# ANÁLISE COMPARATIVA DE MEDIDORES DE IRRADIÂNCIA

# CAIO M. A. LUZ, FERNANDO L. TOFOLI, PAULA S. VICENTE, EDUARDO M. VICENTE

Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de São João del-Rei Praça Frei Orlando, 170 – Centro – São João del-Rei–MG – CEP 36307-352

# *E-mails:* <u>caiomeiramaral@hotmail.com</u>, <u>fernandolessa@ufsj.edu.br</u>, <u>paulasantos@ufsj.edu.br</u>, <u>eduardomoreira@ufsj.edu.br</u>

**Abstract**— This paper presents the development of a photodiode pyranometer, capable of measuring the global irradiance that reaches the surface of the Earth. In the development of this system, different types of sensors are evaluated, as well as its spectral responses. The system also has ambient temperature measurement and a data logging interface that are not available in commercial sensors. Finally, the response of the thermopile and photodiode pyranometers are assessed, evidencing the best dynamic response of the photodiode sensor.

Keywords— Photodiode pyranometer, thermopile pyranometer, photovoltaic systems, BPW34, irradiance.

**Resumo**— Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um piranômetro de fotodiodo, capaz de medir a irradiância global que chega até a superfície da Terra. Para o desenvolvimento desse sistema, diferentes tipos de sensores são avaliados, em conjunto com suas respostas espectrais. São adicionados ao sistema, recursos como medição de temperatura ambiente e uma interface de comunicação e registro de dados, que não estão presentes em medidores comerciais. Ao final, é realizada a análise da resposta dos piranômetros de termopilha e fotodiodo, evidenciando a melhor resposta dinâmica do segundo sensor.

Palavras-chave- Piranômetro de fotodiodo, piranômetro de termopilha, sistemas fotovoltaicos, BPW34, irradiância.

## 1 Introdução

A crescente preocupação em relação às mudanças climáticas e a escassez de combustíveis fosseis, têm elevado o interesse por fontes de energias renováveis, dentre elas, pode-se destacar a energia solar fotovoltaica.

O princípio básico de funcionamento desta tecnologia, se dá através da incidência de raios solares na superfície da célula, na qual, por meio de eventos discretos do fóton, é possível gerar uma corrente elétrica.

A energia gerada por uma célula fotovoltaica está diretamente relacionada à quantia de irradiância solar que incide nesse dispositivo. Sendo assim, para avaliar a potência produzida por um sistema fotovoltaico, é necessário conhecer essa grandeza. Para a medição da irradiância, dispõem-se, essencialmente, de três tipos de sensores: o piranômetro (para medição da irradiância solar direta e difusa), o pireliômetro (para medição da irradiância solar direta) e o albedômetro (para medir a irradiância solar refletida) (Hidalgo et al., 2013). O princípio de funcionamento desses dispositivos se concentra, principalmente, em dois tipos de tecnologia, os baseados em termopilha e os fundamentados em dispositivos semicondutores (Hidalgo et al., 2013), (Beaubien et al., 1998). O piranômetro de termopilha é, geralmente, o mais utilizado em diversas aplicações por apresentar uma maior precisão, menor sensibilidade à temperatura e uma melhor resposta ao espectro de frequência do Sol. Entretanto, o elevado custo, quando comparado a outros tipos de sensores, limita o uso desses dispositivos.

Tendo em vista essa limitação, verificam-se na literatura algumas propostas. Em (Aziz et al., 2013), o autor propõe um piranômetro baseado em uma célula solar fotovoltaica onde, por meio da corrente que flui pelo resistor acoplado ao mesmo, é possível estimar a irradiância, entretanto, o custo de célula não justifica sua implementação. Um dispositivo de medição baseado no modelo de Kimbal-Hobbs é proposto em (de Souza et al., 2009), tal modelagem foi proposta no início do século 20, servindo de base para os piranômetros mais recentes. O mesmo baseia-se na diferença de temperatura de dois anéis concêntricos, com diferentes refletâncias. Contudo, apesar de apresentar bons resultados, o mesmo requer uma calibração complexa, exigindo um difícil equacionamento. Em (Hidalgo et al., 2013), o autor faz uso de um fototransistor para a implementação do piranômetro. Apesar do baixo custo e do circuito de condicionamento integrado, o mesmo apresenta problemas de saturação em alta luminosidade, reduzindo sua sensibilidade quando exposto a altos níveis de irradiância. Já em (Martínez et al., 2009), o autor utiliza um fotodiodo como elemento sensor, obtendo um bom resultado, contudo, o sensor utilizado é de difícil aquisição e alto custo.

É proposto nesse trabalho um piranômetro que funciona através do efeito fotoelétrico, que possui um menor custo e responde a variações bruscas de irradiância. Além disso, o sistema possui uma interface de aquisição de dados através de cartão SD e um medidor de temperatura integrados. Ao final, para validar as medições obtidas através do sensor desenvolvido, será realizada uma comparação com um sensor de termopilha de referência, avaliando os erros de medição.

# 2 Piranômetro

## 2.1 Princípio de funcionamento

O piranômetro é um dispositivo que mede a irradiância em um campo de visão de 180 graus, que aceita radiação de qualquer lado dos hemisférios. Cabe destacar que, a medida da radiação solar por unidade de área (W/m<sup>2</sup>), é denominada irradiância. Sendo está a principal medida quando se trabalha com energia solar fotovoltaica.

Para uma correta medição da irradiância, é necessário, por definição, que a resposta do instrumento diminua com o cosseno do ângulo de incidência. Sendo assim, a máxima resposta é obtida quando o Sol incide perpendicularmente na superfície do sensor (zênite). Em um ângulo de 60 graus, a sua resposta cai pela metade e, em um ângulo de 90 graus (Sol no horizonte), a resposta fornecida é nula, conforme ilustrado na Figura 1 (Michalsky et al., 1995), (Vilela, 2010).

Conforme relatado em (Michalsky et al., 1995), a maioria dos sensores de irradiância não responde corretamente ao cosseno do ângulo de incidência. À medida que o ângulo aumenta, a resposta do sensor perde sua qualidade. Sabe-se ainda que, a diferença entre a resposta real do sensor e a resposta do cosseno é denominada erro do cosseno, expressa pela equação (1) (King et al., 1997), em que: E (%) é o erro percentual do sensor,  $\Theta$  é o ângulo de incidência, V( $\Theta$ ) a tensão de saída do sensor para o ângulo de incidência  $\Theta$  e V<sub>N</sub> a tensão de saída de referência ( $\Theta = 0^{\circ}$ ).

$$E(\%) = \left(\frac{\frac{V(\theta)}{V_N}}{\cos(\theta)} - 1\right).100\%$$
(1)

Conforme será detalhado ao longo do texto, uma maneira de minimizar esses efeitos é por meio de materiais difusores de radiação, tal como o Teflon<sup>®</sup> (de Souza et al., 2009), (Martínez et al., 2009) (Medugu et al., 2010).



Figura 1. Variação da resposta do sensor conforme a angulação, adaptado de (Vilela, 2010).

O piranômetro de termopilha é composto de dois domos de vidro, externo e interno, que permitem a passagem de comprimentos de onda entre 100 nm e 3000 nm, conforme pode ser visto na Figura 2 (Chen, 2017; Beaubien et al., 1998). Neste tipo de sensor, apresentado na Figura 3, a medição da irradiância se dá por meio da diferença de temperatura de duas superfícies de pigmentações diferentes, preta e branca. Apesar de elevada precisão proporcionada por esse dispositivo, superior a 5%, o mesmo apresenta uma resposta demasiadamente lenta, em torno de 1 a 10 s (Martínez et al., 2009), o que pode impossibilitar a percepção de variações bruscas de irradiância.



Figura 2. Resposta espectral do Sol, do fotodiodo e do piranômetro de termopilha (Hidalgo et al., 2013).



Figura 3. Piranômetro do tipo termopilha modelo SR05 da Hukseflux.

Na Figura 4, tem-se o piranômetro fotoelétrico. Este dispositivo semicondutor de junção PN, é sensível a um comprimento de onda reduzido (do ultravioleta ao infravermelho) (Hidalgo et al., 2013), conforme observado na Figura 2. Seu princípio de funcionamento assemelha-se ao de diodos comuns, onde a principal diferença reside no fato que o mesmo produz uma corrente quando exposto à luz. Ou seja, o fotodiodo fornece uma corrente proporcional à radiação incidente, tornando-o adequado à esse tipo de medição.



Figura 4. Piranômetro fotoelétrico desenvolvido.

A diferença fundamental entre os dispositivos sensores é, além das suas características construtivas, sua resposta espectral. A radiação solar, cujo espectro é mostrado na Figura 2 (Chen, 2017), possui um comprimento de onda que varia de 300 nm até cerca de 3000 nm. As células fotovoltaicas de silício, que é a tecnologia mais comumente utilizada em módulos comerciais, responde a um comprimento de onda de cerca de 400 nm a 1200 nm. Para os módulos de silício, 95% da energia convertida se concentra nesse intervalo (Chen, 2017), (King et al., 1997). Em virtude do espectro absorvido pelos fotodetectores ser coincidente com o espectro das células fotovoltaicas, os mesmos foram avaliados para a montagem do sensor proposto.

# 2.2 Definição do sensor

A escolha do sensor para o piranômetro requer a avaliação de diversas características, uma vez que o mesmo é um elemento chave na obtenção da melhor resposta do equipamento. Deve-se avaliar, principalmente, o comprimento de onda ao qual o mesmo é sensível, de forma a se aproximar ao máximo do comprimento de onda da célula fotovoltaica. Além disso, o elemento sensor deve possuir um alto ganho nesse intervalo, sendo sua resposta o mais linear possível.

Avaliando a resposta espectral do sensor, devese selecionar aquele que tenha a maior sensibilidade entre 400 nm e 1200 nm (Hidalgo et al., 2013), (King et al., 1997) de comprimento de onda. Para isso, é necessário recorrer à curva de sensibilidade em função do comprimento de onda, que é disponibilizado nos *datasheets* dos fabricantes. Devido à disponibilidade dos componentes no mercado e de suas características, serão avaliados os fotodiodos BPW21, BPW34, SFH202 e um fototransistor TIL78. A Figura 5 mostra as curvas da sensibilidade em relação ao comprimento de onda, fornecidas pelos fabricantes (VISHAY, 2018b), (VISHAY, 2018a), (SIMENS, 2018), (INSTRUMENTS, 2018). Ao comparar os gráficos da Figura 5, observa-se que a resposta dos fotodiodos BPW34 e SFH202 são as mais adequadas. O fotodiodo BPW21 também se encontra dentro do intervalo especificado, porém, o mesmo possui uma resposta um pouco mais estreita, o que, apesar de não ser ideal, satisfaz as condições requeridas pelo sensor.

Ao analisar os demais dados fornecidos pelo fabricante, é necessário levar em consideração a área sensível à radiação (mm<sup>2</sup>) e a sensibilidade espectral (A/W). Com tais informações, para uma dada irradiância, é possível determinar a corrente fornecida pelo fotodiodo.

Outra grandeza importante é o ruído de energia equivalente NEP (*Noise Equivalent Power*), dado em (W/Hz<sup>1/2</sup>). Essa informação, juntamente com a sensibilidade do sensor, permite calcular o ruído. O fator SNR (*Signal-to-Noise Ratio*), é obtido dividindo-se a corrente de saída pelo ruído. Por fim, deve-se avaliar o preço unitário do sensor, tendo em vista a proposta de baixo custo e a viabilidade de sua utilização em determinadas aplicações.

As características citadas anteriormente foram agrupadas na Tabela 1, para facilitar a comparação entre os sensores. Dentre os dados citados, cabe destacar o NEP, que relaciona a variação do ruído com o aumento da potência, e é fornecido pelo fabricante.

Com essas informações, é possível calcular o sinal fornecido por cada sensor (Martínez et al., 2009). Para isso, considera-se uma irradiância de 1000 W/m<sup>2</sup>, que é o valor de referência para as condições de teste padrão (STC). A corrente de saída I<sub>p</sub> é, então, determinada através de (2). Nos cálculos, não foi possível determinar os valores para o fototransistor TIL78, devido à indisponibilidade dessas informações no *datasheet* do dispositivo.

Conforme pode-se verificar por meio dos resultados da equação (2), apresentado na Tabela 2, o BPW34 apresenta a maior corrente de saída para uma dada irradiância. Porém, além dessa informação, é interessante recorrer ao SNR, que é determinado pela divisão da corrente de saída pelo ruído. Para obter o valor do ruído  $I_n$ , utiliza-se a equação (3).

Finalmente, conforme mencionado, pode-se calcular o SNR por meio de (4). De acordo com os resultados obtidos em (2), (3) e (4), apresentado na Tabela 2, observa-se que o sensor BPW34 apresenta o melhor SNR e que, por meio da Figura 5 e daTabela 1, possui uma resposta espectral adequada e baixo custo de aquisição. Tendo em vista essas características, escolheu-se o BPW34 para a construção do medidor de irradiância proposto.

 $I_{p} = IRRADIÂNCIA \times \acute{A}REA \times SENSIBILIDADE$ (2)



Tabela 1. Informações dos fotodiodos / fototransistores.

Figura 5. Curva de resposta da sensibilidade pelo comprimento de onda, para os dispositivos: (a) BPW34, (b) BPW21, (c) SFH202 e (d) TIL78 (VISHAY, 2018b; VISHAY, 2018a; SIMENS, 2018; INSTRUMENTS, 2018).

$$I_n = SENSIBILIDADE \times NEP$$
(3)

$$SNR = \frac{I_P}{I_n} \tag{4}$$

Tabela 2. Resultados das equações (2), (3) e (4).

	BPW21	BPW34	SFH202
Ip	2,5e <sup>-3</sup>	4,34e <sup>-3</sup>	5,5e <sup>-4</sup>
In	2,45e <sup>-14</sup>	2,54e <sup>-14</sup>	1,81e <sup>-14</sup>
SNR	1,02e <sup>11</sup>	1,71e <sup>11</sup>	3,04e <sup>9</sup>

# 2.3 Sistema de condicionamento

Após a escolha do sensor, é necessário projetar um sistema de condicionamento, para realizar a aquisição de dados de maneira adequada. Tendo em vista a linearidade da irradiância em relação à corrente produzida pelo sensor (Aziz et al., 2013), deve-se realizar a conversão de tensão em corrente, para que o microcontrolador seja capaz de interpretar os sinais amostrados.

Um circuito bastante conhecido na literatura capaz de realizar essa conversão é o amplificador de transimpedância, mostrado na Figura 6. Neste circuito,  $I_p$  é a corrente fotogerada pelo sensor.  $C_c$ ,  $R_c$  e  $C_r$  são elementos de compensação, correção e estabilização, respectivamente. A determinação de seus valores será visto mais adiante.  $R_s e C_s$  compõem um filtro passa-baixa, que tem como intuito eliminar qualquer tipo de ruído proveniente do sensor (SNR). Por fim,  $R_f$  é o resistor de feedback, que é responsável por fixar um ganho CC ao circuito, sendo a tensão de saída dada por  $V_o=I_p.R_f$ .



Figura 6. Amplificador de transimpedância usado no condicionamento do sinal fornecido pelo sensor.

Para determinar o valor de R<sub>f</sub>, recorre-se, primeiramente, às condições climáticas na STC (irradiância de 1000 W/m<sup>2</sup> e temperatura igual a 25 °C), conforme a equação (2). Para essa condição climática, sabe-se que o fotodiodo BPW34 gera uma fotocorrente de I<sub>p</sub>= 4,34x10<sup>-3</sup> A. Levando-se em consideração a máxima tensão permitida na entrada analógica do microcontrolador, que é de 5 V, utilizou-se um valor de R<sub>f</sub> = 1 kΩ.

Com o intuito de corrigir o erro CC proveniente da corrente de polarização, um resistor  $R_c = 1 \ k\Omega$  é conectado à porta não-inversora do amplificador operacional. Uma vez que esse resistor tem um efeito prejudicial em termos do ruído (Graeme, 1996), é necessário conectar um capacitor de C<sub>c</sub> = 100 pF em paralelo ao mesmo, com a finalidade de atenuá-lo. Para melhorar a estabilidade do circuito devido a eventuais capacitâncias parasitas que podem surgir quanto este estiver em operação, um capacitor  $C_r =$ 100 pF é conectado em paralelo ao resistor de realimentação. A determinação desses componentes foi baseada em (Graeme, 1996) e (Sedra, 2014). Por último, os valores dos componentes do filtro passabaixa foram determinados considerando uma frequência de corte de 10 Hz, obtendo-se  $R_s = 6.8 \text{ k}\Omega$  e  $C_s = 2,2 \text{ nF}.$ 

#### 2.4 Sensor de Temperatura

Para uma melhor avaliação das condições climáticas, realizou-se também a leitura da temperatura ambiente. Foram avaliados dois tipos de sensores, o LM35 (INSTRUMENTS, 2017) e o Dallas DS18B20 (INTEGRATED, 2015). Devido à necessidade de medição da temperatura utilizando um cabo de comprimento superior a 3 metros, o primeiro sensor foi descartado em função da deterioração do sinal para distâncias acima de 2 metros, sobretudo em função da presença de ruídos na medição. O sensor DS18B20, apresentou melhores resultados, em grande parte devido à natureza digital do sinal amostrado e do uso da interface "one wire", que permite a utilização de diversos dispositivos na mesma linha de comunicação. Sendo assim, optou-se pelo sensor Dallas DS18B20.

# 2.5 Microcontrolador

Tanto o sensor de irradiância quanto o sensor de temperatura serão integrados ao microcontrolador ATmega328P da ATMEL<sup>®</sup>, que é de 8 bits, e possui capacidade de processamento de até 16 MIPS (Milhões de Instruções Por Segundo). Esse microcontrolador é de baixo custo e fácil integração com diversos componentes, devido à utilização em kits de programação da plataforma Arduino<sup>®</sup>, permitindo integrá-lo a sistemas que são construídos especificamente para essa plataforma (ATMEL, 2009). O esquemático elétrico completo do projeto pode ser visto na Figura 7.

Além dos sensores supracitados, desenvolveu-se um *datalooger*, para disponibilizar os dados através da interface USB ou armazená-los em um cartão SD, tornando o sistema independente de um computador pessoal. Para visualizar as informações em tempo real, foi acoplado um display LCD16x2.

# 2.6 Estrutura física

Tendo em vista que o piranômetro é um dispositivo que deve permanecer exposto ao Sol durante longos períodos, é fundamental que o mesmo tenha uma estrutura física adequada para suportar essas condições climáticas. Para esse projeto, utilizou-se uma estrutura de material PVC, conforme pode ser visto na Figura 4. Na parte superior do protótipo encontra-se o elemento sensor, que foi acondicionado dentro de uma cúpula composta de PTFE (Politetrafluoretileno) que é um polímero mundialmente conhecido como Teflon<sup>®</sup>. Esse dispositivo, de formato côncavo, além de proteção contra a água de dias chuvosos, serve como elemento difusor de luz, reduzindo o erro do cosseno.

#### 3 Análise comparativa

Após todo processo de montagem do protótipo, pôde-se realizar uma comparação entre esses dois dispositivos. Para tanto, os dois sensores foram colocados no topo de uma edificação cuja as coordenadas geográficas são (21°08'18.8"S 44°15'29.1"W), sob uma superfície plana, estando livres de qualquer tipo de sombra, conforme ilustra a Figura 8. Na Figura 9, pode-se ver ambos os sistemas de aquisição de irradiância, sendo o display de maiores dimensões respectivo ao medidor SR-05 e o menor relativo ao piranômetro desenvolvido. Por fim, na Figura 10, pode-se observar o resultado da irradiância e temperatura de ambos piranômetros para o dia 29/06/2018.

Em virtude do surgimento de nuvens ao longo da tarde, sobretudo entre 12:40 e 15:30, tem-se, inevitavelmente, grandes variações de irradiância, dificultando a análise dos resultados nesse período do dia. Entretanto, no intervalo de 6:20 às 12:40, aproximadamente, observa-se que as medições dos piranômetros são semelhantes, sendo a resposta do piranômetro de fotodiodo, mais rápida do que o de termopilha, conforme o esperado. Próximo às 12:30, os valores tornam-se praticamente idênticos.

A fim de verificar o erro do piranômetro projetado com o comercial de termopilha, plotou-se o gráfico da Figura 11. O mesmo retrata, em escala logarítmica, o erro absoluto entre os dois dispositivos.



Figura 7. Esquemático completo de projeto



Figura 8. Local de ensaio da análise comparativa.



Figura 9. Sistemas de aquisição.



Figura 10. Resultados da irradiância e temperatura para um dia completo de medição, 29/06/2018.



Figura 11. Erro absoluto entre os piranômetros.

Por meio da Figura 11, pode-se aferir que a diferença entre as respostas dos dois piranômetros, na maior parte do dia, é inferior à 2%. No decorre da manhã essa diferença tende a diminuir, chegando praticamente a zero às 12:30. Através dos resultados obtidos, comprova-se a eficácia do sistema de medição desenvolvido.

#### 4 Conclusão

O piranômetro é um importante instrumento de medição da irradiância solar, sendo de suma importância em diversas aplicações, tal como em energia solar fotovoltaica. Entretanto, o alto custo de soluções comerciais, é um fator que impede sua popularização, motivo pelo qual desenvolveu-se um medidor de irradiância de baixo custo.

O desenvolvimento do piranômetro proposto foi realizado através da definição do sensor, BPW34, avaliando-se as características desse componente, sobretudo sua resposta espectral. Além disso, uma interface de comunicação e registro de dados foi implementada, disponibilizando os dados através de uma comunicação USB ou com um cartão de memória. A análise comparativa entre o sensor de termopilha e o baseado em fotodiodo, evidenciou o menor tempo de resposta do sistema proposto. Por meio da análise do erro, verificou-se uma pequena diferença entre o valores, de cerca de 2%, o que justifica a diferença de custo dos sistemas, sendo o custo do piranômetro desenvolvido, cerca de 1% do valor de um piranômetro de termopilha comercial.

#### Agradecimentos

Os autores agradecem a CAPES, CNPq, FAPEMIG, INERGE e PPGEL pelo suporte fornecido durante a realização deste trabalho.

## **Referências Bibliográficas**

- ATMEL. (2009) *ATmega328P*. Available at: <u>https://www.mouser.com/pdfdocs/Gravitech\_AT</u> <u>MEGA328\_datasheet.pdf</u>.
- Aziz FSA, Sulaiman SI and Zainuddin H. (2013) A prototype of an integrated pyranometer for measuring multi-parameters. Signal Processing and its Applications (CSPA), 2013 IEEE 9th International Colloquium on. IEEE, 73-77.
- Beaubien D, Bisberg A and Beaubien A. (1998) Investigations in pyranometer design. *Journal of atmospheric and oceanic technology* 15: 677-686.
- Chen G. (2017) Solid-State Solar Thermal Energy Conversion Center. Available at: <u>http://s3tec.mit.edu/index.php?option=com\_cont</u> <u>ent&view=article&id=%2081&Itemid=130#ove</u> rview.
- de Souza LGM, de Souza LGVM, Ramos Filho REB, et al. (2009) DESIGN, CONSTRUCTION, CALIBRATION AND PERFORMANCE ANALYSIS OF A LOW COST PYRANOMETER BASED ON THE KIMBALL-HOBBS MODEL.
- Graeme JG. (1996) *Photodiode amplifiers. Op amp soluti*, New York.
- Hidalgo FG, Martinez RF and Vidal EF. (2013) Design of a low-cost sensor for solar irradiance. URL: <u>http://oceanoptics</u>. com/wpcontent/uploads/Fernando-Guerra-Hidalgo-Sensors-Design. pdf.
- INSTRUMENTS T. (2017) LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors. Available at: http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm35.pdf.
- INSTRUMENTS T. (2018) Optoelectronics. Available at: <u>http://www.datasheetspdf.com/pdf/615591/ETC/</u> TIL32/1.
- INTEGRATED M. (2015) *DS18B20*. Available at: <u>https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/D</u> <u>S18B20.pdf</u>.

- King DL, Kratochvil JA and Boyson WE. (1997) Measuring solar spectral and angle-of-incidence effects on photovoltaic modules and solar irradiance sensors. *Photovoltaic Specialists Conference, 1997., Conference Record of the Twenty-Sixth IEEE.* IEEE, 1113-1116.
- Martínez MA, Andújar JM and Enrique JM. (2009) A new and inexpensive pyranometer for the visible spectral range. *Sensors* 9: 4615-4634.
- Medugu D, Burari F and Abdulazeez A. (2010) Construction of a reliable model pyranometer for irradiance measurements. *African journal of Biotechnology* 9.
- Michalsky J, Harrison L and Berkheiser III W. (1995) Cosine response characteristics of some radiometric and photometric sensors. *Solar Energy* 54: 397-402.
- Sedra. (2014) Microelectronic Circuits.
- SIMENS. (2018) PIN PHOTODIODE.
- Vilela WA. (2010) Estudo, desenvolvimento e caracterização de radiômetros para medidas da radiação solar. *São José dos Campos: INPE*.
- VISHAY. (2018a) *Silicon Photodiode*. Available at: https://www.vishay.com/docs/81519/bpw21r.pdf
- VISHAY. (2018b) Silicon PIN photodiode. Available at: https://www.vishay.com/docs/81521/bpw34.pdf.