

SISTEMA DE ARREFECIMENTO PARA MÓDULOS FOTOVOLTAICOS: UMA PROPOSTA PARA AUMENTO DE EFICIÊNCIA E APROVEITAMENTO DE CALOR

Shelon Andriel Marini – shelon.marini@gmail.com

Tiago Cassol Severo – tcsevero@ucs.br

Universidade de Caxias do Sul, Centro de Ciências Exatas da Natureza e de Tecnologia

Resumo. Módulos fotovoltaicos são equipamentos capazes de converter radiação solar diretamente em energia elétrica. Um fenômeno importante a ser observado é que a eficiência de conversão das células solares tende a cair com a elevação de sua temperatura. Neste trabalho foi desenvolvido um sistema de arrefecimento para módulos fotovoltaicos do tipo placa plana. O objetivo do sistema é absorver calor do módulo, reduzindo assim perdas de eficiência e ainda utilizar este calor para aquecimento de água. O resultado é um equipamento híbrido fotovoltaico/térmico de aproveitamento de energia solar. Um protótipo para um módulo de 1470mm x 680mm e 140W de potência foi construído para a realização de ensaios, que demonstraram que o equipamento foi capaz de elevar a temperatura da água do sistema em 19,4 °C. Houve também um aumento de 0,27% na eficiência do módulo fotovoltaico, representando uma melhoria de 2,06% na conversão elétrica.

Palavras-chave: Energia Solar, Termossifão, Híbrido Fotovoltaico/Térmico.

1. INTRODUÇÃO

Segundo Varella, Cavaliero e Silva (2008), a utilização da energia solar é uma alternativa sustentável para reduzir o consumo de fontes finitas e poluidoras de energia, como os combustíveis fósseis, entre eles os derivados do petróleo. O grande problema que a energia solar ainda enfrenta é a baixa eficiência dos conversores e por consequência o alto custo por quilowatt gerado, sendo pouco competitiva com as formas tradicionais até o momento.

Conforme Dupeyrat et al. (2011), o conceito de sistema híbrido fotovoltaico/térmico (PV-T) já é conhecido e tem por objetivo aproveitar uma maior quantidade de energia solar por unidade de área que os sistemas convencionais, gerando eletricidade e ao mesmo tempo aquecendo um fluido para posterior utilização. Entretanto ele também esbarra no alto custo inicial e tempo relativamente longo de recuperação do investimento. Faz-se necessário o aprimoramento desta tecnologia para torná-la mais barata e/ou mais eficiente.

Este trabalho propõe o desenvolvimento de um modelo de trocador de calor para ser utilizado como elemento térmico em um sistema PV-T, sendo que o equipamento deve ser adaptável aos módulos fotovoltaicos do tipo placa plana de mercado. O sistema final deve realizar o fluxo da água por convecção natural, ciclo este também conhecido como termossifão, reduzindo assim custos iniciais por dispensar bombas e outros equipamentos de controle ativo, além de não necessitar de energia elétrica para seu funcionamento.

2. CARACTERÍSTICAS DE UM MÓDULO FOTOVOLTAICO

Conforme Villas (1999), módulos fotovoltaicos são formados por um conjunto de células solares associadas eletricamente para fornecer os valores de corrente e tensão necessários para uma determinada aplicação. Os módulos mais comuns têm entre 32 e 36 células solares de silício cristalino, todas de igual tamanho e associadas em série e/ou paralelo.

De acordo com Duffie e Beckman (2013), o comportamento elétrico de um módulo fotovoltaico pode ser analisado a partir de sua curva característica, que representa a corrente elétrica fornecida em função da tensão. Uma curva típica está apresentada na Fig. 1.

A curva superior mostra as possíveis relações de corrente elétrica (I) e tensão (V), e a inferior apresenta a potência (P) resultante destas relações, calculada pelo produto $I \times V$. O ponto de máxima potência corresponde ao retângulo de maior área abaixo da curva I-V. Idealmente, as células deveriam trabalhar sempre à potência máxima, porém na prática elas irão operar no ponto da curva I-V que corresponde às características da carga que for conectada.

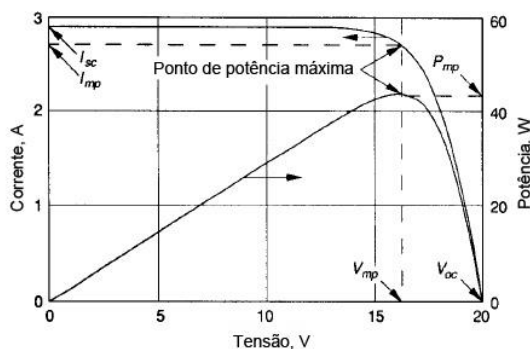


Figura 1 – Curvas I-V e P-V de um módulo fotovoltaico
Fonte: Adaptado de Duffie e Beckman (2013)

Villas (1999) apresenta os principais parâmetros que caracterizam um módulo fotovoltaico:

- Corrente de curto-circuito (I_{sc}): é a máxima corrente que o módulo pode proporcionar, corresponde à corrente elétrica entregue quando se conectam os bornes diretamente.
- Tensão de circuito aberto (V_{oc}): é a máxima tensão que o módulo pode proporcionar, correspondente ao caso em que os bornes estão desconectados.
- Ponto de potência máxima: é o ponto da curva I-V onde a potência é máxima (P_{mp}), e corresponde aos valores I_{mp} e V_{mp} de corrente e tensão, respectivamente. Quando trabalha neste ponto, se obtém o maior rendimento possível do módulo.
- Fator de forma (FF): é a razão entre a potência máxima P_{mp} , e o produto $I_{sc} \times V_{oc}$. O valor da uma ideia da qualidade do painel, já que é uma medida da inclinação de sua curva característica, de forma que quanto mais se aproxima de 1, maior a potência que pode proporcionar. Os valores comuns estão entre 0,7 e 0,8.
- Eficiência (η): é a razão entre a máxima potência elétrica que o painel pode entregar e a potência da radiação solar P_L incidente sobre o painel.

Tendo em conta as definições anteriores, podemos definir a seguinte igualdade:

$$\eta = \frac{P_{mp}}{P_L} = \frac{FF \times I_{sc} \times V_{oc}}{P_L} \quad (1)$$

Os valores de I_{sc} , V_{oc} , I_{mp} e V_{mp} devem ser fornecidos pelo fabricante, e dependem muito da temperatura e irradiância solar. Por este motivo são adotadas condições de teste padrões de 25 °C e 1.000 W/m², respectivamente.

A Fig. 2 apresenta a influência da temperatura sobre uma curva I-V característica, a um nível de radiação constante. A partir dela observamos que o aumento de temperatura resulta em um aumento muito pequeno na I_{sc} e uma queda significativa em V_{oc} . Por consequência, o módulo apresentará menor eficiência com o aumento da temperatura.

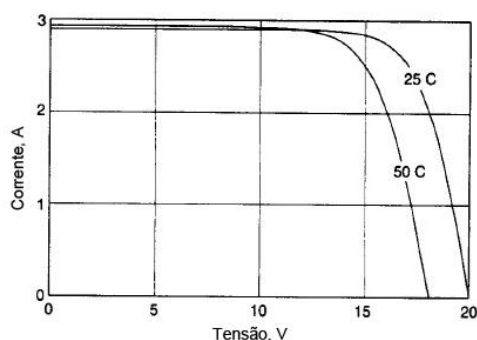


Figura 2 – Curvas I-V características de um módulo fotovoltaico a temperaturas de 25 °C e 50 °C
Fonte: Adaptado de Duffie e Beckman (2013)

3. COLETORES TÉRMICOS

Segundo Duffie e Beckman (2013), um coletor solar é um tipo especial de trocador de calor que transforma a energia radiante do Sol em calor. Os trocadores de calor convencionais normalmente fazem a troca de fluido para

fluido, com altas taxas de transferência de calor e considerando a radiação desprezível. Já os coletores solares transferem energia radiante de uma fonte distante para um fluido, tendo a radiação como um fator importante e alguns problemas específicos como fluxo de energia variável.

Coletores do tipo placa plana são empregados em aplicações que demandam temperatura moderada, até em torno de 100 °C acima da temperatura ambiente.

3.1 O ciclo de termossifão

A nomenclatura “termossifão” é empregada para nomear dispositivos que realizam a circulação de um fluido de forma passiva, se aproveitando de fenômenos como a convecção natural e o efeito de fluabilidade.

Segundo Dobson e Ruppertsberg (2007), um termossifão é um sistema de transferência de energia capaz de transferir calor de uma fonte quente para um reservatório separado, sem o uso de instrumentação para controle ativo ou qualquer parte mecânica móvel, como bombas.

Quando temos um ciclo normalmente fechado, como na Fig. 3, e um dos lados é aquecido, a massa específica do fluido neste lado irá diminuir devido ao aumento de temperatura.

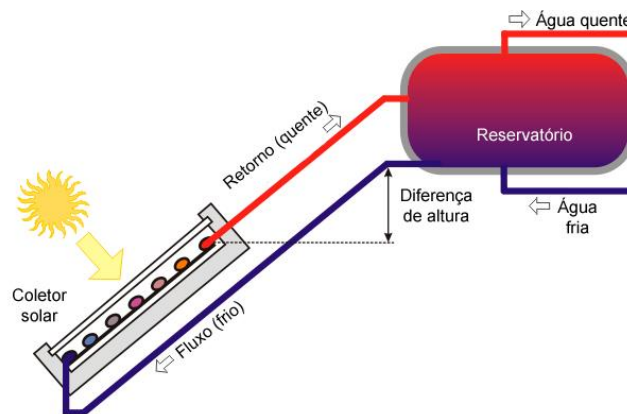


Figura 3 – Sistema de aquecimento de água por termossifão
Fonte: Go Green Heat Solutions (2014)

Desta forma, uma diferença de pressão essencialmente hidrostática ocorrerá entre as linhas de fluxo e retorno. Quando esta diferença de pressão for suficiente para vencer as forças de atrito com a tubulação, a circulação do fluido terá início.

De acordo com Duffie e Beckman (2013), sistemas de termossifão são auto ajustáveis, sendo que quanto maior for a diferença de temperatura entre o coletor e a água do sistema, maior será o fluxo de água.

Fica evidente que para este ciclo funcionar é necessário que o reservatório de água esteja acima da fonte quente, pois o fluido aquecido, com menor massa específica, sempre se deslocará para cima. Também é necessário evitar tubulações com geometria muito complexa que possam impedir o fluxo vertical do fluido.

4. SISTEMAS HÍBRIDOS FOTOVOLTAICO / TÉRMICOS

De acordo com Tselepis e Tripanagnostopoulos (2002), a maior parte da radiação solar absorvida por células fotovoltaicas não é convertida em eletricidade e sim em calor, aumentando a temperatura e reduzindo a eficiência elétrica.

A temperatura das células solares pode ser atenuada por extração de calor com a adequada circulação natural ou forçada de um fluido. Uma alternativa interessante para isso é utilizar sistemas híbridos fotovoltaico-térmicos (PV-T) que consistem de módulos fotovoltaicos convencionais acoplados com dispositivos de extração de calor. Desta forma as células solares poderiam trabalhar a uma temperatura menor, com melhor eficiência e o calor extraído poderia ser utilizado para aquecer água, por exemplo.

4.1 Um estudo sobre o elemento térmico

Ibrahim et al. (2008) diz que muito esforço tem sido feito para se aprimorar a eficiência de híbridos PV-T, tanto da parte térmica quanto das células solares. A combinação da eficiência térmica e elétrica, conhecida como eficiência total é influenciada por uma série de parâmetros e condições de operação, entre eles o design do trocador de calor, outrora nomeado elemento térmico.

Em um estudo muito pertinente para este trabalho, Ibrahim et al. (2008) realizou uma simulação computacional com sete modelos de trocador de calor, entre eles os da Fig. 4, e os comparou para determinar qual obteria a maior eficiência total.

Ambos os modelos da Fig. 4 foram projetados com tubos de aço inoxidável de perfil quadrado 12,7 mm x 12,7 mm com parede de 1 mm, e simulados com um fluxo de água de 0,01 kg/s. As células fotovoltaicas foram consideradas de silício (Si) policristalino.

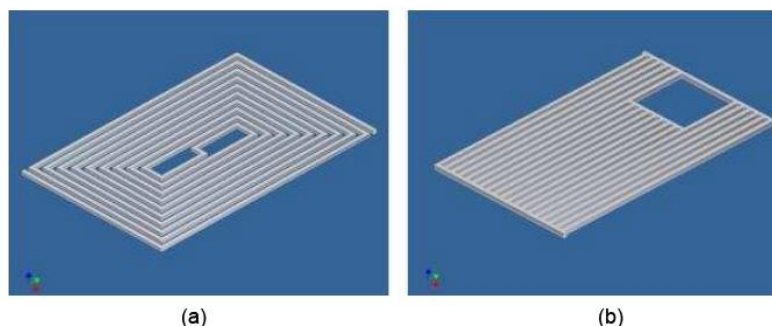


Figura 4 – Modelos de trocador de calor para módulos PV-T

Fonte: Adaptado de Ibrahim et al. (2008)

Os resultados demonstraram que a maior eficiência foi obtida pelo modelo em espiral da Fig. 4(a), atingindo 50,12% de eficiência térmica e 11,98% de eficiência elétrica. O modelo da Fig. 4(b) ficou em quarto lugar, com uma eficiência térmica de 42,5% e eficiência elétrica de 11,90%.

Devemos observar que o modelo da Fig. 4(a) e também os modelos que ficaram em segundo e terceiro lugar na análise necessitam de circulação forçada para trabalhar, sendo que o autor considerou um fluxo de água constante em todos os casos. Já o modelo da Fig. 4(b), pela sua característica de tubos paralelos, pode ser empregado em um sistema de termossifão que como visto anteriormente realiza a circulação do fluido de forma passiva por convecção natural. Isso elimina perdas de energia com equipamentos auxiliares, como bombas, aumentando a eficiência total do conjunto.

Ibrahim et al. (2008) destaca ainda que durante suas simulações concluiu que o *gap*, ou seja, o espaçamento entre os tubos tem um papel de elevada importância na eficiência do trocador de calor. É recomendado que a superfície posterior do módulo fotovoltaico seja completamente coberta para se obter um bom resultado. Por fim, ainda é observado que as alterações no design têm uma influência muito maior na eficiência térmica do que na eficiência elétrica.

5. APRESENTAÇÃO DO PROJETO

A proposta deste trabalho é desenvolver um modelo de trocador de calor para ser utilizado como elemento térmico em um sistema PV-T. O sistema final deve operar com ciclo de termossifão, reduzindo assim custos iniciais por dispensar bombas e outros equipamentos de controle ativo, além de não necessitar de energia elétrica para seu funcionamento.

Como ponto de partida, foi utilizado o modelo com tubos paralelos de Ibrahim et al. (2008), apresentado na Fig. 4(b), construído com tubos de perfil quadrado de 12,7 x 12,7mm e parede de 1mm em aço inoxidável AISI 304. Entretanto, apenas a geometria interna foi mantida para favorecer o ciclo de termossifão. Os materiais empregados e a forma construtiva foram totalmente repensados.

Para viabilizar o aumento da taxa de transferência de calor na superfície de contato com o módulo fotovoltaico, e por consequência a eficiência do sistema, a um custo razoável, o modelo proposto foi construído a partir de chapas, e não mais por tubos. O mesmo está ilustrado em vistas isométrica e de seção juntamente com o módulo fotovoltaico na Fig. 5(a) e (b), respectivamente.

Esta forma construtiva permite substituir o material apenas da face de contato com o módulo fotovoltaico, por outro com maior condutividade térmica. Sendo assim, foi empregada uma chapa de cobre de espessura 0,73mm nesta face, e o restante da carcaça foi construída com chapas de aço inoxidável AISI 304. Isto caracteriza uma utilização mais eficiente dos materiais, sendo que o cobre, de maior condutividade e mais caro, é empregado apenas onde se faz necessário. Como parâmetro de comparação para a melhoria, a condutividade térmica do cobre é de 401 W/m.K, contra 14,9 W/m.K do aço inoxidável AISI 304. Uma melhora de aproximadamente 2.591%.

Outra vantagem deste modelo é que não existe *gap*, ou seja, o espaçamento entre os tubos, geralmente necessário para executar a soldagem. Isto faz com que a superfície do módulo fotovoltaico fique totalmente em contato com o coletor térmico, resultando em uma extração mais eficiente do calor.

Algumas aletas foram colocadas internamente no sentido paralelo ao fluxo, mantendo assim a geometria essencial do modelo de tubos paralelos de Ibrahim et al. (2008), além de dar sustentação à fina chapa de cobre.

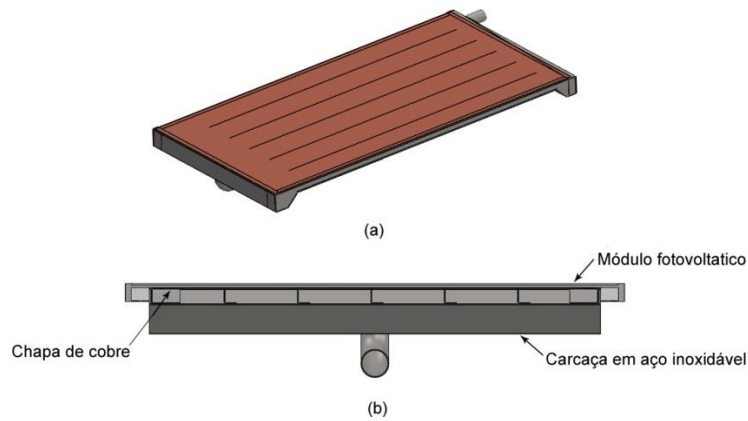


Figura 5 – Modelo de trocador de calor proposto

A Fig. 6 apresenta algumas etapas de fabricação e montagem do sistema, sendo a Fig. 6(a) o trocador de calor ainda sem a chapa de cobre, a Fig. 6(b) os componentes em processo de acabamento e vedação, a Fig. 6(c) o processo de montagem em andamento, e por fim a Fig. 6(d) o sistema final.

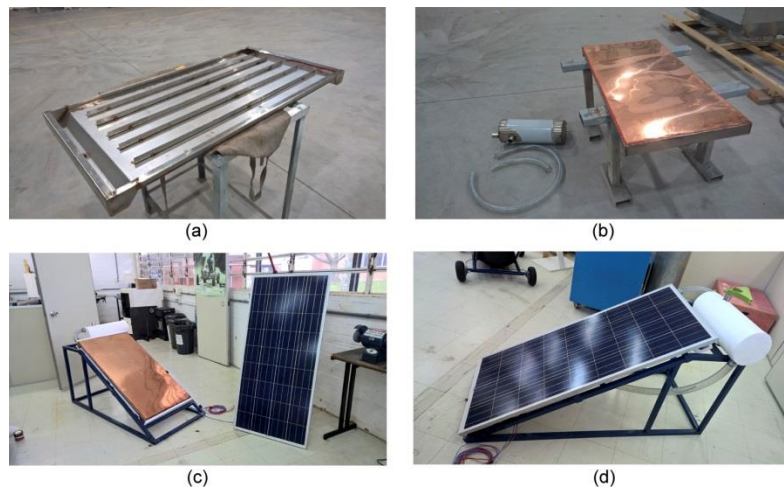


Figura 6 – Etapas de fabricação e montagem

6. ENSAIOS DE OPERAÇÃO

Para avaliar a influência do sistema de termossifão na eficiência do módulo fotovoltaico, fez-se necessário realizar dois ensaios. Primeiramente apenas com o módulo fotovoltaico, e após, com o sistema completo para que assim os resultados possam ser comparados. Os ensaios foram realizados na cidade de Bento Gonçalves/RS.

6.1 Metodologia

No primeiro ensaio foram medidos simultaneamente com intervalos de 1 minuto os seguintes parâmetros:

- Tensão de circuito aberto (V_{oc});
- Corrente de curto-circuito (I_{sc});
- Temperatura na face posterior do módulo fotovoltaico (T_{mod});
- Radiação solar incidente (G);
- Eficiência do módulo fotovoltaico (η).

Este ensaio possibilitou conhecer a máxima temperatura que o módulo fotovoltaico atinge operando em condições reais. Os valores de V_{oc} , I_{sc} e G medidos em cada ensaio permitiram calcular e comparar a eficiência do módulo fotovoltaico em cada caso, através da Equação (1). Assim, também foi possível relacionar o quanto o aumento de temperatura influencia na eficiência da conversão de energia solar em energia elétrica.

No segundo ensaio, com o sistema completo, foram controlados os mesmos parâmetros que o primeiro, com exceção da temperatura na face posterior do módulo (T_{mod}). Em contrapartida, foi medida a temperatura da água no reservatório, para que o potencial de aquecimento seja avaliado.

6.1 Ensaio apenas com o módulo fotovoltaico

O ensaio apenas com o módulo fotovoltaico foi realizado no dia 22 de maio de 2015, tendo início às 10 horas e 43 minutos, e sendo finalizado às 15 horas e 2 minutos, sob condições de céu limpo.

A Fig. 7 apresenta o gráfico da irradiância solar no plano do módulo ao longo de todo ensaio.

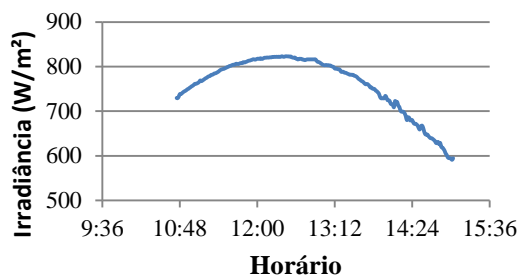


Figura 7 – Irradiância no plano do módulo x Horário

Pode-se notar que a curva da irradiância tem um comportamento parabólico ao longo do dia, sendo que neste ensaio atingiu o pico de 823 W/m² às 12 horas e 28 minutos.

A Fig. 8 apresenta o comportamento da temperatura da face posterior do módulo fotovoltaico. Nota-se uma rápida elevação da temperatura nos primeiros minutos de exposição ao Sol, chegando até 35 °C. Após isso, ocorre uma elevação mais lenta e oscilante devido à influência da convecção externa. O pico de temperatura foi de 43 °C, atingido às 13 horas e 27 minutos.

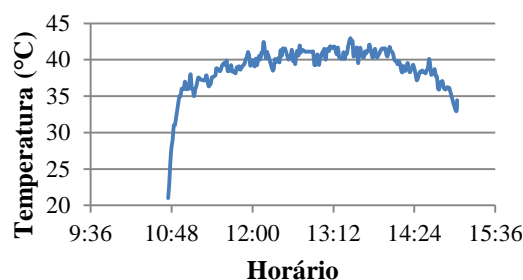


Figura 8 – Temperatura do módulo fotovoltaico x Horário

A eficiência do módulo fotovoltaico ao longo do ensaio é apresentada na Fig. 9.

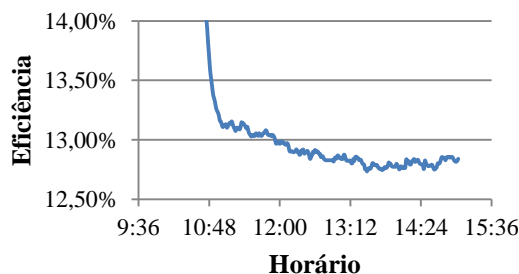


Figura 9 – Eficiência do módulo fotovoltaico x Horário

É perceptível a queda acentuada da eficiência no início do ensaio devido ao rápido aumento de temperatura. A eficiência que era de 14,03% no início do ensaio quando a temperatura era de 21 °C, atingiu um mínimo de 12,73% às 13 horas e 29 minutos, quando a temperatura era de 42,6 °C. Uma queda de 1,30% na eficiência para um aumento de

temperatura de 21,6 °C. Considerando a máxima eficiência do módulo de 14,03%, esta queda representa uma variação de 9,27% sobre o total.

6.2 Ensaio do sistema híbrido fotovoltaico/térmico

O ensaio com o sistema PV-T completo foi realizado no dia 08 de junho de 2015, tendo início às 11 horas e 18 minutos, e sendo finalizado às 15 horas e 07 minutos, também sob condições de céu limpo. Neste ensaio o trocador de calor foi conectado à um reservatório de água de 12 litros, isolado termicamente.

A Fig. 10 apresenta a irradiância solar no plano do módulo ao longo do ensaio.

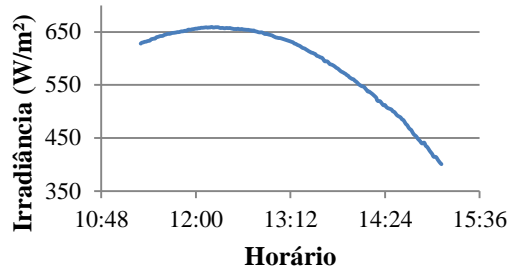


Figura 10 – Irradiância no plano do módulo x Horário

O pico ocorreu às 12 horas e 12 minutos, chegando a 659 W/m². Um valor bem abaixo do registrado no primeiro ensaio.

A Fig. 11 registra o comportamento da temperatura da água no interior do reservatório durante o ensaio.

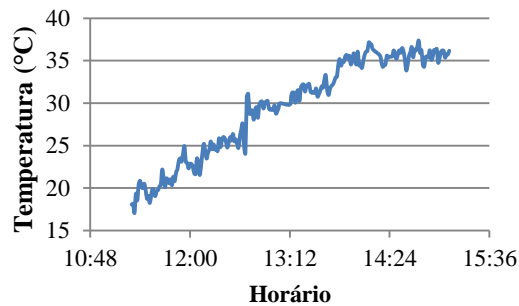


Figura 11 – Temperatura da água no reservatório x Horário

Este gráfico confirma o funcionamento do sistema térmico com ciclo de termossifão. O mesmo foi capaz de elevar temperatura da água desde a temperatura ambiente, apontada em 18 °C até um pico de 37,4 °C, registrado às 14 horas e 45 minutos, apenas com o calor removido da face posterior do módulo fotovoltaico.

A eficiência do módulo fotovoltaico durante o ensaio é dada pela linha vermelha no gráfico da Fig. 12. Para efeitos de comparação, a curva do primeiro ensaio foi replicada.

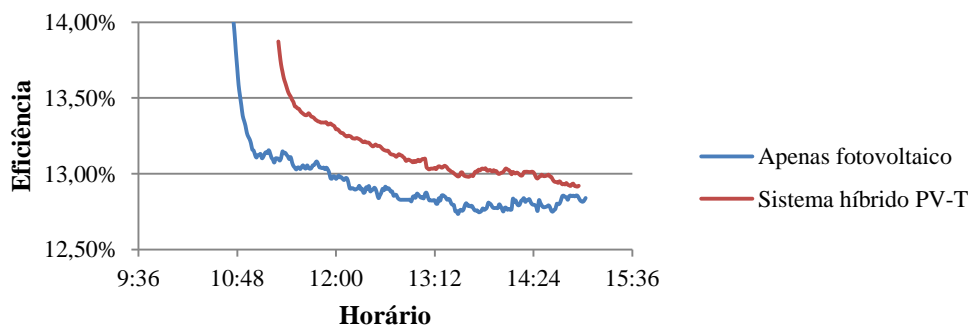


Figura 12 – Eficiência do módulo fotovoltaico x Horário

É perceptível uma queda mais suave na eficiência da geração elétrica em relação ao primeiro ensaio, devido à presença do trocador de calor. Com o sistema completo, a eficiência iniciou no pico de 13,87% e atingiu o ponto mais baixo ao final do ensaio, às 15 horas e 7 minutos, com o valor de 12,92%. A presença do sistema térmico resultou em uma melhora média de 0,27% na eficiência absoluta do módulo fotovoltaico. Como referência para o limite que esta melhora poderia atingir, sabe-se que o aumento da temperatura no primeiro ensaio causou uma queda máxima de eficiência de 1,30%.

A melhora relativa da eficiência do segundo ensaio, em comparação com o primeiro, foi de em média 2,06%.

7. CONCLUSÃO

Este trabalho comprovou e mensurou experimentalmente que o aumento de temperatura de um módulo fotovoltaico culmina na queda de sua eficiência em gerar energia elétrica. Um sistema de arrefecimento foi proposto para minimizar estes efeitos, e ainda aproveitar o calor de forma útil, aquecendo água. Tal sistema teve suas bases teóricas fundamentadas no conceito de equipamento híbrido fotovoltaico/térmico (PV-T) em conjunto com o conceito de termossifão, que realiza a circulação da água através da diferença de calor, dispensando bombas e outros instrumentos de controle ativo.

Os resultados dos ensaios práticos foram positivos para o funcionamento do sistema, que foi capaz de elevar a temperatura da água no reservatório em 19,4 °C. A melhora na eficiência absoluta do módulo fotovoltaico foi de em média de 0,27%, que representa uma melhora relativa de 2,06% entre os dois ensaios.

Já era esperado, devido a limitações técnicas, que a temperatura da água ficaria aquém da necessária para o consumo doméstico. Entretanto um sistema de aquecimento auxiliar poderia ser proposto para que a temperatura ideal seja atingida. Desta forma, o sistema apresentado neste trabalho teria a função de pré-aquecimento, economizando parte da energia elétrica que seria necessária para aquecer a água desde a temperatura ambiente.

O desempenho observado nos ensaios mostra que um híbrido fotovoltaico/térmico é capaz de aproveitar maior quantidade de energia solar por unidade de área que um módulo fotovoltaico isolado. A continuidade deste trabalho deverá avaliar a viabilidade econômica do mesmo, relacionando o aumento no aproveitamento de energia com o custo do equipamento, e o tempo de retorno do investimento.

REFERÊNCIAS

- Dobson R. T., Ruppertsberg J. C., 2007. Flow and heat transfer in a closed loop thermosiphon. Journal of Energy in Southern Africa. Stellenbosch: v. 18, n. 3, p. 32-40.
- Duffie J. A., Beckman W. A., 2013. Solar engineering of thermal process. 4 ed. Hoboken: JW&S.
- Dupeyrat P. et al., 2011. Recent advances in the development and testing of hybrid pv-thermal collectors. Freiburg: ISE.
- Go Green Heat Solutions, 2014. Sistema de aquecimento de água por termossifão. [S.I.], 2014. il color. Disponível em <<http://gogreenheatsolutions.co.za/>>.
- Ibrahim A. et al., 2008. Simulation of different configuration of hybrid photovoltaic thermal solar collector (PVTs) designs. Bangui: [s.n.].
- Tselepis S., Tripanagnostopoulos Y., 2002. Economic analysis of hybrid photovoltaic/thermal solar systems and comparison with standard pv modules. Athens: [s.n.].
- Varella F. K. O. M., Cavaliero C. K. N., Silva E. P., 2008. Energia solar fotovoltaica no Brasil: incentivos regulatórios. Revista brasileira de energia. [S.I.]: v. 14, n. 1, p. 9-22.
- Villas M. G., 1999. Energía solar fotovoltaica y cooperación al desarrollo. Madrid: Iepala. 211 p.

COOLING SYSTEM FOR PHOTOVOLTAIC MODULES: A PROPOSAL TO INCREASE EFFICIENCY AND HEAT RECOVERY

Abstract. Photovoltaic (PV) modules are devices able to convert solar radiation directly into electricity. An important characteristic to observe is the solar cells' efficiency tends to decrease as the temperature rises. This study has developed an adaptable cooling system for flat-plate PV modules. The objective is to absorb heat from solar cells, reducing efficiency losses and use this energy to warm up water. The result was an hybrid photovoltaic/thermal (PV-T) equipment. A prototype for a 1470mm x 680mm and 140W PV module was manufactured to measure the temperature reduction on solar cells, the influence of this reduction on its efficiency and also the temperature rise of water in the thermal system.

Keywords: Solar Energy, Thermosiphon, Hybrid Photovoltaic/Thermal.