolhida para o ensaio depende da posição da chave seletora da Fig. 6.



Figura 6- Chave seletora da carga eletrônica c.c..

Outro circuito semelhante ao da Fig. 3 é utilizado para ativar os ventiladores por meio do sinal de controle P0.5.

Há dois relés de controle cujo modelo é o MCP2425C da Crydom. Esses relés de controle são ativados cada um pelos sinais de controle P0.4 e P0.6. A partir daí, os relés ficam habilitados para controlar o valor eficaz da tensão alternada baseado em um valor de tensão c.c. que varia de 0 a 10 V. Dependendo desse valor de tensão c.c. na sua entrada, o relé modifica o ângulo de disparo para controlar o valor eficaz de tensão alternada sobre as lâmpadas da bancada. O propósito dos relés de controle é modificar o valor eficaz da tensão sobre as lâmpadas e assim regular o brilho ou irradiância sobre os módulos.

3.3 Placa de Aquisição e de Geração de Sinais

Utilizou-se a placa NI PCI 6221 (National Instruments), Fig. 7, que é responsável por receber os sinais analógicos de tensão dos sensores, enviar sinais digitais para acionamento dos relés e enviar sinais analógicos de tensão c.c. para controlar os relés de controle de tensão alternada. Tudo isso é efetuado sob o comando do sistema de supervisão descrito neste artigo.



Figura 7- NI PCI – 6221 (16 entradas analógicas, 24 portas digitais E/S, 2 saídas analógicas).

4. PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO DA INTERFACE

A placa de aquisição de dados (Fig. 7) comunica-se com o PC via um barramento padrão PCI. Ela gera e recebe sinais mediante a interface de monitoração e controle. Essa interface desenvolvida neste trabalho utiliza como ferramenta, o programa computacional LabVIEW Student Edition 2014 e apresenta vários recursos descritos a seguir.

A interface LabVIEW com placa de aquisição já se mostrou bastante eficaz em trabalhos de monitoração e acionamentos como em Riehl e Ruppert (2012).

Essa interface tem o objetivo de tornar o aprendizado de um estudante de sistemas fotovoltaicos simples e amigável por meio de vários recursos de monitoração e controle.

A fim de compreender melhor o funcionamento básico da interface, expõe-se um fluxograma (Fig. 8) que mostra o esqueleto de funcionamento da interface.

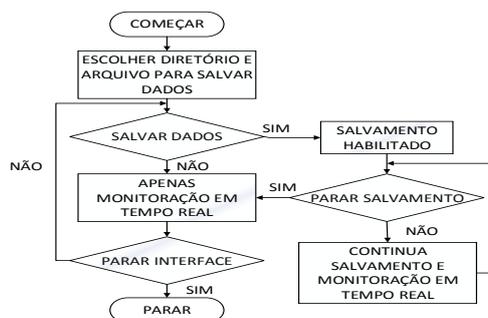


Figura 8- Fluxograma da Interface.

Há botão ‘COMEÇAR’ (Fig. 9) no qual o usuário inicia o funcionamento da interface quando se abre uma caixa de diálogo onde se define o diretório e o nome do arquivo que conterà os dados salvos. A partir desse momento os dados dos sensores já são apresentados nos indicadores que incluem grandezas elétricas (tensão (V), corrente (A)) e físicas (temperatura dos módulos (°C), temperatura ambiente (°C) e irradiância (W/m²)). Há outro indicador que apresenta a potência elétrica de saída do gerador fotovoltaico calculada em W.

Na caixa ‘PLOTAR O SENSOR’, o usuário pode escolher qual sensor ele quer visualizar nos gráficos que ele pode escolher na caixa ‘ESCOLHA GRÁFICO’. Entre as opções de gráficos há o ‘gráfico A’, ‘gráfico B’ ou ‘gráfico único’. Essa visualização gráfica é em tempo real e inclui os dados em uma faixa de tempo dada em segundos e sempre apresenta os últimos dez segundos.

A Fig. 9 apresenta também a interface em funcionamento e já salvando dados. No gráfico superior está sendo plotado o valor de irradiância e no gráfico inferior está sendo plotado o valor de tensão do acumulador recebendo carga do gerador FV via controlador de carga. O botão ‘SALVAR’ habilita o salvamento de dados de todos os sensores para posterior visualização e abre um indicador de tempo de salvamento em segundos. Nota-se que os controladores na forma de colunas (Sol 1 e Sol 2) estão no seu valor máximo na interface em funcionamento, permitindo que os relés de controle acendam os dois grupos de cinco lâmpadas no seu brilho máximo.

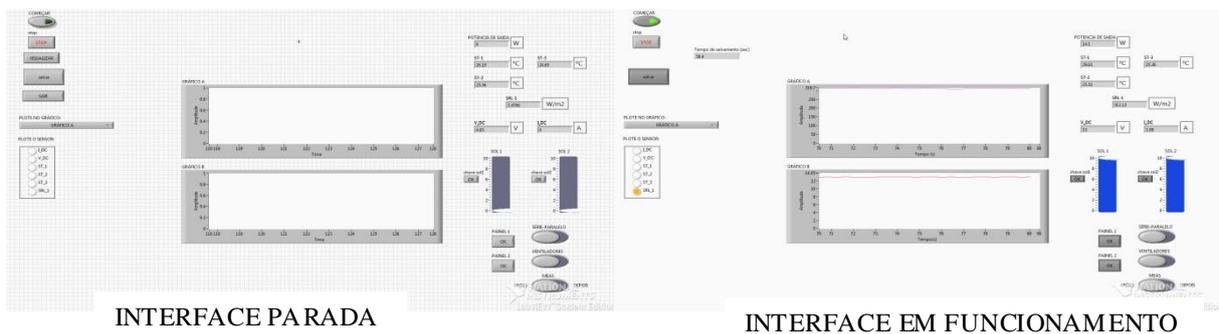


Figura 9- Interface de controle.

Os comandos da interface da Fig. 9 incluem ligar o módulo 1 e 2 no circuito da Fig. 3 com os botões ‘PAINEL 1’ e ‘PAINEL 2’ respectivamente. Há o botão ‘SÉRIE-PARALELO’ que permite ao usuário associar em série ou em paralelo os módulos, há o botão ‘VENTILADORES’ que liga os ventiladores da Fig. 1 e o botão ‘MEAS’ que na posição ‘ANTES’ liga o gerador FV direto na carga escolhida no equipamento da Fig. 6 e na posição ‘DEPOIS’ liga o acumulador na carga c.c. e o módulo no acumulador via controlador de carga.

Algumas mudanças nos valores de tensão e corrente quando se altera a associação entre os módulos pode ser vista nos gráficos de monitoração em tempo real da Fig. 9, contudo mudanças nos valores de temperatura dos módulos são mais bem percebidas em gráfico que apresenta os dados salvos ao longo de um tempo suficiente. Por isso a interface da Fig. 9 apresenta o botão ‘VISUALIZAR’ que abre outra interface (Fig. 10) na qual o estudante pode ver os dados dos sensores ao longo do tempo em que ele determinou o salvamento. Essa outra interface possui o botão ‘CARREGAR ARQUIVO’ pelo qual o usuário pode carregar um primeiro arquivo salvo no formato dat ou recarregar outro arquivo.

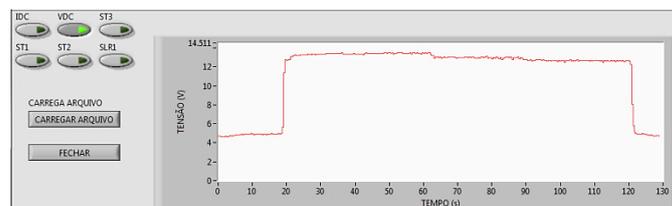


Figura 10- Interface para visualização de dados salvos.

A Fig. 11 apresenta um dos possíveis diagramas sequenciais para os acionamentos e desligamentos dos elementos da bancada.



Figura 11- Um diagrama sequencial dos comandos.

5. TESTES E RESULTADOS

A Fig. 12 e Fig. 13 apresentam os valores de corrente e tensão que o gerador fotovoltaico impõe no acumulador ao longo de aproximadamente 470 segundos. A Fig. 12 começa e termina com valor zero quando não há irradiância. A corrente eleva-se quando os relés chaveiam os módulos em paralelo e diminui quando chaveiam os módulos em série. A tensão da Fig. 13 eleva-se quando os módulos são chaveados em série e diminui quando os módulos são chaveados em paralelo. Essa noção instrui o estudante sobre o comportamento de tensão e corrente na geração FV.

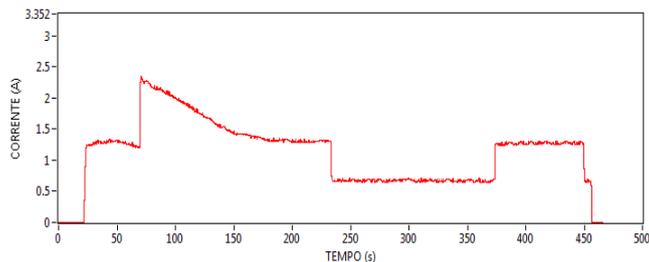


Figura 12- Dados do sensor de corrente.

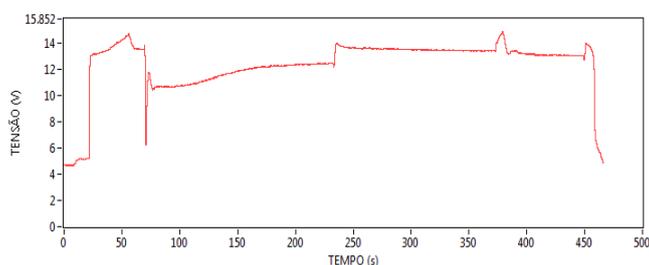


Figura 13- Dados do sensor de tensão.

A Fig. 14 apresenta os valores de irradiância ao longo do tempo. No início e fim não há irradiância. Próximo de 20 segundos, as barras de controle de irradiância estão no máximo e a irradiância é próxima de 320 W/m^2 . Depois a barra de controle está em 80 % de seu valor nominal e a irradiância diminui para 291 W/m^2 . Em 60 % a irradiância diminui para 145 W/m^2 . Quando a barra está em 40%, a irradiância é próxima de 13 W/m^2 .

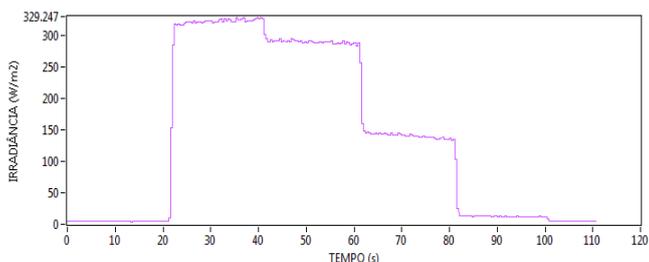


Figura 14- Dados do sensor de irradiância.

Nota-se na Fig. 15, a corrente elétrica em amperes que o gerador fotovoltaico transfere para o acumulador como resposta da irradiância na Fig. 14. Percebe-se em ambas figuras a relação aproximadamente linear entre irradiância e corrente do gerador fotovoltaico sob carga. Essa relação linear é parte fundamental na compreensão dessa forma de geração de energia elétrica.

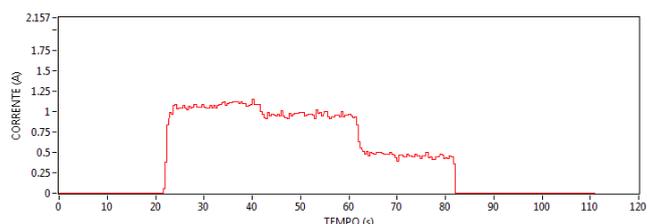


Figura 15- Corrente que o gerador insere na bateria.

A temperatura de costa dos módulos cresce sem ou com ventiladores como mostra a Fig. 16 e Fig. 17, respectivamente, porém com ventiladores em 500 segundos, a temperatura chegou a 39,92 °C, enquanto sem ventiladores em um tempo de 466 segundos, a temperatura alcançou 42,13 °C. Os ventiladores podem ser usados para demonstrar a influência da temperatura no desempenho dos módulos.

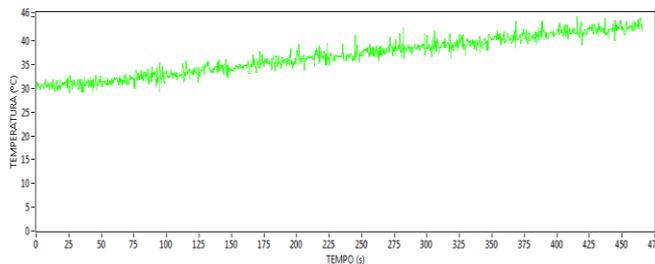


Figura 16- Dados do sensor de temperatura do módulo sem ventiladores.

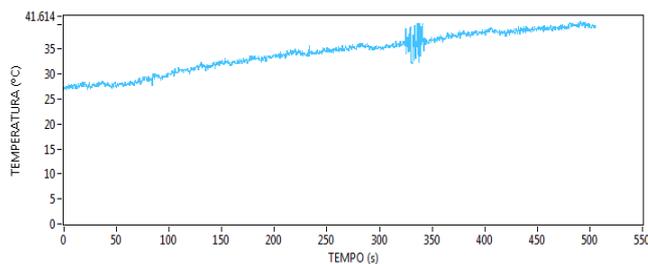


Figura 17- Dados do sensor de temperatura do módulo com ventiladores.

A Fig. 18 apresenta o valor da tensão lida pelo sensor em três situações diferentes. Na primeira, a tensão está entre 10 e 15 V, quando os módulos carregam o acumulador. Quando a tensão passa de 35 V, mudou-se a posição da chave seletora da Fig. 6 para que o gerador fotovoltaico alimentasse o motor elétrico c.c.. Esse fato instrui sobre o ponto de operação do gerador fotovoltaico, ou seja, menor corrente, maior tensão. Quando a tensão diminui novamente para o intervalo entre 10 e 15 V é porque o usuário acionou o botão 'MEAS' para a posição 'DEPOIS', fazendo o motor ser alimentado diretamente pelo acumulador via controlador de carga, enquanto o gerador fotovoltaico passa a carregar a bateria em qualquer posição da chave seletora. Demonstrando assim, o funcionamento de um sistema FV autônomo.

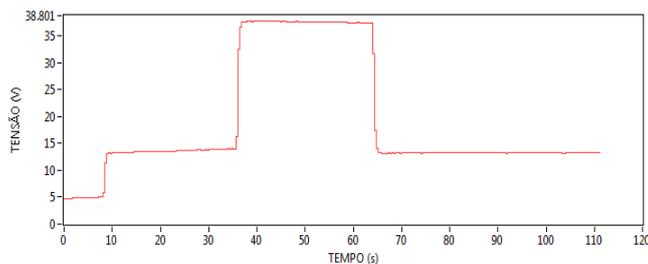


Figura 18- Dados do sensor de tensão em três configurações.

6. CONCLUSÕES

O trabalho apresentado é útil no estudo de geração de energia fotovoltaica, porém pode ser usado até para projetos de geração de energia fotovoltaica com acumuladores eletroquímicos uma vez que os módulos e os acumuladores podem ser trocados e assim, ajudar o projetista a dimensionar melhor o sistema com os equipamentos que ele possui.

A possibilidade de se escolher a associação em série ou paralelo permite ao usuário conhecer as variações de tensão e corrente sobre o acumulador eletroquímico.

Há grandezas que não são controladas no mundo real como irradiação e temperatura, porém a bancada facilita que o estudante visualize de forma prática que a irradiação está diretamente associada à potência de saída do gerador FV e que o aquecimento dos módulos diminui levemente com a ventilação, causando a elevação no desempenho.

Constatou-se que o módulo da tensão do gerador fotovoltaico não é constante, mas depende da carga que está sendo alimentada. Carga de menor consumo de corrente, trabalha com maior tensão. Constatou-se em seguida que é possível colocar o acumulador depois do gerador FV, ou seja, entre o gerador FV e a carga como no sistema autônomo.

Por fim, a bancada apresenta vários recursos que auxiliam no entendimento de geração fotovoltaica e na compreensão do funcionamento do sistema fotovoltaico autônomo.

Agradecimentos

Os autores agradecem a CAPES e a FAPEAM pelo suporte financeiro.

REFERÊNCIAS

- Brito, M. A. G; Ferreira, C. S; Sampaio, L. P; Canesin, C. A., 2012. Sistema Automático para o Controle Eficiente de Iluminação para Múltiplas Lâmpadas Fluorescentes. Revista Controle & Automação/Vol.23 no.4, pp. 439-452.
- Casaro, M. M. e Martins, D. C., 2010. Processamento Eletrônico da Energia Solar Fotovoltaica em Sistemas Conectados à Rede Elétrica. Revista Controle & Automação, Vol.21, No. 2, pp. 159- 172.
- Freitas, E. D. G; Moraes, M. M. B. e Silva, J. H. R., 2012. Sistema de Hardware e Software para a Aquisição de Dados Automática para Painéis Fotovoltaicos-IV Congresso Brasileiro de Energia Solar e V Conferencia Latino-Americana da ISES, São Paulo.
- King, D. L; Kratochvil, J. A. and Boyson, W. E., 1997. Measuring Solar Spectral and Angle-of-Incidence Effects on Photovoltaic Modules and Solar Irradiance Sensors. Photovoltaic Specialists Conference. Conference Record of the Twenty-Sixth IEEE, pp. 1113- 1116.
- Macêdo, W. N; Galhardo, M. A. B; Almeida, M; Pinto, A. C; Pinho, J. T; Modesto, J; Penha, J; Brito, O., 2011. Revitalization and Analysis of Operation of the Autonomous Photovoltaic System of the Uacari Floating Lodging House, Amazon-Brazil. Progress in Photovoltaics, v. 1, p. n/a-n/a.
- National Instruments, 2015. Como Projetar um Sistema de Medição de Temperatura, Disponível em: <http://www.ni.com/webcast/2649/pt/>. Acessado em: 15/02/2016.
- Osterwald, C. R; Edited by Castañer, L. and Markvart, T., 2005. Solar cells: materials, manufacture and operation: standards, calibration and testing of pv modules and solar cells, Elsevier.
- Persechini, M. A. M. e Mendes, L. T. S., 2014. Plataforma Integrada para Ensino de Controle e Automação– CBA- Congresso Brasileiro de Automática, Belo Horizonte.
- Pinheiro Neto, J. S; Carvalho, P. C. M; Oliveira, R. S. H; Borges Neto, M. R; Lopes, L. C. N. e Moreira, A. P., 2012. Sistema de Automação, Controle e Aquisição de Dados para Fontes Renováveis Descentralizadas - IV Congresso Brasileiro de Energia Solar e V Conferencia Latino-Americana da ISES, São Paulo.
- Prieb, C. W. M., 2002. Desenvolvimento de um Sistema de Ensaio de Módulos Fotovoltaicos, Dissertação de Mestrado, PROMEC, UFRGS, Porto Alegre.
- Riehl, R. R e Ruppert, E., 2012. Método Experimental para Determinação das Capacitâncias Parasitas do Motor de Indução Trifásico Acionado por Inversor MLP. Revista Controle & Automação, Vol.23, No. 2, pp. 153- 163.
- Svetila, 2015. Disponível em: http://www.osram.com.br/osram_br/produtos/lampadas/lampadas-especiais/lampadas-ultravioletas/ultra-vitalux/index.jsp?search_result=%2fosram_br%2fsearch%2fadvanced_search.jsp%3faction%3ddosearch%26inp_searchterm_1%3dultra-vitalux%26website_name%3dosram_br. Acessado em: 15/02/2016.
- Zilles, R; Macêdo, W. N; Galhardo, M. A. B. e Oliveira, S. H. F., 2012. Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica. Oficina de Textos.

EDUCATIONAL BENCH OF MONITORING AND CONTROL OF PHOTOVOLTAIC GENERATION TEST

Abstract. *This paper reports the development and tests of a monitoring and control interface for a photovoltaic (PV) modules bench in small-scale aiming to offer a laboratory environment to study PV generation. The PV generating unit, along with developed monitoring system, enable execution of advanced tests in automatic control for this kind of generating system. The interface allows to carries out several experiments under varying operating conditions. Furthermore, all set of important operating variables can be monitored in real time as well can be recorded for further off-line studies. The PV system has two modules with sensors that measure physical values related to photovoltaic generation such as temperature of the modules, environmental temperature and irradiance. The electrical values are measured by sensors. There is a DC charge that consumes energy generated by modules. It has rheostat and LEDs, electrical DC motor and electrochemist accumulator. The interface allows also driving relays that turn on coolers for temperature control, controlling irradiance from lamps that shines modules and shift association between photovoltaic modules. So, the purpose of paper aims to make bench test in controlled conditions with the intention to provide to student practical knowledges about PV generation in different situations and physical effect.*

Key words: *Photovoltaic Generation, Control Interface, Monitoring.*