UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO – UFERSA
CURSO DE BACHARELADO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA
Trabalho de Conclusão de Curso (2018).

CONFECÇÃO E ANÁLISE DE UM PIRANÔMETRO FOTOVOLTAICO DE BAIXO CUSTO

João Frederico S. de Paula, George Bezerra Ribeiro, Vladimir Batista Figueirêdo

Resumo: O presente trabalho teve como objetivo o desenvolvimento e avaliação de um piranômetro fotovoltaico de baixo custo, construído a partir de materiais encontrados facilmente no mercado nacional. Para tanto, foram avaliados modelos de pequenos módulos fotovoltaicos de silício policristalino. Foi desenvolvido um protótipo de corpo de piranômetro com plástico de engenharia usinado. Também foram analisados os comportamentos de difusores construídos de três materiais diferentes, Thecnyl®, acrílico e PVC. Para o material escolhido foram testadas duas espessuras distintas e acabamento superficial polido e fosco. Todos os testes foram realizados em campo, na estação meteorológica da Universidade Federal Rural do Semi-Árido, em Mossoró-RN, entre agosto de 2017 e março de 2018. Os resultados dos protótipos foram comparados com um piranômetro de referência, de classe secundária. Os dados dos experimentos foram coletados por um registrador automático e o seu tratamento foi realizado considerando as recomendações da norma ISO 9847:1992. O modelo final do protótipo mostrou ter um desempenho satisfatório para medições na escala horária e diária. Nas medições de valores totais horários, considerando o intervalo de 6h00 às 18h00, o erro relativo percentual absoluto médio foi de 2,26%, o mínimo de 0,433% e o máximo de 8,10%. Nas medições de valores totais diários, o erro relativo percentual absoluto médio foi de 0,50%, o mínimo de 0,16% e o máximo de 0,93%.

Palavras-chave: Radiação solar. Sensor de baixo custo. Calibração. ISO 9847. Difusor.

1. INTRODUÇÃO

O conhecimento da radiação solar que chega à superfície terrestre tem sido cada vez mais importante para subsidiar diversas atividades, como estudos meteorológicos, aproveitamento do recurso solar para fins energéticos, manejo e trato das culturas realizado na agricultura irrigada, projetos de edificações, entre outras aplicações. Especialmente no que se refere ao aproveitamento para fins energéticos, o Brasil e, particularmente a região Nordeste, apresentam um grande potencial, que apenas recentemente começou a ser explorado, em razão da adoção de políticas públicas de incentivo ao uso da energia fotovoltaica por pequenos e grandes produtores.

O instrumento comumente utilizado para a medição da radiação solar costuma ser o piranômetro. No Brasil, esses instrumentos geralmente são importados, possuem ótima precisão e alto custo, o que torna o acesso a eles viável quase que exclusivamente às universidades, centros de pesquisa e empresas de grande porte. Devido à isso, na literatura encontram-se vários trabalhos [1-3] que realizaram pesquisas sobre o desenvolvimento de sensores de radiação solar, visando o melhor custo benefício, comparando-os com sensores comerciais que tem alta classe, conforme a ISO 9060:1990[1]. Este cenário motiva e justifica o desenvolvimento de um modelo de piranômetro fotovoltaico com boa acurácia e baixo custo, que possibilite a disseminação do acesso a este dispositivo.

Desta forma, a pesquisa realizada no presente trabalho tem como objetivo a construção e análise das características de desempenho de um piranômetro do tipo fotovoltaico, comparando-o com um sensor de referência de classe secundária.

[1] ISO 9060:1990: especificação e classificação de instrumentos para a medição de radiação solar.

2. ENERGIA SOLAR

2.1 Fundamentação Teórica

Ao atravessar a atmosfera terrestre, a radiação solar sofre modificações nos seus comprimentos de onda e na orientação, devido ao processo de absorção, refração e reflexão, separando-a em dois tipos: direta e difusa. O piranômetro mede a soma de ambas as componentes, denominada radiação global.

Os elementos sensores dos piranômetros são basicamente termopilha ou célula fotovoltaica. O primeiro é constituído por um conjunto de termopares, contendo um lado posicionado em uma superfície enegrecida voltada para o Sol e o outro voltado para o interior do instrumento ou sob uma superfície de cor clara. A diferença de temperatura nas juntas dos termopares expostos em condições diferentes à radiação solar produz uma tensão elétrica proporcional à radiação incidente [4]. O segundo tipo normalmente utiliza uma pequena célula fotovoltaica de silício como sensor, a qual é posicionada sob um difusor e exposta à radiação solar. Pelo efeito fotovoltaico, a célula produz uma corrente elétrica que, sob determinadas condições, é proporcional à intensidade da radiação incidente [4]. Esse tipo de piranômetro costuma ter resposta mais rápida e linear e um custo menor, em comparação com o que utiliza a termopilha [5]. A grande desvantagem do sensor fotovoltaico é sua reduzida faixa espectral de resposta, situada entre 400 e 1.100 nm, inferior ao sensor de termopilha, que responde à faixa entre 285 e 2.800 nm [6].

O gráfico da Figura 1 traz curvas que mostram a relação corrente *versus* tensão da célula fotovoltaica, influenciada pela intensidade da radiação solar [5]. É possível observar nas curvas que há uma área onde a corrente gerada é proporcional à intensidade de radiação. Essa área, representada pelo retângulo delimitado por linhas tracejadas, equivale à região que vai do ponto de operação em curto-circuito até um ponto onde a corrente passa a decrescer com o aumento da tensão, situado próximo ao ponto de máxima potência da célula. Sendo assim, verifica-se que para se utilizar uma célula fotovoltaica como sensor de radiação solar é necessário mantê-la operando na faixa de linearidade da relação entre a radiação e a corrente, o que pode ser obtido conectando-a a uma resistência de valor suficientemente baixo de modo que, em qualquer condição de intensidade de radiação, o ponto de operação não se aproxime da região de máxima potência.

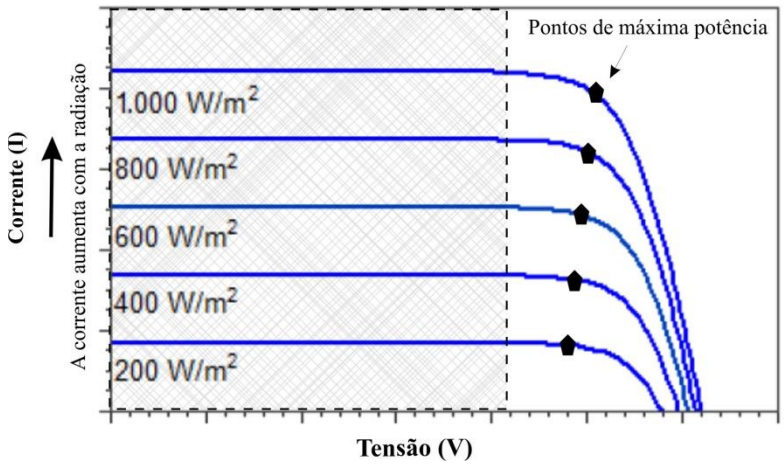


Figura 1. Curva característica I x V de uma célula fotovoltaica. (Adaptado de CRESESB, 2014)

3. Material e Métodos

A confecção do piranômetro fotovoltaico ocorreu em três etapas. Na primeira, foram escolhidos módulos fotovoltaicos de tamanho reduzido, de fácil acesso no mercado nacional e de baixo custo. Esses módulos foram testados em campo, sendo submetidos à radiação solar global, no plano horizontal, para a determinação das suas características elétricas, levantamento da relação entre a radiação solar global e a corrente elétrica produzida e definição da resistência de carga que resultasse em um bom comportamento do conjunto, considerando a linearidade da resposta e a sensibilidade. Posteriormente, foi desenvolvido um projeto do corpo do piranômetro, sendo construídas três unidades e realizados novos testes de campo para a escolha do material e características físicas do difusor. Os protótipos foram instalados no parque de sensores da Estação Meteorológica Automática (EMA) da Universidade Federal Rural do Semi-Árido - UFERSA (05º12’49” S, 37º18’44” W, 38m) e todos os experimentos foram realizados entre 3 de agosto de 2017 e 11 de março de 2018. Os dados dos testes de campo foram coletados por um registrador de

dados do tipo *datalogger*, modelo Campbell Scientific, Inc. CR 3000. Em todos os testes, além das tensões dos protótipos de piranômetros fotovoltaicos, foi monitorada a radiação solar global, através de um piranômetro KIPP&ZONEN CMP22 [7], utilizado neste estudo como referência. Cabe destacar que o piranômetro de referência possui um sensor do tipo termopilha, faixa espectral de 200 a 3600 nm e classificação de padrão secundário, de acordo com a norma ISO 9060:1990, tendo, portanto, o mais alto nível de acurácia para este tipo de instrumento [7].

O tratamento dos dados coletados em campo e os procedimentos de calibração dos protótipos foram fundamentados na ISO 9847:1992[2], em que descreve uma metodologia para calibração de piranômetros em campo usando um piranômetro de referência. Como a metodologia apresentada na ISO 9847 é essencialmente aplicável a medições realizadas de forma manual, em séries de medições distintas para condições diferentes de céu, considerando céu estável sem nuvens, céu instável com algumas nuvens e céu nublado, foram feitas adaptações para o caso concreto: Em todos os testes realizados em campo, o *datalogger* foi programado para realizar leituras a cada 5 segundos e registrar as médias a cada 10 minutos, durante todo o período dos experimentos. Com isso, houve o aumento significativo do número de dados coletados em relação aos procedimentos especificados na norma.

3.1 Ensaio e Seleção do Módulo Fotovoltaico

A primeira etapa do desenvolvimento do protótipo foi o teste de módulos fotovoltaicos visando à escolha do modelo a ser adotado como elemento sensor da radiação solar global. Foram testados dois modelos de potências e dimensões diferentes (Figura 2), no intervalo de vinte dias.

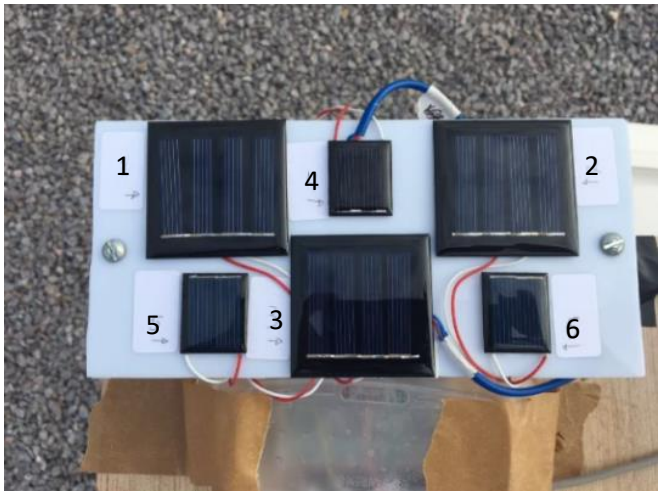


Figura 2: Sensores em teste. (Autoria própria)

Os modelos submetidos ao teste foram pequenos módulos fotovoltaicos policristalinos, um medindo 3 x 3 cm e possuindo corrente e tensões nominais de 80 mA e 1 V (Figura 2, módulos 4, 5 e 6) e o outro medindo 5 x 5 cm com 160 mA de corrente e 2 V de tensão nominal (Figura 2, módulos 1, 2 e 3). Aplicando-se a Lei de Ohm encontrou-se o valor da resistência à potência nominal em ambos os módulos. Optou-se, então por testar o comportamento do conjunto com os módulos conectados a resistores de valores menores, baixos o bastante para garantir a operação na região linear horizontal da curva I x V, mas suficientemente elevados para assegurar uma boa sensibilidade ao sensor.

3.2 Projeto e Construção do Corpo do Sensor

A segunda etapa do desenvolvimento do protótipo foi o projeto de um corpo para o sensor, que fosse compatível com as dimensões do módulo fotovoltaico escolhido e que contemplasse a inserção de um difusor. Tomou-se como referência o formato adotado em piranômetros os quais utilizam fotodiodos como sensor, produzidos pelo fabricante (LI-COR). Assim, chegou-se ao modelo proposto neste trabalho, cujo corpo foi confeccionado em material plástico tipo THECNYL®[3], fixado em uma base confeccionada

[2] ISO 9847:1992: Calibração de piranômetros de campo em comparação com um piranômetro de referência.
[3] Thecnyl é marca registrada da Rhodia, para o nome comercial de um polímero de engenharia à base de poliamida.

por um flange de PVC. A estrutura do corpo foi usinada no centro, formando um rebaixamento, onde foi inserido o módulo fotovoltaico, que foi conectado a um cabo tipo manga de duas vias com diâmetro de 26 AWG (0,4049 mm). Para cobrir o elemento sensor, foram usinadas tampas também de THECNYL®, sendo um modelo fechado no topo e outro vazado para inserção de difusores de outros materiais. A Figura 3 mostra uma imagem do protótipo montado com difusor de acrílico.

Figura 3. Corpo do piranômetro proposto com difusor de acrílico. (Autoria própria)

3.3 Definição do Difusor

A última etapa do processo de desenvolvimento do piranômetro de baixo custo foi identificar um difusor que apresentasse bons resultados, selecionando-se entre vários tipos de material, espessura e acabamento da superfície. Em um piranômetro fotovoltaico, o difusor possui a função de distribuir uniformemente e, também, de reduzir a intensidade de radiação incidente no módulo fotovoltaico, aumentando sua vida útil. Em alguns projetos ele é confeccionado em um formato especial, visando reduzir o erro de cosseno do instrumento. Neste projeto não houve este objetivo, uma vez que difusores com tal propriedade costumam possuir um formato cônico ou semiesférico, dificultando e encarecendo a sua fabricação. Assim, foram testados difusores apenas no formato cilíndrico, com materiais, espessuras e superfícies variadas, pois este formato geométrico é de fácil construção e foi utilizado em trabalhos anteriores, obtendo resultados satisfatórios [1]. Foram confeccionados e testados difusores de THECNYL®, PVC [2] e acrílico [1], materiais de baixo custo e fácil aquisição no mercado local.

Visando identificar a influência na resposta do piranômetro das características relacionadas com o material, espessura e tipo de acabamento superficial do difusor, foram programados três ciclos de testes. Para tanto, três protótipos do piranômetro, juntamente com o piranômetro de referência – KIPP&ZONEN CMP22, foram conectados ao registrador de dados, que foi programado para ler os valores de tensão de cada sensor a cada 5 segundos e registrar a média das leituras a cada 10 minutos. Em cada ciclo de testes, considerando a metodologia de tratamento dos dados recomendada pela ISO 9847, os valores médios de cada 10 minutos obtidos por cada protótipo para ângulos de elevação do Sol superiores a 20º, foram comparados com os valores do piranômetro de referência e calculado o valor da sensibilidade de cada protótipo, conforme definido na Equação 1.

$$\frac{\sum_{t=1}^{n} \left|\frac{yt-\hat{y}t}{yt}\right|}{n} \quad (1)$$

Onde n é o número de dados, y é o dado proveniente do protótipo e ŷ é o dado do piranômetro de referência. Em seguida, foram desconsideradas todas as leituras que apresentavam discrepância superior a 2% e calculada novamente a sensibilidade média de cada protótipo. Além da Equação 1, foram usados os índices estatísticos "coeficiente de determinação (R^2)", "coeficiente de variação (CV)" e os "erros relativos absolutos", para efeitos de comparação e verificação do comportamento dos dados coletados.

3.3.1 Definição do Material do Difusor

O primeiro ciclo de testes dos difusores teve o objetivo de selecionar o material mais adequado. Durante três dias foram testados, simultaneamente, três materiais para a composição do difusor, os quais

foram: O THECNYL®, o acrílico leitoso e o PVC, com espessuras de 4 mm, 3 mm e 1,5 mm, respectivamente. Em relação ao THECNYL®, não foi encontrada na literatura referências sobre sua aplicação como difusor para radiação solar, mas as características de fácil disponibilidade, baixo custo e sua propriedade de alta resistência a altas temperaturas, despertou o interesse de incluí-lo na comparação com os outros dois materiais.

3.3.2 Espessura e Acabamento da Superfície do Difusor

Após a identificação do material que apresentou os melhores resultados quando comparados com o piranômetro de referência, foi executado o segundo ciclo de testes, cujo objetivo é de verificar o efeito da espessura do difusor na resposta relativa do piranômetro, em comparação com a referência. Durante três dias foram testados dois protótipos com os difusores compostos pelo material escolhido no primeiro ciclo de testes, mas com espessuras distintas e ambos com superfície polida. Por fim, no terceiro e último ciclo de testes dos difusores, durante cinco dias, dois protótipos foram testados, um com superfície polida e o outro fosco, visando identificar os efeitos do acabamento superficial do difusor no comportamento do piranômetro.

4. Resultados e Discussões

4.1 Módulos Fotovoltaicos

Na Figura 4 pode ser visto o teste realizado em campo, entre 3 e 22 de agosto de 2017, no qual os módulos fotovoltaicos estavam conectados aos resistores em paralelo, protegidos por uma caixa de plástico transparente. Observa-se também o piranômetro KIPP&ZONEN CMP22 e o *Datalogger*, abrigado em caixa de proteção de fibra de vidro.

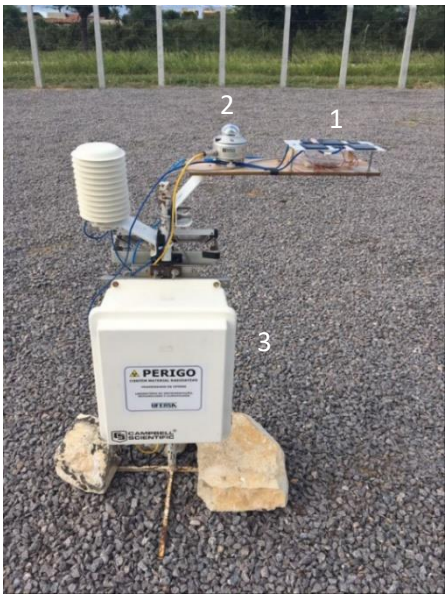


Figura 4. Teste dos elementos sensores. (Autoria própria)
Nota: Os módulos em teste (1), o piranômetro de referência (2) e o Datalogger, situado no interior da caixa de fibra de vidro (3).

O teste com seis módulos fotovoltaicos conectados a resistências escolhidas de acordo com o item 3.1 mostrou que os sensores de menores dimensões apresentaram resultados suficientemente satisfatórios, motivando a sua escolha para comporem os protótipos, por facilitar o uso em campo devido ao seu tamanho e diminuir os custos da construção do piranômetro. A Tabela 1 mostra a Sensibilidade e o Coeficiente de determinação dos dados obtidos de cada módulo escolhido para a confecção do piranômetro em comparação com os dados do piranômetro de referência.

Tabela 1. Características de resposta dos módulos escolhidos.
(Autoria própria)

Módulo	Sensibilidade ($W.m^{-2}/mV$)	Coeficiente de determinação (R^2)
Módulo 1	1,696	0,999
Módulo 2	1,831	0,997
Módulo 3	1,780	0,996

Observa-se na Tabela 1 os resultados obtidos por esses módulos escolhidos, estando ligados em paralelo a resistências de 5,6 ohms, valor escolhido por apresentar uma melhor relação Irradiação x Tensão. Todos os módulos apresentaram uma boa linearidade com os dados do piranômetro de referência, com coeficientes de determinação superiores a 0,99. Também apresentaram uma boa sensibilidade, em média de 1,769 $W.m^{-2}/mV$, o que os qualifica para o uso com *dataloggers* e até mesmo para leitura direta, com voltímetro.

4.2 Avaliação dos Protótipos com Diferentes Difusores

Os resultados dos experimentos de campo realizados para avaliação e escolha do material do difusor, sua espessura e seu acabamento superficial são apresentados nesta seção. Observa-se na Figura 5 o conjunto de protótipos de piranômetros montados em superfície plana, ao lado do piranômetro de referência, modelo KIPP&ZONEN CMP22.

Figura 5. Protótipos de piranômetros com os difusores em teste e o piranômetro de referência, KIPP&ZONEN CMP22. (Autoria própria)
Nota: os protótipos estão enumerados de 1 a 3 e o piranômetro de referência com a enumeração 4.

4.2.1 Material do Difusor

Na Figura 6, verificam-se os valores dos sinais de saída dos protótipos, em milivolts, com os três materiais como difusor: THECNYL®, acrílico e PVC. Também estão apresentados os valores medidos no piranômetro de referência, convertidos em $W.m^{-2}$, no eixo vertical secundário. Os dados referem-se ao período de três dias, entre 23 e 25 de fevereiro de 2018, de 7h00min as 16h30min, período em que o ângulo de elevação do Sol encontra-se acima de 20°. O céu neste intervalo apresentou-se parcialmente nublado e não houve a ocorrência de chuvas. Observa-se que houve uma grande variação da irradiação ao longo do dia (Figura 6).

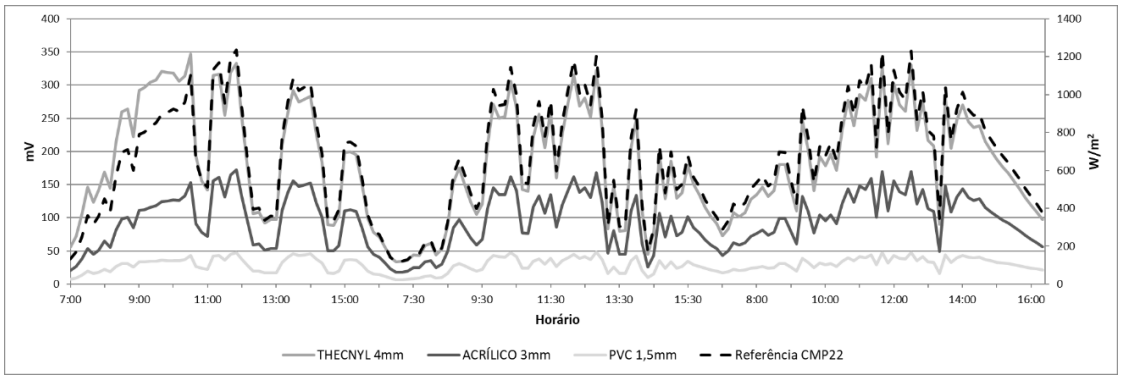


Figura 6. Resultados dos piranômetros protótipos com difusores de três materiais distintos e comparativamente ao piranômetro de referência. (Autoria própria)

De acordo com o gráfico da Figura 6, o protótipo com difusor de THECNYL® apresentou uma sensibilidade variável, sendo maior no início do primeiro dia e menor no restante do período do experimento. Uma provável causa desta variação pode ter sido a ocorrência de chuva no local durante a noite anterior, fazendo com que o THECNYL® absorvesse umidade, alterando a sua translucidez e, consequentemente, aumentando também a sensibilidade do piranômetro. Em relação aos outros dois materiais, não ocorreu alteração porque as suas superfícies não possuem a propriedade de absorção como o primeiro material. A Tabela 2 traz as especificações e resultados para cada piranômetro com os difusores avaliados.

Tabela 2. Respostas dos piranômetros com difusores de três materiais diferentes. (Autoria própria)

Protótipo	Material do Difusor	Espessura do Difusor (mm)	Sensibilidade ($W.m^{-2}/mV$)	Coeficiente de Variação (%)	(R^2)
1	THECNYL®	4	3,646	10,2	0,931
2	Acrílico	3	6,958	3,5	0,996
3	PVC	1,5	22,071	11,8	0,943

Dentre os protótipos avaliados, a unidade com difusor de acrílico destacou-se, apresentando uma linearidade melhor e um coeficiente de variação menor. O THECNYL® possui uma sensibilidade melhor, mas o seu comportamento em relação a possível interferência da chuva pode ter ocasionado maior dispersão dos dados na variância e um valor elevado no Coeficiente de Variação (CV), em comparação com o acrílico, o que o torna inadequado para esta aplicação. O PVC obteve os piores resultados em relação CV e sensibilidade, comparado aos demais. Logo, o acrílico foi escolhido como material do difusor.

4.2.2 Avaliação de Diferentes Espessuras e Acabamento Superficial do Difusor

Após a escolha do acrílico como o material para confecção do difusor, foram avaliadas amostras de duas espessuras, 3 mm ou 1,5 mm, e verificadas suas respostas à irradiação solar, comparativamente ao piranômetro de referência. O experimento foi realizado no período de três dias, entre 27 de fevereiro e 01 de março de 2018, das 7h00min às 16h30min, e foram considerados os valores para ângulos de elevação do Sol superiores a 20º. O céu, neste intervalo, apresentou-se claro e com pouca presença de nuvens no primeiro dia, mas nos dias seguintes a nebulosidade aumentou gradativamente até que no terceiro dia o tempo estava nublado. Isso pode ser observado na Figura 7, em que se verifica o comportamento de dois protótipos, um com difusor com espessura de 3 mm e o outro com espessura de 1,5 mm, que no terceiro dia suas radiações solares (W/m^2) foram menores.

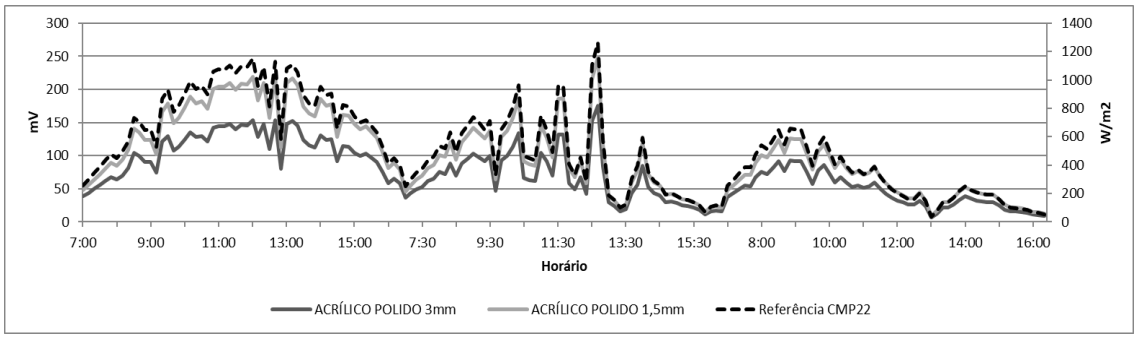


Figura 7. Resposta dos piranômetros com difusores de acrílico com espessuras de 1,5 e 3,0 mm comparativamente ao piranômetro de referência. (Autoria própria)

Ambos os difusores testados apresentaram resultados satisfatórios quando comparados com o piranômetro de referência. Se observa na Tabela 3, a partir da análise de regressão linear, os valores da sensibilidade e o coeficiente de determinação em que são expostos valores da regressão de cada difusor em relação ao referencial.

Tabela 3: Respostas dos piranômetros com difusores de acrílico com espessuras de 1,5 e 3,0 mm. (Autoria própria)

Protótipo	Difusor		Sensibilidade ($W.m^{-2}/mV$)	Coeficiente de Variação (%)	R^2
	Material	Espessura (mm)			
2	Acrílico	3	6,928	5,33	0,996
3	Acrílico	1,5	5,043	5,39	0,997

De acordo com os resultados, o piranômetro com difusor de acrílico de 1,5 mm apresentou uma maior sensibilidade que o modelo com difusor de 3 mm. Porém, o coeficiente de determinação (R^2) de ambos apresentou valores muito próximos. Como ambos os protótipos têm elementos sensores muito semelhantes, a diferença de sensibilidade significa que o sensor com o difusor de 3 mm recebe aproximadamente 27% menos radiações que o sensor com difusor de 1,5 mm, o que deve contribuir para uma maior vida útil do primeiro. Considerando, ainda, que a sensibilidade do modelo com difusor de 3 mm apresentou-se adequada para uso com *dataloggers* e leitura direta em voltímetros, optou-se pela utilização do difusor com esta espessura no modelo em desenvolvimento.

A terceira fase do experimento constituiu-se na análise do comportamento dos protótipos em relação ao acabamento superficial do difusor, quando foram testados modelos de superfície polida e opaca. O experimento foi realizado entre 7 e 11 de março de 2018, entre 8h00min e próximo às 17h00min, pois foi nesse intervalo de tempo em que o Sol se encontrava com um ângulo de elevação superior a 20º, e ocorreu com céu variando entre claro e nublado. Na Figura 8, pode ser observado o comportamento de dois piranômetros, um com difusor com superfície polida e outro com superfície opaca.

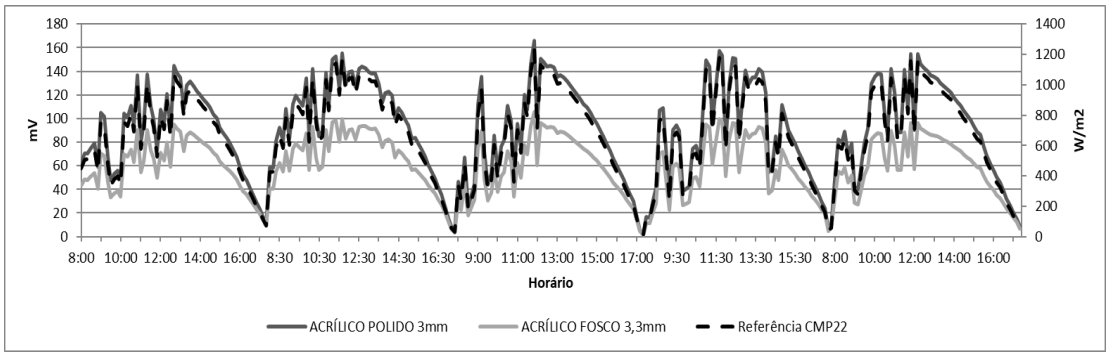


Figura 8: Resposta dos piranômetros com os difusores com acabamentos polido e fosco comparativamente ao piranômetro de referência (Autoria própria).

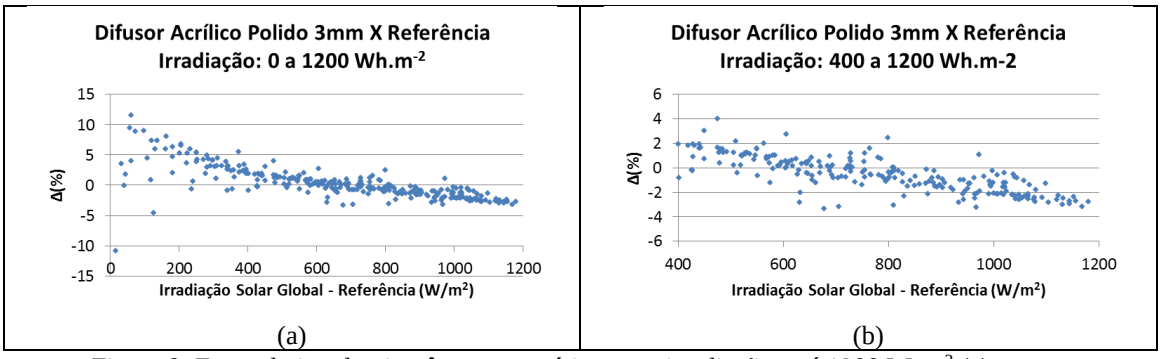
Devido à indisponibilidade de um segundo difusor de 3 mm, foi utilizado um de 3,3 mm, valor disponível mais próximo ao primeiro. Esta diferença foi desprezada na análise dos resultados. No Gráfico da Figura 8, verifica-se que o modelo com difusor de acrílico fosco produziu menor tensão em relação ao polido e a Tabela 4 mostra os valores das regressões lineares das respostas de ambos os modelos.

Tabela 4: Resposta dos piranômetros com difusores de acrílico com superfícies polida e opaca (Autoria própria)

Protótipo	Difusor		Espessura	Sensibilidade	Coeficiente de	
	Material	Superfície	(mm)	($W.m^{-2}/mV$)	Variação (%)	R^2
2	Acrílico	Polida	3	7,274	2,5	0,99
3	Acrílico	Opaco	3,3	10,733	7,8	0,98

Os dados da Tabela 4 mostram que o piranômetro com difusor de acrílico de superfície polida obteve uma melhor sensibilidade, coeficiente de variação e coeficiente de determinação que o difusor com a superfície opaca. Portanto, o difusor com o material de acrílico leitoso polido, com espessura de 3 mm e acabamento polido foi selecionado para compor o piranômetro fotovoltaico de baixo custo proposto por este trabalho.

Por fim, foi determinado o erro relativo percentual absoluto do protótipo, escolhido como o modelo final, em relação ao piranômetro de referência, baseando-se nos dados obtidos pelo o mesmo, durante a última fase de testes. Na Figura 9 estão apresentados os valores dos erros relativos do protótipo em relação à irradiação incidente medida pelo piranômetro de referência, considerando as médias para intervalos de 10 minutos.



(a) (b)

Figura 9: Erro relativo do piranômetro protótipo para irradiações até 1200 $W.m^{-2}$ (a) e entre 400 e 1200 $W.m^{-2}$ (b), comparativamente ao piranômetro de referência. (Autoria própria)

Observam-se erros mais elevados para valores mais baixos de irradiação que, normalmente, correspondem aos horários de menores ângulos de elevação do Sol. O comportamento do erro em relação com a irradiação incidente é compatível com os resultados obtidos por outros dispositivos similares [2,3] e pode estar relacionado com o erro do cosseno, indicando que pode haver margem para melhorar o desempenho do protótipo, modificando-se a forma geométrica do difusor.

Nas medições de valores totais horários (Figura 10), o Erro Percentual Absoluto Médio foi mais elevado nos horários próximos ao nascer e ao pôr do sol, que correspondem aos mais baixos ângulos de elevação do Sol.

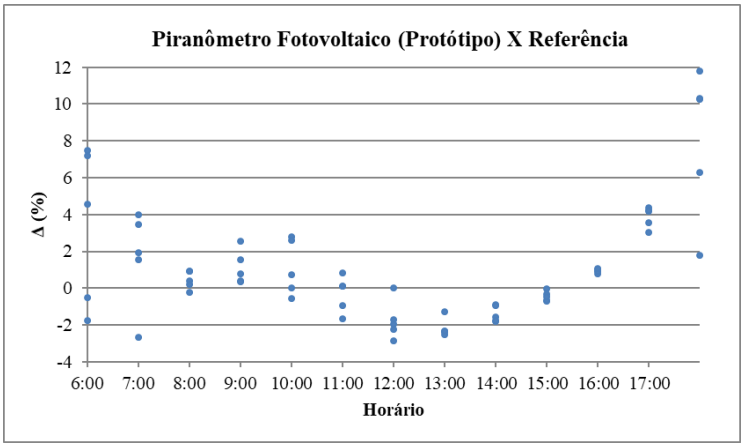


Figura 10: Erro relativo do piranômetro protótipo para medições totais horárias, comparativamente ao piranômetro de referência. (Autoria própria)

Os maiores valores do erro relativo percentual absoluto médio para totais horários foram registrados às 6h00min e 18h00min, sendo 4,29% e 8,10%, respectivamente. Nesta escala, o erro médio mais baixo registrado foi de 0,433%, às 15h00min, e o valor médio foi de 2,26%. Para as medições de totais diários, o erro relativo percentual absoluto foi sempre inferior a 1%, destacando-se o mínimo com 0,16%, o máximo com 0,93% e o valor médio de 0,5%, conforme os resultados na Tabela 5, o que indica um bom desempenho do protótipo.

Tabela 5: Resposta do piranômetro protótipo para medições totais diárias de irradiação, comparativamente ao piranômetro de referência. (Autoria própria)

Data	Irradiação Diária Total ($kWh.m^{-2}$)		Diferença Percentual (%)
	KIPP&ZONEN CMP22	Piranômetro Fotovoltaico Protótipo	
07/03/2018	6.421,36	6.441,85	0,32
08/03/2018	7.438,33	7.368,85	-0,93
09/03/2018	6.505,41	6.487,24	-0,28
10/03/2018	6.324,30	6.314,41	-0,16
11/03/2018	6.972,41	6.916,70	-0,80

A partir dos dados obtidos pelo piranômetro de modelo final e pelo custo de construção inferior a R$140,00, o protótipo apresentou um bom desempenho e possui baixo custo, em comparação com o desempenho do piranômetro KIPP&ZONNEN CMP22, sendo do padrão secundário, pela ISO 9060, e contendo um preço comercial em torno de £5.300,00 (Libras) [8].

3. CONCLUSÕES

O piranômetro desenvolvido, elaborado com um pequeno módulo fotovoltaico, corpo de plástico de engenharia, e tendo como difusor uma placa de acrílico com formato cilíndrico, de fácil execução e baixo custo, apresenta um desempenho satisfatório para medições da irradiação total diária, com erro inferior a 1%, em relação a um instrumento com sensor do tipo termopilha, de classe secundária pela classificação da norma ISO 9060, e alto custo.

Até mesmo medições instantâneas e de totais horários da irradiação podem ser realizadas com qualidade pelo protótipo proposto, desde que sejam observadas as limitações do instrumento para medidas para ângulos baixos de elevação do Sol.

Os resultados obtidos demonstram a viabilidade técnica e econômica do desenvolvimento de piranômetros fotovoltaicos de baixo custo, inferior a R$ 140,00, podendo quase que se equiparar com os resultados do piranômetro de referência, KIPP&ZONEN CMP22, o qual possui o mais alto padrão de classificação, conforme a ISO 9060, e um alto custo de fabricação.

Para trabalhos futuros, sugere-se a realização de ensaios em laboratório, visando identificar e quantificar individualmente os fatores de erro, tais como: a resposta ao cosseno, o erro relacionado com a variação espectral da radiação ao longo do dia e a relação de dependência da sensibilidade do sensor com a temperatura, com vistas ao aprimoramento do dispositivo proposto. O *datalogger* é um equipamento com um custo elevado para o público em geral. Com isso, um projeto desenvolvido com o auxílio de um Arduino para exercer a função de um registrador de dados seria uma alternativa de baixo custo e de fácil acessibilidade.

REFERÊNCIAS

[1] VILELA, Waldeir Amaral**. Estudo, desenvolvimento e caracterização de radiômetros para medidas da radiação solar**. Tese de doutorado – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. São José dos Campos, SP, 2010. 209 p.

[2] FREIRE, Luiz Abelardo Dantas. **Desenvolvimento de um piranômetro fotovoltaico.** Dissertação de mestrado – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco – UFPE. Recife, PE, 2008. 78 p.

[3] ZANESCO, Izete. **Análise e construção de um piranômetro fotovoltaico**. Dissertação de mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS.Porto Alegre, RS, 1991. 141 p.

[4] FRAIDENRAICH, Naum; LYRA, Francisco. **Energia Solar: fundamentos e tecnologia de conversão heliotérmica e fotovoltaica**. Recife, PE: Ed. Universitária da UFPE, 1995. 471 p.

[5] GRUPO DE TRABALHO DE ENERGIA SOLAR (GTES). **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro, RJ: CRESESB, 2004.

[6] HINCKLEY, Alan. ***CAMPBELL SCIENTIFIC: when measurements matter*.** Disponível em <https://www.campbellsci.com/blog/pyranometers-need-to-know>. Acesso em: 20 de jan. 2018.

[7] KIPP & ZONEN, Pyranometers. Röntgenweg – Holland. Disponível em <www.kippzonen.com>. Acesso em: 15 de jan. 2018.

[8] OMNI INSTRUMENTS. Disponível em < http://www.omniinstruments.co.uk/cmp22.html#upsell-product-div>. Acesso em: 10 de fev. 2018.