

Desenvolvimento de um Sistema Completo para Caracterização de Células Solares

Dario Eberhardt – darioe@puers.br

Izete Zanesco – izete@puers.br

Adriano Moehlecke – moehlecke@puers.br

Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Faculdade de Física, *Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia dos Materiais - PGETEMA*,
Centro Brasileiro para Desenvolvimento Energia Solar Fotovoltaica – NT-Solar

4.4 Outros Instrumentos de Medição

Resumo. *No Brasil, o desenvolvimento de células solares está crescendo gradativamente nos últimos anos. Para caracterizar estas células é necessário um equipamento que possa realizar a medição dos parâmetros elétricos sob condições padrão, segundo a norma internacional IEC 904-9. O objetivo deste trabalho é desenvolver um equipamento capaz de classificar um sistema completo para caracterização elétrica de células solares. Este equipamento é constituído por plataforma termostaticada, sistema de vácuo, subsistema de caracterização elétrica e subsistema de iluminação, também denominado de simulador solar. O simulador foi caracterizado pela uniformidade da irradiância no plano de medição, pela estabilidade temporal e pela distribuição espectral da irradiância. Embora varias lâmpadas foram testadas o simulador solar com a lâmpada halógena CYX, foi o que apresentou melhor performance, sendo que a não uniformidade da irradiância na superfície da plataforma termostaticada, segundo a norma IEC, foi de 4,8%. Neste caso, o dispositivo foi classificado como B para a área circular total de 115 mm de diâmetro. No que se refere à estabilidade temporal, este subsistema é classe A. No entanto, o simulador solar com lâmpadas halógenas CYX e com vidro comum de 40 mm de espessura foi caracterizado como classe C. Portanto, o subsistema de iluminação com lâmpadas halógenas CYX foi associado aos outros subsistemas e segundo as normas IEC, o equipamento completo para caracterização de células solares é classificado como classe C. Uma célula solar de silício cristalino foi medida no sistema desenvolvido e seu o resultado foi comparado com a característica I-V medida no simulador solar do Instituto de Energia Solar da Universidade Politécnica de Madri, sendo que a diferença encontrada na corrente de curto-circuito foi de +2,7% e a variação absoluta na eficiência da célula solar é de +0,6%.*

Palavras-chave: *Células Solares, Simulador Solar e Curva I-V.*

1. INTRODUÇÃO

O suprimento das necessidades energéticas para a sociedade atual representa uma das mais importantes metas da atualidade, não somente pelas exigências da sociedade moderna e pelo desenvolvimento da tecnologia, que resultam num aumento constante da demanda energética, mas também pelo fato de que todos habitantes do planeta têm direito à energia elétrica.

Neste contexto, a produção de energia elétrica a partir de fontes de energia renováveis ganha destaque, pois, além de serem inesgotáveis, praticamente não trazem danos ao meio ambiente. Dentre as fontes de energia renováveis para produção de energia elétrica destaca-se a energia solar. Esta tecnologia, denominada de energia solar fotovoltaica, está bastante desenvolvida em nível mundial,

segundo Partain, L.D (1995), pois apresenta vantagens como a de não ser poluente, ser modular e estar disponível na maior parte do planeta. Além disso, nos países desenvolvidos, os governos destinam grandes incentivos financeiros para a instalação de sistemas fotovoltaicos, para o desenvolvimento científico e tecnológico e para sua divulgação.

A célula solar é um dispositivo que, por meio do efeito fotovoltaico, converte diretamente energia solar em elétrica. No Brasil, alguns laboratórios (Pan 2004), centros de pesquisa desenvolvem células solares e surge a necessidade da utilização de simuladores solares para caracterização experimental destes dispositivos.

A corrente elétrica de curto-circuito, a tensão de circuito aberto, o fator de forma e a eficiência permitem caracterizar o dispositivo fotovoltaico. Estes parâmetros são determinados a partir da curva da corrente elétrica em função da diferença de potencial aplicada (I-V) sobre o dispositivo, representada na Fig. 1.

A curva I-V deve ser medida sob determinadas condições padrão internacionalmente estabelecidas:

- Irradiância incidente: 1000 W/m^2
- Espectro da irradiância incidente: AM1,5G
- Temperatura da célula: $25 \text{ }^\circ\text{C}$.

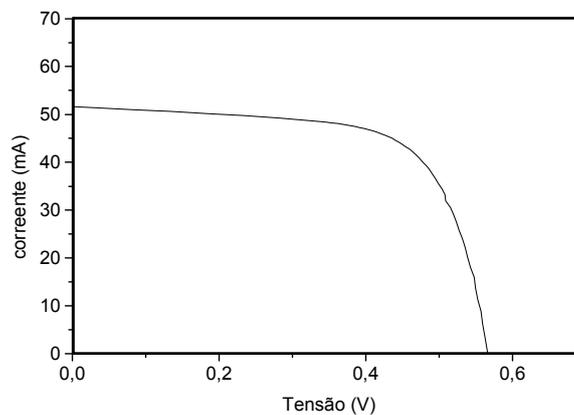


Figura 1 – Característica da corrente elétrica em função da diferença de potencial aplicada em uma célula solar $1,5 \text{ cm}^2$.

Existem duas classes de simuladores solares:

a) Com iluminação pulsada:

- As medidas são realizadas num intervalo de 2 a 20 ms;
- Este simulador tem a vantagem de não necessitar de refrigeração no dispositivo;
- Sua medida é caracterizada pela iluminação padrão por meio de um “flash” de luz.

b) Com iluminação permanente:

- Proporciona um feixe de radiação solar ininterrupto durante todo o tempo de medida.
- O sistema de iluminação é alimentado por corrente contínua muito bem estabilizada.
- Pode ser adquirido no mercado internacional, porém o preço é elevado, em torno de US\$ 25.000,00 para um sistema simples de simulador e até US\$ 210.000,00 com sistemas mais complexos, com plataforma termostaticada em sistema de aquisição de dados.

Devido ao alto custo do equipamento, o objetivo deste trabalho centra-se na implementação e caracterização de um sistema completo para medição da característica I-V de uma célula solar, segundo as normas de padronização internacional, as quais foram definidas pela IEC (International Electrotechnical Commission, 1995), porém com um custo muito menor.

O sistema completo para caracterizar células solares sob condições padrão internacionalmente estabelecidas é constituído das seguintes partes:

- Subsistema de iluminação,

- Bomba de vácuo,
- Subsistema de controle de temperatura,
- Plataforma termostatazada,
- Subsistema de caracterização elétrica.

Na Fig. 2 é apresentado o esquema do equipamento completo distribuído em um organograma que identifica as interligações envolvidas no sistema de medição.

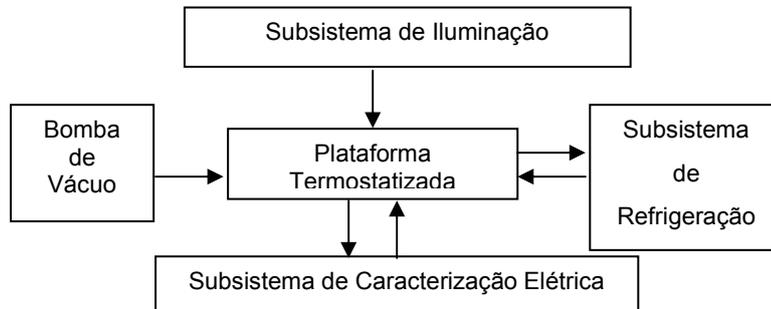


Figura 2 – Esquema do sistema completo para a medição de características I-V de células solares sob condições padrão.

2 DESENVOLVIMENTO DO EQUIPAMENTO

O equipamento completo para a medição da característica de corrente elétrica versus a tensão aplicada (I-V) de células solares é constituído dos seguintes subsistemas: iluminação, refrigeração, vácuo, caracterização elétrica e uma plataforma termostatazada. Com este equipamento é possível caracterizar células solares sob condições padrão, isto é, temperatura da célula de 25 °C, distribuição espectral correspondente ao padrão AM1,5G e irradiância incidente de 1000 Wm⁻².

2.1- Normas para Classificação

Este sistema foi projetado para obedecer às normas internacionais de medição de células solares. A IEC é uma organização com representantes de mais de 60 países, que estabelece normas relativas à caracterização de dispositivos elétricos, eletrônicos ou de tecnologias associadas.

As normas IEC 904-1, 904-3, 904-5 e 904-9 estabelecem os procedimentos de medida para caracterização de células solares.

Para medir a curva I-V de uma célula solar é necessário considerar que:

- A irradiância deve obedecer à norma IEC 904-3 que estabelece que a distribuição espectral deve ser similar ao padrão AM1,5G.
- A irradiância deve ser medida com uma célula padrão calibrada de tecnologia similar.
- A temperatura da célula deve ser de 25 °C, sendo que a incerteza na medida deve ser inferior a ± 1 °C.
- A medida da corrente elétrica e da diferença de potencial aplicada deve ter uma incerteza inferior a ± 0,5 %, usando ponteiras para os contatos independentes.
- O voltímetro deve ter uma resistência interna de no mínimo 20 kΩ/V.
- A calibração dos instrumentos de medida deve ser devidamente certificada e estar nas exigências requeridas.
- O simulador solar deve produzir uma irradiância de 1000 Wm⁻² e a medida deve ser realizada com uma célula solar de referência. Além disso, a irradiância deve estar de acordo com a IEC 904-3.
- A distribuição da irradiância espectral do simulador deve ser comparada com a referência de distribuição espectral, esta tabela será apresentada na classificação do equipamento.
- A área em que a célula será medida deve ser completamente iluminada. Na área de teste, a irradiância incidente deve apresentar uma determinada uniformidade e estabilidade em função do tempo.

2.2 Subsistema de Iluminação

O subsistema de iluminação foi desenvolvido e analisado para três tipos de lâmpadas incandescentes halógenas, nas quais a temperatura do corpo negro pode ser de 2500 K a 3400 K. Dos três modelos diferentes de lâmpadas o que melhor se adequou às normas IEC foi a CYX. Esta lâmpada tem uma potência de 2000W e possui uma distribuição espectral da potência emitida correspondente a de um corpo negro a 3200 K.

Projetou-se um sistema com refletor esférico e um tubo colimador, como mostra a Fig 3, para que a distribuição da irradiação incidente fosse mais uniforme na região da plataforma de medida. A partir disso, constatou-se que o sistema sofria um aquecimento excessivo provindo da lâmpada CYX. Para sanar este problema, confeccionou-se uma serpentina que possibilita a circulação de água gelada para refrigerar o sistema colimador.

A distribuição espectral da irradiância produzida pelo subsistema de iluminação deve se aproximar à referência AM1,5G. O intervalo de comprimentos de onda avaliado foi de 400 nm até 1100 nm, região de sensibilidade de células solares de silício cristalino. Na Fig 4, compara-se a irradiância referência AM1,5G com a potência emitida pela lâmpada Halógena CYX.

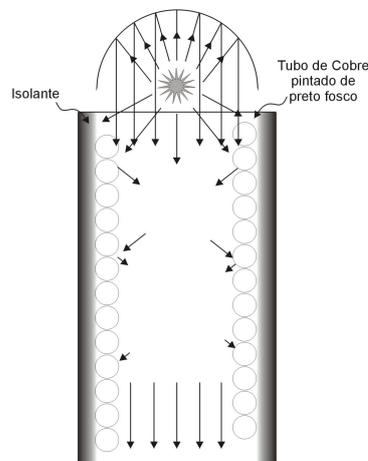


Figura 3 – Projeto do tubo colimador.

Para aproximar o espectro da lâmpada para o AM1,5G, foi necessário o estudo de filtros que absorvessem boa parte do infra-vermelho irradiado pela lâmpada. Um dos filtros estudados foi o filtro comercial *heat abs glass*, mas um de seus problemas é sua dimensão inferior a da medida mínima da plataforma de medida. Deste modo, foi necessário buscar um novo filtro para adaptar-se ao simulador.

Estudou-se o uso de vidros comuns com diferentes espessuras e de boro silicato. Conforme esperado, percebeu-se que à medida que aumenta a espessura do vidro diminui a transmitância na região do infravermelho e a curva aproxima-se daquela do filtro de absorção de infravermelho.

A espessura ideal calculada, a partir da transmitância medida do vidro de 10 mm, foi de 40 mm. Na Fig 5 são comparados os resultados da multiplicação da potência emitida por um corpo negro a 3200 K pela transmitância dos vidros de diferentes espessuras.

2.3 Plataforma Termostatizada

A plataforma termostatizada deve possibilitar um bom contato elétrico e térmico entre ela e a célula solar. Para isso, foi necessário abrir dois rasgos circulares de 2mm de profundidade e de 2mm de largura e um furo de 1,5 mm na plataforma, que estão interligados por uma válvula de seleção de área que controla a região que sofrerá a ação do vácuo. Neste caso, o vácuo é usado para fixar a célula solar sobre a plataforma, obtendo-se, assim, bom contato elétrico e térmico. A válvula de seleção é mudada somente quando células de diferentes tamanhos são medidas. Na Fig 6 ilustra-se a plataforma desenvolvida.

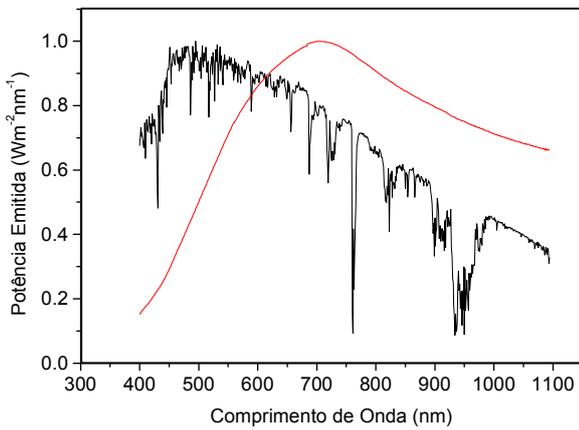


Figura 4 – Distribuição espectral da irradiância de referência AM1,5G comparada com a potência emitida por um corpo negro a 3200 K.

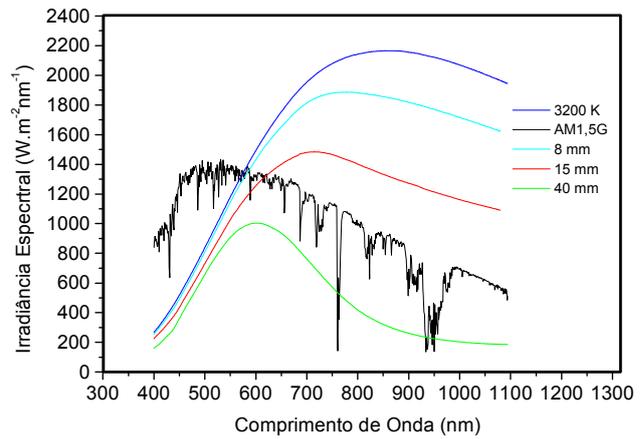


Figura 5 – Comparação entre a distribuição espectral referência AM1,5G e a potência emitida por um corpo negro a 3200 K multiplicada pela transmitância de vidros de diferentes espessuras.

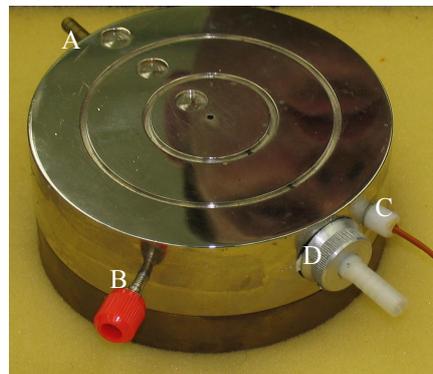


Figura 6 – Plataforma final. A – Entrada de água gelada, B – borne para contato elétrico usado para células grandes, C – termopar e D – conexão para bomba de vácuo.

Sob irradiância de 1000 W/m^2 , a célula solar deve ser mantida a $25 \text{ }^\circ\text{C}$ durante os procedimentos de medição. Portanto, foi implementado um sistema de refrigeração/aquecimento, baseado na passagem de água refrigerada do sistema central e no aquecimento através de um resistor incrustado na plataforma e acionado pelo controlador de temperatura Novus N1100. A medida de temperatura realizada com um termopar tipo K, instalada a $1,0 \text{ mm}$ da superfície da plataforma.

2.4 Subsistema de Vácuo

O vácuo é usado, na superfície externa superior, para produzir um bom contato elétrico e térmico entre a célula solar e a plataforma termostatazada. A bomba é do tipo diafragma e sua pressão mínima é de 68 kPa , com vazão de $290 \text{ cm}^3/\text{s}$.

2.5 Subsistema de Caracterização Elétrica

Para realizar a caracterização elétrica de uma célula solar sem soldá-la, é necessário ter um bom contato elétrico. Os contatos elétricos na parte frontal da célula são realizados através de quatro ponteiras, que são fixadas na plataforma metálica através de ímãs, como mostra a Fig 7. As ponteiras são conectadas em um suporte de conexão fixado por um ímã e este suporte é, então, conectado à fonte de tensão variável e ao multímetro, que mede a tensão aplicada sobre a célula solar. Por meio da fonte de tensão, modelo 2420 da marca Keithley, é aplicada uma diferença de potencial variável sobre a célula solar (a própria fonte permite a leitura da corrente elétrica gerada pela célula). As medidas são automatizadas e controladas por meio de um microcomputador, via uma interface

GPIB e com o auxílio de um programa computacional em VEE, da Agilent Technologies. O programa apresenta a curva IV da célula a ser medida e bem como a corrente de curto circuito, tensão de circuito aberto, fator de forma, densidade de corrente e eficiência da célula.



Figura 7 – Ponteiras usadas para o contato elétrico na célula solar.

3 CARACTERIZAÇÃO DO SIMULADOR

Segundo as normas IEC, foram caracterizada a distribuição da irradiância, estabilidade temporal e a classificação espectral.

3.1 Caracterização da distribuição da irradiância

A distribuição da uniformidade sobre a plataforma termostatzada foi avaliada para o simulador solar com a lâmpada halógena CYX, realizando medições da irradiância em 216 pontos distribuídos em toda a área. Em cada ponto foram realizadas três medidas da irradiância incidente e calculada a média destes valores. Foi usado um conjunto de 21 fotodiodos, distribuídos em um quadrante de circunferência para realizar as medidas.

Na Tab1 encontram-se os valores de acordo com as áreas circulares caracterizadas pelos diâmetros de 35 mm, 75 mm e 115 mm.

Tabela 1 – Classificação do subsistema de iluminação em relação à uniformidade da irradiância incidente na plataforma termostatzada.

Diâmetro (mm)	Fator	Classe
35	1,2%	A
75	2,6%	B
115	4,8%	B

Portanto, a partir da Tabela 1, em relação a uniformidade o simulador é classificado como classe “B”, pois segundo a norma IEC 904-9, predomina a menor classe.

3.2 Estabilidade Temporal

Na Fig 8, apresentam-se os resultados da irradiância medidos durante 60 minutos em intervalos de 10 segundos Determinou-se o fator para classificação, segundo a norma IEC 904-9. O valor do fator calculado foi similar ao valor para as lâmpadas dicróicas, de 0,56%..Comparando os resultados encontrados, pode-se classificar este equipamento como classe “A”.

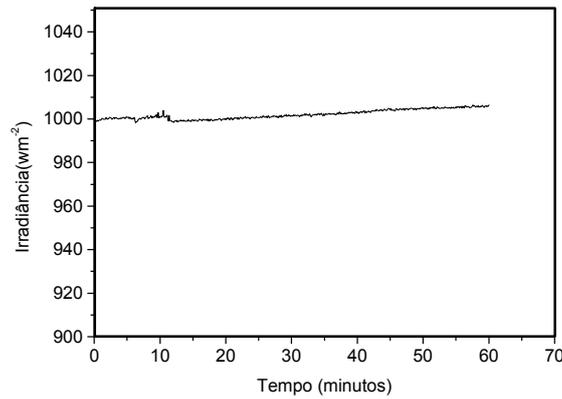


Figura 8 – Estabilidade temporal do simulador com a lâmpada halógena CYX.

3.3 Classificação Espectral

A Fig 9 mostra a irradiância proporcionada pela lâmpada halógena CYX simulada e medida com um espectrorradiômetro comparado com o espectro de referência AM1,5G. Os resultados apresentados na Fig 9 consideram que foi associado à lâmpada halógena CYX um vidro com 40 mm de espessura. Para facilitar a comparação, os resultados foram normalizados em relação ao valor máximo.

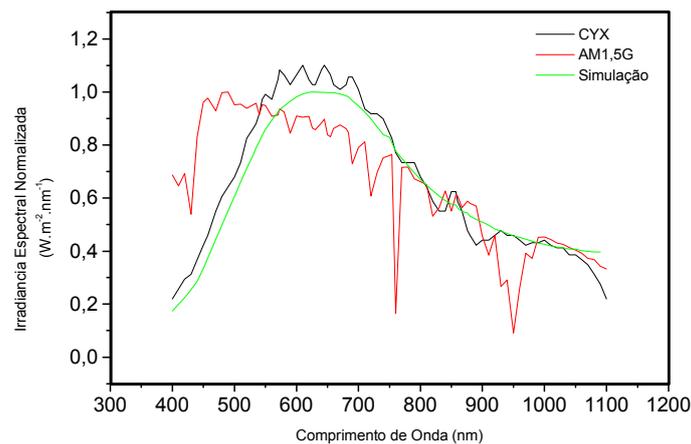


Figura 9 – Comparação dos espectros simulados e medidos com o espectro de referência AM1,5G.

Na Tab 2 são apresentadas as classificações para determinados intervalos de comprimento de onda, de acordo com a norma IEC 904- 9.

Tabela 2 – Classificação segundo a distribuição espectral do simulador AD1000.

Comprimentos de Onda(nm)	Irradiância AM1,5G (Wm ⁻²)	Irradiância AD1000 (Wm ⁻²)	Razão	Classe
400-500	139	79	1,75	C
500-600	151	166	0,90	A
600-700	139	188	0,74	B
700-800	113	149	0,75	A
800-900	94	97	0,97	A
900-1100	118	144	0,82	A

O simulador solar é classificado como “C”, devido aos resultados para o intervalo de comprimentos de onda entre 400 nm e 500 nm.

4. ANÁLISE DE MEDIÇÕES

Após a classificação do simulador solar com a lâmpada halógena CYX, denominado de AD1000, classe C, apresentado na Fig10, medi-se a característica I-V de uma célula solar no equipamento do Instituto de Energia Solar da Universidade Politécnica de Madri (IES-UPM), com o objetivo de comparar os resultados da medição com o equipamento desenvolvido. As características do simulador do IES- UPM são: a)Subsistema de iluminação que possui uma lâmpada de Xenônio filtrada; b)Elevada estabilidade temporal e uniformidade da distribuição da irradiância;c)Suas medidas, comparadas ao National Renewable Energy Laboratory (NREL) e ao Laboratório de Calibração do instituto Fraunhofer (FHG-ISE), apresentam diferenças menores que 2% nas correntes de curto-circuito.

Inicialmente a irradiância incidente na plataforma termostaticada foi medida com uma célula padrão, previamente calibrada do Instituto de Energia Solar da Universidade Politécnica de Madri. Após a rampa de aquecimento, foi medida a célula solar. A Fig 11 mostra a comparação das características I-V da célula medida no Instituto de Energia Solar e com o simulador AD1000. Para facilitar a comparação, na Tab 3 mostra-se a corrente de curto-circuito (I_{sc}), a tensão de circuito aberto (V_{oc}), a potência máxima (P_{max}) e a eficiência (η). Também apresenta-se a diferença percentual de cada parâmetro.

Na Tab 3 nota-se que a diferença entre os parâmetros em análise é inferior a 4 %. Estes valores são aceitáveis considerando que o subsistema de iluminação é classe C. A tensão de circuito aberto medida em ambos os equipamentos é similar, sendo as diferenças insignificantes para a célula.

A célula, usada como padrão, no AD1000, é de silício cristalino, tipo *float zone* (FZ), com uma estrutura n^+pp^+ , dopada com fósforo e alumínio, com uma área 1 cm^2 . Sua superfície é texturada e possui uma camada anti-reflexo de Ta_2O_5 .

A célula medida para a comparação entre os dois equipamentos é também uma célula de silício FZ, com uma estrutura n^+pp^+ , dopada com fósforo e alumínio. Sua área é de 4 cm^2 e sua superfície é texturada, possuindo uma camada anti-reflexo de SiO_2 .



Figura 10 – Sistema completo desenvolvido para caracterização elétrica de células solares, denominado AD100.

Tabela 3 – comparação entre os parâmetros da característica I-V da célula solar medida no equipamento do IES- UPM e no equipamento desenvolvido.

	AD 1000	IES-UPM	Diferença percentual (%)
Isc (A)	0,152	0,148	2,7
Voc (V)	0,575	0,577	-0,3
P (W_{max})	0,063	0,061	3,3
η(%)	15,8	15,2	3,9
FF	0,72	0,71	0,9

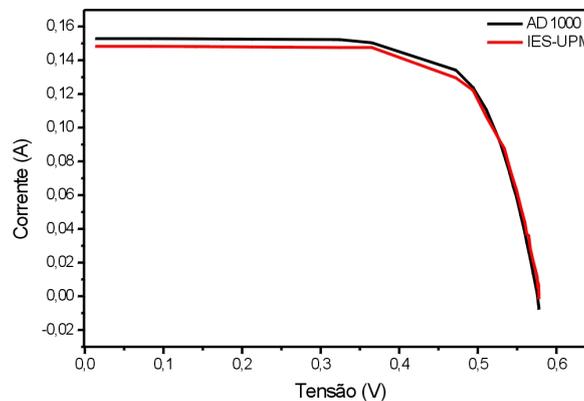


Figura 11 – Comparação entre as características I-V da célula solar medida com o equipamento desenvolvido e com o equipamento do Instituto Energia solar da Universidade Politécnica de Madrid.

5. CONCLUSÕES

Foi desenvolvido um sistema completo para caracterização de células solares e o simulador com a lâmpada halógena CYX, denominado de AD1000, foi classificado como: a) “B”, em relação a distribuição da irradiância para uma área circular de até 115 mm de diâmetro; b) “C” em sua classificação espectral, devido aos valores medidos entre 400 a 500 nm; c) “A”. para sua classificação de estabilidade temporal o simulador AD1000 obteve a classificação.

A medida da característica I-V de uma célula solar de silício realizada no AD1000 e um simulador classe A do IES-UPM, mostrou uma diferença de 0,6% no valor absoluto de eficiência, valor aceitável considerando as diferenças entre os simuladores.

Concluindo, foi desenvolvido e caracterizado um sistema completo para caracterizar células solares, classe C, segundo as normas IEC.

REFERÊNCIAS

- Partain, L. D.; Solar cells and their applications. John Wiley & Sons. New York, 1995. 561p.
- Pan, A.C. Processos de Fabricação de Células Solares Bifaciais em Fornos de Aquecimento Rápido. Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais – PGETEMA. Dissertação de mestrado. Porto Alegre, 2004.
- Zanescio, I.; Conselho Nacional de Desenvolvimento Tecnológico – Redução de Custo de Sistemas Fotovoltaicos Autônomos. Relatório Final. PUCRS – FAFIS. 2003.
- International Electrotechnical Commission. Photovoltaic devices – Solar Simulator Performance Requirements. Parte 9. 1995.

FORMAT INSTRUCTIONS FOR PAPERS SUBMITTED TO THE I CBENS DEVELOPMENT OF A COMPLETE SYSTEM TO CHARACTERIZE SOLAR CELLS

Abstract. *In Brazil, the development of solar cells is growing in last years. To characterize solar cells, electrical parameters have to be measured under standard conditions according international roles IEC904-9. The aim of this work is to present the development of a complete system for electric characterization of solar cells. The equipment is constituted by a thermal shuck, vacuum subsystem, electric characterization subsystem and solar simulator. Simulator was characterized taking into account the uniformity of irradiance at the test plane, temporal stability during the time of data acquisition and spectral irradiance distribution. Although several kinds of lamps were used, simulator with halogen lamp CYX presented the best performance. Heat absorbing filters, based on simple glass sheets of up to 40 mm thick were attached and analyzed to obtain a spectral irradiance similar to AM1.5G spectrum. According IEC roles, the simulator developed can be classified as: a) B, for uniformity of irradiance, reaching 4.8% on a circular area of 115 mm diameter; b) A, for temporal stability, obtaining a variation less than 0.56%; c) C, for spectral distribution, worst result due to the poor spectral match in the 400-500 nm wavelength range. Therefore, simulator developed can be classified as "C". A silicon solar cell was measured in the complete system and in a class A system of Solar Energy Institute of the Politecnical University of Madrid. Short-circuit current and efficiency measured in the developed system was 2.7% and 0.6% (absolute) higher than the measured at class A system.*

Key words: Solar cells, Solar simulator, I-V characteristics.