

COMPARAÇÃO EXPERIMENTAL DE ESTRATÉGIAS PARA REDUÇÃO DA TEMPERATURA DE OPERAÇÃO DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Luan G. M. dos Santos – luan@fem.unicamp.br

Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica

Lucas S. Teixeira – lucassilvat@gmail.com

Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação

Bruno W. F. Lima – bruno.lima@solsticioenergia.com

Solstício Energia Projetos e Engenharia Ltda.

Gilberto de M. Jannuzzi – jannuzzi@fem.unicamp.br

Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica

Talles V. Vargas – tallesviana1@gmail.com

Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação

Resumo. Este trabalho apresenta resultados da verificação experimental de duas estratégias de resfriamento de módulos fotovoltaicos: aletas planas (resfriamento passivo) e canais com ventilação forçada (resfriamento ativo). Tais tecnologias foram selecionadas a partir de um estudo baseado em modelagem matemática e simulação computacional. São detalhados os procedimentos de montagem do sistema experimental, bem como os materiais e métodos empregados para a aquisição dos dados de temperatura superficial e potência elétrica dos módulos, temperatura ambiente e irradiância solar. Verifica-se que as temperaturas de operação dos módulos são reduzidas mediante o uso de aletas planas, atingindo valores ainda menores quando se lança mão de canais com ventilação forçada. Contudo, os módulos resfriados apresentam menores montantes líquidos de eletricidade produzida em relação ao módulo de referência, tendo o resfriamento ativo o pior desempenho global.

Palavras-chave: Experimento, Módulo Fotovoltaico, Resfriamento

1. INTRODUÇÃO

O princípio de conversão de energia solar em eletricidade por meio de células fotovoltaicas (FV) ainda apresenta baixas eficiências, as quais assumem valores entre 10% e 20% em células comercialmente disponíveis, de modo que grande parte da energia proveniente da radiação solar nelas incidente é convertida em calor. A não dissipação desse calor implica aumento na temperatura dessas células, o que acarreta redução de sua eficiência de conversão de energia luminosa em eletricidade. O uso de células com menores coeficientes de temperatura (percentual representando a perda da eficiência de conversão energética diante de um aumento de temperatura do material) pode apresentar um aumento significativo no rendimento de sistemas fotovoltaicos instalados em locais com altas temperaturas ambiente e irradiâncias solares. Tecnologias de filme fino, em especial silício amorfo (a-Si) e telureto de cádmio (CdTe) (Ishii; Otani; Takashima, 2011; Ito et al., 2008; Makriedes et al., 2009), possuem coeficientes de temperatura de potência máxima menores que as tecnologias de silício cristalino, embora apresentem menor eficiência, necessitando, assim, de mais área disponível para uma mesma potência instalada. Tecnologias com menores coeficientes de temperatura de potência máxima apresentam rendimento superior em climas quentes quando comparadas com tecnologias com coeficientes maiores (Makriedes et al., 2010).

Uma alternativa para melhorar o desempenho de sistemas fotovoltaicos nessas condições ambientais é aumentar a dissipação de calor dos módulos, reduzindo sua temperatura de operação e, conseqüentemente, elevando sua eficiência. Isso pode ser realizado tanto passivamente, quando a troca de calor é feita via convecção natural, sem a necessidade de uma fonte externa de energia, quanto ativamente, quando tal dissipação de calor é realizada com o auxílio de uma fonte externa. Em um artigo anteriormente publicado (Rodrigues et al., 2015), apresentou-se uma revisão bibliográfica contemplando princípios de transferência de calor em módulos fotovoltaicos e diversas estratégias passivas e ativas de resfriamento de módulos FV abrangidas na literatura científica. O mesmo trabalho apresentou a modelagem matemática do comportamento térmico de quatro módulos FV – simples (tomado como referência), com aletas planas, com canais ventilados e com dutos para circulação de água – com posterior simulação computacional com vista à comparação das diferentes estratégias ante as mesmas condições ambientais, tendo como parâmetros de entrada dados de irradiância solar e temperatura ambiente locais. Para as condições consideradas, os resultados teóricos mostraram que o uso de aletas planas reduziria em cerca de 10°C a temperatura de operação do módulo, redução praticamente idêntica àquela alcançada mediante uso de dutos de água a uma vazão de 10 L/min. O melhor desempenho da simulação ficou por conta da ventilação dos canais: o uso de um microventilador de 5,85 W promoveria uma redução de cerca de 22°C na temperatura do módulo. Conseqüentemente, quanto menores as temperaturas de operação no módulo, maiores foram as

potências estimadas.

Dando continuidade ao estudo apresentado por Rodrigues et al. (2015), foram selecionadas duas estratégias de resfriamento, quais sejam aletas planas e canais ventilados, para verificação experimental. A escolha dessas tecnologias se justifica pela possibilidade de se comparar uma solução ativa com uma passiva, além de que a simulação computacional apontou a ventilação forçada como tendo o melhor desempenho em termos de redução de temperatura e aumento da potência de saída do módulo. Para além da confirmação dessa premissa, resta verificar se a potência líquida mediante essa estratégia é maior que a obtida nas demais, haja vista que toda solução ativa requer gasto energético para cumprir o resfriamento. O presente trabalho se insere no projeto de pesquisa intitulado “Desenvolvimento e teste de sistemas para a geração solar fotovoltaica em condições de alta temperatura em regiões semiáridas do nordeste brasileiro” (código do projeto junto à ANEEL: PD-6961-0004/2013; entidades executoras: Companhia Energética Candeias, Companhia Energética Potiguar e Companhia Energética Manauara).

2. MONTAGEM DO SISTEMA EXPERIMENTAL

2.1 Dissipadores

Os dois dissipadores de calor utilizados (aletas e canais) foram fabricados em alumínio; o primeiro consiste em uma placa de aletas planas, com espessura de 1 mm (base e aletas), altura de aletas de 60 mm e espaçamento entre aletas de 20 mm; já o segundo consiste na mesma placa, com a adição de uma tampa fixa por meio de rebites às pontas das aletas, de modo a formar canais retangulares. As dimensões de cada placa aletada são 793 mm X 670 mm, e o processo de fabricação utilizado foi usinagem em fresadora. Cada placa foi fabricada não como peça inteira, mas em duas metades, em virtude do limite do curso da fresadora, que não atendia ao comprimento total das placas.

Por fim, um difusor em aço galvanizado foi fabricado, a fim de cumprir o acoplamento de um microventilador (modelo ASA 12038 HB 24 – dimensões: 120 x 120 x 38 mm, acionado e desligado diariamente por meio de um temporizador digital instalado junto à sua fonte de alimentação) ao dissipador de canais retangulares. Os processos de fabricação utilizados foram dobramento e solda, e o difusor foi acoplado ao dissipador após a instalação dos módulos, descrita adiante.

2.2 Módulos FV com Dissipadores

Foram empregados no experimento três módulos FV constituídos por células de silício policristalino, fabricados sob medida pelo *Centro de Tecnologia da Informação “Renato Archer”* (CTI). Cada módulo possui dimensões de 670 x 900 mm e contém 20 células com área de 24,336 mm² cada. Os dissipadores foram fixados com auxílio de pasta térmica (produto *CoolerMaster Ice Fusion*®) a dois dos módulos, ficando um deles como referência para medições. Foi escolhido como módulo de referência aquele com maior rugosidade de superfície posterior, haja vista que a planicidade dos outros dois módulos favoreceu o acoplamento dos dissipadores. Por fim, foram fixados perfis em U em alumínio nas laterais dos módulos com auxílio de silicone, o que colaborou para a aderência dos dissipadores.

2.3 Estrutura de Fixação dos Módulos

A estrutura de fixação dos módulos foi montada sobre a laje de um dos edifícios da Faculdade de Engenharia Mecânica da Unicamp, localizada na cidade de Campinas/SP. Foram posicionados oito blocos de concreto em pares igualmente espaçados entre si, sobre os quais foram chumbados perfis formados por cantoneiras de alumínio (quatro perfis, sendo um apoiado em cada par de blocos). O posicionamento dos blocos obedeceu a critérios de orientação adequados à incidência solar na cidade, de modo que seu alinhamento foi realizado com auxílio de uma bússola. Os perfis da estrutura possuem formato trapezoidal, garantindo uma inclinação de cerca de 21° dos módulos em relação à horizontal.

Em seguida, os perfis foram intertravados por meio de cantoneiras e chapas de alumínio, sendo que todas as fixações foram feitas com parafusos autobrocantes. Por fim, foi instalada uma caixa atrás da estrutura fixação dos módulos, para abrigar os resistores que se prestam como cargas dos módulos fotovoltaicos, descritos adiante.

2.4 Instalação dos Módulos

Os três módulos foram fixados à estrutura com o auxílio de chapas e cantoneiras de alumínio, presas com parafusos autobrocantes aos perfis da estrutura. A ordem de posicionamento seguiu a sequência de identificação dos módulos:

- Módulo 1: módulo de referência, i.e., sem dissipador (posicionado na extremidade da estrutura mais próxima à parede do prédio da faculdade);
- Módulo 2: módulo com aletas planas;
- Módulo 3: módulo com canais retangulares ventilados.

Houve sucessivos realinhamentos dos módulos antes de sua fixação definitiva, devido a dificuldades de posicionamento na estrutura, tendo em vista que a presença dos dissipadores ocasionou restrições de manuseio. Rebites foram utilizados para tampar o dissipador do Módulo 3, o que foi realizado após a sua colocação na estrutura. Tal tampa consiste de uma chapa de alumínio, cortada nas mesmas dimensões de comprimento das aletas e largura total do conjunto de canais. Uma cantoneira de alumínio foi utilizada em cada lado do dissipador para auxiliar a fixação da tampa. Por fim, o microventilador (mostrado na Fig. 1) foi inserido no difusor, o qual foi acoplado à entrada dos canais (extremidade inferior do dissipador) com apoio de cantoneiras de alumínio fixas à estrutura principal. Fitas isolantes cumpriram a vedação da interface difusor-dissipador. A configuração final dos dissipadores é mostrada na Fig. 2.



Figura 1- Microventilador em funcionamento.



Figura 2- Montagem completa dos módulos com dissipadores.

2.5 Cargas resistivas associadas aos módulos FV

As cargas para fechamento do circuito de cada módulo fotovoltaico são compostas de sete resistores de potência 20 W de $8,2 \Omega$ instaladas em paralelo em cada circuito. Os resistores foram dimensionados a fim de se obter o valor de resistência mais próximo possível daquele correspondente ao de máxima potência R_{mp} para as condições padrão de teste (STC) de um módulo fotovoltaico (temperatura da célula fotovoltaica de 25°C , irradiância de 1000 W/m^2 e 1,5 AM). A Fig. 3 apresenta o gráfico corrente x tensão dos módulos fotovoltaicos fornecido por seu fabricante.

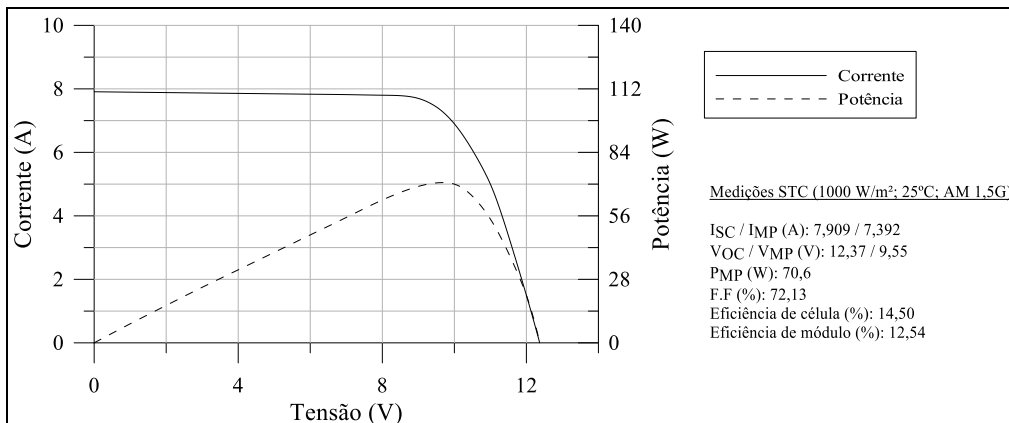


Figura 3- Curva “corrente x tensão” dos módulos adotados.

Pode-se verificar a partir do gráfico acima que os pontos de máxima potência em STC são representados por $I_{mp} = 7,392 \text{ A}$ e $V_{mp} = 9,55 \text{ V}$. Dessa forma, o resistor ideal a ser instalado nos terminais de cada módulo deve apresentar o valor $R_{mp} = V_{mp}/I_{mp} = 1,292 \Omega$. Portanto, respeitando-se a condição de que os resistores devem ser capazes de dissipar potência de forma segura, adotaram-se 7 resistores de 20 W e de 8,2 Ω . A carga de cada módulo apresenta então resistência equivalente de 1,171 Ω .

3. INSTRUMENTAÇÃO

As medições de temperatura e tensão elétrica dos módulos foram realizadas por meio de uma placa da plataforma de prototipagem eletrônica *Arduino*®. Uma placa receptora de dados, modelo *Arduino Mega*, foi adotada, apresentando tensão de operação de 5 V e 15 entradas analógicas. Os dados de tensão e temperatura dos módulos foram gravados na memória EEPROM da própria placa *Arduino*. Dessa forma, os dados foram armazenados na própria placa, de modo que se extraíssem os dados *in loco* a cada semana, tendo em vista a capacidade de armazenamento da EEPROM de 4096 bytes.

3.1 Medições de temperatura dos módulos

Sensores do modelo DS18B20 foram instalados na superfície posterior de cada módulo para medição de suas temperaturas. Em cada módulo, foram instalados cinco sensores de temperatura, e foram calculadas médias aritméticas das cinco medidas correspondentes a cada módulo para confrontar os resultados empíricos com os previstos em modelo matemático. A disposição dos sensores de temperatura é ilustrada na Fig. 4.

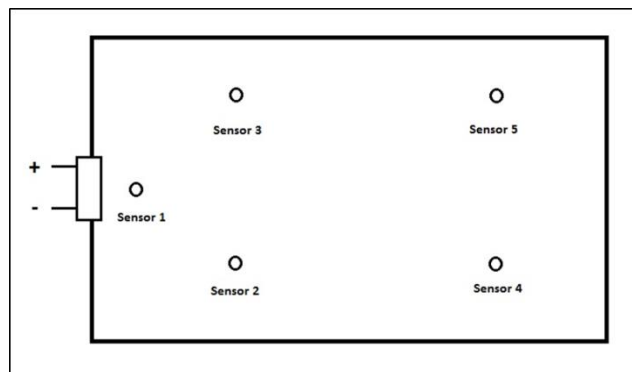


Figura 4- Disposição dos sensores na superfície posterior de cada módulo fotovoltaico.

Foram realizados furos de diâmetro próximo à largura máxima dos sensores em cada dissipador, antes de seu acoplamento aos módulos. Assim, a superfície superior de cada sensor foi colocada em contato direto com a superfície posterior de seu correspondente módulo através dos furos nos dissipadores. A fixação dos sensores foi realizada por meio da aplicação de silicone, com o intuito de garantir forte fixação e, ao mesmo tempo, bom isolamento térmico de suas superfícies laterais, a fim de que as leituras obtidas fossem as mais próximas possíveis das temperaturas reais das superfícies dos módulos.

O conjunto de aquisição de dados foi instalado no interior de uma caixa plástica fixada na face posterior da caixa de resistores. No interior dessa caixa, foi fixada uma placa de madeira, a fim de simplificar a fixação das partes do conjunto de aquisição. Na parte inferior esquerda dessa placa, foi posicionada a fonte de alimentação do microventilador, de entrada de 127 V em corrente alternada e saída de 24 V em corrente contínua. A alimentação elétrica do sistema experimental foi obtida da rede elétrica do prédio da faculdade; uma extensão foi conectada via cabo PP de 2,5 mm² a uma tomada externa do prédio, e sua extremidade fêmea foi fixada junto à caixa de aquisição de dados. Um multiplicador de tomadas (benjamim) foi conectado a tal extremidade, a fim de alimentar a fonte do microventilador e a placa *Arduino*.

Na parte superior esquerda da placa de madeira, foi posicionada a placa *Arduino*, de cujo pino de alimentação de tensão de 5 V sai um cabo vermelho para uma *protoboard*; já do pino de alimentação GND, sai um cabo preto também conectado à *protoboard*. Esses dois cabos fornecem a tensão de 5V à *protoboard*, onde foram instalados os quinze circuitos de recepção de dados de temperatura, cada um deles identificados com uma numeração em fita adesiva branca. Assim, chega a cada sensor uma alimentação de tensão provida pela *protoboard* (por sua vez alimentada pela placa *Arduino*) a partir dos cabos V_s e GND (“tensão em corrente contínua de 5 V” e “terra”), e de cada sensor sai um sinal de tensão (V_{out}) correspondente à temperatura aferida.

3.2 Avaliação das potências elétricas

A potência entregue por cada módulo pode ser calculada como sendo o produto entre a tensão elétrica, V , entre os terminais do módulo e a corrente elétrica, i , fluindo no circuito resistivo de que o módulo constitui fonte de

alimentação. Inicialmente, procurou-se aferir as correntes elétricas providas por cada módulo e a corrente elétrica fornecida ao ventilador por meio do sensor ACS712. Tal sensor é do tipo invasivo, de modo que foi necessário interromper os circuitos elétricos para instalá-los, e a medição de corrente por ele realizada se vale do Efeito Hall. Assim, estabelece-se uma relação entre a corrente fluindo no circuito (corrente esta que entra e sai, respectivamente, pelos dois pinos existentes na pequena caixa do sensor) e um sinal de tensão emitido pelo sensor (V_{OUT}). A partir de então, a conexão com o Arduino é praticamente análoga àquela dos sensores de temperatura, à diferença de que o sinal V_{OUT} não entra em um circuito resistivo da *proto-board*, mas em uma das entradas analógicas da própria placa Arduino. Uma vez instalados os sensores de corrente nos módulos, foram comparados os valores obtidos através da leitura desses sensores com os valores teóricos obtidos via cálculo algébrico (Eq. 1).

$$i = V / R \quad (1)$$

A Tab. 1 apresenta uma amostra dos dados de corrente medidos comparados, para uma dada hora, com os valores calculados via Eq. 1. Verificam-se consideráveis divergências entre os resultados.

Tabela 1- Comparação entre correntes calculadas e correntes medidas pelo sensor ACS712.

MÓDULO	GRANDEZA	VALOR	RESISTÊNCIA (Ω)	POTÊNCIA (W)
1	Tensão (V)	8,86	1,1710	67,0364
	Corrente calculada (A)	7,57		
	Corrente medida (A)	4,91		
2	Tensão (V)	8,84	1,1710	66,7341
	Corrente calculada (A)	7,55		
	Corrente medida (A)	4,96		
3	Tensão (V)	8,95	1,1710	68,4052
	Corrente calculada (A)	7,64		
	Corrente medida (A)	5,35		

Sucessivas tentativas de calibração dos sensores resultaram na persistência de tais divergências, e, diante disso, os valores de corrente elétrica calculados através da Eq. 1 são os considerados adequados ao cômputo da potência elétrica, P , entregue pelos módulos. Assim, tal potência é avaliada conforme a Eq. 2, que leva em conta as grandezas identificáveis de cada circuito: a resistência equivalente, R , composta pelas cargas resistivas anteriormente descritas, e a tensão elétrica V aferida via Arduino.

$$P = V^2 / R \quad (2)$$

A potência consumida pelo ventilador, por sua vez, pode ser calculada a partir do produto entre a tensão em corrente contínua fornecida pela sua fonte de alimentação e a corrente elétrica fluindo no circuito a ele associado, dividindo-se o valor resultante pela eficiência de conversão da fonte. No entanto, os valores de corrente elétrica obtidos a partir dos sensores resultaram em potências muito acima de seu valor nominal, qual seja 5,85 W. Em vista de dificuldades na calibração do sensor de corrente, as quantidades de energia elétrica consumidas pelo ventilador são estimadas adotando-se a sua potência nominal e considerando-se as 11 horas diárias (das 7h às 18h) em que foi mantido em operação.

3.3 Medições de tensão elétrica dos módulos

As medições de tensão elétrica provida por cada módulo foram realizadas a partir de circuitos resistivos divisores de tensão. O intuito da divisão de tensão é enviar um sinal de tensão à placa Arduino que não supere a tensão máxima por ela suportada. Assim, a razão entre a tensão de entrada, $V_{entrada}$, do circuito divisor (tensão que efetivamente se deseja ler) e a tensão de saída $V_{saída}$ (entregue ao Arduino) equivale a uma razão envolvendo os valores das resistências dos resistores empregados, conforme a Eq. 3.

$$\frac{V_{saída}}{V_{entrada}} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (3)$$

Os valores nominais de resistência dos resistores R_1 e R_2 empregados em cada circuito são, respectivamente, 500 Ω e 100 Ω . Como os resistores usados não são de precisão, refinou-se a relação de divisão através da medição da resistência de cada um antes da conexão. Os resultados são mostrados na Tab. 2.

Tabela 2- Relação da divisão de tensão para cada módulo.

MÓDULO	R1(Ω)	R2(Ω)	RELAÇÃO (%)
1	503	97,3	16,2%
2	492	98,1	16,6%
3	507	97	16,1%

A tensão entregue por cada circuito à placa Arduino é a diferença de potencial elétrico entre os terminais do resistor R_2 . Um desses terminais, correspondente ao terminal de referência da *protoboard*, é conectado ao pino GND da placa Arduino; já o outro terminal é conectado a uma das entradas analógicas dessa placa. A Fig. 5 ilustra a configuração do sistema experimental e seus componentes de aquisição de dados.

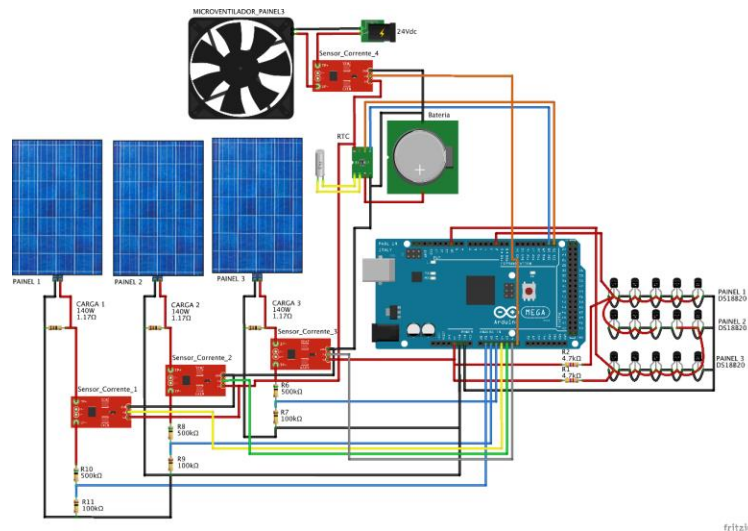


Figura 5- Configuração física do sistema de aquisição de dados dos módulos FV.

Os divisores de tensão se mostraram em adequada operação, tendo suas medidas sido comparadas com medidas obtidas através de leituras via voltímetro, o qual apresentou resultados compatíveis com aqueles verificados via Arduino.

3.4 Estação solarimétrica

A estação solarimétrica se trata de um conjunto de sensores de grandezas físicas ambientais, quais sejam, no âmbito do experimento aqui tratado, irradiância solar no plano horizontal local (em W/m^2) e temperatura ambiente (em $^{\circ}C$). A colocação dos sensores para aferição de tais grandezas, a serem computadas nos mesmos horários de medição das temperaturas, tensões e correntes elétricas dos módulos fotovoltaicos. O modelo do *datalogger* utilizado para adquirir os dados da estação solarimétrica é o CR10X, do fabricante *Campbell Scientific*®. A estação foi instalada ao lado dos módulos, de maneira que seu pequeno módulo fotovoltaico próprio, destinado a fornecer eletricidade ao conjunto de sensores, permanecesse alinhado aos módulos fotovoltaicos principais. O conjunto de sensores conta também com uma bateria instalada na mesma caixa que abriga o *datalogger*. O conjunto completo dos módulos com dissipadores e estação solarimétrica é mostrado na Fig. 6.



Figura 6- Módulos com dissipadores e estação solarimétrica.

4. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS

Os valores de potência e temperatura dos módulos, irradiância solar no plano horizontal local e temperatura do ar ambiente, no período das 7h às 18h horas de um dia considerado representativo de uma média mensal de dezembro/2016 (primeiro mês de medições), são apresentados nas figuras 7 a 9. As médias de cada período de uma hora foram gravadas ao final da respectiva hora (medições das 7h às 8h tiveram suas médias registradas às 8h, e assim sucessivamente). Alguns fatores impediram que as medições fossem realizadas de maneira contínua durante todos os dias de cada mês, como interrupções esporádicas no fornecimento de eletricidade ao edifício (mantendo o sistema de aquisição de dados inoperante em alguns intervalos) e interrupções para reconfiguração da aquisição de dados (a placa Arduino foi programada para iniciar a gravação dos dados apenas a partir das 8h do dia seguinte após cada *backup* semanal e reconfiguração, de modo que recuperações de dados feitas antes das 18h ocasionava ausência de gravação de dados no restante do dia). Assim, sendo as medições realizadas durante n dias completos do mês, os valores apresentados numa dada hora do dia representado correspondem às médias aritméticas dos n valores de cada grandeza medida nessa hora. No mês de dezembro, as medições foram realizadas em 14 dias (dias 3 a 5, 7 a 11 e 14 a 19). Incluem-se nos gráficos as barras de desvio padrão das amostras de medição.

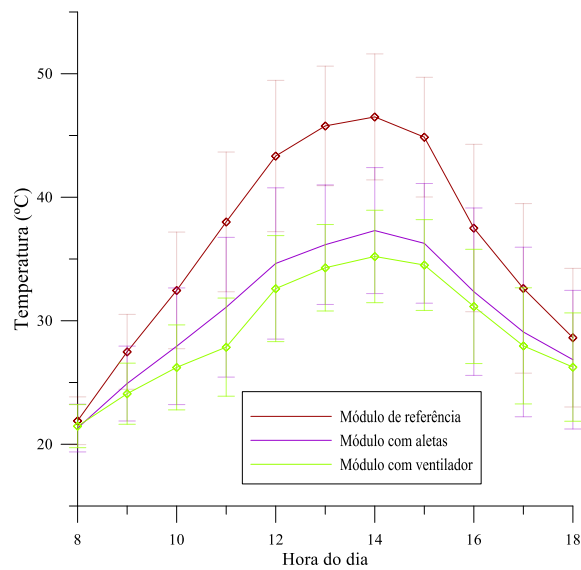


Figura 7- Valores médios das temperaturas dos módulos aferidas no mês de dezembro/2016, com suas respectivas barras de desvio padrão amostral.

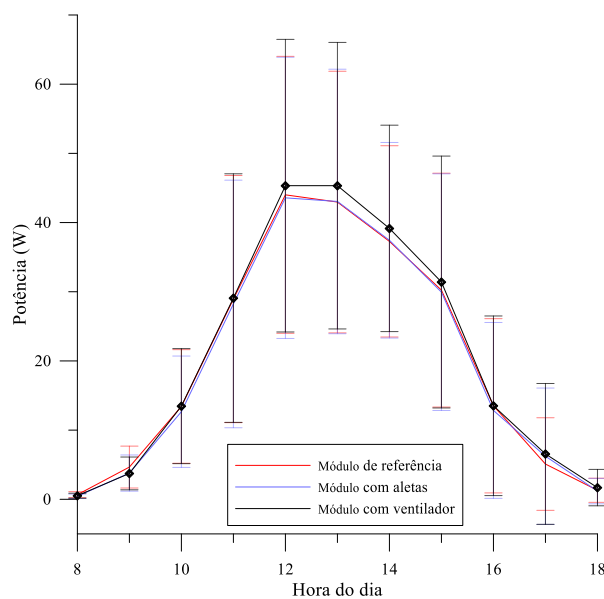


Figura 8- Valores médios das potências dos módulos aferidas no mês de dezembro/2016, com suas respectivas barras de desvio padrão amostral.

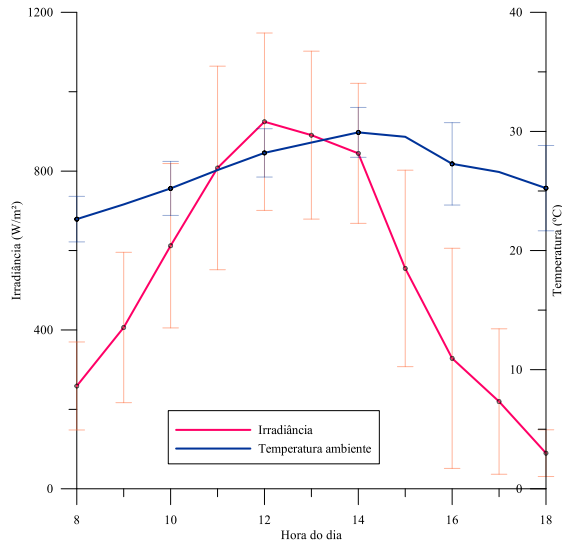


Figura 9- Valores médios dos dados solarimétricos aferidos na Faculdade de Engenharia Mecânica da Unicamp no mês de dezembro/2016, com suas respectivas barras de desvio padrão amostral.

A Fig. 10 confronta os valores medidos de temperatura dos módulos com os valores previstos a partir do modelo computacional desenvolvido na primeira etapa do projeto de pesquisa em que se insere este trabalho. Os valores médios dos dados solarimétricos mostrados na Fig. 9 foram considerados na simulação, bem como as características do modelo de módulo usado no experimento, a fim de que fosse possível comparar os valores previstos com aqueles medidos. Vale ressaltar que a velocidade do vento, na modelagem, é considerada constante e próxima de zero (o valor adotado foi 0,00001 m/s), tendo em vista que tal grandeza não foi aferida no experimento.

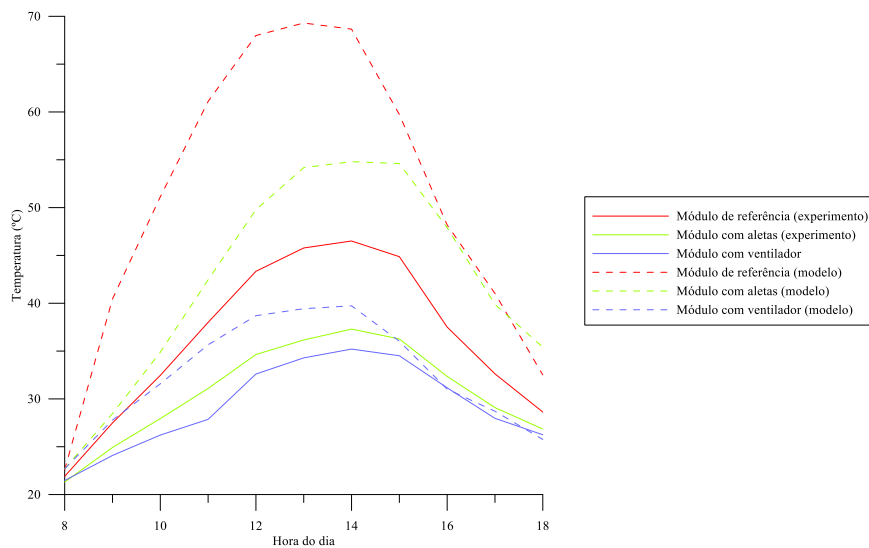


Figura 10- Comparação entre as curvas de temperatura obtidas a partir dos dados medidos e as obtidas a partir de simulação computacional.

Nota-se a partir da Fig. 10 que, a despeito de os valores medidos e previstos serem discrepantes, tanto as curvas teóricas quanto as empíricas apontam a mesma ordem de desempenho das estratégias de resfriamento do módulo FV: a não adoção de um dissipador acarreta as maiores temperaturas, o uso de aletas planas reduz consideravelmente tais temperaturas, e os canais com ventilação forçada promovem as menores temperaturas e operação do módulo. As temperaturas previstas são, de modo geral, maiores que as verificadas experimentalmente para cada estratégia (diferença máxima de 7,23%, ocorrendo às 12h do dia médio considerado para o módulo sem dissipador, e mínima de cerca de -0,05%, às 16h para o módulo com ventilação forçada). A principal razão para tal divergência é que a velocidade do vento é praticamente desconsiderada na modelagem, a qual, embora inclua tal grandeza em sua formulação, assumiu valores constantes e próximos de zero. A partir da inclusão de dados medidos dessa velocidade, a simulação computacional deverá fornecer valores menores de temperatura de operação dos módulos, haja vista que a

incidência de vento figura como fator adicional de arrefecimento. Ademais, o modelo trata a irradiância solar global no plano horizontal como sendo idêntica à irradiância incidente no plano dos módulos (irradiância normal), o que não se verifica na realidade. A irradiância incidente no plano dos módulos inclui as componentes direta e difusa da irradiância global horizontal corrigidas para levar em consideração a orientação do plano dos módulos.

As potências entregues pelos módulos apresentam pequenas diferenças, sendo suas médias pouco distinguíveis graficamente, e com desvios padrões amplos. Considerando-se todos os dados coletados, a maioria dos valores de tensão dos módulos com dissipador diferem em poucos décimos daqueles verificados no módulo sem dissipador, e em diversos horários, as tensões entregues pelo módulo sem dissipador foram maiores.

A Tab. 3 apresenta as quantidades de energia elétrica (em Wh) fornecidas por cada módulo, bem como o consumo energético estimado do ventilador, em cada mês de medição. Tais valores são avaliados como sendo o produto da potência média horária fornecida pelos módulos (ou consumida pelo ventilador) pelo intervalo de tempo de 1 hora. O experimento ocorreu de dezembro/2016 a julho/2017.

Tabela 3- Energia elétrica fornecida pelos módulos e consumo estimado do ventilador em cada mês.

MÊS	QUANTIDADE DE DIAS DE MEDIÇÃO	ENERGIA ELÉTRICA FORNECIDA (Wh)			CONSUMO ESTIMADO DO VENTILADOR ¹ (Wh)
		MÓDULO 1	MÓDULO 2	MÓDULO 3	
dez/16	14	3346,9	3339,7	3496,3	900,9
jan/17	10	2303,2	2288,3	2567,6	643,5
fev/17	15	3873,4	3763,1	4191,2	965,25
mar/17	18	4927,1	4777,4	5301,2	1158,3
abr/17	21	5897,5	5674,5	6376,2	1351,3
mai/17	12	3259,0	3066,8	3487,1	772,2
jun/17	14	3197,5	3050,9	3452,0	900,9
jul/17	10	3373,7	3230,8	3656,4	643,5

Em decorrência dos valores apresentados na Tab. 3, a Fig. 11 apresenta os valores dos ganhos energéticos percentuais líquidos conseguidos mediante adoção das aletas e dos canais ventilados para o arrefecimento do módulo FV. Nota-se que, em relação ao módulo sem dissipador, ambas as estratégias de resfriamento ocasionaram piora no desempenho das células FV. No caso do módulo com canais ventilados, a despeito de se tratar da estratégia que promoveu claro aumento da produção elétrica do módulo, o gasto energético para manter o ventilador em funcionamento acarreta perda de energética líquida significativa, na faixa de -22,5% a -10,7%.

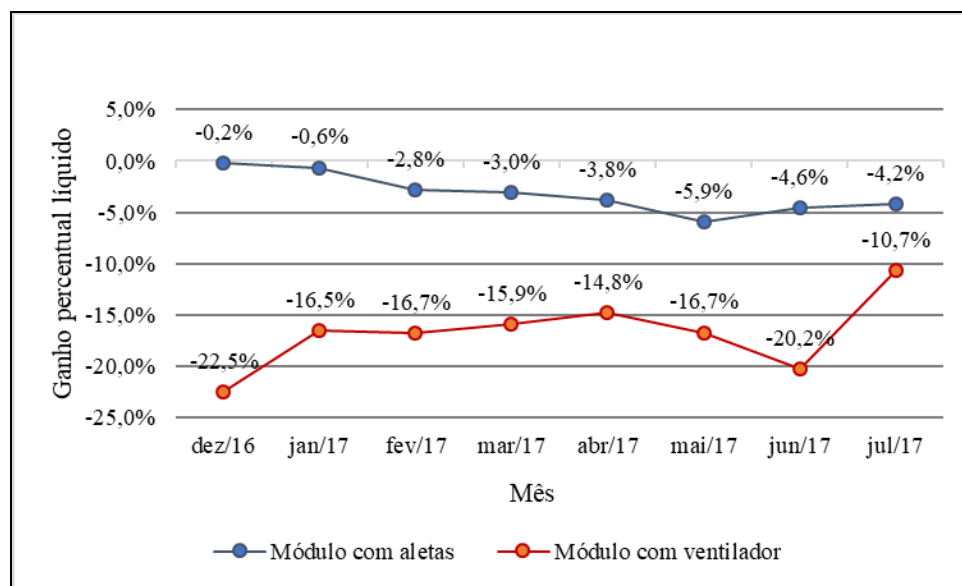


Figura 11- Ganhos energéticos percentuais líquidos promovidos pela adoção do dissipador de aletas e dos canais ventilados.

¹ Valores estimados adotando-se a potência nominal do ventilador, equivalente a 5,85 W, e considerando-se 11 horas diárias de operação (das 7h às 18h).

5. CONCLUSÕES

Este trabalho teve como intuito apresentar os procedimentos de montagem e operação de um experimento objetivando comparar os efeitos da adoção de aletas planas e de canais com ventilação forçada na temperatura de operação e na potência de um módulo fotovoltaico, de modo a observar se as previsões sobre os desempenhos desses dissipadores realizadas a partir de um modelo matemático previamente estabelecido se verificam. Os resultados empíricos mostram que, assim como previsto pelo modelo, a adoção de estratégias de resfriamento promove considerável redução das temperaturas de operação do módulo FV, e que as menores temperaturas são atingidas mediante o uso de canais com ventilação forçada, atingindo valores pouco maiores quando se lança mão de aletas planas mantidas em convecção natural. Vale ressaltar que o objetivo da modelagem não foi prever as temperaturas com precisão, mas realizar um estudo comparativo sobre o desempenho de diferentes estratégias de resfriamento mantidas sob as mesmas condições de operação.

A despeito de as reduções das temperaturas terem sido alcançadas, os resultados obtidos mostram que a produção elétrica do módulo sem e com resfriamento se mantêm próximas, sendo que o módulo com aletas (resfriamento passivo) contraria a expectativa teórica, apresentando desempenho inferior ao módulo de referência. A despeito de o módulo com canais ventilados (resfriamento ativo) prover as maiores quantidades de potência, seu desempenho global é o pior dentre todas as estratégias, tendo em vista o gasto energético avaliado para a manutenção de seu ventilador em operação. Com a instalação e configuração bem-sucedida de sensores, vale verificar se as correntes elétricas de fato correspondem às calculadas com base nos valores de tensão elétrica aferidos, a fim de confirmar se os valores de potência aqui apresentados são realistas.

Agradecimentos

Os pesquisadores gostariam de agradecer à empresa Candeias Energia pelo financiamento desta pesquisa e à Faculdade de Engenharia Mecânica da Unicamp por ceder o espaço para a realização do experimento, bem como a estação solarimétrica utilizada.

REFERÊNCIAS

- Ishii, T., Otani, K., Takashima, T. “Effects of solar spectrum and module temperature on outdoor performance of photovoltaic modules in round-robin measurements in Japan”. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, v. 19, p. 141-148, 2011.
- Ito, M. et al. “A Comparative Study on Cost and Life-cycle Analysis for 100MW Very Large-scale PV (VLS- PV) Systems in Deserts Using m-Si, a-Si, CdTe, and CIS Modules”. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, v. 16, p. 17-30, 2008.
- Makriedes, G. et al. “Temperature Behavior of Different Photovoltaic Systems Installed in Cyprus and Germany”. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, v. 93, n. 6-7, p. 1095-1099, Junho 2009.
- _____. “Potential of Photovoltaic Systems in Countries with High Solar Irradiation”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 14, n. 2, p. 754-762, fevereiro 2010.
- Rodrigues, V. M., Santos, L. G. M., Lima, B. W. F., Ganzarolli, M. M., Jannuzzi, G. M. “Estratégias para redução da temperatura de operação de módulos fotovoltaicos”, in *Anais do VIII Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (VIII CITENEL)*, 2015, Costa do Sauípe - BA.

EXPERIMENTAL COMPARISON OF STRATEGIES FOR REDUCING THE OPERATING TEMPERATURE OF PHOTOVOLTAIC MODULES

Abstract. *This paper presents the results of an experimental verification of two strategies for cooling PV modules: flat plate fins (passive cooling) and forced ventilation through rectangular channels (active cooling). Such technologies were selected based on previous mathematical modeling and computational simulation. The assembling procedures of the experimental system are detailed, as well as the materials and methods adopted for data acquisition, namely temperature and power output of PV modules, ambient air temperature and solar irradiance. Results show that the operating temperatures of the modules are reduced by resorting to fins, and even lower temperatures are achieved from deploying forced ventilation. Nonetheless, smaller net energy outputs from the cooled modules are verified when compared to the reference module, having the active cooling strategy the worst overall performance.*

Key words: *Experiment, Photovoltaic Module, Cooling*