

# COMPARAÇÃO ENTRE COEFICIENTES TÉRMICOS DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS DETERMINADOS COM SIMULADOR SOLAR E SOB ILUMINAÇÃO NATURAL

Fabiano Perin Gasparin – gasparin.fabiano@gmail.com

Arno Krenzinger – arno.krenzinger@ufrgs.br

Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS

**Resumo.** O efeito da temperatura dos módulos fotovoltaicos é um fator crucial na análise de desempenho de sistemas fotovoltaicos. Os coeficientes térmicos caracterizam o efeito da temperatura nos diversos parâmetros fotovoltaicos. Para a correção das curvas I-V de módulos fotovoltaicos para diversas condições de operação é necessário a determinação da variação da corrente de curto-circuito com a temperatura ( $\alpha$ ) e a variação da tensão de circuito aberto com a temperatura ( $\beta$ ). A variação da potência máxima com a temperatura ( $\gamma$ ) também é relevante pois qualifica diretamente a variação da eficiência do módulo com a temperatura. A determinação dos coeficientes térmicos de módulos fotovoltaicos envolve um ensaio que pode ser realizado sob iluminação natural (outdoor), onde a própria radiação solar promove o aquecimento do módulo enquanto as curvas I-V são traçadas em diferentes temperaturas. A partir das curvas I-V são extraídos os parâmetros em cada temperatura e os coeficientes térmicos são calculados. A outra maneira é realizar o ensaio com simulador solar (indoor), onde o módulo é acondicionado em uma câmara termostática para estabelecer diversas temperaturas e as curvas I-V são medidas utilizando o flash do simulador solar. Neste trabalho foram comparados os coeficientes térmicos determinados sob iluminação natural com valores previamente medidos com simulador solar para um grupo de módulos fotovoltaicos. O objetivo da comparação foi a validação da metodologia utilizando iluminação natural de determinação de coeficientes térmicos do laboratório ESTI (European Solar Test Installation) – Ispra, Itália. A incerteza combinada da medida sob iluminação natural do coeficiente  $\beta$  e  $\gamma$  é praticamente três vezes superior à incerteza do ensaio com simulador solar devido à maior incerteza da temperatura enquanto a incerteza na determinação de  $\alpha$  é praticamente a mesma. Os resultados das medidas são completamente equivalentes em ambos os casos, tendo sobreposição completa dos intervalos de incertezas das medidas sob iluminação natural e com simulador solar.

**Palavras-chave:** Energia solar, módulo fotovoltaico, coeficientes térmicos.

## 1. INTRODUÇÃO

A energia solar fotovoltaica ganha destaque a cada ano pela capacidade instalada mundialmente e pela sua crescente importância na matriz elétrica. Esta forma de energia já possuía no final de 2012 mais de 102 GW de potência instalada em sistemas conectados à rede elétrica no mundo. Se tomarmos como parâmetro a potência instalada da usina hidrelétrica de Itaipu, com 14 GW, tem-se uma ideia da dimensão que estas instalações estão tomando na matriz elétrica. Pelo segundo ano seguido, a energia solar fotovoltaica foi a forma de geração de eletricidade mais instalada na Europa em termos de novos empreendimentos. A energia solar fotovoltaica cobre atualmente na Europa 2,6% da demanda de eletricidade anual. No ano de 2012, na Itália, mais de 6,7% da eletricidade anual foi gerada por instalações fotovoltaicas e na Alemanha este valor alcançou 5,6%. (EPIA, 2013)

O Brasil está dando os primeiros passos para a inserção definitiva da energia solar fotovoltaica na matriz elétrica nacional. A partir da resolução nº 482 da ANEEL (ANEEL, 2012) um importante marco foi estabelecido para a energia solar fotovoltaica. Esta resolução estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração (até 100 kW) e minigeração (de 100kW a 1MW) conectada aos sistemas de distribuição de energia elétrica e estabelece o sistema de compensação de energia elétrica.

Os sistemas fotovoltaicos compreendem uma forma intermitente de geração de eletricidade e em sua análise é fundamental levar em consideração os diversos fatores que influenciam seu desempenho. Dentre estes diversos fatores podem-se citar a disponibilidade de radiação solar e sua distribuição espectral, a tecnologia de fabricação dos módulos fotovoltaicos utilizados, a orientação e a localização geográfica do sistema além da influência da temperatura de operação dos módulos, que é crucial na análise do desempenho dos sistemas fotovoltaicos. As características nominais dos módulos fotovoltaicos são determinadas nas condições padrão de teste, ou seja, com irradiância de 1000 W/m<sup>2</sup>, temperatura da célula de 25 °C e distribuição espectral da radiação AM 1,5, cuja forma padronizada encontra-se na norma IEC 904-3 (2008). As condições reais de operação são substancialmente diferentes das condições de teste padronizadas. Um parâmetro que dá um indício da temperatura de funcionamento dos módulos é a temperatura nominal de operação, que é definida como a temperatura que as células atingem em circuito aberto quando o módulo é exposto a

irradiância de  $800 \text{ W/m}^2$ , temperatura do ar de  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ , velocidade do vento de  $1 \text{ m/s}$  e com o módulo montado com a face posterior aberta.

Para avaliar a influência da temperatura no desempenho do módulo fotovoltaico são definidos os coeficientes térmicos (CT). Uma maneira apropriada para definir um coeficiente térmico é apresentada por Emery et al (1996), definindo o coeficiente térmico normalizado para uma variável genérica Z em função da temperatura T por meio da Eq. (1).

$$CT(1/^\circ\text{C}) = \frac{1}{Z} \left. \frac{\partial Z}{\partial T} \right|_{T_n} \quad (1)$$

Onde a temperatura de normalização ( $T_n$ ) deve ser preferencialmente  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ , que corresponde à temperatura padrão de testes de dispositivos fotovoltaicos.

Uma vez que um coeficiente térmico para um parâmetro Z é determinado e normalizado para a temperatura  $T_n$ , o parâmetro em questão  $Z_1$  pode ser trasladado de uma dada temperatura  $T_1$  para o valor  $Z_2$  em outra temperatura  $T_2$  utilizando a Eq. (2).

$$Z_2 = Z_1 + \frac{CT \cdot Z_1 \cdot (T_2 - T_1)}{1 - CT \cdot (T_n - T_1)} \quad (2)$$

Utilizando a notação usual, o coeficiente de variação da corrente de curto-circuito ( $I_{sc}$ ) com a temperatura (T) é denominado  $\alpha$ , e é calculado com a Eq. (3). Para o silício cristalino o valor típico está entre  $0,04$  e  $0,1 \text{ } \% I_{sc} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$  temperatura, sendo comumente encontrado na literatura o valor de  $0,06 \text{ } \% \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ .

$$\alpha = \frac{1}{I_{sc}} \left. \frac{\partial I_{sc}}{\partial T} \right|_{T_n} \quad (3)$$

A tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ) tem uma redução da ordem de  $2,2 \text{ mV }^\circ\text{C}^{-1}$  para uma célula de silício cristalino na faixa de  $20$  a  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ . A redução de  $V_{oc}$  com o aumento da temperatura altera a curva característica I-V do módulo fotovoltaico, ocorrendo também a redução de potência do módulo fotovoltaico com o aumento da temperatura. O coeficiente de variação da tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ) com a temperatura é denominado  $\beta$  e é calculado por meio da Eq. (4).

$$\beta = \frac{1}{V_{oc}} \left. \frac{\partial V_{oc}}{\partial T} \right|_{T_n} \quad (4)$$

Os coeficientes  $\alpha$  e  $\beta$ , são necessários para translação dos pontos de uma curva para diferentes condições de temperatura, conforme descrito na norma IEC 60891 (2009) onde também é descrito o procedimento para a determinação experimental destes coeficientes. Outro coeficiente térmico de interesse é a variação da máxima potência ( $P_m$ ) com a temperatura, sendo definido pela Eq. (5).

$$\gamma = \frac{1}{P_m} \left. \frac{\partial P_m}{\partial T} \right|_{T_n} \quad (5)$$

Virtuani et al (2010) apresentam uma série de medidas de coeficientes térmicos determinados *indoor* comparando com os dados fornecidos pelos fabricantes de diversos módulos de filmes finos. Os módulos de filmes finos em geral tem coeficiente  $\gamma$  menor do que os módulos de silício cristalino.

Os coeficientes térmicos podem ser determinados com simulador solar (*indoor*) ou sob iluminação natural (*outdoor*). No método *indoor* o módulo é acondicionado em uma câmara termostática e sua temperatura é controlada até que esteja estável dentro de uma faixa de temperatura aceitável. Após a estabilização da temperatura, a câmara termostática é momentaneamente aberta para a medida da curva I-V. São medidas curvas I-V para diversos valores de temperaturas. Neste método de determinação de coeficientes térmicos a temperatura do módulo é uniforme em toda a sua extensão, sendo que a temperatura da célula é a mesma medida pelo sensor fixado na parte posterior do módulo. A uniformidade de temperatura em toda a extensão do módulo garante uma menor incerteza na medida dos coeficientes térmicos. Este método é relativamente demorado, pois o módulo deve estar estabilizado em cada temperatura, e em geral são requeridos pelo menos quatro valores de temperatura variando entre  $25$  e  $60 \text{ }^\circ\text{C}$ . Este método independe das condições climáticas e o controle das variáveis é facilitado por tratar-se de ambiente controlado.

Nos ensaios *outdoor* o módulo é resfriado até valores de temperatura da ordem de  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  com água corrente ou por meio de convecção com o ar em um ambiente climatizado. O módulo é então exposto à radiação solar e várias curvas IV são traçadas durante o aquecimento do módulo. Neste caso, fatalmente o módulo não terá temperatura uniforme, como ressaltado no trabalho de King et al (1997). Além da não uniformidade de temperatura há uma diferença de temperatura entre a célula fotovoltaica e a temperatura medida pelo sensor fixado na parte posterior do

módulo. Esta diferença é da ordem de 2°C para um módulo de silício cristalino sob irradiância de aproximadamente 1000 W/m<sup>2</sup>, conforme relatado por Bühler et al (2010).

O objetivo deste trabalho é apresentar uma comparação de coeficientes térmicos medidos com a utilização de simulador solar (*indoor*) e sob iluminação natural (*outdoor*). Estes experimentos foram realizados para a validação do procedimento *outdoor* do laboratório ESTI (European Test Solar Installation) em Ispra – Itália, para a medida dos coeficientes térmicos. No laboratório ESTI somente o procedimento *indoor* estava validado até então. Não havia uma comparação entre os dois procedimentos com o objetivo de avaliar as diferenças nos resultados e as fontes de incerteza nos dois procedimentos.

## 2. METODOLOGIA

Os módulos fotovoltaicos elencados na Tab. (1) foram selecionados para fazer a comparação dos coeficientes térmicos determinados *indoor* e *outdoor*. No procedimento *outdoor* os módulos foram caracterizados utilizando o sistema de medidas do laboratório ESTI em dias de céu limpo e com irradiância solar superior a 900 W/m<sup>2</sup>. Para cada um dos módulos, ao menos dois conjuntos de curvas I-V foram traçadas com temperaturas entre 25 °C e 55°C a fim de determinar os coeficientes térmicos  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$ .

Código ESTI	Tipo de célula	Área da célula (mm <sup>2</sup> )	Área do módulo (m <sup>2</sup> )	Células em série	P <sub>m</sub> [W]	I <sub>sc</sub> [A]	V <sub>oc</sub> [V]
TD81	Silício multi-cristalino	15617	1,3122	72	160	4,85	33
EY07	Silício multi-cristalino	22799	1,6115	60	210	8,7	35,2
EY08	Silício mono-cristalino	15481	1,2743	72	150	4,8	42,7
CQ02	Silício amorfo	7833	0,8455	100	58	1,12	85
HJ405	Módulo Tandem a- $\mu$ c Si	10315	1,054	94	80	2,08	63,3
LK711	Tripla Junção a-Si	80106	0,99666	10	62	5,1	21

Os mesmos módulos tinham sido medidos previamente no Laboratório ESTI com o simulador solar PASAN, resultando em uma matriz de curvas I-V medidas em diversas temperaturas e irradiâncias. Nas medidas *indoor*, cada curva I-V é medida com o módulo em equilíbrio térmico com o ambiente e temperatura uniforme já que não está exposto à radiação solar. Os coeficientes térmicos foram calculados a partir das curvas I-V medidas próximas a 1000 W/m<sup>2</sup> de irradiância e temperaturas de 25, 35, 45 e 60 °C, permitindo desta maneira um conjunto de dados para validação do procedimento *outdoor*. A partir das curvas I-V são retirados os parâmetros fotovoltaicos para a determinação dos coeficientes térmicos.

Para realizar as medidas *outdoor*, primeiramente os módulos foram resfriados utilizando água corrente até que a temperatura atingisse valores próximos ou inferiores a 25 °C. Então o módulo era montado no suporte e exposto à radiação solar. As curvas I-V foram traçadas em intervalos aproximados de 5°C, a partir da temperatura inicial até a máxima temperatura que o módulo atingisse, normalmente na faixa de 55 a 60 °C, comum para a época em que os experimentos foram realizados. A temperatura é medida com um sensor Pt100 fixado em uma célula central na parte posterior do módulo. As curvas I-V foram corrigidas para a condição de 1000 W/m<sup>2</sup>, utilizando os procedimentos da norma IEC 891 cujas equações estão no programa de correção da curva I-V utilizado no laboratório ESTI.

O cálculo de incertezas na determinação dos coeficientes térmicos no ESTI utilizando o simulador solar Pasan II LAPSS LS-4, dá os seguintes resultados, onde U é a incerteza combinada de todas as variáveis envolvidas na medida do parâmetro.

$$\text{Indoor } U(\alpha) = \pm 0,016 [\% / ^\circ\text{C}]$$

$$\text{Indoor } U(\beta) = \pm 0,024 [\% / ^\circ\text{C}]$$

$$\text{Indoor } U(\gamma) = \pm 0,029 [\% / ^\circ\text{C}]$$

Para as medidas *outdoor*, as incertezas foram recalculadas levando-se em conta as modificações e particularidades dos ensaios, resultando nos seguintes valores:

$$\text{Outdoor } U(\alpha) = \pm 0,013 [\% / ^\circ\text{C}]$$

$$\text{Outdoor } U(\beta) = \pm 0,076 [\% / ^\circ\text{C}]$$

$$\text{Outdoor } U(\gamma) = \pm 0,077 [\% / ^\circ\text{C}]$$

#### 4. RESULTADOS

Para ilustrar os resultados das medidas dos coeficientes térmicos em ambos os casos, as Fig. 1, 2 e 3 apresentam a variação da corrente de curto-circuito ( $I_{sc}$ ) com a temperatura nas medidas *indoor* e *outdoor* do módulo TD81 e do módulo HJ405. Em ambos os casos foi possível obter uma alta correlação linear dos pontos medidos.

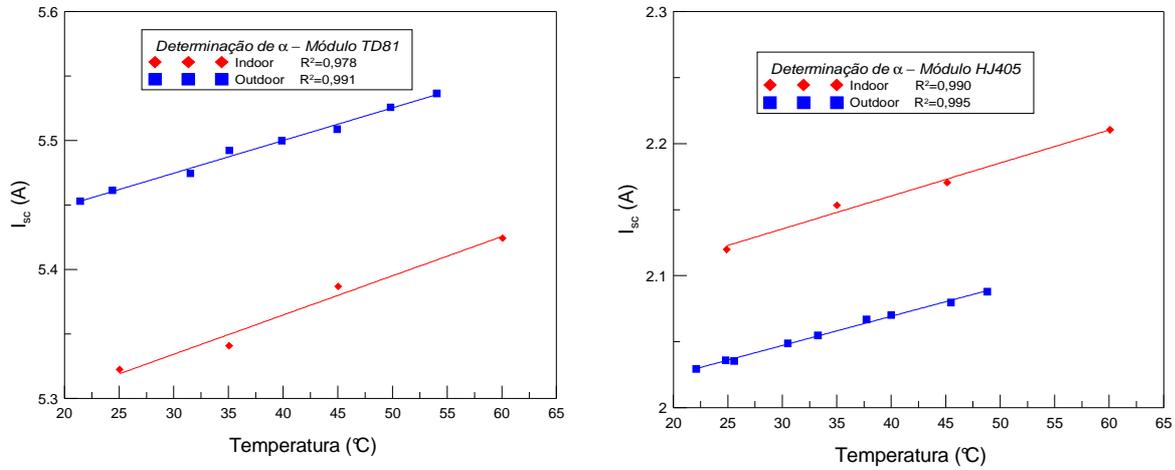


Figura 1 – Variação de  $I_{sc}$  com a temperatura do módulo TD81 e do módulo HJ405.

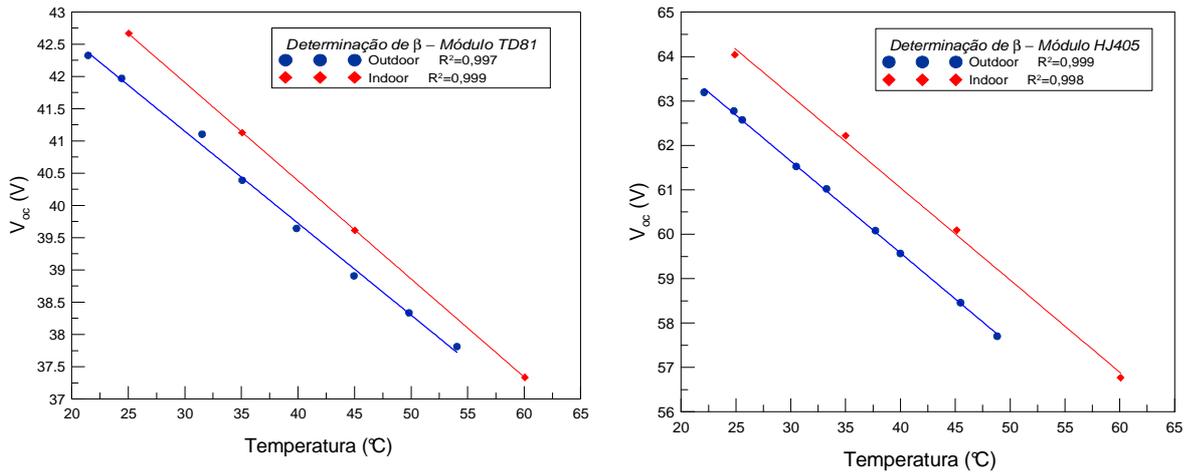


Figura 2 – Variação de  $V_{oc}$  com a temperatura do módulo TD81 e do módulo HJ405.

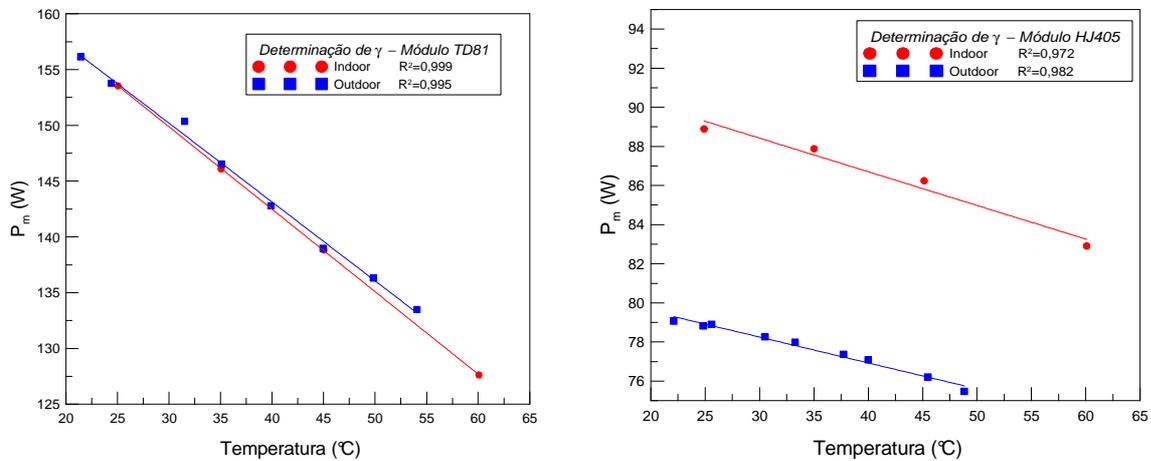


Figura 3 – Variação de  $P_m$  com a temperatura do módulo TD81 e do módulo HJ405.

Diferenças eventuais nos valores absolutos dos coeficientes térmicos são possíveis entre as medidas *indoor* e *outdoor*, sendo que as curvas I-V foram corrigidas para 1000 W/m<sup>2</sup> em ambos os casos e o descasamento espectral não foi considerado.

Para realizar comparações entre os valores e a análise de incertezas, os coeficientes térmicos foram convertidos em coeficientes de temperatura relativos, normalizando a declividade da reta de regressão pelo valor do parâmetro calculado a 25 °C a partir da própria reta de regressão.

Para o módulo TD81 foram realizadas três medidas para determinação dos coeficientes térmicos *outdoor*. O resultado de cada medida *outdoor* do coeficiente térmico, a sua média e os resultados *indoor* são listados na Tab. 2. O valor do coeficiente determinado *indoor* é tomado como referência, uma vez que o objetivo dos ensaios era a validação do procedimento *outdoor* para determinação dos coeficientes térmicos.

TD81	$\alpha$ [%/°C]	$\beta$ [%/°C]	$\gamma$ [%/°C]
Indoor	0,057 ±0,016	-0,357 ±0,024	-0,481 ±0,029
Média Outdoor	0,036 ±0,013	-0,351 ±0,076	-0,480 ±0,077
Medida 1 Outdoor	0,036 ±0,013	-0,391 ±0,076	-0,527 ±0,077
Medida 2 Outdoor	0,025 ±0,013	-0,323 ±0,076	-0,454 ±0,077
Medida 3 Outdoor	0,046 ±0,013	-0,340 ±0,076	-0,460 ±0,077

Na determinação do coeficiente  $\alpha$  do módulo TD81, como ilustrado na Fig. 4, há uma intersecção dos intervalos de incerteza da medida *indoor* com a média das medidas *outdoor* e com as medidas 1 e 3. Na medida 2 os intervalos de incerteza não se sobrepõem. A reta de regressão da medida 2 de  $\alpha$  teve maior dispersão em relação às outras, indicando que além da incerteza calculada houve uma interferência externa, pois no momento em que este ensaio foi realizado as condições do céu não eram ideais, ou seja, o céu não estava completamente limpo. Como o módulo demora até 20 min para entrar em equilíbrio térmico, a presença de nuvens pode ter alterado o regime de aquecimento, influenciando na determinação do coeficiente  $\alpha$ .

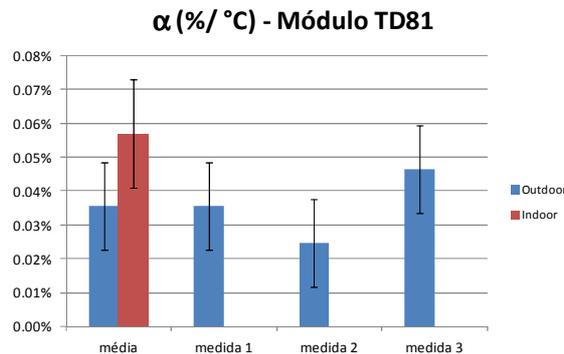


Figura 4 – Coeficientes  $\alpha$  do módulo TD81 determinados *indoor* e *outdoor*.

Na determinação do coeficiente  $\beta$ , há uma total concordância entre a média das três medidas *outdoor* e a medida *indoor* como apresentado na Fig. 5. Tomando como referência a medida *indoor* verifica-se que o máximo desvio das medidas individuais *outdoor* é de ± 0,034% da medida *indoor*, ou seja, praticamente metade do valor da incerteza da medida *outdoor*, mostrando uma grande sobreposição dos intervalos de incertezas.

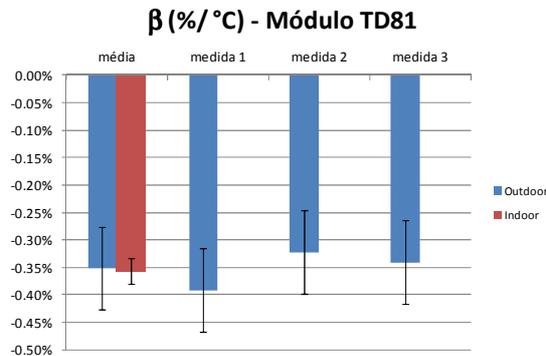


Figura 5 – Coeficientes  $\beta$  do módulo TD81 determinados *indoor* e *outdoor*.

A determinação do coeficiente  $\gamma$ , segue a mesma tendência da medida de  $\beta$ , sendo que o máximo desvio entre as medidas outdoor e indoor é de 0,033%, ocorrido na medida 1, totalmente compreendido dentro do intervalo de incerteza da medida outdoor que é 0,077%, como apresentado na Fig. 6.

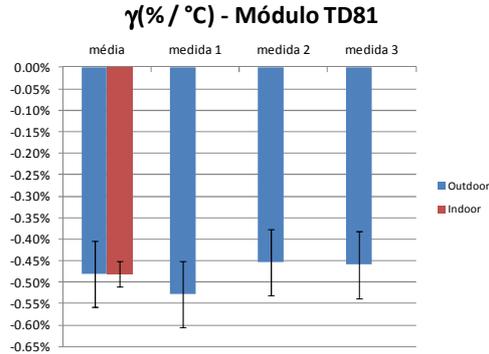


Figura 6 – Coeficientes  $\gamma$  do módulo TD81 determinados indoor e outdoor.

Para o módulo EY07, três conjuntos de medidas foram realizados e os resultados estão nas Tab. 3.

EY07	$\alpha$ [%/°C]	$\beta$ [%/°C]	$\gamma$ [%/°C]
Indoor	0,041 ± 0,016	-0,339 ± 0,024	-0,493 ± 0,029
Média Outdoor	0,046 ± 0,013	-0,352 ± 0,076	-0,502 ± 0,077
Medida 1 Outdoor	0,041 ± 0,013	-0,349 ± 0,076	-0,505 ± 0,077
Medida 2 Outdoor	0,050 ± 0,013	-0,334 ± 0,076	-0,465 ± 0,077
Medida 3 Outdoor	0,046 ± 0,013	-0,372 ± 0,076	-0,536 ± 0,077

Os resultados da determinação do coeficiente  $\alpha$  do módulo EY07 estão apresentados na Fig. 7. A média e todas as medidas outdoor estão compreendidas no intervalo de incerteza da medida indoor. Estes ensaios foram realizados no mesmo dia e em condições de céu completamente limpo, mostrando a equivalência entre as medidas na determinação do coeficiente  $\alpha$ .

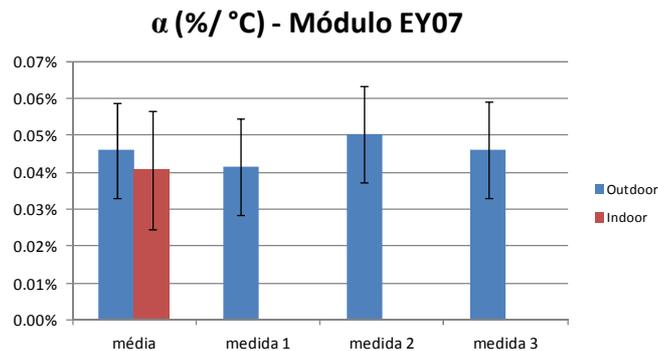


Figura 7 – Coeficientes  $\alpha$  do módulo EY07 determinados indoor e outdoor.

A determinação do coeficiente  $\beta$  do módulo EY07 foi muito precisa comparando com o valor determinado indoor, mais uma vez associado às excelentes condições meteorológicas em que o ensaio foi realizado como apresentado na Fig. 8. O desvio máximo encontrado entre as medidas outdoor e a medida indoor foi de 0,033% na medida 3, consideravelmente abaixo da incerteza calculada de 0,076% da medida outdoor.

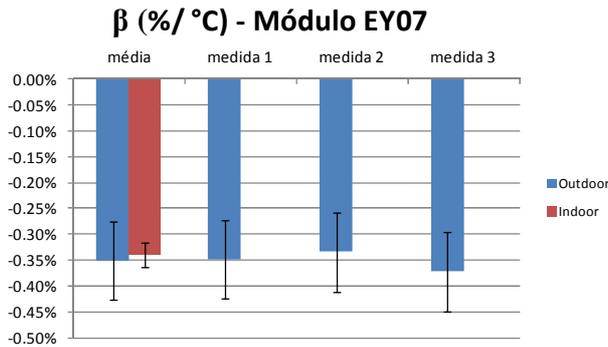


Figura 8 – Coeficientes  $\beta$  do módulo EY07 determinados *indoor* e *outdoor*.

A determinação de  $\gamma$  segue as mesmas características da determinação de  $\beta$ , e os resultados estão apresentados na Fig. 9. A redução da potência do módulo é majoritariamente decorrente da redução da tensão com a temperatura. Novamente o maior desvio encontrado foi de 0,043% entre a medida *indoor* e a medida 3 *outdoor*, menor do que a incerteza da medida *outdoor* que é 0,077%.

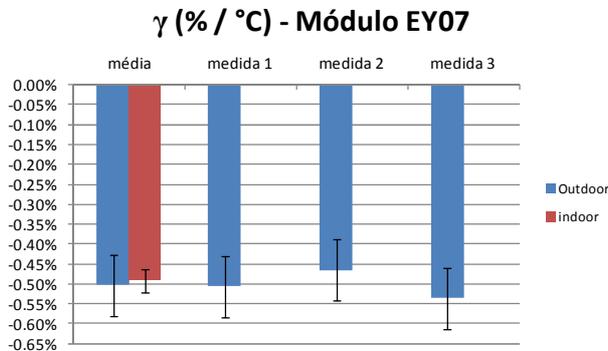


Figura 9 – Coeficientes  $\gamma$  do módulo TD81 determinados *indoor* e *outdoor*.

Para o módulo EY08 somente dois conjuntos de medidas *outdoor* foram realizadas e os resultados estão na Tab. 4.

EY08	$\alpha$ [%/°C]	$\beta$ [%/°C]	$\gamma$ [%/°C]
Indoor	0,024 ± 0,016	-0,351 ± 0,024	-0,463 ± 0,029
Média Outdoor	0,019 ± 0,013	-0,352 ± 0,076	-0,475 ± 0,077
Medida 1 Outdoor	0,028 ± 0,013	-0,367 ± 0,076	-0,489 ± 0,077
Medida 2 Outdoor	0,011 ± 0,013	-0,338 ± 0,076	-0,462 ± 0,077

As medidas *outdoor* de determinação do coeficiente  $\alpha$  do módulo EY08 estão compreendidas no intervalo de incerteza da medida *indoor*, como pode ser visto na Fig. 10. Como o coeficiente  $\alpha$  é de apenas 0,02% °C<sup>-1</sup>, a barra de incerteza é maior do que a própria medida 2. A medida 2 também foi afetada por condições de medida não ideais, ou seja, havia algumas nuvens no céu, que interferiram na medida.

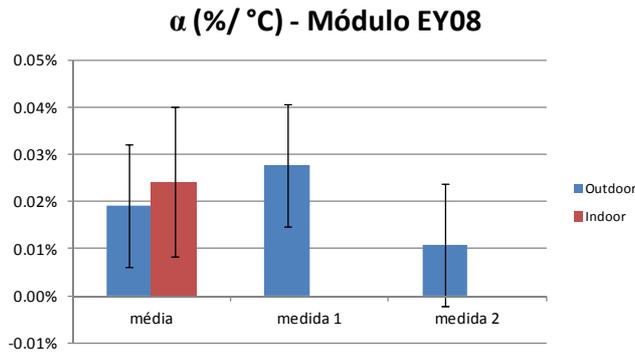


Figura 10 – Coeficientes  $\alpha$  do módulo EY08 determinados *indoor* e *outdoor*.

As medidas *outdoor* do coeficiente  $\beta$  do módulo EY08 estão no intervalo de incerteza da medida *indoor*, indicando a total coincidência de resultados, ocorrendo o mesmo para as medidas do coeficiente  $\gamma$ , como ilustrado na Fig. 11 e na Fig. 12.

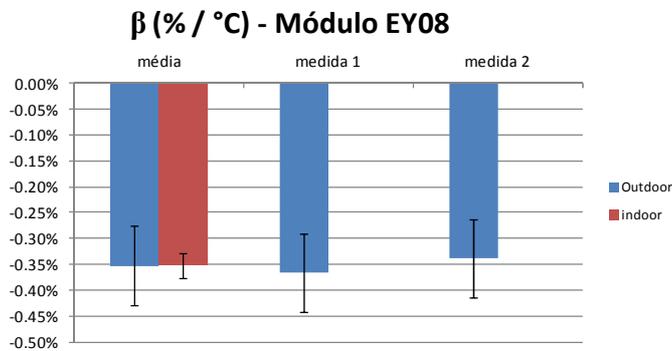


Figura 11 – Coeficientes  $\beta$  do módulo EY08 determinados *indoor* e *outdoor*.

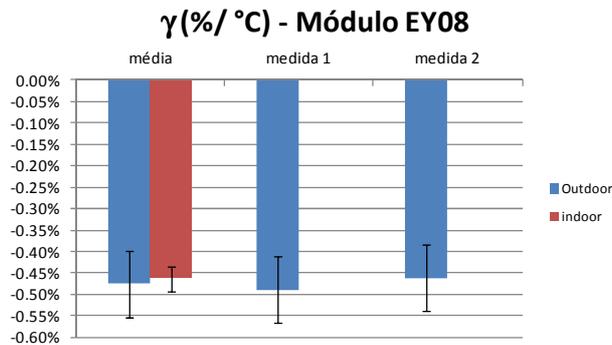


Figura 12 – Coeficientes  $\gamma$  do módulo EY08 determinados *indoor* e *outdoor*.

Além dos módulos de tecnologia de silício monocristalino e multicristalino, foram investigados três modelos de módulos de filmes finos, o módulo CQ02 de silício amorfo de junção simples, HJ405 de silício amorfo de dupla junção ou *tandem* e LK711 de silício amorfo de tripla junção. Para estes módulos, os coeficientes térmicos foram determinados *outdoor* apenas uma vez e os resultados estão expressos na Tab. 5

Para todos os módulos presentes na Tab. 5, houve uma sobreposição dos valores de  $\alpha$  dentro dos intervalos de incerteza. Este resultado pode parecer surpreendente, pois para dispositivos de multi-junção como o módulo HJ405 e LK711 a curva I-V resultante depende consideravelmente da irradiância espectral e não apenas da total. Todas as curvas foram corrigidas para a irradiância de  $1000 \text{ W/m}^2$  porém a correção espectral não foi realizada. A irradiância espectral *indoor* e *outdoor* é consideravelmente diferente, entretanto mostrou-se irrelevante para a determinação dos coeficientes térmicos relativos.

Da Tab. 5 é possível verificar que para o módulo CQ02 as medidas do coeficiente  $\beta$  e  $\gamma$  *outdoor* estão compreendidas no intervalo de incerteza da medida *indoor*, indicando que o resultado do cálculo da incerteza da medida *outdoor* está ligeiramente elevado.

Para o coeficiente  $\beta$  e  $\gamma$  *outdoor* do módulo HJ405 novamente as medidas *outdoor* estão dentro do intervalo de incerteza da medida *indoor*, tornando os resultados totalmente equivalentes.

Analisando o módulo de tripla junção LK711, os intervalos de incerteza se sobrepõem em todos os coeficientes térmicos medidos, tendo as medidas apresentado a maior diferença.

É interessante analisar que os coeficientes térmicos dos módulos de silício amorfo diferem dos coeficientes térmicos dos módulos de silício cristalino. Os valores de  $\alpha$  dos módulos de silício amorfo são da ordem de  $0,1\% \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  comparado a  $0,05\% \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  para a tecnologia de silício cristalino. O coeficiente  $\beta$  dos módulos de silício amorfo são ligeiramente inferiores quando comparados aos dos módulos de silício cristalino, porém ambos são da mesma ordem de grandeza, entre  $-0,3$  a  $-0,35\% \text{ Voc } ^\circ\text{C}^{-1}$ . Já o coeficiente de variação da máxima potência com a temperatura ( $\gamma$ ) dos módulos de silício amorfo é da ordem de  $-0,1$  a  $-0,2\% \text{ P}_m \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ , e é consideravelmente inferior aos módulos de silício cristalino (da ordem de  $-0,45$  a  $-0,5\% \text{ P}_m \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ). Este fato é devido que o fator de forma aumenta com a temperatura nos módulos de silício amorfo e a redução de  $V_{oc}$  com a temperatura é da mesma ordem de grandeza dos módulos de silício cristalino.

Tabela 5 – Coeficientes térmicos dos módulos de filmes finos

CQ02	$\alpha$ [%/°C]	$\beta$ [%/°C]	$\gamma$ [%/°C]
Indoor	$0,101 \pm 0,016$	$-0,321 \pm 0,024$	$-0,089 \pm 0,029$
Outdoor	$0,106 \pm 0,013$	$-0,302 \pm 0,076$	$-0,067 \pm 0,077$

HJ405	$\alpha$ [%/°C]	$\beta$ [%/°C]	$\gamma$ [%/°C]
Indoor	$0,118 \pm 0,016$	$-0,324 \pm 0,024$	$-0,193 \pm 0,029$
Outdoor	$0,109 \pm 0,013$	$-0,330 \pm 0,076$	$-0,168 \pm 0,077$

LK711	$\alpha$ [%/°C]	$\beta$ [%/°C]	$\gamma$ [%/°C]
Indoor	$0,078 \pm 0,016$	$-0,350 \pm 0,024$	$-0,162 \pm 0,029$
Outdoor	$0,104 \pm 0,013$	$-0,382 \pm 0,076$	$-0,229 \pm 0,077$

## 5. CONCLUSÕES

Os coeficientes térmicos relativos dos módulos fotovoltaicos ensaiados são equivalentes nas medidas realizadas com simulador solar (*indoor*) e sob iluminação natural (*outdoor*). Um fato interessante é que o valor do coeficiente relativo não é influenciado pela irradiância espectral utilizada para a medida, sendo os resultados consistentes com as medidas realizadas em diferentes condições de irradiância espectral do sol e também quando comparados com a distribuição espectral do simulador solar. Este fato também é válido para módulos de silício amorfo de multi-junção, onde o efeito espectral é mais acentuado.

A incerteza na medida do coeficiente  $\alpha$  é similar *indoor e outdoor*, ao passo que para os coeficientes  $\beta$  e  $\gamma$  a incerteza *outdoor* é aproximadamente três vezes maior que aquela *indoor*, principalmente devido à consideração da não uniformidade de temperatura no módulo de  $\pm 3 \text{ } ^\circ\text{C}$  em condições *outdoor*. A determinação da incerteza da medida dos coeficientes térmicos *outdoor* poderia ser revista, pois os resultados indicam que a variação em relação às medidas *indoor*, é menor do que a incerteza calculada. A principal contribuição para o cálculo da incerteza na determinação dos coeficientes térmicos *outdoor* é a não uniformidade de temperatura considerada em  $3^\circ\text{C}$ .

Os intervalos de incerteza das medidas *indoor e outdoor* se interceptam na totalidade das medidas realizadas para este trabalho, com exceção de medidas em que houve alguma interferência originada de condições externas não ideais.

### Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e ao Instituto de Energias Renováveis e Eficiência Energética da Amazônia vinculado ao projeto INCT/MCT/CNPq pelo apoio financeiro na realização deste trabalho.

## REFERÊNCIAS

- ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica, 2012. Resolução **Normativa nº482**.
- Buhler, A. J. ; Gasparin, F. P. ; Krenzinger, A., 2010. **Análise da Medida da Temperatura de Módulos Fotovoltaicos em Ensaios de Caracterização Elétrica**. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, v. 14, p. 04.09-04.16.
- EPIA (European Photovoltaic Industry Association), 2013. **Global Market Outlook for Photovoltaic 2013-2017**

- Emery, K., Burdick, J., Caiyem, Y., Dunlavy, D., Field, H., Kroposki B., Moriarty, T., Ottoson, L., Rummel S., Strand T. e Wanlass M.W., 1996. **Temperature dependence of photovoltaic cells, modules and systems.** 25<sup>th</sup> PVSC; May 13-17, Washington, D.C.
- IEC 60891 (International Electrotechnical Commission), 2009. **Procedures for temperature and irradiance correction to measure I-V characteristics.**
- IEC 60904-3 (International Electrotechnical Commission), 2008. **Photovoltaic Devices – Part 3: Measurement principles for terrestrial photovoltaic (PV) solar devices with reference spectral irradiance data.**
- King David L., Kratochvil Jay A. e Boyson William E., 1997. **Temperature coefficients for PV Modules and Arrays: Measurements, Difficulties and Results.** 26<sup>th</sup> IEEE Photovoltaic Specialists Conference, September 29- October 03. Anaheim, California.
- Virtuani A., Pavanello D., and Friesen G., 2010. **Overview of temperature coefficients of different thin film photovoltaic technologies.** 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 5th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 6-10 September 2010, Valencia, Spain

### **COMPARISON OF INDOOR AND OUTDOOR MEASURED THERMAL COEFFICIENTS OF PHOTOVOLTAIC MODULES**

**Abstract.** *The effect of temperature on photovoltaic modules is a crucial factor in the performance analysis of photovoltaic systems. The thermal coefficients describe the effect of temperature on the photovoltaic parameters. In order to correct the I-V curves to different conditions of temperature it is necessary to determine the change of the short circuit current with temperature ( $\alpha$ ) and the change of the open circuit voltage respect to temperature ( $\beta$ ). The change of maximum power respect to temperature ( $\gamma$ ) is also important, since it qualifies directly the efficiency loss due to temperature. The measurement of thermal coefficients of photovoltaic modules can be realized outdoor, with natural sunlight causing the heating of the module while several I-V curves are taken at different temperatures. The other way is the indoor measurement in a solar simulator. The module is placed in a thermostatic chamber to reach several temperatures and the I-V curves are measured using the flash of the solar simulators. From the I-V curves the parameters are extracted and the thermal coefficients are determined. In this work a set of thermal coefficients were previously determined indoors for several photovoltaic modules and then they were determined outdoors and the results are compared. The main objective was the comparison of the results in order to validate the outdoor procedure for measurements of thermal coefficients at ESTI (European Solar Test Installation) Ispra, Italy. The combined uncertainty of the outdoor measurement of  $\beta$  and  $\gamma$  are three times greater than the uncertainty indoor, mainly due to the temperature uncertainty outdoors. The parameter  $\alpha$  has almost the same uncertainty in both cases. The results are completely equivalent in both cases, having intersection of the uncertainty range between the indoor and outdoor measurement.*

**Key words:** *Photovoltaic solar energy, Thermal coefficients*