

ESTUDO DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS DE SILÍCIO COMO RADIÔMETROS

Jime de Souza Sampaio - jimesampaio@gmail.com

Denis G. F. David - denisgfd@ufba.br

Universidade Federal da Bahia, Instituto de Física

Germano Pinto Guedes - germano@uefs.br

Universidade Estadual de Feira de Santana, Departamento de Física

Resumo. A análise do potencial solar de uma região ainda é fundamental para as perspectivas de aplicação. Porém, os dados encontrados, medidos com os piranômetros, não representam com precisão o potencial solar útil à conversão fotovoltaica. Nesse contexto, a implementação de radiômetros fotovoltaicos de silício representa uma solução eficaz. Grandes indústrias de piranômetros fabricam tais dispositivos e artigos publicados já mostram sua eficiência. Com tudo isso, é de interesse do Laboratório de Energia Solar (LABENSOL) – UEFS, estudar o funcionamento de uma célula fotovoltaica atuando como radiômetro. O caminho tomado foi avaliar seu funcionamento em função do modelo matemático proposto, testá-la em função dos parâmetros de especificação estabelecidos na norma ISO-9060 e compará-la com um piranômetro de referência para as medidas realizadas em condições ambientes. Como resultado, a célula estudada mostrou ser uma boa alternativa considerando a análise proposta. A curva I-V medida, se ajustou ao modelo, apresentando erro máximo de 5%. No geral, os resultados para os parâmetros de especificação mantiveram-se dentro dos limites estabelecidos pela norma ISO-9060 e a comparação com o piranômetro de referência determinou a célula, como um radiômetro fotovoltaico com precisão de 5%. Neste quesito, segundo a WMO (World Meteorological Organisation), a célula é classificada como um piranômetro de “boa qualidade”. Para perspectivas de testes futuros, já existe uma proposta de substituição da fonte de radiação e de toda a base utilizada em laboratório, esperando, como resultado, medidas mais refinadas e testes mais equivalentes com os propostos pelas normas estabelecidas.

Palavras-chave: Células Fotovoltaicas de Silício, Radiômetros, Energia Solar, Instrumentação

1. INTRODUÇÃO

As perspectivas de aplicação de sistemas elétrico-solares (fotovoltaicos) dependem da análise do potencial solar da região onde se pretende utilizar. Os dados encontrados, medidos com radiômetros do tipo piranômetros que respondem numa larga faixa do espectro solar (geralmente de 0,3 a 2,2 μm), não representam com precisão o potencial solar útil à conversão fotovoltaica com os tradicionais módulos de silício, semicondutor presente em 97% das células solares disponíveis comercialmente (sensíveis apenas entre 0,3 - 1,1 μm) (Greenpeace e EPIA, 2007). Nesse contexto, a implementação de radiômetros fotovoltaicos de silício representa uma solução eficaz. Grandes indústrias de sensores, conceituadas no mercado de radiometria, fabricam tais dispositivos e artigos publicados já mostram sua eficiência, em comparação com os piranômetros térmicos.

A proposta desse trabalho é medir, a partir do sinal fornecido por uma célula FV (fotovoltaica), (tensão ou corrente), qual a insolação de uma região em estudo, analisando, com base no seu modelo teórico e resultados experimentais, como a irradiância e a temperatura são influentes nesta medida. O caminho tomado foi analisar alguns dos parâmetros propostos na norma de especificação dos piranômetros, ISO 9060, e, além disso, comparar o funcionamento dessa célula FV com um piranômetro de referência quando submetidos a condições ambientes (chuva, vento, umidade, etc). Como a produção de um sensor calibrado segundo as normas internacionais demanda equipamentos sofisticados e de uso específico de laboratórios de normatização, tecnologia que o LABENSOL não dispõe, esta análise foi realizada buscando aproximar-se ao máximo das normas de especificação, apesar das limitações do laboratório utilizado no trabalho.

1.1 Radiação Solar na Atmosfera

A constante solar, ou seja, a energia média irradiada pelo sol por unidade de área que chega até a terra (fora da atmosfera), é de 1367 W/m^2 (Tiwari, 2002). Entretanto, ao passar pela atmosfera, a energia sofre processos de dispersão e absorção atenuando sua intensidade até chegar ao nível do solo.

O maior absorvente atmosférico é o vapor d'água (H₂O), que junto com o ozônio (O₃) e o oxigênio (O₂) respondem pela absorção de 19% da radiação na atmosfera, como pode ser visto na Fig. 1 que contrasta as curvas de radiação do corpo negro e a do sol dentro e fora da atmosfera (Souza, 2007).

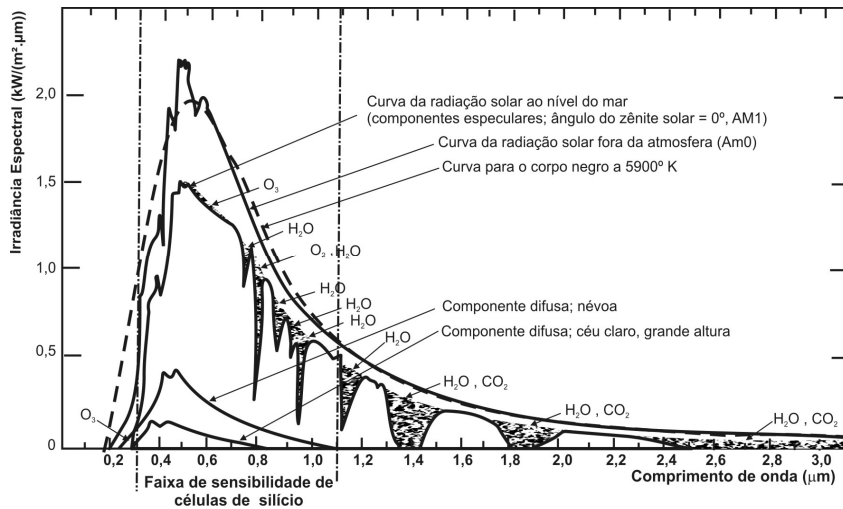


Figura 1- Faixa de sensibilidade das células solares de silício, comparada com o espectro solar dentro e fora da atmosfera e ao nível do solo. Fonte: (Palz, 1981) (modificada)

O valor numérico da atenuação da radiação pela atmosfera é chamada de “Massa de Ar” (AM) que é função do ângulo de incidência dos raios, normalmente indicada por AMX onde X é um número dado pela equação 5.

$$X = \frac{1}{\cos \theta} \quad (5)$$

1.2 Célula Fotovoltaica

A célula FV é um dispositivo que converte a energia solar em energia elétrica, através do efeito fotovoltaico. Na presença de radiação eletromagnética, fótons com energia suficiente podem excitar elétrons para níveis de energia mais elevados. Se essa excitação corresponder a uma energia igual ou maior que o *gap*, existirá a transição de elétrons da banda de valência para banda de condução do material. Tais elétrons, acelerados pelo campo elétrico interno da junção que compõe a célula, dão origem a uma corrente elétrica, isto é o efeito fotovoltaico. Como pode ser visto no esquema apresentado na Fig. 2-A, a estrutura básica de uma célula fotovoltaica consiste na junção *P-N* de um semiconductor, que tem conectados na superfície frontal e na base, contatos elétricos, responsáveis pela captação dos elétrons livres localizados na banda de condução. Na superfície superior, os trilhos, como são chamados os contatos, são geralmente bem estreitos para não impedir a passagem da luz para o semiconductor. Um circuito resistivo fechando a conexão entre os contatos da base e da superfície vai conduzir uma corrente resultante da diferença de potencial, gerada no efeito fotovoltaico. É essa corrente, chamada de fotocorrente, que recarga baterias, acende lâmpadas, aciona motores ou alimenta os conversores DC-AC quando os módulos fotovoltaicos são conectados diretamente à rede elétrica.

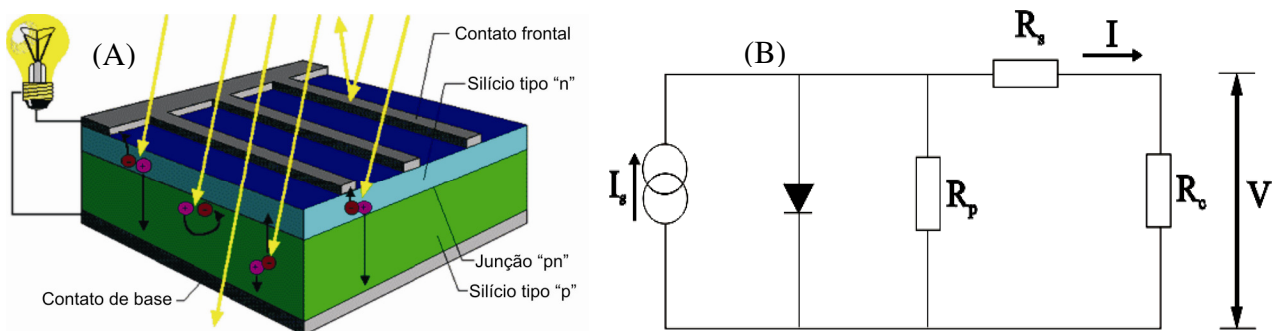


Figura 2: A- Esquema de uma junção *P-N* de uma célula FV de silício. Fonte: (Souza, 2007); B- Circuito elétrico equivalente de uma célula FV alimentando uma carga R_c .

Para a construção do modelo fotovoltaico, deve-se levar em consideração que a célula fotovoltaica é um dispositivo composto por uma junção de semicondutor, cujo *gap* depende da temperatura, que na presença de luz atua como uma fonte de tensão ou corrente, e que por apresentar imperfeições na estrutura cristalina ou também pela presença de contatos elétricos no semicondutor, apresenta resistências parasitas. Desta forma, pode-se representar um circuito equivalente para uma célula fotovoltaica alimentando uma carga representada por uma resistência R_c [Ω], pela configuração apresentada na Fig. 2-B.

Nesse esquema, a célula fotovoltaica, composta por uma junção *pn*, é representada por um diodo [\rightarrow], característico por apresentar a mesma estrutura de junção. O gerador de corrente [\ominus] associado ao diodo, representa a geração de corrente I_s [A] na presença de luz. As resistências R_s e R_p [Ω], que são as resistências em série e em paralelo respectivamente, representam a presença das resistências parasitas. A carga resistiva R_c [Ω] é alimentada pela corrente I [A], que pode ser obtida diretamente da tensão V [V] nos terminais da célula.

Com base no esquema do circuito elétrico apresentado na Fig. 2-B, pode-se determinar a corrente I [A] que atravessa a carga resistiva R_c . O modelo matemático equivalente a este circuito, que descreve o comportamento da célula fotovoltaica, apresentado na Eq. (6) (Soto, 2004), é caracterizado por três termos: O primeiro está relacionado ao gerador, produzindo a fotocorrente I_s ; o segundo é a equação de um diodo, devido à célula ter a mesma estrutura de junção desse dispositivo; e o terceiro representa as perdas de corrente gerada pelas resistências parasitas.

$$I = I_s - I_0 \left(e^{\frac{V+IR_c}{mV_T}} - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_p}, \quad (6)$$

O segundo termo da Eq. (6) descreve a corrente que atravessa um diodo polarizado, onde I_0 é a corrente inversa máxima de saturação do diodo [A], m o fator de idealidade do diodo, R_s a resistência em série [Ω] e V_T o potencial térmico [V] ($V_T = kT/e$; onde e é a carga do elétron ($1,6 \times 10^{-19}$ C)). Convencionalmente, a fotocorrente é positiva, pois, na presença de radiação, a corrente que atravessa a carga R_c se deve aos elétrons foto-gerados, por outro lado, observando esquema elétrico da Fig. 2-B, o único sentido de condução de corrente pelo diodo é contrário a I_s , justificando o sinal negativo. A presença de resistências parasitas está associada principalmente às perdas de potência da célula, entrando como um termo negativo no balanço de potência. Neste termo R_p é a resistência em paralelo [Ω]. A potência gerada, Eq. (7), é dada por:

$$P = IV \quad (7)$$

Estudos da estrutura de bandas de energia mostram que existe uma diminuição do *gap* do semicondutor com o aumento da temperatura. Com esse aumento, fótons com energias menores conseguem excitar os elétrons da banda de valência para a banda de condução, resultando, em um pequeno aumento da fotocorrente. Por outro lado, a chegada de mais fótons com energia de excitação suficiente, implicará em mais elétrons chegando à banda de condução, estabelecendo uma relação de direta proporcionalidade entre a corrente solar I_s e a intensidade solar que chega até sua superfície, conforme a Eq. (8) (Soto, 2004).

$$I_s = \frac{G}{G_r} [I_{ccr} + \alpha(T - T_r)], \quad (8)$$

onde, G_r [w/m²] e T_r [°C] são Irradiância e temperatura da célula nas condições de referência.

Das resistências parasitas que compõem o modelo FV, Eq. (8), a resistência em série é a própria resistência do semicondutor dopado e também está associada à resistência entre os contatos entre o metal e o semicondutor. Idealmente deve ser bem pequena, mas como compõe o expoente do termo associado ao semicondutor, no modelo FV, seu crescimento antecipa a queda de corrente característica do comportamento da curva *I-V* da célula tornando-a mais suave. Assim, a resistência em série pode ser entendida como a inclinação da curva *I-V* na região de circuito aberto, Eq. (9) (Soto, 2004).

$$R_s = - \left(\frac{dV}{dI} \right)_{V=V_{CA}} \quad R_p = - \left(\frac{dV}{dI} \right)_{I=I_{CC}} \quad (9)$$

A resistência em paralelo representa as perdas de corrente da célula e está associada às imperfeições do cristal do semicondutor. Idealmente esta resistência seria infinita, representando nenhuma perda. Dentro do modelo FV da Eq. (6), a diminuição da resistência em paralelo, está associada ao aumento do termo que determina as quedas de corrente na região entre a potência máxima e o curto-circuito. Assim, pôde ser equacionada como a inclinação da curva *I-V* na região de curto-circuito, como apresentado na Eq. (9).

2. INSTRUMENTAÇÃO

Para desenvolver o estudo proposto neste trabalho um módulo fotovoltaico de silício policristalino com 36 mm de largura e 51,5 mm de comprimento, composto por cinco células em série, Fig. 3-A. Neste trabalho o módulo será chamado de “*célula em teste*”. O conjunto é montado sobre uma placa de fenolite (típica de circuitos eletrônicos) e a superfície sensível, está recoberta por uma camada de resina transparente.

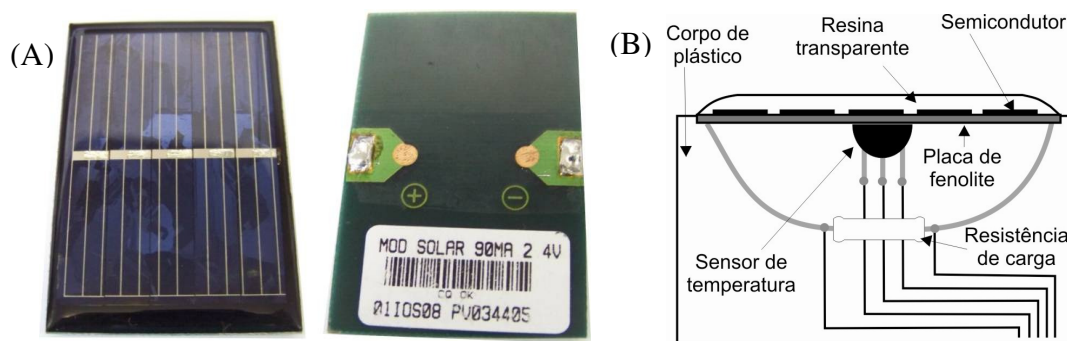


Figura 3: A- Célula fotovoltaica em estudo; B-Esquema de montagem da célula FV para o estudo.

Na configuração proposta para a realização do estudo, encontra-se ligada nos terminais da *célula em teste*, ocupando o lugar da resistência de carga R_c no circuito elétrico equivalente, Fig. 2-B, uma resistência de 1Ω . Essa configuração permite que a célula opere na região próxima a corrente de curto-circuito. Pode-se notar comportamento da célula em curto-circuito, Eq. (10) (Soto, 2004), em função da irradiância e temperatura, é bem semelhante ao comportamento da corrente solar I_s , em relação aos mesmos parâmetros.

$$I_{cc} = \frac{G}{G_r} I_{ccr} + \alpha(T - T_r) \quad (10)$$

A medida de corrente, para este modo, é realizada de forma indireta através da medida da tensão nos terminais da resistência de 1Ω . As tensões máximas medidas nesse modo se encontram na ordem das dezenas de mV (milivolt).

Em todo o estudo, a temperatura da *célula em teste* foi medida por um sensor de temperatura de calibrado, o LM35CZ (National Semiconductors), que está localizado na superfície inferior da *célula em teste*, livre da incidência direta da luz, Fig. 3-B. Caracterizado como um sensor ativo (necessita de alimentação externa para sua operação), este se encontra alimentado com tensão $V_{cc} = 12V$. Suas principais características são apresentadas na Tab. 1.

Tabela 1: Principais características do sensor de temperatura LM35CZ.

Característica	Valor
Sensibilidade	10 mV/°C
Precisão (a 25 °C)	0,5 °C
Faixa de leitura	- 40 a 110 °C

Para medir a intensidade solar global, e obter os dados de irradiância tomados como referência, utilizou-se o piranômetro CM21 (Kipp&Zonen), devidamente calibrado e classificado como padrão secundário segundo a norma ISO 9060. Esse modelo de piranômetro já foi citado na literatura como referência na comparação com outros instrumentos (Storch, 2004; SolData Instruments, 2009). As principais características são apresentadas na Tab. 2.

Tabela 2: Principais características do piranômetro de referência CM21.

Característica	Valor
Sensibilidade	10,08 $\mu V/W.m^2$
Faixa espectral de resposta	0,335 a 2,200 μm
Tempo de resposta	5 s (95% da resposta)
Dependência com a temperatura	$< \pm 1\%$ (de -20 a 50 °C)
Precisão	2%
Erro com a inclinação	0,2%
Seletividade espectral	2%

3. METODOLOGIA DE TESTES

A necessidade de medidas idênticas de uma mesma grandeza realizada por sensores diferentes, força o estabelecimento de normas que garantam as uniformidades das medidas. Dentre as inúmeras normas de calibração e especificação de sensores de radiação solar, podem-se destacar, para os piranômetros, as normas ISO-9846, ISO-9847 relacionadas ao processo de calibração e a ISO-9060 que especifica e classifica estes sensores.

A especificação segundo a norma ISO 9060 tem como base a análise dos seguintes parâmetros: Tempo de Resposta; Compensação do ponto zero; Não-Estabilidade; Não Linearidade; Resposta Direcional (para radiação direta); Seletividade Espectral; Resposta à Temperatura e Resposta à Inclinação (Freire, 2008). Levando em consideração que a especificação dos piranômetros tem como base a análise desses parâmetros, o estudo realizado nesse trabalho se concentra em analisar alguns dos parâmetros de especificação no protótipo em estudo. Comparações entre as medidas instantâneas e de longa duração da radiação solar, realizadas pela *célula em teste* e o piranômetro de referência também fazem parte do estudo.

Os testes com a célula, exceto os que utilizam à radiação solar direta, foram realizados em uma base para testes desenvolvida no Laboratório de Energia Solar da UEFS, Fig. 4.

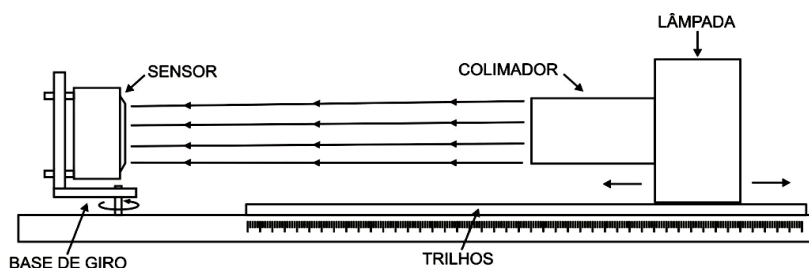


Figura 4- Base para testes em laboratório.

A base tem uma estrutura para fixar o sensor que o permite girar e conseqüentemente variar o ângulo de incidência da radiação. O eixo de rotação se encontra no nível da superfície do sensor. Uma lâmpada dicróica de 50W, modelo EXN com lente (FLC), alimentada pela fonte de tensão estabilizada ADV-3062D (Genérica), é utilizada como fonte de radiação. A lâmpada se encontra dentro de uma estrutura que a mantém resfriada e faz a colimação da radiação em direção à superfície do sensor.

O espelho dicróico no fundo da lâmpada reflete a luz na região do visível e absorve a luz para alguns comprimentos de onda do infravermelho, tendo como efeito resultante uma fonte de radiação com temperatura de cor na ordem de 4700K, enquanto que a lâmpada halógena que compõe a lâmpada dicróica, segundo o fabricante, tem temperatura de cor de 2900K.

A lâmpada encontra-se fixada numa estrutura de trilhos, com escala graduada, que permite a mudança e medida da distância entre a lâmpada e o sensor, e conseqüentemente variação da intensidade que chega até o sensor, mantendo a alimentação da lâmpada constante e, assim, o mesmo espectro de radiação.

Para a comparação das medidas instantâneas e de longa duração, realizadas com a *célula em teste* e o piranômetro de referência, ambos foram submetidos simultaneamente às mesmas condições ambientais. Os sensores foram colocados lado a lado, sobre uma plataforma instalada próximo ao telhado do prédio do LABOFIS, Fig. 5.



Figura 5- Sensores expostos à radiação solar.

Os dados foram adquiridos e gravados pelo *data logger* Nomad 2 (Secondwind), podendo ser baixados para o tratamento através de uma interface serial. Um programa exclusivo do fabricante faz a decodificação dos dados gravados, possibilitando exportar esses dados em formato de texto. A aquisição, pelo Nomad 2, é realizada em intervalos desejados, 24h por dia, onde os dados de todos os canais ligados são gravados simultaneamente. No caso desse trabalho, os dados utilizados para as análises foram adquiridos no intervalo entre 6 e 18h, com 1 (uma) aquisição

por minuto. Dos 7 canais analógicos disponíveis para aquisição no Nomad 2, três foram utilizados durante as medidas: CH1 – Tensão do piranômetro; CH2 – Tensão da célula em análise; CH3 – Tensão do sensor de temperatura.

4. RESULTADOS

Seguindo o proposto neste trabalho, ou seja, estudar um dispositivo FV operando como radiômetro, através de uma análise da influência de parâmetros como insolação e temperatura sobre seu funcionamento, avaliação do dispositivo em função de seu modelo teórico e comparação com um radiômetro calibrado, serão apresentados, nesse capítulo, os resultados da composição do modelo teórico e dos testes experimentais, os quais serviram de base para as conclusões de todo o estudo.

4.1 Comparação com o Modelo Teórico

Para a análise do comportamento da célula, em função do modelo FV, Eq. (6), foi necessária a construção da curva $I-V$ da célula em teste, Fig. 6, obtida a partir dos dados resultantes das medidas da tensão e corrente associadas a diferentes resistências de carga R_c .

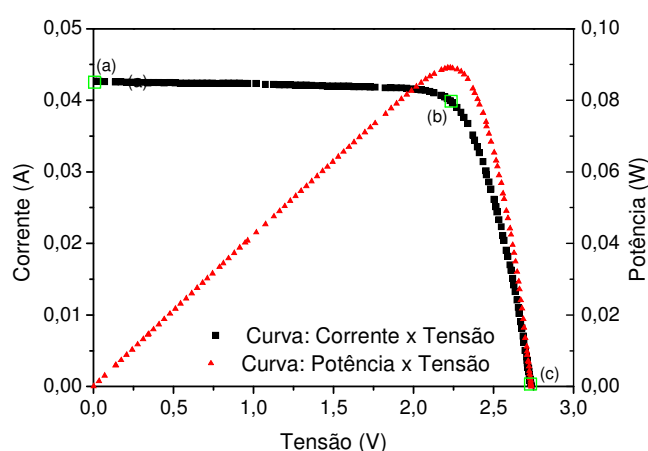


Figura 6- Curva IV característica da célula e potência gerada.

As condições de referência da curva $I-V$ acima foram: intensidade $G_r = 1000\text{W/m}^2$ e temperatura $T_r = 307\text{ K}$. Convencionalmente, devido às suas relevâncias técnicas, três pontos específicos do comportamento da curva $I-V$ da célula fotovoltaica, são destacados: (a) corrente de curto-circuito; (b) ponto de máxima potência; (c) tensão de circuito aberto. Os dados de corrente e tensão relacionados a esses pontos específicos são utilizados na composição do modelo teórico de funcionamento de um dispositivo fotovoltaico, permitindo assim, uma análise prévia da dimensão de um sistema fotovoltaico em função dos parâmetros climáticos da região onde se pretende aplicar esse sistema. Os valores de tensão de circuito aberto, corrente de curto-circuito e os valores tensão e correntes para potência máxima, são

Tabela 3: Tensão e Corrente nos pontos de potência máxima, circuito aberto e curto-circuito

Ponto	Tensão (V)	Corrente (V)
Curto-circuito	(V_{cc}) 0,000	(I_{cc}) 0,0426
Circuito Aberto	(V_{ca}) 2,736	(I_{ca}) 0,0000
Potência máxima	(V_{pm}) 2,231	(I_{pm}) 0,0399

As resistências em série (R_s) e em paralelo (R_p), tendo como base a Eq. (9), foram obtidas com ajustes lineares da curva $I-V$ na região de curto-circuito para R_p e na região de tensão de circuito aberto para R_s . O critério adotado, foi ajustar linearmente os 10 pontos mais próximos da corrente de curto-circuito ou tensão de circuito aberto. Como o coeficiente angular da reta de ajuste da curva $I-V$, está associada à derivada da corrente em função da tensão, foi possível, então, encontrar os valores das resistências parasitas. Os valores encontrados para R_p e R_s foram $1,87\text{K}\Omega$ e $7,09\Omega$, respectivamente.

A construção do modelo matemático para a célula em teste depende do cálculo dos cinco parâmetros associados a ele. Dessa forma, partindo da análise do comportamento da célula nos pontos de corrente de curto-circuito, potência máxima e tensão de circuito aberto, levando em consideração que os parâmetros R_s e R_p já foram determinados, podemos encontrar os parâmetros I_s , I_0 e m a partir das equações 11 a 13: (Phang et al, 1984).

$$m = \frac{V_{pm} + I_{pm}R_s - V_{ca}}{V_t \left[\ln\left(I_{cc} - \frac{V_{pm}}{R_p} - I_{pm}\right) - \ln\left(I_{cc} - \frac{V_{ca}}{R_p}\right) + \left(\frac{I_{pm}}{I_{cc} - \frac{V_{ca}}{R_p}}\right) \right]} \quad (11)$$

$$I_o = \left(I_{cc} - \frac{V_{ca}}{R_p}\right) \exp\left(-\frac{V_{ca}}{mV_t}\right) \quad (12)$$

$$I_s = I_{cc} \left(1 + \frac{R_s}{R_p}\right) + I_o \left[\exp\left(\frac{I_{cc}R_s}{mV_t}\right) - 1\right] \quad (13)$$

Os resultados para os cinco parâmetros do modelo encontrados são apresentados na Tab. 4.

Tabela 4: Parâmetros encontrados para o modelo fotovoltaico de cinco parâmetros.

Parâmetro	I_s (A)	I_o (A)	R_s (Ω)	R_p (Ω)	m
Valor	0,0428	$3,43 \times 10^{-15}$	7,33	$1,87 \times 10^3$	3,54

Substituído os dados da Tab. 4 na equação de corrente do modelo fotovoltaico, Eq. (6) foi possível a construção da curva I - V teórica para a célula em estudo, Fig. 7.

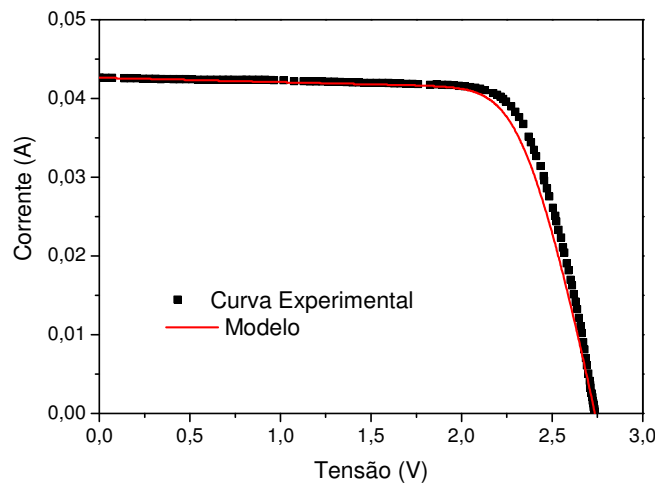


Figura 7- Comparação entre as curvas IV experimental e modelo

Como pode ser visto na Fig. 7, o modelo descreve bem o comportamento da *célula em teste* nos pontos de corrente de curto-circuito e tensão de circuito aberto, para a região onde se encontra o ponto de potência máxima o modelo prevê potências menores em relação ao comportamento encontrado. No ponto de potência máxima, em específico, o erro relativo, Er [%], do modelo em relação à curva experimental foi 4,78%. Em média $Er = 8,34\%$.

Levando em consideração os erros encontrados, simulações do modelo matemático para diversos valores de R_p e R_s foram realizadas, supondo que a disparidade entre as curvas experimental e do modelo FV tenha origem na determinação desses parâmetros. O procedimento realizado foi o mesmo utilizado para a determinação do modelo FV apresentado na Fig. 7. Os valores dos cinco parâmetros do modelo matemático para a *célula em teste*, calculados para alguns valores de R_p e R_s são apresentados na Tab. 5.

Tabela 5: Parâmetros encontrados para o modelo fotovoltaico de cinco parâmetros.

Parâmetro	I_s (A)	I_o (A)	R_s (Ω)	R_p (Ω)	m
Valor	0,0426	$1,51 \times 10^{-7}$	12,00	1000	8,25
	0,0427	$9,05 \times 10^{-13}$	4,00	1100	4,21
	0,0431	$3,24 \times 10^{-158}$	12,00	1000	0,028

Substituído os dados da Tab. 6 na equação de corrente do modelo fotovoltaico, Eq. (6) foi possível a construção das curvas I - V simulada para a célula em estudo, que, juntamente com a curva experimental e o modelo encontrado são apresentadas na Fig. 8-A.

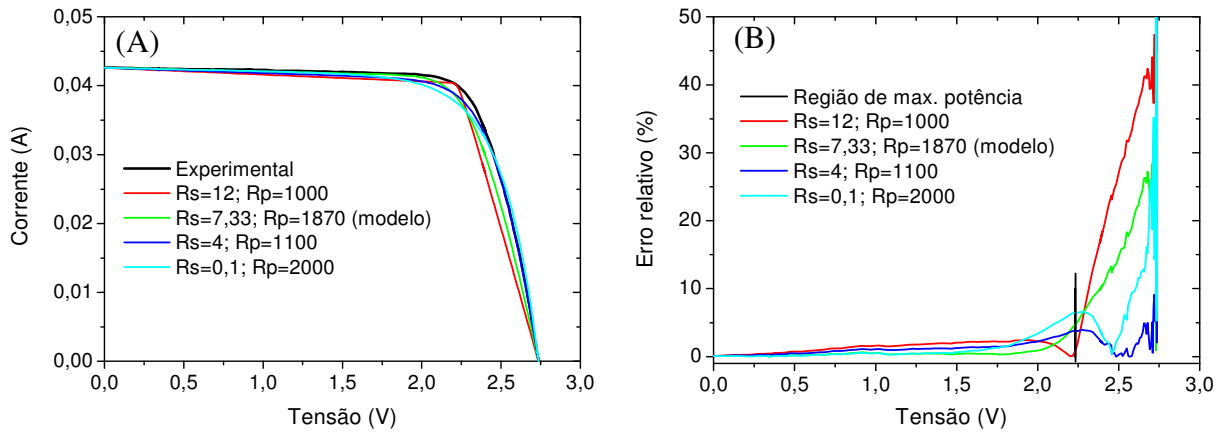


Figura 8: A- Curvas I - V (simuladas, modelo e experimental); B- Comportamento do valor absoluto do erro relativo das Curvas I - V (simuladas e modelo calculado) em relação a curva experimental.

As curvas simuladas, Fig. 8-A, mostram uma significativa influência das resistências parasitas no perfil das curvas I - V . Com de $R_p = 12 \Omega$ e $R_s = 1K\Omega$, obteve-se o melhor ajuste na região de potência máxima dentre as curvas em relação à curva experimental, com $Er = 0,79\%$ no ponto de potência máxima, Fig.8-B. Apesar de obter, visualmente, um melhor resultado, Fig. 8-A, a curva com $R_p = 0,1 \Omega$ e $R_s = 2K\Omega$, apresentou $Er = 6,51\%$ no ponto de potência máxima além de apresentar erros relativos significativos na região próximo ao curto-circuito. O melhor ajuste encontrado nas simulações foi obtido para $R_p = 4 \Omega$ e $R_s = 1,1K\Omega$, que apresentou $Er = 3,84\%$ no ponto de potência máxima e, em média pra curva toda, $Er = 3,02\%$. Para as outras curvas o erro relativo médio foram maiores que 6% .

4.2 Medida de Dependência da Resposta com a Temperatura

Para a análise da dependência com temperatura para os piranômetros, a norma ISO-9060 estabelece como parâmetro a medida da temperatura ambiente do local onde estão sendo realizados os testes. Entretanto, toda a construção do modelo fotovoltaico leva em consideração a influência da temperatura do semiconductor para conversão fotovoltaica. Desta forma, o teste de dependência com a temperatura, realizado nesse trabalho, leva em conta a temperatura do sensor, que é medida na superfície posterior da *célula em teste*, como mostrado na Fig. 3-B.

Incidindo radiação com potência constante de $1000W/m^2$ sobre a superfície sensível da *célula em teste*, a uma temperatura inicial de $18^\circ C$, fez-se variar a temperatura da *célula em teste*, medindo-se a sua respectiva resposta à incidência de radiação. O protótipo foi aquecido com o uso de um jato de ar quente, chegando até a temperatura de $58^\circ C$. A Fig. 8-A mostra o comportamento da resposta da *célula em teste* em função da temperatura.

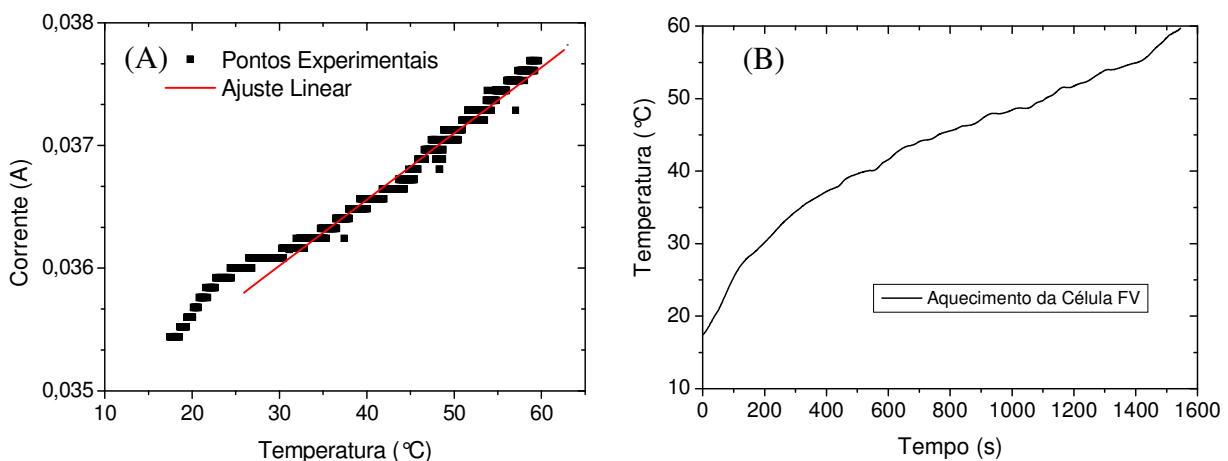


Figura 8: A- Dependência da resposta da *célula em teste* com a temperatura; B- Aquecimento da célula ao longo do tempo.

O comportamento da *célula em teste* no intervalo de temperatura compreendido entre 18 e $30^\circ C$, não condiz com o modelo teórico. Como pode ser notado na Fig. 8-A, *célula em teste* mostrou um comportamento linear apenas para temperaturas superiores a $30^\circ C$. Tal efeito se deve ao tempo de difusão do calor até chegar ao sensor de temperatura, representando a inércia térmica do sistema cristal de silício + placa de fenolite. Uma análise mais detalhada da evolução da temperatura com o tempo, como apresentado na Fig. 8-B, evidenciou um aumento mais acentuado da temperatura

para início do processo, em específico, no intervalo entre 18 e 35°C, seguido por um crescimento de temperatura aproximadamente constante e linear para o resto do intervalo. O resultado encontrado para o período de não linearidade evidencia que o aquecimento da *célula em teste* aconteceu de forma mais rápida que o tempo de difusão do calor pelo semiconductor e placa de fenolite, assim, pode-se entender que o semiconductor da *célula em teste* estava mais quente do que o sensor de temperatura acusava, e por tal motivo apresentou este aumento de corrente mais acentuado nesse período. Para o intervalo acima de 35°C, o aquecimento mais lento possibilitou a existência do equilíbrio de temperatura entre o semiconductor e sensor térmico, tendo como resultado, o processo de evolução da resposta com a temperatura acontecendo como esperado no modelo matemático.

Dentro deste contexto, o coeficiente de temperatura do sensor, correspondente ao coeficiente angular da reta de ajuste da curva corrente versus temperatura, foi obtido para respostas associadas a temperaturas superiores a 30 °C. Como a *célula em teste* está configurada para operar na região de curto-circuito, o coeficiente encontrado $\alpha = 5,32 \times 10^{-5}$ representa o coeficiente de temperatura da corrente de curto-circuito da célula fotovoltaica. A variação percentual da I_{cc} em relação à temperatura foi de $0,15\%^{\circ C^{-1}}$. Para um intervalo de temperatura de 50°C essa variação percentual chega a 7,5%.

4.3 Medida da Resposta com o Ângulo de Incidência

Como determina a Lei dos cossenos de Lambert, a intensidade de radiação que chega até uma superfície é proporcional ao cosseno ângulo de incidência. Portanto, pode-se definir a potência irradiada sobre a superfície do sensor G_s em função do ângulo de incidência, Eq. (14), através da relação:

$$G_s = G \cos \theta_s, \quad (14)$$

onde θ_s é o ângulo de incidência em relação à normal da superfície do sensor e G é a potência irradiada.

A base construída para os testes na célula FV é composta por um dispositivo de fixação do sensor, que permite variações no ângulo de incidência da radiação, Fig. 9-A. Esse ângulo de incidência é medido através de um goniômetro que está alinhado com o eixo central da superfície do sensor. Com esse dispositivo foi possível analisar o comportamento da *célula em teste* segundo a Lei de Lambert.

O procedimento para a medida de resposta com o cosseno foi realizado mantendo irradiação constante de $1000W/m^2$, e temperatura em torno de 27°C. A resposta da *célula em teste* foi medida para ângulos compreendidos no intervalo de 0 a 90° variado passos de 5°. Com a medida da resposta da *célula em teste* à irradiação com incidência normal à superfície, calculou-se, com base na Eq. (14), a resposta teórica da *célula em teste* para sucessivos ângulos de incidência. Os dados da resposta, medidos para estes ângulos, são comparados através do erro relativo com resposta esperada, calculada anteriormente. Os valores absolutos dos erros para cada ângulo são apresentados na Fig. 9-B.

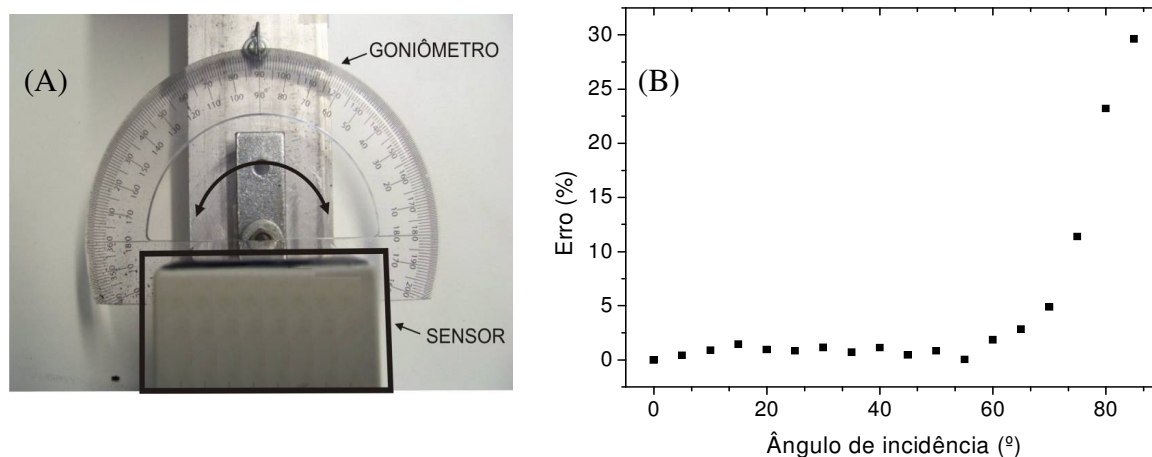


Figura 9: A- Vista superior da base de testes, destacando sistema graduado de deslocamento angular dos sensores; B- Erros da resposta da *célula em teste* em relação ao ângulo de incidência, calculados em relação ao valor esperado pela lei de Lambert.

Como pode ser visto na Fig. 9-B, para incidências até 60° os erros foram inferiores a 2%, chegando a 4,9% com a radiação incidindo com o ângulo de 70°. Para ângulos maiores, os erros crescem de forma significativa, passando de 30% para incidência a 85°. Poder-se-ia indicar a utilização de um difusor na superfície do semiconductor ou um sistema de seguimento do movimento aparente do sol de como possível solução. As reflexões na interface ar-resina tornam-se muito significativas para ângulos superiores a 70° prejudicando o funcionamento da *célula em teste* como sensor. Entretanto, tal prejuízo não se faz tão significativo, pois, nota-se que para um dia com céu claro, a quantidade de energia medida antes das 7h e após as 15h (horário solar) que estão relacionados a ângulos solares maiores que 70° e 70°, respectivamente, correspondem a cerca de 5% do total de energia medida durante todo o dia.

4.4 Testes com Insolação Global

Este teste permitiu uma avaliação do comportamento da *célula em teste* para medidas instantâneas e também medidas de longa duração. Os dados utilizados nesses testes foram coletados num período de cinco dias subsequentes (de 7 a 11 de junho de 2009) em que a *célula em teste* juntamente com o piranômetro de referência foram submetidos às mesmas condições ambientes. Das medidas de sinal de corrente da *célula em teste* e piranômetro foi possível realizar a calibração do dispositivo em teste, possibilitando então encontrar sua sensibilidade S [A/W/m²], Fig. 10. O Comportamento da corrente corrigida I_{corr} em função da intensidade solar pode ser visto na Fig. 10.

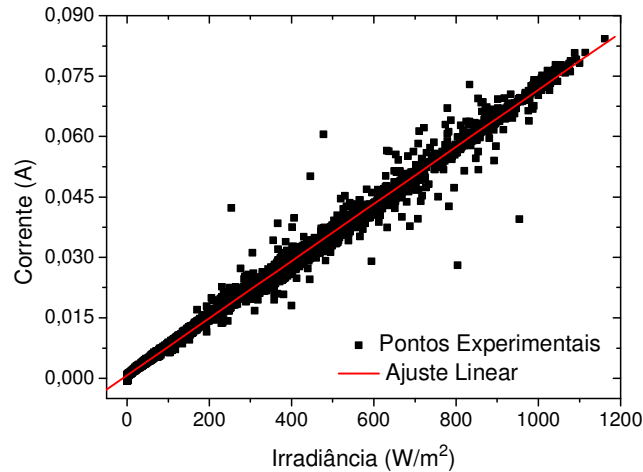


Figura 10- Curva de calibração da *célula em teste* com utilização do piranômetro de referência.

O coeficiente angular da reta de ajuste encontrado, que é justamente a sensibilidade da *célula em teste*, foi: $S = 7,09 \times 10^{-5} \text{ A/W/m}^2$

Como a sensibilidade é conhecida, pode-se então determinar a quantidade de radiação que chega até a superfície da *célula em teste*, usando como parâmetro de medida seu sinal de resposta, que nesse caso é a corrente. Assim, a potência irradiada pelo sol medida pela *célula em teste* é:

$$P_{sol} = \frac{I}{S} \quad (15)$$

Entretanto, como o resultado apresentado no item 4.2 evidencia uma influência significativa da corrente da *célula em teste* com a temperatura, os dados de corrente da *célula em teste*, utilizados para o cálculo da irradiância sobre a superfície da *célula em teste*, Eq. (15), foram corrigidos em relação à temperatura segundo a relação apresentada na Eq. (16), obtida com base na Eq. (10):

$$I_{corr} = I - \alpha(T - T_r), \quad (16)$$

onde I_{corr} [A] e I [A] são a corrente da *célula em teste* corrigida em relação à temperatura e corrente medida, respectivamente, α é o coeficiente de temperatura da *célula em teste*, apresentado no item 4.2 e $T_r = 25 \text{ }^\circ\text{C}$.

Durante os 5 dias de análise, as leituras realizadas pelo piranômetro resultaram na soma de irradiância de: $\sum Ep = 17,7 \text{ MW/m}^2$ e a *célula em teste*, calculada com base na Eq. (15), obteve a soma de irradiância $\sum Ec = 18,4 \text{ kWh/m}^2$. Dessa forma, o erro E_r , das medidas de longa duração da *célula em teste*, em relação ao piranômetro foi:

$$E_r = 3,9\%$$

O dia 30 de julho de 2009 foi escolhido como um dia representativo para análise das medidas instantâneas, pois apresenta um intervalo de insolação direta, na parte da manhã, e um período nublado durante a tarde, permitindo uma análise mais abrangente dos efeitos das condições ambientes sobre a *célula em teste*. Usando as medidas de corrente da *célula em teste* realizadas para o dia analisado, com o auxílio da Eq. (15), foi possível calcular a energia irradiada sobre a *célula em teste* e assim, comparar o resultado com a medida realizada pelo piranômetro de referência. Na Fig. 11-A, são contrastadas as medidas de irradiâncias realizadas pela *célula em teste* e piranômetro de referência.

Visualmente as curvas da Fig. 11-A se encontram muito próximas em quase todo dia, a exceção do início da manhã e final da tarde, onde as discrepâncias aumentam (desvio da lei de Lambert). Os picos pronunciados estão associados aos efeitos de reflexão causados pelas nuvens, que à medida que vão se aproximando do ponto de cobertura

do sol, refletem a luz na direção do sensor, aumentando assim a quantidade de radiação medida. Essa explicação para os picos pode ser referendada pela queda de irradiância logo após seu aparecimento, originada da interrupção da iluminação direta do sol causada pela nuvem. Uma análise estatística mais detalhada mostrando as discrepâncias entre as curvas da Fig. 11-A é apresentada na Fig. 11-B.

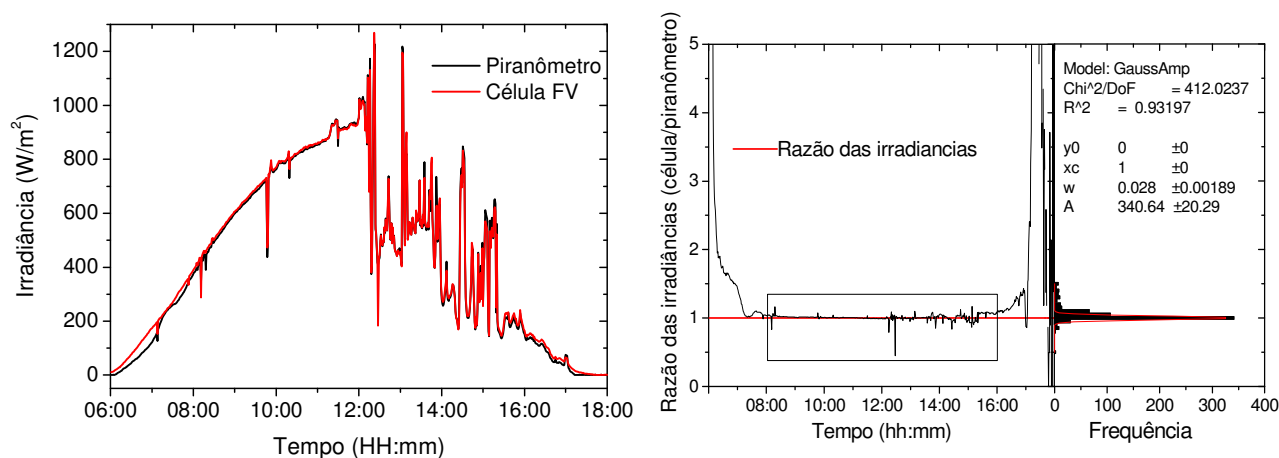


Figura 11: A- Curvas das leituras de irradiância solar do piranômetro de referência e *célula em teste*; B- Curvas da razão entre as irradiâncias solar lidas (*célula/piranômetro*) / histograma de frequências das razões para a região de interesse (em destaque).

Nos extremos da Fig. 11-B, pode-se notar que a razão assume valores grandes se comparados com o esperado 1 (um). Nestas regiões as leituras estão muito próximas do fundo de escala do sistema de aquisição (NOMAD) gerando dados não confiáveis. Além disso, incidências com ângulos acima de 70° , como apresentado neste trabalho, carregam erros significativos, confirmando a presença de erros tão expressivos. Por isso, a análise estatística das medidas instantâneas foi realizada apenas para o período compreendido entre as 8 e às 16h.

Dentro da região de interesse, a Fig. 11-B exibe alguns picos no decorrer da evolução. Se comparados os tempos, com os apresentados nas curvas da Fig. 11-A, é perceptível que estes picos acontecem nas regiões onde existe uma queda ou ascensão de irradiância pronunciada, que, como já falado, estão associadas à passagem de nuvens. Nesses pontos, a diferença entre os tempos de resposta dos sensores torna-se mais evidente, ou seja, efeito capacitivo na leitura do piranômetro leva a um atraso na leitura para quedas ou ascensões intensas, resultando em erros mais significativos nesses pontos. Nas regiões onde não há passagem de nuvens observa-se um comportamento mais constante da razão entre os sinais dos sensores. Dos dados compreendidos no intervalo de análise, foi construído um histograma que permitiu a análise do desvio padrão σ desses dados. Com um ajuste para uma distribuição gaussiana foi possível encontrar a raiz da variância $w = 0,028$, que é justamente duas vezes o desvio padrão da distribuição dos dados, portanto: $\sigma = 1,4\%$.

5. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

Com a finalidade de estudar uma célula fotovoltaica como um sensor, um pequeno módulo de silício comercial foi testado. Esses testes analisam alguns parâmetros utilizados na especificação dos piranômetros segundo a norma ISO-9060. Um modelo matemático baseado na física dos semicondutores foi elaborado de maneira a caracterizar a *célula em teste* dentro das condições de uso como radiômetro. Por fim, uma análise das médias à exposição direta do sol também foi estabelecida, configurando a célula como um sensor que está submetido às condições de operação e trabalho.

O comportamento da *célula em teste* em relação ao seu comportamento teórico foi satisfatório, apesar da disparidade entre as curvas teórica e experimental na região do joelho da curva chegando a 5%. As simulações mostraram que a metodologia para a determinação das resistências parasitas precisa ser melhorada, considerando que a curva de melhor ajuste tem valores de R_p e R_s menores aos encontrados. Para isso

A dependência com a temperatura apresentada pela *célula em teste* também foi considerada como satisfatória, apesar dos problemas com a forma do aquecimento, o resultado mostra que a *célula em teste* se comporta como previsto no modelo. Além disso, a variação de 7,5% para um intervalo de temperatura de 50°C se encaixa dentro dos padrões de especificação dos piranômetros (WMO, 2008; Freire, 2008), sendo também, mesmo valor encontrado para outros piranômetros fotovoltaicos como o LI-200 (LI-COR, Inc., 2005) ou SP-LITE (Campbell Scientific, Inc, 2004).

A *célula em teste* segue a lei de Lambert numa ampla faixa (0 a 70°) com erros inferiores a 5%. Como foi visto, para ângulos de incidência maiores os erros tornam-se mais significativos. Os resultados poderiam ser melhorados com a utilização de um difusor na superfície do semiconductor ou um sistema de seguimento do movimento aparente do sol. Porém, as leituras de irradiação solar realizadas com sensor fixo para ângulos de incidência, maiores que 70° , em um dia claro, correspondem a menos de 5% da irradiância diária total, o que está compreendido dentro da precisão da *célula em*

teste. Desta forma, tendo em vista que as medidas realizadas por este protótipo são destinadas principalmente para o dimensionamento de sistemas FV, o mais econômico e prático é usar sua *célula em teste* sem difusor ou seguidor.

As medidas com incidência direta do sol apresentaram erros inferiores a 4% mostrando que a *célula em teste* tem um bom retrospecto trabalhando em condições ambientes, além de estar de acordo com as exigências das normas de especificação (WMO, 2008).

Como já abordado nesse trabalho, sabe-se que o levantamento do potencial solar de uma determinada região tem fator decisivo nas perspectivas de aplicação de sistemas de solares como fonte de energia desta região. Nas aplicações termo-solares a energia efetiva a ser utilizada, encontra-se na região do visível e próximo infravermelho do espectro solar. Para a perspectiva de aplicação de sistemas fotovoltaicos, o silício é a principal tecnologia encontrada. Nesse contexto os piranômetros fotovoltaicos de silício passam a ser alternativas eficazes no levantamento do potencial solar. Principalmente para as aplicações dos sistemas fotovoltaicos, pois, um piranômetro de FV de silício vai medir o potencial solar útil à conversão fotovoltaica desse material. É a forma mais precisa para medir este potencial.

Os maiores problemas encontrados nesse trabalho estão relacionados ao espectro de irradiância das fontes de luz usadas para simular a luz solar, que ainda é precário. Devido à aparição de vários tipos de células fotovoltaicas com respostas espectrais diferentes (silício amorfo, CIS, CdS, etc.), a necessidade de uma fonte com resposta espectral mais próxima da emissão solar fica maior. Como perspectiva para uma maior confiabilidade dos testes realizados, além da realização de todos os testes, existe a proposta de criação de uma base para especificação de radiômetros, que se baseia nos testes propostos na norma ISO-9060, seguindo os padrões de espectro, temperatura e irradiância. Essa base permitirá os testes em piranômetros térmicos ou fotovoltaicos, além de outros tipos de radiômetros de área reduzida.

REFERÊNCIAS

- Freire, L. A. D., 2008. Desenvolvimento de um Piranômetro Fotovoltaico. Diss. de Mestrado, PROTEN, UFPE, Recife
- Greenpeace and EPIA, 2007. Solar Generation 4, Bruselas.
- Grupo de Trabalho de Energia Solar (CRESECB e CEPEL), 2004. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos, CRESECB, Rio de Janeiro.
- LI-COR, Inc., 2005. Li-cor terrestrial Radiation Sensors Introduction Manual, Documento disponível na internet, site: ftp://ftp.licor.com/perm/env/Radiation_Sensors/Manual/TerrestrialSensors_Manual.pdf. Acessado 15 /de 2009
- Campbell Scientific, Inc, 2004. SP-LITE Silicon Pyranometer Introduction Manual, Documento disponível na internet, site: <http://www.campbellsci.com/documents/manuals/retired/sp-lite.pdf>. Acessado em 15 de fevereiro de 2009.
- Lima, A. A., 2008. Construção de uma Geladeira Solar a Adsorção do Álcool e Carvão Ativado. Trabalho de Conclusão de Curso, Departamento de Física, UEFS, Feira de Santana.
- Phang J. C. H. Chan D. S. H. Philips J. R., 1984. Accurate analytical method for the extraction of solar-cell model parameters. *Electron Lett*, 20(10):406–18.
- Soto, W. D., 2004. Improved and Validation of Model for Photovoltaic Array Performance, Masters Dissertation, Solar Energy Laboratory, University Wisconsin, Madison.
- Souza, J. V. D., 2007. Contribuições em Solarimetria para a Composição de uma Rede Baiana de Radiômetros. Trabalho de Conclusão de Curso, Escola Politécnica, UFBA, Salvador.
- Tiwari, G. N., 2002. Solar Energy, Narosa Publishing House.
- WMO, 2008. WMO GUIDE TO METEOROLOGICAL INSTRUMENTS AND METHODS OF OBSERVATION, parte I, capítulo 7, 7ª edição. Documento disponível na internet, site: http://www.wmo.int/pages/prog/www/IMOP/publications/CIMO-Guide/CIMO_Guide-7th_Edition-2008.html. Acessado em 10 setembro de 2009.

STUDY OF SILICON PHOTOVOLTAIC CELLS HOW RADIOMETERS

Abstract. *The analysis of solar potential of a region is fundamental for the prospects of application.. But the data measured with pyranometers not represent accurately the potential useful solar for photovoltaic conversion. In this context, the implementation of photovoltaic radiometers represents an effective solution. Big industries of pyranometers already manufacture these devices and published articles also shown their efficiency. Howsoever, the interest of Laboratório de Energia Solar (LABENSOL) -UEFS, is study the operation of a photovoltaic cell as radiometer. The way taken was to evaluate its operation in relation to the proposed mathematical model, test it against the parameters of the specification set out in ISO-9060 and compare it with a reference pyranometer for the measurements performed at ambient. As a result, the cell studied was efficient considering the proposed analysis. The measured I-V curve, fits the model, with maximum error of 5%. Overall, the results for the specification parameters remained within the limits set by ISO-9060 and comparison with the reference pyranometer determined the cell such as photovoltaic pyranometer with an accuracy of 5%. In this variable, according to the WMO (World Meteorological Organisation), the cell is classified as a pyranometer of "good quality". As Prospects of future testing, there is already a proposal to replace the radiation source and the whole basis used in the laboratory, waiting, as a result, more refined measures and tests equivalent to those for proposed by established norms.*

Key words: Photovoltaic Silicon Cells, Radiometers, Solar Energy, Instrumentation