

CÂMARA TERMOSTÁTICA PARA DETERMINAÇÃO DE COEFICIENTES TÉRMICOS DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS COM SIMULADOR SOLAR

Fabiano Perin Gasparin (UFRGS) - gasparin.fabiano@gmail.com

Felipe Detzel Kipper (Instituição - a informar) - felipe_kipper@hotmail.com

Arno Krenzinger (UFRGS) - arno.krenzinger@ufrgs.br

Resumo:

Dentre as variáveis que afetam o desempenho dos sistemas fotovoltaicos, depois da radiação solar incidente, os efeitos da temperatura são os mais importantes. Estes efeitos são descritos pelos coeficientes térmicos, que representam a variação dos parâmetros dos módulos fotovoltaicos com a temperatura. Tendo em vista a importância da determinação experimental dos coeficientes térmicos dos módulos fotovoltaicos, este trabalho descreve os materiais e métodos desenvolvidos no LABSOL - UFRGS para a determinação destes coeficientes utilizando um simulador solar. Uma câmara termostática com controle de temperatura foi desenvolvida para ser instalada no interior do túnel do simulador, a fim de realizar medidas de curvas I-V na faixa de temperatura de operação típica dos módulos fotovoltaicos. O detalhamento da construção da câmara e a metodologia para um ensaio de determinação de coeficientes térmicos são explanadas e discutidas neste trabalho. A câmara construída atendeu às expectativas no sentido de viabilizar os ensaios em simulador solar, porém a uniformidade de temperatura, em alguns casos, ainda não atende à norma IEC 60890-2009, o que exigirá pequenas modificações na câmara a serem desenvolvidas. Os coeficientes térmicos determinados no simulador solar tiveram uma diferença máxima de 0,02% em relação aos valores fornecidos pelo fabricante de módulos fotovoltaicos e as retas de regressão tiveram coeficiente de determinação do erro quadrático (R^2) sempre maior que 0,99. A realização deste trabalho possibilitou o aperfeiçoamento e a difusão da metodologia para medição dos coeficientes térmicos em simulador solar, um procedimento essencial na caracterização dos dispositivos fotovoltaicos.

Palavras-chave: *Módulo Fotovoltaico, Coeficientes térmicos, Câmara termostática*

Área temática: *Conversão Fotovoltaica*

Subárea temática: *Tecnologias e ensaios de módulos fotovoltaicos*

CÂMARA TERMOSTÁTICA PARA DETERMINAÇÃO DE COEFICIENTES TÉRMICOS DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS COM SIMULADOR SOLAR

Fabiano Perin Gasparin – fabiano.gasparin@ufrgs.br

Felipe Detzel Kipper - felipe_kipper@hotmail.com

Arno Krenzinger – arno.krenzinger@ufrgs.br

Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS

Resumo. Dentre as variáveis que afetam o desempenho dos sistemas fotovoltaicos, depois da radiação solar incidente, os efeitos da temperatura são os mais importantes. Estes efeitos são descritos pelos coeficientes térmicos, que representam a variação dos parâmetros dos módulos fotovoltaicos com a temperatura. Tendo em vista a importância da determinação experimental dos coeficientes térmicos dos módulos fotovoltaicos, este trabalho descreve os materiais e métodos desenvolvidos no LABSOL – UFRGS para a determinação destes coeficientes utilizando um simulador solar. Uma câmara termostática com controle de temperatura foi desenvolvida para ser instalada no interior do túnel do simulador, a fim de realizar medidas de curvas I-V na faixa de temperatura de operação típica dos módulos fotovoltaicos. O detalhamento da construção da câmara e a metodologia para um ensaio de determinação de coeficientes térmicos são explanadas e discutidas neste trabalho. A câmara construída atendeu às expectativas no sentido de viabilizar os ensaios em simulador solar, porém a uniformidade de temperatura, em alguns casos, ainda não atende à norma IEC 60890-2009, o que exigirá pequenas modificações na câmara a serem desenvolvidas. Os coeficientes térmicos determinados no simulador solar tiveram uma diferença máxima de 0,02% em relação aos valores fornecidos pelo fabricante de módulos fotovoltaicos e as retas de regressão tiveram coeficiente de determinação do erro quadrático (R^2) sempre maior que 0,99. A realização deste trabalho possibilitou o aperfeiçoamento e a difusão da metodologia para medição dos coeficientes térmicos em simulador solar, um procedimento essencial na caracterização dos dispositivos fotovoltaicos.

Palavras-chave: Módulo fotovoltaico, Coeficientes térmicos, Câmara termostática

1. INTRODUÇÃO

A aplicação da conversão fotovoltaica da energia solar tem importância mundial crescente desde meados do ano 2000. Em particular no Brasil, o uso da tecnologia fotovoltaica apresenta aumento considerável do uso em geração distribuída desde meados de 2012 e em geração centralizada por meio dos leilões de energia.

A conversão da energia solar em energia elétrica pelos módulos fotovoltaicos tem natureza intermitente, isto é, depende da radiação solar, da posição geográfica, das condições climáticas entre outros fatores. Dentre as variáveis que influenciam o desempenho dos módulos fotovoltaicos, os coeficientes térmicos tem papel importante, já que a eficiência dos módulos fotovoltaicos diminui com o aumento da temperatura. Este decréscimo na eficiência do módulo é um fenômeno conhecido e que deve ser considerado em qualquer análise de desempenho, seja com simulação computacional ou nas medições em campo dos sistemas fotovoltaicos. O processo de determinação dos coeficientes térmicos envolve a medida da curva característica I-V do módulo fotovoltaico em uma série de temperaturas que representem as condições de operação em campo. A partir dos valores dos parâmetros determinados em diversas temperaturas é possível calcular a sua dependência em função da temperatura.

Os coeficientes térmicos são determinados de maneira genérica a partir da Eq. (1), em que a variação do parâmetro em análise, no caso um parâmetro Z, é normalizado pelo valor do parâmetro em uma temperatura padrão (Emery *et al.* 1996).

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

onde CT é o coeficiente térmico do parâmetro de interesse Z, T é a temperatura da célula fotovoltaica e T_n é a temperatura de normalização de 25 °C, que é a temperatura padrão para ensaios em dispositivos fotovoltaicos,

O coeficiente de variação da corrente de curto-circuito (I_{sc}) com a temperatura (T) é denominado α , e é determinado por meio da Eq. (2). O valor típico de α para módulos fotovoltaicos de silício cristalino é de 0,05% $I_{sc}/^\circ\text{C}$, em uma faixa de temperatura de operação entre 20 e 100 °C.

$$\alpha = \frac{1}{I_{sc}(T_n)} \frac{\partial I_{sc}}{\partial T} \quad (2)$$

O coeficiente de variação da tensão de circuito aberto (V_{oc}), com a temperatura é calculado por meio da Eq. (3). A redução de V_{oc} com o incremento da temperatura resulta na alteração da curva I-V característica do módulo fotovoltaico, causando redução da potência entregue pelo dispositivo com o aumento da temperatura. O valor típico β para o silício cristalino é da ordem de $-0,32\% V_{oc}/^{\circ}\text{C}$.

$$\beta = \frac{1}{V_{oc}(T_n)} \frac{\partial V_{oc}}{\partial T} \quad (3)$$

Já o coeficiente de variação da máxima potência (P_m) com a temperatura é denominado γ e pode ser determinado a partir da Eq. (4). Um valor típico de γ para o silício cristalino é $-0,42\% P_m/^{\circ}\text{C}$, para a faixa de temperatura de operação dos módulos em campo.

$$\gamma = \frac{1}{P_m(T_n)} \frac{\partial P_m}{\partial T} \quad (4)$$

Os coeficientes térmicos podem ser determinados em um simulador solar (*indoor*) ou com radiação solar (*outdoor*). No método *outdoor*, os módulos fotovoltaicos devem ser acomodados em um suporte para exposição solar com uma cobertura para bloquear a incidência da radiação antes do início das medidas. O módulo fotovoltaico deve iniciar o ensaio com temperatura em valores próximos a 25°C , temperatura que pode ser atingida por meio de uma câmara climatizada com condicionador de ar, como descrito em Bühler *et al.* (2009) ou mesmo com o módulo em equilíbrio com a temperatura ambiente, caso esta esteja em valores próximos a 25°C . Pode-se ainda fazer o resfriamento utilizando algum fluido enquanto o módulo fotovoltaico é mantido protegido da radiação solar. Em seguida, a cobertura do módulo é retirada, expondo-o à radiação solar. A própria radiação solar faz o aquecimento do módulo fotovoltaico e o procedimento é realizado com a medida da curva I-V em diversos valores de temperatura. O ensaio termina quando é atingida a temperatura de equilíbrio do módulo fotovoltaico exposto à radiação solar (Gasparin e Krenzing, 2015). O tempo de ensaio *outdoor* depende da taxa de aquecimento do módulo, que é função da irradiância incidente, da temperatura ambiente e da massa do módulo, sendo em geral de 15 a 20 minutos. No método *outdoor* todas as curvas I-V devem ser corrigidas para a mesma irradiância solar e as incertezas são geralmente maiores dado o número de variáveis não controladas.

O método *indoor* consiste em acomodar o módulo fotovoltaico em uma câmara termostática e ajustar a temperatura para valores que compreendam a operação do módulo em campo. Quando a temperatura está estabilizada, a câmara é aberta momentaneamente para a exposição à radiação da lâmpada do simulador e realização da medida da curva I-V. O procedimento é repetido para diversos valores de temperatura. O método *indoor* é geralmente mais lento, já que o tempo para a temperatura do módulo estabilizar nos valores desejados depende das características da câmara termostática e em cada abertura momentânea da câmara ocorre o resfriamento do módulo. É importante notar que o método *indoor* é independente das condições climáticas e o controle das variáveis é facilitado.

Dada a importância da determinação experimental dos coeficientes térmicos dos módulos fotovoltaicos, este trabalho descreve os materiais e métodos utilizados para a medida de curvas I-V com o simulador solar pulsado PASAN SunSim 3C do LABSOL – UFRGS em diferentes temperaturas. Serão apresentadas as características e os aspectos construtivos da câmara termostática desenvolvida no LABSOL para aquecimento de módulos fotovoltaicos a serem ensaiados no simulador solar. São avaliados alguns aspectos do desempenho da câmara, a uniformidade de temperatura e por fim os resultados de um ensaio de coeficientes térmicos de um módulo de silício policristalino de 72 células.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Esta seção apresenta o detalhamento da construção da câmara termostática para aquecimento de módulos fotovoltaicos. São descritos os materiais e equipamentos empregados no sistema de aquecimento e controle de temperatura e o sistema de monitoramento de temperatura. Ao final é apresentada a metodologia empregada na determinação dos coeficientes térmicos de um módulo fotovoltaico de silício policristalino.

2.1 Aspectos construtivos da câmara termostática

A câmara termostática consiste em uma caixa em que as paredes e portas foram construídas com MDF (*Medium Density Fiberboard*) cru e posteriormente pintadas com tinta preta, nas dimensões apresentadas no croqui da Fig. 1 (a). O fundo da parte interna é coberto com uma camada de espuma de polietileno expandido com aproximadamente 20 mm de espessura que atua como isolante térmico. As partes internas das portas e as laterais são revestidas com uma espuma elastomérica de cor preta, com o objetivo de reduzir as trocas de calor com o meio externo e também para minimizar a

reflexão da radiação proveniente da lâmpada do simulador. O material utilizado é conhecido comercialmente como Manta Elastomérica K-Flex, e além de propriedades de isolante térmico é um material com baixa refletividade, sendo que a refletividade do material é reduzida ainda mais após lixar a superfície que será exposta à radiação da lâmpada do simulador solar. Este material foi testado no LABSOL e comprova alta absorção tanto no visível como no infravermelho próximo, e os detalhes das propriedades óticas do material estão descritos em Hincapie *et al.* (2014), sendo que o mesmo material foi utilizado no revestimento do túnel do simulador do LABSOL - UFRGS. A câmara é fixada em um suporte de alumínio com rodízios que permite o fácil deslocamento no laboratório e a instalação dentro do túnel do simulador solar, conforme foto do equipamento apresentada na Fig. 1 (b).

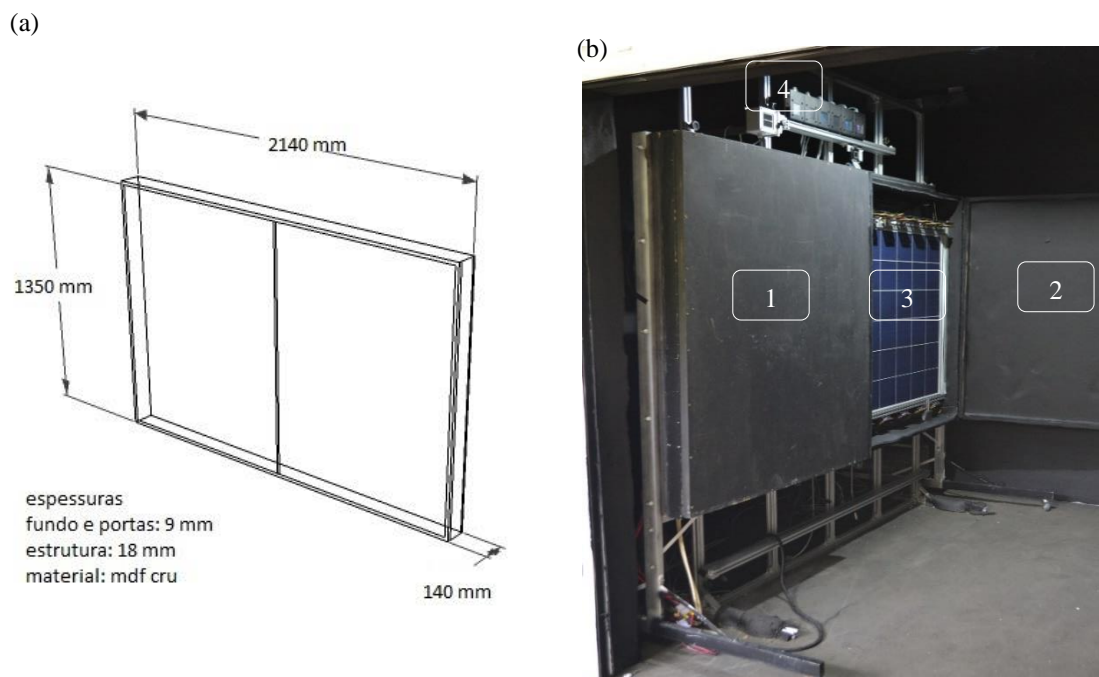


Figura 1 – (a) Croqui da câmara termostática. (b) Câmara termostática instalada no túnel do simulador solar: (1) porta esquerda da câmara, (2) porta direita, (3) módulo FV no interior da câmara, (4) células de referência.

Um suporte de alumínio foi montado na parte interna inferior da câmara para apoiar o módulo fotovoltaico na posição paisagem. Abaixo deste suporte foram instalados ventiladores que promovem convecção forçada por meio do movimento ascendente do ar pela parte posterior do módulo fotovoltaico. Um perfil de alumínio montado na parte superior e inserido entre trilhos deslizantes laterais é utilizado para manter o módulo fotovoltaico na posição e também como suporte do conjunto de ventiladores superiores. Uma pequena chapa de alumínio atua como limitador do movimento pendular do módulo fotovoltaico. A Fig. 2 (a) apresenta a parte interna da câmara termostática, mostrando os ventiladores, a placa aquecedora ao fundo e os suportes do módulo fotovoltaico. A Fig. 2 (b) apresenta a câmara com as portas abertas e com um módulo instalado, dentro do túnel do simulador solar.

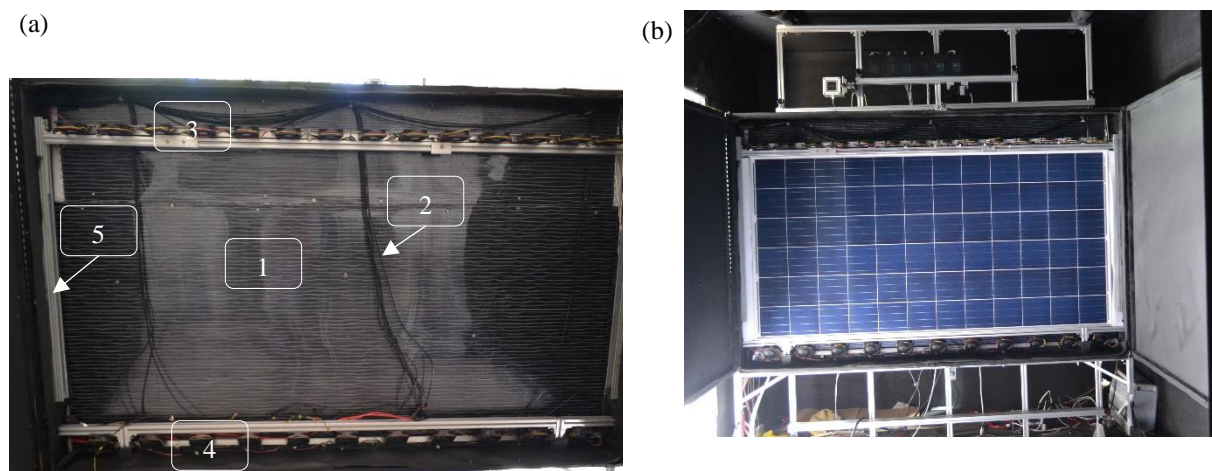


Figura 2 – Fotos da câmara termostática. (a) Sem o módulo fotovoltaico instalado: (1) elemento de aquecimento construído com placa de policarbonato alveolar, (2) cabos dos sensores de temperatura, (3) suporte e ventiladores superiores, (4) ventiladores inferiores e perfil de suporte, (5) trilho lateral para deslizamento do perfil superior. (b) Câmara termostática com um módulo de silício policristalino de 72 células instalado.

A fiação é conduzida para a parte posterior da câmara para conectores elétricos que permitem a rápida conexão da câmara com os cabos provenientes do painel de comando. Visualizando a câmara de frente, na parte inferior direita há a passagem dos fios das resistências elétricas de aquecimento, na parte inferior esquerda há a passagem dos cabos de ligação do módulo fotovoltaico com a carga eletrônica do simulador solar e os cabos de alimentação dos ventiladores. Na parte superior esquerda há a saída dos cabos dos sensores de temperatura Pt100 para o controle e para o monitoramento da temperatura.

2.2 Sistema de aquecimento e controle de temperatura

O aquecimento da câmara é obtido por uma resistência de fio com isolamento de silicone introduzida em canaletas alternadas de uma placa de policarbonato alveolar, formando uma placa de aquecimento. As características do fio utilizado e dos principais componentes do sistema de aquecimento estão descritas na Tab. 1.

Tabela 1 - Especificações dos componentes utilizados no sistema de aquecimento da câmara termostática.

Componente	Marca	Modelo	Observação
Resistência elétrica	Pan Electric	Fio com resistência linear de 4,21 Ω /m Potência nominal: 25 W/m - 220 V	Diâmetro do condutor: 0,5mm Diâmetro externo: 2,4 mm
Controlador de temperatura	NOVUS	Controlador PID modelo N1030	-
Relé de estado sólido	NOVUS	SSR-4825 25 A / 480 VCA	-
Sensor de temperatura	NOVUS	Termorresistência Pt100 – CRZ-2005 CLASSE A	-
Ventiladores	Akasa	DFS802512H DC - BRUSHLESS FAN	Tensão 12 VDC Potência 2,4 W
Fonte de alimentação	-	Fonte de alimentação chaveada 12 V / 10 A	Entrada 110-220VAC

A placa de aquecimento é composta por 7 blocos resistivos de aproximadamente 20 cm de altura, sendo que cada bloco é obtido por 14 voltas do fio ao longo da placa de policarbonato. Os blocos resistivos tem potência aproximada de 400 W quando alimentados em 220 V. Cada bloco resistivo equivale a um fio com comprimento aproximado de 28,7 m, e, portanto, foram utilizados aproximadamente 201 m de fio para toda a placa aquecedora. A Fig. 3 (a) mostra uma foto com o detalhe do fio de aquecimento instalado na placa de policarbonato alveolar.

A câmara possui ventiladores na parte inferior e superior do módulo fotovoltaico para realizar convecção forçada e uniformizar a temperatura do módulo. O sistema de convecção é composto por 25 ventiladores, sendo 14 instalados na parte superior e 11 na parte inferior. Desta maneira, o ar é forçado a subir pela parte posterior do módulo fotovoltaico e descer pela parte frontal do módulo. A Fig. 3 (b) e (c) mostram detalhes da instalação dos ventiladores. O acionamento dos ventiladores é realizado por botoeiras pulsantes na parte frontal do quadro de comando, onde foi montado um circuito de auto retenção com relés automotivos de 12V.

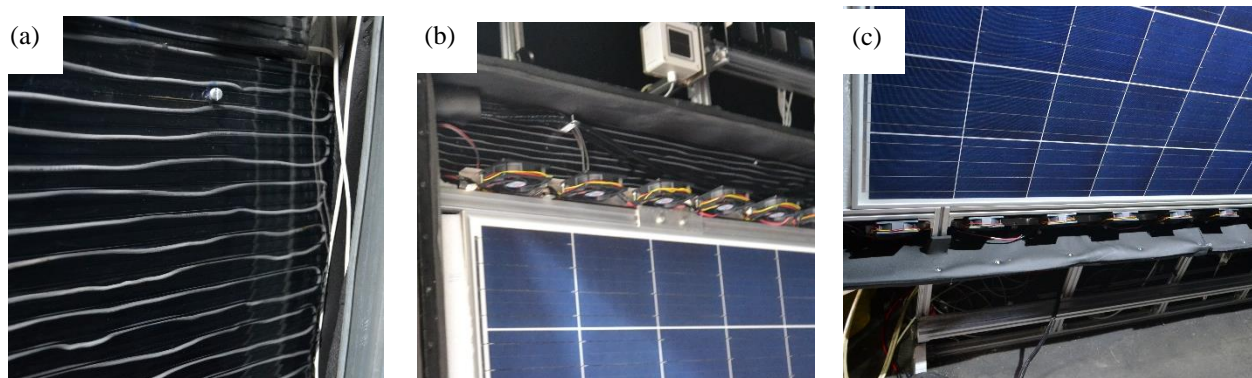


Figura 3 – Detalhes da câmara termostática. (a) Fio de aquecimento (branco) inserido na placa de policarbonato. (b) Detalhes do conjunto superior de ventiladores. (c) Detalhe do conjunto inferior de ventiladores.

Para o controle do aquecimento ficar mais eficiente na direção vertical, melhorando a uniformidade de temperatura, a placa de aquecimento foi dividida em 3 zonas de aquecimento com controle de temperatura independente para cada zona. A zona inferior é composta por 3 blocos de resistências, o que equivale a 1200 W. Para o controle desta zona, um Pt100, identificado com o número #11 foi fixado com fita metálica na parte inferior do módulo fotovoltaico. A zona central é composta por 2 blocos de resistências, ou aproximadamente 800 W, e para o controle desta zona, o Pt100

identificado com o número #22 foi fixado na parte central do módulo fotovoltaico. A zona superior é composta pelos dois blocos restantes, e o Pt100 número #33 é usado no controle de temperatura desta zona e foi fixado na parte superior do módulo fotovoltaico. Os sensores Pt100 são do modelo CRZ-2005 classe A, com dimensões de 2 x 5 x 1,5 mm, tendo tolerância de $\pm 0,35$ °C a 100 °C conforme norma IEC 60751, informado no catálogo do fornecedor. Os sensores foram utilizados sem calibração adicional, pois a tolerância nominal é suficiente para as medidas de coeficientes térmicos.

O quadro de comando para a instalação dos três controladores de temperatura, dos relés de estado sólido e do sistema de alimentação dos ventiladores foi instalado na bancada de controle do simulador solar para fácil acesso aos comandos, sendo ilustrado na Fig. 4.

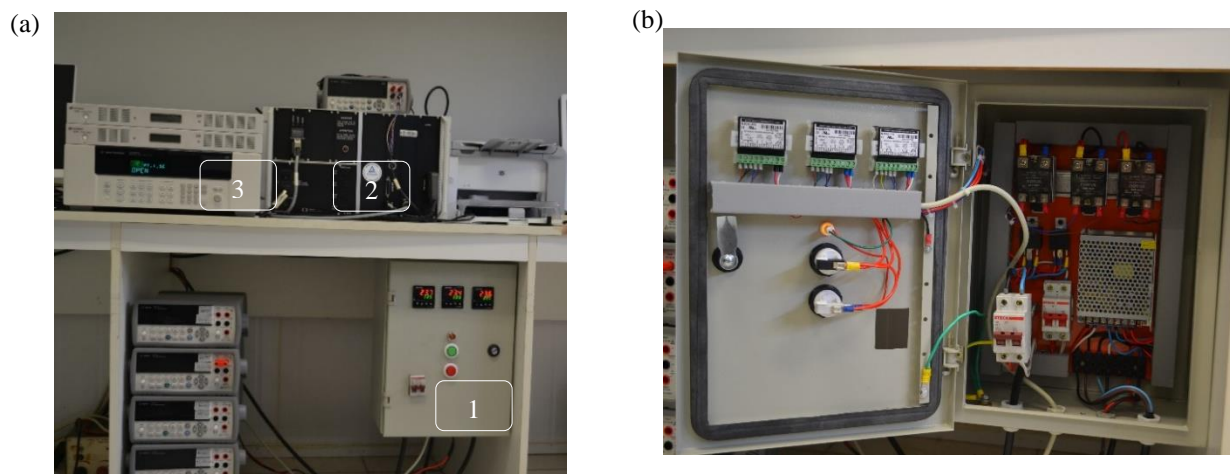


Figura 4 – Fotos do painel de comando da câmara termostática. (a) Bancada de controle do simulador solar: (1) quadro de comando da câmara termostática, (2) controle eletrônico do simulador solar, (3) equipamento de aquisição de dados Keysight 34980 A. Os demais equipamentos não foram utilizados neste trabalho. (b) Detalhe da parte interna do quadro de comando do sistema de aquecimento da câmara termostática.

2.3 Sistema de monitoramento da temperatura

Além dos circuitos de controle de temperatura, foram instalados 9 sensores Pt100 que são conectados em um equipamento de aquisição de dados modelo Keysight 34980A comandada pelo software Benchlink 34980A. A unidade de aquisição pode ser visualizada na parte superior esquerda da Fig. 3 (a). A norma internacional IEC 60891 (2009) estabelece os procedimentos para determinação dos coeficientes térmicos, e recomenda a instalação de 4 sensores de temperatura na parte posterior do módulo. No sistema desenvolvido foi excedida a recomendação, pois o objetivo era também para monitorar a temperatura em 9 locais do módulo fotovoltaico, a fim de possibilitar a obtenção da média de temperaturas, bem como verificar a não uniformidade da temperatura em qualquer momento do ensaio.

Os sensores de temperatura são fixados em 9 locais conforme descrito na Tab. 2 e conectados a 4 fios na unidade de aquisição de dados Keysight 34980A. Os valores de temperatura são registrados a cada 10s e depois exportados para uma planilha eletrônica. Convém destacar que ao todo foram instalados 12 sensores de temperatura, sendo 9 exclusivamente para monitoramento da temperatura e 3 para o controle das zonas de aquecimento correspondentes, que são conectados diretamente aos controladores de temperatura PID.

Tabela 2 – Descrição e localização dos sensores de monitoramento da uniformidade de temperatura da câmara termostática.

Variável medida e Pt100 correspondente	Canais utilizados para ligação na unidade Keysight 34980A	Localização do sensor Pt100 no módulo fotovoltaico (visto de frente)
T1 - Pt100_1	#1 - entradas 01 e 21	Canto superior esquerdo (SE)
T2 - Pt100_2	#2 - entradas 02 e 22	Centro da lateral esquerda (CE)
T3 - Pt100_3	#3 - entradas 03 e 23	Canto inferior esquerdo (IE)
T4 - Pt100_4	#4 - entradas 04 e 24	Posição superior central (SC)
T5 - Pt100_5	#5 - entradas 05 e 25	Posição central do módulo (CC)
T6 - Pt100_6	#6 - entradas 06 e 26	Posição inferior central (IC)
T7 - Pt100_7	#7 - entradas 07 e 27	Canto superior direito (SD)
T8 - Pt100_8	#8 - entradas 08 e 28	Centro da lateral direita (CD)
T9 - Pt100_9	#9 - entradas 09 e 29	Canto inferior direito (ID)

2.4 Metodologia para determinação dos coeficientes térmicos

A determinação dos coeficientes térmicos é realizada pela medida dos parâmetros extraídos da curva I-V em diversas temperaturas. Os dados de V_{oc} , I_{sc} e P_m são representados graficamente em função da temperatura e uma reta de regressão

linear é utilizada para obtenção dos coeficientes de variação de cada um dos parâmetros com a temperatura. A variação do parâmetro é normalizada conforme Eq. (1) pelo valor do parâmetro obtido pela reta de regressão a 25 °C. Neste trabalho, um módulo fotovoltaico de silício policristalino disponível comercialmente, cujas características estão apresentadas na Tab. 3 foi submetido a ensaio dos coeficientes térmicos com a aplicação da metodologia descrita.

Tabela 3 – Características do módulo fotovoltaico ensaiado nas condições de ensaio padrão (irradiância de 1000 W/m², temperatura da célula de 25°C e espectro AM 1,5).

Quantidade e tipo de célula fotovoltaica	72 células de silício policristalino 156 mm x 156 mm
Potência máxima (P_m)	315 W \pm 3 %
Eficiência	16,23%
Tensão de máxima potência (V_{mp})	37,2 V
Corrente de máxima potência (I_{mp})	8,48 A
Tensão de circuito aberto (V_{oc})	46,2 V
Corrente de curto-circuito (I_{sc})	9,01 A
Coefficiente de variação de I_{sc} com a temperatura (α)	0,06%/°C
Coefficiente de variação de V_{oc} com a temperatura (β)	-0,30%/°C
Coefficiente de variação de P_m com a temperatura (γ)	-0,40 %/°C

Na determinação dos coeficientes térmicos, foi analisado o efeito do uso da média das temperaturas na abscissa em comparação com o uso apenas da temperatura central do módulo na abscissa, para a determinação dos coeficientes térmicos. Além disto, os valores dos coeficientes obtidos no aquecimento controlado do módulo e no resfriamento foram comparados. As curvas I-V foram medidas nas temperaturas aproximadas de 25°C, que corresponde à temperatura nas condições padrão de ensaio segundo a norma IEC 60904-4 (2009) e nas temperaturas aproximadas de 35°C, 45°C, 55°C e 65°C, que representam uma faixa semelhante às temperatura de operação dos módulos fotovoltaicos em campo. O aquecimento do módulo e a estabilização nas temperaturas acima de 25°C é relativamente lento (da ordem de 30 minutos até a estabilização). Além do ensaio em cada temperatura durante o aquecimento, foi realizado o ensaio no resfriamento do módulo, isto é, após o módulo atingir 65°C, as portas da câmara termostática foram abertas com os ventiladores ligados, e a curva I-V foi medida nas temperaturas indicadas durante o resfriamento.

3. RESULTADOS

A construção da câmara com os materiais e métodos apresentados atendeu as expectativas em relação ao controle da temperatura do módulo fotovoltaico. As três zonas de aquecimento proporcionaram uma uniformidade vertical da temperatura da ordem de $\pm 1^\circ\text{C}$, porém ainda há uma não-uniformidade acima do desejável entre o centro e as laterais, pelo efeito da distribuição da temperatura nas bordas laterais do módulo fotovoltaico. Para um ensaio padrão, esta não-uniformidade não prejudica os ensaios de coeficientes térmicos, uma vez que a média das temperaturas nos nove pontos de monitoramento compensa estes efeitos. A câmara passará por mais um aprimoramento com objetivo de melhorar a uniformidade da temperatura nas extremidades do módulo por meio da instalação de aquecedores suplementares na parte lateral interna da câmara.

A Fig. 5 (a) mostra a imagem termográfica obtida com uma câmera da marca Thermocom modelo V52. O módulo fotovoltaico está em aproximadamente 43 °C, e a imagem foi tomada imediatamente após a abertura das portas da câmara termostática, indicando a uniformidade de temperatura após um tempo de estabilização de aproximadamente 30 minutos. Verifica-se que as laterais do módulo estão mais frias. A Fig. 5 (b) mostra a imagem a aproximadamente 62 °C.

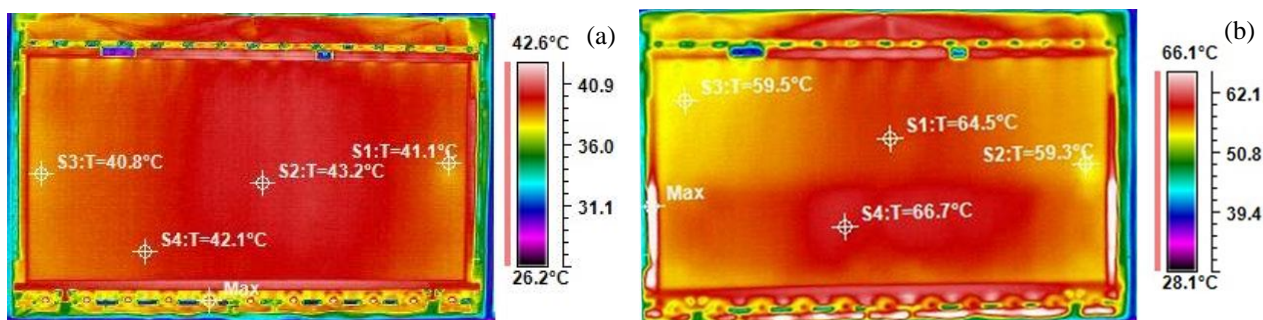


Figura 5 – Imagens termográficas do módulo fotovoltaico com aproximadamente 30 minutos de estabilização após selecionar o valor desejado de temperatura. (a) Módulo a $\sim 43^\circ\text{C}$. (b) Módulo a $\sim 65^\circ\text{C}$.

A curva I-V do mesmo módulo fotovoltaico foi determinada 9 vezes, partindo de 25 °C e aquecendo o módulo até estabilização da câmara nas temperaturas desejadas. O tempo de estabilização entre cada temperatura foi entre 30 e 40 minutos. Após o módulo atingir aproximadamente 65 °C, as portas da câmara foram abertas e os ventiladores foram

mantidos ligados. No processo de resfriamento do módulo, mais 4 medidas de curva I-V foram realizadas. Os valores de temperatura dos 9 locais de monitoramento estão apresentados na Tab. 4, bem como a média e a amplitude de temperaturas do módulo em cada medida da curva I-V. A amplitude é simplesmente a diferença entre a maior e a menor temperatura. Na Tab. 4 os valores de temperatura foram organizados de maneira a representar a posição do sensor no módulo fotovoltaico visto de frente. Uma escala de cores foi adicionada para facilitar a identificação dos gradientes de temperatura, podendo-se verificar que as maiores temperaturas estão localizadas na parte central do módulo, conforme já ilustrado pelas imagens termográficas da Fig. 5.

Tabela 4 - Temperatura dos 9 pontos de monitoramento em cada uma das medidas das curvas I-V. As temperaturas estão distribuídas nos quadros conforme modelo ao lado, sendo que a descrição dos sensores está detalhada na Tab. 2.

T1	T4	T7
T2	T5	T8
T3	T6	T9

<p>Medida 1 inicial (~25°C) Amplitude: 0,5 °C Média: 25,1°C</p> <table border="1"> <tr><td>24,8</td><td>25,2</td><td>24,9</td></tr> <tr><td>24,9</td><td>25,3</td><td>25,3</td></tr> <tr><td>25,0</td><td>25,2</td><td>25,2</td></tr> </table>	24,8	25,2	24,9	24,9	25,3	25,3	25,0	25,2	25,2	<p>Medida 2 - aquecendo (~35°C) Amplitude: 0,9 °C Média: 34,8 °C</p> <table border="1"> <tr><td>34,5</td><td>35,3</td><td>34,7</td></tr> <tr><td>34,5</td><td>35,4</td><td>34,7</td></tr> <tr><td>34,7</td><td>35,0</td><td>34,5</td></tr> </table>	34,5	35,3	34,7	34,5	35,4	34,7	34,7	35,0	34,5	<p>Medida 3 - aquecendo (~45°C) Amplitude: 3,3 °C Média: 44,3 °C</p> <table border="1"> <tr><td>44,3</td><td>46,1</td><td>44,4</td></tr> <tr><td>42,8</td><td>45,2</td><td>43,3</td></tr> <tr><td>43,8</td><td>45,0</td><td>43,9</td></tr> </table>	44,3	46,1	44,4	42,8	45,2	43,3	43,8	45,0	43,9
24,8	25,2	24,9																											
24,9	25,3	25,3																											
25,0	25,2	25,2																											
34,5	35,3	34,7																											
34,5	35,4	34,7																											
34,7	35,0	34,5																											
44,3	46,1	44,4																											
42,8	45,2	43,3																											
43,8	45,0	43,9																											
<p>Medida 4 - aquecendo (~55°C) Amplitude: 2,6 °C Média: 54,2°C</p> <table border="1"> <tr><td>53,9</td><td>55,5</td><td>53,7</td></tr> <tr><td>53,4</td><td>55,8</td><td>53,5</td></tr> <tr><td>53,7</td><td>54,8</td><td>53,2</td></tr> </table>	53,9	55,5	53,7	53,4	55,8	53,5	53,7	54,8	53,2	<p>Medida 5 - aquecendo (~65°C) Amplitude: 4,3 °C Média: 63,3 °C</p> <table border="1"> <tr><td>64,1</td><td>64,7</td><td>63,4</td></tr> <tr><td>62,8</td><td>65,7</td><td>61,8</td></tr> <tr><td>62,5</td><td>63,3</td><td>61,4</td></tr> </table>	64,1	64,7	63,4	62,8	65,7	61,8	62,5	63,3	61,4	<p>Medida 6 - resfriando (~55°C) Amplitude: 4,8 °C Média: 52,5 °C</p> <table border="1"> <tr><td>51,5</td><td>54,1</td><td>51,3</td></tr> <tr><td>53,8</td><td>54,7</td><td>52,6</td></tr> <tr><td>51,6</td><td>52,9</td><td>49,9</td></tr> </table>	51,5	54,1	51,3	53,8	54,7	52,6	51,6	52,9	49,9
53,9	55,5	53,7																											
53,4	55,8	53,5																											
53,7	54,8	53,2																											
64,1	64,7	63,4																											
62,8	65,7	61,8																											
62,5	63,3	61,4																											
51,5	54,1	51,3																											
53,8	54,7	52,6																											
51,6	52,9	49,9																											
<p>Medida 7 - resfriando (~45°C) Amplitude: 3,2 °C Média: 43,5 °C</p> <table border="1"> <tr><td>41,8</td><td>43,9</td><td>42,0</td></tr> <tr><td>45,0</td><td>44,9</td><td>44,7</td></tr> <tr><td>43,1</td><td>43,8</td><td>41,9</td></tr> </table>	41,8	43,9	42,0	45,0	44,9	44,7	43,1	43,8	41,9	<p>Medida 8 - resfriando (~35°C) Amplitude: 2,4 °C Média: 34,4 °C</p> <table border="1"> <tr><td>33,4</td><td>34,3</td><td>33,7</td></tr> <tr><td>35,4</td><td>34,9</td><td>35,8</td></tr> <tr><td>34,3</td><td>34,3</td><td>33,7</td></tr> </table>	33,4	34,3	33,7	35,4	34,9	35,8	34,3	34,3	33,7	<p>Medida 9 - final (~25°C) Amplitude: 0,6 °C Média: 25,1°C</p> <table border="1"> <tr><td>24,8</td><td>25,3</td><td>24,9</td></tr> <tr><td>25,0</td><td>25,3</td><td>25,5</td></tr> <tr><td>25,2</td><td>24,9</td><td>25,2</td></tr> </table>	24,8	25,3	24,9	25,0	25,3	25,5	25,2	24,9	25,2
41,8	43,9	42,0																											
45,0	44,9	44,7																											
43,1	43,8	41,9																											
33,4	34,3	33,7																											
35,4	34,9	35,8																											
34,3	34,3	33,7																											
24,8	25,3	24,9																											
25,0	25,3	25,5																											
25,2	24,9	25,2																											

A norma IEC 60891 (2009) preconiza uma uniformidade de $\pm 2^\circ\text{C}$ para ensaios de coeficientes térmicos em simulador solar, o que significaria uma amplitude de 4°C . Observando os dados da Tab. 4, apenas na medida a 65°C e no resfriamento a 55°C a uniformidade de temperatura não foi atingida com a câmara termostática no estágio atual de desenvolvimento. As modificações a serem implementadas na câmara tem como objetivo superar a uniformidade exigida pela norma e dispensar a necessidade de intervenções do operador para tentar uniformizar a temperatura.

Os parâmetros V_{oc} , I_{sc} e P_m determinados a partir da curva I-V, a temperatura central do módulo e a temperatura média estão apresentados na Tab. 5 para maior clareza dos dados utilizados nos cálculos dos coeficientes térmicos.

Tabela 5 – Parâmetros do módulo fotovoltaico determinados em cada uma das medidas. Os valores da variável T5 representam a temperatura central do módulo.

Medida	T5 (°C)	T_média (°C)	V_{oc} (V)	I_{sc} (A)	P_m (W)
1. medida inicial (~25°C)	25,3	25,1	45,319	8,995	316,0
2. aquecendo (~35°C)	35,4	34,8	43,938	9,065	302,3
3. aquecendo (~45°C)	45,2	44,3	42,531	9,130	289,9
4. aquecendo (~55°C)	55,8	54,2	41,129	9,185	278,0
5. aquecendo (~65°C)	65,7	63,3	39,764	9,229	266,8
6. resfriando (~55°C)	54,7	52,5	41,348	9,172	280,9
7. resfriando (~45°C)	44,9	43,5	42,669	9,127	292,6
8. resfriando (~35 °C)	34,9	34,4	44,034	9,071	304,8
9. medida final (~25°C)	25,3	25,1	45,330	9,021	317,1

Para o cálculo do coeficiente de variação da tensão de circuito aberto com a temperatura (β) os dados da Tab. 5 correspondentes a V_{oc} foram representados graficamente na Fig. 6 mostrando os valores obtidos para as retas de regressão obtidas no aquecimento (V_{oc}) e no resfriamento do módulo (V_{oc_resf}). Na Fig. 6 (a) é mostrado o resultado considerando a temperatura central do módulo como valores do eixo de abcissa e na Fig. 6 (b) a temperatura média do módulo foi utilizada.

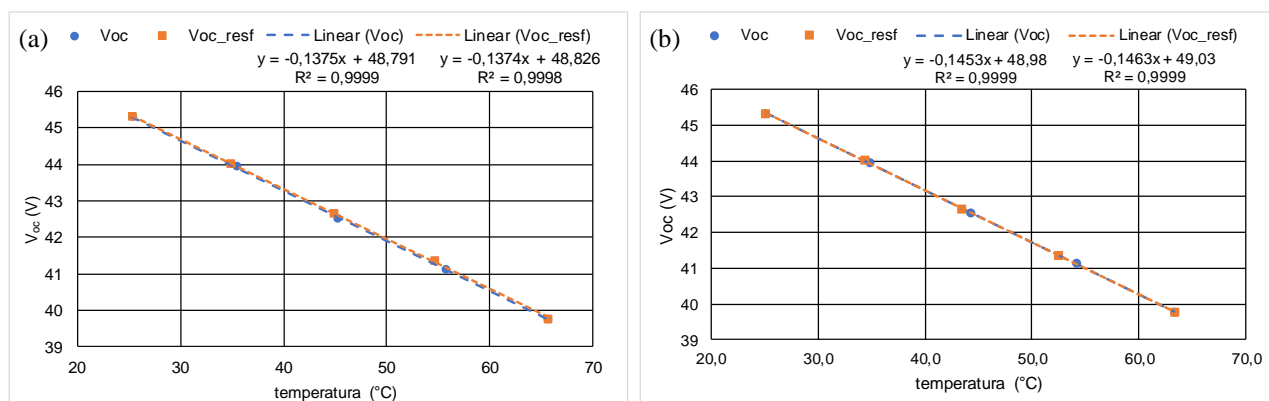


Figura 6 – Variação de V_{oc} com a temperatura para determinação do coeficiente β no aquecimento e no resfriamento do módulo. (a) com a temperatura central do módulo na abcissa (b) com a temperatura média na abcissa.

Verificou-se que os valores obtidos no aquecimento e no resfriamento do módulo são praticamente idênticos, porém diferem ligeiramente conforme a temperatura utilizada no eixo de abcissa. Na Tab. 6 são sistematizados os resultados e as diferenças percentuais entre as medidas.

Para o cálculo do coeficiente de variação da corrente de curto-circuito com a temperatura (α), os dados correspondentes a I_{sc} da Tab. 5 foram representados graficamente na Fig. 7 mostrando os valores obtidos para as retas de regressão obtidas no aquecimento (I_{sc}) e no resfriamento (I_{sc_resf}) do módulo. Na Fig. 7 (a) é mostrado o resultado considerando a temperatura central do módulo no eixo das abcissas e na Fig. 7 (b) a temperatura média do módulo foi utilizada. No caso do coeficiente α , a menor temperatura é quem limita a corrente de curto-circuito do módulo, entretanto, como o módulo possui diodos de desvio, utilizou-se a média das temperaturas conforme procedimentos da norma IEC 60891 (2009).

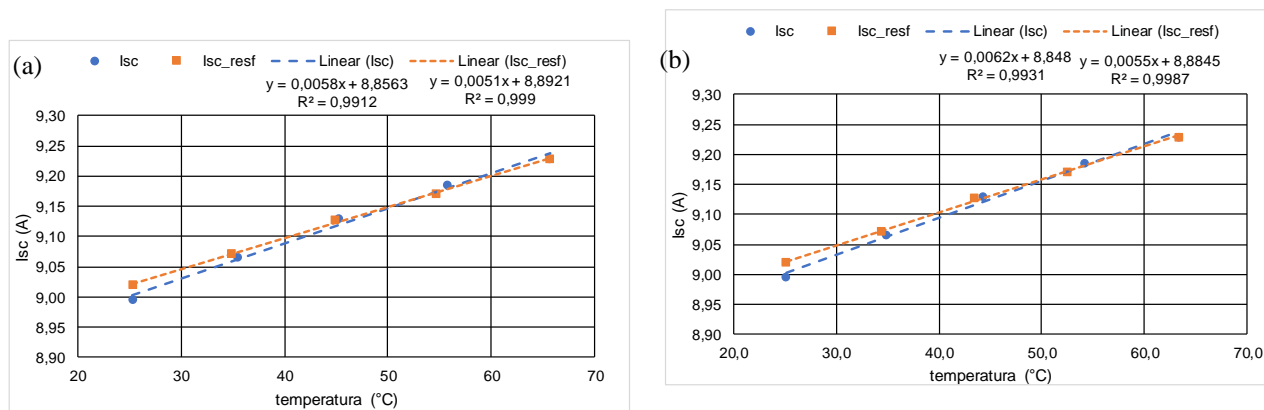


Figura 7 – Variação de I_{sc} com a temperatura para determinação do coeficiente α no aquecimento e no resfriamento do módulo. (a) Com a temperatura central do módulo na abcissa. (b) Com a temperatura média na abcissa.

O valor do coeficiente α é de apenas $0,0006 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, o que torna a sua medição bastante sensível às incertezas de medida. Observa-se que houve uma pequena diferença nas correntes de curto-circuito medidas a 25°C no aquecimento e no resfriamento. Esta diferença é perceptível pois a escala do gráfico está ampliada. Para ilustrar a diferença percentual entre as medidas, o parâmetro I_{sc} calculado a 25°C na medida 1 foi de $9,0013 \text{ A}$ e na medida 9 foi de $9,0196 \text{ A}$, o que equivale a uma diferença em relação a média dos valores ($9,0105 \text{ A}$) de apenas $0,20\%$. Este valor está dentro da própria incerteza elétrica do equipamento, porém um motivo para esta diferença é a existência de alguma incerteza na compensação do efeito da temperatura na medida da irradiância pela célula de referência, que será motivo de testes futuros.

Na Fig. 8 são apresentados os resultados para o coeficiente γ , isto é, a variação de P_m com a temperatura. Os valores obtidos para o coeficiente γ foram similares nas quatro situações. Os coeficientes angulares e lineares das retas de regressão apresentados nos gráficos das Fig. 6, Fig. 7 e Fig. 8, bem como o cálculo dos coeficientes térmicos estão apresentados na Tab. 6, para maior clareza dos dados utilizados para o cálculo dos coeficientes térmicos em cada situação de medida.

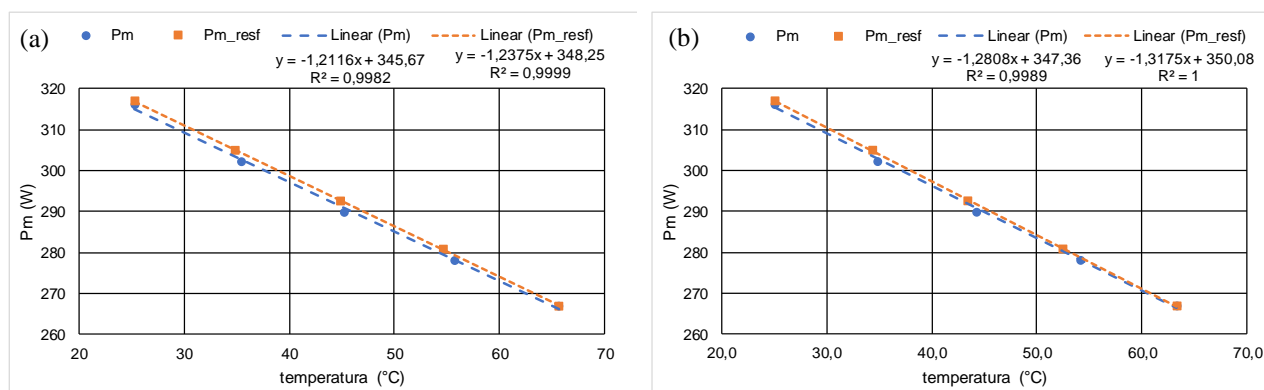


Figura 8 – Variação de P_m com a temperatura para determinação do coeficiente γ no aquecimento e no resfriamento do módulo. (a) Com a temperatura central do módulo na abscissa. (b) Com a temperatura média na abscissa.

A Tab. 6 mostra os resultados finais dos coeficientes térmicos calculados nas quatro situações diferentes, isto é, considerando a temperatura central do módulo e a média de temperaturas nas abscissas, com as curvas I-V medidas no aquecimento e no resfriamento do módulo fotovoltaico. Como o fabricante não informa a incerteza dos coeficientes térmicos apresentados, não é possível estabelecer se todas as medidas estavam dentro do intervalo de tolerância, mas como os coeficientes térmicos determinados com a metodologia exposta tem uma diferença de $\pm 0,02\%$ dos valores informados pelo fabricante, isto ilustra um intervalo relativamente pequeno.

Tabela 6 – Dados das equações das retas de regressão linear da variação dos parâmetros com a temperatura e valores dos coeficientes térmicos em cada uma das configurações do ensaio.

	Dados obtidos a partir da temperatura central do módulo na abscissa				Dados obtidos a partir da temperatura média do módulo na abscissa				Dados de catálogo
	coef. angular	coef. linear	valor a 25 °C	CT temp. central	coef. angular	coef. linear	valor a 25 °C	CT temp. média	CT
Voc	-0,1375	48,791	45,354 V	-0,30%	-0,1453	48,98	45,348	-0,32%	-0,30%
Voc_resf	-0,1374	48,826	45,391 V	-0,30%	-0,1463	49,03	45,373	-0,32%	
Isc	0,0058	8,8563	9,001 A	0,06%	0,0062	8,848	9,003	0,07%	-0,06%
Isc_resf	0,0051	8,8921	9,020 A	0,06%	0,0055	8,884	9,022	0,06%	
Pm	-1,2116	345,67	315,4 W	-0,38%	-1,2808	347,36	315,3	-0,41%	-0,40%
Pm_resf	-1,2375	348,25	317,3 W	-0,39%	-1,3175	350,08	317,1	-0,42%	

4. CONCLUSÕES

O desenvolvimento da câmara termostática para aquecimento de módulos fotovoltaicos propiciou um equipamento eficiente desenvolvido no Laboratório de Energia Solar da UFRGS, disponibilizando uma infraestrutura importante para ensaios de coeficientes térmicos de módulos fotovoltaicos com o simulador solar. Os aspectos construtivos e o sistema de aquecimento e controle são relativamente simples de implementar, o que pode ser reproduzido por outros pesquisadores interessados no tema.

A uniformidade de temperatura de $\pm 2^\circ\text{C}$ preconizada pela norma internacional IEC 60891 ainda não foi plenamente contemplada em todas as medidas, não sendo atingida em apenas duas temperaturas, cuja amplitude chegou a $4,8^\circ\text{C}$. Ainda serão implementadas modificações na câmara envolvendo a instalação de aquecedores laterais para reduzir o efeito da redução da temperatura nas bordas laterais dos módulos.

Os resultados dos ensaios de coeficientes térmicos em simulador solar possuem menores incertezas do que ensaios *outdoor*, principalmente na determinação do coeficiente α . No ambiente externo, as medidas não são realizadas exatamente na mesma irradiância e, portanto, é necessária correção da curva, o que causa maior dispersão dos pontos. Como apresentado no trabalho, os ensaios realizados, permitiram obter retas de regressão com coeficiente de determinação R^2 maiores que 0,99 em todos os casos.

O trabalho apresentado possibilitou o aperfeiçoamento e a difusão da metodologia para medição dos coeficientes térmicos em simulador solar, procedimento essencial para a caracterização dos dispositivos fotovoltaicos.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao grupo de pesquisa do LABSOL- UFRGS pelo apoio no desenvolvimento deste trabalho e principalmente ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo fomento à pesquisa.

REFERÊNCIAS

- Bühler, A. J., Gasparin, F. P., Rampinelli, G. A., Krenzinger, A. DEVELOPMENT OF A CLIMATIC CHAMBER FOR PHOTOVOLTAIC MODULES TESTING. Proceedings of COBEM 2009 - 20th International Congress of Mechanical Engineering November 15-20, 2009, Gramado, RS, Brazil
- Emery, K., Burdick, Y., Caiyem, D., Dunlavy, H., Field, H., Kroposky, B., Moriarty, T., Ottoson, L., Rummel, S., Strand, T., Wanlass, M., W., 1996. Temperature dependence of photovoltaic cells, modules and systems, 25th PVSC, May 13-17, Washington, D.C.
- Gasparin, F.P., Krenzinger, A., 2015. Comparação entre coeficientes térmicos de módulos fotovoltaicos determinados com simulador solar e com iluminação natural. Revista Brasileira de Energia Solar - Ano 6 Volume VI Número 2 Dezembro de 2015 p.102-111
- Hincapie, C. O., Piccoli Junior, L. A., Gasparin, F. P., Krenzinger, A. Estudo e montagem de túnel para simulador solar. V Congresso Brasileiro de Energia Solar – Recife, 31 de Março a 03 de Abril de 2014.
- IEC 60904-4. International Electrotechnical Commission.- International Standard. Photovoltaic devices – Part 4: Reference solar devices – Procedures for establishing calibration traceability. Edition 1 – 2009.
- IEC 80901 International Electrotechnical Commission.- International Standard. Photovoltaic devices – Procedures for temperature and irradiance corrections to measured I-V characteristics. Edition 2.0 – 2009.

THERMOSTATIC CHAMBER FOR DETERMINING THERMAL COEFFICIENTS OF PHOTOVOLTAIC MODULES USING SOLAR SIMULATOR

Abstract. Among the variables that affect the performance of photovoltaic systems, after incident solar radiation, the effects of temperature are the most important. These effects are described by the thermal coefficients, which represent the variation of PV module parameters with temperature. Considering the importance of experimental determination of thermal coefficients of photovoltaic modules, this work describes the materials and methods developed in LABSOL - UFRGS for the determination of such coefficients with solar simulator. A thermostatic chamber with temperature control was developed to be installed in the simulator tunnel in order to make I-V curve measurements in the typical operating temperature range of photovoltaic modules. The details of the chamber construction and the methodology for a thermal coefficient determination test are explained and discussed. The built chamber met expectations to make the measurements in solar simulator feasible. Temperature uniformity in some cases does not yet meet IEC 60890-2009, but minor modifications to the chamber should be implemented to improve temperature uniformity. The thermal coefficients determined in the solar simulator had a maximum difference of 0.02% in relation to the values provided by the manufacturer and the regression lines had a coefficient of determination R^2 always greater than 0.99. The accomplishment of this work allowed the improvement and the diffusion of the methodology to measure the thermal coefficients in solar simulator, an essential procedure in the characterization of the photovoltaic devices.

Key words: Photovoltaic module, Thermal coefficient, Thermostatic chamber