

## SIMULAÇÃO DA TEMPERATURA DE MÓDULOS FOTVOLTAICOS EM OPERAÇÃO

Arno Krenzinger – arno.krenzinger@ufrgs.br

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Airton Cabral de Andrade – kbral@puccrs.br

Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Faculdade de Física

### 3.3 Módulos Fotovoltaicos

**Resumo.** O ponto de operação de um módulo fotovoltaico depende de sua tensão, da irradiância solar sobre o mesmo e da temperatura das células que o compõem, além, obviamente, de suas características elétricas. Para fazer uma estimativa da potência elétrica e da corrente produzida por um módulo é necessário conhecer sua temperatura. Existem modelos simplificados que relacionam a temperatura das células fotovoltaicas com a temperatura ambiente e a irradiância solar, mas estes modelos não são adequados para a simulação do comportamento dos módulos fotovoltaicos em uma evolução onde os intervalos entre os resultados sejam da ordem de um minuto. Este trabalho propõe calcular a temperatura dos módulos com um modelo de transferência de calor transiente que faz uso da capacidade térmica e do poder de absorção da radiação solar, entre outros parâmetros, para obter uma evolução de temperatura muito parecida com o que é observado experimentalmente. Os resultados obtidos foram comparados com resultados experimentais e com resultados de modelos mais simplificados. O método proposto não é difícil de implementar em um programa de computador e apresentou resultados mais fidedignos do que os de outros métodos considerados.

**Palavras-chave:** Temperatura de célula, temperatura de módulos fotovoltaicos, simulação de sistemas fotovoltaicos.

## 1. INTRODUÇÃO

Os módulos fotovoltaicos convertem energia solar em energia elétrica diretamente. Suas características elétricas são dependentes da temperatura e normalmente a potência máxima de um módulo diminui com o aumento de temperatura. Em sistemas de simulação do comportamento de instalações fotovoltaicas é possível fazer uma estimativa bastante segura dos resultados da eletricidade obtida pela conversão de energia, mas, para isto, é fundamental entrar com dados da irradiância solar e da temperatura do módulo.

Os dados meteorológicos normalmente incluem a irradiância solar horizontal, a temperatura ambiente e a velocidade do vento. Isto significa que para simular o comportamento de um módulo fotovoltaico haveria primeiro que obter os dados de irradiância solar no plano dos módulos e a temperatura dos módulos em função dos dados conhecidos. O cálculo da irradiância sobre planos inclinados em diversas orientações é bastante conhecido. Modelos para determinar a radiação difusa como o de Perez et al (1987) são aceitos por diversos pesquisadores e dão resultados bastante bons. Resta, portanto, discutir métodos para determinar a temperatura média dos módulos fotovoltaicos em operação.

## 2. MÉTODO DO REGIME PERMANENTE

Uma técnica bastante utilizada para obter o valor da temperatura de um módulo fotovoltaico a partir de dados meteorológicos é obtida assumindo que o módulo estará à temperatura ambiente na ausência de radiação solar e que o aumento de temperatura, sempre que houver radiação solar incidente, será proporcional à irradiância.

De fato, em regime permanente a temperatura de equilíbrio será atingida quando o módulo perder a mesma quantidade de calor que ele absorve do sol. Considerando que a absorptância média do módulo deva ser uma constante e que os coeficientes de transferência de calor têm uma variação pequena, a equação da energia deve produzir:

$$A(\tau\alpha)_{ef}G = h_w A(T_M - T_a) + h_{r1} A(T_M - T_s) + h_{w2} A(T_M - T_a) + h_{r2} A(T_M - T_b) \quad (1)$$

onde  $A$  é a área do módulo,  $(\tau\alpha)_{ef}$  representa a parcela da radiação solar efetivamente absorvida pelo módulo, combinando a absorptância da célula, a transmitância do vidro e o fator de ocupação das células no módulo,  $h_{w1}$  é o coeficiente de convecção devido ao vento na superfície frontal do módulo,  $h_{w2}$  é o coeficiente de convecção devido ao vento na superfície posterior do módulo,  $h_{r1}$  é o coeficiente de transferência de calor por radiação entre a superfície frontal e o céu,  $h_{r2}$  é o coeficiente de transferência de calor por radiação entre a superfície posterior e o material que

estiver no campo de visão da superfície posterior do módulo (telhado, eventualmente),  $T_M$  é a temperatura do módulo,  $T_a$  é a temperatura ambiente,  $T_s$  é a temperatura equivalente do céu e  $T_b$  é a temperatura do material atrás do módulo.

Aqui se pode assumir uma série de aproximações para simplificar. É possível recalculer os coeficientes de transferência de calor por radiação para o céu e para o lado posterior para que sejam utilizados em equações em função da temperatura ambiente, respectivamente substituindo  $h_{r1}$  e  $h_{r2}$  por  $h_{r3}$  e  $h_{r4}$ . Assim a Eq. (1) fica reduzida a

$$(\tau\alpha)_{ef} G = (h_w + h_{r3} + h_{w2} + h_{r4})(T_M - T_a) \quad (2)$$

ou

$$T_M = T_a + \left( \frac{(\tau\alpha)_{ef}}{h_w + h_{r3} + h_{w2} + h_{r4}} \right) G \quad (3)$$

Para utilizar a equação (3) seria necessária a determinação tanto das propriedades ópticas do módulo quanto dos coeficientes de transferência de calor. No entanto, ensaios experimentais demonstram que uma boa estimativa do conjunto de valores que estão entre os parêntesis pode ser obtida para ajustar uma equação linear. Ainda mais, uma vez que se assume que a relação entre  $(T_M - T_a)$  e  $G$  seja uma reta passando por zero, basta um ponto para determinar esta característica, e este ponto pode ser o ponto da temperatura nominal de operação das células no módulo ( $T_{NOC}$ ), definida como a temperatura média assumida pelas células nos módulos quando a irradiância solar é  $800 \text{ Wm}^{-2}$ , a temperatura ambiente é  $293\text{K}$  ( $20^\circ\text{C}$ ) e a velocidade do vento é  $1 \text{ m/s}$ :

$$T_M = T_a + \left[ \frac{T_{NOC} - 293}{800} \right] G \quad (4)$$

Esta expressão foi apresentada por Ross (1980) para módulos convencionais e sua funcionalidade foi também comprovada por Krenzinger (1987) a partir de medidas com módulos bifaciais, para situações em que a velocidade do vento é baixa (da ordem de  $1 \text{ m/s}$ ).

A norma ASTM E-1036 (2002) define um método para a determinação da temperatura  $T_{NOC}$  de um módulo, sugerindo usar a equação linear ( $[T_M - T_a]$  &  $G$ ), mas com um fator de correção aditivo, que varia com a faixa de temperatura ambiente e de velocidade do vento, conforme a Eq. (5), onde o termo  $b_T$  é o termo de correção dado por um diagrama publicado na norma e  $m$  é o coeficiente angular da relação a ser determinado experimentalmente.

$$T_M = T_a + mG + b_T \quad (5)$$

King et al. (2004) apresentaram a Eq.(6), baseada em estudos empíricos para determinar a temperatura do módulo, a partir da irradiância solar, da temperatura ambiente e da velocidade do vento medida em uma altura de 10 metros. A equação utiliza dois coeficientes  $a$  e  $b$  que foram determinados experimentalmente para diferentes tipos de módulos. Os coeficientes  $a$  e  $b$ , propostos pelos autores para calcular a temperatura de superfície de um módulo fabricado com vidro na superfície frontal e um polímero na superfície posterior, são respectivamente  $-3,56$  e  $-0,0750$ .

$$T_M = G \{ e^{a+bVw} \} + Ta \quad (6)$$

onde  $Vw$  é a velocidade do vento em  $\text{m/s}$ .

Dias (2006) apresentou uma variante das equações anteriores, obtida da observação da temperatura de um dos módulos de um arranjo instalado no telhado do Laboratório de Energia Solar da UFRGS. As medidas não incluíram a velocidade do vento e a comparação do modelo, apresentado na Eq. (7), para temperaturas em graus Celsius, com dados experimentais mostrou o bom funcionamento do mesmo. O fator que multiplica a radiação solar é dependente da temperatura ambiente, conforme ajuste realizado em dias de clima frio e dias de clima quente. Infelizmente o resultado é válido para aquela instalação, sem maior generalidade.

$$T_M = (0,0332 - 0,002Ta)G + 0,908Ta + 2,1 \quad (7)$$

### 3. MÉTODO TRANSIENTE

A Eq. (4) é totalmente independente da capacidade térmica do módulo fotovoltaico. Quando se aplica essa equação para representar a temperatura de um módulo fotovoltaico em um valor médio de um intervalo de uma hora ela funciona razoavelmente, mas quando se tenta utilizar o mesmo modelo para intervalos de um minuto o comportamento simulado já não acompanha o experimental.

Rigorosamente haveria que ser calculada a transferência de calor em 3 dimensões, incluindo diferenças entre a temperatura de uma célula e a temperatura do vidro utilizado na laminação do módulo. Andrade (2008) apresenta um desenvolvimento completo que representa muito bem cada célula individualmente. Para a estimativa buscada neste trabalho, no entanto, este discernimento não será necessário. Por hipótese a temperatura do módulo será considerada uniforme. O módulo será considerado como uma placa de vidro, cujas propriedades radiantes são as mesmas apresentadas pelo vidro, mas a absorvância solar efetiva terá o valor correspondente ao da absorvância da célula combinada com a transmitância do vidro. Ao ter uma temperatura uniforme o problema de transferência de calor fica resumido a apenas 1 dimensão. Outra consideração simplificadora foi a de considerar a conversão fotovoltaica no problema como sendo efetuada com uma eficiência constante.

$$m_M c_p \left( \frac{\partial T_M}{\partial t} \right) = \tau \alpha G A - \eta G A - (h_{w1} + h_{r3} + h_{w2} + h_{r4}) A (T_M - T_a) \quad (8)$$

onde  $m_M$  é a massa do módulo e  $c_p$  é o calor específico do vidro (o módulo está sendo considerado como se fosse todo de vidro) e  $t$  o tempo.

Para a simulação pretendida a Eq.(8) foi discretizada em intervalos de 1 minuto e utilizaram-se as seguintes relações para obter os coeficientes. Para o coeficiente de transferência de calor com o vento na superfície frontal usou-se a relação apresentada em Duffie e Beckmann,1991:

$$h_{w1} = 2,8 + 3V_w \quad (9)$$

Para o coeficiente na parte posterior foi considerado um coeficiente 4 vezes menor. Chenlo (11) sugeriu utilizar 2/3 do valor para a superfície frontal, mas em um sistema com muitos módulos, há uma evidente proteção de uns com respeito aos outros e isto contribuiu para a decisão de propor um coeficiente menor.

$$h_{w2} = 0,25h_{w1} \quad (10)$$

A temperatura equivalente do céu corresponde à temperatura que deve ser utilizada nos cálculos de transferência de calor por radiação para que o céu possa ser considerado com características de corpo negro. Seu valor depende da umidade do ar, da nebulosidade e de outros parâmetros, mas pode ser estimado através de uma relação muito simples, que foi utilizada:

$$T_s = T_a - 10K \quad (11)$$

Para definir a temperatura do telhado atrás dos módulos foi utilizada uma relação linear com a irradiância solar. Apesar de que a inclinação geralmente não seja a mesma, foi considerada a irradiância no plano dos módulos porque este seria um dado já elaborado. A relação foi feita de forma que ocorra um aumento de 5K quando a irradiância for de 1000 Wm<sup>-2</sup>:

$$T_b = T_a + 0,005G \quad (12)$$

O coeficiente para troca radiante com o céu, corrigido para ingressar na equação em função da temperatura ambiente é dado por:

$$h_{r3} = \varepsilon_v \sigma \frac{(T_M + T_s)(T_M^2 + T_s^2)(T_M - T_s)}{(T_M - T_a)} \quad (13)$$

$$h_{r4} = \varepsilon_b \sigma \frac{(T_M + T_b)(T_M^2 + T_b^2)(T_M - T_b)}{(T_M - T_a)} \quad (14)$$

Combinando as equações (2) e (4) para a condição estacionária de temperatura de operação, pode-se obter o valor de  $(\tau \alpha)_{ef}$ :

$$(\tau \alpha)_{ef} = \frac{(h_w + h_{r3} + h_{w2} + h_{r4})(T_{NOC} - 293)}{800} \quad (15)$$

Neste caso os coeficientes de transferência de calor devem ser calculados para as condições definidas no ensaio da  $T_{NOC}$ , ou seja,  $T_a=293K$  e  $V_w=1m/s$ , e utilizando  $T_{NOC}$  na variável  $T_M$  quando calcular  $h_{r3}$  e  $h_{r4}$  com as Eq. (13) e (14).

Finalmente a temperatura a cada minuto é calculada iterativamente pela equação (16)

$$T_M^{i+1} = T_M^i + \Delta t \frac{(G_T^{i+1} M_F A_M)(\tau\alpha)_{ef} - \eta) - (h_{r3} + h_{w1} + h_{r4} + h_{w2})A_M(T_M^i - T_a^{i+1})}{m_M c_p} \quad (16)$$

onde  $\Delta t$  é 60s. A temperatura do módulo encontrada corresponde à temperatura da superfície do vidro na cobertura. Um segundo cálculo é então realizado para calcular com mais exatidão a temperatura da célula. Considerando que as perdas térmicas pela face frontal do módulo são consequência da temperatura da célula estar maior que a temperatura da face externa do vidro, em regime quase-estacionário admite-se assumir que o fluxo de calor por condução através do vidro seja igualado ao fluxo de calor do vidro para o ambiente. O gradiente térmico através do vidro permite determinar desta forma a temperatura da célula no módulo:

$$T_{cel} = \frac{T_M^{i+1} + (h_{r3} + h_{w1})(T_M^{i+1} - T_a^{i+1})E_v}{k_v} \quad (17)$$

onde  $T_{cel}$  é a temperatura da célula no módulo,  $k_v$  é a condutividade térmica do vidro e  $E_v$  é a espessura do vidro,

## 4. RESULTADOS

### 4.1 Análise da absortância das células

Para medir a absortância solar em células de um módulo foi desenvolvido um ensaio que consistiu em determinar a quantidade de energia incidente em um módulo exposto ao Sol, posicionado na horizontal, e o valor da dissipação térmica associada a cada célula. Na condição em que o módulo está em circuito aberto, nenhuma fração da radiação incidente se converte em energia elétrica fornecida externamente pelo módulo. Sendo assim, ao ser feito o balanço de energia entre o que chega ao módulo e o que sai do módulo pode-se calcular, sabendo-se a temperatura de equilíbrio da célula, quanto da energia solar incidente foi absorvida pela mesma.

Nesta determinação é necessário saber a temperatura da célula e as condições do entorno. Para determinar a temperatura da célula, mediu-se a temperatura da superfície do Tedlar® logo abaixo de cada célula, com sensores planos RTD tipo PT100, sendo o módulo isolado por sua face posterior e pelas laterais com uma placa de poliestireno expandido. Medindo desta forma se obtém uma boa avaliação da temperatura da célula, porque a lâmina de Tedlar® tem uma espessura de 0,2 mm e está isolada do ambiente com uma placa de 50 mm de poliestireno expandido.

Para determinar a quantidade de radiação solar que chega à célula utilizou-se uma célula fotovoltaica de referência, calibrada pelo CIEMAT (*Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas-Espanha*). Medir a irradiância desta forma é coerente porque o sensor é da mesma tecnologia das células do módulo fotovoltaico e o encapsulamento também segue a mesma tecnologia. Desta forma, as perdas ópticas que dependem do ângulo de incidência no módulo são semelhantes às que ocorrem na célula de referência.

Dissipações térmicas de cada célula ocorrem por condução, por convecção e por radiação. Por condução ocorrem para as células vizinhas (ou bordas) e para as superfícies do vidro e da lâmina de poliestireno. Nas superfícies do vidro e do poliestireno a transferência de energia ocorre por convecção e por radiação para o entorno e para o céu.

Para o cálculo da quantidade de calor por convecção foi utilizado o coeficiente de transferência de calor por convecção dado pela Eq.(9) e a temperatura ambiente. Para o cálculo deste coeficiente é necessário conhecer a velocidade do vento, que foi medida com um anemômetro de conchas bastante sensível.

Para o cálculo do fluxo de calor por radiação foi utilizado o coeficiente de transferência de calor por radiação utilizando-se a Eq. (13) com o valor da temperatura efetiva do céu. A transferência de calor por radiação e convecção por trás foi desprezada porque a superfície externa da placa de poliestireno expandido ficou em temperatura muito parecida com o ambiente e do objetos no entorno local. A temperatura do céu foi medida com um pirgeômetro construído no Laboratório de Energia Solar da UFRGS e para a emitância do vidro foi usado o valor de 0,92.

A determinação da absortância solar de cada célula é feita com o uso da equação da energia para o regime permanente, pois a temperatura estabelecida em cada célula será dependente do valor da absortância. No processo de cálculo foi considerada condução de calor entre as células vizinhas e as bordas do coletor, em um procedimento numérico descrito em detalhes por Andrade (2008). A dificuldade no processo de determinação da absortância solar consistiu em encontrar momentos em que seria aceitável supor que o módulo estivesse em regime permanente.

Analisando conjuntos de medidas da temperatura do módulo colocado na horizontal e isolado buscou-se a coincidência de três fatores. Primeiramente buscaram-se seqüências de temperaturas constantes. Tendo esta condição verificou-se se a velocidade do vento era próxima a zero e se a temperatura ambiente e a irradiância eram constantes. Sendo assim, calculou-se qual seria a potência incidente em cada célula para atingir aquela temperatura de equilíbrio naquela condição meteorológica, sendo este fluxo igual a  $(\tau\alpha)_e G$ . Considerando que a refletância da interface ar-vidro é 0,04 para incidência normal e que a transmitância devida exclusivamente à absorção de um vidro de qualidade similar ao vidro do módulo é 0,99 também se pode determinar a absorptância da própria célula. Os valores de absorptância calculados por este método, apresentados na Tab.1, têm seus valor médio em 0,56. As células são identificadas por linhas e colunas. Esta distribuição corresponde à indexação utilizada pelo programa de simulação. A Fig. 1 mostra um histograma para estes valores.

Tabela 1-Valores determinados para as absorptâncias das células fotovoltaicas.

	Col. 1	Col. 2	Col. 3	Col. 4	Col. 5	Col. 6
L1	0,46	0,52	0,51	0,51	0,53	0,52
L2	0,55	0,59	0,59	0,58	0,57	0,51
L3	0,48	0,57	0,60	0,61	0,61	0,58
L4	0,60	0,62	0,62	0,61	0,58	0,50
L5	0,51	0,58	0,61	0,62	0,62	0,60
L6	0,60	0,62	0,62	0,61	0,58	0,50
L7	0,50	0,58	0,61	0,61	0,62	0,60
L8	0,59	0,62	0,61	0,60	0,57	0,49
L9	0,49	0,56	0,59	0,61	0,61	0,59
L10	0,58	0,60	0,60	0,59	0,55	0,39
L11	0,45	0,54	0,57	0,59	0,59	0,56
L12	0,53	0,55	0,55	0,53	0,50	0,42

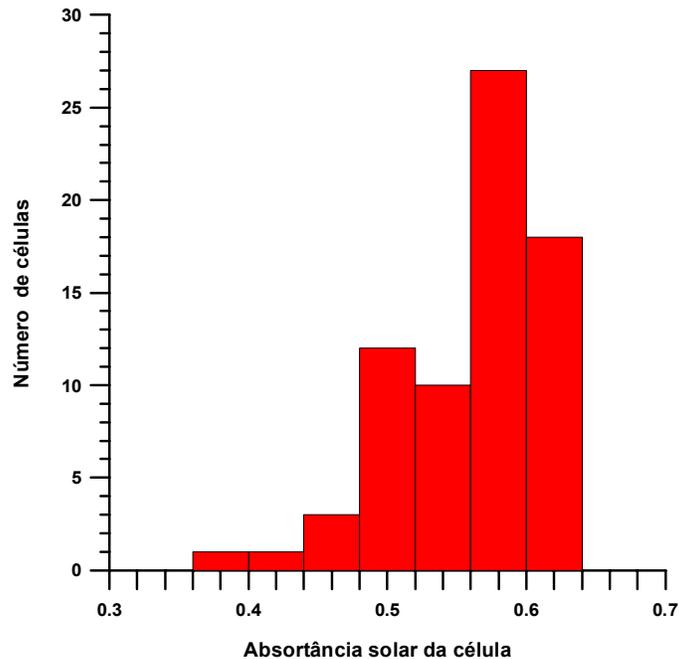


Figura 1. Distribuição da absorptância solar das células em um módulo de 72 células, conforme determinação experimental.

Evidentemente estes resultados são válidos apenas para o módulo testado, mas podem servir como parâmetro ao estabelecer um método mais genérico. O modelo correspondente ao módulo ensaiado tem uma temperatura  $T_{NOC}=320K$  (47°C) segundo o fabricante. Aplicando esta temperatura na Eq. (15) obtém-se como resultado  $(\tau\alpha)_e=0,52$  que, de acordo com as considerações anteriores, corresponderia a uma absorptância de célula  $\alpha=0,55$ , valor muito

parecido com a média obtida no ensaio, mostrando que a avaliação resultante da Eq. (15) pode ser utilizada para obter genericamente um valor de  $(\tau\alpha)_{ef}$ .

#### 4.2 Validação experimental da evolução da temperatura

Para testar a validade do modelo foram utilizados dados medidos com o equipamento de aquisição de dados do sistema fotovoltaico conectado à rede do Laboratório de Energia Solar da UFRGS. Há dados medidos ao longo de mais de um ano, em uma taxa de aquisição de um minuto por varredura, que incluem dados de irradiância solar, medida com uma célula fotovoltaica calibrada, dados de temperatura ambiente e dados de temperatura de uma célula em um dos módulos fotovoltaicos da instalação.

Estudos sobre a distribuição de temperaturas nos módulos fotovoltaicos (Andrade, 2008) mostram que pode haver diferenças significativas de temperatura entre diferentes células em um mesmo módulo e mais ainda entre células de módulos diferentes. Análises da distribuição de temperaturas no módulo que foi utilizado mostram que a célula medida pode ser considerada como representando o comportamento típico dos módulos.

As medidas tomadas a cada minuto são instantâneas, isto é, a irradiância não representa a média de um minuto completo, mas apenas o valor da grandeza no momento que o multiplexador seleciona o canal de medição da radiação solar. No caso das temperaturas a variação não é tão abrupta e este fato introduz muito pouco erro. Há outros erros, ruídos e incertezas nas medidas que não serão aqui analisados, mas que levam à reflexão de que pelo menos uma tolerância de  $\pm 1^\circ\text{C}$  deva ser considerada nos resultados.

A velocidade do vento é um dado que não foi medido. Para realizar a simulação e depois comparar com os dados medidos foi considerada uma velocidade de vento sempre igual a  $V_w = 0,5$  m/s. Evidentemente este fato prejudica a validação experimental do modelo, mas de qualquer modo o cálculo servirá para reproduzir, em um programa de simulação, a temperatura de módulos onde também não se terá a velocidade do vento prescrita.

A Fig. 2 representa uma seqüência de dois dias de ensaio, com gráficos de irradiância solar na parte superior da figura e temperatura ambiente, temperatura medida no módulo e temperatura simulada na parte de baixo. Pelo gráfico da radiação pode-se perceber que se tratam de um dia com nuvens e um dia com céu límpido. A temperatura simulada acompanha muito bem os dados da temperatura medida, mesmo no primeiro dia quando os dados oscilam muito ao longo do tempo, comprovando a validade do método. No segundo dia observa-se uma variação maior da temperatura simulada do que da temperatura medida, mas ainda assim o valor médio é satisfatório. Talvez neste dia a velocidade do vento fosse menor do que a que foi considerada, pois neste caso haveria menor interferência das variações da temperatura ambiente medida.

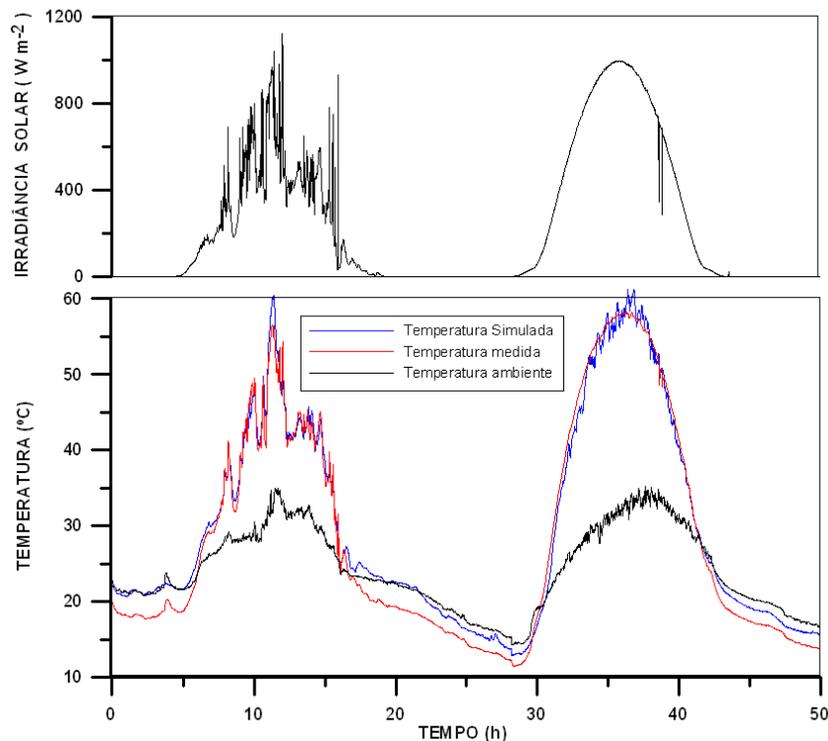


Figura 2. Exemplo dos resultados em dois dias em seqüência, mostrando a irradiância solar no plano dos módulos, a temperatura ambiente e a temperatura do módulo, medida e simulada.

Ainda analisando a Fig. 2, observa-se que nos períodos noturnos a temperatura simulada não fica tão baixa como a temperatura medida. Para ajustar melhor estes resultados noturnos o cálculo da temperatura efetiva do céu teria que ser mais sofisticado, levando em conta a umidade do ar e a nebulosidade. Mas estes são dados adicionais que iriam onerar o programa de simulação, sem que houvesse um resultado aproveitável na prática, já que durante a noite o sistema não opera.

A Fig. 3 mostra uma comparação entre a simulação obtida pelo método proposto e obtida com o método do regime permanente, a partir da Eq. (4). O gráfico é mostrado para um período de apenas duas horas para que se possam observar melhor as diferenças. Observa-se que, apesar de não ser exato, o método proposto (curva azul) acompanha as medidas realizadas (curva vermelha) em suas oscilações, enquanto o método do regime permanente apresenta oscilações com amplitude mais acentuada, porque segue instantaneamente as variações da irradiância solar. Na mesma linha de comparação, a Fig. 4 mostra gráficos sequenciais do desvio entre medida e simulação para uma seqüência de seis dias. O gráfico superior representa o erro da simulação com o modelo proposto, chegando a um valor de erro médio quadrático (RMSE) de apenas 1,66°C ao longo do período. O gráfico inferior é o erro do resultado obtido com a Eq. (4) que resulta em um RMSE= 3,63°C no mesmo período.

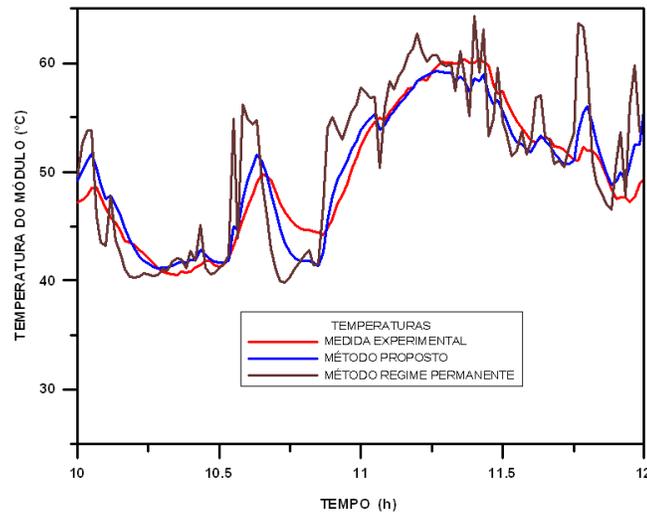


Figura 3. Comparação entre a evolução da temperatura medida em um módulo e as temperaturas obtidas por dois modelos de simulação utilizando o método proposto (transiente) e o método correspondente à Eq. (4).

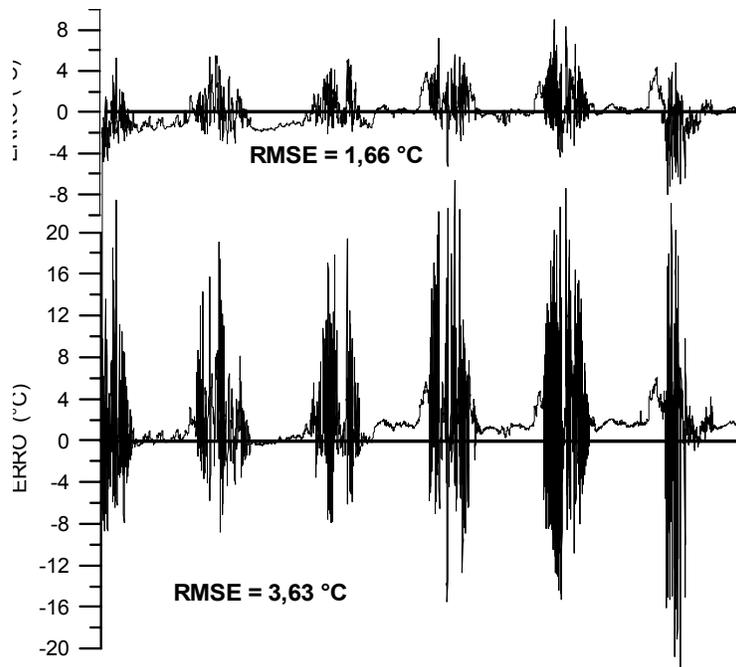


Figura 4. Comparação entre os erros observados para o modelo de regime permanente (gráfico inferior) e o modelo de regime transiente (gráfico superior) para uma seqüência de seis dias de medidas com intervalos de um minuto.

## 5. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou um método simples para simular a temperatura de células em módulos fotovoltaicos e comparou seus resultados com medidas e com outros métodos de simulação. Adicionalmente foi apresentado um método experimental de avaliar a absorptância solar individual de cada célula em um módulo. Para uma avaliação genérica não é necessário determinar estas absorptâncias individuais, bastando conhecer a temperatura nominal de operação do módulo.

Os resultados mostraram ser muito adequados, acompanhando razoavelmente a curva da evolução da temperatura medida. O método é recomendado para simulações com intervalos pequenos, da ordem de 1 minuto, entre os instantes simulados. Para simulação horária pode-se tanto utilizar um dos modelos conhecidos que utilizam regime permanente, como repetir o modelo proposto por 60 vezes (1 vez a cada minuto) com resultados muito parecidos.

Uma maior fidelidade nas temperaturas simuladas vai melhor ajustar as curvas características dos módulos e terá algum impacto nas distribuições de tensões e potências ao longo do tempo. Este impacto será avaliado e servirá de tema para um estudo futuro.

### *Agradecimentos*

Os autores agradecem o suporte financeiro dado a este trabalho pelo CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, FINEP – Financiadora de Estudos e Projetos e ELETROBRAS- Centrais Elétricas do Brasil.

## REFERENCIAS

- Andrade, A. C. 2008 Análise e Simulação da Distribuição de Temperaturas em Módulos Fotovoltaicos. Tese de Doutorado. PROMEC, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.
- ASTM E-1036, 2002, Standard Methods of Testing Electrical Performance of Nonconcentrator Terrestrial Photovoltaic Modules and Arrays Using Reference Cells, American Society for Testing and Materials.
- Dias, J. B. Instalação Fotovoltaica Conectada à Rede: Estudo Experimental para a Otimização do Fator de Dimensionamento, Tese de Doutorado, PROMEC, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Duffie, J.A., Beckman, W.A., 1991. "Solar Engineering of Thermal Processes". John Wiley & Sons.
- King, D. L., Boyson, W. E. e Kratochvil, J. A., 2004. "Photovoltaic Array Performance Model", Sandia National Laboratories Report, Albuquerque, New Mexico 87185-0752.
- Krenzinger, A., 1987. "Contribución al Diseño de Sistemas Fotovoltaicos con Paneles Bifaciales en Combinación con Reflectores Difusos de Carácter General", Tesis Doctoral, Universidad Politecnica de Madrid, E.T.S.I. de Telecomunicacion. Madrid.
- Perez, R. Seals, R. Ineichen, P. Stewart, R. Menucucci, D. 1987 New Simplified Version of the Perez Diffuse Irradiance Model for Tilted Surfaces, Solar Energy, V.39, n.3, Pp. 221-231
- Ross, R.G. (1980) "Flat-Plate Photovoltaic Array Design Optimization", *Conference Record, 14th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, San Diego, APUD PVCDDROM, University of New South Wales, <http://www.udel.edu/igert/pvcdrom/>

## PHOTOVOLTAIC MODULE OPERATING TEMPERATURE SIMULATION

**Abstract.** *The operating point in the characteristic curve of a photovoltaic module depends on its voltage, on the solar irradiance and on the temperature of its cells, besides, obviously, on its electrical characteristics. It is necessary to know the temperature of a module for estimating its voltage and its electrical current. There are simplified models that correlate the cell temperature with the solar irradiance and ambient temperature, but these are not adequate for simulating the behavior of the photovoltaic modules in an evolution when the time interval is as small as one minute. This work propose to compute the module temperature using a transient heat transfer model that make use of the heat capacity and of the solar absorptance, among other parameters, in order to obtain an thermal evolution very similar to that is experimentally observed. The obtained results were compared with experimental results and with results from simpler models. The proposed method is not difficult to implement in a computer program and presented results more accurate than the other considered methods.*

**Key words:** Cell temperature, PV module temperature, photovoltaic systems simulation