

MEDIÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR ATRAVÉS DE CÉLULAS DE REFERÊNCIA DE BAIXO CUSTO

André Possamai Rosso¹ – possamairosso@yahoo.com.br
Giuliano Arns Rampinelli² – giuliano.rampinelli@ufsc.br

¹Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Minas, Metalúrgica e Materiais

²Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Energia e Sustentabilidade

Resumo. Em um cenário de aumento do uso da energia solar fotovoltaica para a geração de eletricidade, tem-se a importância de realizar estudos da previsão precisa da radiação solar no local onde os sistemas fotovoltaicos serão instalados. As previsões precisas da radiação solar fornecem informações relacionadas às incertezas na geração de eletricidade de uma usina solar fotovoltaica. As células de referência são instrumentos que podem ser usados para medição da radiação solar global. As células de referência foram desenvolvidas no Laboratório de Pesquisa Aplicada (LPA) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Os procedimentos e métodos de calibração podem ser realizados mediante medições em simulador solar (indoor) ou sob iluminação natural (outdoor). Este artigo apresenta as constantes de calibração das células de referências através de três métodos distintos e as etapas de medição da irradiância solar. As medições são validadas a partir de um piranômetro fotovoltaico de uma estação meteorológica, localizada na Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, Campus Araranguá. As irradiâncias foram medidas em todas as estações do ano e em dias totalmente ensolarados (sem nuvens). As irradiâncias foram medidas utilizando os três métodos de calibração das células de referência e tiveram uma forte correlação com a irradiância do piranômetro fotovoltaico da estação meteorológica.

Palavras-chave: Célula de referência. Sistemas fotovoltaicos. Radiação Solar.

1. INTRODUÇÃO

A produção de energia elétrica através da energia solar se provém da incidência da radiação solar nas células solares fotovoltaicas. Com o aumento do uso da energia solar fotovoltaica para a geração de eletricidade, tem-se a importância de realizar estudos da previsão precisa da radiação solar no local onde os sistemas fotovoltaicos serão instalados. As previsões precisas da radiação solar fornecem informações relacionadas às incertezas na geração de eletricidade de uma usina solar fotovoltaica. Através do conhecimento dessas incertezas se pode gerenciar a entrada de energia elétrica na rede elétrica de maneira que não cause distúrbios e flutuações de energia nessa rede (BAKKER *et al*, 2019).

Os instrumentos para medição da radiação solar global (difusa + direta) comercialmente disponíveis são conhecidos como piranômetro. Existem dois tipos principais de piranômetros: piranômetro termoeletrico e piranômetro fotovoltaico (PINHO e GALDINO, 2014; MACAGNAN, 2010; LORENZO, 2006; DUFFIE e BECKMAN, 2006). Os piranômetros do tipo fotovoltaico estão sendo cada vez mais utilizados para a medição da irradiância solar e são compostos por uma célula fotovoltaica de pequenas dimensões. A vantagem dos piranômetros fotovoltaicos são o seu baixo custo comparado com um sensor de termopilha e a não necessidade da correção espectral já que o sensor é uma célula fotovoltaica de c-Si com uma faixa espectral entre 400 a 1100 nm, semelhante ao módulo (ZEQIANG *et al*, 2013).

A medição da radiação solar *in situ* é importante para o desenvolvimento de projetos que visam a captação e a conversão da energia solar em outros tipos de energia. Entretanto, na maioria dos locais faltam medições precisas do recurso solar, devido ao alto custo do equipamento de medição da radiação solar (MARION, 2017).

Garcia *et al*, (2015) observaram a radiação solar no período de um ano para duas plantas fotovoltaicas localizadas em Amareleja, Portugal. Nove módulos calibrados foram espalhados por toda a área de superfície da planta e foram usados para medir a radiação no plano do rastreador e a temperatura dos módulos. A análise se concentrou nas consequências energéticas a longo prazo, em termos de incerteza na determinação dos índices de desempenho energético. Através das medidas foi observado altas diferenças de irradiância transitória. Um resultado particularmente notável é que os desvios diários de irradiância solar entre os pontos separados de 400 m são significativamente maiores do que se supõe-se. Em dias parcialmente nublados percebe-se uma diferença de irradiância entre os dois módulos de referência que estão a 750 m de distância. Essas diferenças ocorrem devido ao efeito lente que acontece em determinadas nuvens. Em dia claro a diferença de percentual de irradiância é menor que em dias nublados.

Este artigo apresenta as etapas de medição da irradiância solar utilizando os três métodos de calibração das células de referência. Essas medidas são comparadas com a irradiância solar do piranômetro fotovoltaico de referência da estação meteorológica localizada na planta piloto bioclimática da Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, Campus Araranguá.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A estrutura de encapsulamento e tecnologias das células fotovoltaicas utilizadas na construção das células de referência estão apresentadas na Tab. 1. As tecnologias das células utilizada na construção das células de referência foram de m- Si e mc-Si.

Tabela 1 – Estrutura das células de referência (fonte: do autor).

PROTÓTIPOS	ESTRUTURA	CÉLULA FV
CEL 1	Vidro/EVA/Tedlar	m-Si
CEL 2	Vidro/EVA/Tedlar	m-Si
CEL 3	Vidro/EVA/Tedlar	m-Si
CEL 4	Vidro/EVA/Tedlar	mc-Si
CEL 5	Vidro/EVA/Tedlar	mc-Si
CEL 6	Vidro/EVA/Tedlar	mc-Si

Para o desenvolvimento das células de referência, primeiramente as células fotovoltaicas foram metalizadas com fitas de estanho (1,8 mm). A metalização ocorreu em apenas 1 célula de m-Si e mc-Si. Após a metalização e montagem dos componentes as células passaram pelo processo de laminação para encapsulamento das células. Após a conclusão do processo de laminação, as células de referência desenvolvidas, não apresentaram nenhuma deformidade.

2.1 Caracterização das células de referência

As células foram calibradas por três métodos distintos de calibração. O primeiro método de calibração foi realizado através de um simulador solar (Pasan SunSim 3c) em condição padrão, $G_{SD} = 1000$ (W/m²), $T = 25$ °C e $AM = 1,5$.

Em ambiente *outdoor* as células de referência foram calibradas através de uma célula de referência padrão (calibrada) e um piranômetro termoeletrico padrão (calibrado). As seis células de referência, o piranômetro termoeletrico padrão (8,28 x 10⁻⁶ V/(W/m²)) e a célula de referência padrão (88,5 mV/(kW/m²)) foram anexadas em uma plataforma com orientação horizontal e exposta ao sol (sem nuvens). As constantes de calibração das células de referência estão demonstradas na Tab. 2.

Tabela 2 – Constantes de calibração das células de referência através dos métodos utilizados (fonte: do autor).

CARACTERIZAÇÃO DAS CÉLULAS DE REFERÊNCIA			
	Indoor	Outdoor	
Cel. Ref.		Cel. Ref. Padrão	Piranômetro Térmico
CEL 1	7,8913 A/1000 (W/m ²)	28,9 mV/1000 (W/m ²)	30,2 mV/1000 (W/m ²)
CEL 2	7,7717 A/1000 (W/m ²)	29,4 mV/1000 (W/m ²)	-
CEL 3	7,8262 A/1000 (W/m ²)	28,5 mV/1000 (W/m ²)	29,7 mV/1000 (W/m ²)
CEL 4	7,4959 A/1000 (W/m ²)	27,5 mV/1000 (W/m ²)	28,6 mV/1000 (W/m ²)
CEL 5	7,5705 A/1000 (W/m ²)	28,3 mV/1000 (W/m ²)	29,5 mV/1000 (W/m ²)
CEL 6	7,5366 A/1000 (W/m ²)	28,4 mV/1000 (W/m ²)	29,6 mV/1000 (W/m ²)

2.2 Medição da radiação solar

As medidas foram realizadas na Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, campus Araranguá. As células de referência foram anexadas em uma estrutura de ferro (Fig. 1) na posição horizontal ao plano da terra. Essa posição horizontal evita que a componente albedo da radiação solar entre em contato com a superfície da célula fotovoltaica, evitando um aumento de concentração da irradiância. A posição horizontal foi ideal a modo de comparação com o piranômetro referência (fotovoltaico) da estação, que se encontra também na posição horizontal. As medições ocorreram em todas as estações do ano e nos dias totalmente ensolarados (sem nuvem). As medições foram realizadas com um multímetro da marca *Minipa* ET-2082D. As medições de irradiância do piranômetro da estação eram computadas antes e após as medições das células de referência e realizado uma média com os dois valores. Os dois valores medidos do piranômetro eram sempre muito próximos, devido o dia ser totalmente ensolarado e haver pouca variação da irradiância nesse intervalo de tempo.



Figura 1 – Células de referência na estrutura de medição (fonte: do autor).

Nas células de referência, foram medidas a queda de tensão no resistor *shunt* após a corrente elétrica passar pelo resistor. O resistor *shunt* possui uma resistência de $0,00375 \Omega$ (Fig. 2). Após as medidas desses parâmetros foram calculadas as irradiâncias e comparado com o piranômetro fotovoltaico da estação meteorológica, da planta piloto bioclimática, localizada na Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, campus Araranguá.

As medidas foram realizadas em todas as estações do ano, exceto para a CEL 2. As medidas com a CEL 2 foram realizadas nas estações de outono, inverno e primavera. Através do uso do método *outdoor* para obter os valores de irradiância, foi usado somente a constante de calibração através da célula de referência calibrada.



Figura 2 – Resistor shunt anexado na célula de referência (fonte: do autor).

2.3 Incertezas nas medidas

A unidade *Minipa* ET-2082D é um dispositivo chamado multímetro digital utilizado para aquisição de dados para medições manuais. A medida da irradiância é obtida a partir da diferença de potencial no resistor *shunt* correspondente da célula de referência medida com esse equipamento. A Tab. 3 apresenta algumas especificações referentes a exatidão do instrumento.

Tabela 3 – Precisão do multímetro ET-2082D em diferentes faixas de escala para medição da tensão DC (Fonte: Manual de instruções do fabricante *Minipa* ET-2082D).

Faixa	Resolução	Precisão
200 mV	0,1 mV	
2 V	1 mV	$\pm (0,5 \% + 3D)$
20 V	0,01 V	
200 V	0,1 V	
1000 V	1 V	$\pm (0,8 \% + 10D)$

As medidas de tensão no resistor *shunt* das células de referência foram realizadas em uma faixa de 200 mV com uma resolução de 0,1 mV e uma precisão de $\pm (0,5 \% + 3D)$. As medições da G_{REF} foram através de uma célula de referência fotovoltaica instalada na estação meteorológica da planta piloto bioclimática. Os dados de irradiância eram acompanhados pelo datalogger. A faixa de medição desta variável vai de 0 a 1800 W/m^2 , com precisão de $\pm 5\%$ da escala total ou fundo de escala.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Medições da irradiância pelo método *indoor* ($G_{C,1}$)

A Fig. 3 apresenta uma correlação das medidas de irradiância ($G_{C,1}$) das células calibradas pelo simulador solar (*indoor*) em relação a G_{REF} do piranômetro fotovoltaico da estação. Observando a Fig. 3, a relação da medida da $G_{C,1}$ da CEL 1 está próxima ao G_{REF} . O valor de $R^2 = 0,9837$ está próximo de 1, isso indica que a $G_{C,1}$ da CEL 1 está próxima com a G_{REF} no momento da medição. Observando a Fig. 3 percebe-se que todas as células de referência possuem o R^2 próximo de 1. A CEL 2 de silício m-Si teve uma correlação mais próxima de 1 quando comparada com as outras, com um valor de $R^2 = 0,9947$.

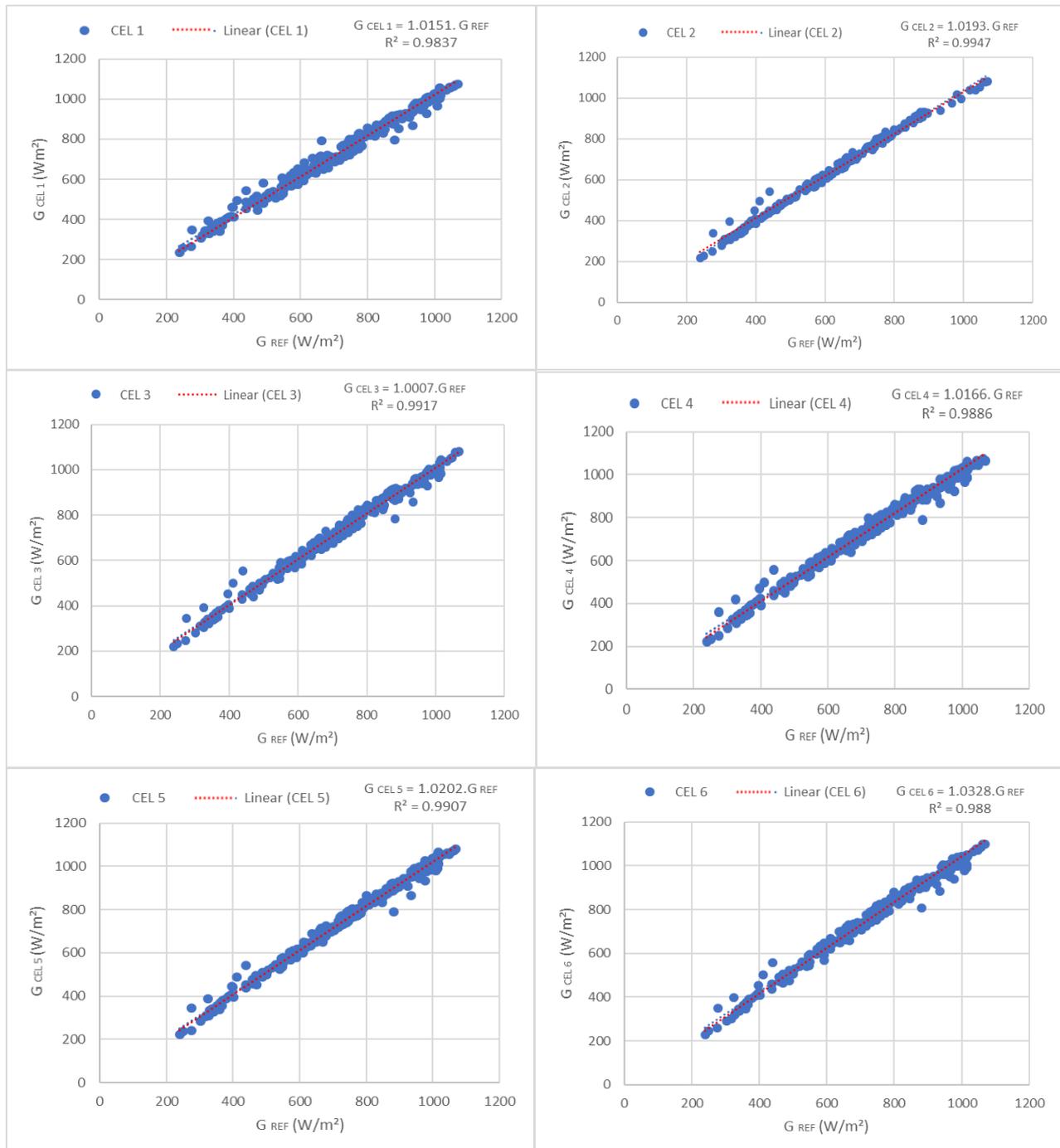


Figura 3 – Correlação das medições da $G_{C,1}$ com a G_{REF} .

3.2 Medições da irradiância pelo método *outdoor*, utilizando a constante de calibração da célula de referência calibrada ($G_{C,O,C}$) e do piranômetro de referência calibrado ($G_{C,O,P}$)

As Figs. 4 e 5 também apresentam as correlações das medidas de $G_{C,O,C}$ e $G_{C,O,P}$ em relação a G_{REF} do piranômetro fotovoltaico da estação. Observando a Fig. 4, a relação da medida da $G_{C,O,C}$ da CEL 1 está próxima ao G_{REF} . O valor de $R^2 = 0,9773$ está próximo de 1, isso indica que a $G_{C,O,C}$ da CEL 1 está próxima com a G_{REF} no momento da medição. Observando a Fig. 4 percebe-se que todas as células de referência possuem o R^2 próximo de 1. A CEL 2 de silício m-Si foi a célula que teve uma correlação mais próxima de 1, com um $R^2 = 0,9913$. A Fig. 5 mostra também uma forte correlação das medidas de $G_{C,O,P}$ em relação a G_{REF} do piranômetro fotovoltaico da estação. A CEL 3 também de silício m-Si foi a célula que teve uma correlação mais próxima de 1, com um $R^2 = 0,9836$.

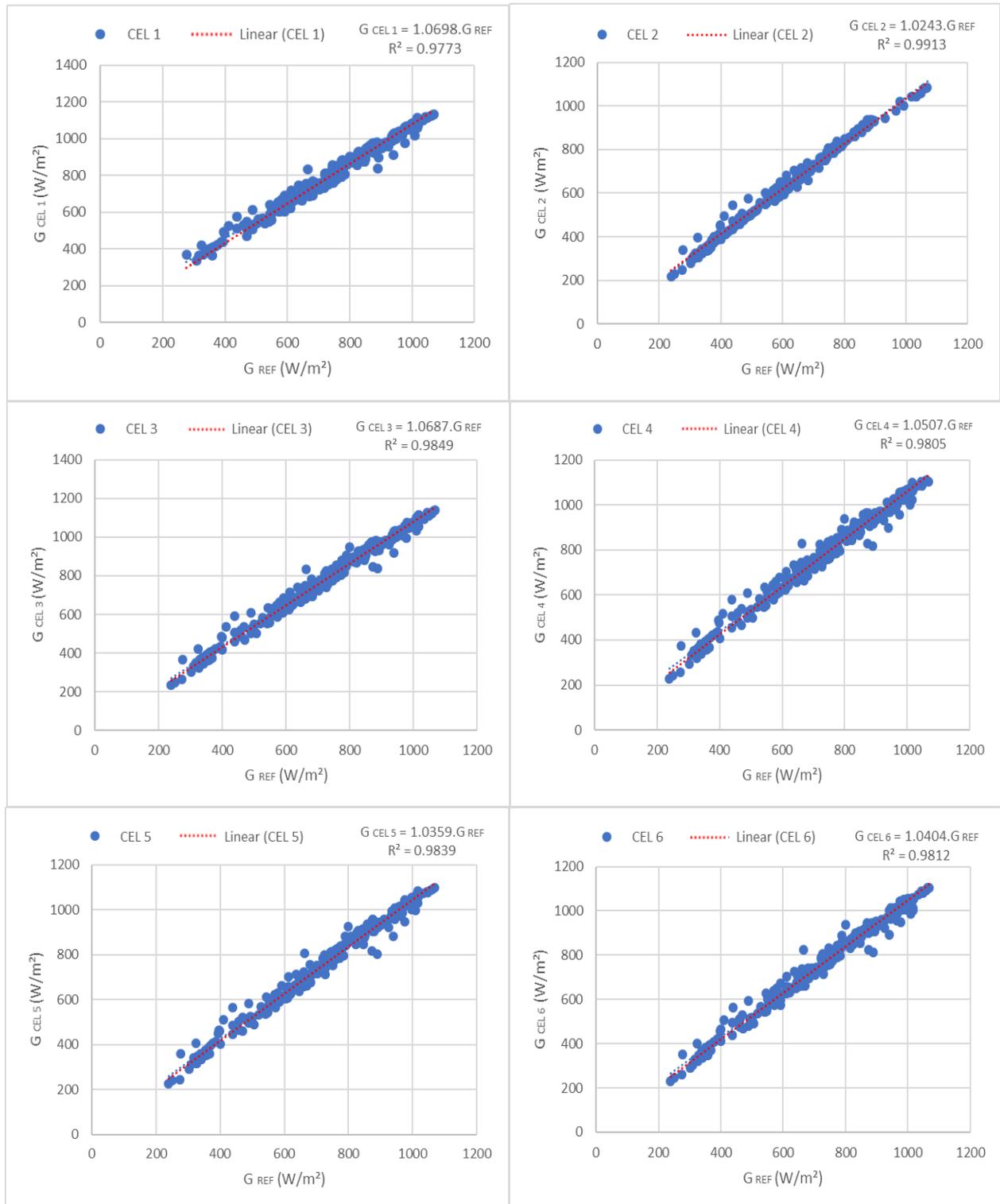


Figura 4 – Correlação das medições da $G_{C,O,C}$ com a G_{REF} .

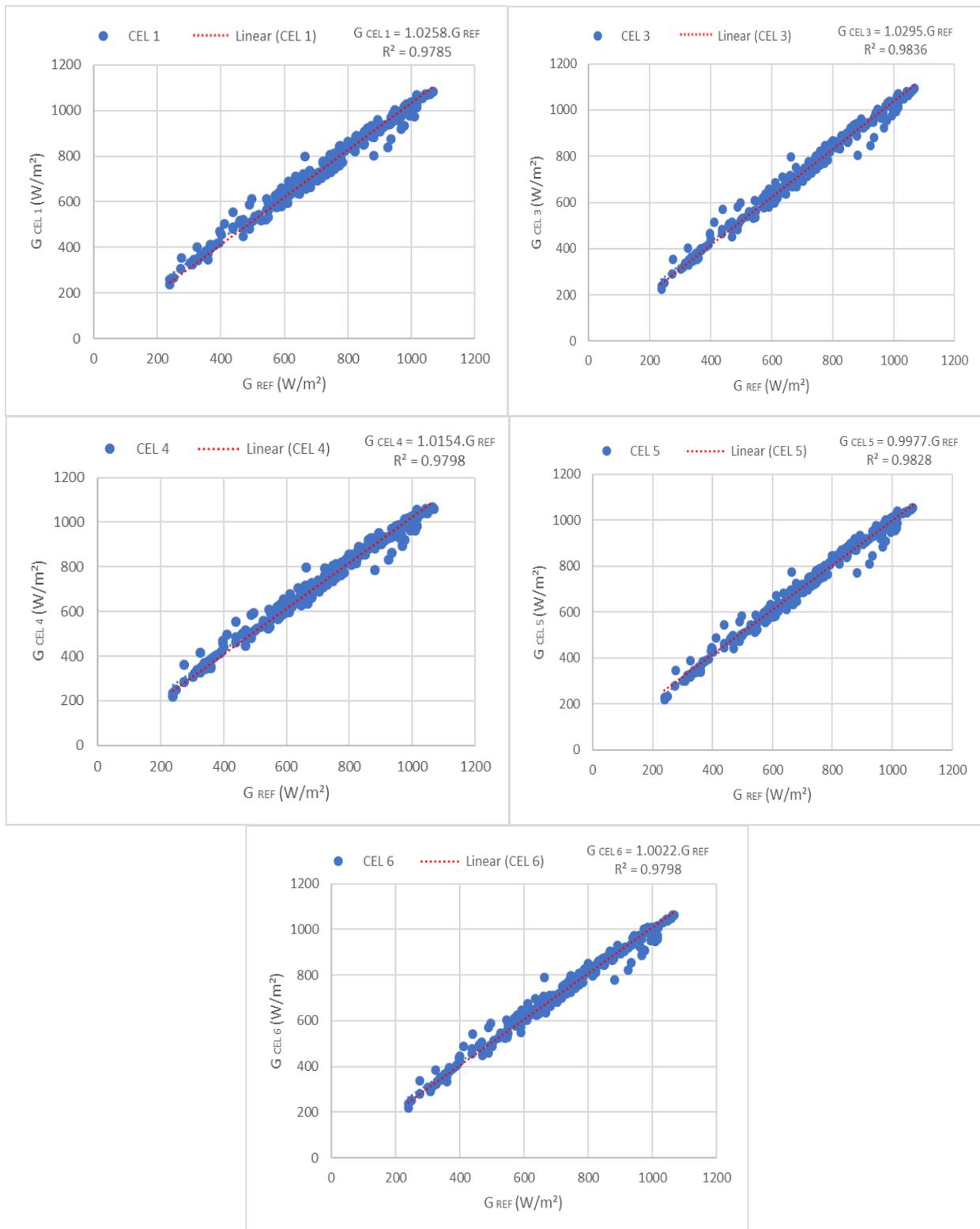


Figura 5 – Correlação das medições da $G_{C,O,P}$ com a G_{REF} .

As Figs. 6 e 7 apresentam a dispersão nas medições da radiação solar considerando os diferentes métodos de calibração das células de referência e as distintas estações do ano.

Analisando a Fig. 6 percebe-se que as três células de referência de m-Si com a calibração pela célula de referência padrão apresentaram maiores amplitudes máximas e mínimas em todas as estações do ano, quando comparado com os outros métodos de calibrações e com o piranômetro de referência da estação. Em todas as estações do ano a célula de referência quando calibrada pelo método *indoor* apresentaram uma correlação mais próxima quando comparado com o piranômetro de referência ($G_{P,R}$).

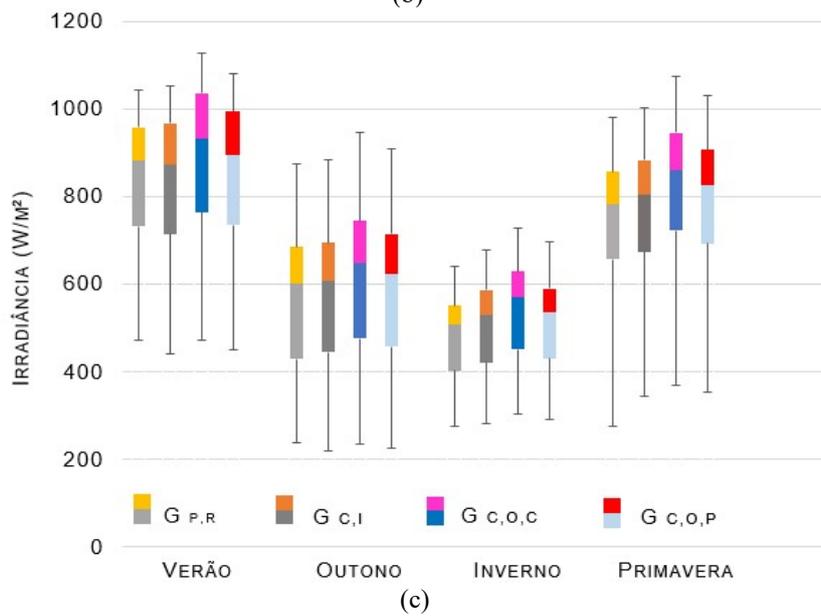
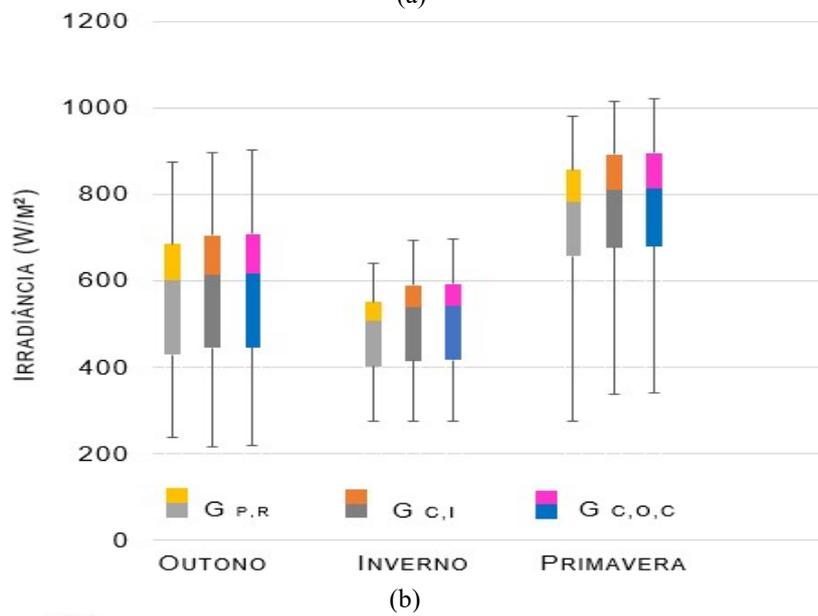
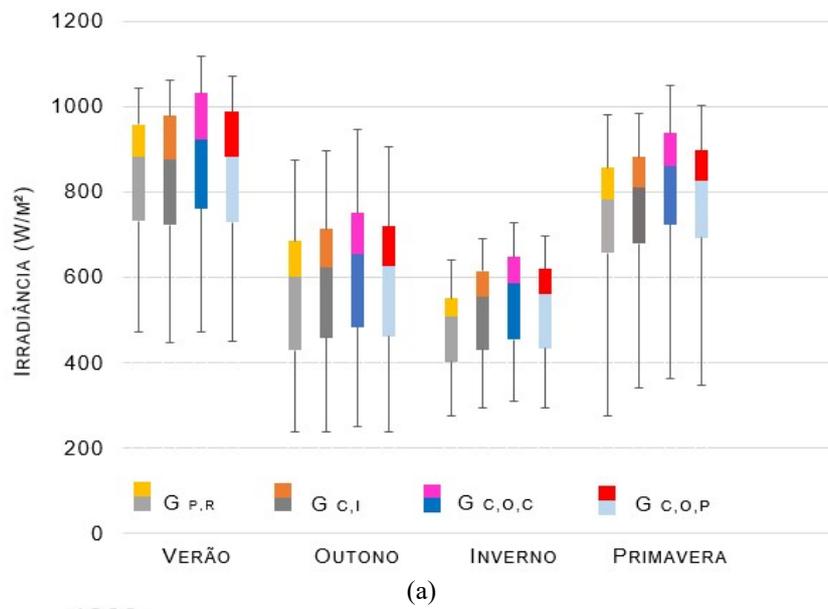


Figura 6 – CEL 1 (a), CEL 2 (b), CEL3 (c).

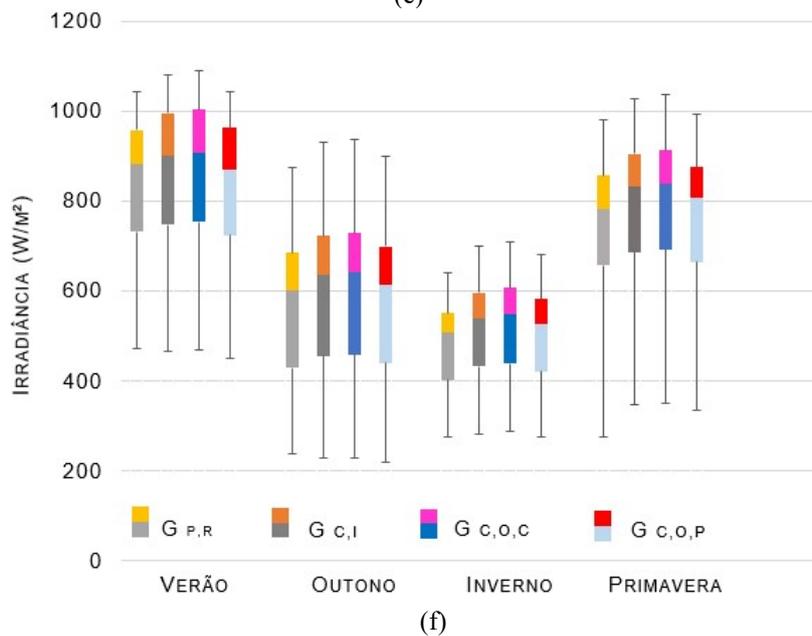
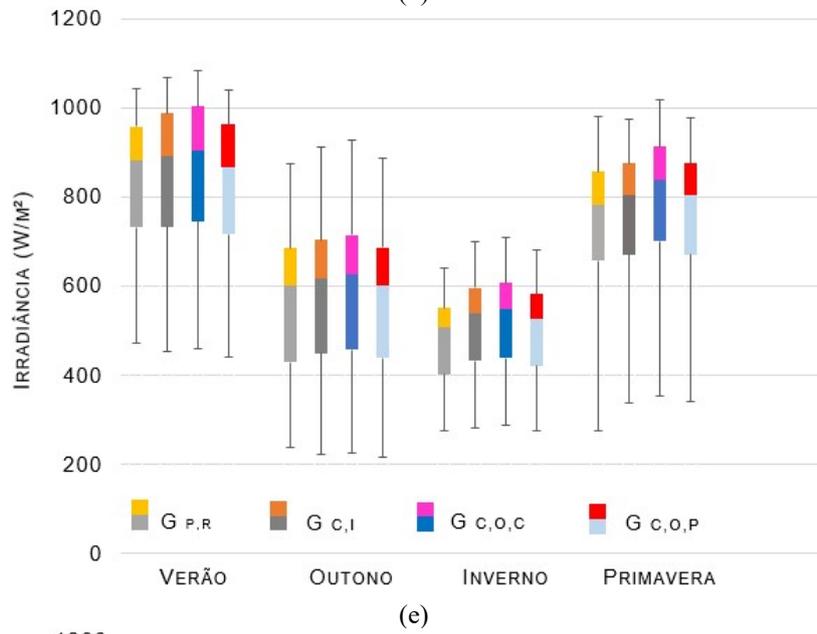
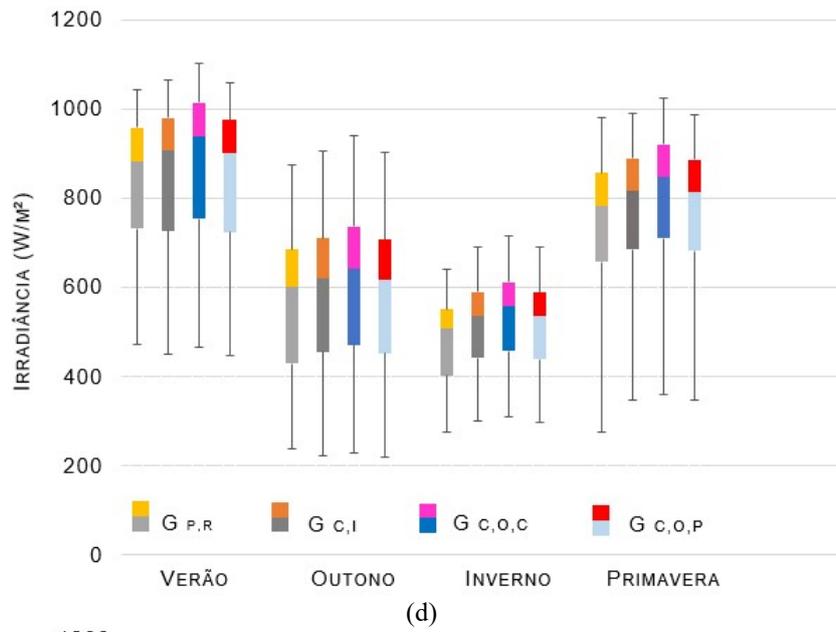


Figura 7 – CEL 4 (d), CEL 5 (e), CEL 6 (f).

As células de referência mostraram uma repetibilidade nas medições quando comparada uma com a outra em todas as estações do ano. Analisando para a estação de outono as três células de m-Si apresentaram amplitudes máximas de aproximadamente 940 W/m^2 quando calibradas pelo método *outdoor* com a célula de referência padrão. Analisando a Fig. 7 percebe-se que com as células de mc-Si aconteceu a mesma repetibilidade das medições que com as células de m-Si, quando comparadas uma célula com a outra, em todas as estações do ano as CEL 4, CEL 5 e CEL 6 tiveram o mesmo perfil. Novamente as células calibradas pelo método *indoor* apresentaram uma correlação mais próxima quando comparada com o piranômetro de referência da estação. Novamente a calibração pelo método *outdoor* com a célula de referência padrão apresentou amplitudes máximas e mínimas maiores quando comparadas com os outros métodos de calibração.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O método de construção das células de referência se mostrou eficaz, após a etapa de laminação as células não apresentaram nenhuma formação de bolhas, evitando assim, um aceleração na degradação por delaminação.

Os ensaios elétricos pelo método *indoor* para as células e módulos de referência foram realizados em simulador solar e a corrente de curto-circuito (I_{SC}) gerada pelas células de mc-Si é menor que a corrente gerada pelas células de m-Si, como já esperado, devido a tecnologia das células.

As células de referência nos três métodos de calibração apresentaram uma forte correlação quando comparadas com o piranômetro de referência apresentando um R^2 próximo de 1.

As células de referência mostraram uma repetibilidade nas medições quando comparada uma com a outra em todas as estações do ano. Como já esperada os maiores valores de irradiância foram encontradas na estação do verão, chegando em amplitudes de aproximadamente 1100 W/m^2 quando a célula de referência calibrada pelo método *outdoor* com a célula de referência padrão. Os valores menores foram na estação do inverno com amplitudes máximas de aproximadamente 700 W/m^2 com a célula de referência calibrada pelo método *outdoor* com a célula de referência padrão.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo auxílio financeiro, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Minas, Metalúrgica e Materiais (PPGE3M) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), ao Programa de Pós-Graduação em Energia e Sustentabilidade (PPGES) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Agradecimentos também ao Laboratório de Energia Solar (LABSOL) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) pela disponibilização de infraestrutura para realização dos ensaios.

Referências

- Bakker, K.; Whan, K.; Knap, W.; Schmetts, M., 2019. Comparison of statistical post-processing methods for probabilistic NWP forecasts of solar radiation. *Solar Energy*, v. 191, pp. 138-150.
- Duffie J. A. e Beckman W. A. *Solar Engineering of Thermal Processes*, 3ª edição, pp. 926. Wiley Interscience, New York, 2006.
- García, M.; Marroyo, L.; Lorenzo, E.; Marcos, J.; Pérez, M., 2015. Solar irradiation and PV module temperature dispersion at a large-scale PV plant. *Progress in Photovoltaics*, v. 23, pp. 1381-1389.
- Lorenzo, E. *Radiación Solar y Dispositivos Fotovoltaicos*, *Electricidad Solar Fotovoltaica*, V. II, Espanã, 2006.
- Macagnan, M. H. *Introdução a Radiação Solar*. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Unisinos, São Leopoldo, 2010.
- Marion, B.; Smith, B., 2017. Photovoltaic system derived data for determining the solar resource and for modeling the performance of other photovoltaic systems, *Solar Energy*, v. 147, pp. 349-357.
- Pinho, J. T., Galdino, M. A., 2014. *Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos*. Rio de Janeiro.
- Zeqiang, B.; Wenhua, L.; Yizhuo, S.; Xiaolei, H.; Wei, C., 2013. Research on Performance Test Method of Silicon Pyranometer. 11th IEEE International Conference on Electronic Measurement & Instruments.

MEASURING SOLAR RADIATION THROUGH LOW COST REFERENCE CELLS

Abstract. With the increasing use of solar photovoltaic energy for electricity generation, it is important to carry out studies of the precise prediction of solar radiation in the place where photovoltaic systems will be installed. Accurate solar radiation predictions provide information related to uncertainties in the electricity generation of a photovoltaic solar plant. Reference cells are instruments that can be used to measure global solar radiation (diffuse + direct). The reference cells were developed at the Applied Research Laboratory (LPA) of the Federal University of Santa Catarina (UFSC). Calibration procedures and methods can be performed by measurements in solar simulator (*indoor*) or under

natural lighting (outdoor). This paper presents the calibration constants of the reference cells using three different methods and the solar irradiance measurement steps and compared with the solar irradiance of the weather station photovoltaic pyranometer, located at the Federal University of Santa Catarina, UFSC, Araranguá campus. Irradiances were measured at all seasons of the year and on totally sunny (cloudless) days. The irradiance was measured using the three reference cell calibration methods and had a strong correlation with the weather station photovoltaic pyranometer irradiance.

Key words: Reference cell. Photovoltaic systems. Solar radiation.