

**Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP  
Campus João Monlevade  
Graduação em Engenharia Elétrica**

**JOÃO LUCAS FERREIRA TRAD**

**IMPLEMENTAÇÃO DE UM PIRANÔMETRO DE BAIXO CUSTO PARA  
MEDIÇÃO DE IRRADIÂNCIA SOLAR**

**João Monlevade/MG  
2025**

**JOÃO LUCAS FERREIRA TRAD**

**IMPLEMENTAÇÃO DE UM PIRANÔMETRO DE BAIXO CUSTO PARA  
MEDIÇÃO DE IRRADIÂNCIA SOLAR**

**Trabalho de conclusão de curso  
apresentado como requisito parcial  
para obtenção do grau de Engenheiro  
Eletricista na Universidade Federal de  
Ouro Preto, Campus João Monlevade.**

**Professor Orientador: Dr. Caio Meira  
Amaral da Luz**

**João Monlevade/MG  
2025**

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

T763i Trad, Joao Lucas Ferreira.  
Implementação de um piranômetro de baixo custo para medição de irradiância solar. [manuscrito] / Joao Lucas Ferreira Trad. - 2025.  
52 f.: il.: color., gráf., tab., mapa.

Orientador: Prof. Dr. Caio Meira Amaral da Luz.  
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.  
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas. Graduação em Engenharia Elétrica .

1. Energia Solar. 2. Irradiação - Medição. 3. Piranômetro. 4. Radiação solar - Medição. I. Luz, Caio Meira Amaral da. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 621.317.794

Bibliotecário(a) Responsável: Flavia Reis - CRB6-2431



## FOLHA DE APROVAÇÃO

**João Lucas Ferreira Trad**

### **Implementação de um piranômetro de baixo custo para medição de irradiância solar**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica

Aprovada em 10 de Abril de 2025

#### Membros da banca

Dr. Caio Meira Amaral da Luz - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto - DECAT)

Dr. Welbert Alves Rodrigues - (Universidade Federal de Ouro Preto - DEELT)

Dr. Rodrigo Cassio de Barros - (Universidade Federal de Ouro Preto - DEELT)

Dr. Caio Meira Amaral da Luz, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 22/04/2025



Documento assinado eletronicamente por **Caio Meira Amaral da Luz, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 22/04/2025, às 14:59, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [http://sei.ufop.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0898708** e o código CRC **F5033F1F**.

## RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento e a implementação de um piranômetro de baixo custo para a medição de irradiância solar, utilizando o fotodiodo BPW34 como sensor principal. A proposta surge diante da necessidade de dispositivos acessíveis para monitoramento da radiação solar, visto que os piranômetros comerciais apresentam custos elevados, dificultando sua adoção em aplicações de pequeno porte e projetos educacionais. O protótipo foi desenvolvido com base em componentes eletrônicos simples, incluindo circuito de condicionamento de sinal, microcontrolador, módulo de armazenamento e estrutura física resistente às intempéries. O sistema foi calibrado com o auxílio de um piranômetro comercial de referência (Hukseflux SR05), permitindo a análise comparativa das medições obtidas em campo. Os resultados indicaram que o dispositivo apresentou comportamento coerente com o sensor de referência, com desvios inferiores a 2% nas medições e boa estabilidade térmica. Além disso, o custo total estimado do protótipo foi de aproximadamente R\$ 122,00, representando uma alternativa econômica frente aos modelos comerciais, cujo custo pode ultrapassar R\$ 9.000,00. Conclui-se que o piranômetro desenvolvido apresenta potencial para aplicações em contextos onde a alta precisão não é um requisito crítico, sendo uma solução promissora para democratização do monitoramento solar.

**Palavras-chave:** Piranômetro, Irradiância Solar, Fotodiodo, Energia Solar, Monitoramento.

## **ABSTRACT**

This work presents the development and implementation of a low-cost pyranometer for measuring solar irradiance, using the BPW34 photodiode as the main sensor. The proposal addresses the demand for accessible devices for solar radiation monitoring, as commercial pyranometers have high costs, limiting their use in small-scale applications and educational projects. The prototype was built using simple electronic components, including a signal conditioning circuit, microcontroller, data storage module, and a weather-resistant physical structure. Calibration was performed using a commercial reference pyranometer (Hukseflux SR05), enabling comparative analysis of field measurements. The results indicated that the device showed consistent behavior with the reference sensor, with deviations below 2% and good thermal stability. Moreover, the total estimated cost of the prototype was approximately R\$ 122.00, offering an economical alternative to commercial models, which may exceed R\$ 9,000.00. It is concluded that the developed pyranometer shows potential for applications where high precision is not a critical requirement, representing a promising solution for the democratization of solar monitoring.

**Keywords:** Pyranometer, Solar Irradiance, Photodiode, Solar Energy, Monitoring.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação das componentes da radiação solar .....	8
Figura 2 - Piranômetro com banda de sombra para medição de radiação difusa .....	9
Figura 3 – Modelo de piranômetro termopilha.....	10
Figura 4 – Modelo de piranômetro que utiliza fotodiodo.....	10
Figura 5 - Construção do piranômetro “padrão” C21 da Kipp & Zonen .....	11
Figura 6 – Variação da resposta do sensor em função do ângulo de incidência do Sol.....	12
Figura 7 – Projeto do Protótipo-1 fotovoltaico de silício .....	15
Figura 8 - Protótipos de piranômetros com os difusores em teste (enumerados de 1 a 3) e o piranômetro de referência (enumeração 4), KIPP&ZONEN CMP22 .....	17
Figura 9 - Curva de resposta da sensibilidade pelo comprimento de onda, para os dispositivos: (a) BPW34, (b) BPW21, (c) SFH202 e (d) TIL7 .....	21
Figura 10 - Amplificador de transimpedância usado no condicionamento do sinal fornecido pelo sensor.....	23
Figura 11 - Esquemático completo de projeto .....	24
Figura 12 – Montagem da fonte, módulo Arduino .....	25
Figura 13 – Estruturação do módulo de leitura para a estrutura física do protótipo ..	26
Figura 14 – Visão superior do protótipo em momento de amostragem.....	26
Figura 15 - Piranômetro do tipo termopilha modelo SR05 da Hukseflux.....	27
Figura 17 – Geolocalização do local de amostragem.....	30
Figura 18 - Resultados da irradiância para período de medição de 12 horas (04/09/2024).....	31
Figura 19 - Resultados da irradiância para período de medição de 12 horas (06/09/2024).....	32

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Componentes básicos de um sistema solar fotovoltaico.....	6
Quadro 2 – Vantagens e desvantagens dos piranômetros .....	13
Quadro 3 - Padrão internacional – ISO 9060 (1990): Lista de especificação de piranômetros. ....	14
Quadro 6 - Comparativo de custos entre o protótipo e piranômetro comercial .....	33

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Informações dos fotodiodos .....	21
Tabela 2 – Resultados obtidos para as correntes de saída ( $I_p$ ), valor do ruído ( $I_n$ ) e SNR.....	22

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1 Motivação do trabalho .....	2
1.2 Objetivos Específicos.....	3
1.3 Estruturação do trabalho .....	3
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>5</b>
2.1 Considerações iniciais .....	5
2.2 Energia Solar Fotovoltaica.....	5
2.3 Radiação Solar e Irradiação Solar .....	7
2.4 Piranômetros.....	9
2.4.1 Componentes e funcionamento.....	10
2.4.2 <i>Classificação, especificação e calibração</i> .....	13
2.4.3 <i>Histórico de pesquisas</i> .....	15
2.5 Considerações parciais.....	18
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>20</b>
3.1 Considerações iniciais .....	20
3.2 Descrição dos procedimentos metodológicos .....	20
3.1 Definição do sensor.....	20
3.2 Sistema de Condicionamento.....	22
3.3 Microcontrolador.....	24
3.4 Estrutura Física e o Difusor .....	25
3.5 Calibração.....	26
3.6 Considerações parciais.....	27
<b>4 RESULTADOS E DISSUSÃO</b> .....	<b>29</b>
4.1 Considerações iniciais .....	29
4.2 Descrição da medição e local de amostragem.....	29
4.2.1 <i>Medição 1</i> .....	30
4.2.2 <i>Medição 2</i> .....	31
4.3 Comparativo de custos .....	32
4.4 Considerações parciais.....	34
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>35</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>36</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Vários países têm se preocupado com o futuro das próximas gerações no que se refere à disponibilidade de matriz energética. Essa preocupação, por sua vez, é essencial para a manutenção da sobrevivência no planeta.

Como consequência, tem-se constatado maior mobilização no que se refere à conservação, pesquisa e implementando planos de ações que conscientizem cada vez mais a utilização dos recursos energéticos. Esse anseio é refletido e confirmado através do Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS) nº 7, estabelecido pela Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas (ONU), tratando da garantia do acesso à energia barata, confiável, sustentável e renovável para todos (IPEA, 2019). O estabelecimento deste ODS fortalece a busca pelas opções de geração de energia que causem menores danos ao meio ambiente e que sejam viáveis economicamente (Rosa, Gasparin, 2017).

A matriz energética no Brasil atualmente é composta em cerca de 70% por hidrelétricas. Entretanto, a energia solar tem se mostrado como uma fonte energética renovável de alto potencial nos últimos anos. Isso se deve a sua viabilidade para se gerar energia elétrica renovável e garantia da segurança energética ao país (Bezerra, 2021; WWF-Brasil, 2015).

Nesse contexto de diversificação e fortalecimento das fontes renováveis, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) é a responsável por estabelecer os regulamentos necessários para o funcionamento do setor elétrico no Brasil. Dentre suas competências, pode-se citar a fiscalização e monitoramento afim de garantir com que as regras sejam seguidas e os padrões de segurança e qualidade sejam mantidos. Além destas atribuições, a ANEEL contribui com iniciativas que estimulam a utilização das energias renováveis, objetivando maior sustentabilidade e variabilidade da matriz energética no país.

Em 2012 foi publicada a Resolução Normativa nº 482. Esta estabelece as regras para compensação de energia e permite com que pequenos geradores fossem instalados em unidades consumidoras. Tal medida acarretou em uma considerável redução na fatura de energia elétrica de diversos consumidores. Com o passar do tempo esta resolução foi atualizada. Dentre as principais alterações, destaca-se a atualização de fevereiro de 2023, a Resolução Normativa nº 1.059, que aprimorou as

regras para a conexão e o faturamento de centrais de microgeração e minigeração distribuída em sistemas de distribuição de energia elétrica assim como as regras do Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE). Além destas, a Norma ABNT 16690 (2019), regulamenta a energia solar fotovoltaica no Brasil, estabelecendo os requisitos e recomendações dos projetos elétricos quanto a instalação e equipotencialização dos arranjos fotovoltaicos, aterramento e dispositivos de manobra.

Para que essas instalações sejam eficientes e seguras, é fundamental compreender as características dos recursos energéticos envolvidos, em especial a radiação solar, esta é definida como a energia emitida pelo Sol, que se propaga no espaço em várias direções. Por outro lado, a irradiação é o fluxo de energia radiante instantâneo que incide sobre uma superfície real ou imaginária, por unidade de área cuja unidade de medida é W/m. Dito isso, faz-se necessário a mensuração tanto em quantidade quanto em qualidade desta energia para que se possa calcular, direcionar e convertê-la para diversos fins, sendo uma fonte alternativa de geração de energia elétrica.

O Brasil possui um considerável índice de radiação solar se comparado a Europa, isso se deve à sua grande extensão territorial, a expressiva área de telhados em habitações, e o elevado nível de irradiação solar sobre o país (com ênfase a Região Nordeste) (Rosa; Gasparin, 2017; Bezerra, 2021). Porém, esse grande potencial energético deve estar alinhado ao desenvolvimento de políticas públicas específicas para promover este desenvolvimento no país (WWF-Brasil, 2015).

## **1.1 Motivação do trabalho**

Diante da necessidade de se obter aparelhos eficazes na mensuração desta energia, o piranômetro é um dispositivo capaz de medir a irradiância solar incidente sobre uma superfície, geralmente plana e dentro de um campo de visão de 180° (Luz *et al.*, 2019). Este dispositivo pode ser composto por sensores dos tipos termoelétricos, fotoelétricos, piroelétricos ou bimetálicos, sendo, entretanto, equipamentos de custo elevado, o que pode limitar sua adoção em aplicações de pequeno porte.

Nesse sentido, é necessário ofertar dispositivos de baixo custo que garantam a mesma confiabilidade na mensuração dos dados solares de irradiância e irradiação,

afim de se atingir as diferentes classes sociais e econômicas para a utilização dos recursos energéticos de matriz solar.

Um dos principais desafios para ampliação das redes solarimétricas no Brasil é o custo elevado dos sensores de medição de irradiância solar, principalmente quando se trata dos piranômetros térmicos (Santos et al., 2020).

Em virtude deste desafio, os piranômetros fotovoltaicos apresentam-se como uma solução viável de baixo custo. Entretanto, salienta-se que eles ainda se encontram em fase desenvolvimentos nas universidades. Isso porque, apesar de possuir certas limitações no que tange à resposta espectral do sensor, ainda consiste na melhor opção nos quesitos de montagem e custos (Santos *et al.*, 2020).

## **1.2 Objetivos Específicos**

A presente pesquisa teve como objetivo desenvolver e implementar um piranômetro de baixo custo, utilizando fotodiodos como sensores, para a medição de irradiância solar. Baseada nos estudos de Luz et al., a pesquisa envolveu a coleta de dados de irradiância realizada pelo aluno, com o intuito de validar o desempenho do dispositivo frente à potencialidade de sua utilização em sistemas de energia renovável.

Além disso, a proposta foi além da simples medição de irradiância, ao sugerir o uso do fotodiodo como uma ferramenta de manutenção preventiva em usinas solares. Esse sensor, quando integrado ao sistema de monitoramento, permitiu acompanhar a eficiência dos módulos fotovoltaicos e identificar possíveis falhas no sistema, prevenindo perda de desempenho e otimizando a operação.

A abordagem adotada foi de natureza aplicada, com revisão bibliográfica e caráter experimental. O trabalho explorou conceitos técnicos de engenharia elétrica, legislações e equações voltadas para sistemas de baixo custo de medição de irradiância, além de realizar análises comparativas entre medidores.

## **1.3 Estruturação do trabalho**

O trabalho foi estruturado em quatro partes principais: (i) referencial teórico, que apresenta dados estatísticos e conceitos sobre energia solar fotovoltaica, além dos

princípios de funcionamento do piranômetro; (ii) metodologia, que descreve a caracterização da pesquisa e os procedimentos técnicos adotados; (iii) materiais e métodos, com a explicação detalhada dos componentes utilizados, do protótipo desenvolvido e dos procedimentos de campo realizados; e (iv) resultados e conclusão, onde são discutidos os dados obtidos, a análise comparativa com o piranômetro de referência, e as (v) considerações finais acerca do desempenho do dispositivo e de suas possíveis aplicações.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1 Considerações iniciais**

Nesta seção, são discutidos temas como a energia solar fotovoltaica, destacando sua importância e desafios, os princípios relacionados à radiação e irradiância solar, e as características, classificações e calibrações dos piranômetros. Além disso, apresenta-se o histórico de pesquisas relevantes que consolidam o uso de dispositivos fotovoltaicos como solução viável para medições precisas e acessíveis de irradiância solar.

### **2.2 Energia Solar Fotovoltaica**

O termo fotovoltaico (FV) é definido como “a ciência que utiliza a energia do Sol para produzir eletricidade” (Balfour, 2019, p. 21). A energia gerada pelos módulos FV pode ser usada de forma a complementar a energia gerada pelas hidrelétricas. Dessa forma, o pico de demanda energética durante o dia, que representa um fardo tanto para as linhas de transmissão quanto de distribuição, pode ser atenuado. Como consequência, têm-se níveis de emissão de gases do efeito estufa e maior eficiência energética (WWF-Brasil, 2015; Balfour, 2019). Contudo, apresenta algumas desvantagens tal como: o alto investimento inicial, pois o retorno acerca do custo se dá após um período de 5 a 10 anos (Balfour, 2019).

O aproveitamento desta energia se deu em função do cuidado de se criar uma fonte de energia em que não houvesse desperdício de recursos (Balfour, 2019). De forma geral, a energia solar sempre foi uma fonte de energia essencial à vida na Terra, por exemplo, o carvão, petróleo, madeira e eletricidade são fontes energéticas produzidas pelo Sol (Balfour, 2019).

O que determina o funcionamento da energia FV é a incidência dos raios solares sobre a superfície de uma célula, que por meio de emissões de fóton pode gerar uma corrente elétrica (Luz *et al.*, 2019). Em vista deste princípio de funcionamento, as principais variáveis que influenciam no rendimento energia gerada pelo sistema FV são as condições meteorológicas e ambientais (Balfour, 2019).

Os componentes de um sistema FV requerem materiais que sejam resistentes às forças mecânicas ou climáticas afim de se evitar a degradação dos materiais utilizados por corrosão, chuva ácida, rachaduras, inchação, força do vento, entre outros, e demarcar sua durabilidade. O Quadro 1 apresenta os principais componentes de um sistema FV e suas principais características.

Quadro 1 – Componentes básicos de um sistema solar fotovoltaico.

<b>Componente</b>	<b>Função</b>
Recurso solar	Fonte de energia de todos os sistemas FV em nosso sistema solar.
Células fotovoltaicas	Quando tratadas com impurezas químicas, em um processo chamado dopagem, essas finas seções de material semiconductor reagem à luz solar, criando tensão e corrente.
Módulo	Consistem em várias células ligadas em série e em paralelo, para fornecer tensões e corrente.
Painel	Utilizado intercaladamente com o termo módulo.
Matriz	Consiste em vários módulos ligados em série e em paralelo, para fornecer tensões e correntes específicas. A matriz normalmente é presa a uma estrutura de montagem.
Bateria	Uma bateria pode ser definida como um dispositivo de armazenamento de energia elétrica de corrente direta (DC). Até mesmo os sistemas FV conectados à rede de distribuição de energia elétrica frequentemente podem se beneficiar de um sistema de armazenamento em baterias, em que a falta de energia é uma preocupação.
Inversos	O inversor DC-AC converte a energia de corrente direta (DC) para corrente alternada (AC), para ser utilizada em eletrodomésticos, eletrônicos e outros dispositivos.
Controlador de carga	Regula, carrega e mantém a tensão da bateria
Carga elétrica	Inclui os eletrodomésticos e outros dispositivos que usam a energia gerada pelo sistema FV. As cargas elétricas podem ser DC ou AC. É possível ter os dois tipos de carga elétrica no mesmo sistema FV.
Cabeamento	Inclui os fios, também conhecidos como condutores, que conectam os componentes do sistema para produzir circuitos.
Protetor contra surtos	Dispositivo que protege contra choques elétricos provenientes de curtos-circuitos e contra danos decorrentes das flutuações de energia.

Fonte: Balfour, 2019, adaptado pelo autor.

Os sistemas FV são customizáveis em função das variáveis meteorológicas e ambientais. Em vista disso, cada localidade apresentará características específicas, necessitando de ajustes que alcancem um ótimo rendimento operacional.

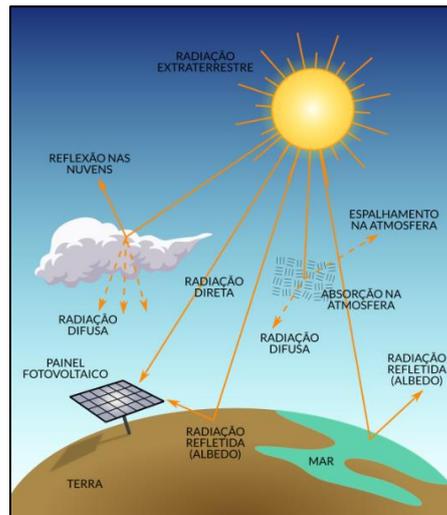
Fatores como temperatura, poeira e sujeira, perdas por incompatibilidade e fiação, perdas decorrentes da Conversão DC/AC e condições de Teste-Padrão e Classificação PTC podem afetar o rendimento global de um sistema FV (Balfour, 2019). Assim, cabe a necessidade constante de monitoramento e manutenção – preditiva e corretiva - sobre o sistema instalado.

### **2.3 Radiação Solar e Irradiação Solar**

Conforme Yamasoe (2011), a radiância e irradiância são grandezas radiométricas provenientes das energias radiante ou eletromagnética. A radiação solar é definida como “o fluxo de energia emitida pelo Sol e transmitida sob a forma de radiação eletromagnética” (Gómez et al., 2018). A irradiância é o quociente entre a intensidade de radiação de um certo elemento de superfície, em uma determinada direção, e a área da projeção ortogonal deste elemento em um plano perpendicular a essa direção ( $Wm^{-2}sr^{-1}$ ) (Yamasoe, 2011).

De acordo com a WWF-Brasil (2015), o Brasil pode ampliar consideravelmente a participação da fonte solar fotovoltaica em sua matriz energética devido a grandiosidade territorial e a alta irradiação solar. Porém, mesmo com o planeta recebendo uma alta irradiação solar, existem locais onde a irradiância é baixa, fazendo-se necessários os estudos nos locais pretendidos em função da viabilidade econômica de uma instalação (Almeida, 2015). A Figura 1 apresenta os componentes da radiação solar no planeta Terra.

Figura 1 - Representação das componentes da radiação solar



Fonte: Souza et al., 2020.

A irradiação direta é definida como a radiação solar que chega diretamente à superfície terrestre sem sofrer dispersão na atmosfera. Ela incide em linha reta e é mais intensa em dias de céu claro. Segundo Alves (2008), em dias ensolarados, cerca de 80 a 90% da radiação solar que atinge a superfície é radiação direta. E a irradiação difusa resulta do espalhamento da radiação solar ao interagir com partículas na atmosfera, como moléculas de ar, poeira e gotículas de água. Essa radiação atinge a superfície terrestre de forma indireta e é predominante em dias nublados. Victoria (2008) descreve a radiação difusa como a radiação solar que, após sofrer processos de refração e reflexão na atmosfera, incide na superfície terrestre com sua direção modificada.

O estudo do rendimento previsto para um sistema FV em comparativo ao rendimento real pode ser realizado através dos sensores de irradiância conhecidos como piranômetro. Este, por sua vez, é capaz de mensurar a irradiância solar no local em que o sistema FV está localizado (Balfour, 2019). De acordo com Vilela (2010), as aplicações dos sensores de radiação são diversas, como acionadores de processos automáticos, indicadores de radiação, dispositivos de medidas de radiação, entre outros.

## 2.4 Piranômetros

Os piranômetros são dispositivos que medem a irradiação solar global (difusa e direta). São dispositivos capazes de medir a irradiância solar ( $W/m^2$ ) incidente sobre uma superfície, geralmente plana e dentro de um campo de visão de  $180^\circ$  (Luz *et al.*, 2019). Pode ser composto por sensores dos tipos termoeletrônicos, fotoeletrônicos, piroeletrônicos ou bimetálicos.

O componente difuso da irradiância é mensurado com o auxílio de um disco ou anel de sombreamento, os mais tradicionais são apresentados na forma de aro ou semiaro, aplicados em paralelo com a elíptica, o intervalo espectral deste dispositivo está entre  $0,2$  a  $2,8 \mu m$ , logo, se a mensuração da radiação global for realizada por outro piranômetro de forma simultânea é possível estimar a radiação solar direta no plano horizontal e assim converter para incidência normal (Yamasoe, 2011; CEMIG, 2012). O modelo de piranômetro com banda de sombra é apresentado pela Figura 2.

Figura 2 - Piranômetro com banda de sombra para medição de radiação difusa.



Fonte: CEMIG, 2012, p. 31.

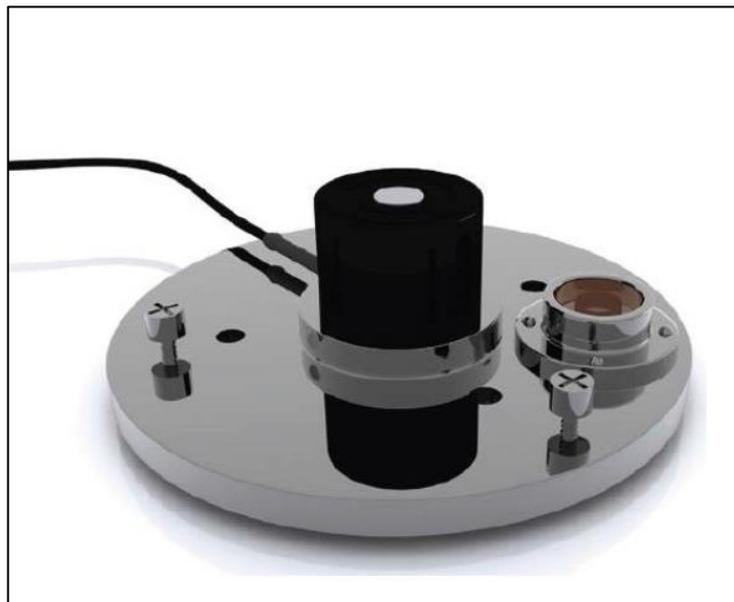
Um piranômetro espectral “mede os componentes global, difuso ou refletido da irradiância solar em bandas espectrais largas, em geral com o auxílio de filtros” (Yamasoe, 2011). As Figuras 3 e 4, apresentam um modelo de piranômetro do tipo termopilha e um modelo que utiliza fotodiodo, respectivamente.

Figura 3 – Modelo de piranômetro termopilha.



Fonte: CEMIG, 2012, p. 30.

Figura 4 – Modelo de piranômetro que utiliza fotodiodo.



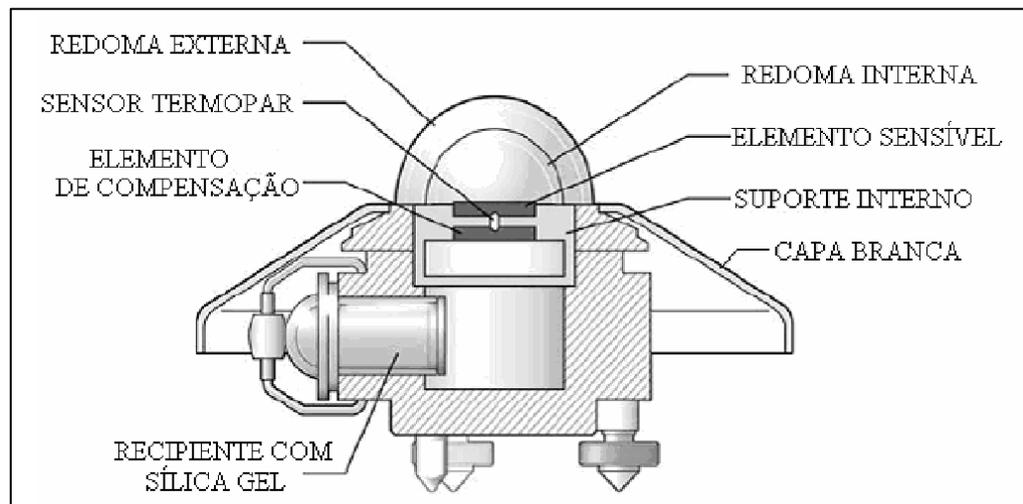
Fonte: CEMIG, 2012, p. 29.

#### 2.4.1 Componentes e funcionamento

Embora possuam o mesmo objetivo, os modelos de piranômetros diferem quanto ao seu princípio de funcionamento. Isso se deve às suas características construtivas, sensores e resposta espectral.

No modelo termopilha ou termoelétrico, os componentes essenciais incluem: o sensor térmico ou elemento sensível, cuja superfície receptora é pintada de preto ou, alternadamente, de preto e branco; redomas de vidro que envolvem concentricamente a superfície receptora; e o corpo que está sempre protegido do Sol por uma capa branca, sendo utilizado como referência térmica. A Figura 5 apresenta os detalhes de fabricação de um modelo de piranômetro desta categoria.

Figura 5 - Construção do piranômetro “padrão” C21 da Kipp & Zonen



Fonte: Freire, 2008.

Nestes modelos de piranômetros, há um conjunto de termopares ligados em série que geram uma corrente elétrica proporcional à diferença de temperatura entre um absorvedor de radiação solar e uma placa de referência (CEMIG, 2012). “É composto de dois domos de vidro, externo e interno, que permitem a passagem de comprimentos de onda entre 100 nm e 3000 nm” (Luz et al., 2019).

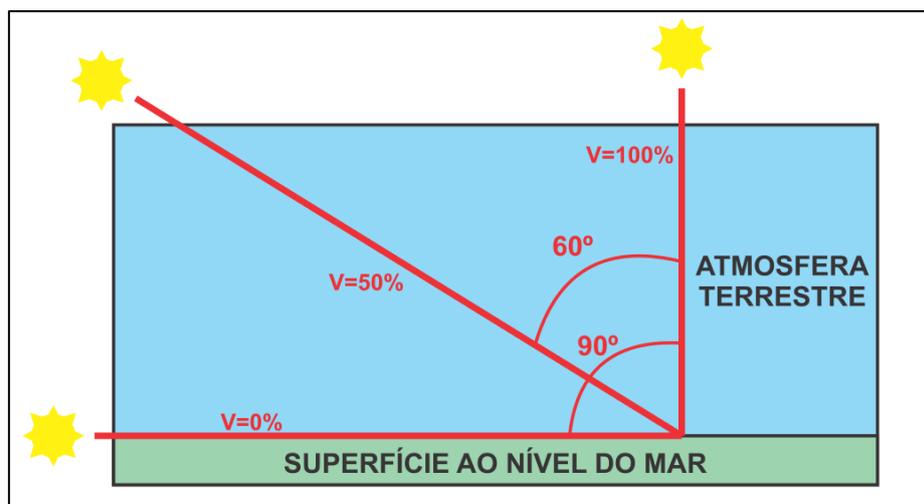
Os domos de vidro formam um ou dois hemisférios em seu entorno, evitando prevenir efeitos transitórios resultantes de resfriamentos convectivos no sensor, além de filtrar a radiação de onda larga proveniente do céu e da terra (Almerão et al., 2021). Conforme Macagnan (2010) *apud* Almerão et al. (2021), ao utilizar dois hemisférios, as trocas de radiação no infravermelho ocorrem entre o hemisfério externo (mais frio) e o interno (mais quente), minimizando a transferência direta para o sensor.

Já o modelo fotovoltaico, baseia-se na geração de corrente elétrica por meio de células fotovoltaicas quando expostas à radiação, e assim a corrente gerada é diretamente proporcional à irradiância solar (CEMIG, 2012). Conforme Luz et al.

(2019), as células fotovoltaicas de silício respondem a um comprimento de onda entre 400 nm a 1200nm.

Em comum, a máxima resposta destes aparelhos é dada quando o Sol incide perpendicularmente sobre estes. Já em  $60^\circ$  a resposta cai pela metade, e em um ângulo de  $90^\circ$  a resposta é nula (Luz *et al.*, 2019). Este processo é representado pela Figura 6.

Figura 6 – Variação da resposta do sensor em função do ângulo de incidência do Sol.



Fonte: Vilela, 2010 apud Luz et al., 2019, p. 1.

Além disso, é pertinente destacar as características funcionais, os benefícios e desvantagens de cada modelo. O Quadro 2 apresenta estes apontamentos.

Quadro 2 – Vantagens e desvantagens dos piranômetros

Modelos	Vantagens	Desvantagens
Piranômetro térmico	Utilização em escala diária, horária ou menor	Alto custo
		Dificuldades de confecção devido às cúpulas de vidro
	Medidas como maior precisão	Necessidade de correção espectral
	Resposta espectral de até 2500 nm	
Boa qualidade		
Piranômetro fotovoltaico	Refletividade das células e dependência da resposta com a temperatura	Seletividade do espectro solar parcial
	Baixo custo e facilidade de uso	Para células de c-Si, introduzem incertezas de quase 5%
	Sensor estável e degradação de sensibilidade menor que 2% ao ano	Qualidade razoável
	Não necessidade da correção espectral	
	Tempo de resposta instantâneo e linear com a irradiância	

Fonte: Almerão et al., 2021; CEMIG, 2012; Pinho; Galdino, 2014; Santos, 2020, adaptado pelo autor.

#### 2.4.2 Classificação, especificação e calibração

Conforme Pinho e Galdino (2014), a qualidade das medidas dos piranômetros provém das calibrações requeridas dos sensores, conforme as normas da ISO (*International Standards Organization*). A ISO 9847 (1992), “normatiza os procedimentos de calibração de um piranômetro de campo (pertencente a uma rede de medição) por comparação, *in-situ* com um piranômetro de referência (padrão secundário)” (Pinho; Galdino; 2014, p. 90).

Já a norma ISO 9060 (1990), especifica e classifica os instrumentos para medição da irradiância global, diante desta, os piranômetros podem ser classificados em de padrão secundário; de primeira classe e de segunda classe. A classificação destes dispositivos é estabelecida conforme o preenchimento dos critérios e parâmetros da ISO 9060, sendo estes: tempo de resposta, compensação do ponto zero, não-estabilidade, não-linearidade, resposta á inclinação (ou resposta co-seno), resposta direcional, seletividade espectral.

O Quadro 3, apresenta a listagem de especificação de piranômetros conforma o padrão internacional.

Quadro 3 - Padrão internacional – ISO 9060 (1990): Lista de especificação de piranômetros.

Nº da Referência	Especificação	Categoria do Piranômetro		
		Padrão Secundário	1ª Classe	2ª Classe
1	Tempo de Resposta: tempo para 95% da resposta.	< 15 s	< 30 s	< 60 s
2	Compensação do ponto zero: (a) resposta a 200 W.m <sup>-2</sup> para radiação térmica líquida (ventilado). (b) resposta à mudança de 5K/h na temperatura ambiente.	+ 7 W.m <sup>-2</sup> ± 2 W.m <sup>-2</sup>	+ 15 W.m <sup>-2</sup> ± 4 W.m <sup>-2</sup>	+ 30 W.m <sup>-2</sup> ± 8 W.m <sup>-2</sup>
3a	Não-Estabilidade: Mudança na porcentagem na resposta no ano.	± 0,8 %	± 1,5 %	± 3 %
3b	Não-Linearidade: Desvio percentual da resposta em 500 W.m <sup>-2</sup> devido à mudança na irradiância dentro de 100 W.m <sup>-2</sup> a 1000 W.m <sup>-2</sup> .	± 0,5%	± 1 %	± 3 %
3c	Resposta Direcional (para radiação direta): a faixa de erros causada pela pretensão de que a resposta à incidência normal é válida para todas as direções quando medindo de uma direção um feixe de radiação de que a irradiância incidente normal é 1000 W.m <sup>-2</sup> .	± 10 W.m <sup>-2</sup>	± 20 W.m <sup>-2</sup>	± 30 W.m <sup>-2</sup>
3d	Seletividade Espectral: Desvio percentual do produto da absorvência espectral e transmitância espectral da média correspondente entre 350 nm e 1500 nm.	± 3 %	± 5 %	± 10 %
3e	Resposta à Temperatura: Desvio percentual devido à mudança na temperatura ambiente dentro de um intervalo de 50K.	2%	4%	8%
3f	Resposta à Inclinação: Desvio percentual da resposta para a inclinação 0° a 90° na irradiância de 1000 W.m <sup>-2</sup> .	± 0,5%	± 2%	± 5%

Fonte: ISO 9060, 1990.

### 2.4.3 Histórico de pesquisas

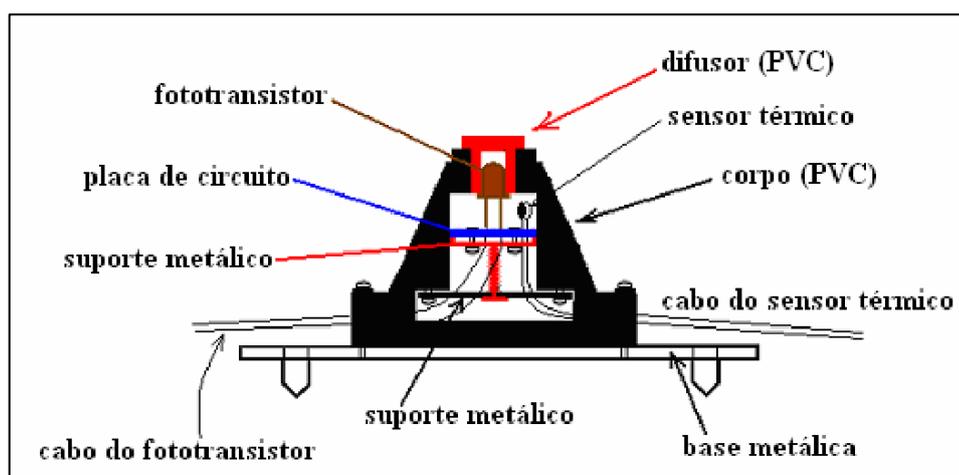
Visto os princípios de funcionamento, componentes e modelos de piranômetros abordados, vários pesquisadores compuseram uma gama histórica e técnica acerca de estudos e experimentos sobre estes equipamentos, em especial aos modelos fotovoltaicos, com o intuito de fortalecer suas vantagens de utilização, nos quesitos operacionais e financeiros.

A seguir apresentam-se alguns estudos, assim como suas metodologias e resultados acerca da implantação dos piranômetros.

No estudo de Freire (2008), foi desenvolvido e testado um piranômetro fotovoltaico utilizando um sensor óptico à base de silício cristalino, facilmente encontrado no mercado. A metodologia utilizada pelo autor foi baseada nas características do dispositivo desenvolvido e nos ensaios, ao longo de vários dias, de calibração, onde utilizou-se um piranômetro comercial Eppley como referência, não-linearidade, respostas à inclinação, temperatura e espectral dos sensores utilizados (Protótipo-1 e LI-COR), e análise da energia absorvida pelo Protótipo-1.

O Protótipo-1 foi constituído por um corpo PVC (policloreto de vinila), pois possui menor condutividade térmica (0,203 W/mK), e assim pode minimizar influências térmicas e climáticas nas medidas (Freire, 2008). O projeto do protótipo e seus componentes é apresentado pela Figura 7.

Figura 7 – Projeto do Protótipo-1 fotovoltaico de silício



Fonte: Freire, 2008.

Contudo, os estudos de Freire (2008), indicaram os seguintes resultados:

- O piranômetro desenvolvido possui uma constante de calibração média de  $12,9 \mu\text{V}/(\text{W}/\text{m}^2)$ , com desvio padrão de 1%;
- A não linearidade média foi de  $\pm 9,2\%$ , levemente acima do limite normativo de 3%;
- A resposta ao ângulo de incidência foi adequada até 40 graus Celsius, com desvios menores que 4%.

Por fim, apesar de não atender completamente às normas, o protótipo desenvolvido pelo autor mostrou-se adequado para medições de radiação solar. Foram sugeridos experimentos adicionais para resolver possíveis problemas e avaliar a estabilidade ao longo do tempo. Além de um radiômetro de baixo custo, com precisão similar, que poderia contribuir para expandir a coleta de dados de energia solar no Brasil.

Em 2015, o estudo realizado por Santos avaliou o desempenho de vários sensores de radiação solar incidente e estimar o saldo de radiação usando modelos lineares. Diferentes modelos de piranômetros foram utilizados para mensurar a radiação solar incidente, comparando-os com o radiômetro CNR4 como referência. O experimento foi realizado na área experimental da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia.

Os resultados indicaram que os piranômetros testados apresentaram desempenho semelhante ao padrão de referência. O saldo de radiação foi estimado tanto com base na radiação solar incidente quanto no saldo de radiação de ondas curtas.

Vignola et al. (2018), investigaram o desempenho de piranômetros que utilizam fotodiodos e células solares como referência. Para minimizar os efeitos do ângulo de incidência, esses instrumentos são normalmente orientados em direção à radiação incidente. Ao eliminar os efeitos inerentes ao ângulo de incidência presentes em estudos anteriores, tornou-se possível identificar de maneira mais clara a alteração na capacidade de resposta do sensor em condições de céu claro.

Os resultados indicaram que os piranômetros baseados em fotodiodos apresentam uma variação mais significativa na responsividade em comparação as

células solares de referência. Os autores sugeriram ainda a realização de medições espectrais para investigar a origem dessa discrepância.

Já em 2020, a pesquisa de Paula *et al.*, buscou desenvolver e avaliar um piranômetro fotovoltaico de baixo custo utilizando pequenos módulos fotovoltaicos de silício policristalino. A metodologia consistiu em um protótipo construído com plástico de engenharia usinado, além da análise de diferentes difusores, constituídos por diferentes materiais: Thecnyl, acrílico e PVC.

Os testes foram conduzidos na estação meteorológica da Universidade Federal Rural do Semi-Árido, em Mossoró/RN. O desempenho do protótipo foi comparado com um piranômetro de referência de classe secundária. A Figura 8, apresenta os protótipos com os difusores em teste e o piranômetro de referência.

Figura 8 - Protótipos de piranômetros com os difusores em teste (enumerados de 1 a 3) e o piranômetro de referência (enumeração 4), KIPP&ZONEN CMP22



Fonte: Paula *et al.*, 2020.

O modelo final mostrou desempenho satisfatório em medições horárias e diárias, com erro médio relativo percentual absoluto de 2,26% nas medições horárias e 0,50% nas medições diárias.

Megantoro *et al.* (2022), buscaram compreender uma caracterização adequada para o sistema de instrumentação para piranômetros através de uma observação experimental e um sistema microcontrolador para adquirir e processar os dados do dispositivo.

Com este estudo, concluiu-se que o piranômetro fotovoltaico é comparado em termos de características de instrumentação, sendo o SP-Lite 3 considerado mais preciso, mas com um efeito de histerese mais pronunciado em comparação com o SEM228. O uso de um circuito de interface e ADC externo é útil para aumentar a precisão do sistema de instrumentação.

Em suma, o conteúdo apresentado se mostra como um aporte necessário para a compreensão da relevância e da aplicabilidade do piranômetro de baixo custo proposto neste estudo. As abordagens apresentadas evidenciam não apenas os avanços e desafios no campo da medição de irradiância solar, mas também a necessidade de dispositivos que unam baixo custo e alta eficiência, reforçando a importância da pesquisa e do desenvolvimento tecnológico nesse contexto.

## **2.5 Considerações parciais**

O levantamento teórico realizado evidenciou a importância da energia solar como uma alternativa sustentável e promissora para diversificação da matriz energética, especialmente em países como o Brasil, que apresentam altos índices de radiação solar ao longo do ano. A compreensão dos conceitos de radiação e irradiância solar mostrou-se fundamental para a análise do potencial energético de diferentes regiões, bem como para a otimização de sistemas fotovoltaicos. Nesse contexto, a mensuração precisa dessa energia torna-se um fator crítico para o desenvolvimento e a eficiência das tecnologias solares.

Dentre os dispositivos utilizados para essa mensuração, os piranômetros destacam-se pela capacidade de medir a irradiância solar com precisão, sendo amplamente empregados em estudos solares e em usinas fotovoltaicas. No entanto, a revisão bibliográfica revelou que o custo elevado dos modelos comerciais, sobretudo os de termopilha, representa um obstáculo à ampliação do uso desses dispositivos, limitando a democratização do acesso à energia solar em comunidades e projetos de pequeno porte.

Os estudos analisados também apontaram que os piranômetros fotovoltaicos surgem como uma alternativa viável e de menor custo, embora ainda enfrentem desafios relacionados à resposta espectral e à linearidade das medições. Diversas pesquisas vêm explorando soluções que utilizam fotodiodos para a construção de

piranômetros de baixo custo, com resultados promissores quanto à precisão e à estabilidade dos sensores.

Portanto, esta revisão reforça a relevância do desenvolvimento de piranômetros mais acessíveis e eficientes, que possam contribuir para a ampliação do uso da energia solar e o fortalecimento das práticas de monitoramento e manutenção preventiva em sistemas fotovoltaicos. Esse contexto embasa a proposta do presente trabalho, que busca desenvolver e validar um piranômetro fotovoltaico de baixo custo, capaz de fornecer medições confiáveis de irradiância solar, alinhando inovação tecnológica e sustentabilidade.

## **3 MATERIAL E MÉTODOS**

### **3.1 Considerações iniciais**

Apresenta-se a seguir o processo de desenvolvimento e implementação do protótipo de piranômetro fotovoltaico de baixo custo, onde são apresentados os componentes utilizados, as técnicas de montagem, o esquema eletrônico do dispositivo e os procedimentos de calibração e coleta de dados. Além disso, descreve-se a metodologia experimental empregada para validar o desempenho do protótipo em condições reais.

### **3.2 Descrição dos procedimentos metodológicos**

A metodologia utilizada consistiu principalmente no desenvolvimento do protótipo, onde foram observados os *datasheets* dos fotodiodos utilizados, cruciais para a determinação de parâmetros comparativos como as faixas espectrais de interesse, linearidade, estrutura física, entre outros.

Os componentes utilizados para o desenvolvimento do piranômetro foram selecionados com base em sua disponibilidade no mercado, no custo reduzido, e seguindo estudos prévios de Freire (2008) e Luz et al (2019).

#### **3.1 Definição do sensor**

A seleção do sensor para o piranômetro exigiu um estudo detalhado dos dispositivos disponíveis no mercado. O foco foi encontrar um fotodiodo que atuasse dentro do espectro visível, apresentasse alto ganho nesse intervalo e fosse o mais linear possível. A análise inicial considerou a resposta espectral do sensor, sendo ideal aqueles com faixa entre 400 nm e 1200 nm (Hidalgo et al, 2013; King et al, 1997).

Os sensores foram divididos em dois grupos principais: os que possuem circuito de condicionamento integrado e os que não possuem. Sensores com circuito de condicionamento integrado foram descartados inicialmente, pois, ao se expor a altas luminosidades, como em condições de forte incidência solar, esses sensores podem sofrer saturação, comprometendo a precisão das medições (Medugu et al, 2010). Com

isso, optou-se por avaliar apenas sensores sem circuito de condicionamento, entre eles BPW21, BPW34, SFH202 e o fototransistor TIL78.

O NEP (*Noise Equivalent Power*) descreve a variação do ruído em função do aumento da potência, sendo esse valor fornecido pelo fabricante. Com essas informações, é possível calcular a resposta de sinal de cada sensor, levando em conta o impacto do ruído na medição (Martínez et al., 2009).

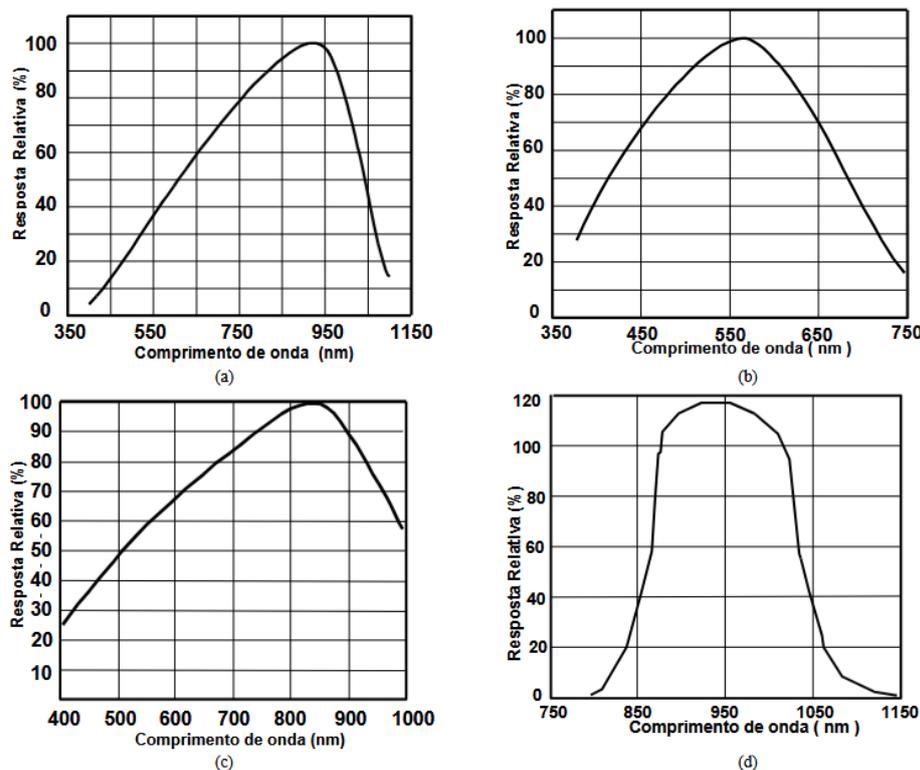
O Quadro 4 apresenta as informações dos fotodiodos e a Figura 9 apresenta as curvas de sensibilidade para os dispositivos.

Tabela 1 – Informações dos fotodiodos

Fotodiodo	Área sensível (mm <sup>2</sup> )	Sensibilidade (A/W)	NEP (W/H <sup>1/2</sup> )	Preço (reais)
BPW21	7,34	0,34	$7,2 \times 10^{-14}$	41,97
BPW34	7	0,62	$4,1 \times 10^{-14}$	9,37
SFH202	1	0,55	$33 \times 10^{-14}$	115,99
TIL78	5	N/D	N/D	1,52

Fonte: (Vishay, 2018; Simens, 2018; Instruments, 2018), adaptado pelo autor.

Figura 9 - Curva de resposta da sensibilidade pelo comprimento de onda, para os dispositivos: (a) BPW34, (b) BPW21, (c) SFH202 e (d) TIL7.



Fonte: (Vishay, 2018; Simens, 2018; Instruments, 2018)

A análise comparativa das curvas de sensibilidade revelou que BPW34 e SFH202 possuem as respostas mais adequadas, enquanto o BPW21, apesar de apresentar uma resposta espectral mais estreita, ainda atende aos requisitos. Além disso, outros fatores foram levados em consideração, como a área sensível à radiação, a sensibilidade espectral, o ruído de energia equivalente (NEP), o SNR (Relação sinal-ruído, do inglês *Signal-to-Noise Ratio*) e o preço unitário.

A relação sinal-ruído (SNR) de cada fotodiodo foi calculada a partir da razão entre a corrente de saída estimada ( $I_p$ ) e o ruído equivalente ( $I_n$ ), utilizando dados dos fabricantes, o que permitiu identificar o BPW34 como o sensor com melhor desempenho. Os resultados demonstraram que o BPW34 obteve o melhor SNR, com resposta espectral adequada e custo acessível, tornando-se o sensor escolhido para a construção do piranômetro proposto (Martínez et al., 2009). Os cálculos realizados para as conclusões são apresentados na respectiva sequência pelo Quadro 5, as variáveis foram obtidas a partir das informações fornecidas pelos fabricantes (Quadro 4 e Figura 9).

Tabela 2 – Resultados obtidos para as correntes de saída ( $I_p$ ), valor do ruído ( $I_n$ ) e SNR

Equação	Resultados por fotodiodo			
	BPW34	BPW21	SFH202	TIL32
$I_p = \text{IRRADIÂNCIA} \times \text{ÁREA} \times \text{SENSIBILIDADE}$	$0,62 \times 10^{-3} \text{ A}$	$2,5 \times 10^{-3} \text{ A}$	$0,55 \times 10^{-4} \text{ A}$	Informações indisponíveis no <i>datasheet</i> .
$I_n = \text{SENSIBILIDADE} \times \text{NEP}$	$2,54 \times 10^{-14} \text{ A/Hz}^{1/2}$	$2,45 \times 10^{-14} \text{ A/Hz}^{1/2}$	$1,81 \times 10^{-14} \text{ A/Hz}^{1/2}$	Informações indisponíveis no <i>datasheet</i> .
$\text{SNR} = I_p / I_n$	$1,71 \times 10^{11}$	$1,02 \times 10^{11}$	$2,04 \times 10^9$	Informações indisponíveis no <i>datasheet</i> .

Fonte: Autor (2025).

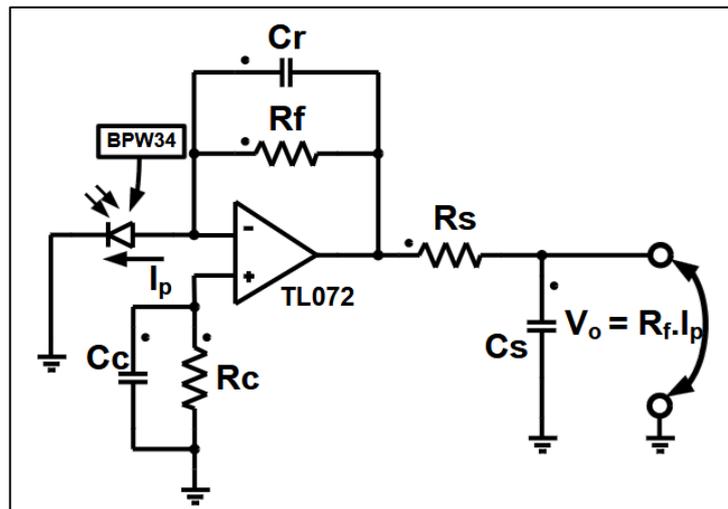
### 3.2 Sistema de Condicionamento

Após a escolha do sensor BPW34, foi necessário projetar um sistema de condicionamento para assegurar a aquisição adequada dos dados, uma vez que a

relação entre irradiância e corrente do sensor exige a conversão dessa corrente em tensão para leitura pelo microcontrolador. Para isso, foi utilizado um amplificador de transimpedância, cuja configuração permite que a tensão de saída seja diretamente proporcional à corrente gerada pelo fotodiodo.

O sinal de tensão gerado pelo sensor fotovoltaico foi processado por um amplificador de transimpedância, responsável por converter a corrente fornecida pelo sensor em uma tensão proporcional. Este circuito foi projetado para minimizar ruídos e melhorar a precisão das medições. O esquemático do amplificador é apresentado pela Figura 10.

Figura 10 - Amplificador de transimpedância usado no condicionamento do sinal de corrente fornecido pelo sensor.



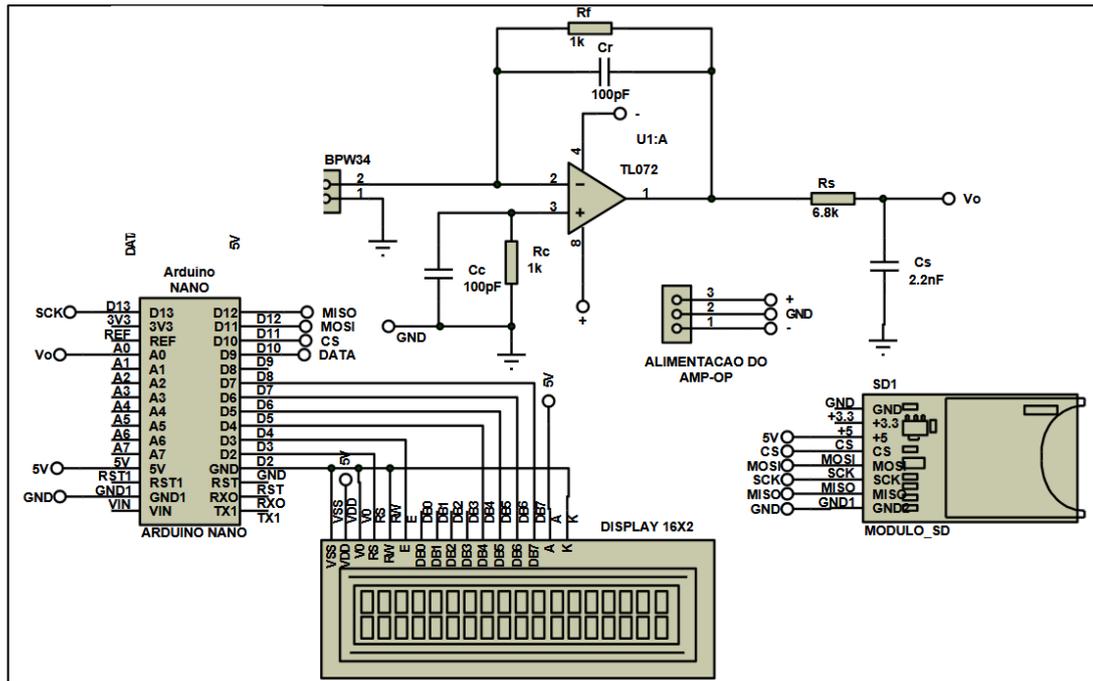
Fonte: Luz et al (2019).

O amplificador de transimpedância desempenha um papel crucial na amplificação de sinais fracos gerados por fotodetectores, garantindo linearidade e alta sensibilidade (Freire, 2008). Além disso, sua implementação com componentes de baixo custo e fácil aquisição é ideal para projetos de dispositivos acessíveis e confiáveis (Luz et al., 2019).

### 3.3 Microcontrolador

O esquemático completo do projeto, incluindo o amplificador e demais componentes eletrônicos, foi documentado e analisado para garantir a eficiência do sistema. O mesmo é apresentado através da Figura 11.

Figura 11 - Esquemático completo de projeto



Fonte: Luz et al (2019).

O sistema de medição desenvolvido utilizou o microcontrolador ATmega328P da ATMEL®, escolhido por seu baixo custo, facilidade de integração e compatibilidade com a plataforma Arduino®.

Esse microcontrolador de 8 bits, capaz de processar até 16 MIPS (Milhões de Instruções Por Segundo), foi responsável por coletar os dados de irradiância e temperatura, integrando-os ao circuito de condicionamento do fotodiodo BPW34 e ao sensor de temperatura Dallas DS18B20, é um dispositivo digital amplamente utilizado em projetos eletrônicos por sua precisão, estabilidade e facilidade de integração com microcontroladores, especialmente através do protocolo 1-Wire, que permite comunicação com apenas um pino de dados. Ele oferece leituras de temperatura entre  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$ , com precisão de até  $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  na faixa de  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$ , sendo ideal para aplicações que exigem monitoramento térmico confiável e de baixo custo.

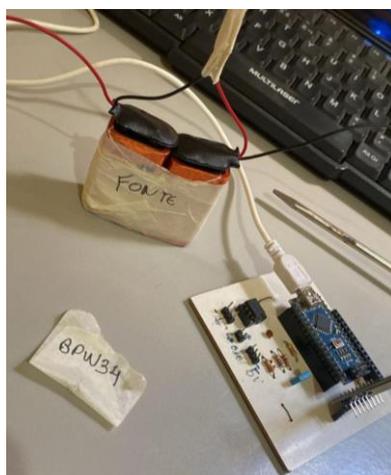
Além disso, o projeto incluiu um *datalogger* baseado na integração do microcontrolador ATmega328P com um módulo de cartão SD para armazenamento dos dados sem a necessidade de conexão constante com um computador, proporcionando maior flexibilidade no manuseio. Para a visualização em tempo real dos resultados, foi incorporado um *display* LCD 16x2, permitindo o acompanhamento direto das medições.

### 3.4 Estrutura Física e o Difusor

A estrutura física do piranômetro foi projetada para suportar longos períodos de exposição ao sol, utilizando PVC (Policloreto de Vinila) como material principal devido à sua durabilidade e resistência a condições climáticas adversas. O elemento sensor BPW34 foi protegido por uma cúpula de PTFE (Politetrafluoretileno), conhecido como Teflon™, que desempenha um papel crucial como difusor de luz.

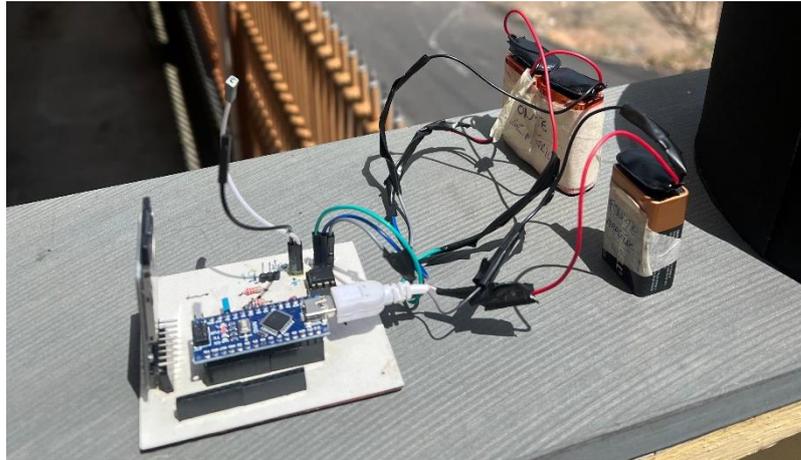
O difusor de PTFE (Politetrafluoretileno) garante que a resposta do piranômetro siga adequadamente a curva do cosseno, pois dispersa uniformemente a luz incidente sobre o sensor, fazendo com que sua resposta seja proporcional ao cosseno do ângulo de incidência da radiação solar. Além disso, a cúpula oferece proteção contra a entrada de água em dias chuvosos, assegurando a integridade do sensor e a precisão das medições. As Figuras 12, 13 e 14 apresentam as montagens da estrutura física.

Figura 12 – Montagem da fonte, módulo Arduino.



Fonte: Autor (2024).

Figura 13 – Estruturação do módulo de leitura para a estrutura física do protótipo.



Fonte: Autor (2024).

Figura 14 – Visão superior do protótipo em momento de amostragem.



Fonte: Autor (2024).

### 3.5 Calibração

O protótipo foi calibrado em condições reais de luz solar, utilizando um piranômetro comercial como referência, o piranômetro do tipo termopilha modelo SR05 da Huskeflux, apresentado pela Figura 15.

Figura 15 - Piranômetro do tipo termopilha modelo SR05 da Hukseflux



Fonte: Hukseflux Brasil, 2025.

O piranômetro em questão é composto por domo de vidro e possui faixa espectral de 285 a 3000nm, é ideal para a medição fotovoltaica (Hukseflux, 2025). A calibração envolveu a medição simultânea da irradiância pelos dois dispositivos, ajustando a constante de calibração do protótipo para minimizar erros de leitura.

Avaliou-se o desempenho do piranômetro desenvolvido através dos ensaios realizados, em dois dias consecutivos, sob área aberta, com baixa obstrução solar.

Os dados de irradiância foram coletados em intervalos de um minuto e registrados em no sistema de aquisição de dados, em seguida foram processados para melhor visualização através de gráficos utilizando-se o *software* Excel.

### 3.6 Considerações parciais

A partir dos materiais e métodos adotados, foi possível desenvolver um piranômetro fotovoltaico de baixo custo, priorizando a escolha de componentes acessíveis e de fácil aquisição, sem comprometer a precisão das medições. A seleção do fotodiodo BPW34 mostrou-se adequada devido à sua resposta espectral compatível com a faixa de interesse e ao seu custo reduzido.

O projeto do sistema de condicionamento de sinal, aliado à calibração com um piranômetro de referência, garantiu a confiabilidade dos dados coletados.

Além disso, a estrutura física do protótipo foi planejada para suportar condições climáticas adversas, assegurando a durabilidade do dispositivo em medições a longo

prazo. Assim, a metodologia aplicada proporcionou um embasamento técnico sólido para a validação do protótipo, permitindo a análise comparativa dos resultados obtidos em campo

## **4 RESULTADOS E DISSUSÃO**

### **4.1 Considerações iniciais**

Os resultados obtidos com o desenvolvimento e a implementação do piranômetro de baixo custo permitiram avaliar a eficiência do protótipo na medição de irradiância solar em condições reais de campo. A análise comparativa com o piranômetro de referência possibilitou verificar a precisão e a estabilidade das medições, destacando o desempenho do fotodiodo BPW34 diante das variações de irradiância ao longo do dia.

Os testes de campo forneceram informações valiosas sobre a resposta do dispositivo em diferentes condições atmosféricas, permitindo discutir os principais fatores que influenciam sua performance e identificar oportunidades de melhorias para futuras aplicações.

### **4.2 Descrição da medição e local de amostragem**

Após todo processo de montagem do protótipo, realizou-se uma comparação entre medições do dispositivo BPW34 e o piranômetro comercial.

As medições foram efetuadas em dois 2 dias (04/09/2024 e 06/09/2024), no período compreendido entre 6h e 18h. Os horários escolhidos se deram em função da resposta máxima obtida do Sol sob a superfície do protótipo, ou seja, a correta medição da irradiância se dá quando a resposta do instrumento diminui com o cosseno do ângulo de incidência (Luz et al, 2019).

Para tanto, o sensor foi colocado no topo de uma edificação cuja as coordenadas geográficas são (19°48'46.08"S 43°10'2.84"O), sob uma superfície plana, estando livres de qualquer tipo de sombra. A Figura 17 apresenta a localização da amostragem no município de João Monlevade/MG.

Figura 16 – Geolocalização do local de amostragem



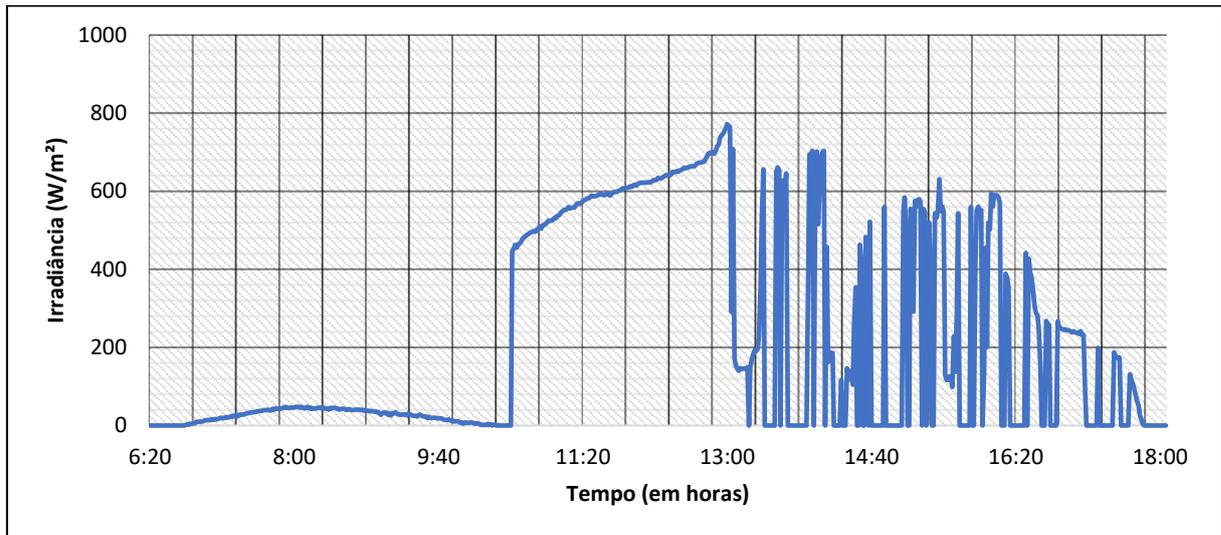
Fonte: Autor (2024).

Abaixo apresenta-se os resultados obtidos para as medições nos dias 4 de setembro de 2024 e 6 de setembro de 2024.

#### **4.2.1 Medição 1**

Nos dias avaliados, observou-se um aumento gradativo da irradiância solar durante a manhã, com um pico máximo registrado por volta das 12h40 no dia 4 de setembro, alcançando aproximadamente  $760 \text{ W/m}^2$ . No dia 6 de setembro, o pico ocorreu por volta das 12h20, com um valor ligeiramente maior, de  $945 \text{ W/m}^2$ . A Figura 18 apresenta os resultados das medições para o primeiro dia de amostragem.

Figura 17 - Resultados da irradiância para período de medição de 12 horas (04/09/2024)



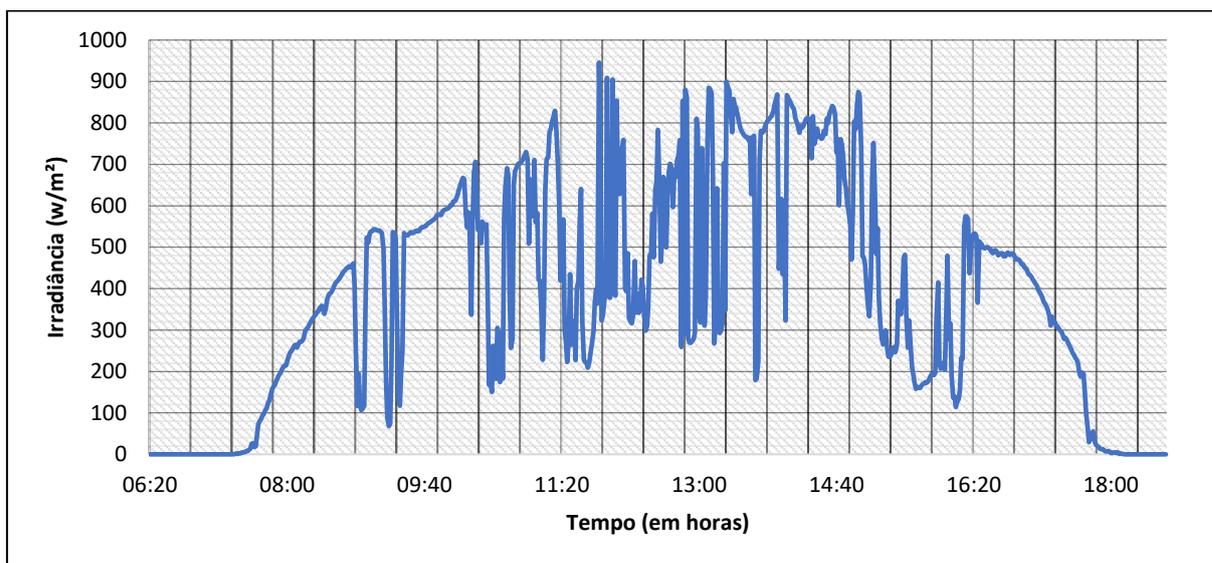
Fonte: Autor (2024).

#### 4.2.2 Medição 2

Durante o período da tarde, entre 14h e 17h, as medições mostraram oscilações significativas nos dois dias, atribuídas à presença de nuvens intermitentes, no entanto com um destaque maior para a medição do dia 4 (Figura 17).

Essas oscilações são consistentes com os dados apresentados por Luz et al. (2019), que destacam o impacto das condições atmosféricas na irradiância solar, em virtude deste fato, o gráfico da medição do segundo dia se torna mais atrativo para um melhor desempenho do protótipo. A Figura 19 apresenta os resultados das medições para o segundo dia de amostragem.

Figura 18 - Resultados da irradiância para período de medição de 12 horas (06/09/2024)



Fonte: Autor (2024).

### 4.3 Comparativo de custos

Um dos principais motivadores para o desenvolvimento deste trabalho foi a busca por uma alternativa de baixo custo aos piranômetros comerciais, que apresentam valores significativamente elevados e podem inviabilizar sua aplicação em projetos educacionais, pesquisas acadêmicas de pequeno porte e sistemas fotovoltaicos de baixo investimento.

O custo total estimado do protótipo desenvolvido, considerando todos os seus componentes (fotodiodo, microcontrolador, difusor, condicionamento de sinal, estrutura física, armazenamento de dados e interface de exibição), foi de aproximadamente R\$ 122,00. Em contrapartida, o piranômetro comercial SR05 da Hukseflux, utilizado como referência durante a calibração e validação do protótipo, possui um custo médio que varia entre R\$ 6.000,00 e R\$ 9.000,00, dependendo da versão e do fornecedor. Este comparativo é apresentado pelo Quadro 6, a seguir.

Quadro 4 - Comparativo de custos entre o protótipo e piranômetro comercial

Item	Protótipo com BPW34	Piranômetro Comercial SR05 (Hukseflux)
<b>Sensor principal</b>	BPW34 – R\$ 9,37	Termopilha interna (não comercializado separadamente)
<b>Circuito de condicionamento</b>	Amplificador – R\$ 8,00	Integrado no equipamento
<b>Microcontrolador</b>	ATmega328P (Arduino) – R\$ 20,00	Integrado, com saída digital/analógica
<b>Sensor de temperatura</b>	DS18B20 – R\$ 12,00	Incluído internamente
<b>Display e interface local</b>	LCD 16x2 – R\$ 18,00	Sem display
<b>Armazenamento de dados</b>	Módulo SD – R\$ 15,00	Comunicação via Modbus (registro externo)
<b>Difusor e proteção</b>	PTFE (Teflon™) – R\$ 25,00	Domo de vidro duplo (incluso)
<b>Estrutura física</b>	PVC – R\$ 10,00	Corpo em alumínio com proteção IP
<b>Custos adicionais (cabos, conectores etc.)</b>	R\$ 15,00	Incluso
<b>Custo Total</b>	<b>R\$ 122,00</b>	<b>~R\$ 6.000,00 a R\$ 9.000,00</b>

Fonte: Autor (2024).

Essa diferença representa uma economia superior a 98% no custo de aquisição, o que demonstra claramente a viabilidade econômica do protótipo para aplicações em que a altíssima precisão dos modelos comerciais não é uma exigência fundamental. Embora o piranômetro SR05 apresente maior robustez, maior faixa espectral de operação e certificações internacionais de calibração (ISO 9060), os resultados obtidos com o protótipo indicaram desempenho satisfatório.

Portanto, o custo reduzido, aliado à facilidade de montagem e à disponibilidade dos componentes no mercado nacional, torna o dispositivo desenvolvido uma alternativa promissora para aplicações como monitoramento preliminar em usinas solares, ensino técnico e universitário, validação de modelos solares em regiões remotas, entre outros.

A seguir, apresentam-se as considerações parciais em relação aos resultados obtidos.

#### **4.4 Considerações parciais**

As temperaturas registradas nos dois dias também apresentaram um padrão característico, acompanhando de forma direta a irradiância solar. No dia 6 de setembro, a temperatura máxima foi registrada às 13h, com 32°C, enquanto no dia 4, a máxima foi ligeiramente inferior, de 30°C às 12h50. Esses valores corroboram estudos como o de Freire (2008), que identificou uma correlação entre irradiância solar e temperatura ambiente, destacando que variações térmicas podem impactar as medições dos sensores.

Embora sensível à temperatura, o sensor utilizado foi capaz de capturar com precisão as oscilações de irradiância ao longo do dia.

Comparando os dois dias de medição, observa-se que o dia 6 apresentou maiores valores de irradiância em média, devido às condições climáticas mais estáveis e menor cobertura de nuvens.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo desenvolver e implementar um piranômetro de baixo custo para medição de irradiância solar, utilizando fotodiodos como sensores.

A análise comparativa entre o protótipo desenvolvido e um piranômetro de referência indicou que o sensor BPW34 apresenta potencial para medir a irradiância solar com razoável precisão. Apesar de algumas limitações inerentes ao uso de fotodiodos, os ajustes realizados no sistema de condicionamento de sinal, aliados à calibração adequada, contribuíram para a obtenção de resultados satisfatórios. Além disso, a estrutura física do dispositivo mostrou-se robusta e resistente às condições ambientais adversas, garantindo a durabilidade necessária para sua utilização em medições de longo prazo.

Os testes de campo revelaram que o piranômetro desenvolvido apresentou um desempenho consistente ao longo do período de medição, capturando com precisão as variações de irradiância ao longo do dia.

Um dos destaques deste estudo foi o comparativo de custos, que evidenciou uma diferença superior a 98% entre o valor de aquisição do protótipo desenvolvido (R\$ 122,00) e o de um piranômetro comercial de referência, cujo custo pode ultrapassar R\$ 9.000,00. Essa discrepância coloca em evidência a relevância do protótipo como uma solução econômica e funcional para aplicações em projetos educacionais, monitoramento preliminar de sistemas fotovoltaicos, e uso em regiões remotas com restrições orçamentárias.

Dessa forma, o estudo contribui significativamente para a disseminação de dispositivos acessíveis para a medição de irradiância solar, possibilitando a ampliação do uso de energia solar em diferentes contextos. Além disso, os resultados obtidos incentivam novas pesquisas voltadas à otimização dos sensores fotovoltaicos e aprimoramento de suas aplicações em sistemas fotovoltaicos.

Sugere-se ainda para futuras pesquisas uma investigação do impacto de diferentes materiais difusores na precisão das medições do piranômetro e como cada um pode contribuir para otimizar a captação da irradiância solar.

## REFERÊNCIAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16690:** Instalações Elétricas de Arranjos Fotovoltaicos – Requisitos de Projetos. Rio de Janeiro: ABNT, 2019. 65 p.

ALVES, A. F. Desenvolvimento de um sistema de posicionamento automático para painéis fotovoltaicos. Botucatu: FCA-UNESP. 2008. 152f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista Júlio Mesquita Filho.

ALMEIDA, Laís Tamara de. **Implantação de um piranômetro termoeletrico na UTFPR para análise do potencial de energia Solar nesta localidade.** 2015. 94f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso de Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

ALMERÃO, Eduardo da Silva et al. **Estudo das metodologias de medição e análise da dispersão espacial da radiação solar em áreas de usinas fotovoltaicas.** 2021. Núcleo Tecnológico de Energia Elétrica – NTEEL Solar. UFSC. Porto Alegre, RS. 9 p. 2021. Disponível em: [https://nteelsolar.paginas.ufsc.br/files/2022/10/02\\_Renomat2021.pdf](https://nteelsolar.paginas.ufsc.br/files/2022/10/02_Renomat2021.pdf). Acesso em: 13 jan. 2024.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (Brasil). **Resolução Normativa n. 482, de 17 de abril de 2012. Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de**

**distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências.** Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 19 abr. 2012. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>. Acesso em: 14 jan. 2024.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (Brasil). **Resolução Normativa n. 1.059, de 23 de 7 de fevereiro de 2023. Aprimora as regras para a conexão e o faturamento de centrais de microgeração e minigeração distribuída em sistemas de distribuição de energia elétrica, bem como as regras do Sistema de Compensação de Energia Elétrica; altera as Resoluções Normativas n. 920, de 23 de fevereiro de 2021, 956, de 7 de dezembro de 2021, 1.000, de 7 de dezembro de 2021, 1009, de 22 de março de 2022, e dá outras providências.** Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 10 fev. 2023. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20231059.pdf>. Acesso em: 14 jan. 2024.

BALFOUR, John. **Introdução ao projeto de sistemas fotovoltaicos.** John Balfour, Michael Shaw, Nicole Bremer Nash. Tradução Luiz Claudio de Queiroz Faria; Revisão técnica Marco Aurélio dos Santos. 1. ed. [Reimpr.]. – Rio de Janeiro: LTC, 2019.

BEZERRA, Francisco Diniz. **Energia solar.** Fortaleza: Banco do Nordeste do Brasil, ano 6, n.174, jul. 2021.

BPW21. Disponível em: <https://www.vishay.com/docs/81519/bpw21r.pdf>.

BPW34. Disponível em: <https://www.vishay.com/docs/81521/bpw34.pdf>.

CEMIG - COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS. **Atlas Solarimétrico de Minas Gerais**. Belo Horizonte: Cemig, p. 80, 2012. Disponível em: <https://www.cemig.com.br/wp-content/uploads/2021/03/atlas-solarimetrico-vol-i-mg.pdf>. Acesso em: 11 jan. 2024.

FREIRE, Luiz Abelardo Dantas. **Desenvolvimento de um piranômetro fotovoltaico**. 2008. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/9779>. Acesso em: 14 jan. 2024.

GERHARDT, T. E.; SILVEIRA, D. T. **Métodos de Pesquisa**. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2009.

GIL, Antônio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2018.

GÓMEZ, J. M. et al. **A irradiância solar: conceitos básicos**. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 40, 2018.

HIDALGO, Fernando Guerra; MARTINEZ, Robinson Faez; VIDAL, Edward Fuentealba. **Design of a low-cost sensor for solar irradiance**. Disponível em:

<http://oceanoptics.com/wpcontent/uploads/Fernando-Guerra-Hidalgo-Sensors-Design.pdf>, 2013. Acesso em: 25 fev. 2025.

HUSKENFLUX BRASIL. **Piranômetro Digital e Analógico com Modbus RS-485**

**SR05-D1A3. 2025.** Huskenflux Brasil. São Paulo, Brasil. Disponível em:

<https://huksefluxbrasil.com.br/produtos/piranometro-digital-modbus-sr05-d1a3>.

Acesso em: 1 mar. 2025.

IPEA – INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. **Energia acessível e**

**limpa.** Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). Brasil, 2019. Disponível

em: <https://www.ipea.gov.br/ods/ods7.html>. Acesso em: 2 fev. 2024.

ISO - INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION 9060. **Solar energy – Specification and classification of instruments for measuring hemispherical solar and direct solar irradiance.** Genebra, 1990.

ISO 9847-1992. **Calibration of field pyranometers by comparison to a reference pyranometer.** 1992.

KING, David L.; KRATOCHVIL, Jay A.; BOYSON, William E. **Measuring solar spectral and angle-of-incidence effects on photovoltaic modules and solar irradiance sensors.** *In:* Conference record of the twenty sixth IEEE photovoltaic specialists conference-1997. IEEE, 1997. p. 113-1116.

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. A. **Fundamentos de Metodologia Científica**. São Paulo: Atlas, 2011.

LUZ, Caio Meira Amaral da. et al. **Análise Comparativa de Medidores de Irradiância**. *In*: Congresso Brasileiro de Automática-CBA. 2019. Disponível em: [https://www.sba.org.br/open\\_journal\\_systems/index.php/cba/article/view/238](https://www.sba.org.br/open_journal_systems/index.php/cba/article/view/238). Acesso em: 30 out. 2023.

MARTÍNEZ, Miguel A.; ANDÚJAR, José M.; ENRIQUE, Juan M. **A new and inexpensive pyranometer for the visible spectral range**. *Sensors*, v. 9, n. 6, p. 4615-4634, 2009.

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

MEGANTORO, Prisma et al. **Analysis of instrumentation system for photovoltaic pyranometer used to measure solar irradiation level**. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, v. 11, n. 6, p. 3239-3248, 2022.

PAULA, João Frederico Souza de *et al.* **Confecção e análise de um piranômetro fotovoltaico de baixo custo**. *In*: Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.59627/cbens.2020.763>. Acesso em: 31 jan. 2024.

PINHO, J. T., GALDINO, M. A. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro, 2014.

PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. **Metodologia do Trabalho Científico: Métodos e Técnicas da Pesquisa e do Trabalho Acadêmico**. Novo Hamburgo: FEEVALE, 2013.

ROSA, A. R. O.; GASPARIN, F. P. **Panorama da energia solar fotovoltaica no Brasil**. Revista Brasileira de Energia Solar, [S. l.], v. 7, n. 2, p. 140–147, 2017. DOI: 10.59627/rbens.2016v7i2.157. Disponível em: <https://rbens.emnuvens.com.br/rbens/article/view/157>. Acesso em: 30 out. 2023.

SANTOS, Lauren Merlini et al. Desenvolvimento e caracterização de um piranômetro térmico—Análise preliminar das medidas de irradiação. **In:** Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS. 2020.

SANTOS, NARA TOSTA. **Avaliação de piranômetros em condições de campo e estimativa do balanço de radiação em área de gramínea com grau de cobertura variável**. 2015. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Recôncavo da Bahia.

SOUZA, Muriele Bester de *et al.* **Modelos para estimativa da radiação difusa a partir da radiação global horizontal para a cidade de Curitiba/PR**. In: Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS. 2020.

SFH202. Disponível em: <http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/45610/SIEMENS/SFH202.html>.

TIL32. Disponível em: <http://www.datasheetspdf.com/pdf/615591/ETC/TIL32/1>.

VICTORIA, I. M. B. **Medição da radiação solar global e difusa utilizando piranômetro com sensores fotoelétricos**. 2008. 85f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Pelotas, 2008.

VIGNOLA, Frank et al. **Evaluation of photodiode-based pyranometers and reference solar cells on a two-axis tracking system**. In: 2018 IEEE 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC)(A Joint Conference of 45th IEEE PVSC, 28th PVSEC & 34th EU PVSEC). IEEE, 2018. p. 2376-2381.

WWF- BRASIL. **Desafios e Oportunidades para a energia solar fotovoltaica no Brasil: recomendações para políticas públicas**. Brasília, DF, 1ª edição. WWF-Brasil – Fundo Mundial para a Natureza. 2015. 44 p.

YAMASOE, Márcia Akemi. **Apostila da Disciplina Meteorologia Física II – ACA 0326**. Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo. 2011. 110 p.