

COLETOR SOLAR HÍBRIDO PARA GERAÇÃO DE ENERGIA

Suelem Vieira dos Santos*
Wagner Cherobin**
Joiris Manoela Dachery***
Gilson José Rodrigues****
Marcellus Fontenelle*****

RESUMO

Neste trabalho teve-se como objetivo comparar o funcionamento dos painéis fotovoltaicos, demonstrando sua construção e estudando o efeito do resfriamento em um módulo fotovoltaico (FV), bem como analisar o aproveitamento da energia solar em um único módulo, coletor solar híbrido (fotovoltaico e térmico). Com a construção e a montagem do experimento, analisaram-se dados como tensão, corrente elétrica e também temperaturas envolvidas no sistema. Os dados para o experimento foram obtidos entre os dias 29 de março de 2016 e 19 de maio de 2016. As leituras das grandezas foram feitas nos horários das 12 às 18h. Caracterizou-se o módulo FV com coletor térmico (CT) e o módulo sem coletor térmico (ST), ou seja, convencional. A eficiência de geração elétrica do módulo CT ficou em média de 4,55%, já o módulo ST teve eficiência média de 4,22%. O módulo CT, durante os dias em que houve coleta, foi o que teve a maior geração de energia, totalizando 569,3 W quando comparado com o ST, com 536,5 W, portanto, tendo gerado 32,8 W de energia. É possível concluir que o resfriamento de um painel FV de silício amorfo possui uma tendência de geração de eletricidade maior que em um módulo FV convencional.

Palavras-chave: Energia solar. Eficiência. Fotovoltaico. Térmico. Híbrido.

1 INTRODUÇÃO

A energia solar, sendo uma energia renovável, pode ser aproveitada de diversas formas; a energia térmica é uma delas. De acordo com Tiradentes (2007), o aquecimento é a aplicação mais natural e óbvia da energia solar, utilizada pelo homem desde a pré-história.

Nos dias atuais já são conhecidas várias aplicações da energia solar voltada para o aquecimento de fluidos sólidos ou de ambientes. Nas regiões mais frias do Planeta, teve desenvolvimento notável, com a utilização de tecnologias simples, mas eficientes, pelo menos nos períodos de maior insolação.

Teixeira (2012) afirma que os coletores solares térmicos têm como objetivo converter a maior quantidade de radiação solar disponível em calor e transferir esse calor com o mínimo de perdas possível para o resto do sistema. Existem diversos tipos e *designs* de coletores, com custos e performances diferentes, para as mais variadas aplicações.

Os principais tipos de sistemas de coletor térmico são classificados quanto à forma como é efetuada a circulação do fluido térmico, sendo eles circulação em termossifão (passivo) e circulação forçada (ativo).

Existem variados tipos de coletores solares, como o de tubo a vácuo e de placa plana. O de placa plana é constituído principalmente de uma placa absorvedora, serpentinas em tubos, isolantes e um reservatório. Nesse tipo de coletor o calor é transferido para a água, que circula pela tubagem no circuito, o qual, por sua vez, transfere o calor para um reservatório (DUARTE, 2012).

* Graduanda em Engenharia Bioenergética pela Universidade do Oeste de Santa Catarina de Xanxerê, SC; suelemvieira23@gmail.com

** Graduando em Engenharia Bioenergética pela Universidade do Oeste de Santa Catarina de Xanxerê, SC; wagcher@gmail.com

*** Pós-graduada em Eficiência Energética aplicada aos Processos Produtivos pela Universidade Federal de Santa Maria; Graduada em Engenharia Bioenergética pela Universidade do Oeste de Santa Catarina de Xanxerê; Instrutora no Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial de Xanxerê; joydachery@gmail.com

**** Mestre em Engenharia Química pela Universidade Federal de Santa Catarina; Graduado em Engenharia de Alimentos pela Universidade Federal de Santa Catarina; Professor titular na Universidade do Oeste de Santa Catarina de Videira; gilson.rodrigues@unoesc.edu.br

***** Mestre em Energia na Agricultura pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná; Pós-graduado em Fontes Alternativas de Energia pela Universidade Federal de Lavras; Professor Titular e Coordenador do Curso de Engenharia Bioenergética na Universidade do Oeste de Santa Catarina; Professor Titular do Curso de Engenharia Mecânica na Universidade do Oeste de Santa Catarina; marcellus.fontenelle@unoesc.edu.br

Já a conversão da energia solar em energia elétrica possui um pouco mais de complexidade. Conforme o relato de Zilles et al. (2012), a conversão da energia contida na radiação luminosa em energia elétrica é um fenômeno físico conhecido como efeito fotovoltaico, em que certos materiais semicondutores com capacidade de absorver a energia contida nos fótons presentes na radiação luminosa incidente a transformam em eletricidade. A energia absorvida por esses materiais faz a quebra de suas moléculas estruturais, e com isso cargas elétricas são liberadas podendo ser utilizadas para a realização de trabalho.

A conversão fotovoltaica (FV) é o surgimento de uma diferença de potencial entre dois materiais semicondutores de propriedades elétricas diferentes em razão da incidência de luz na região de junção entre eles. A grande maioria dos dispositivos que fazem uso do efeito fotovoltaico é constituída de silício nas suas diferentes formas, principalmente na forma de silício multicristalino (BÜHLER, 2007).

Unindo os dois tipos de sistemas, fotovoltaico e térmico, tem-se o coletor solar híbrido, uma tecnologia que converte a radiação solar, simultaneamente, em eletricidade e calor. Esse sistema combina as funções do coletor solar térmico (CT) e FV, o que, basicamente, consiste na adição de um sistema de troca térmica em um módulo FV (CHARALAMBOUS et al., 2004).

Dessa forma, a placa absorvedora ou trocadora de calor coletará a energia térmica, provocando um arrefecimento no módulo fotovoltaico, o que resulta em uma melhoria no seu comportamento elétrico. Essa energia térmica é aproveitada para aquecer água ou ar. Além de se conseguir obter uma maior eficiência de conversão energética, com um sistema híbrido, consegue-se uma redução do espaço útil e do investimento inicial, quando comparado com um sistema composto por um módulo FV e um coletor solar, colocados lado a lado.

Foi relatado por Almeida (2008) que o sistema híbrido com células monocristalinas produz cerca de 26% a 31% mais energia do que um módulo FV convencional para a mesma área e a mesma potência instalada. Também conclui que o sistema com um coletor convencional produz cerca de 2% a 9% mais energia térmica do que um coletor híbrido.

Neste trabalho teve-se como objetivo comparar o funcionamento dos painéis fotovoltaicos, do tipo placa plana, avaliando o efeito do resfriamento em um módulo fotovoltaico, bem como analisar o aproveitamento da energia solar em um único módulo, coletor solar híbrido fotovoltaico e térmico. Foram coletados e analisados os dados de tensão, corrente elétrica e temperaturas envolvidas no sistema.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para este trabalho, utilizaram-se dois módulos fotovoltaicos, sendo em um deles adaptada uma placa absorvedora de calor, sem qualquer alteração. Com isso foi designado que esse painel seria P1CT (com coletor térmico) e o outro P2ST (sem coletor térmico). O escoamento do fluido é livre com circulação forçada por meio da utilização de uma bomba-d'água de pequeno porte.

Os dados foram coletados nos dias ensolarados e quentes em um período de 29 de março de 2016 a 19 de maio de 2016. O procedimento de coleta ocorreu de forma a se utilizar a maior incidência solar disponível. Por isso os aparelhos eram ligados ao meio-dia, sendo programados para a cada 60s fazerem a gravação instantânea da medida.

2.1 PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

Foram utilizados painéis fotovoltaicos de silício amorfo (a-Si), construídos pela Solar Plus (Portugal), usando a tecnologia de filme fino. Os módulos de a-Si possuem superfícies frágeis em sua estrutura, pois utilizam vidro na face frontal e posterior.

Os painéis fotovoltaicos utilizados no experimento foram instalados no laboratório de energias renováveis do bloco H da Unoesc Xanxerê (Fotografia 1), montados em um suporte a 45° de inclinação. A sua direção de apontamento está para o Noroeste. Esse posicionamento dos painéis foi analisado conforme sombreamentos em seu entorno.

Fotografia 1 – Imagem do sistema completo, montado no Bloco H da Unoesc Xanxerê



Fonte: os autores.

2.2 TROCADOR DE CALOR

O trocador de calor utilizado no experimento foi modelado utilizando o *software* AutoCad 3D®, em tamanho proporcional ao módulo fotovoltaico. O coletor de calor tem dimensões de 580 mm x 1000 mm, com uma área de 0,58 m², que estará em contato com a parte traseira do módulo fotovoltaico. A espessura da chapa de alumínio que está em contato com o módulo fotovoltaico é de 1,2 mm. Para melhorar a eficiência de resfriamento, foi utilizada uma bomba-d'água para fazer com que o fluido circule pelo coletor de calor retornando para o reservatório. O ciclo de ligamento da bomba foi programado por meio de um temporizador analógico com ciclo de energização a cada 15 minutos.

Utilizou-se lã de vidro para fazer a isolamento entre o coletor térmico e o meio ambiente, possuindo uma condutividade térmica de 0,038 W/mK, diminuindo, assim, a perda de calor por convecção, fazendo com que a quantidade de energia (calor) transferida do módulo para a água tenha a menor perda possível para o ambiente.

Um sistema de aquecimento solar de água é composto por um reservatório para fazer o armazenamento da água aquecida. Nesse caso, o reservatório foi usado apenas para fazer a água recircular no interior do coletor térmico.

Foi utilizada uma caixa retangular de plástico com capacidade de 150 litros. Para o processo de montagem, foi necessário fazer dois furos de 25 mm; o furo superior ficou designado como o retorno da água aquecida vinda do coletor de calor. O segundo furo, inferior, ficou como a saída da água do reservatório, sendo impulsionada a entrar novamente no coletor pela bomba.

Para se efetuar uma maneira padronizada de ligamento e desligamento da bomba-d'água, foi instalado um temporizador analógico da marca G20 127/220V de 10A, programado para acionar a bomba a cada 15 minutos no horário das 12 às 18h.

2.3 COLETA E TRATAMENTO DOS DADOS

Para obter as características elétricas dos módulos em comparação, foram colocados multímetros digitais da marca Impac modelo IP336-RS. Para a aquisição da corrente, foram utilizados também multímetros digitais da marca Minipa modelo ET 1002.

Os dados elétricos medidos foram a tensão e a corrente, sendo estes salvos em um computador com data e hora demarcadas em cada intervalo de tempo definido. Para adquirir os dados de tensão, foram conectadas as pontas de prova em paralelo à carga, e para medir a corrente foram instalados os multímetros em série.

As temperaturas dos módulos fotovoltaicos e da água que circula pelo coletor, na entrada e na saída, foram coletadas com auxílio de um termômetro digital de quatro canais da marca Instrutemp e com opção de registro dos dados coletados na sua memória interna ou diretamente em um computador. No experimento foram utilizados sen-

sores termopares tipo K. O primeiro canal de entrada do sensor, denominado T1, foi instalado na superfície frontal do módulo P2ST. O termopar T2, conectado ao segundo canal, foi colado na face frontal do módulo fotovoltaico P1CT, em que estava inserido o coletor de calor. O terceiro canal do termômetro foi ocupado pelo termopar T3 para a aferição das temperaturas de entrada de água no coletor. Finalmente, o termopar T4, instalado no último canal do termômetro, mediu as temperaturas de saída da água do coletor de calor.

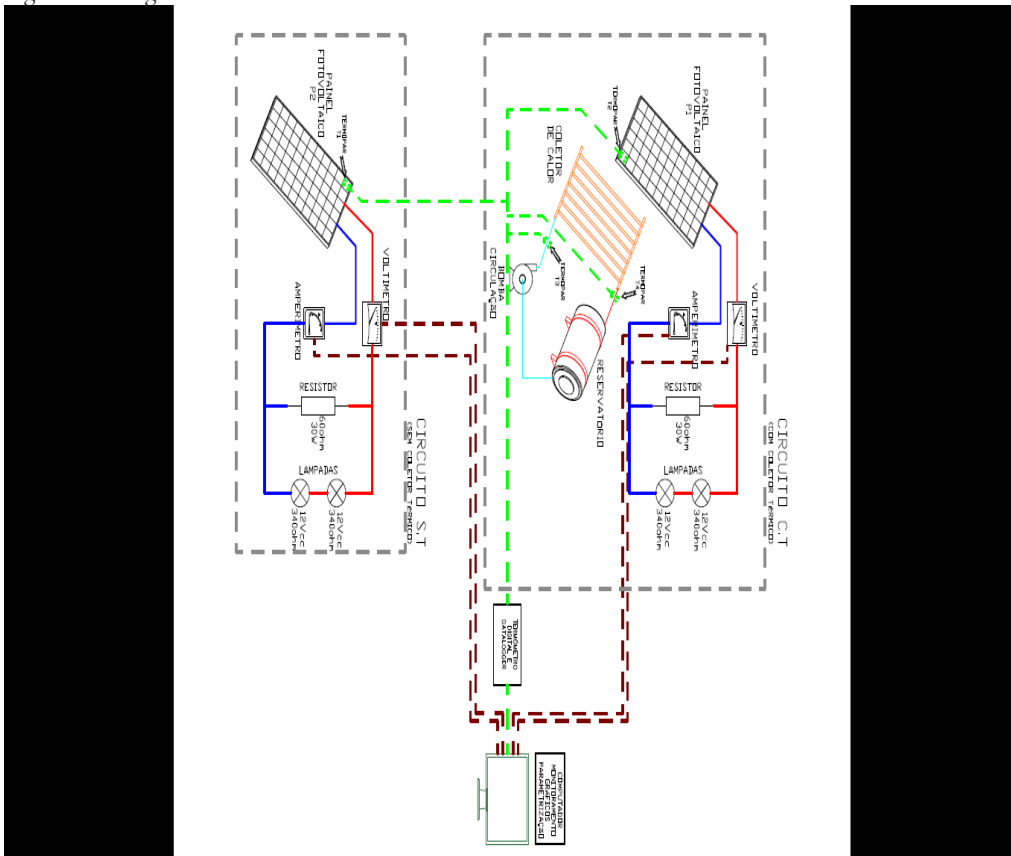
Os dados coletados foram analisados utilizando-se os seguintes *softwares*:

- a) Datalogger Multímetros IP336-RS: multímetros utilizados para medir as tensões;
- b) WebCam Xp free: para a coleta dos dados de corrente foram utilizados outros dois multímetros, estes sem conexão RS-232 ou similar para gravar os dados diretamente no computador. Dessa forma, foi instalada uma câmera *web* ligada ao computador e direcionada aos multímetros minipa ET 1002, que estavam lado a lado. Com o auxílio do *software* WebCam Xp free foi programada a captura das fotos dos aparelhos a cada 60s e armazenada na memória do computador;
- c) *Software* Datalogger de temperatura: o termômetro digital ITTH1400 usado no estudo conta com um *software* para aquisição dos dados Run D4IThermoMeter, no qual é possível gravar as temperaturas medidas no intervalo de tempo programado diretamente no computador.

Para os cálculos de rendimento elétrico, considerou-se que as células fotovoltaicas não conseguem converter toda a radiação solar incidente em eletricidade, em razão das limitações da tecnologia e das perdas inerentes ao processo. A eficiência de um módulo fotovoltaico é definida como a razão entre a máxima potência elétrica gerada com a potência nele incidente.

Na Figura 1 mostra-se o diagrama elétrico do módulo fotovoltaico P1CT com a instalação de um coletor de calor e P2ST sem coletor térmico. Também é possível visualizar a montagem dos instrumentos e sensores de temperatura.

Figura 1 – Diagrama elétrico



Fonte: os autores.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

No projeto do trocador de calor, considerou-se uma forma construtiva simples, com a maior área superficial total disponível para a transferência de calor. O modelo de coletor partiu do princípio de transmissão do calor por condução, em que a superfície traseira do módulo fotovoltaico está em contato com a superfície do coletor térmico, transmitindo o calor do painel para o fluido circulante internamente ao trocador de calor.

O período de monitoramento do sistema foi iniciado em 29 de março de 2016 até a data de 19 de maio de 2016, porém, nem todos os dias foram utilizados em decorrência das variações climáticas, totalizando 24 dias de coletas. As leituras das grandezas foram feitas nos horários das 12 às 18h, com gravações de dados a cada 60s. Isso gerou um total de 360 dados diários de gravações. No período de 24 dias de coletas houve um total de 8.640 dados gravados de tensão, corrente, temperatura e radiação. A Tabela 1 a seguir mostra o resumo geral das médias diárias dos dados coletados.

Tabela 1 – Resumo geral apresentando as médias diárias dos dados coletados

Data	Corrente (A)		Tensão (V)		Energia gerada (W)		E* (%)		Δ^{**} (%)	R ^{***} (W/m ²)
	CT	ST	CT	ST	CT	ST	CT	ST		
29/03/2016	0,72	0,7	43,43	41,83	31,44	29,63	4,90	4,55	5,78	804,56
30/03/2016	0,6	0,6	31,02	27,31	20,35	17,82	3,18	2,85	12,45	782,76
31/03/2016	0,32	0,3	19,08	18,48	10,87	10,59	2,14	2,03	2,62	488,96
01/04/2016	0,71	0,72	42,7	41,22	30,71	29,91	5,27	5,14	2,60	766,28
04/04/2016	0,59	0,61	36,18	34,67	24,91	24,61	3,73	3,78	1,22	754,2
05/04/2016	0,66	0,63	38,68	36,98	26,06	24,17	4,41	4,16	7,25	716,96
06/04/2016	0,7	0,69	42,01	40,56	30,27	28,97	5,27	4,99	4,29	724,84
13/04/2016	0,45	0,44	27,37	25,16	15,44	14,54	4,43	3,91	5,80	548,92
14/04/2016	0,3	0,27	18,38	16,23	7,17	5,46	2,23	1,78	23,94	381,4
15/04/2016	0,65	0,63	38,68	36,78	27,74	26,06	4,91	4,43	6,07	704,08
18/04/2016	0,63	0,63	37,73	35,67	25,83	24,77	5,28	4,76	4,13	600,21
19/04/2016	0,51	0,49	30,9	28,92	20,25	18,92	3,02	2,65	6,58	696,2
20/04/2016	0,61	0,59	36,5	34,73	25,9	24,48	4,73	4,61	5,49	613,36
23/04/2016	0,68	0,67	40,96	39,27	30,03	28,62	5,63	5,53	4,69	621,8
29/04/2016	0,6	0,59	36,12	35,29	25,72	24,39	5,25	4,98	5,20	613,94
02/05/2016	0,65	0,63	38,28	37,38	27,88	26,82	5,91	5,57	3,79	592,56
04/05/2016	0,65	0,63	39,19	37,25	28,29	26,47	5,89	5,31	6,45	555
05/05/2016	0,6	0,58	36,21	34,28	25,41	23,81	5,13	4,52	6,31	543,68
07/05/2016	0,34	0,31	20,59	18,94	10,6	9,53	2,49	2,16	10,09	387,21
10/05/2016	0,41	0,38	25,1	23,05	14,32	12,86	3,03	2,58	10,21	452,84
14/05/2016	0,59	0,58	35,53	34,03	25,06	23,88	4,54	4,26	4,70	603,46
17/05/2016	0,66	0,64	39,74	37,87	28,96	27,12	6,00	5,63	6,34	537,4
18/05/2016	0,66	0,64	39,42	37,64	28,51	26,91	5,97	5,67	5,61	530,52
19/05/2016	0,64	0,63	38,56	36,93	27,58	26,21	5,78	5,49	4,97	541,96
Média	0,58	0,57	34,6	32,94	23,72	22,35	4,55	4,22	6,52	606,8
Soma					569,3	536,5				

Fonte: os autores.

Nota: *Eficiência; **Diferença entre energia gerada; ***Radiação média.

A diferença da energia gerada entre os módulos P1CT e P2ST variou em média de 6,52%. A eficiência do painel com o coletor de calor ficou em média de 4,55%, já a eficiência do painel solar sem o coletor teve eficiência média de 4,22%, uma variação que induz a uma tendência de que o módulo P1CT produz mais energia ao ser resfriado.

O dia 14 de abril de 2016 foi o dia em que menos energia foi contabilizada em decorrência da nebulosidade que ocorreu. A geração média de energia no módulo P1CT foi de 7,17 W, já no P2ST a geração foi de 5,46 W. Mesmo em dias adversos sem grande incidência de radiação foi possível gerar mais energia no módulo com o coletor de calor.

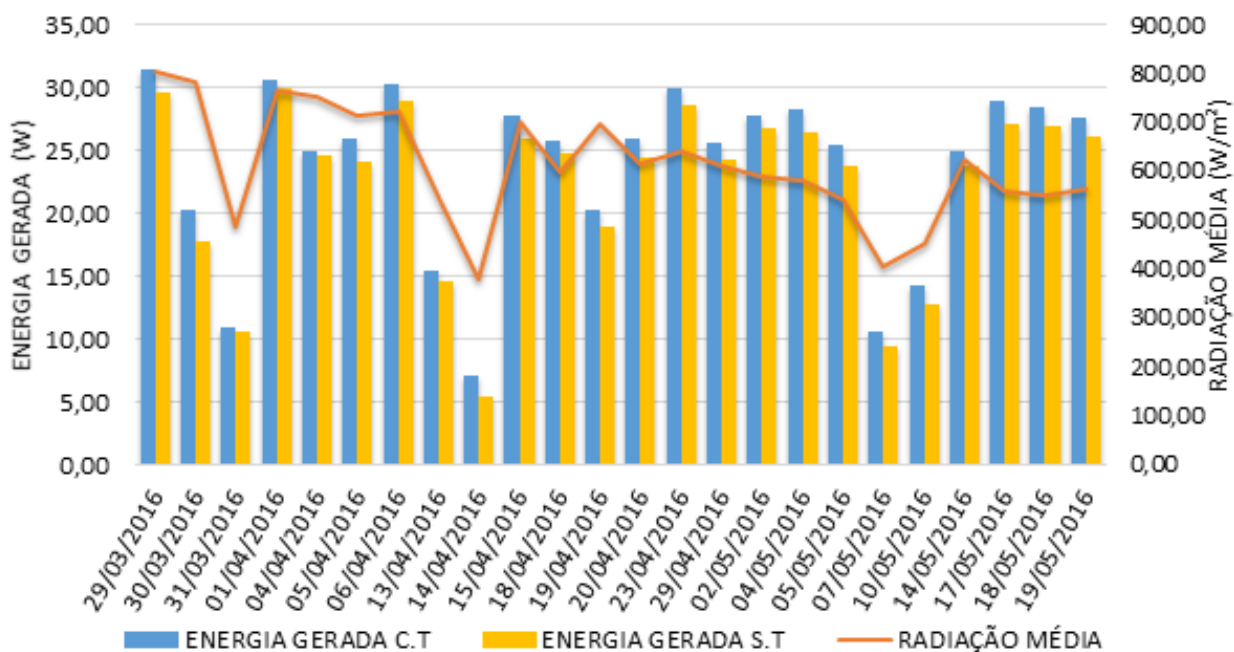
Mediante esse experimento, foi possível perceber que a água que circula no coletor de calor, em determinados dias, foi aquecida a temperaturas de até 40 °C. Segundo Marques (2012), o rendimento térmico de um painel híbrido é inferior a um coletor solar térmico convencional, em razão das perdas de rendimento ocasionadas pelo fato de os raios solares não atingirem diretamente o coletor. Para que a energia radiante chegue até o coletor de calor, é preciso passar por uma série de resistências térmicas.

Com os dados, foi possível encontrar as médias de temperatura no intervalo das 12 às 16h. O módulo P1CT, que continha o resfriamento pelo coletor térmico, em quase todo o período de tempo, ficou com temperaturas abaixo do módulo P2ST convencional, observando-se, assim, que parte do calor gerado foi transmitido para o fluido. Após as 16h as temperaturas diminuem consideravelmente; em todos os dias ocorreu a inversão das temperaturas e o P2ST teve suas temperaturas marcadas abaixo do P1CT. Isso ocorreu porque a água que circula pelo coletor térmico está em um sistema fechado e, ao final do dia, a água aquecida mantém o módulo P1CT mais quente que o P2ST. Por meio do experimento foi possível observar que conforme há variação de temperatura do módulo fotovoltaico sua tensão é alterada. No módulo fotovoltaico em que havia a instalação do coletor de calor é possível observar que sua tensão era maior que a tensão do painel convencional, sendo ambos incididos pela mesma radiação solar.

A relação entre a potência gerada e a variação da incidência de radiação no painel solar, como é previsto nos dias de maior radiação, também é de maior geração de energia. Também é possível perceber a radiação diminuindo com o passar dos dias e meses em decorrência da passagem das estações climáticas e, conseqüentemente, da diminuição da radiação solar. Praticamente todos os dias a geração de eletricidade no módulo P1CTST ficou inferior ao módulo P1CT.

Existe uma correlação entre a energia gerada e a radiação incidente. Mesmo em dias com pouca radiação direta, houve geração de energia elétrica, provando o conceito de geração também com radiação difusa. Os dias que tiveram a maior geração de energia foram 29 de março e 01, 06 e 23 de abril. As médias de geração para esses dias destacados foram de 30,61 W para o P1CT e 29,28 W para o P2ST, como é apresentado no Gráfico 1.

Gráfico 1 – Energia gerada e radiação média pelos dois processos (20 de março de 2016 a 19 de maio de 2016)



Fonte: os autores.

Os dias em que ocorreram as menores gerações elétricas foram, respectivamente, 31 de março, 13 e 14 de abril, 07 e 10 de maio. As médias de geração para esses dias foram de 11,68 W para o P1CT e de 10,59 W para o P2ST. As

médias gerais da potência de todos os dias foram de 23,72 W para o módulo com a instalação do coletor de calor e de 22,35 W para o módulo fotovoltaico P2ST, que estava operando de modo convencional sem resfriamento.

4 CONCLUSÕES

A inserção de um coletor térmico em um sistema de geração fotovoltaica comum trouxe algumas vantagens para o sistema, isto é, o resfriamento em um painel fotovoltaico de silício amorfo possui uma tendência de geração de eletricidade maior que em um painel solar convencional.

A diferença da energia gerada entre os módulos P1CT e P2ST variou em média de 6,52%, mostrando uma tendência de maior geração no módulo com o coletor de calor.

A eficiência elétrica em relação à radiação incidente mostrou que o módulo P1CT possuiu ao final, em média, 7,25% a mais de eficiência elétrica em comparação ao P2ST.

Com esse experimento foi possível obter também água aquecida. A geração de calor foi considerada baixa, pois as temperaturas alcançadas pela água não foram suficientes para o armazenamento em períodos sem radiação solar e posterior utilização.

Uma sugestão para trabalhos futuros estaria no melhoramento do isolamento térmico das tubulações e do reservatório e também ser melhorada a capacidade de troca térmica do coletor de calor para obter maior quantidade de calor.

Hybrid solar collector for power generation

Abstract

The objective in this study was to compare photovoltaic panels, showing their construction and studying the effect of cooling in a photovoltaic module (FV) and to analyze the conversion of solar energy in a single module, hybrid solar collector (photovoltaic and thermal). With the construction and assembly of the experiment, it was analyzed data such as voltage, electric current and the temperatures involved in the system. The data were registered from March 29th 2016 to May 19th 2016, from noon to 6 pm. It characterized the FV module with thermal collector (CT) and the conventional module, without thermal collector (ST). The power generation efficiency average of the CT module was 4.55%, and for the ST module, it was 4.22%. During the test period, the CT module had the largest power generation, totaling 569.3 W when compared to the ST, with 536.5 W, therefore, having generated 32.8 W. It is possible to conclude that the cooling of an amorphous silicon FV panel has a tendency to higher electricity generation in a conventional FV module.

Keywords: Solar energy. Efficiency. Photovoltaic. Thermal. Hybrid.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. Brasília, DF, 2010.

ALMEIDA, L. M. M. C. E. **Estudo de um coletor solar híbrido para a produção de eletricidade e calor**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)–Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2008.

BÜHLER, A. J. **Determinação de parâmetros fotovoltaicos a partir de ensaios de curvas características sem iluminação**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)–Universidade Federal do Rio grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

CÂMARA, C. F. **Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica**. 2011. Monografia (Especialização em Formas Alternativas de Energia)–Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011.

DUARTE, P. N. A. **Colectores solares térmicos – análise de desempenho térmico de soluções tecnológicas no mercado**. 2012. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica)–Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2012.

MARQUES, R. L. M. da R. **Avaliação da viabilidade de colectores híbridos fotovoltaicos e térmicos para aplicação ao aquecimento de águas e microgeração de electricidade**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)–Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2008.

TEIXEIRA, T. R. C. **Estudo de um sistema híbrido com colectores solares termo-fotovoltaicos acoplados a um termogerador eléctrico.** 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)–Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2012.

TIRADENTES, A. **Uso da energia solar para geração de eletricidade e para aquecimento de água.** 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)–Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2007.

ZILLES, R. et al. **Sistemas fotovoltaicos conectados à rede eléctrica.** São Paulo: Oficina de Textos, 2012.