

## ANÁLISE DA MEDIDA DA TEMPERATURA DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS EM ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO ELÉTRICA

**A. J. Bühler, F. P. Gasparin e A. Krenzinger**

Laboratório de Energia Solar – Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) Rua Sarmento Leite, 425 CEP 90050-170, Porto Alegre – RS - Brasil  
 Tel. 55 (51)-3308-6841 e-mail: [ajbuhler@gmail.com](mailto:ajbuhler@gmail.com)

**RESUMO:** A medida da temperatura de módulos fotovoltaicos é fundamental em ensaios para determinação de sua curva característica de corrente *versus* tensão ( $I-V$ ) em uma condição específica, bem como para a determinação de seus coeficientes térmicos. A metodologia e o equipamento empregados na medida da temperatura, entretanto, podem afetar significativamente os resultados, já que não é possível medir a temperatura diretamente nas células que compõem um módulo sem danificar o encapsulamento do mesmo. Este trabalho apresenta uma comparação entre os resultados obtidos para a medida da temperatura junto ao Tedlar, na parte posterior de um módulo e os resultados obtidos através da medida da temperatura diretamente em uma das células do mesmo, através de uma pequena abertura feita no material de encapsulamento. Esta abertura possibilitou a colocação do sensor em contato direto com a célula. Um estudo sobre a configuração dos sensores utilizados para a medida da temperatura e uma análise de propagação de erros também é realizada e os resultados são aqui apresentados.

**Palavras chave:** Módulos fotovoltaicos, curva característica  $I-V$ , medida de temperatura, coeficientes térmicos, caracterização de módulos fotovoltaicos.

### INTRODUÇÃO

A temperatura é um parâmetro de grande influência no comportamento de um módulo fotovoltaico. Este parâmetro afeta a curva de corrente *versus* tensão ( $I-V$ ) de forma que, à medida que a temperatura aumenta, a tensão de circuito aberto ( $V_{OC}$ ) diminui linearmente segundo um coeficiente  $\beta$  enquanto a corrente de curto-circuito ( $I_{SC}$ ) aumenta ligeiramente segundo um coeficiente  $\alpha$ . A máxima potência de um módulo ( $P_M$ ) também é afetada pela temperatura segundo um coeficiente  $\gamma$ . Na maioria dos casos a potência diminui à medida que a temperatura aumenta. A eficiência de módulos fotovoltaicos também é afetada pela temperatura, de forma que esta diminui à medida que a temperatura aumenta, como pode ser observado em Mattei et. al., (2006). Fica claro que a determinação desses coeficientes térmicos é fundamental para prever o comportamento de um módulo fotovoltaico em diferentes condições de operação, o que pode ser observado pelos procedimentos de translação de curvas  $I-V$  da norma internacional IEC 891, que exigem que os coeficientes térmicos do módulo sejam conhecidos (IEC, 1987).

A determinação dos coeficientes térmicos de um módulo depende da medida da temperatura das células que o compõe, uma vez que é esta a temperatura que efetivamente afeta a curva  $I-V$ . Esta tarefa, entretanto não é praticável sem que seja realizado um ensaio destrutivo, uma vez que as células se encontram encapsuladas entre diferentes materiais dependendo da configuração do módulo. A figura 1 apresenta uma configuração típica para um módulo fotovoltaico de silício cristalino onde estão representadas as diferentes camadas constituintes.

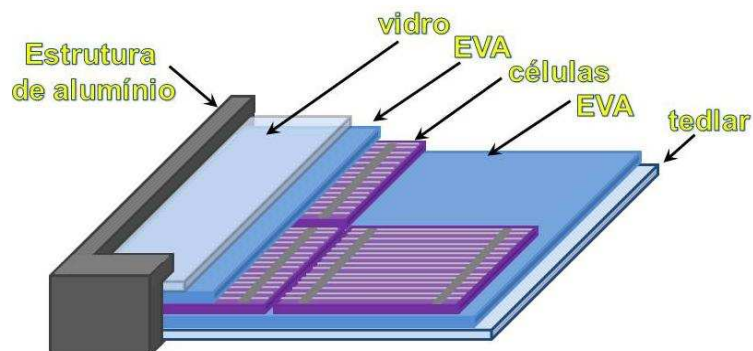


Figura 1: Representação de um corte de um módulo fotovoltaico típico de silício cristalino.

A medida da temperatura de um módulo fotovoltaico normalmente é realizada por meio de um sensor fixado junto ao Tedlar, na parte posterior do módulo. Quando a medida da temperatura é realizada em regime permanente, com o módulo protegido da irradiação solar, pode-se assumir, sem grandes erros, que a temperatura do Tedlar é a mesma que a temperatura da célula. Em regime permanente, com o módulo exposto a irradiação solar, a diferença de temperatura entre o Tedlar e a célula pode assumir valores de até 2°C. Principalmente em medidas realizadas em regime transiente, como é o caso em ensaios para determinação dos coeficientes térmicos, essa aproximação pode ocasionar erros significativos. Isto ocorre, pois enquanto o módulo estiver exposto à radiação solar, em regime de aquecimento, a temperatura do Tedlar estará sempre mais baixa que a temperatura da célula. Considerando então que existe uma diferença de temperatura entre o Tedlar e a célula, é importante estudar como esta diferença se comporta em regime transiente, pois assim é possível prever qual será a influência da medida da temperatura junto ao Tedlar em ensaios nestas condições.

Este trabalho apresenta uma análise dos efeitos causados na determinação de coeficientes térmicos em módulos fotovoltaicos pela medida da temperatura junto ao Tedlar em regime transiente. É realizada uma comparação entre os resultados obtidos para a medida da temperatura junto ao Tedlar e os resultados obtidos através da medida da temperatura diretamente em uma das células de um módulo fotovoltaico. São também apresentadas duas configurações de sensores Pt100 para a medida de temperatura, com e sem encapsulamento, que será posteriormente descrito. Um estudo sobre a diferença entre essas configurações também é realizado, avaliando possíveis erros de medida. Uma análise das incertezas associadas à determinação dos coeficientes térmicos também é realizada e apresentada neste trabalho.

## PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Para a medida da temperatura, este trabalho propõe a utilização de um sensor tipo Pt100 de filme metálico. Este sensor deve ser fixado na parte de trás do módulo, junto a uma célula central, com auxílio de pasta térmica, a fim de garantir um bom contato térmico entre o sensor e o Tedlar. Como os sensores Pt100 são muito frágeis, um processo de encapsulamento foi realizado para garantir maior resistência mecânica e desta maneira aumentando consideravelmente a durabilidade do sensor. Este encapsulamento consiste em fixar o sensor sobre uma pequena lâmina de cobre e cobri-lo com resina epóxi. A figura 2 apresenta uma fotografia onde são observados dois sensores Pt100 utilizados para a elaboração deste trabalho, um com encapsulamento e o outro sem encapsulamento. Nesta mesma fotografia pode ser observada uma régua onde a numeração, dada em centímetros, fornece uma idéia da dimensão dos sensores.



Figura 2: Sensores Pt100 utilizados para a medição de temperatura em módulos fotovoltaicos: à esquerda, Pt100 encapsulado, à direita, Pt100 não encapsulado. A marcação na régua da figura está em centímetros.

A fim de avaliar qual a influência da medida da temperatura junto ao Tedlar em ensaios em regime transiente foi adotada a metodologia que é descrita a seguir.

Foi realizado um pequeno corte nas camadas de Tedlar e EVA, pouco maior do que as dimensões do sensor Pt100, permitindo assim acesso a uma das 33 células de um módulo fotovoltaico de silício monocristalino da marca Solarex. Com auxílio de pasta térmica e fita adesiva, um sensor Pt100 sem encapsulamento foi fixado através do orifício gerado, diretamente em contato com a célula do módulo. Nesta mesma célula, outros dois sensores Pt100 foram também fixados da mesma forma, porém junto ao Tedlar. Um destes sensores possui a mesma configuração do sensor fixado na célula, enquanto o outro possui o encapsulamento tal como observado na figura 2. Como forma de avaliar a influência da medida de temperatura junto ao Tedlar em regime transiente, a tensão de circuito aberto foi medida juntamente com a temperatura dos três sensores fixados na parte de trás do módulo. Através da medida de  $V_{OC}$  foi possível a determinação do coeficiente  $\beta$  e assim avaliar a influência da medida da temperatura na determinação deste coeficiente. O coeficiente  $\beta$  foi determinado de acordo com os seguintes passos:

- 1) Posiciona-se o módulo em um local protegido da ação do vento e livre de obstáculos que possam influenciar a distribuição de irradiação na superfície do módulo por efeitos de reflexão.

- 2) Os sinais dos sensores de temperatura que estão fixados na parte de trás do módulo são monitorados, com o mesmo coberto por um material opaco, até que o módulo atinja o equilíbrio térmico.
- 3) Uma célula de referência, posicionada no mesmo plano que o módulo, é exposta à irradiação solar e sua temperatura também é monitorada. Esta temperatura também é medida por um sensor fixado em sua parte traseira.
- 4) Uma vez que a temperatura da célula entre em regime permanente, um sistema de aquisição de dados é acionado e logo após o material opaco que cobria o módulo é retirado. Uma vez exposto à irradiação solar o módulo entra em regime de aquecimento.
- 5) As temperaturas dos três sensores fixados na parte de trás do módulo, a tensão de circuito aberto do mesmo, a irradiância e a temperatura da célula de referência são então medidas em cada intervalo de 10 segundos. Estas medidas são realizadas até que a temperatura do módulo entre em regime estacionário.

A irradiância precisa ser monitorada ao longo do ensaio, pois a tensão de circuito aberto varia segundo uma taxa logarítmica com a irradiância. Para este monitoramento foi utilizada uma célula de referência, pois o tempo de resposta desta é extremamente rápido, da ordem de microssegundos, capaz de responder a possíveis variações instantâneas da irradiância solar. Como o objetivo do experimento é avaliar a variação de  $V_{OC}$  somente com a temperatura, o efeito da variação da irradiância precisa ser isolado e para tanto uma correção dos valores medidos de  $V_{OC}$  é aplicada utilizando a equação (1). A medida da temperatura da célula de referência é importante para assegurar que esta não varie significativamente durante o ensaio interferindo na medida da irradiância e assim ocasionando erros, tais quais são apresentados por Gasparin e Bühler, (2010).

$$V_{OC\_CORR} = V_{OC\_MED} + mV_T \ln \frac{G_{REF}}{G_{MED}} \quad (1)$$

onde:  $V_{OC\_CORR}$  é a tensão de circuito aberto corrigida pela irradiância,  $V_{OC\_MED}$  é a tensão de circuito aberto medida,  $m$  é o fator de idealidade do diodo,  $V_T = N_s k_B T / e$ , a tensão térmica, sendo  $e$  a carga do elétron,  $k_B$  a constante de Boltzmann,  $T$  a temperatura das células do módulo e  $N_s$  o número de células ligadas em série.

Na equação (1), o fator de idealidade do diodo, que pela teoria de Shockley (Shockley, 1949) deve assumir valores entre 1 e 2 foi determinado pelo método proposto por Phang et. al., (1984). A temperatura utilizada para a correção da tensão de circuito aberto, presente também na equação (1), foi àquela medida diretamente na célula.

#### Calibração dos sensores de temperatura

Neste trabalho foram utilizados 4 sensores de temperatura do tipo Pt100 filme metálico classe A, modelo CRZ-2005-100-A, que possui as seguintes características (HAYASHI DENKO, 2010):

Incerteza:  $\pm 0,15^\circ\text{C} + 0,002T$       T: Temperatura medida ( $^\circ\text{C}$ )  
 Incerteza a  $0^\circ\text{C}$ :  $\pm 0,06 \Omega$   
 TCR (alpha) =  $0,003851 \pm 0,0000005 (\Omega, \Omega/^\circ\text{C})$

Embora o sensor possua uma incerteza pequena para diversas aplicações, a fim de fazer as comparações requeridas para este trabalho, os três sensores utilizados para medir a temperatura do módulo foram calibrados com o auxílio de um banho termostático, modelo Lauda RE207. Como as diferenças de temperatura medidas são de até  $2^\circ\text{C}$ , a imprecisão de fábrica de cada Pt100 poderia invalidar os resultados. O sensor utilizado para medir a temperatura da célula de referência não foi calibrado, pois sua utilização foi apenas para verificar a temperatura da célula ao longo de cada ensaio.

Os sensores foram submetidos a temperaturas entre  $10^\circ\text{C}$  e  $70^\circ\text{C}$ , resultando desta maneira em diferentes curvas de calibração. Nesta faixa os sensores serão considerados lineares, não sendo aplicada uma equação de correção. A figura 3 apresenta a curva de calibração de um dos sensores utilizados neste trabalho.

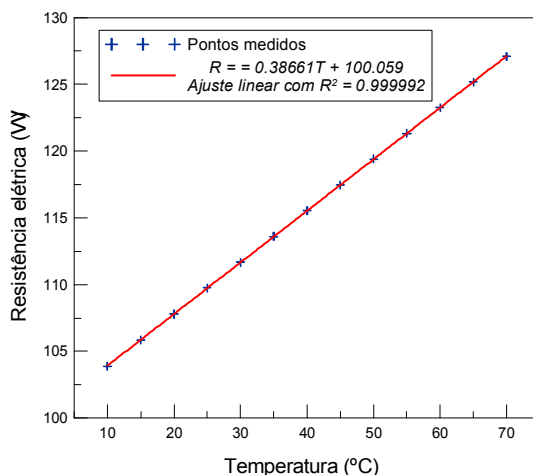


Figura 3: Curva de calibração de um dos sensores Pt100 utilizados para a medição de temperatura no módulo.

A calibração foi realizada por meio da medida da resistência elétrica dos sensores Pt100. As medidas de resistência foram realizadas com uma unidade de aquisição de dados Agilent 34970A. A escala utilizada é a de 1 k $\Omega$  em 6 ½ dígitos, resultando em uma resolução de 0,001  $\Omega$ . Cada medida de resistência está sujeita a uma incerteza de  $\pm(0,0010\%$  da leitura + 0,0001% da escala), o que resulta, para um valor medido de 120,000  $\Omega$ , uma incerteza de  $\pm 0,022$   $\Omega$ .

Os resultados das medidas realizadas para a calibração dos sensores estão apresentados na tabela 1.

Temperatura (°C)	R ( $\Omega$ ) Pt100 #1	R ( $\Omega$ ) Pt100 #2	R ( $\Omega$ ) Pt100 #3(encap.)
10	103.880	103.863	103.680
15	105.842	105.806	105.630
20	107.797	107.754	107.573
25	109.740	109.706	109.515
30	111.672	111.641	111.466
35	113.611	113.583	113.390
40	115.546	115.520	115.340
45	117.471	117.449	117.270
50	119.399	119.376	119.202
55	121.326	121.307	121.122
60	123.263	123.220	123.040
65	125.171	125.137	124.960
70	127.086	127.049	126.870

Tabela 1: Valores de resistência elétrica medida em função da temperatura para três sensores Pt100 submetidos a um banho termostático.

#### Análise da incerteza associada à calibração dos sensores de temperatura

Uma vez definido que a referência de temperatura é aquela dada pelo banho termostático, para cada sensor foi obtida uma equação de ajuste linear pelo método de mínimos quadráticos. Posteriormente, com o auxílio das ferramentas de estatística do Microsoft Excel 2007, foi realizada uma análise das incertezas associadas à determinação de cada equação de ajuste linear. Para cada sensor foram calculados os valores que constam na Tabela 2.

Parâmetro	Pt100 #1	Pt100 #2	Pt100 #3(encap.)
$R^2$	0.999991642	0.99999055	0.99999114
Desvio padrão dos pontos em torno da reta de regressão	0.02273246	0.02416245	0.023406018
Coefficiente linear da reta, $b$ ( $\Omega$ )	100.059	100.031	99.847
Incerteza de $b$ ( $\Omega$ ) (intervalo confiança: 95%)	$\pm 0.033$	$\pm 0.035$	$\pm 0.034$
Coefficiente angular da reta, $a$ ( $\Omega/^\circ\text{C}$ )	0.38661	0.38656	0.38663
Incerteza de $a$ ( $\Omega/^\circ\text{C}$ ) (intervalo confiança: 95%)	$\pm 0.00074$	$\pm 0.00079$	$\pm 0.00076$

Tabela 2: Dados referentes à análise de incertezas efetuada para a calibração dos sensores de temperatura utilizados neste trabalho.

Uma vez determinados os parâmetros da equação de calibração, a temperatura é determinada por meio da medida da resistência elétrica dos sensores a quatro fios. Considerando o comportamento dos sensores de temperatura totalmente linear na faixa utilizada, utiliza-se a equação (2) para determinação da temperatura.

$$T = \frac{R - b}{a} \quad (2)$$

É possível determinar a incerteza associada na determinação da temperatura aplicando o método de propagação de erros de Kline e McClintock. Aplicando este método na equação (2), obtém-se a equação (3).

$$\Delta T = \sqrt{\left(\frac{\partial T}{\partial R} \Delta R\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial b} \Delta b\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial a} \Delta a\right)^2} \quad (3)$$

Calculando as derivadas parciais da equação (3) chega-se a equação (4), que fornece a incerteza na determinação da temperatura devido ao seu processo de calibração.

$$\Delta T = \sqrt{\left(\frac{1}{a} \Delta R\right)^2 + \left(-\frac{1}{a} \Delta b\right)^2 + \left(\frac{R - b}{a^2} \Delta a\right)^2} \quad (4)$$

A tabela 3 fornece as incertezas calculadas, para uma medida de resistência de 120,000  $\Omega$ , que corresponde a uma temperatura de aproximadamente 52°C.

Incerteza (sensor #1)	Incerteza (sensor #2)	Incerteza (sensor #3) (encapsulado)
0,14°C	0,15°C	0,15°C

Tabela 3: Incertezas na medida da temperatura associadas ao processo de calibração dos sensores Pt100.

## RESULTADOS OBTIDOS

Os ensaios para determinação do coeficiente  $\beta$  foram realizados em três situações distintas, porém todas com uma condição de céu limpo, e com o módulo protegido da ação do vento. A figura 4 apresenta as curvas de aquecimento medidas pelos três sensores, bem como a variação da irradiância ao longo de um dos ensaios realizados. Pode-se observar que nos primeiros pontos medidos os valores de temperatura medidos pelos três sensores são iguais. Isso ocorre, pois esses pontos foram medidos com o módulo ainda coberto por um material opaco. Esta temperatura é, portanto, igual à temperatura ambiente na ocasião do ensaio.

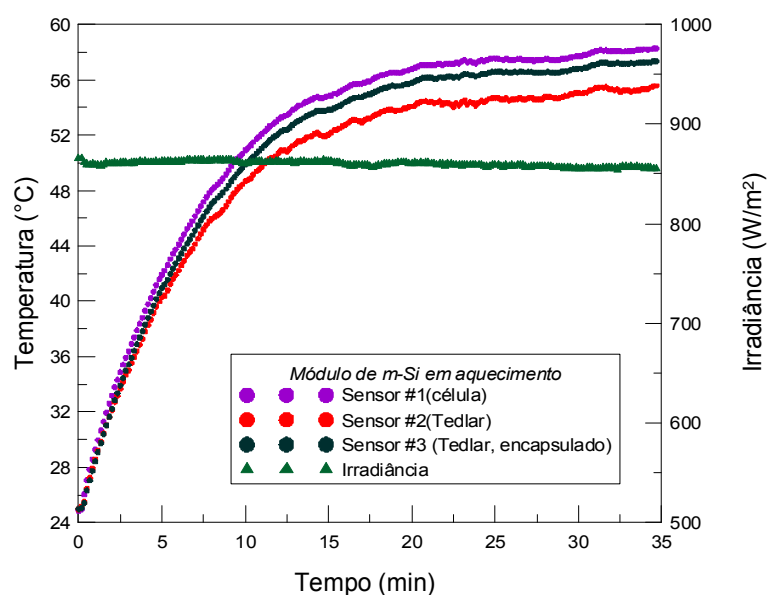


Figura 4: Variação da irradiância ao longo de um ensaio para determinação de  $\beta$  e curvas de aquecimento de um módulo fotovoltaico medidos com três sensores Pt100 acoplados ao módulo da seguinte forma: Sensor sem encapsulamento diretamente em uma das células, sensor sem encapsulamento junto ao Tedlar e sensor com encapsulamento junto ao Tedlar.

Analisando a figura 4, observa-se que a diferença de temperatura medida diretamente na célula e medida junto ao Tedlar, com o sensor sem encapsulamento, se estabelece em aproximadamente 3,0°C quando o módulo se aproxima do regime permanente. Para o sensor encapsulado esta diferença se estabelece em aproximadamente 1,0°C. Isto ocorre, pois a resina epóxi que cobre a parte do sensor que não está em contato com o Tedlar exerce um papel de isolante térmico dificultando as trocas de energia térmica deste sensor com o meio ambiente e, dessa forma, fazendo com que a temperatura do sensor fique mais próxima da temperatura da célula. Por outro lado, o sensor sem encapsulamento que está em contato com o Tedlar, tem trocas de energia térmica maiores com o meio ambiente e, dessa forma, estabelece uma temperatura mais distante da temperatura da célula. Ainda analisando a figura 4, verifica-se que ao longo do processo de aquecimento, a variação da diferença de temperatura medida pelo sensor acoplado diretamente à célula e o sensor acoplado ao Tedlar não é a mesma para o sensor com e sem encapsulamento, como pode ser melhor observado pela figura 5.

Através da figura 5, pode-se observar que para o sensor encapsulado, logo nos primeiros instantes do aquecimento se estabelece uma diferença de temperatura com relação à célula que pouco varia até o módulo entrar em regime estacionário. No caso do sensor não encapsulado, a diferença de temperatura com relação à célula apresenta uma variação gradativa, que aumenta ao longo do aquecimento do módulo até que o mesmo atinja o regime estacionário. Este fenômeno tem influência direta nos resultados que se obtém na determinação de coeficientes térmicos em ensaios de aquecimento contínuo, como foi o caso estudado neste trabalho. O que se observa, é que embora a temperatura medida junto ao Tedlar com o sensor encapsulado não seja a mesma que a medida na célula, a sua variação ao longo do aquecimento do módulo é muito similar a variação da temperatura medida diretamente na célula, o que não ocorre com o sensor sem encapsulamento. Portanto, a utilização do sensor encapsulado fornece coeficientes térmicos com resultados bastante próximos daqueles em que a temperatura é medida diretamente na célula, uma vez que o valor absoluto da temperatura não importa tanto quanto a variação da mesma ao longo do ensaio. A figura 6 apresenta as curvas para determinação de  $\beta$ , para um dos ensaios realizados e a tabela 4 apresenta os valores de  $\beta$ , determinados com a utilização dos sensores Pt100 nas três diferentes situações estudadas.

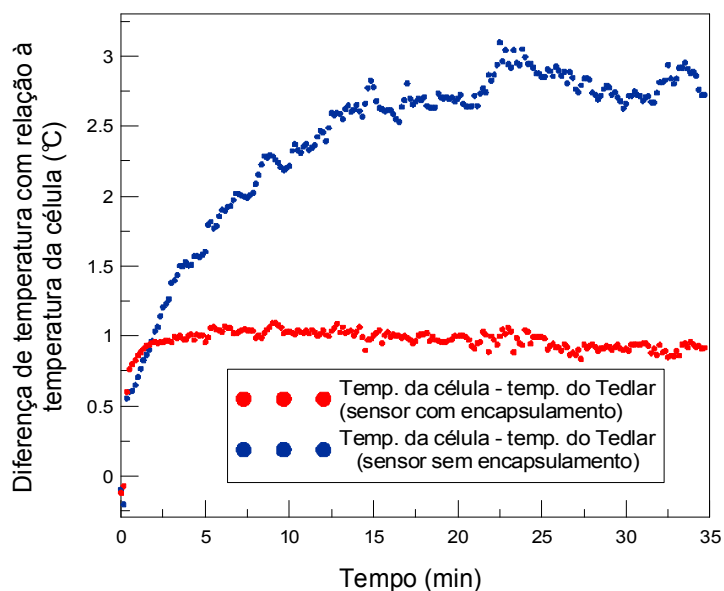


Figura 5: Variação ao longo do aquecimento de um módulo fotovoltaico, da diferença entre a temperatura medida junto ao Tedlar (com o sensor com e sem encapsulamento) e a temperatura medida diretamente na célula.

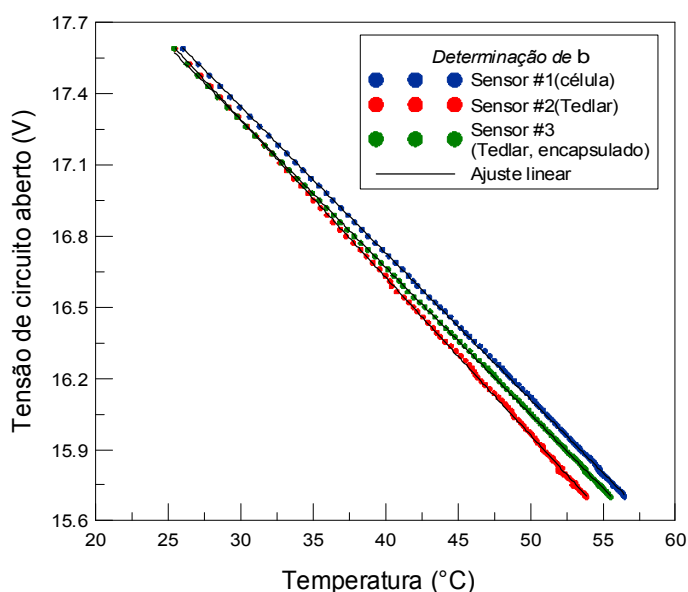


Figura 6: Variação da tensão de circuito aberto em função da temperatura (medida por três sensores Pt100 em condições distintas).

Medida	$\beta$ (#1)(mV°C <sup>-1</sup> ) Medida na célula	$\beta$ (#2) (mV°C <sup>-1</sup> ) Medida no Tedlar	Diferença entre $\beta$ (#1) e $\beta$ (#2) (%)	$\beta$ (#3) (mV°C <sup>-1</sup> ) Medida no Tedlar, encapsulado	Diferença entre $\beta$ (#1) e $\beta$ (#3) (%)
#1	-63,63±0,11	-66,34±0,19	-4,26	-63,25±0,10	-0,60
#2	-64,09±0,10	-68,83±0,14	-7,39	-64,27±0,08	+0,28
#3	-63,05±1,4	-67,24±0,16	-6,64	-63,02±0,12	-0,05
<b>Média</b>	<b>63,59±0,20</b>	<b>67,47±0,28</b>	<b>-6,10</b>	<b>63,51±0,17</b>	<b>-0,12</b>

Tabela 4: Coeficientes de variação de  $V_{OC}$  com a temperatura determinados por três sensores Pt100 acoplados de diferentes formas em um módulo fotovoltaico.

Verifica-se pela análise da tabela 4, que a diferença entre os valores de  $\beta$  determinados com a medida de temperatura diretamente na célula e com o sensor encapsulado (junto ao Tedlar) é sistematicamente menor que a diferença entre os valores de  $\beta$  determinados com o sensor não encapsulado. Em média, a utilização de um sensor com o encapsulamento realizado neste trabalho fornece um resultado com apenas 0,12% de diferença em relação ao valor medido diretamente na célula. No caso do sensor sem encapsulamento, a diferença média de  $\beta$  encontrada com relação ao valor medido diretamente na célula foi de 6,10%. Desta forma, fica claro que a utilização de um sensor com o encapsulamento proposto neste trabalho

para a medida da temperatura em módulos fotovoltaicos, melhora significativamente os resultados quando se compara a utilização de um Pt100 sem qualquer tipo de encapsulamento.

Todas as medidas de temperatura para a realização deste trabalho foram feitas em uma única célula do módulo. É importante ressaltar que caso o módulo em análise não possua uma uniformidade na distribuição de temperatura, os valores de  $\beta$  obtidos podem não ser representativos para o módulo. O módulo analisado neste trabalho, por exemplo, apresenta uma desuniformidade considerável de temperatura entre as suas células. Esta desuniformidade é devida parcialmente a diferenças físicas entre as células e parcialmente devida às caixas de conexão, (este módulo possui duas caixas de conexão). A figura 7 apresenta uma imagem termográfica obtida durante o aquecimento do módulo em um dos ensaios realizados.

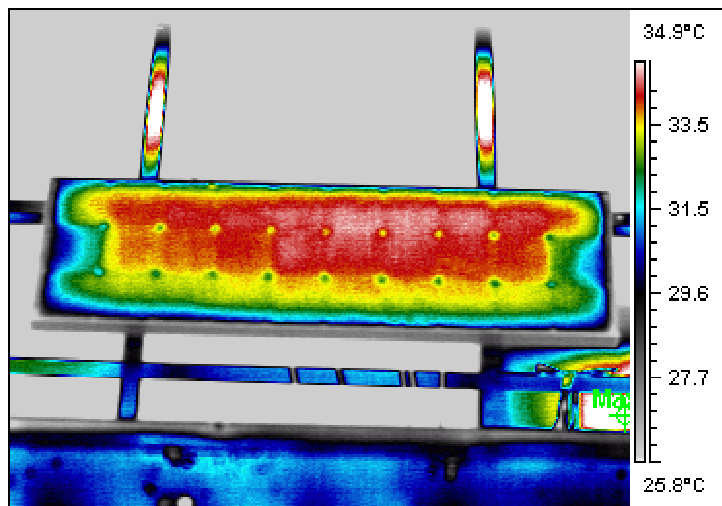


Figura 7: Fotografia termográfica de um módulo fotovoltaico de silício monocristalino de 33 células em série durante um regime de aquecimento por iluminação natural.

A desuniformidade gradual que se verifica ao longo do eixo transversal do módulo é um falso efeito das termografias, provocado pela reflexão da imagem do céu no vidro, conforme plenamente explicado por Krenzinger e Andrade (2007). No entanto as zonas de temperatura mais baixa nos dois extremos do módulo se explicam pela capacidade térmica das caixas de conexão, que no início do aquecimento absorvem energia térmica do módulo. Em casos de módulos com desuniformidade na distribuição de temperatura como o apresentado neste trabalho, o mais indicado para a medida da temperatura é a fixação de sensores em diversas células e considerar a temperatura do módulo como sendo a média das temperaturas medidas por estes sensores. Este procedimento é proposto, por exemplo, por King *et. al.*, (1997). De qualquer forma, mesmo medindo a temperatura em uma única célula do módulo, pode-se verificar qual o erro associado à medida da temperatura junto ao Tedlar utilizando sensores Pt100 com e sem encapsulamento, em ensaios com o módulo em regime transiente. Esta informação pode ser utilizada em ensaios com uma série de sensores acoplados ao módulo.

## CONCLUSÕES

O erro associado à medida da temperatura junto ao Tedlar, para ensaios de módulos fotovoltaicos, em regime transiente, foi estudado. Foi também realizada uma comparação entre duas configurações de sensores Pt100, com e sem encapsulamento. Verificou-se que em regime estacionário, com o módulo exposto à radiação solar, a diferença de temperatura medida diretamente na célula e medida junto ao Tedlar com o sensor sem encapsulamento, estabeleceu-se em valores de até 3,0°C. Para o sensor encapsulado este valor não foi maior do que 1,0°C.

Para ensaios com o módulo em regime transiente, verificou-se que a variação da diferença de temperatura medida pelo sensor acoplado diretamente à célula e o sensor acoplado ao Tedlar não é a mesma que para o sensor com e sem encapsulamento. Isso faz com que a diferença entre os valores de  $\beta$ , com relação à medida feita diretamente na célula, seja de apenas 0,12% para o sensor encapsulado, enquanto que para o sensor sem encapsulamento este valor chegou a 6,10%.

Por fim, além de aumentar significativamente a vida útil do sensor e facilitar a sua fixação no módulo, o sensor encapsulado, da forma como foi apresentado neste trabalho, fornece resultados melhores para os ensaios com o módulo em regime permanente e transiente. No caso de ensaios para determinação de coeficientes térmicos, por exemplo, os resultados obtidos com o sensor encapsulado são melhores tendo em vista que em um curto intervalo de tempo o sensor já estabelece uma diferença de temperatura em relação à temperatura da célula que se mantém praticamente constante ao longo do aquecimento.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). O LABSOL é associado ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Energias Renováveis e Eficiência Energética da Amazônia, mantido pelo CNPq/MCT.

## REFERÊNCIAS

- Gasparin, F., P. e Bühler, A., J., (2010). Influência da temperatura na medida de irradiância solar com células de referência de silício cristalino, III Congresso Brasileiro de Energia Solar - Belém, 21 a 24 de setembro de 2010.
- IEC, (1987). International Electrotechnical Commission – IEC-891. Procedures irradiance correction to measured  $I-V$  characteristics of crystalline silicon devices for temperature and irradiance.
- King D.L., Kratochvil J. A., and Boyson W. E., (1997). Temperature Coefficients for PV Modules and Arrays: Measurement Methods, Difficulties and Results, 26<sup>th</sup> IEEE Photovoltaic Specialists Conference, September 29 – October 3, Anaheim, CA, pp. 1183-1186.
- Krenzinger, A. ; Andrade, A. C.,(2007) . Accurate outdoor glass thermographic thermometry applied to solar energy devices. Solar Energy, v. 81, p. 1025-1034, 2007.
- Mattei, M., Notton, G., Cristofari, C., Muselli, M. e Poggi, P., (2006). Calculation of the polycrystalline PV module temperature using a simple method of energy balance. Renewable Energy, 31, 553-567.
- Phang, J. C. H., Chan, D. S. H., Phillips, J.R. (1984). Accurate analytical method for the extraction of solar cell model parameters, Electronic Letters, vol. 20, n. 10, pp 406-408.
- Shockley, W., (1949). Bell Systems Tech, J. 28, 435.

## ABSTRACT

Temperature measurements of photovoltaic modules are fundamental in  $I-V$  curves determination in specific condition as well as in temperature coefficients measurements. The methodology and the equipment used on the temperature measurement may have an important influence on the results once it is not possible to measure the temperature directly on the cells without a destructive procedure. This work presents a comparison of the results for the temperature measurement in the back surface, on the Tedlar and the results of the temperature measurement directly on a cell. This measurement is done by means of a sensor in direct contact with the cell, inserted through a small hole made on the encapsulation material. A study about different configuration of the sensors and error analysis is also done and the results are presented in this work.

**Keywords:** Photovoltaic module,  $I-V$  characteristic curve, temperature measurements, temperature coefficients, photovoltaic modules characterization.