

AVALIAÇÃO DE PROTÓTIPOS DE SENSORES DE RADIAÇÃO SOLAR DE BAIXO CUSTO PARA ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL

JULIANA SÁNCHEZ BENÍTEZ; LUCIANO SOBRAL FRAGA JUNIOR; ALISSON MACENDO AMARAL E LUCAS MELO VELLAME

¹Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Cidade Universitária "Zeferino Vaz", CEP 13083-970, Campinas, São Paulo, Brasil, j218736@dac.unicamp.br.

²Dr. em Engenharia de sistemas agrícolas, ESALQ/USP, lucianosobral@alumni.usp.br

³Instituto Federal do Norte de Minas Gerais - Campus Arinos, Rodovia MG 202, Km 407, 38680000 - Arinos, MG - Brasil.

⁴Centro de Ciências Agrárias, Ambientais e Biológicas, Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, rua Rui Barbosa, 710, Campus Universitário CEP 74690900, Cruz das Almas, Bahia, Brasil, lucasvellame@gmail.com

1 RESUMO

O cálculo da evapotranspiração de referência pelo método da FAO 56 necessita de dados da radiação solar, o qual pode ser medido ou estimado. O alto valor dos sensores traz a necessidade do uso de equações como a equação de *Hargraves-Samani*. Objetivou-se construir e avaliar um piranômetro de baixo custo e fácil reprodução, baseado no uso de um fotodiodo de silício. Foram construídos e testados 16 sensores por um período de 414 dias. Entre os principais resultados desta pesquisa destaca-se a incerteza do instrumento para estimar radiação global de $\pm 0,04 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, os desvios na estimativa da ET_{OPM} foram inferiores a $0,22 \text{ mm dia}^{-1}$ em 95% das observações realizadas, esses desvios são 3,62 vezes menores que os desvios na estimativa da radiação usando a equação de *Hargraves-Samani* com calibração local e mesma probabilidade de ocorrência. O período necessário para a calibração com 99,7% de confiança foi de 32 dias. O sensor tem custo total aproximado de US\$ 27,23. Os resultados demonstram que o sensor pode ser utilizado em estações meteorológicas automatizadas, instaladas em campo aberto ou em ambiente protegido, com acurácia suficiente para estimativas de ET_{OPM} de baixo custo.

Palavras-chave: piranômetro de baixo custo, irradiância, sensor de baixo custo, evapotranspiração.

**SÁNCHEZ-BENÍTEZ, J.; FRAGA JUNIOR, L. S.; AMARAL, A. M.; VELLAME, L. M.;
EVALUATION OF LOW-COST SOLAR RADIATION PROTOTYPES TO
ESTIMATE POTENTIAL EVAPOTRANSPIRATION**

2 ABSTRACT

To calculate the reference evapotranspiration by the FAO56 method (ET_{OPM}) solar radiation shall be measured or estimated. Due to the high value of sensors, equations such as the *Hargraves-Samani* equations are used. The objective of this project was to build and evaluate a low-cost and easy-to-reproduce pyranometer. Sixteen sensors were built and tested for 414

days. Among the main results of this research highlights that the uncertainty of the instrument to estimate global radiation of $\pm 0.04 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$, deviations in the EToPM estimate was less than 0.22 mm day^{-1} in 95% of the observations performed, these deviations are 3.62 times smaller than the deviations caused by the radiation estimate using the Hargraves-Samani equation with local calibration and same probability of occurrence. The period required for calibration for 99.7% confidence was 32 days. The sensor has an approximately total cost of \$27.23. The results demonstrate that the sensor can be used in automated weather stations, installed in the open field or in a protected environment, with sufficient accuracy for low-cost EToPM estimates.

Keywords: Low cost pyranometer, irradiance, low cost sensor, evapotranspiration.

3 INTRODUÇÃO

O estudo da radiação solar pode ser realizado para diferentes finalidades que abrangem a meteorologia, hidrologia, agricultura, entre outras áreas da engenharia. Uma destas aplicações é a estimativa da evapotranspiração (ET), usualmente realizada para determinação das necessidades hídricas de uma cultura com a finalidade de planejamento e manejo de irrigação (RAFI *et al.*, 2019). Devido à grande dificuldade de estimar a ET usando medições diretas em campo, a FAO propôs em 1990 um método padrão para estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) usando a equação de *Penman-Monteith*, a qual toma como base os dados temporais provenientes de uma estação meteorológica, que pode ser manual ou automatizada (BORNHOFEN, 2015).

Uma estação meteorológica automatizada sinótica (EMAs) é caracterizada pela autonomia energética, coleta e transmissão de dados em intervalos de tempo estabelecidos. (MAPA, 2011). Os sensores comumente utilizados em uma EMAs convencional possuem custos de implantação inacessíveis a muitos produtores rurais, extensionistas e pesquisadores, o que motiva o desenvolvimento de estações meteorológicas de baixo custo. No mercado nacional estão disponíveis algumas EMAs construídas com sensores confeccionados a

partir de elementos acessíveis no mercado local, o que permite sua comercialização a custos reduzidos em comparação com sensores importados.

O desenvolvimento de sensores e a popularização do uso de estações meteorológicas de baixo custo é crescente no Brasil, porém o piranômetro ainda é um instrumento pouco ofertado pela indústria nacional (VILELA, 2010). Mesmo com o desenvolvimento de diversos estudos no país propondo piranômetros de fácil reprodutibilidade e baixo custo (FREIRE, 2008; VILELA, 2010; BOLZAN, 2014). Assim, a disponibilidade de dados medidos de radiação solar é ainda limitada. O que leva em muitos casos a prescindir do piranômetro para mensurar a radiação solar e fazer uso de modelos matemáticos como *Hargreaves-Samani*, que estima a radiação solar baseado na variação da temperatura do ar (BORGES *et al.*, 2010).

Existem dois tipos de piranômetros, os de termopilha e os de fotodiodo de silício. Estes últimos são uma opção econômica frente aos piranômetros térmicos, apesar de apresentar uma resposta limitada do espectro de radiação solar. O fotodiodo é um sensor empregado comumente em aplicações de detecção de infravermelho, sistemas de transmissão de dados por controle remoto, fotômetros ou aplicações de controle óptico infravermelho na indústria. O fotodiodo tem como vantagem para a construção de piranômetros a faixa de medição do espectro

eletromagnético, que se encontra dentro da zona de maior sensibilidade dos piranômetros térmicos. Outra vantagem é ser um dispositivo de rápida resposta, praticamente instantânea ante as mudanças da intensidade de radiação (GÓMEZ *et al.*, 2018). Como desvantagem, este tipo de sensor apresenta uma degradação mais rápida em comparação com o sensor de termopilha. Células solares de silício amorfo são afetadas por um processo de degradação logo nos primeiros meses de operação, reduzindo assim seu rendimento ao longo da vida útil (SILVA, 2015).

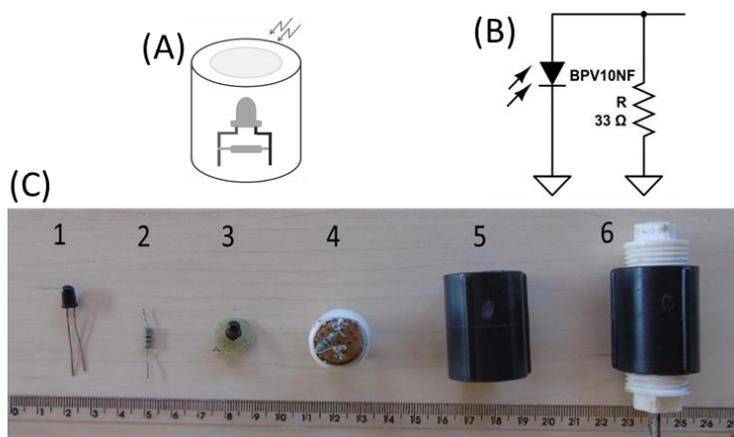
O presente trabalho teve por objetivo avaliar a empregabilidade de um piranômetro construído com materiais de baixo custo, na estimativa de ETo pelo modelo de *Penman-Monteith* mediante sua integração com os sensores de uma estação meteorológica.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Construção dos sensores

A construção dos piranômetros fotovoltaicos se deu conforme adaptação da metodologia apresentada por Freire (2008). O sensor é composto por um fotodiodo de silício conectado em paralelo a um resistor de 33Ω e fixado dentro de uma luva preta roscável de $\frac{1}{2}$ polegada (Figura 1A). Nas extremidades da luva foram roscados dois caps de Policloreto de Vinila (PVC) de $\frac{1}{2}$ polegada. O cap da extremidade superior, foi utilizado como filtro de luz limitando o intervalo de radiação que atinge o elemento de medição (Figura 1C) e o cap inferior foi utilizado como sustento para os demais componentes.

Figura 1. Passo a passo da construção do sensor piranômetro fotovoltaico.



(A) Esquema de funcionamento do sensor, (B) circuito eletrônico, e (C) sequência de montagem dos piranômetros. Em (C): (1) corresponde ao fotodiodo, (2) é o resistor de 33Ω , (3) é o sensor e resistor soldados sobre uma placa de protótipo universal, (4) o conjunto soldado e unido ao plug roscado, (5) luva de PVC com a correção de rosca, (6) união de todas as partes conformando o sensor. **Fonte:** Os autores (2021).

4.2 Seleção do fotodiodo

Inicialmente foram construídos dois protótipos de piranômetro com o objetivo de selecionar o melhor deles. Foram utilizados como elementos de medição os fotodiodos de modelo BPW20RF e BPV10NF. A faixa de sensibilidade do BPW20RF varia de 400 a 1100 nm, caracterizado por ter um amplo

ângulo de captação de luz incidente, $\pm 50^\circ$ (VISHAY, 2011), quando comparado com o modelo BPV10NF que possui um intervalo de sensibilidade que varia entre 790 e 1050 nm e um ângulo de sensibilidade de $\pm 20^\circ$ (VISHAY, 2019). Faixas de medição e ângulo de incidência menores, comparado com os sensores de piranômetro comerciais como o sensor CS300 da Campbell SC® que

abrange um intervalo de sensibilidade entre 360 a 1120 nm (CAMPBELL SCIENTIFIC, 2018), e o piranômetro térmico LP02 da Campbell SC®, que abrange um intervalo de sensibilidade mais amplo, de 285 até 3000 nm (CAMPBELL SCIENTIFIC, 2012).

Para selecionar o elemento sensor foi realizada uma coleta de dados em condições de pleno sol, localizando dois protótipos sobre uma barra horizontal disposta a 2 m de altura e nivelada na orientação norte, para evitar o sombreamento entre os piranômetros. Foi utilizado o piranômetro secundário de termopilha, Campbell SC® LP02, como piranômetro padrão para fins de comparação. Os instrumentos (protótipos e padrão) foram conectados a um sistema de aquisição de dados CR1000 Campbell Sci®, realizando medições a cada 30 segundos. As médias foram armazenadas em intervalos de cinco minutos durante cinco dias.

4.3 Calibração do sensor

A calibração do sensor foi realizada de acordo com a norma ISO 6090 de 1990 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 1990) que faz referência à calibração do dispositivo experimental com relação a um dispositivo padrão. O dispositivo de referência deve ser um piranômetro de termopilha padrão secundário como o LP02 (ISO9060:2018, Campbell SC®). O processo de calibração consiste em realizar um modelo matemático

para a correlação da resposta em voltagem do piranômetro fotovoltaico e a resposta em irradiância do sensor de referência.

O experimento foi conduzido na Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB) na cidade de Cruz das Almas-BA, localizado nas coordenadas geográficas Latitude: 12° 39' 29,4" Sul, Longitude: 39° 5' 45" Oeste. Foram construídos 16 sensores de baixo custo usando o fotodiodo BPV10NF e fixados em uma barra metálica a 2 m sobre o solo, disposta em direção norte e em posição perpendicular aos raios do sol, sobre uma pastagem homogênea em um terreno livre de árvores (Figura 2). Além do sensor padrão foi adicionado um piranômetro fotovoltaico comercial (CS300 - Campbell SC®).

Todos os sensores foram conectados a um *datalogger* CR1000 (Campbell SC®) para a coleta e armazenamento de dados. A coleta de dados do sinal dos sensores (mV) foi realizada no período entre 13/04/2018 e 01/06/2019, com intervalo de observações de 30 segundos e médias armazenadas a cada 15 minutos. O período de amostragem de dados estabelecido visou minimizar as diferenças provocadas pela inercia térmica dos sensores, uma vez que os mesmos possuem diferentes princípios de funcionamento. Para o sensor LP02 (termopilha) o tempo de resposta é menor que 18 s (CAMPBELL SCIENTIFIC, 2012) e para o sensor CS300 (fotodiodo) é menor que 1 s (CAMPBELL SCIENTIFIC, 2018).

Figura 2. Sensores localizados acima da barra horizontal no início do período de coleta de dados em condição de campo aberto no período entre 13/04/2018 e 01/06/2019.



Fonte: Os autores (2018).

Ao finalizar a amostragem de dados em campo aberto, a estrutura de calibração e os sensores foram instalados no interior de uma casa de vegetação com o intuito de realizar a calibração dos sensores para ambiente protegido. A estação de teste foi instalada na área experimental da mesma universidade (Latitude: 12° 39' 22" Sul, Longitude: 39° 5' 16.5" Oeste), no período compreendido entre 01/11/2019 até 10/12/2019. Foi utilizada a mesma unidade de coleta e armazenamento de dados anterior, programado para armazenar os valores médios a cada 15 minutos.

4.3 Incerteza na medição

A incerteza na medição é definida como uma indicação de quanto o valor estimado difere do valor verdadeiro do mensurando, em termos de probabilidade, e é estimado como o intervalo de confiança para 95 % das medições (INMETRO, 2012b). A incerteza padrão dos piranômetro de baixo custo foi calculado de acordo com a metodologia do INMETRO (INMETRO, 2012a) (Equação 1).

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^k (\bar{y}_j - y_j)^2}{k-1}} \quad (1)$$

Em que, σ é a incerteza padrão; k é a quantidade de pontos observados; y_j é cada uma das observações realizadas com o

piranômetro baixo custo; \bar{y}_j é o valor observações realizadas com o piranômetro padrão LP02.

A partir da incerteza padrão do instrumento pode ser estimado o número mínimo de observações necessárias para garantir a confiabilidade e reduzir o tempo de calibração em campo e assim otimizar o tempo de calibração de novos sensores (INMETRO, 2012a) (Equação 2).

$$n = \left(\frac{3\sigma}{le}\right)^2 \quad (2)$$

Em que, n é o número de observações para estimar o limite do erro estatístico, σ é a incerteza padrão do instrumento, le é o limite do erro estatístico 99,7 %.

4.5 Estimativa da evapotranspiração de referência

Com a finalidade de avaliar a empregabilidade dos sensores de baixo custo para a estimativa da demanda evaporativa da atmosfera, foi realizado o cálculo da evapotranspiração de referência (ET_{OPM}) empregando o modelo de *Penman-Monteith* sugerido por Allen *et al.* (1998) (Equação 3). Foram utilizados os dados estimados de radiação solar obtidos com cada um dos 16 sensores de baixo custo e o sensor CS300, durante o período de calibração em campo aberto.

$$ET_o = \frac{0,408 \Delta(Rn-G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1+0,34u_2)} \quad (3)$$

Em que, ET_o é a evapotranspiração de referência ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$); Rn é a radiação líquida na superfície da cultura ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$); G fluxo de calor ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$); T é a temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$); u_2 é a velocidade média do vento a 2 m altura (m s^{-1}); e_s é a pressão de vapor de saturação (kPa); e_a é a pressão atual de vapor (kPa); $(e_s - e_a)$ é o déficit de pressão de vapor (kPa); Δ é a inclinação da curva de pressão de vapor ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$); γ é a constante psicrométrica ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$).

Os demais dados meteorológicos necessários para o cálculo da ET_o foram obtidos da estação metrológica que acompanhou o desenvolvimento do experimento (Termo-higrômetro HC2S3L12, anemômetro 03002-L12, pluviômetro TE525-L, sistema de armazenamento de dados CR1000. Campbell Sci®). A partir dos resultados obtidos foram estimados os desvios dos sensores de baixo custo, em relação ao sensor padrão e o sensor comercial. Além disso, foi realizada a estimativa de ET_o com dados teóricos de radiação solar usando o modelo *Hargreaves-Samani* (Equação 4), o

qual apesar de ser inicialmente recomendado para uso em regiões áridas foi parametrizado por Borges *et al.* (2010) para a cidade de Cruz das Almas, Bahia.

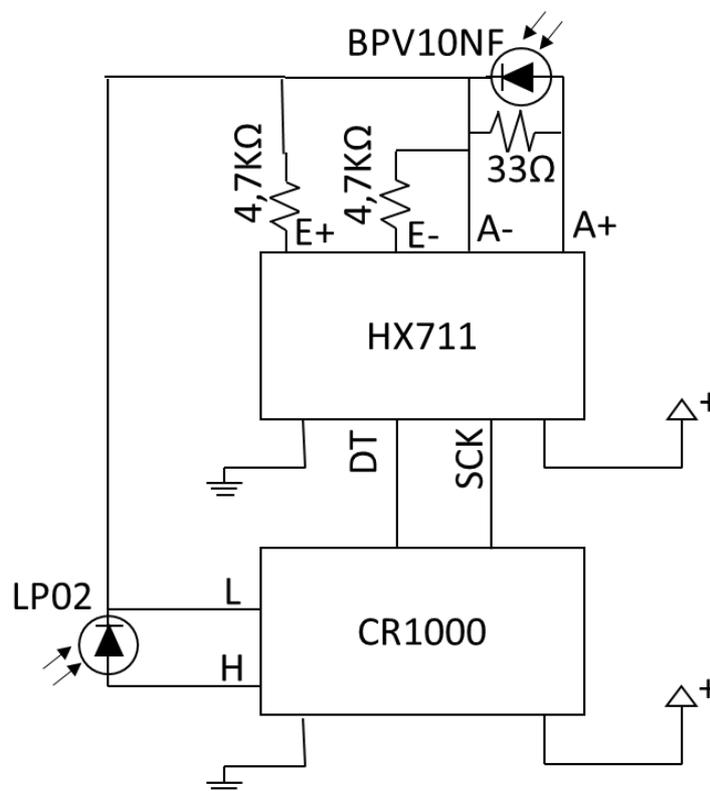
$$R_s = K_{R_s} (T_{max} - T_{min})^{0,5} R_a \quad (4)$$

Em que, R_s é a radiação solar calculada usando o modelo; K_{R_s} coeficiente de calibração 0,19 sugerido por Borges *et al.* (2010) para cidade de Cruz das Almas, região do Recôncavo da Bahia, Brasil; T_{max} temperatura máxima do ar ($^{\circ}\text{C}$); T_{min} temperatura mínima ($^{\circ}\text{C}$); R_a é a radiação solar no topo da atmosfera ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$).

4.6 Integração do piranômetro com um SAD de baixo custo

O sistema de armazenamento de dados (SAD) utilizado durante a calibração dos piranômetros possui internamente um Conversor Analógico Digital (CAD) de 13 bit (CR1000 *Campbell Sci*®). Com o intuito de analisar a viabilidade de uso deste sensor acoplado com um sistema de armazenamento de dados de baixo custo, foi realizada avaliação do módulo CAD HX711. Para isso foi instalado em campo aberto um sensor LP02 e um piranômetro de baixo custo de acordo como o esquematizado na Figura 3.

Figura 3. Esquema da montagem do experimento em campo comparativo entre o uso do conversor analógico/digital HX711 e o conversor analógico/digital interno do CR1000.



Fonte: Os autores (2020).

As observações foram realizadas no período de 7 dias entre o 08/01/2020 e 15/01/2020. O CAD HX711 é um dispositivo empregado para discretizar um sinal analógico através de um circuito de digitalização de 24 bits. Este dispositivo de fácil aquisição no mercado foi criado pela empresa *AVIA Semiconductor*® para ser empregado principalmente em balanças. Mas na atualidade, vem sendo bastante utilizado nas mais diversas áreas, por viabilizar resultados precisos com custos baixos (CAQUIMBO; ROJAS; POLANCO, 2015).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Seleção do fotodiodo

Os protótipos de piranômetro construídos com os sensores BPW20RF e

BPV10NF avaliados com relação ao piranômetro térmico LP02 da Campbell SC®, apresentaram elevados coeficientes de correlação $R^2 > 0,99$ com aumento linear do sinal em resposta a radiação solar incidente. Similar aos resultados obtidos por Nwankwo, Nnabuchi, Ekpe (2012), os quais obtiveram coeficientes de correlação de $R^2 > 0,99$ entre seu sensor artesanal e o sensor padrão. Medugu, Burari, Abdulazeez (2010) avaliaram um piranômetro, construído com o fotodiodo BPW21 da mesma linha de fotodiodos e de características similares aos testados no presente trabalho, obtendo um erro de $\pm 0,024 \text{Wm}^{-2}$ sobre o valor medido.

De acordo com Freire (2008), o uso de material de PVC, tais como os adotados nesta pesquisa (luva e caps), funcionam como filtro para radiação de onda curta e protege os elementos internos do sensor contra a influência da temperatura ambiente, devido à baixa condutividade térmica do

material ($0,23 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$). A cor negra no sensor reduz a reflexão da luz pela parede interna da luva, tal como o observado por Bolzan (2014), que revestiu o corpo de seu protótipo de piranômetro artesanal com material em coloração negra, obtendo melhoria no desempenho do sensor.

A partir das observações em campo aberto o piranômetro construído com o fotodiodo BPW20RF apresentou amplitude de sinal máximo de 1,045 mV, e o piranômetro construído com o sensor BPV10NF apresentou sinal máximo de 0,7813 mV. Para ambos os sensores propostos a probabilidade de ocorrência de desvios foi menor que $\pm 0,043 \text{ MJ m}^{-2}$ em 95 % das medições, com um desvio máximo de $\pm 2,21 \%$ e mínimo de $\pm 0,11 \%$.

O erro relativo foi maior no BPW20RF ($\pm 1,73\%$) que no BPV10NF ($\pm 0,694\%$), mas este foi baixo para ambos os casos quando comparado com o sensor comercial CS300, $\pm 5\%$ para radiação total diária (segundo fabricante). Os valores dos desvios são concordantes com as observações de Freire (2008), que estimou a diferença diária em $\pm 2 \%$ da radiação global mensurada com um protótipo de piranômetro fotovoltaico artesanal e um piranômetro comercial da marca *Eppley*®.

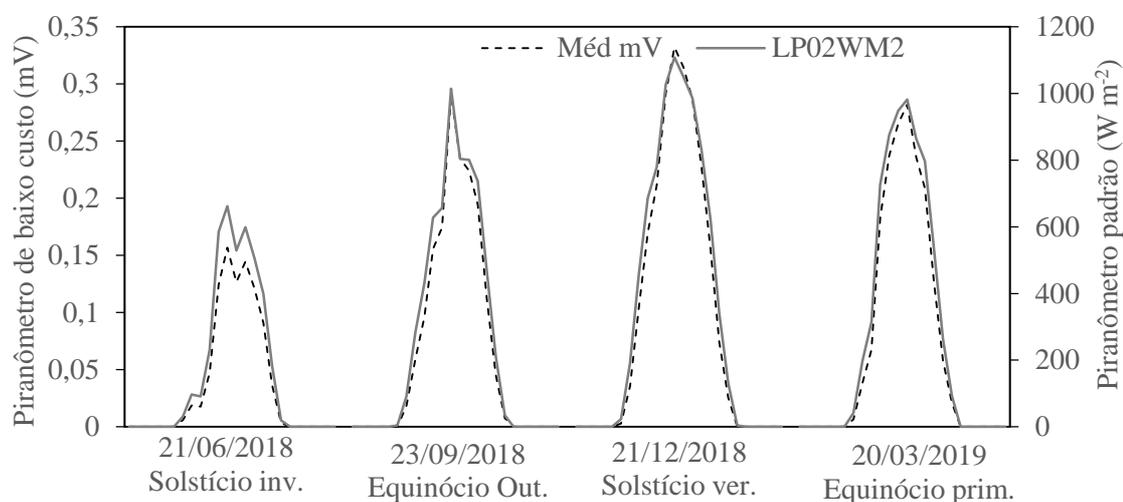
O custo de aquisição do fotodiodo BPV10NF no mercado é inferior ao do

fotodiodo BPW20RF. Diante do exposto e tomando em consideração o menor erro relativo, a maior linearidade com relação às variações da temperatura ambiente entre $0 \text{ }^\circ\text{C}$ e $40 \text{ }^\circ\text{C}$ (VISHAY, 2019), maior amplitude de saturação (VISHAY, 2019) e o menor custo de aquisição no mercado, foi selecionado o fotodiodo BPV10NF para ser usado na construção de 16 piranômetros fotovoltaicos. Os quais foram calibrados e submetidos a testes para avaliar sua empregabilidade na estimativa da ET_{OPM} .

5.2 Calibração do sensor

Em média os 16 sensores conseguiram representar adequadamente a irradiância durante o dia, com uma sensibilidade entre 0,15 e $0,25 \mu\text{V W}^{-1} \text{ m}^{-2}$ para valores de irradiância de até 1108 W m^{-2} (Figura 4). A amplitude do sinal média nos sensores foi de 0,33 mV quando avaliado em campo aberto e de 0,35 mV quando avaliado em ambiente protegido. Assim, a tensão de trabalho do sensor se encontra abaixo do limite de saturação do fotodiodo BPV10NF, a qual é de 450 mV (VISHAY, 2019). De acordo a isso, pode-se assegurar que os sensores conseguem operar tanto em campo aberto, como em ambiente protegido sem apresentar risco de saturação.

Figura 4. Curso horários da radiação solar para os dias correspondentes a solstício e equinócio de inverno e verão que aconteceram durante o período de calibração dos sensores em condição de campo aberto no período entre 13/04/2018 e 01/06/2019, no município de Cruz das Almas, BA.



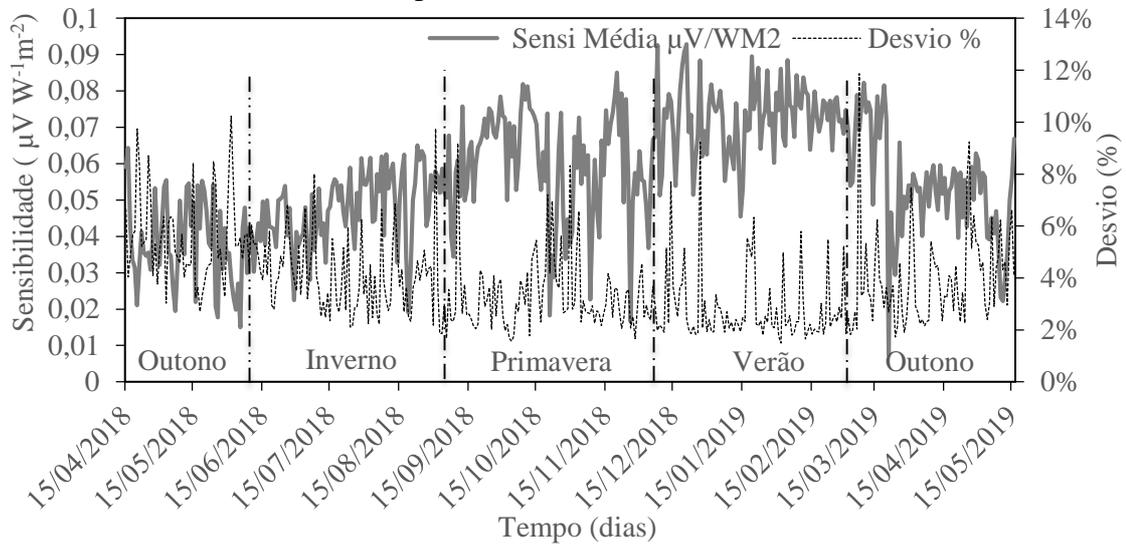
Fonte: Os autores (2021).

A radiação média observada como os 16 sensores durante um período de um ano (Figura 5) teve um comportamento ondulatório ao recorrer das estações climáticas. A sensibilidade foi baixa no outono incrementando à medida que se aproxima à primavera. Os valores máximos ocorreram entre primavera e verão, voltando a diminuir no outono, com um aparente nível mínimo entre outono e inverno. Este comportamento é atribuível a um sinal quadrático.

A maior sensibilidade durante os meses de primavera e verão pode ter influência das altas temperaturas e baixa nebulosidade característica da época, fenômeno observado por Čekon, Slávik,

Juras (2016) que atribuíram as variações no ganho do sinal em razão do incremento da radiação difusa nos dias com condição de céu nebuloso e chuva ocasional. Para o dia de menor radiação máxima registrada, ao redor de 600 W m^{-2} (Figura 4), o qual correspondeu ao solstício de inverno (21/06/2018), registrou-se 6,3 mm de precipitação, 90,7 % de umidade relativa e a menor temperatura máxima do ano $21,8 \text{ }^\circ\text{C}$, durante este dia os sensores em geral apresentaram queda na resposta de tensão. Uma causa possível é a formação de uma camada de água na superfície plana do sensor, limitando o espectro de radiação que o atinge.

Figura 5. Variação da sensibilidade no sinal ($\mu\text{V W}^{-1} \text{m}^2$) ao longo de um ano marcado pelas estações climáticas (outono, inverno, primavera e verão) durante o período de avaliação dos sensores em condição de campo aberto no período entre 13/04/2018 e 01/06/2019, no município de Cruz das Almas, BA.



Fonte: O autor (2021).

Ocorreram diferenças na sensibilidade dos piranômetros causadas pelo manejo dos materiais durante o processo de montagem demandando uma calibração individual. Vale ressaltar que mesmo os sensores de radiação construídos por processo industrial são calibrados individualmente.

As equações de calibração foram obtidas pela relação entre o sinal acumulado diário (mV) e os valores totais diários de irradiância (W m^{-2}). Os valores de

irradiância foram então expressados como energia em escala diária ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$) (GÓMEZ *et al.*, 2018). A relação matemática que apresentou o melhor ajuste para a calibração dos sensores, na correlação entre irradiância e sinal elétrico, foi uma equação polinomial de segundo grau (Equação 5). A equação foi utilizada para todos os sensores com coeficientes específicos, tanto para campo aberto como para ambiente protegido.

$$\text{Irradiância} = a * (\text{sinal mV})^2 + b * (\text{sinal mV}) + c \quad (5)$$

Em que, a, b, c, são os coeficientes do modelo e sinal mV faz referência às observações realizadas com cada sensor.

A média dos desvios para a medição em campo aberto ($\sigma = \pm 0,048 \text{ MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$) foi levemente maior que a média dos desvios apresentada pelos sensores em ambiente protegido ($\sigma = \pm 0,041 \text{ MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$). Para a condição de campo aberto o erro relativo médio no período de um ano foi de 3,79 %, e o erro absoluto médio foi $0,79 \text{ MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$

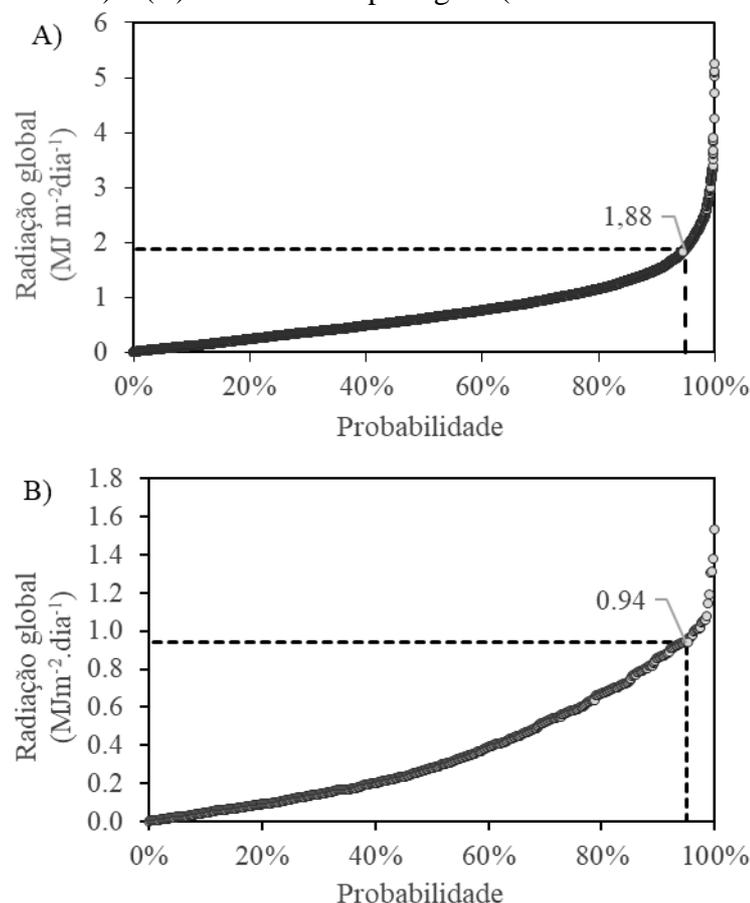
¹ variando, a depender do dia do ano, entre 5,2 e $0,06 \text{ MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$. Os maiores erros ocorreram no período de outono-inverno (5,2 %). Na condição de ambiente protegido, o erro absoluto médio foi $0,37 \text{ MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$ e o erro relativo médio foi 0,24 %, o que indica que em média os sensores erram menos em ambiente protegido que em condição de campo aberto, provavelmente pela maior radiação difusa e ausência de chuva.

O estado de conservação física dos piranômetros se manteve durante o período

de 414 dias, permanecendo íntegros sem apresentar nenhuma alteração visível durante o estudo, tanto em campo aberto como em ambiente protegido. Não foi observada tendência de aumento dos desvios em relação ao tempo de medição indicando uma estabilidade nas propriedades óticas dos materiais utilizados. A incerteza média dos instrumentos para uma probabilidade de 95

% de ocorrência do desvio é de $1,88 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ para uso em campo aberto e, $0,94 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ para uso em ambiente protegido (Figura 6). Com um intervalo de confiança de 99,7 % o número mínimo de observações necessárias, para definir o número de dias necessários para calibração dos sensores com um desvio médio de $2 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, é estimado em 32 dias (Equação 2).

Figura 6. Desvio médio para o 95 % das medições de radiação solar global média estimada com os 16 piranômetro de baixo custo construídos com o fotodiodo BPV10NF no município de Cruz das Almas, BA. (A) em condição de campo aberto (de 13/04/2018 até 01/06/2019) e (B) em ambiente protegido (de 01/11/2019 até 10/12/2019).



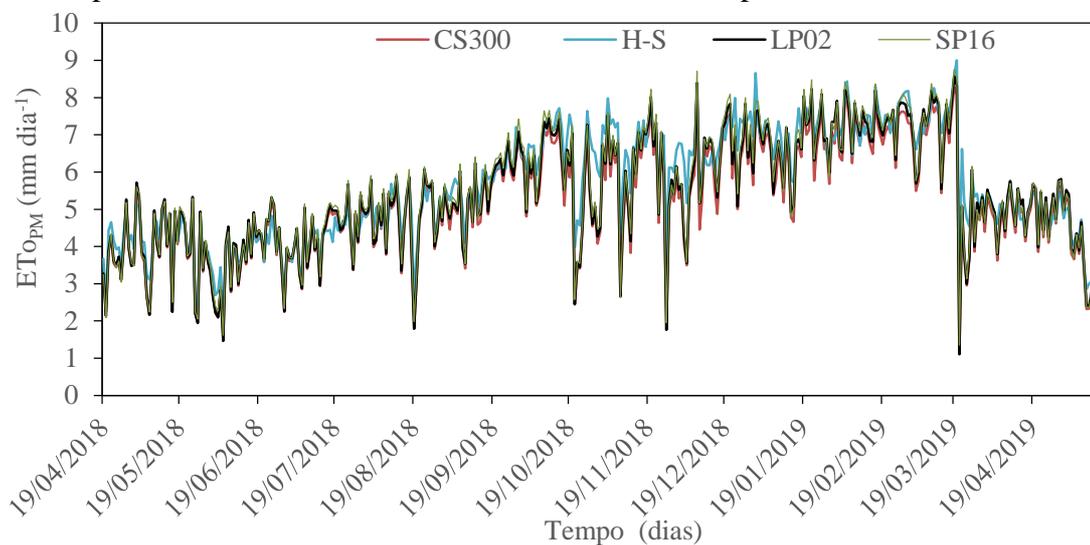
Fonte: Os autores (2021).

5.3 Estimativa da evapotranspiração de referência

A evapotranspiração de referência estimada com a radiação solar medida pelos 16 piranômetros no período de 365 dias de

observações em campo aberto, com o piranômetro fotovoltaico comercial, com o sensor padrão, e com a radiação global estimada pelo modelo de *Hargreaves-Samani*, são apresentadas na figura 7.

Figura 7. Evapotranspiração potencial diária estimada a partir da radiação solar mensurada com três tipos de sensor diferente. CS300, sensor comercial; LP02, sensor padrão; SP16, média dos 16 sensores piranômetros de baixo custo; e H-S modelo físico *Hargreaves-Samani*. Para o período de um ano em condição de campo aberto no período entre 13/04/2018 e 01/06/2019, no município de Cruz das Almas, BA.

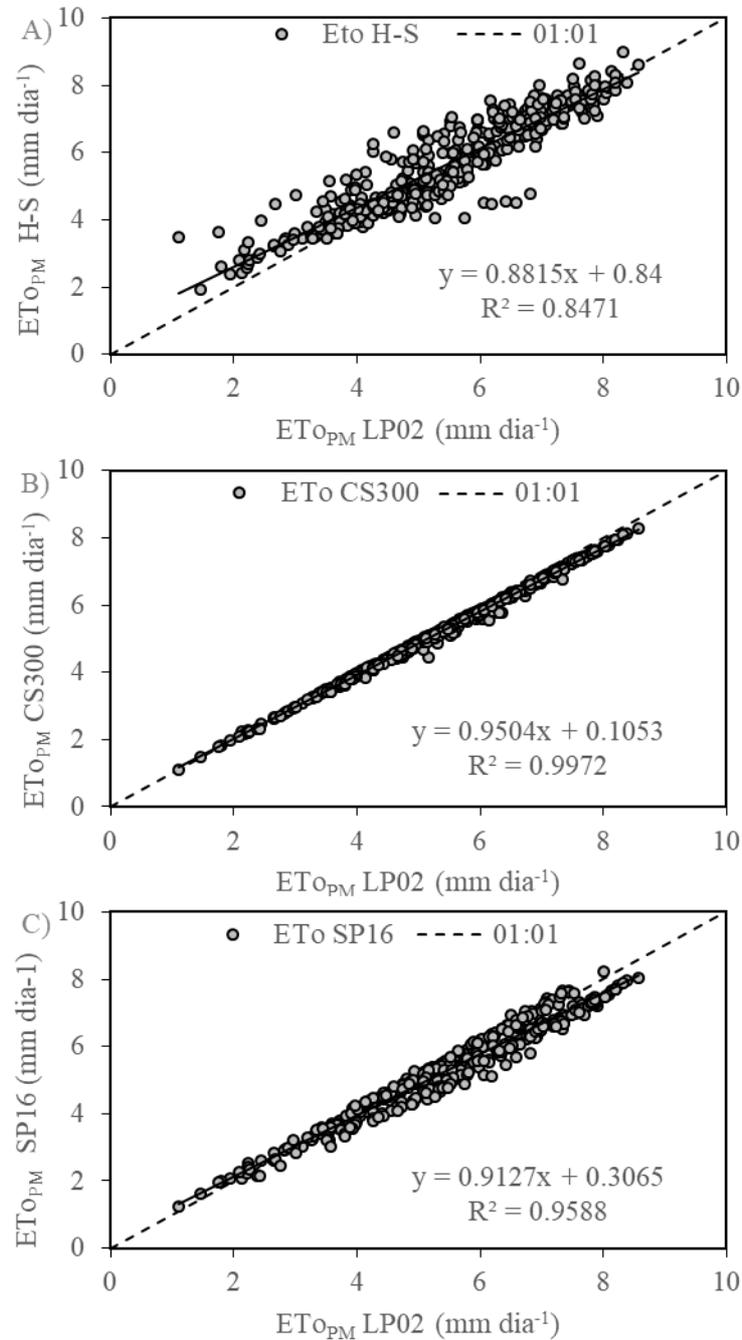


Fonte: Os autores (2021).

A tendência da ET_{OPM} média estimada a partir dos 16 protótipos de sensor de baixo custo testados, teve maior linearidade ($R^2 = 0,9588$) que a tendência dos valores de ET_{OPM} estimada usando o

modelo físico *Hargreaves-Samani* calibrado para a região ($R^2 = 0,8471$). A ET_{OPM} estimada pelo modelo teve maior dispersão que os valores calculados com o sensor comercial (CS300), Figura 8.

Figura 8. Tendência da ET_{OPM} de linearidade dos sensores calibrados durante o período 13/04/2018 a 01/06/2019 em condição de campo aberto no município de Cruz das Almas, Ba. Estimada com o (A) o modelo físico *Hargreaves-Samani* (H-S); (B) o sensor comercial CS300; (C) média dos 16 sensores piranômetros de baixo custo (SP16); em relação aos valores de ET_{OPM} estimados com o piranômetro padrão LP02.



Fonte: Os autores (2021).

Comparando a média das estimativas de ET_{OPM} utilizando os piranômetros de baixo custo frente a ET_{OPM} estimada usando o piranômetro padrão, o desvio absoluto médio para o total de observações foi $0,16 \text{ mm dia}^{-1}$, o desvio padrão foi $\pm 0,22 \text{ mm dia}^{-1}$ para o 95 % das observações o que equivale a um desvio médio percentual de 3 %.

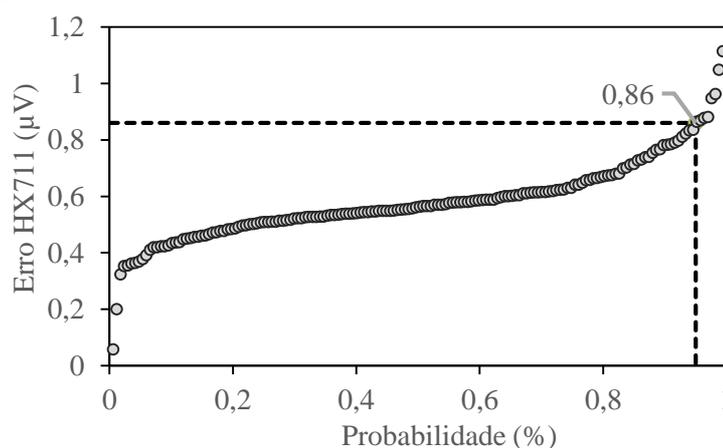
Estes indicadores são 3,62 vezes menores em comparação com os estimados usando o modelo *Hargreaves-Samani*, os quais foram $0,58 \text{ mm dia}^{-1}$ para o desvio absoluto médio e $0,55 \text{ mm dia}^{-1}$ para o desvio padrão. Em um ano de medição, a estimativa ET pelo modelo *Hargreaves-Samani* que, mesmo com calibração local apresentou um erro acumulado absoluto ($183,94 \text{ mm}$) maior que o erro acumulado absoluto quando a ET foi calculada utilizando o piranômetro de baixo custo e o sensor comercial do modelo CS300 apresentou um erro acumulado absoluto de $65,64 \text{ mm}$, comparados a ET_{OPM} estimada com o sensor padrão LP02. Portanto, frente ao uso do modelo *Hargreaves-Samani*, o emprego de sensores de baixo custo

previamente calibrados para a condição do local é uma opção viável e vantajosa para realizar a estimativa da ET, integrando estes sensores em uma EMA.

5.4 Teste do piranômetro associado a leituras do Conversor Analógico Digital HX711

Empregar o CAD HX711 para medição do piranômetro se mostrou uma alternativa acurada, uma vez que a incerteza relativa estimada para 95 % das medições é inferior a $\pm 0,86 \mu\text{V}$ (Figura 9), menor que a acurácia indicada pelo fabricante do CAD CR1000 (*Campbell SC®*) que nessa faixa de medição ($2,5 \text{ mV}$) é de $\pm 1,5 \mu\text{V}$. O HX711 consegue medir os valores de tensão gerados no piranômetro fotovoltaico com uma resolução de $\pm 0,002 \mu\text{V}$ e completa linearidade com relação ao CAD comercial ($y = 1,0007x + 0,0006$; $R^2 > 0,9999$). Esse desvio corresponde a um erro na estimativa da radiação de $1,8 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ e de $0,22 \text{ mm dia}^{-1}$ na evaporação de referência.

Figura 9. Incerteza relativa estimada para 95 % das medições realizadas com o conversor analógico digital HX711, avaliado usando um piranômetro LP02 em campo aberto no período de 7 dias (de 08/01/2020 até 15/01/2020) no município de Cruz das Almas, BA.



Fonte: Os autores (2021).

5.5 Custos de construção

O custo de produção aproximado do piranômetro para o ano 2021 é R\$ 136,17, ou US\$ 27,23 usando como base o preço médio do dólar em maio de 2021. Estes valores são inferiores aos equipamentos disponíveis no mercado com características de funcionamento similares. Como exemplo, o modelo construído com célula de silício da marca Apogee® cujo preço estimado foi de US\$ 337,00 e, mesmo àqueles desenvolvidos com o propósito de custo reduzido em relação aos modelos comerciais, tal como o sensor desenvolvido por Freire (2008) cujos custos corresponderam a US\$ 150,00 segundo cita o autor.

Para realizar a construção dos piranômetros foram empregados elementos de fácil acesso no mercado local. De acordo com dados de 2021 apresentados na Tabela

1, estes componentes podem ter um custo aproximado de R\$ 30,00. A fabricação do sensor pode levar em torno de três horas e custar ao redor de R\$10 a hora, resultado no valor de R\$ 30,00 para a construção de um sensor.

Para garantir o adequado funcionamento dos sensores, é importante realizar a calibração utilizando um piranômetro padrão secundário de termopilha como o LP02 ou similar. O preço do piranômetro padrão LP02 é de US\$ 983,25. Considerando uma vida útil de até 10 anos e custo de capital de 12% a calibração por um período de 32 dias tem um custo de R\$ 42,17. Durante este processo de calibração é importante contar com mão de obra qualificada para realizar a instalação dos sensores, supervisão e cálculos posteriores, este trabalho tem um custo aproximado de R\$ 34 em relação a 4 hora de trabalho.

Tabela 1. Valores correspondentes ao custo de produção do piranômetro artesanal.

Item	Valor R\$	Valor US\$
Componentes	30,0	6,0
Mão de obra construção	30,0	6,0
Mão de obra calibração	34,0	6,8
Aluguel de sensor padrão LP02	42,17	8,43
VALOR TOTAL	136,17	27,23

Fonte: Os autores (2021).

6 CONCLUSÕES

A metodologia de construção dos piranômetros foi de fácil reprodutibilidade por usar materiais de baixo custo e fácil aquisição no mercado. Os sensores submetidos a condição de campo durante 414 dias não apresentaram deterioração física e os dados estimados mantiveram concordância com o curso sazonal da série temporal do sensor padrão. A estimativa da ET_{OPM} com a radiação solar medida pelos piranômetros construídos e o registro dos dados por meio do conversor HX711 demonstraram que este sensor pode ser

usado em estações meteorológicas automatizadas, instaladas em campo aberto ou em ambiente protegido com acurácia suficiente para estimativas confiáveis e de baixo custo da Evapotranspiração de Referência utilizando o modelo de *Penman Montheith*.

7 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES pelas bolsas de estudo e ao CNPq pelo financiamento desta pesquisa através do projeto 409332/2018-6.

O presente artigo é oriundo da dissertação de mestrado Sánchez-Benítez, J. Sensores de baixo custo para monitoramento contínuo da umidade do solo e radiação solar. Universidade Federal do Recôncavo da Bahia. 2021.

8 REFERENCIAS

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration-** guide lines for computing crop water requirements. Rome: FAO, 1998. (Irrigation and Drainage paper, 56).

BOLZAN, M. B. **Desenvolvimento de um piranômetro baseado em componentes semicondutores**. 2014. Dissertação (Mestrado em Metrologia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil, 2014.

BORGES, V. P.; OLIVEIRA, A. S. D.; COELHO FILHO, M. A.; SILVA, T. S.; PAMPONET, B. M. Avaliação de modelos de estimativa da radiação solar incidente em Cruz das Almas, Bahia. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Cidade: Campina Grande, Paraíba, Brasil, v. 14, n. 1, p. 74-80, 2010.

BORNHOFEN, E. Evapotranspiración del cultivo FAO 56. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Cidade: Goiânia, Goiás, Brasil, v. 45, n. 1, p. 46-55, 2015.

CAMPBELL SCIENTIFIC. **CS300 Silicon Pyranometer**. Cidade: North Logan, Utah, USA, Editora: Campbell Scientific, inc., 2018. Disponível em: <https://www.campbellsci.com/cs300-pyranometer>. Acesso em: 15 maio 2021.

CAMPBELL SCIENTIFIC. **LP02 pyranometer Sensor**. Cidade: North Logan, Utah, USA, Editora: Campbell Scientific, inc, 2012. Disponível em:

<https://www.campbellsci.com/lp02-1>. Acesso em: 15 maio 2021.

CAQUIMBO, C. C. P.; ROJAS, R. Q.; POLANCO, J. D. Q. Diseño e implementación de un prototipo médico para el tratamiento y control de la Diabetes Mellitus Tipo 1. **Ingeniería y Región**, Cidade: Neiva, Huíla, Colômbia, H v. 13(1), p. 191-200, 2015.

CEKON, M.; SLÁVIK, R.; JURAS, P. Obtainable method of measuring the solar radiant flux based on silicone photodiode element. **Applied Mechanics and Materials**, Cidade: Schweiz, Suíça, v. 824, p. 477–484, 2016.

FREIRE, L. A. D. **Desenvolvimento de um piranômetro fotovoltaico**. 2008. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Energéticas e Nucleares) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil, 2008.

GÓMEZ, J. M.; CARLESSO, F.; VIEIRA, L. E.; SILVA, L. A irradiância solar: conceitos básicos. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, Cidade: São Paulo, São Paulo, Brasil, v. 40, n. 3, p. e3312-1-e3321-12, mar. 2018.

INMETRO. **Avaliação de dados de medição** - Guia para a expressão de incerteza de medição- GUM 2008. Cidade: Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2012a.

INMETRO. **Vocabulário Internacional de Metrologia: VIM 2012**. Conceitos fundamentais e gerais e termos associados. 1. ed. Cidade: Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, INMETRO, 2012b.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 9060: 1990** - Solar Energy - specification and classification of instruments for measuring

hemispherical solar and direct solar radiation. ISO, Cidade: Genebra, Suíça, 1990.

MAPA. Instituto Nacional de Meteorologia. **Rede de estações meteorológicas automáticas do Inmet**. Brasília, DF: MAPA, 2011. (Nota técnica n. 001/2011/SEGER/LAIME/CSC/INMET). Disponível em: http://www.cemtec.ms.gov.br/wp-content/uploads/2019/02/Nota_Tecnica-Rede_estacoes_INMET.pdf. Acesso em: 29 out. 2020.

MEDUGU, D.; BURARI, F.; ABDULAZEEZ, A. Construction of a reliable model pyranometer for irradiance measurements. **African journal of Biotechnology, Academic Journals** (Kenya), v. 9, n. 12, 2010.

NWANKWO, S. N.; NNABUCHI, M. N.; EKPE, J. E. Construction and characterization of a pyranometer using locally available materials for global solar radiation measurement. **Asian Transactions on Basic and Applied Sciences**, Cidade: Pakistan, v. 26, n. 4, p.26-33, 2012.

RAFI, Z; MERLIN, O; LE DANTEC, V.; KHABBA, S.; MORDELET, P.; ER-RAKI,

S. FERRER, F. Partitioning evapotranspiration of a drip-irrigated wheat crop: Inter-comparing eddy covariance-, sap flow-, lysimeter- and FAO-based methods. **Agricultural and Forest Meteorology**, Cidade: Guelph, Ontario, Canadá, v. 265, p. 310-326, 2019.

SILVA. E. A. **Técnicas de estimação de parâmetros de módulos fotovoltaicos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015.

VILELA, W. A. **Estudo, desenvolvimento e caracterização de radiômetros para medidas da radiação solar**. 2010. Teses (Doutorado em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Ciência e Tecnologia Materiais e Sensores) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2010.

VISHAY. **Silicon PIN Photodiode**. BPV10. Vishay, 2019. Disponível em: www.vishay.com/docs/81502/bpv10.pdf . 2019. Acesso em: 29 out. 2020.

VISHAY. **Silicon Photodiode, RoHS Compliant**. BPW20RF. Vishay, 2011. Disponível em: www.vishay.com/docs/81570/bpw20rf.pdf. 2011. Acesso em: 29 out. 2020.