

BALANÇO TÉRMICO DE PAINEL FOTOVOLTAICO - UM ESTUDO EXPERIMENTAL

Mario Benjamim Baptista Siqueira (UnB) - mariosiqueira@unb.br

Ariane Martins Caponi Lima (UNB) - a-ri-ane@hotmail.com

Antonio Brasil Junior (UnB) - antonio.brasiljunior@gmail.com

Resumo:

Este trabalho tem o objetivo de realizar um balanço de energia, através dos dados coletados de um aparato experimental e fazer uma análise térmica de um painel solar fotovoltaico. A metodologia é baseada na coleta de dados em um projeto experimental, em que se mediu temperaturas dos componentes do painel. Desenvolveu-se um painel fotovoltaico, através da construção de seus componentes, sendo instalados termopares por trás das células solares, em cima do vidro para determinar respectivamente, a temperatura nas células e a temperatura na superfície e no backsheet. Os demais dados foram coletados através da estação meteorológica compacta e de dois piranômetros que mediram a temperatura ambiente, a velocidade do vento, a irradiância global horizontal e a irradiância global inclinada com inclinação igual a latitude em Brasília-DF. A eficiência de um painel fotovoltaico é influenciada pela temperatura. Portanto, é importante realizar uma análise do balanço de energia para abranger todos os seus componentes. Os resultados mostraram os mecanismos de transferência de calor ocorridos em um painel fotovoltaico durante o seu funcionamento em um dia de céu claro. Os resultados demonstram que existem diferenças tanto de médias e comportamento dinâmico dos diversos componentes do painel.

Palavras-chave: *Painel Solar, comportamento térmico, balanço de energia*

Área temática: *Conversão Fotovoltaica*

Subárea temática: *Tecnologias e ensaios de módulos fotovoltaicos*

BALANÇO TÉRMICO DE PAINEL FOTOVOLTAICO – UM ESTUDO EXPERIMENTAL

Mario Benjamim Baptista de Siqueira – mariosiqueira@unb.br

Ariane Martins Caponi Lima – a-ri-ane@hotmail.com

Antônio Cesar Pinho Brasil Junior – brasiljr@unb.br

Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Mecânica

Resumo. Este trabalho tem o objetivo de realizar um balanço de energia, através dos dados coletados de um aparato experimental e fazer uma análise térmica de um painel solar fotovoltaico. A metodologia é baseada na coleta de dados em um projeto experimental, em que se mediu temperaturas dos componentes do painel. Desenvolveu-se um painel fotovoltaico, através da construção de seus componentes, sendo instalados termopares por trás das células solares, em cima do vidro para determinar respectivamente, a temperatura nas células e a temperatura na superfície e no backsheet. Os demais dados foram coletados através da estação meteorológica compacta e de dois piranômetros que mediram a temperatura ambiente, a velocidade do vento, a irradiância global horizontal e a irradiância global inclinada com inclinação igual a latitude em Brasília-DF. A eficiência de um painel fotovoltaico é influenciada pela temperatura. Portanto, é importante realizar uma análise do balanço de energia para abranger todos os seus componentes. Os resultados mostraram os mecanismos de transferência de calor ocorridos em um painel fotovoltaico durante o seu funcionamento em um dia de céu claro. Os resultados demonstram que existem diferenças tanto de médias e comportamento dinâmico dos diversos componentes do painel.

Palavras-chave: Painel Solar, comportamento térmico, balanço de energia

1. INTRODUÇÃO

O Brasil apresenta uma elevada incidência de radiação solar, insolação e elevada temperatura, principalmente na região próximo da linha do equador. Esse ambiente propicia um amplo desenvolvimento para a energia solar. Assim, a matriz energética brasileira de energia solar, entre 2017 e 2018, apresentou um crescimento de 387,5% (BP, 2019). Apesar da componente solar na matriz ser ainda mínima quando comparada com outras fontes, a tendência de crescimento deve se manter nos próximos o que pode fazer com que ela seja relevante num horizonte temporal de uma década, o que faz com que o estudo de geração nas nossas condições seja relevante para a adequação do planejamento energético do país.

A conversão da energia solar em energia elétrica é realizada através do efeito fotovoltaico. A luz solar é composta por partículas denominadas de fótons, esses contêm uma quantidade de energia e ao atingirem uma célula fotovoltaica fornecem energia para os elétrons. Com essa energia, os elétrons mudam de sua posição original para uma barreira de potencial, que atua sobre esses elétrons para produzir uma corrente elétrica (Parida, et al., 2011). No entanto, ocorre um aumento da temperatura operacional do painel fotovoltaico a parte da irradiância solar que não é convertida em energia elétrica, ou seja, a maior parte da energia absorvida é convertida em energia interna do próprio painel. O aumento da temperatura do painel provoca redução na tensão de saída e, conseqüentemente, sua potência e eficiência (Razak, et al., 2016).

A base dos modelos de conversão de energia solar envolve uma descrição matemática dos mecanismos de conversão de energia em painéis solares fotovoltaicos (e.g. Brasil Junior, 2016; Kharb, Shimi, Chatterji, & Ansari, 2014; Ma, Yang, & Lu, 2014). Isto também é associado a um modelo de balanço de energia térmica, o qual determina a temperatura de operação do módulo, que por sua vez modifica as constantes do modelo do circuito equivalente. Neste contexto, o conhecimento do comportamento térmico do painel, e dos diversos mecanismos de troca de energia entre o painel e o ambiente se torna relevante para a confiabilidade dos modelos que, em última análise, serão utilizados para estimativa de geração de energia elétrica a partir de painéis fotovoltaicos, seja ela geração distribuída ou em centrais fotovoltaicas.

No sentido de prover um melhor entendimento dos mecanismos de energia entre um painel fotovoltaico, um protótipo de painel foi construído com termopares possibilitando a medição de temperatura dos diferentes elementos que compõe um módulo fotovoltaico típico.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Um módulo fotovoltaico foi construído no Laboratório de Energia e Ambiente da Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília. O módulo foi conectado a um aparato experimental capaz de medir as variáveis necessárias para a realização do balanço energético de cada componente do módulo, a saber, vidro, célula e backsheet. A seguir

uma breve descrição do protótipo, do aparato experimental e da metodologia para se estimar as trocas de energia serão apresentadas.

2.1 Painel instrumentado

Para a montagem do painel fotovoltaico, a moldura foi fabricada a partir de 4 perfis em “L” de alumínio com dimensão 4x4x550mm. Nove células fotovoltaicas de silício monocristalino, com dimensão de 156×156mm potência de 4,8W, grau A, foram soldadas em série em uma matriz 3x3 utilizando fita de estanho *tab wire* de 20 mm. Antes da montagem final do painel, foram instalados na parte inferior das células fotovoltaicas três termopares tipo K revestidos modelo SA1-K, da marca Ômega. O processo de montagem foi finalizado com o encapsulamento das células pelo EVA entre o vidro e as células, e entre as células e o *backsheet* por meio de um secador térmico. Nesta etapa do processo de montagem utilizou-se um gerador de vácuo para evitar bolhas durante a etapa do encapsulamento do EVA.

Após a colocação da moldura, dois termopares do mesmo tipo dos anteriores foram colocados na parte superior do vidro, posicionados na mesma diagonal dos termopares das células aproximadamente no meio entre eles. Dois termopares adicionais, do tipo K, modelo 5TC-GG-K-36-36, da marca Ômega, foram instalados no *backsheet* na mesma posição dos instalados no vidro. A Fig. 1 mostra a localização dos termopares no módulo. O painel foi então fixado no suporte ajustável em dois eixos para o seu posicionamento ideal para realização dos experimentos.

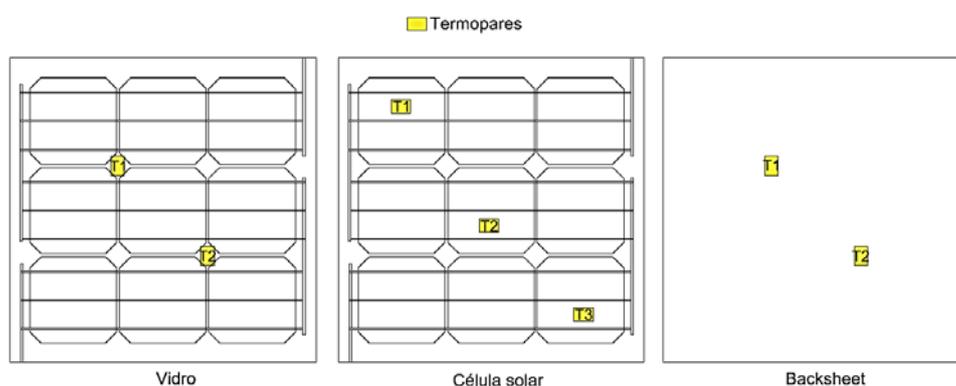


Figura 1 - Posições dos termopares nas células solares, respectivamente com vista frontal e traseira

As Tab.'s 1 e 2 apresentam as características geométricas do módulo e as propriedades físicas dos materiais, respectivamente.

Tabela 1 – Características geométricas

	Espessura [m]	Largura [m]
Vidro	0,004	0,55
Célula solar	0,00025	0,155
Backsheet	0.0003	0,55

Tabela 2 - Propriedades físicas dos materiais

	α	ρ	τ	ε	c [J/kgK]	Densidade [kg/m ³]	K [W/mK]
Vidro	0,12	0,1	0,88	0,91	500	3000	1,8
Célula solar	0,9	0,1	-	0,9	677	2330	150
Backsheet	1	-	-	0,85	1250	1200	0,3
Concreto	0,6	0,1	-	0,95	-	-	-

α – absorbtância, ρ – reflectância, τ – transmitância, ε – emissividade, c – calor específico

2.2 Aparato Experimental

Concomitantemente às temperaturas dos componentes do módulo solar, medidas de irradiância global horizontal (G_h), irradiância global no plano inclinado (G_i , plano do painel) e irradiância refletida foram obtidas por piranômetros fotovoltaicos calibrados do modelo LI200 da marca Li-cor. Foi também utilizada uma estação meteorológica GMX-600 da marca Gill para a medição de temperatura e umidade do ar, e velocidade e direção do vento.

Medições de temperatura da superfície de concreto, foram realizadas com termopares tipo J, fabricados pela empresa Baed Automação Industrial com transdutor de sinal modelo MTI-TT01, da marca Meganotti Technology. Esses termopares foram calibrados no laboratório antes da realização dos experimentos. Dois desses termopares foram

posicionados no concreto cobertos por uma fita isolante branca para minimizar a carga radiativa. Um deles foi instalado na superfície sob a ação do sol e outra em superfície sombreada pelo módulo. Desse modo foi possível estimar com maior precisão as trocas de radiação térmica entre o painel e a superfície.

Além dessas medidas locais, as componentes da irradiância solar, a saber, irradiância global horizontal (G_h), irradiância direta normal (G_b), e irradiância difusa, são continuamente medidas no prédio adjacente ao local dos experimentos. Essas medidas são realizadas por uma estação solarimétrica configurada numa plataforma Solys 2 (com rastreamento solar) na qual dois piranômetros CMP-6, um deles sombreado por esfera para medição de irradiância difusa, e um pireliômetro CHP-1 foram montados. Todos esses instrumentos, incluindo a plataforma Solys 2, são da marca Kipp & Zonen,

Para a dissipação da energia gerada pelo painel fotovoltaico, um circuito resistivo composto por duas resistências elétricas de 2Ω nominal cada ligadas em paralelo foi construído. A medição da potência, gerada pelo painel fotovoltaico, foi então calculada com a medição da voltagem entre as extremidades do circuito e a aplicação da Eq. (1):

$$P = \frac{V^2}{Res} \quad (1)$$

Onde:

P é Potência gerada [W]

V é Tensão [V]

Res é Resistência equivalente do circuito resistivo [Ω].

Toda essa instrumentação foi conectada a dois sistemas de aquisição e dados (Dataloggers) CR1000 da Campbell Scientific. A Fig. 2, apresenta o diagrama de ligação do aparato experimental com a sua instrumentação para a coleta de dados. Já a Fig. 3, mostra o protótipo e o aparato experimental em operação durante os testes.

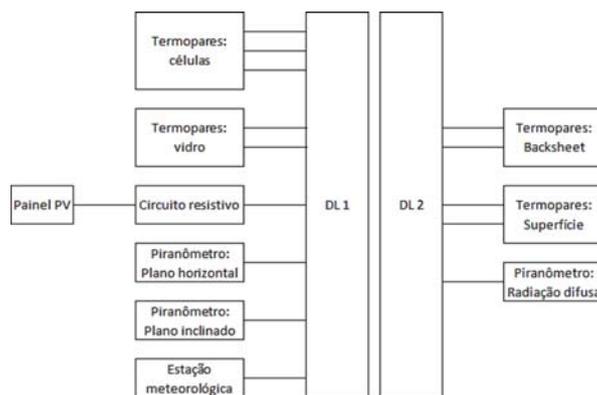


Figura 2 - Diagrama do aparato experimental. DL se refere ao sistema de aquisição de dados (Dataloggers)



Figura 3 - Aparato experimental montado para aquisição de dados

2.3 Metodologia

O balanço de energia aplicada a sistemas, que no presente estudo são os componentes de um painel fotovoltaico, é regido pela 1ª Lei da termodinâmica. Na ausência de trocas de massa, a equação de balanço de energia é dada pela Eq. (2):

$$\frac{dE}{dt} = \sum \dot{Q} - \sum \dot{W} \quad (2)$$

Onde,

t representa tempo [s]

E é a energia total do sistema [J]

\dot{Q} representa fluxos de calor por convecção, condução e/ou radiação [W]

\dot{W} é a potência gerada [W]

Na Eq. (2) o termo do lado esquerdo da equação é o termo transiente dado por:

$$\frac{dE}{dt} = m \cdot c \cdot \frac{dT}{dt} \quad (3)$$

e do lado direito são as taxas de transferência de energia na forma de calor (condução, convecção ou radiação) e na forma de trabalho (potência). A Fig. 4, mostra esquematicamente, os processos de troca de calor. No caso das trocas por radiação (Q_{rad} na Fig. 4) a de se distinguir entre radiação solar (ondas curtas, SW) e radiação térmica (ondas longas, LW).

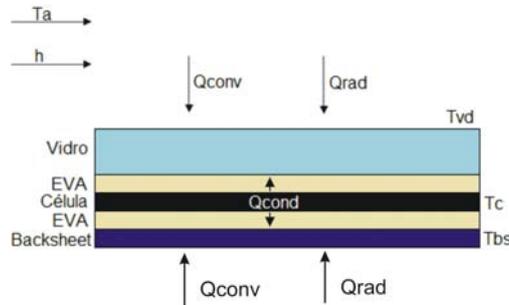


Figura 4 – esquema do trocas de calor no painel fotovoltaico

O balanço de energia de cada componente do painel consiste em aplicar a Eq. (2) para cada componente do painel. No caso das células fotovoltaicas é apresentado na Eq. (4).

$$den_{cel} \cdot c_{cel} \cdot d_{cel} \cdot A_p \frac{dT_{cel}}{dt} = \dot{Q}_{SW,cel} - \dot{Q}_{cond,cel} - P \quad (4)$$

Onde A_p é a área do painel. O termo de radiação solar na Eq. (4), dado pela Eq. (5), é composto por duas componentes, a irradiância incidente proveniente do sol ($SW_{cel,1}$) e a refletida na superfície ($SW_{cel,2}$), respectivamente as Eq.'s (6) e (7).

$$\dot{Q}_{SW,cel} = (SW_{cel,1} + SW_{cel,2}) \cdot A_p \quad (5)$$

$$SW_{cel,1} = G_t (1 - \rho_{vidro}) (1 - \alpha_{vidro}) \alpha_{cel} \quad (6)$$

$$SW_{cel,2} = \left\{ \left[G_t \cdot \cos(\theta_z) + G_d \right] \cdot \rho_c \cdot F_{sup} \right\} \cdot (1 - \rho_{vidro}) \cdot (1 - \alpha_{vidro}) \cdot \alpha_{cel} \quad (7)$$

Dos termos da equação de balanço de energia, o termo transiente (lado esquerdo da equação), de ondas curtas (SW) e de geração de potência gerada podem ser estimados pelas variáveis medidas. O termo de condução, então é calculado de forma a fechar o balanço, é dada pela Eq. (8).

$$\dot{Q}_{cond,cel} = den_{cel} \cdot c_{cel} \cdot d_{cel} \cdot A_p \frac{dT_{cel}}{dt} + \dot{Q}_{SW,cel} - P \quad (8)$$

O balanço de energia para o vidro é obtido novamente pela aplicação da Eq. (2), obtendo-se a Eq. (9).

$$den_{vidro} \cdot c_{vidro} \cdot d_{vidro} \cdot A_p \cdot \frac{dT_{vidro}}{dt} = \dot{Q}_{SW,vidro} + \dot{Q}_{LW,vidro} + \dot{Q}_{cond,vidro} - \dot{Q}_{conv,vidro} \quad (9)$$

No caso do vidro, os termos de SW, equação (10), tem três contribuições. Além da irradiância incidente do sol e a refletida no solo, ainda existe a refletida na célula e absorvida pelo vidro, respectivamente pelas Eq.'s (11), (12) e (13).

$$\dot{Q}_{SW,vidro} = (SW_{vidro,1} + SW_{vidro,2} + SW_{vidro,3}) \cdot A_p \quad (10)$$

$$SW_{vidro,1} = G_t \cdot (1 - \rho_{vidro}) \cdot \alpha_{vidro} \quad (11)$$

$$SW_{vidro,2} = \left\{ [G_b \cdot \cos(\theta_z) + G_d] \cdot \rho_c \cdot F_{sup} \right\} \cdot (1 - \rho_{vidro}) \cdot \alpha_{vidro} \quad (12)$$

$$SW_{vidro,3} = \left\{ G_t + [G_b \cdot \cos(\theta_z) + G_d] \cdot \rho_c \cdot F_{sup} \right\} \cdot (1 - \rho_{vidro}) \cdot (1 - \alpha_{vidro}) \cdot \rho_{cel} \cdot (1 - \tau_{vidro}) \quad (13)$$

Para ondas longas tem-se a radiação térmica do céu, G_{sky} , a radiação térmica emitida pela superfície do concreto e absorvida pelo vidro e a radiação térmica emitida pelo vidro, como mostrado nas Eq.'s (14), (15), (16) e (17).

$$\dot{Q}_{LW,vidro} = (LW_{vidro,1} + LW_{vidro,2} + LW_{vidro,3}) \cdot A_p \quad (14)$$

$$LW_{vidro,1} = G_{sky} \cdot F_{céu} \quad (15)$$

$$LW_{vidro,2} = \varepsilon_c \cdot \sigma \cdot F_{sup} \cdot T_{sup}^4 \quad (16)$$

$$LW_{vidro,3} = -\varepsilon_{vidro} \cdot \sigma \cdot T_{vidro}^4 \quad (17)$$

Nessas equações F representa fatores de forma para a troca de calor por radiação. O termo convectivo á calculado pela Eq. (18):

$$\dot{Q}_{conv,vidro} = h \cdot A_p (T_{vidro} - T_a) \quad (18)$$

Onde T_a é a temperatura do ar e h é o coeficiente de transferência de calor por convecção. O valor de h é estimado pelas relações do número de Nusselt. No caso do vidro, o termo de condução, Eq. (19), foi calculado pela diferença entre o calor perdido por condução pelas células e calor por condução das células para o *backsheet*, esse último dado pela Eq. (29). Essa consideração é justificada pelo fato de que o EVA é extremamente delgado, e sua inércia térmica é mínima. Sendo assim, todo o calor de condução das células só pode ir para o *backsheet* ou para o vidro, e o termo de condução das células para o vidro é dada por:

$$\dot{Q}_{cond,vidro} = \dot{Q}_{cond,cel} - \dot{Q}_{cond,bs} \quad (19)$$

O balanço de energia para o *backsheet* é descrito pela Eq. (20):

$$den_{bs} \cdot c_{bs} \cdot d_{bs} \cdot A_p = \dot{Q}_{SW,bs} + \dot{Q}_{LW,bs} + \dot{Q}_{cond,bs} - \dot{Q}_{conv,bs} \quad (20)$$

Os termos de SW, equação (21), são apenas dois, a incidente do sol (somente difusa), equação (22), e a refletida no solo, Eq. (23):

$$\dot{Q}_{SW,bs} = (SW_{bs,1} + SW_{bs,2}) \cdot A_p \quad (21)$$

$$SW_{bs,1} = (G_d \cdot F_{céu,bs}) \cdot \alpha_{bs} \quad (22)$$

$$SW_{bs,2} = \left\{ \left[G_b \cdot \cos(\theta_z) + G_d \right] \cdot \rho_c \cdot F_{sup,bs} \right\} \cdot \alpha_{bs} \quad (23)$$

Para ondas longas, equação (24), os termos são a radiação térmica do céu, a radiação térmica emitida pela superfície do concreto e a absorvida pela radiação térmica emitida do *backsheet*, respectivamente nas Eq.'s (25), (26) e (27).

$$\dot{Q}_{LW,bs} = (LW_{bs,1} + LW_{bs,2} + LW_{bs,3}) \cdot A_p \quad (24)$$

$$LW_{bs,1} = G_{sky} \cdot F_{sup} \quad (25)$$

$$LW_{bs,2} = \varepsilon_c \cdot \sigma \cdot (F_{sup,bs} \cdot T_{sup}^4 + F_{sombra} \cdot T_{sombra}^4) \quad (26)$$

$$LW_{bs,3} = -\varepsilon_{bs} \cdot \sigma \cdot T_{bs}^4 \quad (27)$$

Semelhante ao vidro, a convecção é calculada pela Eq. (28):

$$\dot{Q}_{conv,bs} = h \cdot A_p \cdot (T_{bs} - T_a) \quad (28)$$

A condução é estimada como o residual do balanço para o *backsheet*, na Eq. (29):

$$\dot{Q}_{cond,bs} = den_{bs} \cdot c_{bs} \cdot d_{bs} \cdot A_p \frac{dT_{bs}}{dt} - \dot{Q}_{SW,bs} - \dot{Q}_{LW,bs} + \dot{Q}_{conv,bs} \quad (29)$$

No presente estudo, o EVA foi considerado apenas uma resistência a transferência de calor por condução devido a sua espessura, e portanto, sua inércia térmica, desprezível.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir dos dados medidos e das propriedades físicas dos materiais é possível calcular todos os termos do balanço de energia. O termo que carrega maior incerteza é o termo convectivo. Nas condições em que os experimentos foram realizados, o número de Nusselt válido seria para a convecção forçada em escoamento laminar. A relação de Nusselt com os números de Reynolds, Re , e Prandtl, Pr , é dado por:

$$Nu_f = C \cdot Re^{1/2} \cdot Pr^{1/3} \quad (30)$$

Onde C é uma constante empírica. No caso painel fotovoltaico testado a constante, para que o fechamento do balanço de energia de todos os componentes, essa constante teve que ser ajustada de 0,664, sugerida na literatura, para 4,09. Esse ajuste se justifica pela diferença entre o escoamento e o escoamento controlado para a determinação do coeficiente original.

3.2 Condições Experimentais

Os experimentos com o protótipo ocorreram no Laboratório de Energia e Ambiente na Universidade de Brasília. Eles foram realizados em três dias diferentes, 17 e 18 de junho e 28 de agosto. O protótipo juntamente com o aparato experimental foi colocado no sol na parte da manhã e finalizado o teste a tarde. Em todos os equipamentos foram nivelados, e o painel foi posicionado com sua face voltada para o norte com o ângulo de inclinação de 15°, próximo ao valor da latitude local. Nos dias de 17 de junho e 28 de agosto o painel estava conectado ao circuito resistivo, já no dia 18 de junho o painel ficou em circuito aberto.

As condições de irradiância durante os experimentos são apresentadas na Fig. 5. Nos três dias, as condições eram predominantemente de céu claro, principalmente no dia 18 de junho em que todo o experimento aconteceu em ausência de nuvens. Já nos dias 17 de junho e 28 de agosto houve o aparecimento de nuvens esporádicas durante o período de coleta de dados. Essa condição é interessante para análise da dinâmica do comportamento térmico do painel.

Repare que no dia 28 de agosto a irradiância no plano inclinado é maior do que nos outros dias. Isso era esperado já que o solstício de inverno, quando trajetória do sol fica mais ao norte, é no dia 20 de junho. Depois disso o sol começa a retornar para trajetórias mais ao sul. Por exemplo, considerando a órbita solar em Brasília, no dia 18 de junho ao meio dia solar, o ângulo entre o sol e o painel era de 65° enquanto no dia 28 de agosto era de 80° . Lembrando que a condição de máxima radiação seria com ângulo de 90° . Outro fato interessante são os picos de irradiância com o aparecimento de nuvens nos dias 17 de junho e 28 de agosto. Esse efeito é conhecido como efeito lente de nuvens, quando o posicionamento aleatório das nuvens promove reflexões que concentram a radiação no local da medição.

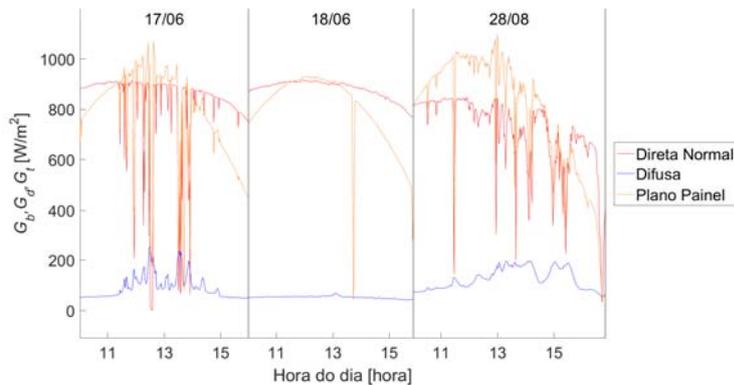


Figura 5 - Irradiância durante a realização dos experimentos.

O instrumento de medição do vento, importante para a caracterização das trocas convectivas, foi posicionado a 65cm de altura do chão, altura semelhante à do painel. Velocidades e direção do vento (médias de um minuto) durante os experimentos estão representadas na Fig. 6.

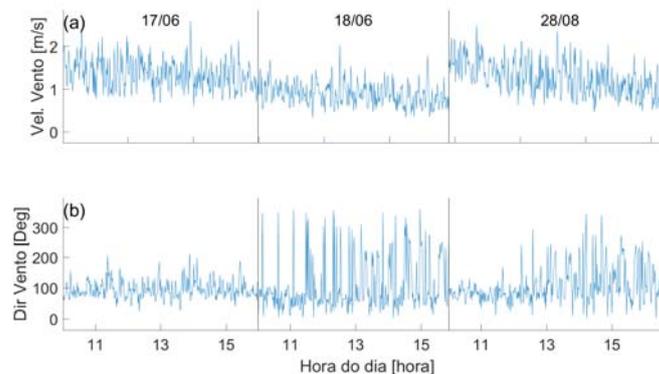


Figura 6 - Velocidade do vento e direção do vento no período dos experimentos.

O vento durante os testes se caracterizou por uma maior intensidade no começo dos testes com diminuição no decorrer dos experimentos, mas sempre se mantendo entre 0,5 e 2,5 m/s, classificado entre vento de aragem e uma brisa leve segundo a escala de vento de Beaufort. Porém o comportamento foi ligeiramente diferenciado para cada dia. No dia 17 de junho, o vento se manteve em níveis maiores em comparação com o dia 18 de junho. Já no dia 28 de agosto, a intensidade foi maior no começo do experimento, mas com uma redução mais acentuada no período do teste. Observe que as oscilações de velocidade, mesmo com médias de um minuto, são comparáveis a média, o que corrobora com o ajuste da constante da relação de Nusselt.

Outra variável relevante para o balanço de energia é a temperatura do ar, já que a diferença entre a temperatura da superfície e a do meio (no caso o ar) é a força motriz para as trocas de calor por convecção. A Fig. 7, mostra a variação de temperatura do ar nos dias do experimento, medido pela estação meteorológica. O comportamento é semelhante nos três dias, típico dessa época do ano em Brasília, com o aumento de temperatura até um valor máximo, próximo às 15:00, e redução após esse horário. Apesar do comportamento similar, nota-se que a temperatura no dia 17 de junho é inferior aos outros dias, com uma diferença de aproximadamente 3°C .

3.2 Distribuição de temperatura

As temperaturas dos componentes do painel, a saber, temperatura do vidro (2 termopares), da célula (3 termopares) e do backsheet (2 termopares) são mostradas na Fig. 8. Percebe-se na Fig. 8, que a distribuição de temperatura é heterogênea nos três componentes do painel. As diferenças de temperatura entre os termopares são mais

pronunciadas na célula, mas são consistentes em relação ao seu posicionamento tanto do vidro quanto do *backsheet*, ou seja, temperaturas mais altas do vidro e no *backsheet* foram medidas na posição entre as temperaturas mais altas das células. Vale ressaltar que essa heterogeneidade não está relacionada a geração de energia pelas células já que no dia 18 de junho o painel estava em circuito aberto. Sendo assim, ela deve ser consequência com as diferenças nos processos de transferência de calor. Se um efeito de borda for relevante, ou seja, coeficiente de troca de calor, na borda de ataque for maior, essa distribuição é compatível com o fato de que a direção do vento foi consistente nos três dias de experimento.

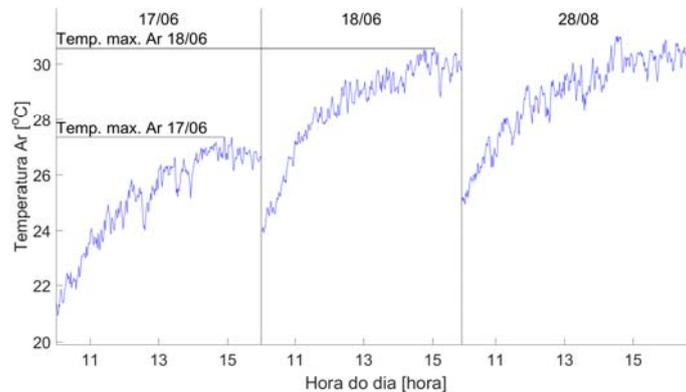


Figura 7 - Temperatura do ar nos dias dos experimentos. As linhas horizontais marcam as temperaturas máximas nos dias 17, 18 de junho.

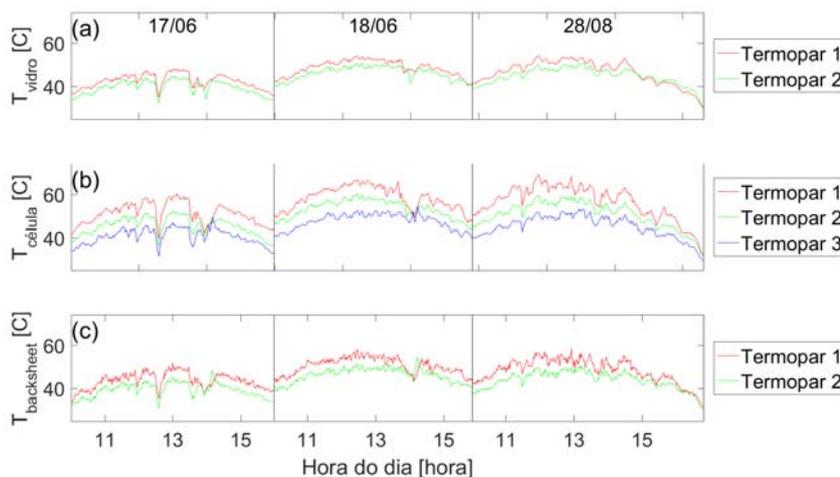


Figura 8 - Temperaturas medidas dos componentes do painel, Vidro (gráfico a), Células (gráfico b) e *Backsheet* (gráfico c). Os termopares seguem a nomenclatura da Fig. 1.

Para uma melhor comparação da variação temporal da temperatura, a Fig. 9 mostra as séries temporais das médias de temperatura de cada componente, juntamente com a irradiância global no plano do painel. Com relação ao comportamento dinâmico do painel, fica claro na Fig. 9 que a célula tem uma dinâmica mais intensa do que a do vidro e do *backsheet*, com respostas mais rápidas e amplitudes maiores em relação às variações de irradiância. Esse fato é de se esperar já que é ela que absorve a maior parte da radiação solar além de ter uma inércia térmica menor. Outro fato interessante é que no dia 18 de junho, dia de céu claro (sem nuvens) durante todo o período do teste, as variações de todos os componentes são semelhantes tanto em tempo quanto em amplitude. Ou seja, forçamentos que não são devidos a alterações de radiação solar, e sim a outros fatores, como oscilações de vento e temperatura do ar, promovem variações menores de temperatura e que são semelhantes entre os componentes. Esse é um fator relevante para testes de painéis com relação ao seu desempenho em função da temperatura.

A temperatura média do painel, calculada pela média ponderada pelas suas capacidades térmicas, é incluída na Fig. 9 (linha tracejada preta) para referência. Essa média foi escolhida por ser a mais representativa daquelas estimadas por modelos térmicos de painel fotovoltaico que considerem o painel como um único elemento. Essa temperatura média é bem próxima da temperatura do vidro, que é o componente com massa consideravelmente maior que a dos outros. O seu comportamento é diferenciado da temperatura das células, que seria a variável de influência, na eficiência de conversão do painel.

3.2 Balanço de Energia

Os termos do balanço de energia para os três componentes do painel, a saber, células, vidro e *backsheet* são mostrados nas Fig.s 10, 11 e 12, respectivamente.

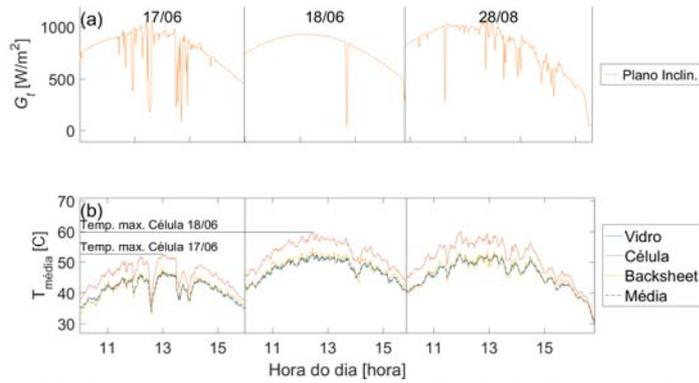


Figura 9 - Médias espaciais de temperatura (gráfico b) e irradiância incidente no plano inclinado G_t (gráfico a). Temperatura Média representa a temperatura média ponderada pela capacidade térmica de cada componente. As linhas horizontais no gráfico (a) marcam as temperaturas médias máximas nos dias 17, 18 de junho.

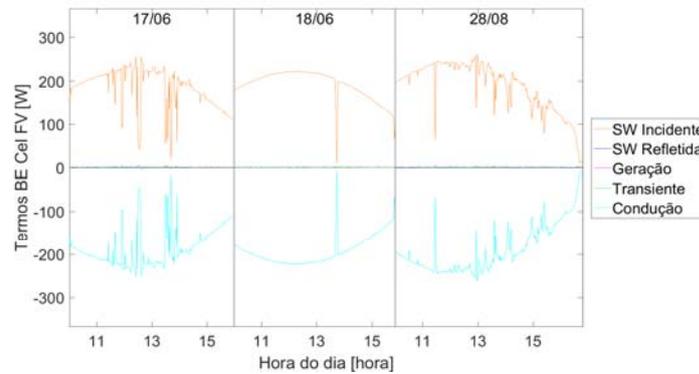


Figura 10 - Termos do balanço de energia (BE) para as células fotovoltaicas

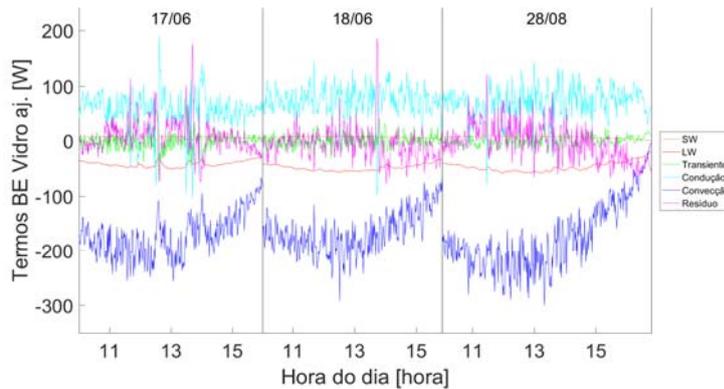


Figura 11 - Termos do balanço de energia para o vidro

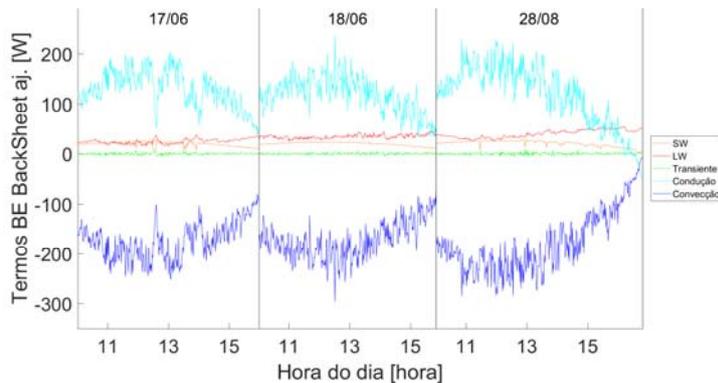


Figura 12 - Termos do balanço de energia para o *backsheet*,

Percebe-se que os termos transientes são muito pequenos em comparação com os outros termos do balanço de energia de cada componente. No caso das células, o balanço se resume praticamente ao equilíbrio entre o termo radiação solar e de condução. Já tanto para o vidro como para o *backsheet*, os termos mais relevantes são os de condução e convecção, com uma importância não desprezível do termo de radiação térmica.

4. CONCLUSÕES

Um painel solar foi construído e instrumentado para medição de temperatura de seus componentes, a saber, célula, vidro e *backsheet*. Com esse painel, juntamente com um aparato experimental que mede variáveis de forçamento térmico foram realizados testes experimentais em três dias sob diferentes condições. Como conclusões, pode-se dizer que as componentes do painel solar têm comportamentos térmicos com diferenças dinâmicas marcantes. A aplicação do balanço de energia demonstrou que cada componente tem diferentes mecanismos de transferência de energia que, em conjunto com suas propriedades físicas e geométricas resultam nessas diferenças dinâmicas. Portanto, cuidado deve ser tomado na modelagem térmica de painéis como um único componente, principalmente se a modelagem tiver como objetivo estimativas de geração de energia.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Além desse, suporte para a realização do trabalho foi dado pelo projeto de P&D ANEEL intitulado “HIBRIDIZAÇÃO DE FONTES DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA COMO ALTERNATIVA TECNOLÓGICA DE REMEDIAÇÃO AMBIENTAL DE ÁREAS DEGRADADAS POR RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS – ESTUDO DE CASO: ATERRO CONTROLADO DO JOCKEY CLUBE (LIXÃO DA ESTRUTURAL – BRASÍLIA-DF)” financiado pela CEB Geração S.A. e CEB Lajeado S.A. em parceria com a Secretaria de Meio Ambiente do Distrito Federal - SEMA.

REFERÊNCIAS

- BP. (2019). Acesso em julho de 2019, disponível em Statistical Review of World Energy 2019: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2019-full-report.pdf>
- Brasil Junior, A. C. P. (2016). Dynamical Modeling and Simulation of PV-Solar Pannels. *Rev. Brasileira de Energia Solar*, 7(1), 16–23.
- Kharb, R. K., Shimi, S. L., Chatterji, S., & Ansari, M. F. (2014). Modeling of solar PV module and maximum power point tracking using ANFIS. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 33, 602–612. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.02.014>
- Ma, T., Yang, H., & Lu, L. (2014). Solar photovoltaic system modeling and performance prediction. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 36, 304–315. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.04.057>
- Parida, B., Iniyani, S., & Goic, R. (2011). A review of solar photovoltaic technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 1625-1636.
- Razak, A., Irwan, Y. M., Leow, W. Z., Irwanto, M., Safwati, I., & Zhafarina, M. (s.d.). Investigation of the Effect Temperature on Photovoltaic (PV) Panel Output Performance. *International Journal on Advanced Science Engineering Information Technology*, 6, 682-688.

THERMAL BALANCE OF A PHOTOVOLTAIC PANEL – AN EXPERIMENTAL STUDY

Abstract. This work aims to perform an energy balance of a photovoltaic solar panel through the data collected from an experimental apparatus. The methodology is based on data collection, where temperatures of panel components were measured. A photovoltaic panel was built, where thermocouples were installed behind the solar cells, on top of the glass. The other data were collected through the compact weather station and two pyranometers that measured the ambient temperature, wind speed, horizontal global irradiance and inclined global irradiance with latitude slope in Brasília-DF. The efficiency of a photovoltaic panel is influenced by temperature. Therefore, it is important to perform an energy balance analysis of all of its components. The results demonstrate that there are differences in both averages and dynamic behavior of the various panel components.

Key words: Solar Panel, thermal behavior, energy balance