

Desenvolvimento e caracterização de células de referência através dos métodos de calibração *Indoor* e *Outdoor*

Development and characterization of reference cells through the *Indoor and Outdoor* calibration methods

DOI:10.34117/bjdv6n12-265

Recebimento dos originais:08/11/2020

Aceitação para publicação:12/12/2020

André Possamai Rosso

Mestre em Energia e Sustentabilidade

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

Endereço:Rua Imigrante Meller, 1398, Criciúma, 88805-300, (Santa Catarina) Brasil

E-mail: possamairosso@yahoo.com.br

Giuliano Arns Rampinelli

Doutor em Engenharia Mecânica

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

Endereço:Rua Pedro João Pereira, 150, Araranguá, 88905-120, (Santa Catarina) Brasil

Email: giuliano.rampinelli@ufsc.br

Lirio Schaeffer

Doutor em Conformação Mecânica

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

Endereço;Av. Bento Gonçalves, 9500, Porto Alegre, 91501970, Caixa-postal: 15021(Rio Grande do Sul) Brasil

E-mail: schaeffer@ufrgs.br

RESUMO

As células de referência são dispositivos utilizados para a medição da radiação solar. As vantagens desses dispositivos são o reduzido custo de construção e operação e a resposta espectral idêntica à do módulo fotovoltaico, quando as células fotovoltaicas das células de referência forem da mesma tecnologia das células do módulo fotovoltaico. Os procedimentos e métodos de calibração das células de referência podem ser realizados mediante a medições em simulador solar (indoor) ou sob iluminação natural (outdoor). Este artigo apresenta as etapas de construção e os ensaios elétricos de calibração de células de referência para medição da irradiância solar desenvolvidas no Laboratório de Pesquisa Aplicada (LPA) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). As células de referência foram desenvolvidas a partir do processo de laminação para o encapsulamento das células fotovoltaicas. Em ensaios com simulador solar foram obtidas as curvas I-V, correlações de fator de forma e de corrente de curto-circuito para as células de referência. Os protótipos apresentaram fator de forma próximos de

70 %. A calibração outdoor foi realizada utilizando uma célula padrão (calibrada) e um piranômetro termoeétrico (calibrado).

Palavras-chave: Radiação solar, Célula de referênci., Calibração indoor e outdoor.

ABSTRACT

Reference cells are devices used to measure solar radiation. The advantages of these devices are the low cost of construction and operation and the spectral response identical to that of the photovoltaic module when the cells are of the same technology. Reference cell calibration for solar radiation measurement can be performed indoors or outdoors. Calibration procedures and methods can be performed by measurements in solar simulator or under natural light. This paper presents the construction steps and electrical calibration tests of reference cells for solar irradiance measurement developed at the Applied Research Laboratory (LPA) of the Federal University of Santa Catarina (UFSC). Reference cells were developed from the lamination process for encapsulating photovoltaic cells. In indoor simulations with solar simulator, I-V curves, shape factor and short-circuit current correlations were obtained for the reference cells. The prototypes had a form factor close to 70%. Outdoor calibration was performed using a standard cell (calibrated) and a thermoelectric pyranometer (calibrated).

Keywords: Solar radiation, Reference cell, Indoor and outdoor calibration.

1 INTRODUÇÃO

Em junho de 2019 o Brasil alcançou um número de 126.305 sistemas de geração distribuída a partir da energia solar. A capacidade total instalada desses sistemas alcança uma potência de aproximadamente 1,5 GW, Aneel (2019); Ideal (2019). O valor de potência alcançada em junho de 2019 é aproximadamente o dobro do valor quando comparado a junho de 2018, Aneel, (2019). Os sistemas fotovoltaicos de geração centralizada alcançaram um número de 2.473 sistemas instalados no Brasil. A capacidade total instalada desses sistemas alcança uma potência de 2.106.220 kW, Aneel, (2019).

A partir do conhecimento do perfil/comportamento da irradiância solar, pode-se viabilizar a instalação de sistemas fotovoltaicos em uma determinada região, garantindo o máximo aproveitamento do recurso ao longo de todo o ano, onde as variações da intensidade da radiação solar sofrem significativas alterações, Lorenzo (2006); Pinho e Galdino (2014); Pereira *et al.* (2017).

Desta forma, a informação sobre o recurso solar é a variável de maior importância no desenvolvimento de um projeto de sistema de aproveitamento da energia solar. Para que se torne viável financeiramente um projeto fotovoltaico, em média, a radiação solar exigida é de no mínimo 3 a 4 kWh/(m².dia), Lorenzo (2006); Pinho e Galdino (2014); Pereira *et al.* (2017); Babar *et al.* (2019).

A medição da irradiância em um único ponto na usina fotovoltaica, pode acarretar valores não compatíveis com os valores de geração de energia elétrica da usina fotovoltaica. Na geração fotovoltaica centralizada a dispersão espacial das condições de operações da usina pode afetar a representatividade dos valores medidos em um único ponto da planta, portanto, podendo haver mudanças nos resultados de desempenho de toda a geração de energia elétrica, Garcia *et al.* (2014). A variação da irradiância solar que ocorre nas usinas fotovoltaicas de geração centralizada pode causar flutuações na energia elétrica gerada dessas usinas, Marcos (2011).

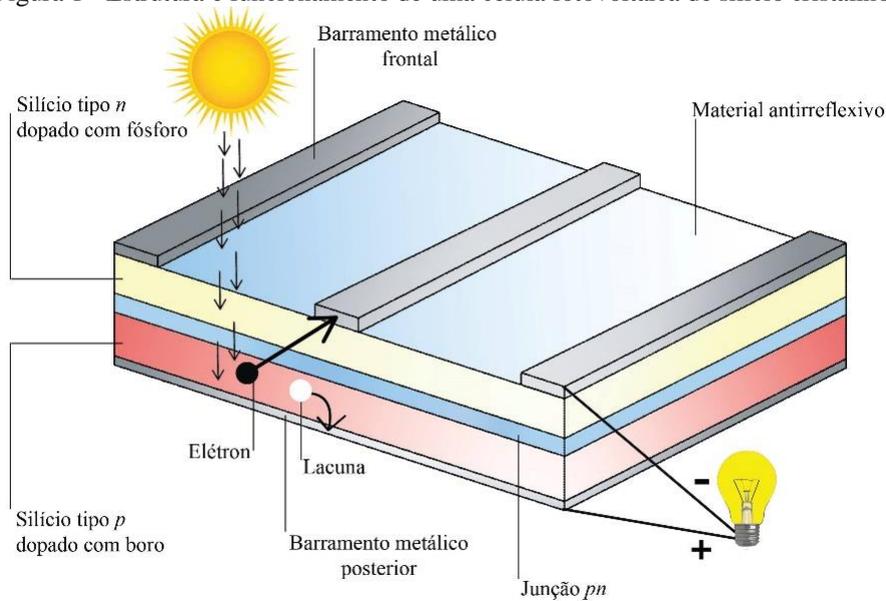
Os instrumentos para medição da radiação solar comercialmente disponível são conhecidos como: piranômetro e pireliômetro, o primeiro é usado para medições de radiação solar global (direta + difusa) que é a radiação de importância para os dispositivos fotovoltaicos. O segundo é usado para medidas da componente direta da radiação solar, Pinho e Galdino (2014); Bharadwaj e John (2014); Duffie e Beckman (2006). Este artigo apresenta as etapas de desenvolvimento de protótipos de células de referência de baixo custo para a medição da radiação solar global. A caracterização elétrica das células de referência foi realizada na Universidade Federal do Rio Grande do Sul pelo método *indoor* e pelo método *outdoor*. Para o método *outdoor* foi utilizado um piranômetro termoeletrico calibrado e uma célula de referência calibrada.

2 CÉLULA FOTOVOLTAICA DE SILÍCIO CRISTALINO (c-SI)

A célula fotovoltaica é um dispositivo que converte energia solar em energia elétrica. As células fotovoltaicas podem ser divididas devido à estrutura de ligação dos átomos envolvidos na composição da célula. A estrutura atômica pode ser dividida como cristalina ou amorfa e a estrutura cristalina pode ser: monocristalina, multicristalina ou microcristalina, Lorenzo (2006); Bühler (2011).

A corrente elétrica produzida na célula fotovoltaica é capturada através de uma grade de contato da célula. As células possuem um barramento metálico para a condução da corrente elétrica e a conexão com outras células. Uma área descoberta entre os barramentos metálicos é de extrema importância para permitir a entrada de radiação solar no material semicondutor. Essa face iluminada da célula é revestida com uma capa de material antirreflexo para aumentar o percentual de energia absorvida pela célula. A Fig. 1 apresenta a estrutura típica de uma célula fotovoltaica de silício cristalino

Figura 1 - Estrutura e funcionamento de uma célula fotovoltaica de silício cristalino.



3 CÉLULA DE REFERÊNCIA

Os simuladores solares apresentam não idealidade. Quando for usada uma célula de referência calibrada com precisão semelhante às células de um módulo fotovoltaico convencional, os erros devido a não idealidade serão largamente cancelados. Esta é a base sobre a qual a grande maioria das medições de células de referência é realizada. A alternativa, na ausência de uma célula de referência correspondente, é corrigir as não idealidades. Esta é a abordagem adotada pelos laboratórios de padrões. Os erros de incompatibilidade espectral são os mais difíceis de eliminar, eles são corrigidos pela técnica de correção de incompatibilidade espectral. Assim, é requerida uma medição precisa da irradiância espectral da fonte de luz, e as respostas espectrais das células do módulo de teste e de referência, Keogh e Blakers (2004).

Em plantas fotovoltaicas de grande porte a dispersão espacial das condições operacionais da planta podem afetar a representatividade dos valores medidos de um único ponto e, portanto, os resultados do desempenho. Essas variações dos valores de irradiação provavelmente não são apenas causadas pelo movimento das nuvens, mas também por outros fenômenos da nuvem, como por exemplo, o sombreamento de apenas uma zona limitada dentro do campo fotovoltaico, García *et al.* (2014).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Esta seção faz referência aos métodos utilizados no desenvolvimento dos protótipos dos medidores de irradiação e na caracterização elétrica. As células de referência foram desenvolvidas em

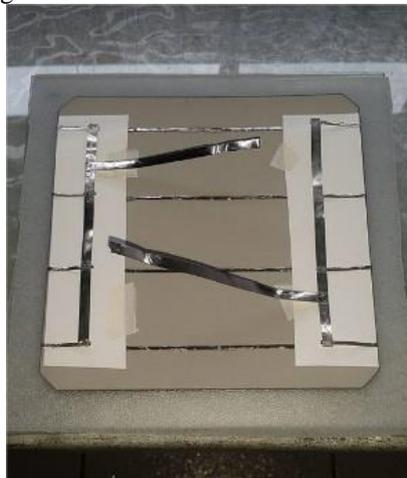
um processo semiprofissional, fazendo uso de equipamentos e componentes disponíveis no Laboratório de Pesquisa Aplicada da Universidade Federal de Santa Catarina.

4.1 CONSTRUÇÃO DAS CÉLULAS DE REFERÊNCIA

Para a obtenção das células de referência foi utilizado o polímero tedlar como material base, o polímero EVA para o encapsulamento das células fotovoltaicas e o vidro como material de cobertura, sendo que foram utilizadas células de silício cristalino m-Si e mc-Si.

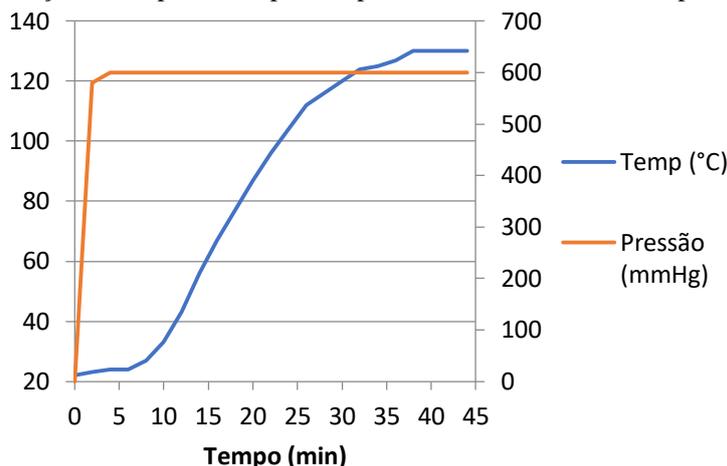
Para o desenvolvimento das células, primeiramente foram integradas fitas de estanho (1,8 mm) no processo de metalização das células de m-Si e mc-Si. A metalização ocorreu em apenas 1 célula fotovoltaica de m-Si e mc-Si como pode ser observado na Fig. 2. Após a metalização e montagem dos componentes as células passaram pelo processo de laminação para encapsulamento das células.

Figura 2 - Estrutura da célula de referência.



No processo de laminação são alcançadas temperaturas entre 120 °C e 150 °C, quando o EVA se torna líquido e as eventuais bolhas de ar geradas são eliminadas, Pinho e Galdino (2014). No processo de laminação dos protótipos, a pressão é reduzida a 600 mmHg e a temperatura atinge valores da ordem de 132 °C. A Fig. 3 apresenta a distribuição de temperatura e pressão ao longo do processo de laminação para a célula de referência.

Figura 3 - Distribuição da temperatura e pressão para a célula de referência no período de laminação.



Observando a Fig. 3, percebe-se que no processo de laminação o perfil de temperatura ao longo do tempo é linear em praticamente todo o processo. A pressão em curto tempo se torna constante com valor de 600 mmHg, até o término da laminação. Observa-se, que o tempo total de laminação da célula de referência foi de aproximadamente 44 minutos.

4.2 PROTÓTIPOS DAS CÉLULAS DE REFERÊNCIA

A estrutura de encapsulamento e tecnologias das células fotovoltaicas dos protótipos 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

Após a conclusão do processo de laminação, as células desenvolvidas, não apresentaram nenhum defeito. Através do método de inspeção visual as células foram avaliadas e não apresentaram nenhuma formação de bolhas no EVA após o processo de laminação, conforme pode ser observado nas Fig. 4 e 5. Um resistor *shunt* foi integrado no *tedlar* e interligado nos terminais da célula (Fig. 6). A partir da queda de tensão medida no resistor pode-se calcular a irradiância do momento e local da medição.

Figura 4 – Células de referência de m-Si (CEL 1, CEL 2 e CEL 3).



Figura 5 – Células de referência de mc-Si (CEL 4, CEL 5 e CEL 6).

Figura 6 – Resistor *shunt* anexado na célula de referência.

4.3 CARACTERIZAÇÃO ELÉTRICA

4.3.1 Caracterização a partir de simulador solar (*indoor*)

O módulo fotovoltaico é submetido às condições padrões de ensaio, uma fonte de tensão variável realiza uma varredura entre uma tensão negativa em relação aos terminais do módulo, até ultrapassar a tensão de circuito aberto do módulo com a corrente ficando negativa. Durante esta

varredura são registrados pares de dados de tensão e corrente, permitindo o traçado de uma curva característica, Pinho e Galdino (2014).

O desempenho de células e módulos fotovoltaicos normalmente é associado às condições de teste padrão (*Standart Test Conditions –STC*), ou seja, nível de irradiância de 1000 W/m² ou também conhecido como 1 sol, distribuição espectral correspondente a AM1,5 e temperatura de célula de 25°C. Estas condições de irradiância representam as condições de operação de um dia de céu claro, entretanto, a temperatura em operação frequentemente resulta em temperaturas próximas a 50 °C. A diferença entre essas temperaturas proporciona também uma diferença entre a potência entregue pelo módulo fotovoltaico e a potência nominal, devido à queda de tensão, Macêdo (2006).

A caracterização de módulos fotovoltaicos em simuladores solares (*indoor*) vem se tornando mais comum do que a caracterização em *outdoor*. Uma vantagem do uso de simuladores solares *indoor* é que o equipamento é independente do clima e do tempo meteorológico, podendo realizar simulações a qualquer momento do dia. Para as empresas produtoras de módulos fotovoltaicos os simuladores solares são muito importantes para a certificação do produto, Carrilo *et al.* (2017).

A caracterização das células de referência foi realizada através de um simulador solar (Pasan SunSim 3c, classe AAA) (*indoor*). A simulação consiste em verificar os aspectos técnicos e parâmetros das curvas I-V. Os testes foram realizados no laboratório de Energia Solar (LABSOL) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

4.3.2 Caracterização a partir de sol natural (*outdoor*)

Em condições de céu limpo e com os piranômetros na posição horizontal a calibração é realizada com leituras instantâneas de tensão em ambos os instrumentos, por no mínimo de 15 a 20 minutos, contendo cada uma com 21 ou mais leituras instantâneas. Essas medições são realizadas durante um período de 2 a 3 dias ou até obter um número razoável dos dados. A calibração se realiza no início da manhã, passando pelo meio dia solar e terminando durante a tarde, garantindo que os dados coletados são durante um período que garante que o ângulo solar de elevação exceda 20°.

A calibração das células de referências (*outdoor*) também foi realizada na Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. As seis células de referência, um piranômetro termoeletrico calibrado (8,28 x 10⁻⁶ V/(W/m²)) e uma célula de referência padrão (calibrada) com uma constante de calibração de (88,5 mV/(kW/m²)) foram anexadas em uma plataforma com orientação horizontal e exposta ao sol (sem nuvens), conforme a Fig. 7.

Figura 7 – Calibração *outdoor* das células de referência.

Todos os dispositivos foram conectados no cartucho do datalogger Multifunction 34980A, da marca Agilent Technologies. A unidade Agilent 34980A é um dispositivo utilizado para aquisição de dados que permite visualizar as leituras através da tela de um computador. Os dados de tensão de cada dispositivo foram medidos diretamente em um tempo de 3 horas, com passo de um minuto. A CEL 2 não foi calibrada no mesmo dia das demais e quando calibrada foi apenas com a célula de referência (padrão).

Em um período de 3 horas de medição foram registrados valores de tensão com diferentes valores de irradiância dos protótipos, célula de referência e piranômetro termoeletrico. Com os dados de tensão medidos do piranômetro e da célula de referência chega-se na radiação solar através da constante de calibração dos dispositivos. Com esses valores de irradiâncias se constrói o gráfico com a tensão medida de cada protótipo. Realizando uma regressão linear chega-se a uma constante de calibração para cada protótipo. O valor da irradiância medida pelos protótipos vai ser a tensão medida dividida pela constante de calibração do protótipo.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta seção apresenta os resultados obtidos a partir do método apresentado, bem como discussões relevantes acerca dos mesmos.

5.1 CARACTERIZAÇÃO *INDOOR* DAS CÉLULAS DE REFERÊNCIA

As curvas características I-V das células foram obtidas através de um simulador solar (*indoor*) em condição padrão, com irradiância de 1000 W/m², temperatura de célula de 25 °C e AM 1,5. As curvas I-V em condição padrão dos protótipos são apresentadas nas Fig. 8 e 9.

Observando as Fig. 8 e 9 percebe-se que as curvas I-V das células de referência são coincidentes. Essa proximidade das curvas demonstra uma repetibilidade no processo construtivo das seis células de referência. O valor da V_{OC} das células está próximo de 0,62 V para as duas tecnologias de silício cristalino. A I_{SC} gerada pelas células de mc-Si é menor que a corrente gerada pelas células de m-Si devido a tecnologia das células e essa diferença é notável na curva I-V. A I_{SC} nas células de m-Si é aproximadamente de 7,8 A enquanto a I_{SC} para as células de mc-Si é aproximadamente de 7,5 A.

Figura 8 – Curvas I-V das células de referência de m-Si, G = 1000 W/m², T_{célula} = 25 °C e AM1,5.

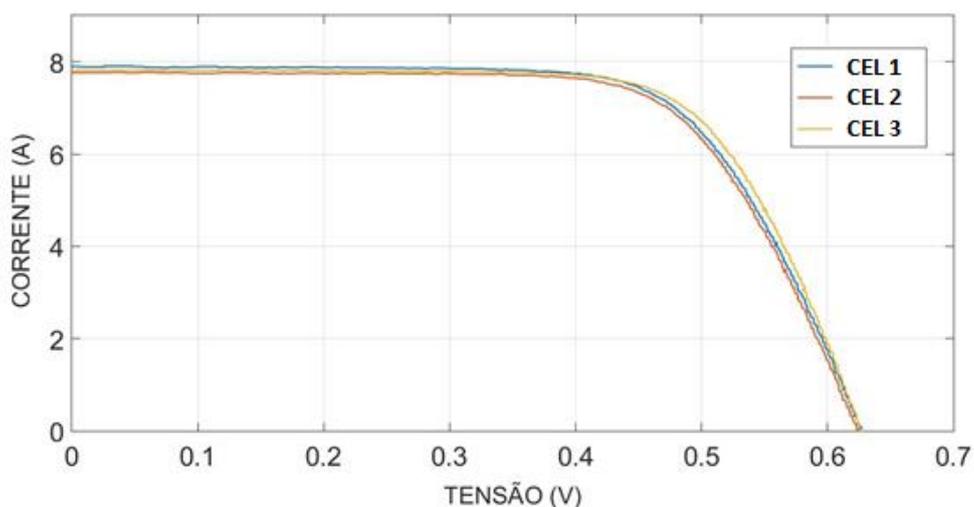
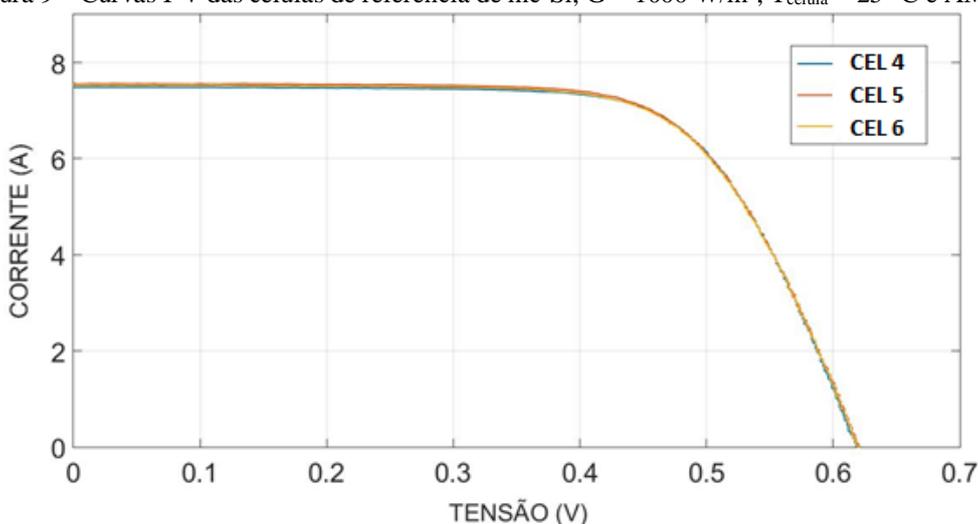


Figura 9 – Curvas I-V das células de referência de mc-Si, G = 1000 W/m², T_{célula} = 25 °C e AM1,5.



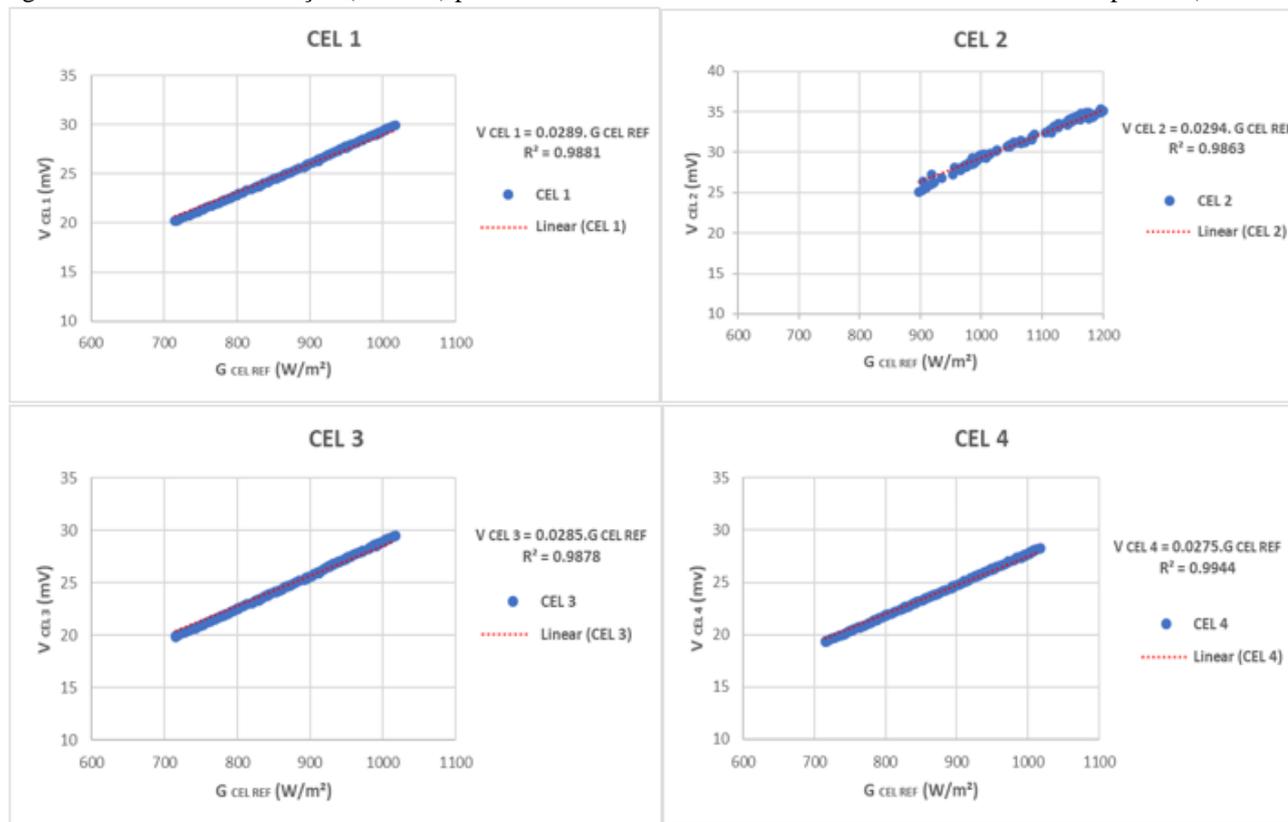
5.2 CARACTERIZAÇÃO OUTDOOR DAS CÉLULAS DE REFERÊNCIA

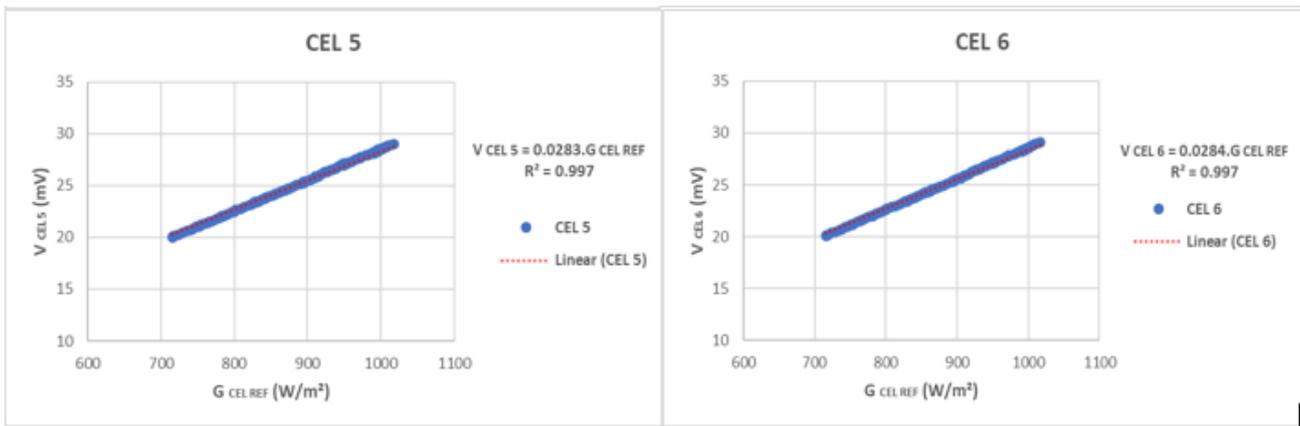
A caracterização outdoor dos protótipos de células de referência foram divididas em calibração através de uma célula de referência padrão (calibrada) e calibração através de um piranômetro termoeletrico.

5.2.1 Caracterização utilizando à célula de referência padrão (calibrada)

As medidas de tensão das CEL 1, CEL 3, CEL 4, CEL 5 e CEL 6 foram realizadas no mesmo dia. Os valores de tensão para a CEL 2 foram coletados em um dia diferente dos outros protótipos e com apenas a célula de referência padrão (calibrada). A curva de calibração e a constante de calibração das células de referência em relação a célula de referência padrão (calibrada), estão apresentadas na Fig. 10. Analisando a Fig. 10, observa-se a equação da reta e a constante de calibração para as células de referência. Observando para a CEL 1, a equação da reta é de $V_{CEL\ 1} = 0,0289 \cdot G_{CEL\ REF}$, com uma constante de calibração de 28,9 mV/1000 (W/m²), através das células de referência calibradas através da célula de referência padrão.

Figura 10 - Curva de calibração (outdoor) para as células de referência utilizando a célula de referência padrão (calibrada).

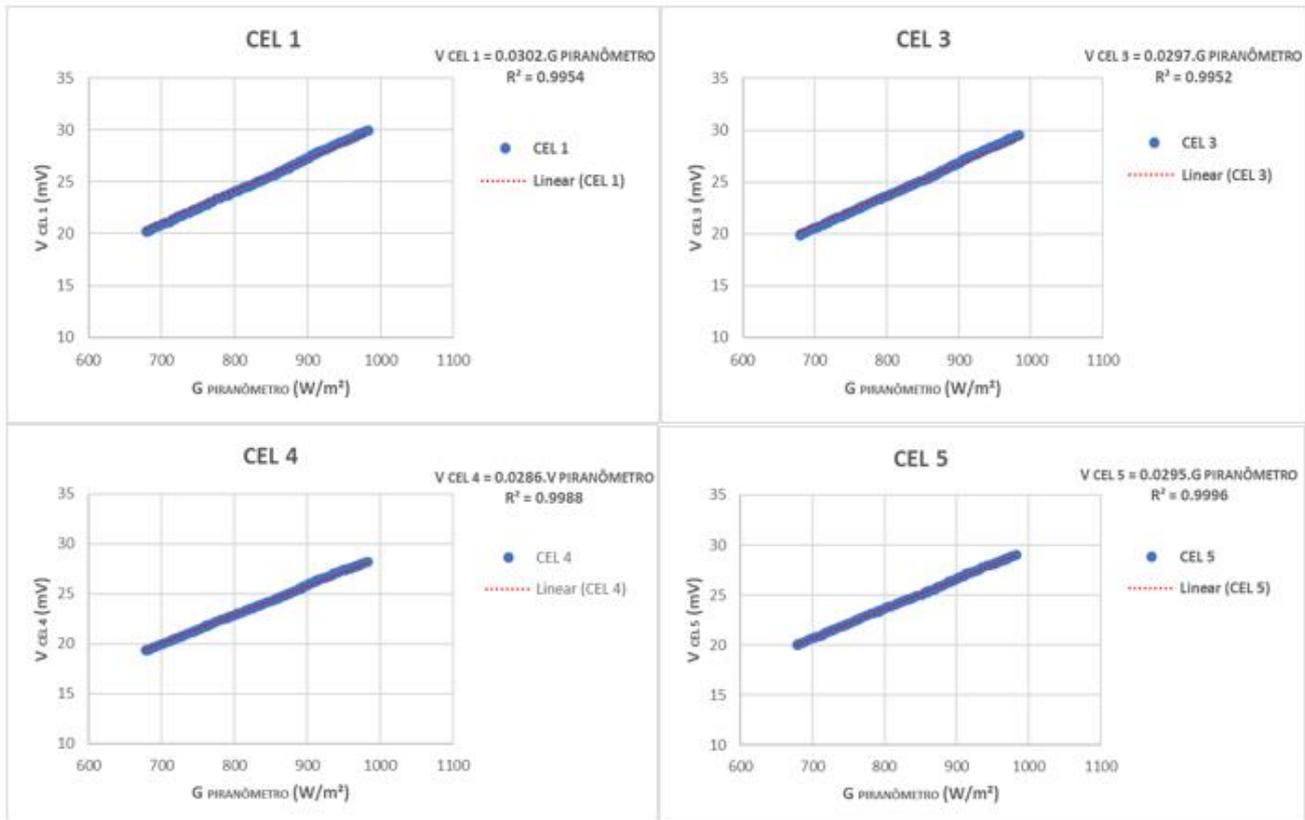


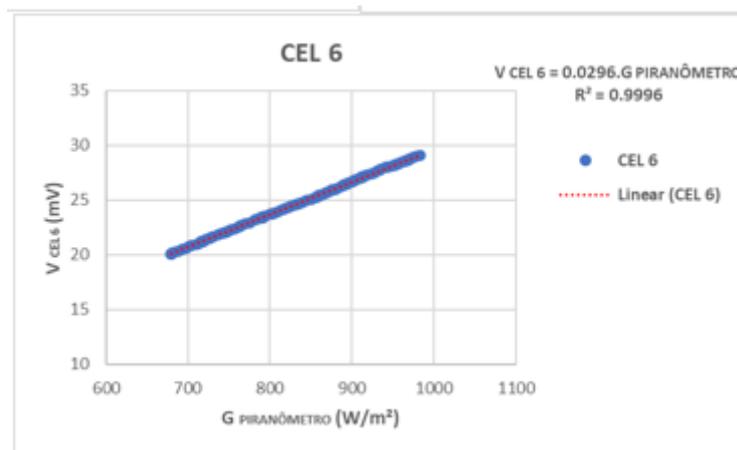


5.2.2 Caracterização utilizando o piranômetro termoeétrico (calibrado)

A curva de calibração e a constante de calibração das células de referência em relação ao piranômetro termoeétrico (calibrado), estão apresentadas na Fig. 11. Analisando à Fig. 11, observa-se que a equação da reta para a CEL 1 é de $V_{CEL1} = 0,0302 \cdot G_{PIRANÔMETRO}$, ou seja 30,2 mV/1000 (W/m²), através das células de referência calibradas com o piranômetro termoeétrico calibrado.

Figura 11 - Curva de calibração (outdoor) para as células de referência utilizando o piranômetro térmico padrão (calibrado).



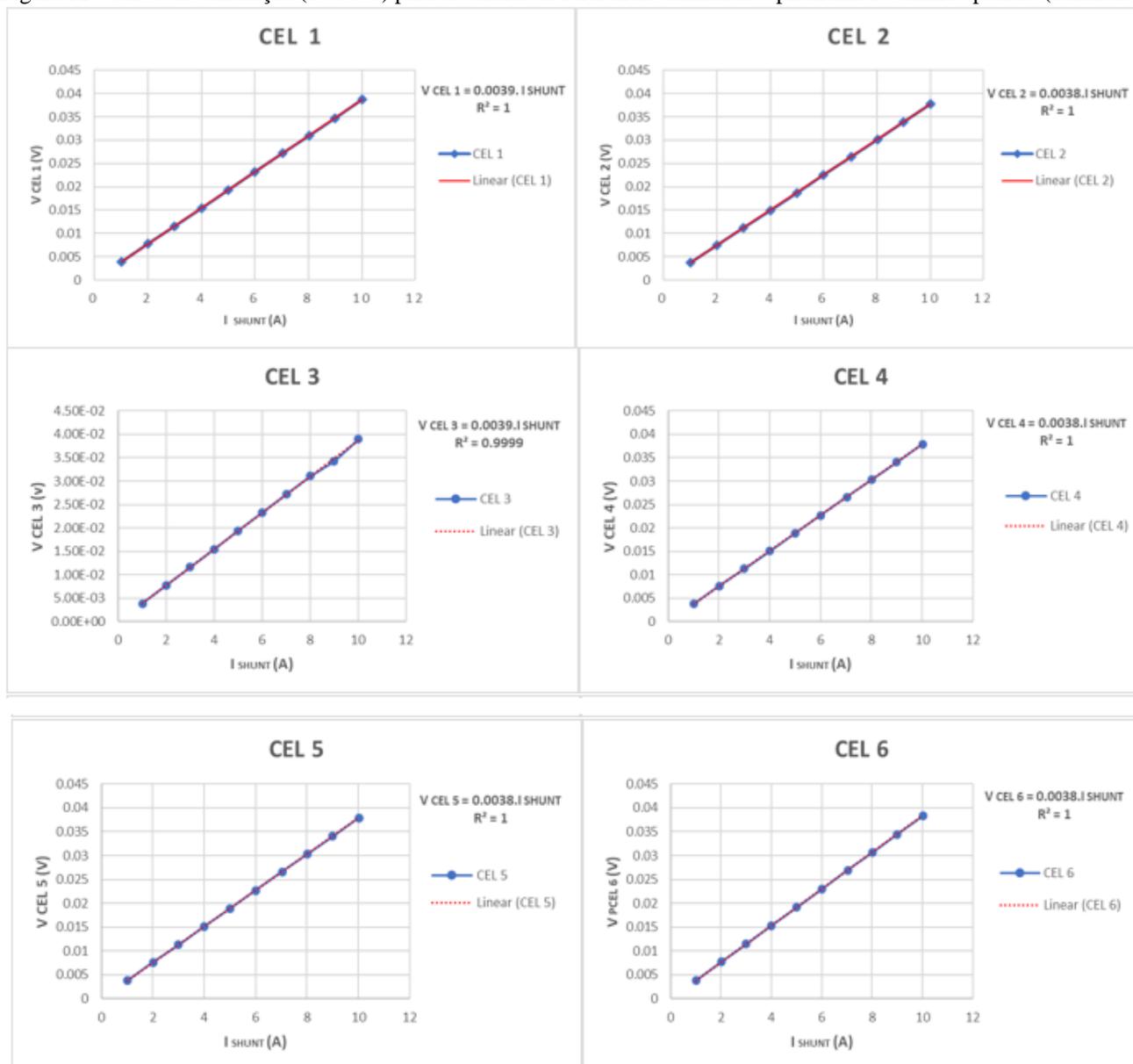


Observando as constantes de calibração através dos dois métodos de calibração *outdoor*, percebe-se que a diferença das duas constantes, é relativamente pequena quando as medições de irradiâncias são realizadas em campo.

5.2.3 Calibração do resistor *shunt*

Na calibração dos resistores *shunts*, as células de referência junto aos resistores foram conectadas em série uma com a outra. A primeira célula é conectada com o resistor *shunt* padrão que é ligado na fonte de corrente e no multímetro. Na última célula o resistor *shunt* é ligado na fonte de corrente. A escolha dos valores de tensão aplicada foi decorrente aos valores de corrente desejável que variaram de 1,008 a 10,021 A, com passo de 1 A. Nos dias ensolarados a corrente elétrica na célula fotovoltaica dificilmente atingiu um valor de 10 A. Para cada passo foi medido a queda de tensão nos resistores *shunts* de cada protótipo.

Como a resistência do resistor *shunt* padrão é conhecida de $R = 0,01 \Omega$, foi determinada a corrente elétrica em todos os protótipos para cada passo aplicado. A tensão (mV) nos resistores *shunts* de cada protótipo foi medida para cada valor de corrente aplicado. Com os valores de tensão e corrente se determina o valor de resistência de cada resistor *shunt*. A constante de calibração do *shunt* para cada protótipo foi determinada através da Fig. 12.

Figura 12 - Curva de calibração (*outdoor*) para as células de referência utilizando o piranômetro térmico padrão (calibrado).

No momento da calibração das células de referência pelo simulador solar (*indoor*), as células de referência não estavam com o resistor *shunt* anexado. A constante de calibração do resistor *shunt* foi determinada com o propósito de determinar o valor de irradiância através do método de calibração *indoor*.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho apresentou a construção e caracterização de células de referência para medição da radiação solar. Algumas técnicas e métodos em escala de laboratório foram utilizadas para construção e caracterização dessas células.

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

Os ensaios elétricos pelo método indoor foram realizados em simulador solar. A 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.

A calibração através do método *outdoor* por célula de referência padrão e piranômetro de referência padrão se mostraram eficaz. A diferença das constantes de calibração através dos dois instrumentos de calibração utilizados no método *outdoor*, são relativamente pequenas quando comparado uma com a outra.

Percebeu-se que para medição em campo da radiação solar podemos utilizar qualquer um dos três métodos de calibração devido as constantes de calibração estarem com valores próximos.

REFERÊNCIAS

- ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica, Banco de Informações de Geração (BIG), 2019. <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>, Acesso em: 26 jun. 2019.
- Babar, B.; Graversen, R.; Boström, T. Solar radiation estimation at high latitudes: Assessment of the CMSAF databases, ASR and ERA5. **Solar Energy**, v. 182, pp. 397-411, 2019.
- Bharadwaj, P.; John, V. Design, Fabrication and Evaluation of Solar Irradiation Meter, IEEE International Conference on Power Electronics, drives and energy systems systems (Pedes), 2014.
- Bühler, A. J. Estudo de técnicas de determinação experimental e pós processamento de curvas características de módulos fotovoltaicos, Tese de Doutorado, UFRGS, Porto Alegre, 2011.
- Carrillo, J. M.; Martínez-Moreno, F.; Lorenzo, C.; Lorenzo, E. Uncertainties on the outdoor characterization of PV modules and the calibration of reference modules, *Solar Energy*, v. 155, pp. 880-892, 2017.
- 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., 2014. Solar irradiation and PV module temperature dispersion at a large-scale PV plant. *Progress in Photovoltaics*, Vol. 23, pp. 1381-1389.
- Instituto para o Desenvolvimento de Energias Alternativas na América Latina, IDEAL, 2019. <<http://americadosol.org/>>, Acesso em: 03 jun. 2019.
- Keogh, W. M.; Blakers, A. W. Accurate Measurement, Using Natural Sunlight, of Silicon Solar Cells, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, v. 12, pp. 1-19, 2004.
- Lorenzo, E. *Radiación Solar y Dispositivos Fotovoltaicos*, *Electricidad Solar Fotovoltaica*, V. II, España, 2006.
- Macêdo, W. N., 2006. Análise do fator de dimensionamento do inversor aplicado a sistemas fotovoltaicos conectados à rede, Tese de Doutorado, Programa Pós-graduação em Energia, USP, São Paulo.
- Marcos, J.; Marroyo, L.; Lorenzo, E.; Alvira, D.; Izco, E. Power output fluctuations in large scale PV plants: one year observations with one second resolution and a derived analytic model, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, v. 19, pp. 218-227, 2011.
- Pereira, E. B.; Martins, F. R.; Gonçalves, A. R.; Costa, R. S.; Lima, F. J. L.; Rüther, R.; Abreu, S. L.; Tiepolo, G. M.; Pereira, S. V.; Souza, J. G. *Atlas Brasileiro de Energia Solar*, 2ª edição, pp. 88. São José dos Campos, 2017.
- Pinho, J. T., Galdino, M. A., 2014. *Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos*. Rio de Janeiro.