



Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP - Escola de
Minas - Colegiado do curso de Engenharia de Controle
e Automação - CECAU



Arthur Almeida Candido Gondim

Construção de um solarímetro para utilização em sistemas de monitoramento de limpeza de placas fotovoltaicas

Monografia de Graduação em Engenharia de Controle e Automação

Ouro Preto, 2020

Arthur Almeida Candido Gondim

Construção de um solarímetro para utilização em sistemas de monitoramento de limpeza de placas fotovoltaicas

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro de Controle e Automação.

Orientador: prof. Alan Kardek Rêgo Segundo, D.Sc.

Ouro Preto, 2020

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

G637c Gondim, Arthur Almeida Candido .
Construção de um solarímetro para utilização em sistemas de
monitoramento de limpeza de placas fotovoltaicas. [manuscrito] / Arthur
Almeida Candido Gondim. - 2020.
52 f.: il.: color., gráf., tab..

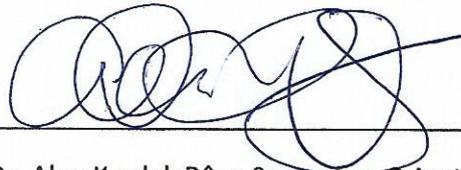
Orientador: Prof. Dr. Alan Kardek Rêgo Segundo.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.
Escola de Minas. Graduação em Engenharia de Controle e Automação .

1. Piranômetro. 2. Placa Fotovoltaica. 3. Monitoramento de
Limpeza. I. Segundo, Alan Kardek Rêgo. II. Universidade Federal de Ouro
Preto. III. Título.

CDU 681.5

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB:1716

Monografia intitulada CONSTRUÇÃO DE UM SOLARÍMETRO PARA UTILIZAÇÃO EM SISTEMAS DE MONITORAMENTO DE LIMPEZA DE PLACAS FOTOVOLTAICAS, defendida e aprovada em 17 de janeiro de 2020 pela comissão avaliadora constituída pelos professores:



Prof. Dr. Alan Kardek Rêgo Segundo – Orientador



Prof. Dr. Paulo Marcos de Barros Monteiro – Professor Convidado



Profa. M.Sc. Adrielle de Carvalho Santana – Professora Convidada

Agradecimentos

Primeiramente agradeço a Deus, pois sem ele não somos nada.

Agradeço a toda a minha família, mas principalmente aos meus Pais Geraldo e Andréa e meus irmãos Thiago e Pedro pelo apoio incondicional em todas as escolhas e momentos da minha vida.

Agradeço a Anna Carolina, pela companhia, amor e ajuda durante toda a minha caminhada neste curso.

Agradeço aos colegas e amigos da Kasa Cheia, a qual , para mim, deixou de ser uma simples republica para se tornar uma família.

Ao Prof. Alan Kardek pela orientação e ajuda nesta monografia.

A UFOP pela oportunidade de estudar e cursar Engenharia.

“O desejo profundo da humanidade pelo conhecimento é justificativa suficiente para nossa busca contínua.” (Stephen Hawking)

Resumo

Neste trabalho foi construído um solarímetro utilizando uma placa fotovoltaica como elemento sensor de radiação, cuja principal função é fornecer um valor de referência para que seja possível determinar se placas externas ao sistema estão sujas ou não (com base na diminuição de eficiência ao longo do tempo). A medição da radiação é feita pela placa que, de acordo com a irradiância que incide sobre ela, gera uma corrente elétrica proporcional, enviando este valor para um microcontrolador. Foi desenvolvido também um método de alimentação do sistema independente da rede elétrica, para que seja possível instalar o sensor no ambiente externo, utilizando uma bateria e uma segunda placa fotovoltaica, que possui a função de manter a bateria sempre carregada. Para a aquisição de dados, foi desenvolvido um sistema supervisorio utilizando o Visual Studio, cuja função é mostrar os dados recebidos pelo microcontrolador e salvá-los em um arquivo externo. A transmissão de dados entre o microcontrolador e o sistema supervisorio foi realizada via radiofrequência, por meio de módulos XBee. O solarímetro foi calibrado utilizando um piranômetro comercial como referência. O modelo de calibração ajustado aos dados apresentou coeficiente de determinação igual a 96,33%. Durante os testes de validação o sistema apresentou RMSE igual a $101,432 \text{ W/m}^2$, o qual é um valor considerado alto, segundo a Norma ISO9060 um sensor de classe 2 (a mais baixa) pode ter erro máximo de 30 W/m^2 . Portanto, conclui-se que o sistema proposto pode ser utilizado para a aplicação em questão.

Palavras-chaves: Piranômetro, Placa Fotovoltaica, Energia Solar .

Abstract

In this work, a solarimeter was built using a photovoltaic plate as a radiation sensor element. The main function of the system is to provide a reference value to know whether external plates are dirty or not (based on the decrease of efficiency over time). The radiation measurement is made by the plate, which generates a proportional electric current according to the irradiance that affects it, sending this value to a microcontroller. A system sourcing method independent of the electrical network was also developed, so that is possible to install the sensor in the external environment. It was used a battery and a second photovoltaic plate, which only has the function of keeping the battery always charged. For the data acquisition, a supervisory system was developed using Visual Studio, which has only the function of showing the data received by the microcontroller and save them in an external file. Data transmission between the microcontroller and the supervisory system was carried out via radio frequency, through XBee modules. The solarimeter was calibrated using a commercial pyranometer as a reference. The calibration model adjusted to the data showed a determination coefficient equal to 96.33 %. During the validation tests, the system presented RMSE equal to 101.432 W/m², which is considered high value, according to ISO9060, a class 2 sensor (the lowest) can have a maximum error of 30 W/m². Thus, it is concluded that the proposed system can be used for the proposed application.

Key-words: Pyranometer, Photovoltaic Plate, Solar Energy.

Lista de ilustrações

Figura 1	Condução Elétrica em uma junção N-P. Fonte: (NASCIMENTO, 2004)	18
Figura 2	Modelo de uma placa fotovoltaica. Fonte: (VILLAVA; GAZOLI, 2012)	19
Figura 3	Célula de silício monocristalino e de silício policristalino. Fonte: (Energia Solar, 2016)	20
Figura 4	Sequencia de movimentos de um solar tracker no dia. Fonte: (TESSARO; SOUZA et al., 2006)	20
Figura 5	Sujeira detectada na placa por uma câmera de infravermelho. Fonte: (MUNTWYLER; SCHUEPBACH; LANZ, 2015)	21
Figura 6	Esquema elétrico de um Piranômetro genérico. Fonte: (FREIRE, 2008)	22
Figura 7	Piranômetro de Kimball-Hoobs. Fonte: (NAZIAZENO, 2009)	22
Figura 8	Piranômetro utilizando fotodiodo. Fonte: (BOLZAN, 2014)	23
Figura 9	Piranômetro utilizando placa fotovoltaica. Fonte: (PINTO, 2005)	23
Figura 10	Apogee Instruments SP-110. Fonte: (APOGEE, 2019)	24
Figura 11	XBee PRO S2C. Fonte: (Digi, 2019)	25
Figura 12	Frame de uma API do módulo para o computador ou vice-versa . Fonte: (Digi, 2019)	25
Figura 13	Diagrama esquemático das partes do sensor proposto.	28
Figura 14	Montagem na protoboard da placa de condicionamento de sinal.	30
Figura 15	Desenvolvimento do Piranômetro	31
Figura 16	Esquema de ligação de um amplificador operacional não inversor.	32
Figura 17	Jardim onde foi instalado o sistema.	33
Figura 18	Montagem de medição do piranômetro.	35
Figura 19	Trave onde foi instalado todo o sistema. (i) a placa fotovoltaica de 20 V; (ii) os dois sensores instalados; (iii) trave metálica; (iv) as duas caixas herméticas.	36
Figura 20	Placa de alimentação	37
Figura 21	Circuito da placa de amplificação desenvolvido no Proteus	38
Figura 22	Sistema no piranômetro contido na caixa hermética. De cima para baixo e da esquerda para a direita: Módulo Xbee, Placa de Alimentação, Placa de Condicionamento de Sinal e Placa de Amplificação do SP-110.	38
Figura 23	Tela do sistema supervisorio.	39
Figura 24	Arquivo .txt com os dados salvos.	40

Figura 25	Gráfico da resposta dos 2 sensores. Em azul, os dados da placa fotovoltaica e em laranja os dados do SP-110	40
Figura 26	Gráfico da calibração de irradiância do SP-110 versus tensão da placa fotovoltaica	41
Figura 27	Gráfico da resposta dos 2 sensores durante dois dias. Em azul, os dados da placa fotovoltaica e em laranja os dados do SP-110	42
Figura 28	Gráfico do erro do sensor	43
Figura 29	Gráfico do comportamento do sensor durante o dia	44

Lista de tabelas

Tabela 1	Média ponderada global dos custos de investimento em energia solar e eólica, fatores de capacidade e LCOEs, 2015 e 2025	14
Tabela 2	Tabela de Especificações do SP-110	24

Lista de abreviaturas e siglas

N-P	Negativa-Positiva
WDT	Watch Dog Timer
MCLR	Master Clear
LED	Light-Emitting Diode
CNC	Comando Numérico Computadorizado
AMP-OP	Amplificador Operacional
ADC	Analog/Digital Converter
LAP	Laboratório de Automação Predial
UFOP	Universidade Federal de Ouro Preto
LABCAM	Laboratório de Controle e Automação Multiusuário

Lista de símbolos

$\%$	Porcentagem
USD/kW	Dolar por Quilowatt
$^{\circ}$	Graus
mV	Milivolts
W	Watt
m	Metros
ms	Milisegundos
MHz	Mega Hertz
GHz	Giga Hertz
$kbps$	Quilo bytes por segundo
mA	Miliamperes
V	Volts
m^2	Metros quadrados
V_{out}	Tensão de saída
V_{in}	Tensão de entrada
Ω	Ohm

Sumário

1	Introdução	14
1.0.1	Motivação	14
1.1	Objetivos	16
1.1.1	Objetivo Geral	16
1.1.2	Objetivos Específicos	16
2	Revisão Bibliográfica	18
2.1	Placas Fotovoltaicas	18
2.2	Previsão da Limpeza de Placas Solares	20
2.3	Piranômetros	21
2.3.1	SP-110	24
2.4	Modulo XBee	24
2.5	Microcontrolador	26
3	Metodologia	28
3.1	Desenvolvimento do Piranômetro	28
3.2	Desenvolvimento do sistema de alimentação	33
3.3	Supervisório em C#	34
3.4	Calibração	34
4	Resultados	36
4.1	Instalação do Sistema	36
4.2	Desenvolvimento do Piranômetro	37
4.3	Supervisório em C#	39
4.4	Calibração	40
4.5	Validação	42
5	Considerações Finais	45
	Referências	47
	Apêndices	50
	Anexos	51

1 Introdução

1.0.1 Motivação

A energia elétrica se tornou um elemento indispensável nos dias atuais. Sua produção, no entanto, pode ser agressiva ao meio ambiente, e o grau de sua agressividade depende do método de geração. Desta forma, garantir meios de produção de energia de forma sustentável e econômica é um grande desafio. Assim, métodos de geração de energia considerados menos poluentes ao meio ambiente, como a solar e a eólica, vêm sendo utilizados de forma crescente.

O Brasil tem um grande potencial de geração de energia sustentável, e por estar localizado em uma região intertropical, também apresenta um grande potencial de geração de energia solar (PEREIRA et al., 2006). De acordo com IRENA (2018), no Brasil, houve um aumento de 749,68% na capacidade de geração instalada entre 2013 e 2016. Em contrapartida, o consumo de energia elétrica em 2030 terá um aumento de 50% em relação ao ano de 2013 (ONUDI, 2013).

Como apresentado na Tabela 1, a previsão de custo de produção em energia solar de 2025 é de 790 *USD/kW*, enquanto que a energia eólica costeira é de 1370 *USD/kW*, e a não-costeira é de 3950 *USD/kW*. Logo, a energia solar deve ser o método de geração do futuro mais barato e não-nocivo (TAYLOR; RALON; ILAS, 2016).

Tabela 1 – Média ponderada global dos custos de investimento em energia solar e eólica, fatores de capacidade e LCOEs, 2015 e 2025

	Global weighted average data								
	Investment costs (2015 USD/kW)		Percent change	Capacity factor		Percent change ²	LCOE (2015 USD/kWh)		Percent change
	2015	2025		2015	2025		2015	2025	
Solar PV	1 810	790	-57%	18%	19%	8%	0.13	0.06	-59%
CSP (PTC: parabolic trough collector)	5 550	3 700	-33%	41%	45%	8.4%	0.15 -0.19	0.09 -0.12	-37%
CSP (ST: solar tower)	5 700	3 600	-37%	46%	49%	7.6%	0.15 -0.19	0.08 -0.11	-43%
Onshore wind	1 560	1 370	-12%	27%	30%	11%	0.07	0.05	-26%
Offshore wind	4 650	3 950	-15%	43%	45%	4%	0.18	0.12	-35%

Fonte: (IRENA, 2018)

O elemento primário para a geração de energia fotovoltaica é chamado de célula fotovoltaica ou painel fotovoltaico. A célula é composta basicamente de uma junção de

uma camada tipo "n" e uma camada tipo "p", que assim como nos fotodiodos, quando são expostas à radiação solar, geram energia elétrica. No entanto, segundo [Duarte et al. \(2015\)](#), como as células dependem diretamente da incidência solar, é de extrema importância fazer sua limpeza periodicamente, para que seja captado o máximo de fótons possível pelas células.

Assim, para estes sistemas, é importante medir a incidência solar diária para que se faça um levantamento de produção de energia buscando manutenções preventivas dos painéis solares e, conseqüentemente, uma maior eficiência energética com o passar do tempo. Segundo [Duarte et al. \(2015\)](#), células fotovoltaicas têm, em média, eficiência de 14% da irradiação disponível, e dentro desses, verificou-se que painéis solares limpos apresentam eficiência 6,5% maior em relação aos painéis sujos.

A sujeira, principal fator da diminuição da eficiência, é um fator acumulativo nos painéis fotovoltaicos. A acumulação ocorre devido ao fato da superfície da placa não ser totalmente lisa, além de brisas lentas, fluxo do ar devido ao vento e a frequência de chuvas ([JÚNIOR; CRUZ; AMARAL, 2018](#)). Logo, é de extrema importância saber com qual periodicidade deve haver manutenções nos painéis solares, pois não é viável fazê-las diariamente. Uma maneira para se prever a manutenção é comparar a produção de energia dos painéis e estabelecer um limite de produção de energia aceitável. Caso os valores de produção estejam abaixo desse limite, a manutenção é feita. Porém, devido à incidência solar não ser um fator constante, torna-se necessário medir a incidência solar.

A incidência ou irradiância solar que pode ser medida na Terra não é uma única componente. Segundo [Pereira et al. \(2017\)](#), "A irradiância solar que incide em uma superfície é composta por suas componentes direta e difusa". A irradiância direta seria a parcela dos raios solares que não sofreram nenhum tipo de desvios (absorção ou espalhamento) ao entrar na atmosfera da Terra pelos gases, enquanto que a irradiância difusa seria a parcela que sofreu o espalhamento, ou difusão, em todas as demais direções ([PEREIRA et al., 2017](#)).

A medição da irradiância pode ser direcionada para os seus diferentes componentes. Existem sensores que medem potência (devido à irradiância) por unidade de área de radiação solar direta que incide perpendicularmente ao plano de medição, que são chamados de pireliômetros; e outros que medem a potência por unidade de área da radiação solar global (soma da irradiância, ou radiação, solar difusa com a direta), que são chamados de piranômetros ([NAZIAZENO, 2009](#)).

Os piranômetros são sensores que têm como característica ter uma superfície que seja sensível à luz e que altere, de acordo com a incidência de radiação solar, suas características de maneira linear (resistência, temperatura, tensão elétrica, dentre outras) ([BOLZAN, 2014](#)). Os primeiros piranômetros tiveram origem em meados da década de 1920.

De acordo com [Borchardt e Gomes \(1979\)](#), "[...] um circuito constituído por dois materiais diferentes X e Y é percorrido por uma corrente elétrica "i", desde que os contatos ou as junções p e q entre os dois materiais estejam a temperaturas diferentes". Assim, o piranômetro pioneiro, desenvolvido por Kimball e Hobbs, continham duas superfícies, uma que era pintada de preto ou ligada à uma superfície negra (chamada de junta quente), absorvendo 100% da radiação incidente, e outra que era ligada à uma superfície branca (chamada de junta fria), refletindo toda a radiação incidente, e uma cuia de vidro protegendo as superfícies do clima ([MONTEITH, 1959](#)). Desta forma, de acordo com o efeito Seeback, as duas superfícies ficavam com temperaturas diferentes, produzindo uma corrente elétrica que era proporcional à diferença de temperatura e, assim, proporcional à incidência solar.

Atualmente, os modelos de piranômetros são mais diversos, utilizando a mesma ideia base de Kimball e Hobbs, mas também outras tecnologias, como fotodiodos, que são dispositivos semicondutores que, quando expostos à luz, geram uma corrente elétrica. Assim, baseado nesse fenômeno, é possível criar um sensor que meça a irradiância de maneira indireta, aproveitando o fato de que a geração de corrente elétrica do fotodiodo ser proporcional à irradiância que incide sobre ele.

Portanto, neste contexto, foi desenvolvida esta monografia, que é organizada da seguinte forma: no Capítulo 1 é abordado a introdução do projeto; no Capítulo 2 é apresentado revisão bibliográfica, que busca mostrar o que já foi produzido e o que está sendo investigado em relação ao tema desta pesquisa; no Capítulo 3 é descrita a metodologia escolhida para a pesquisa apresentada; No capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos pelo sensor criado e seu nível de desempenho em relação a um segundo sensor já consolidado no mercado. Por fim, no Capítulo 5 são descritas as considerações finais em relação ao protótipo e à pesquisa realizada.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Neste trabalho tem-se por objetivo projetar e construir um piranômetro do tipo solarímetro utilizando uma placa fotovoltaica como elemento sensor, a fim de criar um sistema de monitoramento para prevenir problemas de redução de eficiência de placas solares por falta de limpeza.

1.1.2 Objetivos Específicos

1. Desenvolver a placa do sensor.

2. Construir a estrutura física do sensor.
3. Implementar a aquisição de dados e sistema supervisorio.
4. Desenvolver o sistema de alimentação independente.
5. Fazer os devidos testes da estrutura física com a placa.
6. Instalar o sensor no campo.
7. Calibrar o sensor.
8. Realizar os testes de campo.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Placas Fotovoltaicas

As placas fotovoltaicas são baseadas no efeito de condução de corrente elétrica em sólidos semicondutores, isto é, quando um semicondutor com potencial positivo¹ entra em contato com um semicondutor com potencial negativo², cria-se um campo elétrico entre as duas camadas, sob o qual analisa-se a condução de corrente elétrica. Este fenômeno acontece pois, quando um elétron ocupa uma lacuna vazia, ele cria uma nova lacuna em outra posição do sólido, causando um movimento de elétrons e lacunas (MARQUES, 1996).

A partir da ocorrência de uma junção Negativa-Positiva (N-P), quando ela sofre exposição de luz solar na parte negativa da junção, os fótons se chocam com os elétrons sobrando da estrutura, transformando-a em uma superfície condutora, como ilustra a Figura 1. Assim, é criado um movimento de elétrons indo da camada negativa para a camada positiva, gerando energia elétrica. Porém, a placa não consegue armazenar essa energia gerada, sendo necessária a coleta da mesma (NASCIMENTO, 2004).

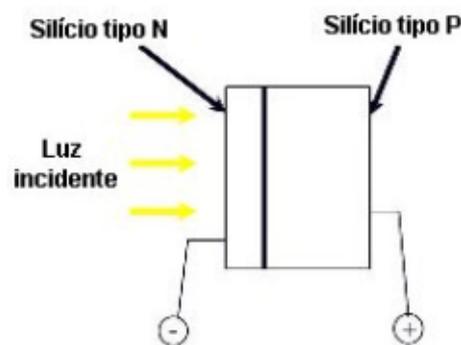


Figura 1 – Condução Elétrica em uma junção N-P. Fonte: (NASCIMENTO, 2004)

As placas, ou módulos fotovoltaicos, são basicamente constituídas de uma manta de duas camadas condutoras, uma camada positiva e uma camada negativa, um conjunto de barras localizado no topo das duas camadas, e um base metálica localizada no final das duas camadas, como mostra a Figura 2. Assim, o conjunto de barras e a base metálica se transformam em terminais elétricos da placa, que coletam a energia elétrica que a camada

¹ Também conhecido por camada P, é um semicondutor que possui sobra de lacunas, ou espaços vazios, na sua estrutura molecular

² Chamado de camada N, é um semicondutor que apresenta sobra de elétrons na estrutura molecular

negativa e positiva cria ao ser incidida por luz solar. Por ser necessário que a camada negativa entre em contato com a luz, a parte superior da placa deve ser transparente, adotando-se uma construção de uma fina grade de barras metálicas. Já a base pode ser sólida, normalmente constituída de alumínio ou prata. (VILLAVA; GAZOLI, 2012).

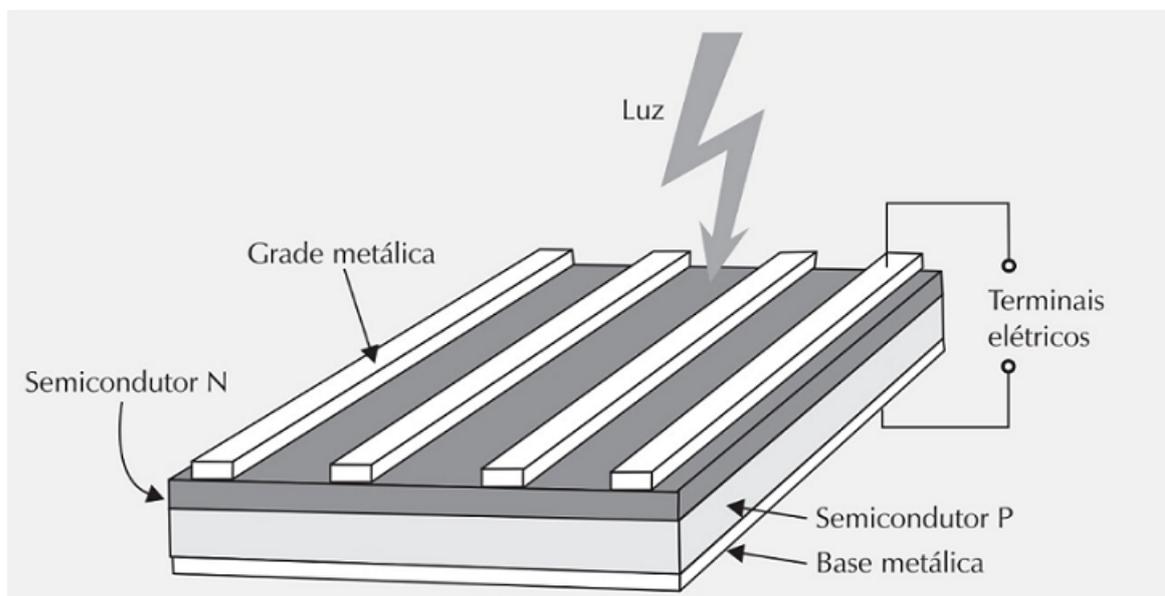


Figura 2 – Modelo de uma placa fotovoltaica. Fonte: (VILLAVA; GAZOLI, 2012)

As placas fotovoltaicas podem ser fabricadas com diferentes tipos de materiais que tem diferentes tipos de arranjos das suas moléculas. Estes arranjos de moléculas são chamados de composições da estrutura. Existem vários tipos de composições de estruturas de uma placa solar: células de silício monocristalino, de silício policristalino, dentre outros.

As células de silício monocristalino são os mais usados no mundo, e as mais eficientes também, chegando a 24,4% de eficiência³ em testes laboratoriais (ZHAO et al., 1998). Essas células são constituídas a partir de um lingote de silício monocristalino cortado em finas camadas. Como são pouco resistentes, é necessário a proteção em módulos. Já as células de silício policristalino são menos eficientes do que as monocristalino, de acordo com Villava e Gazoli (2012) cerca de 13 a 15 %, porém sua produção é muito mais barata, devido ao fato de a produção do lingote ser mais fácil, pois o produto final é um lingote com cristais desalinhados e não orientados, como mostra a Figura 3. Esse tipo de placa também necessita de produção por módulos.

³ Segundo (Portal Solar, 2019), eficiência é a porcentagem da energia solar incidida na placa que se transforma em energia elétrica por m^2

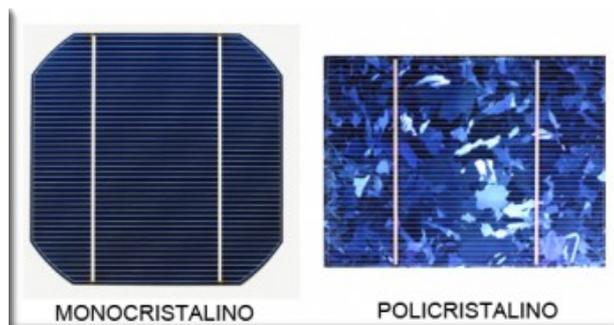


Figura 3 – Célula de silício monocristalino e de silício policristalino. Fonte: (Energia Solar, 2016)

Buscando cada vez mais aumentar a eficiência das células fotovoltaicas, um novo tipo de célula que vem sendo desenvolvida e testada são as chamadas Células Orgânicas. Elas são feitas de polímeros e plásticos, que são materiais orgânicos leves e flexíveis, capazes de, devido a eletrônica orgânica, ter o mesmo efeito que ocorre nas junções N-P (Solarvolt, 2015).

Devido à eficiência das células fotovoltaicas serem consideradas muito baixas, em comparação aos outros meios de geração de energia elétrica, uma saída criada para aumentá-la são os chamados *Solar Trackers*(ST), ou seguidores solares. Os ST são sistemas que buscam posicionar a célula sempre a 90° da posição do sol, conseguindo assim a máxima produção da placa durante todo o período do dia, ilustrado na Figura 4. Com a utilização deste sistema consegue-se chegar a um ganho de até 2,052% de eficiência (TESSARO; SOUZA et al., 2006).



Figura 4 – Sequencia de movimentos de um solar tracker no dia. Fonte: (TESSARO; SOUZA et al., 2006)

2.2 Previsão da Limpeza de Placas Solares

Com a tendência do crescimento da utilização de módulos fotovoltaicos para gerar energia em grande escala, o controle de qualidade e de rendimento dos geradores desta energia se tornam cada vez mais exigentes. Um dos maiores problemas de diminuição de rendimento dos módulos são a sujeira acumulada neles. Por isso, se torna cada vez mais fundamental criar métodos de vistoria das placas que sejam eficientes e precisos (MUNTWYLER; SCHUEPBACH; LANZ, 2015).

Um dos métodos de vistoria mais simples e intuitivos é o operador responsável por fazer a limpeza fazer uma vistoria do estado do módulo. Porém, como muitas das placas são instaladas em locais de difícil acesso, o método de detecção do momento de se fazer a limpeza torna-se cada vez mais ineficiente, pois o operador só consegue detectar sujeiras se ele conseguir ir até o local onde as placas estão instaladas.

Buscando solucionar o problema acima, com o advento dos drones, foi vista uma oportunidade de utilização deste equipamento para substituir o funcionário, de forma que ele vai até o local e transmite as imagens para o operador que, baseado no que vê, conclui se é necessário a limpeza ou não. Outro meio de utilização de drones é equipando-os com câmeras infravermelho, de forma que quando o drone filma a placa, a sujeira se torna visível à luz do infravermelho, como ilustra a Figura 5.

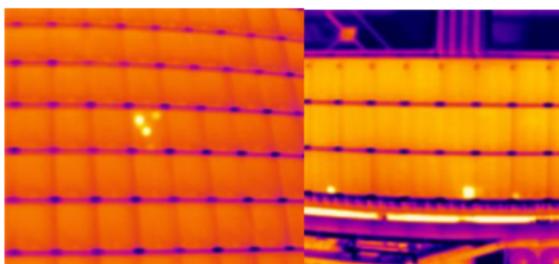


Figura 5 – Sujeira detectada na placa por uma câmera de infravermelho. Fonte: (MUNTWYLER; SCHUEPBACH; LANZ, 2015)

Por fim, uma técnica mais nova e avançada trabalha com a análise do estado da resposta da placa comparando com um histórico obtido anterior à sujeira. Segundo Deceglie, Micheli e Muller (2018), pode ser utilizado um célula ou módulo solar, que é higienizado com uma certa frequência, e a ideia de sua utilização é que a resposta dos módulos instalados sejam comparados com a resposta que eles deveriam dar sobre as condições climáticas indicadas pelo sensor higienizado. Assim, caso as respostas estejam de acordo com o histórico para o clima atual, a placa é considerada limpa, caso contrário, aplicando uma margem de segurança pré-estabelecida, ela é considerada suja. Esse método extingue a necessidade de visão da placa no campo, porém cria a necessidade de se ter um histórico de respostas da placa quando ela estava limpa e as informações do ambiente no dado momento (intensidade solar, condições climáticas, dentre outras).

2.3 Piranômetros

Os piranômetros são caracterizados como dispositivos que têm a capacidade de medir a intensidade solar a qual são submetidos. Tais dispositivos conseguem medir tanto a intensidade que incide diretamente sobre ele quanto a refletida, medindo assim a totalidade da mesma, ou intensidade global. Como mostrado na Figura 6, o sistema é composto de

um elemento sensor que recebe a luz solar e faz a conversão para sinal de tensão, que é transmitido para o sistema de análise.

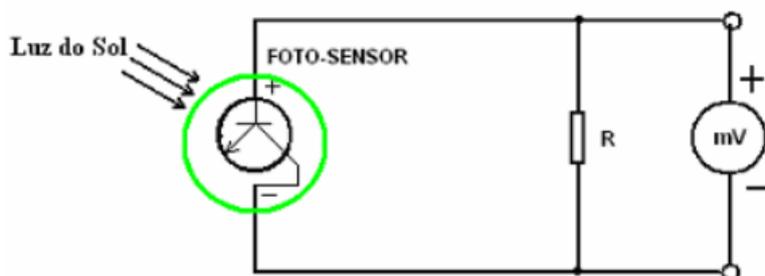


Figura 6 – Esquema elétrico de um Piranômetro genérico. Fonte: (FREIRE, 2008)

A origem dos piranômetros ocorre em meados dos anos 1920, sendo um dos mais importantes e propulsores o modelo de Kimball-Hobbs. Seu funcionamento se dá pela diferença de temperatura de 2 anéis concêntricos de prata com capacidades de reflexão de luz distintas⁴, que é medida por um termopar (NAZIAZENO, 2009). Um modelo físico deste tipo de piranômetros é demonstrado na Figura 7.



Figura 7 – Piranômetro de Kimball-Hoobs. Fonte: (NAZIAZENO, 2009)

Com a intensificação dos estudos, foram desenvolvidos piranômetros que utilizam o fenômeno de condução de eletricidade de sólidos semicondutores como elemento sensor do sistema. Fotodiodos e placas solares são exemplos de componentes que possuem este fenômeno. Por este motivo, são amplamente utilizados como elementos sensores dos piranômetros mais modernos, podendo ser equipados com difusores solares⁵ ou não.

⁴ isso ocorre pela pintura diferente de cada um, sendo um coberto de branco e outro coberto por uma superfície negra

⁵ são películas protetoras que ficam na superfície do sensor de forma que retire a dependência do ângulo de incidência da luz da geração de energia

A principal diferença entre a utilização dos dois elementos sensores descritos acima é que, devido ao fato do fotodiodo ter o formato semiesférico, ele funciona como uma lente para os raios solares. Com isso, a localização da convergência da luz solar varia com o passar do dia (de acordo com a variação do ângulo de incidência da luz solar) necessitando, portanto, de uma superfície que remova este problema, chamada de difusor (BOLZAN, 2014). Esta superfície plana basicamente cria uma fonte de raios solares constante independente do ângulo de incidência da luz solar, como mostra a Figura 8.

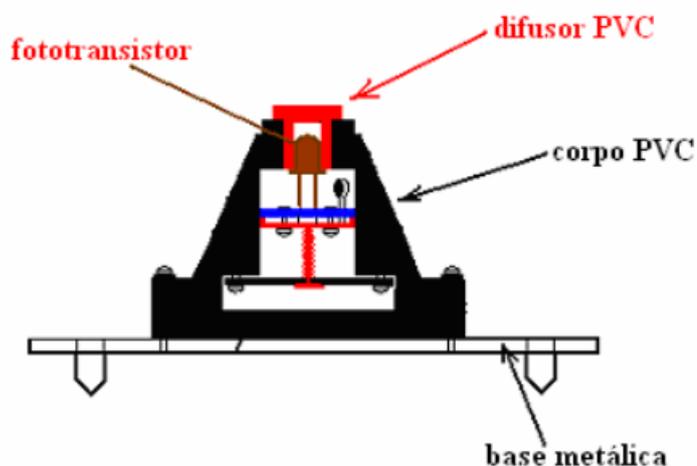


Figura 8 – Piranômetro utilizando fotodiodo. Fonte: (BOLZAN, 2014)

Já os piranômetros que usam placas fotovoltaicas como elemento sensor não têm necessidade de difusor por ser uma superfície plana, o que elimina o problema do ângulo de incidência. Por esse motivo, sua implementação é mais fácil e sua construção é mais simples. Na Figura 9 mostra-se um exemplo de um piranômetro que utiliza placa fotovoltaica como elemento sensor.

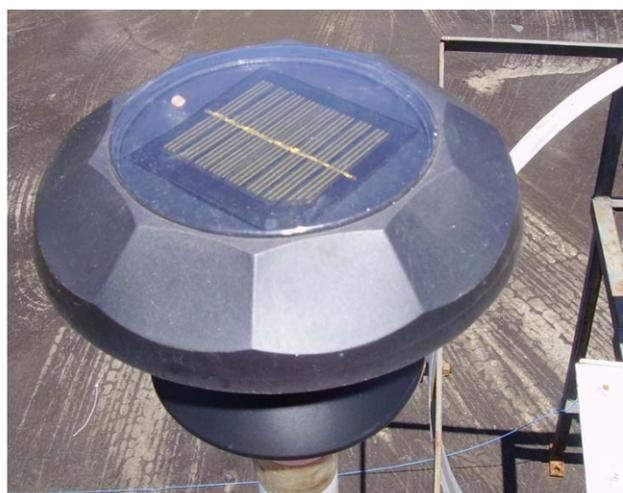


Figura 9 – Piranômetro utilizando placa fotovoltaica. Fonte: (PINTO, 2005)

2.3.1 SP-110

Para validação dos resultados do piranômetro construído nessa monografia, será utilizado como referência o piranômetro da Apogee Instruments, série SP, modelo 110, ilustrado na Figura 10. Este sensor utiliza um fotodiodo como elemento sensor e possui um difusor de acrílico, produzindo uma tensão analógica proporcional à radiação solar total, sendo assim, ideal para medição de irradiância solar geral.



Figura 10 – Apogee Instruments SP-110. Fonte: (APOGEE, 2019)

Segundo a fabricante, o piranômetro SP-110 não necessita de alimentação, pois ele contém um sistema de auto alimentação (a energia que ele gera é usada na sua alimentação), e tem as especificações segundo a Tabela 2.

Tabela 2 – Tabela de Especificações do SP-110

Sensibilidade	0.2 mV per Wm^2
Fator de Calibração	5 Wm^{-2} per mV
Incerteza de Calibração	$\pm 5\%$
Faixa de saída de Calibração	0-400 mV
Tempo de resposta	< 1 ms
Campo de visão	180 °

2.4 Modulo XBee

O protocolo de comunicação 802.15.4 é um tipo de *Wireless Personal Area Network* (WPAN), ou Rede de Área Pessoal Sem Fio, de baixa velocidade do *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE). Pode operar nas frequências de 868 MHz, 915 MHz ou 2,4 GHz, e o máximo de transmissão de dados de 250 kbps (MAYALARP et al., 2010).

O Módulo *XBee* foi criado pela aliança das empresas *Philips, Motorola, Mitsubishi Electric, Invensys* e *Honeywell* em meados de 2002. Utiliza frequência de 2,4GHz, taxa de

transmissão de dados de 250 kbps, e consegue comunicar com mais de um módulo por vez, tendo um gasto de energia que gira em torno de 30-40 mA (KUMAR et al., 2014). O módulo usado nessa monografia é o XBee PRO S2C, como o da Figura 11.



Figura 11 – XBee PRO S2C. Fonte: (Digi, 2019)

A construção de rede usando o XBee pode ser feita por ponto-a-ponto, onde um módulo comunica com outro módulo diretamente, ou em formato estrela, em que o módulo lança o dado na rede e os outros dispositivos propagam o dado enviado até que ele chegue para o XBee correto. Isto é possível devido ao fato de ser possível cadastrar um Xbee como mestre, ou seja, ele é o responsável pela rede e comanda o fluxo de dados, e os outros sendo XBee escravos, que seguem a orientação do XBee mestre.

Quando se utiliza XBee's mestres e escravos, também é necessário a utilização de uma Application Programming Interface (API) nativa do XBee. Esta API faz o envio de dados usando um frame de um número de bytes predefinidos, como mostra a Figura 12.



Figura 12 – Frame de uma API do módulo para o computador ou vice-versa . Fonte: (Digi, 2019)

A divisão de bytes da API segue a seguinte forma:

1. o primeiro byte indica que a comunicação será iniciada, sendo sempre de valor 7E.
2. os próximos dois bytes indicam a contagem de bytes depois dele.
3. um byte que indica o tipo de frame que está sendo utilizado.

4. um byte que identifica se o XBee receptor deve mandar um pacote de resposta indicando que o dado enviado chegou com sucesso ou não.
5. os próximos dois ou oito bytes, depende da configuração, indicam o endereço do XBee que deve receber o dado.
6. o próximo byte indica configurações de opções de comando.
7. os próximos bytes são os dados propriamente ditos.
8. o ultimo byte é o checksum, que é um byte que serve para identificar se os dados enviados chegaram da mesma forma que foram enviados (seu cálculo é feito usando a formula matemática $(0xFF - \sum \text{Bytes entre o byte de tamanho e o checksum})$).

2.5 Microcontrolador

Os microcontroladores são dispositivos eletrônicos que têm a capacidade de serem programados para fazer múltiplas funções de diversos tipos, as quais dependem apenas da escolha do usuário. Sua flexibilidade e facilidade de serem manipulados foram essenciais para sua difusão no mundo moderno.

O grande motivo pelo qual os microcontroladores têm a flexibilidade alta é o fato dele ter um núcleo processador, responsável por coordenar toda a atividade, e vários periféricos, que fazem tarefas especializadas. Assim, cada modelo de microcontrolador pode ser único, dependendo da quantidade e dos tipos de periféricos que ele possui.

A família de microcontroladores PIC tem-se destacado no cenário internacional à muitos anos. Segundo [Carlos \(2004\)](#) a família PIC, do ingles *Peripheral Interface Controller*, foi criada em 1975 pela companhia General Instruments, a qual criou o PIC1650. Nos dias de hoje, os microcontroladores PIC são desenvolvidos pela Microchip Technology, que já ultrapassou a marca de mais de 5 bilhões de microcontroladores produzidos.

Tomando como base a família PIC, é possível perceber varias periféricos que são essenciais para o funcionamento do mesmo, como o Watch Dog Timer (WDT), o conversor analógico/digital (ADC) e os timers.

O Watch Dog Timer é um tipo especial de contador contido dentro do microcontrolador, cuja principal função é impedir travamentos no PIC. Quando habilitado, ele conta de um valor inicial estabelecido até o valor zero. Caso sua contagem chegue ao fim, ele presume que o microcontrolador está travado e o reinicia, como se o operador tirasse a alimentação e reconectasse, impedindo que o travamento se alongue para mais do que o tempo gasto para terminar a contagem ([MURPHY; BARR, 2001](#)). Outra função que o WDT possui é retirar o microcontrolador do modo SLEEP, ou economia de energia pela sua natureza de reiniciar o PIC em qualquer circunstância.

O conversor analógico/digital (ADC, do inglês *Analog/Digital Converter*) é um periférico usado pelo microcontrolador quando é necessário fazer uma conversão de um sinal analógico (geralmente variando de 0-5 V), para seu equivalente digital (JUCÁ, 2011). A transformação de um sinal para o outro é feito separando um pequeno intervalo de valores analógicos em um único valor digital. A quantidade máxima de valores digitais possíveis é dependente do número de bits que o conversor possui, sendo que o valor máximo é 2^n , com n sendo o número de bits. Assim um microcontrolador com um conversor de 10 bits consegue representar até 1024 intervalos de valores analógicos diferentes.

Os timers são periféricos utilizados pelo microcontrolador para contar uma quantidade de tempo estipulada pelo usuário. Este periférico é extremamente útil em projetos que necessitam que tarefas sejam feitas em intervalos de tempo conhecidos. Normalmente os timers também podem ser configurados como contadores, apenas a "unidade" da contagem é que muda.

3 Metodologia

Nesta seção é apresentada a metodologia utilizada para o desenvolvimento do piranômetro, descrita em quatro partes: (i) desenvolvimento do piranômetro; (ii) desenvolvimento do circuito de alimentação; (iii) desenvolvimento do sistema supervisório; e (iv) calibração do sensor. A pesquisa foi desenvolvida no Laboratório de Automação Predial (LAP) da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), com apoio do Laboratório de Controle e Automação Multiusuário (LABCAM).

3.1 Desenvolvimento do Piranômetro

De acordo com o diagrama esquemático apresentado pela Figura 13, o piranômetro desenvolvido neste trabalho é formado por quatro partes principais : (i) conjunto de elementos sensores (placa fotovoltaica e piranômetro SP-110); (ii) placa de condicionamento de sinal, contendo um amplificador operacional, um microcontrolador e um Xbee (com funções de condicionar o sinal do sensor SP-110, coletar os dados dos elementos sensores e enviá-los para o supervisório); (iii) placa de alimentação (realiza recarga da bateria e fornece energia para a placa de condicionamento de sinal); e (iv) sistema supervisório (programa de computador para o usuário acessar os dados coletados).

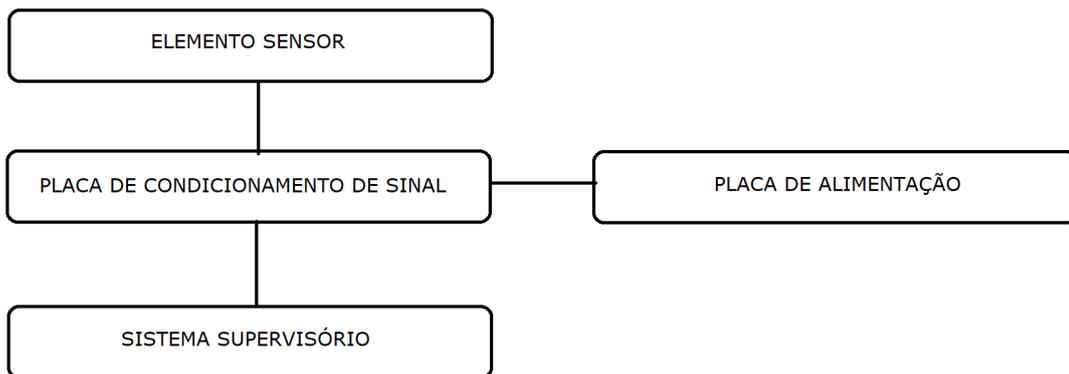


Figura 13 – Diagrama esquemático das partes do sensor proposto.

Para o desenvolvimento da placa de condicionamento de sinal proposta, inicialmente foi escolhido o elemento sensor que seria utilizado no protótipo. Dentre as possíveis opções, foi escolhida uma placa fotovoltaica pelo fato de sua variação de sinal de saída ser de 0-5 V e sua corrente máxima de 200 mA. Isso simplifica o trabalho, pois não necessita de um

circuito de interfaceamento adicional para se conectar ao microcontrolador escolhido e por ser uma placa fotovoltaica, que dispensa o uso de difusores na sua montagem.

Os dados fornecidos pela placa fotovoltaica, ou seja, sua resposta da saída (tensão) têm uma dependência aproximadamente linear com a irradiância solar por m^2 , vista na Equação 3.1, em que V_{out} é a tensão de saída da placa, a é uma constante de calibração e I é a irradiância solar por m^2 (FREIRE, 2008). Assim, quanto maior a intensidade da luz solar no módulo, maior a tensão produzida.

$$V_{out} = a \times I \quad (3.1)$$

Com o valor da resposta de saída da placa solar, torna-se necessário enviar este dado para o supervisor do piranômetro para que os dados estejam disponíveis para o usuário ou operador sem a necessidade de se fazer medições desses valores *in loco*. A ideia é utilizar um dispositivo que consuma o mínimo de energia possível e possa enviar os dados para um computador. Para esta função, foi escolhido a utilização de um microcontrolador, mais especificamente o PIC 16F873A. O motivo da escolha foi devido ao PIC 16F873A apresentar baixo custo, possuir mais de uma entrada analógica (o mínimo necessário era duas entradas) e ter a função de SLEEP.

A função SLEEP presente no PIC permite a diminuição drástica do gasto de energia elétrica que o microcontrolador consome. Segundo Souza (2005), quando este modo é habilitado, o oscilador é paralisado, e os níveis lógicos das portas são salvos, paralisando todo o processo do PIC. O microcontrolador permanece nesse estado até que seja acordado, podendo isso ser feito de três formas: um reset externo no pino Master Clear (MCLR), um estouro de contagem no WDT, caso esteja habilitado, ou uma interrupção externa em um pino de entrada.

O método de se fazer o religamento do PIC neste trabalho foi usando o WDT, setado para estourar aproximadamente de 1 em 1 segundo, fazendo assim o envio dos dados. Como este tempo é muito pequeno (a variação de irradiância solar, assim como a variação de temperatura, não se altere drasticamente em um curto espaço de tempo (segundos)) foi criada uma flag para aumentar o tempo entre as medições, ou seja, se o valor da flag não atingiu o número estipulado, o sistema volta a dormir imediatamente, ou caso contrário, o sistema faz a operação de medição e depois volta a dormir (aproximadamente de 40 em 40 segundos).

Existem várias maneiras de se fazer a comunicação entre microcontrolador e o computador. Dentre as possibilidades, o método escolhido para este trabalho foi utilizar o módulo XBee, pelo fato de ter um alcance de transmissão elevado para esta aplicação (1600m), e por ter uma baixa taxa de perda de dados (como os dados não são transmitidos a toda hora, a perda de dados pode ser muito prejudicial ao resultado do projeto).

Com os principais componentes escolhidos, partiu-se para o desenvolvimento da placa de condicionamento de sinal. Inicialmente foi feita uma montagem do circuito em um protoboard. Na Figura 14 é possível observar os componentes descritos acima além de um oscilador externo de 20 MHz, para que a contagem de tempo seja mais precisa, um diodo emissor de luz (LED), colocado apenas para que o funcionamento da placa seja visível, quatro bornes de conexão das entradas e saídas, as quais são duas entradas analógicas (uma para o piranômetro SP-110 e outra para a placa fotovoltaica), uma entrada de alimentação (5V) e uma saída onde foi conectado o módulo XBee.

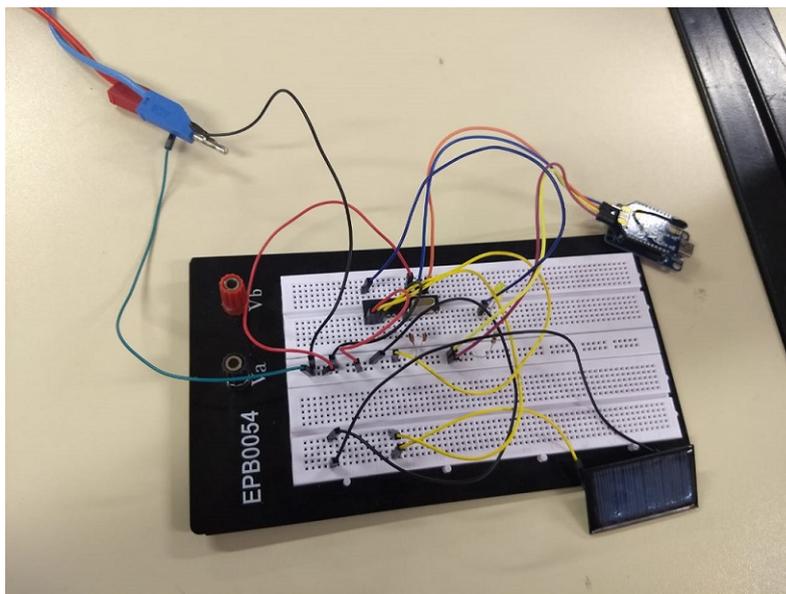


Figura 14 – Montagem na protoboard da placa de condicionamento de sinal.

A programação do microcontrolador foi feita pelo programa PIC C Compiler, usando a linguagem C. A ideia por trás do código foi basicamente dividida em duas partes: uma função de leitura das entradas analógicas (placa fotovoltaica e SP-110) e outra parte da parada do funcionamento do PIC.

Para a ideia da parada do microcontrolador foi utilizada a função SLEEP, ou seja, ao iniciar o sensor, a placa automaticamente entraria em modo de economia de energia até que o WDT terminasse a sua contagem (aproximadamente 1152 ms). Quando isso ocorre, é finalizado o modo SLEEP do PIC e é feito o seguinte teste: caso a variável de controle seja igual a 25, executa-se a função de leitura, caso contrário, retorna-se ao modo SLEEP, reiniciando o ciclo. O motivo por trás da criação da variável de controle foi para aumentar o tempo entre uma leitura e a outra, no caso sendo $1152 \text{ ms} \times 25$.

Na função de leitura, como o próprio nome diz, foi feita a leitura das duas entradas analógicas usando o ADC do 16F873A, de forma que os dados fossem transformados em um número inteiro dentro do intervalo de 0-1023. Portanto, foi feito a transcrição dos dados contidos no conjunto para duas variáveis hexadecimais (bytes) para cada leitura.

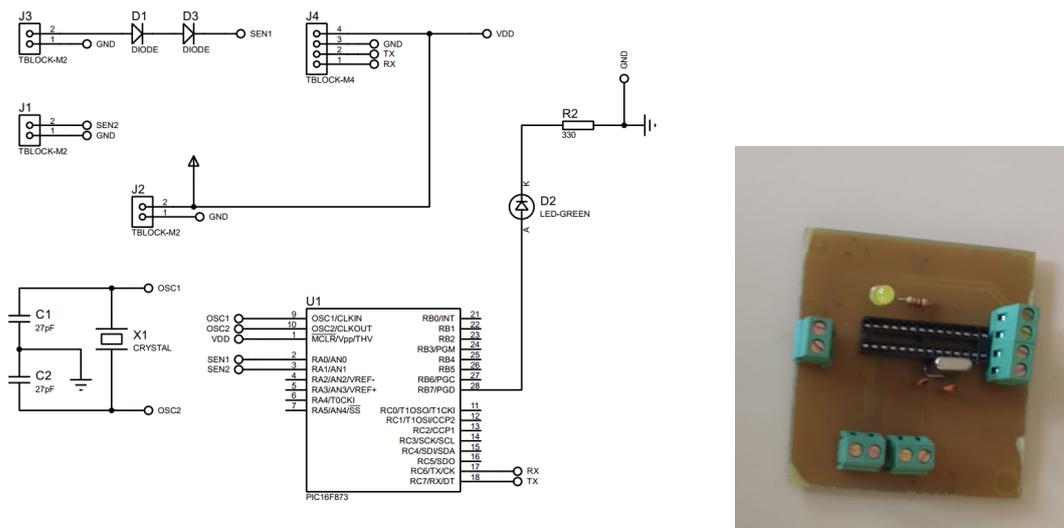
Então, é feito o cálculo do checksum, um requisito do modulo Xbee, utilizando a Equação 3.2, em que T1B1,T1B2,T2B1 e T2B2 são os bytes dos dados.

$$Checksum = 0xFF - (0x01 + T1B1 + T1B2 + T2B1 + T2B2) \quad (3.2)$$

Porém isso ainda não é suficiente para que o dado seja enviado diretamente no XBee, pois além dele necessitar de os dados serem hexadecimais, ele trabalha com envio de pacotes de frames (conjunto de bytes hexadecimais). Então, foi feita a criação e envio do frame que contém os dados de um módulo XBee para o outro que se encontra no computador com o supervisor. Por fim, o LED fica acesso por 500 ms e depois é desligado (apenas um sinal visível que indica o fim do envio dos dados) e o PIC é novamente paralisado.

Finalizado a programação do microcontrolador, todo o sistema foi submetido a um teste, de forma que o objetivo era detectar se o sistema proposto conseguiria enviar um dado presente na placa para o computador. Atestado o funcionamento correto do circuito (dados presentes na montagem foram recebidos de forma correta no computador) foi iniciado o processo de projeto da placa em uma fenolite. Ele foi feito utilizando o programa Proteus, e ficou da forma como mostra a Figura 15(a). Por fim, após a verificação do funcionamento do circuito utilizando a simulação do próprio programa, foi feito a impressão da placa em uma fresadora com Comando Numérico Computadorizado (CNC) e o resultado da placa, após a soldagem dos componentes na mesma é mostrado na Figura 15(b).

Figura 15 – Desenvolvimento do Piranômetro



(a) Design do Piranômetro no Proteus.

(b) Placa do Piranômetro.

Não se viu a necessidade de se construir um corpo protetor para o sensor pois a placa fotovoltaica consegue resistir às intempéries do clima. Porém a placa de condicionamento

do sinal foi protegida por uma caixa hermética, pois ela não é resistente as condições climáticas adversas.

Para que o piranômetro SP-110 se adéque na comparação com o sensor criado, é necessário colocá-lo na mesma faixa de medida da placa fotovoltaica (0-5V), pois seu range de medição varia de 0 - 200 mV. Para isso, foi desenvolvida uma placa com um amplificador operacional (AMP-OP) não inversor. Segundo [BARROS et al. \(2018\)](#), o circuito deste AMP-OP é mostrado na Figura 16 em que seu ganho entre o sinal de entrada e o sinal de saída segue a Equação 3.3, em que V_{out} é a tensão de saída do AMP-OP e V_{in} é a tensão de entrada do AMP-OP.

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = 1 + \frac{R_f}{R_i} \quad (3.3)$$

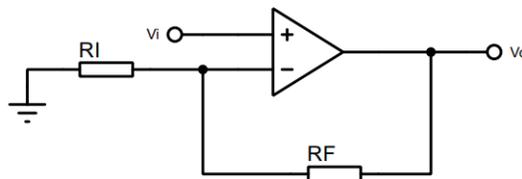


Figura 16 – Esquema de ligação de um amplificador operacional não inversor.

O amplificador operacional usado para a solução do problema foi o LM324, pois sua alimentação é a mesma usada pela placa de sinal (5 V) e o ganho entre o sinal de entrada e saída foi de 20. Para se chegar próximo a este ganho foram utilizadas duas resistências: R_f sendo 16 k Ω e R_i sendo 820 Ω .

Depois da construção da placa, quando foi feito um teste nas condições reais de ambiente de medição utilizando o módulo fotovoltaico, foi visto um problema: quando submetido a intensidade solar muito alta, o módulo gerava tensões maiores do que 5V. Isso é bastante prejudicial para o sistema pois o PIC não consegue identificar tensões maiores do que sua alimentação (5 V). Além disso, se o pino de entrada for submetido a tensões maiores que 5 V durante um espaço de tempo grande, existe o risco da queima da porta e do conversor analógico/digital.

A solução encontrada para este problema foi fazer a soldagem de um diodo entre o fio de condução de sinal e o borne de sinal na placa. A solução é viável devido às características físicas do diodo¹. Assim, seu range mudou de 1 - 5 V, o que não alterou o

¹ Quando polarizado diretamente, produz uma queda constante de 0.4 V a 0.7 V. Como a maior tensão registrada foi de 5.6 V e a diminuição medida foi de 0.5 V, foram usados dois diodos em serie que produziu uma queda de 1.0 V, ficando dentro dos padrões do microcontrolador

comportamento do sistema, já que quando o SP-110 começa a medir irradiância, a tensão na placa já está em quase 2 V.

3.2 Desenvolvimento do sistema de alimentação

O sistema criado tem o objetivo de medir a irradiância solar, e, para isso, precisa estar localizado em um espaço aberto onde é possível captar luz solar durante todo o período do dia e que não seja obstruído por qualquer objeto ou construção que fariam sombras nos elementos sensores. No caso deste trabalho, o espaço utilizado foi o jardim mostrado na Figura 17 que se encontra atrás do Laboratório de Automação Predial (LAP) encontrado na Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP).



Figura 17 – Jardim onde foi instalado o sistema.

Espaços abertos como o mostrado acima não possuem tomadas próximas disponíveis para utilizar uma fonte de tensão convencional. Assim, viu-se a necessidade de desenvolver outra forma de energização do sistema. Para o projeto, foi pensado em duas possibilidades: a placa fotovoltaica utilizada como elemento sensor ser utilizada também como gerador de energia da própria placa de condicionamento de sinal (auto alimentação) ou se fazer o uso de uma bateria para alimentar o sistema. Devido a dificuldades técnicas de se implementar a auto alimentação, foi escolhido a utilização de uma bateria recarregável.

A ideia central da utilização da bateria recarregável parte da ideia de que durante o dia, um módulo fotovoltaico de maior capacidade de geração de energia (aproximadamente 20 V) carregaria a bateria e proveria os 5 V necessários para o funcionamento da placa de condicionamento de sinal. Desta forma, quando não for gerada energia pelo módulo principal, ela proveria energia para que a placa de sinal continuasse a funcionar. Assim, quando amanhecesse no próximo dia, ela seria carregada novamente até a noite.

Para o caso específico do projeto, foi desenvolvida uma placa de alimentação que atendesse aos requisitos da ideia acima, funcionando da seguinte forma: quando o módulo fotovoltaico gera uma tensão de até 19,8 V, o bourné onde se encontra os terminais da bateria de 12 V fornece uma tensão constante de 13,8 V (tensão necessária para que se faça a recarga da bateria). Um regulador de tensão é usado para abaixar a tensão da bateria para 5 V, disponíveis em outro bourné para alimentar o circuito de condicionamento de sinais. Faltando energia provida pelo módulo, a tensão nos terminais da bateria mudam para 12 V, porém a tensão no bourné de alimentação da placa de condicionamento de sinal continua com os mesmos 5 V de tensão.

3.3 Supervisório em C#

O sistema supervisório criado foi desenvolvido utilizando a ferramenta Visual Studio, sendo programado em C#, por ser muito simples a criação de telas e por não ser necessário o desenvolvimento de um supervisório muito complexo.

Assim, foi feito um programa com uma tela apenas, na qual buscou-se mostrar os dados de tensão e o os dados da irradiância de cada um dos dois sensores, além de um espaço em que é possível ver o histórico das últimas medições. Além disso, foi possível criar a lógica na qual se possibilitou fazer a exportação dos dados em um arquivo .txt para que se conseguisse fazer a avaliação e calibração fora do ambiente do Visual Studio.

A forma como os dados chegam para o supervisório é pelo frame criado pelo microcontrolador, mas para que se torne possível mostrar os dados no ambiente, é necessário fazer a quebra deste frame voltando os dados para o formato de um vetor de 16 posições de bits. Portanto, assim que o código detecta uma chegada de um novo dado pelo módulo XBee, o supervisório faz o processo inverso do microcontrolador (2 bytes hexadecimais de dados se transformam em um vetor de 16 bits de dados) e os valores de cada sensor são salvos em duas variáveis diferentes (Leitura1 e Leitura2). Então, como estes valores são o resultado da conversão do ADC do microcontrolador, foi necessário transformá-lo em um valor de tensão. Para esta operação, foi utilizado a Equação 3.4, em que V_{out} é o valor da tensão de saída em mV e L é o valor da leitura do ADC.

$$V_{out} = \frac{(L \times 5000)}{1023} \quad (3.4)$$

3.4 Calibração

Para que os valores do sensor criado sejam tomados como valores verdadeiros, foi necessário submetê-lo a um processo de calibração. O método escolhido foi utilizar um sensor que já foi calibrado anteriormente (SP-110) e tomá-lo como referência. Desta forma,

foi feita uma montagem para medição, como mostra a Figura 18. É possível perceber que os dois sensores foram colocados na mesma altura e aproximadamente mesma posição para que fosse possível assumir que ambos estavam medindo o mesmo valor de irradiância.



Figura 18 – Montagem de medição do piranômetro.

Com a montagem instalada, foi possível iniciar a coleta de dados dos sensores. Tendo estas informações em mãos foi traçado um gráfico de Wm^2 (saída do piranômetro SP-110) por mV (saída da placa fotovoltaica). Para isso, foi necessário fazer a transformação do sinal do SP-110 de mV para Wm^2 . Isto foi feito utilizando a Equação 3.5, em que $5 \frac{Wm^2}{mV}$ é o fator de calibração fornecido pelo manual do SP-110.

$$V_{out}(Wm^2) = V_{out}(mV) \times 5 \frac{Wm^2}{mV} \quad (3.5)$$

Tendo o gráfico traçado, a constante de calibração do sensor foi obtida ajustando-se um modelo exponencial aos dados experimentais. Então, o modelo foi adicionado no sistema supervisorio, de acordo com a Equação 3.6, em que V_{cal} é o dado do sensor calibrado, e $f(V_{out})$ é a função de calibração que depende da tensão de saída.

$$V_{cal} = f(V_{out}) \quad (3.6)$$

4 Resultados

4.1 Instalação do Sistema

Para que fosse possível fazer a instalação do sistema desenvolvido, foi necessário criar um sistema base. Esse sistema base seria uma estrutura cuja principal função seria acomodá-lo, além de protegê-lo contra as condições climáticas adversas (principalmente chuva e neblina) e abrigar a placa fotovoltaica que recarrega a bateria.

O sistema base é composto por uma trave metálica de 3 m de comprimento, onde, na sua extremidade superior (Figura 19(i)) , foi instalado uma placa fotovoltaica que produz até 20 V de tensão e os dois piranômetros (SP-110 e placa fotovoltaica). Além disso foram utilizados duas caixas herméticas, para não deixar a água da chuva entrar nas placas e na bateria, uma contendo todas as placas utilizadas no sistema e a outra contendo apenas a bateria, conforme ilustrado na Figura 19.



Figura 19 – Trave onde foi instalado todo o sistema. (i) a placa fotovoltaica de 20 V; (ii) os dois sensores instalados; (iii) trave metálica; (iv) as duas caixas herméticas.

Antes de ser feita a instalação foi analisado uma localização onde, durante toda a duração do dia, a luz solar incidiria sobre os piranômetros sem nenhuma formação de sombra neles. O local escolhido foi aproximadamente no meio do jardim.

Com a escolha do local feita, foi feita uma perfuração no solo com profundidade suficiente para que a trave conseguisse ficar de pé a todo momento (mesmo nas chuvas e com os ventos). Após a fixação da trave, foram colocados as caixas herméticas com a utilização de braçadeiras de plástico, deixando-as firmes e presas, de forma que não se movimente durante o tempo que estiver no campo.

4.2 Desenvolvimento do Piranômetro

O resultado da construção do piranômetro pode ser separado em quatro partes principais: instalação dos piranômetros utilizados (SP-110 e placa fotovoltaica), da placa de condicionamento de sinal, da placa de amplificação e da placa de alimentação. Os piranômetros foram fixados na parte superior da trave base para que os raios solares fossem captados durante todo o dia.

A placa de alimentação, como é demonstrado na Figura 20, é um conjunto de capacitores e transistores que conseguem criar o efeito de duas saídas de tensão, de 13,8 V e 5 V respectivamente. Ainda na mesma Figura é possível perceber o resistor variável que foi utilizado para fazer a calibragem das tensões mencionadas acima, quando a alimentação fornecida pelo módulo fotovoltaico fosse de 19,8 V.



Figura 20 – Placa de alimentação

A placa de amplificação do sinal do SP-110 foi desenvolvida seguindo o esquema criado no Proteus, como mostra a Figura 21. O borne de seis vias (J1) recebe a referência de alimentação diretamente da placa de alimentação (5 V e GND) nos pinos 5 e 6, o sinal de entrada do piranômetro SP-110 nos pinos 3 e 4, e provém o sinal amplificado pelos pinos 1 e 2. Além disso, todos os sinais de terra foram interligados para manter todos os sinais na mesma referência.

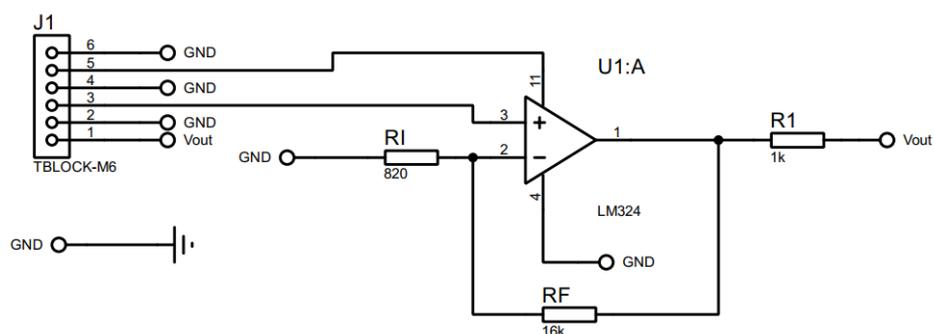


Figura 21 – Circuito da placa de amplificação desenvolvido no Proteus

Na Figura 22 ilustra-se a disposição das três placas descritas acima, juntamente com o módulo Xbee, dentro da caixa hermética. A placa de condicionamento de sinal e a placa de alimentação, além do módulo, estão parafusadas na caixa para que consigam ficar fixadas na parede da caixa, deixando espaço suficiente para que a placa de amplificação fique disposta na parte baixa da caixa sem nenhum problema.



Figura 22 – Sistema no piranômetro contido na caixa hermética. De cima para baixo e da esquerda para a direita: Módulo Xbee, Placa de Alimentação, Placa de Condicionamento de Sinal e Placa de Amplificação do SP-110.

4.3 Supervisório em C#

Para a comunicação do sistema do piranômetro e o computador, foi criado um sistema supervisório, como mostra a Figura 23. Nele, o ambiente principal é composto apenas de uma tela onde todas as informações do sistema são mostradas para que o operador tenha acesso.



Figura 23 – Tela do sistema supervisório.

No ambiente, é possível perceber que foi criado um checklist onde é possível selecionar a qual porta o módulo XBee está conectado. Também foram utilizados quatro *gauges*, dois deles mostrando a tensão em cada um dos sensores (placa fotovoltaica e piranômetro SP-110), e os outros dois mostrando a irradiância solar de cada um deles (o cálculo é feito de uma transformação no próprio código do supervisório utilizando os valores de tensão). Além disso, foi utilizada uma Textbox, onde é mostrado um histórico das últimas medições registradas pelo sistema.

Outra funcionalidade adicionada ao supervisório foi a possibilidade de exportação dos dados para um arquivo .txt, em que são transcritas para o arquivo todas as medições dos dois sensores, juntamente com a data e o horário de cada uma das medições, como mostra a Figura 24. Esse processo é de muita ajuda para a calibração, pois os gráficos obtidos neste estudo são feitos fora do ambiente do supervisório.

```

medicoes2 - Bloco de notas
Arquivo Editar Formatar Exibir Ajuda
16/01/2020 19:55:05 - Sensor 1 :0547 Sensor 2 :0860 Irradiância 1 :0000 Irradiância 2 :0215
16/01/2020 19:55:34 - Sensor 1 :0660 Sensor 2 :0938 Irradiância 1 :0000 Irradiância 2 :0235
16/01/2020 19:56:04 - Sensor 1 :0709 Sensor 2 :1095 Irradiância 1 :0000 Irradiância 2 :0274
16/01/2020 19:56:34 - Sensor 1 :0621 Sensor 2 :0968 Irradiância 1 :0000 Irradiância 2 :0242
16/01/2020 19:57:03 - Sensor 1 :0841 Sensor 2 :1127 Irradiância 1 :0000 Irradiância 2 :0304
16/01/2020 19:57:33 - Sensor 1 :0743 Sensor 2 :1173 Irradiância 1 :0000 Irradiância 2 :0293
16/01/2020 19:58:03 - Sensor 1 :0699 Sensor 2 :1022 Irradiância 1 :0000 Irradiância 2 :0255
16/01/2020 19:58:33 - Sensor 1 :0860 Sensor 2 :1102 Irradiância 1 :0000 Irradiância 2 :0323
16/01/2020 19:59:02 - Sensor 1 :0694 Sensor 2 :1031 Irradiância 1 :0000 Irradiância 2 :0258
16/01/2020 19:59:32 - Sensor 1 :0762 Sensor 2 :1153 Irradiância 1 :0000 Irradiância 2 :0288
16/01/2020 20:00:01 - Sensor 1 :0718 Sensor 2 :1100 Irradiância 1 :0000 Irradiância 2 :0275
16/01/2020 20:00:31 - Sensor 1 :0669 Sensor 2 :1012 Irradiância 1 :0000 Irradiância 2 :0253
16/01/2020 20:01:01 - Sensor 1 :0670 Sensor 2 :1056 Irradiância 1 :0000 Irradiância 2 :0264
16/01/2020 20:01:30 - Sensor 1 :0699 Sensor 2 :1075 Irradiância 1 :0000 Irradiância 2 :0269
16/01/2020 20:02:00 - Sensor 1 :0635 Sensor 2 :0938 Irradiância 1 :0000 Irradiância 2 :0235
16/01/2020 20:02:30 - Sensor 1 :0860 Sensor 2 :1325 Irradiância 1 :0000 Irradiância 2 :0331
16/01/2020 20:03:00 - Sensor 1 :0797 Sensor 2 :1246 Irradiância 1 :0000 Irradiância 2 :0312
16/01/2020 20:03:29 - Sensor 1 :0860 Sensor 2 :1329 Irradiância 1 :0000 Irradiância 2 :0332
16/01/2020 20:03:59 - Sensor 1 :0772 Sensor 2 :1173 Irradiância 1 :0000 Irradiância 2 :0293
16/01/2020 20:04:29 - Sensor 1 :0860 Sensor 2 :1241 Irradiância 1 :0000 Irradiância 2 :0310
16/01/2020 20:04:58 - Sensor 1 :0841 Sensor 2 :1246 Irradiância 1 :0000 Irradiância 2 :0312
16/01/2020 20:05:28 - Sensor 1 :0797 Sensor 2 :1212 Irradiância 1 :0000 Irradiância 2 :0303
16/01/2020 20:05:58 - Sensor 1 :0797 Sensor 2 :1139 Irradiância 1 :0000 Irradiância 2 :0285
16/01/2020 20:06:27 - Sensor 1 :0802 Sensor 2 :1188 Irradiância 1 :0000 Irradiância 2 :0297
16/01/2020 20:06:57 - Sensor 1 :0699 Sensor 2 :1022 Irradiância 1 :0000 Irradiância 2 :0255
16/01/2020 20:07:27 - Sensor 1 :0718 Sensor 2 :1075 Irradiância 1 :0000 Irradiância 2 :0269
16/01/2020 20:07:56 - Sensor 1 :0811 Sensor 2 :1173 Irradiância 1 :0000 Irradiância 2 :0293
16/01/2020 20:08:26 - Sensor 1 :0694 Sensor 2 :1075 Irradiância 1 :0000 Irradiância 2 :0269
16/01/2020 20:08:56 - Sensor 1 :0797 Sensor 2 :1295 Irradiância 1 :0000 Irradiância 2 :0324
16/01/2020 20:09:25 - Sensor 1 :0797 Sensor 2 :1212 Irradiância 1 :0000 Irradiância 2 :0303
16/01/2020 20:09:55 - Sensor 1 :0816 Sensor 2 :1188 Irradiância 1 :0000 Irradiância 2 :0297
16/01/2020 20:10:25 - Sensor 1 :0816 Sensor 2 :1173 Irradiância 1 :0000 Irradiância 2 :0293
16/01/2020 20:10:54 - Sensor 1 :0699 Sensor 2 :1056 Irradiância 1 :0000 Irradiância 2 :0264
16/01/2020 20:11:24 - Sensor 1 :0777 Sensor 2 :1173 Irradiância 1 :0000 Irradiância 2 :0293
16/01/2020 20:11:54 - Sensor 1 :0684 Sensor 2 :1031 Irradiância 1 :0000 Irradiância 2 :0258
16/01/2020 20:12:24 - Sensor 1 :0844 Sensor 2 :1085 Irradiância 1 :0000 Irradiância 2 :0271
16/01/2020 20:12:53 - Sensor 1 :0718 Sensor 2 :1124 Irradiância 1 :0000 Irradiância 2 :0281
16/01/2020 20:13:23 - Sensor 1 :0797 Sensor 2 :1129 Irradiância 1 :0000 Irradiância 2 :0282
16/01/2020 20:13:52 - Sensor 1 :0811 Sensor 2 :1173 Irradiância 1 :0000 Irradiância 2 :0293
16/01/2020 20:14:22 - Sensor 1 :0743 Sensor 2 :1109 Irradiância 1 :0000 Irradiância 2 :0277
16/01/2020 20:14:52 - Sensor 1 :0797 Sensor 2 :1246 Irradiância 1 :0000 Irradiância 2 :0312
16/01/2020 20:15:22 - Sensor 1 :0772 Sensor 2 :1124 Irradiância 1 :0000 Irradiância 2 :0281
16/01/2020 20:15:52 - Sensor 1 :0787 Sensor 2 :1129 Irradiância 1 :0000 Irradiância 2 :0282
16/01/2020 20:16:21 - Sensor 1 :0733 Sensor 2 :1095 Irradiância 1 :0000 Irradiância 2 :0274
16/01/2020 20:16:51 - Sensor 1 :0762 Sensor 2 :1119 Irradiância 1 :0000 Irradiância 2 :0280
16/01/2020 20:17:20 - Sensor 1 :0743 Sensor 2 :1100 Irradiância 1 :0000 Irradiância 2 :0275
16/01/2020 20:17:50 - Sensor 1 :0762 Sensor 2 :1129 Irradiância 1 :0000 Irradiância 2 :0282
16/01/2020 20:18:20 - Sensor 1 :0816 Sensor 2 :1212 Irradiância 1 :0000 Irradiância 2 :0303
16/01/2020 20:18:49 - Sensor 1 :0743 Sensor 2 :1139 Irradiância 1 :0000 Irradiância 2 :0285
16/01/2020 20:19:19 - Sensor 1 :0802 Sensor 2 :1212 Irradiância 1 :0000 Irradiância 2 :0303
16/01/2020 20:19:49 - Sensor 1 :0762 Sensor 2 :1109 Irradiância 1 :0000 Irradiância 2 :0277
16/01/2020 20:20:19 - Sensor 1 :0743 Sensor 2 :1100 Irradiância 1 :0000 Irradiância 2 :0275

```

Figura 24 – Arquivo .txt com os dados salvos.

4.4 Calibração

Para a calibração, foi feita a medição da tensão nos dois piranômetros durante o período de 3 dias completos. A Figura 25 mostra o gráfico onde demonstra os dados coletados durante o período descrito.

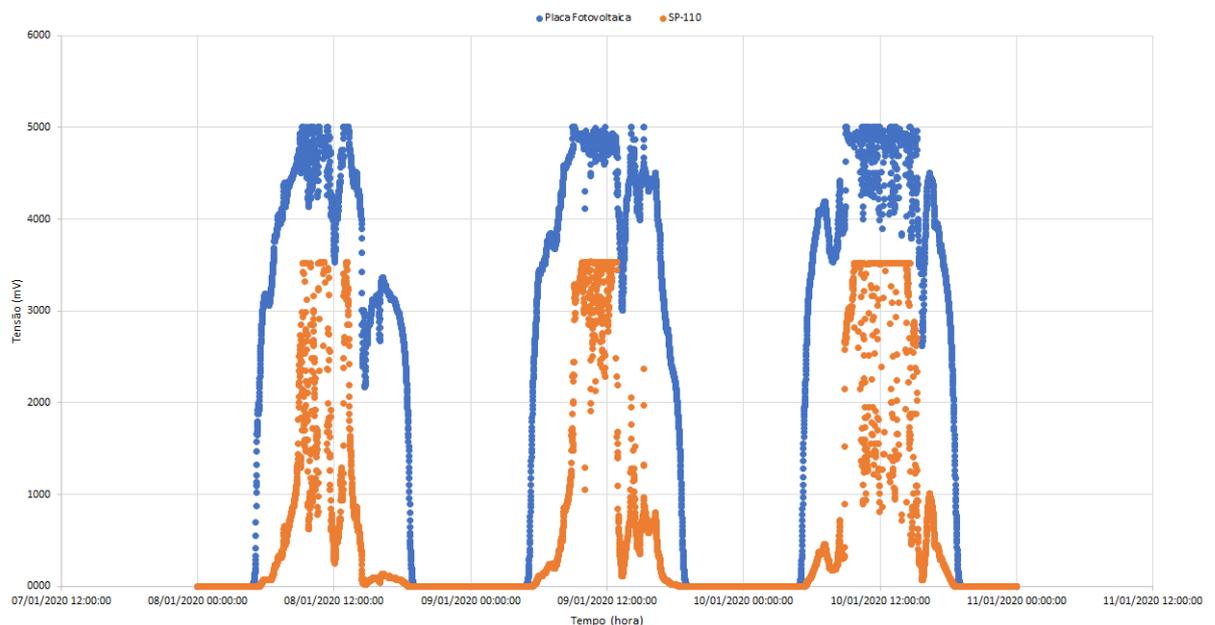


Figura 25 – Gráfico da resposta dos 2 sensores. Em azul, os dados da placa fotovoltaica e em laranja os dados do SP-110

Com os dados coletados foi necessário fazer a transformação dos dados de tensão do sensor SP-110 em mV para irradiância em W/m^2 . Para isso foi utilizado a Equação 3.5, com uma alteração: devido ao fato de ter sido necessário amplificar o sinal do SP-110,

essa amplificação deve ser retirada nessa etapa para que a comparação seja fiel. Então, a equação usada no supervisor e nesta transformação foi a Equação 4.1.

$$V_{out} = \frac{(V_{out} \times 5)}{20} \quad (4.1)$$

Uma vez que foram obtidos esses dados, foi plotado um gráfico da tensão da placa em mV pela irradiância do SP-110, demonstrado na Figura 26.

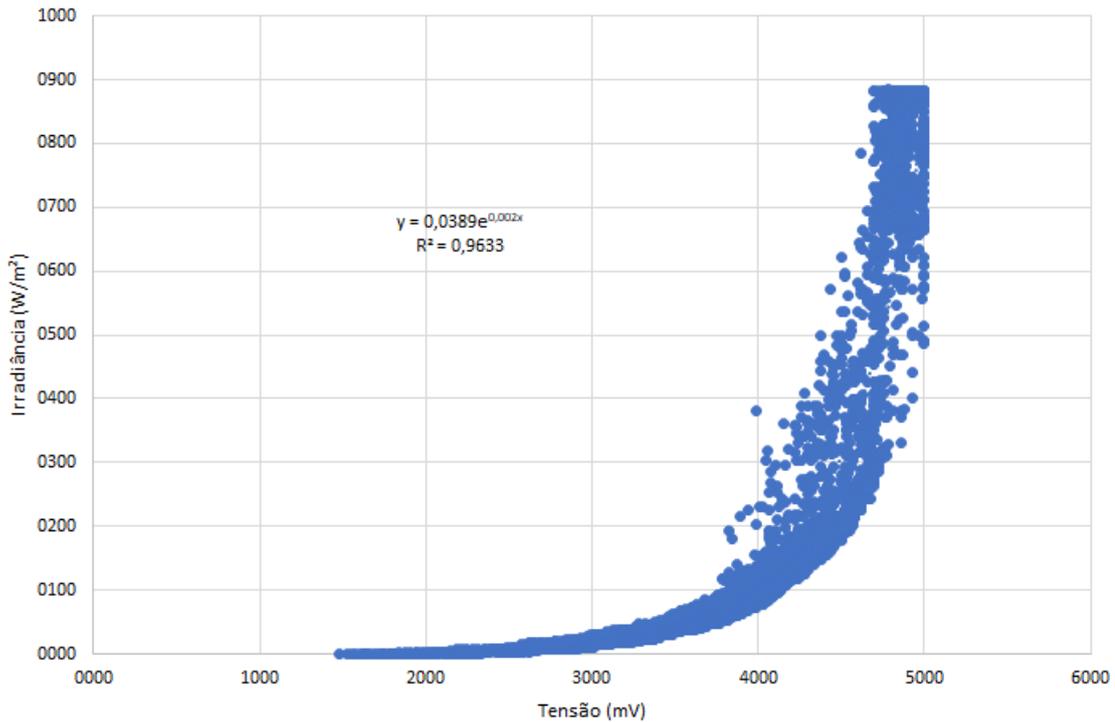


Figura 26 – Gráfico da calibração de irradiância do SP-110 versus tensão da placa fotovoltaica

Como o comportamento do gráfico se mostrou de uma função exponencial, foi utilizado a linha de tendência exponencial, a qual foi encontrada a função que descreve o comportamento dos dados. A função encontrada foi

$$y = 0,0389 \times e^{0,002x} \quad (4.2)$$

e se mostrou adequada, pois o índice R^2 , o qual descreve o quão bem a função encontrada pode explicar a variação da variável independente, foi alto (96,33%¹).

¹ Ou seja, 96,33% dos dados do gráfico podem ser encontrados aplicando as coordenadas dos pontos na função encontrada.

4.5 Validação

Para observar o quão bem o sensor desenvolvido condiz com a realidade, foi feita uma validação dos valores da irradiância após a calibração do sistema. Após colocar a função obtida pela calibração anterior no sistema supervisorio, os dados foram colhidos durante dois dias para este processo, e os resultados podem ser observados pela Figura 27.

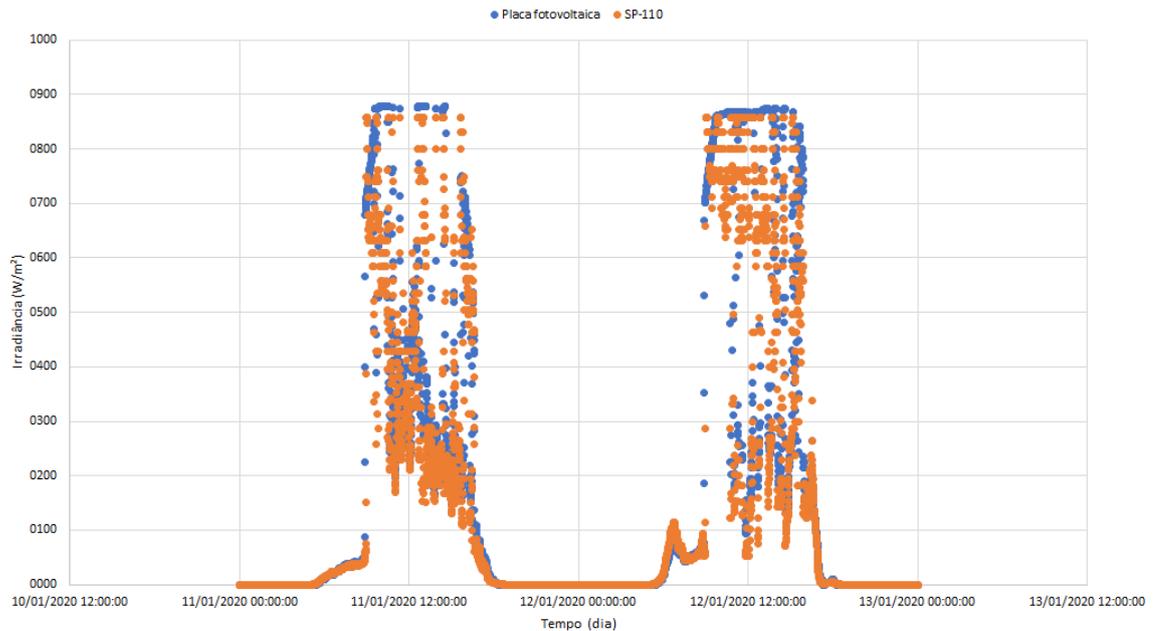


Figura 27 – Gráfico da resposta dos 2 sensores durante dois dias. Em azul, os dados da placa fotovoltaica e em laranja os dados do SP-110

O processo de validação foi feito plotando a curva de erro das medidas durante os dias observados. Para obter a curva de erro, foi necessário utilizar a Equação 4.3

$$E = V_c - V_r \quad (4.3)$$

em que V_c é o valor calibrado, V_r é o valor da referencia e E é o erro de medição.

Portanto, fazendo uso da Equação 4.3 em todos os dados durante 2 dias, obteve-se o gráfico da Figura 28.

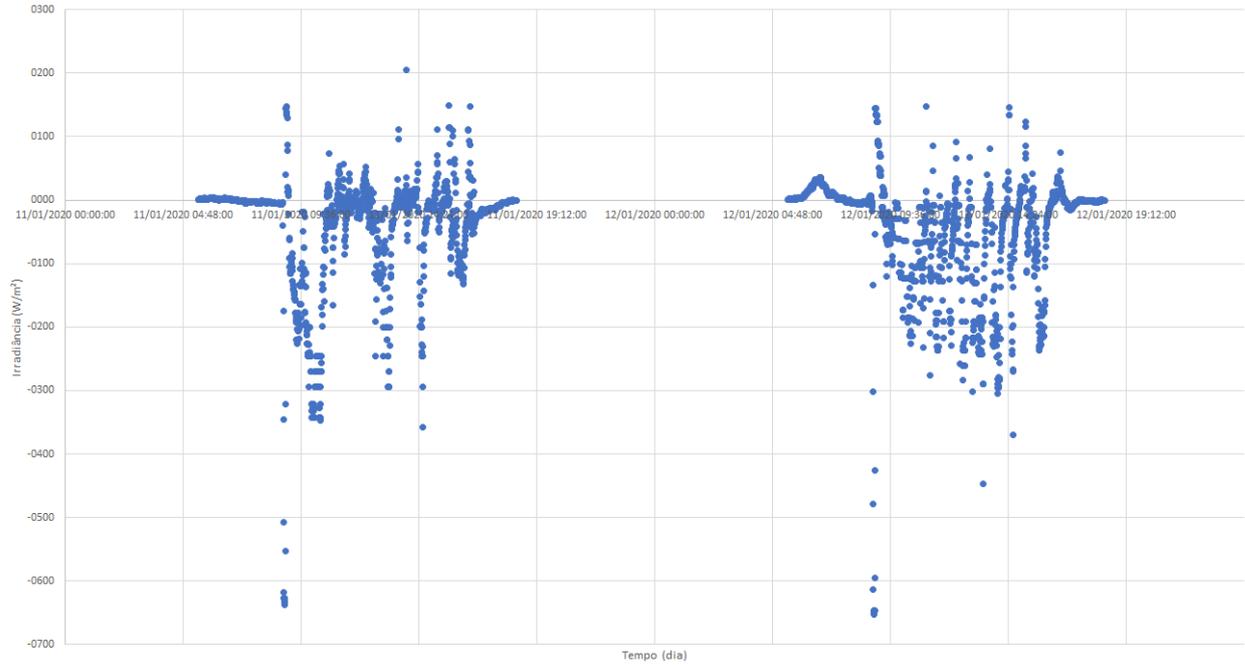


Figura 28 – Gráfico do erro do sensor

Como é possível perceber no gráfico, os erros foram muito pequenos nos extremos do dia (amanhecer e anoitecer), mas no horário de pico o erro observado foi maior. Para se ter uma noção do tamanho médio do erro, foi calculado o RMSE (Root Mean Square Error), igual a $101,432 \text{ W/m}^2$. O cálculo foi feito utilizando a Equação 4.4, em que y_t é o valor de irradiância do sensor calibrado e y_n é o valor da irradiância do SP-110.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (y_t - y_n)^2}{N}} \quad (4.4)$$

Existem alguns pontos isolados com um erro muito grande, mas isso pode ter ocorrido pelo fato da variação da placa fotovoltaica em um curto período de tempo ser maior do que o do SP-110.

Para analisar se, mesmo com erro, o sensor atende as especificações para a aplicação, foi feita a análise da resposta da irradiância durante dois dias, e comparou-se com os valores esperados. Como se sabe, durante 9:00 h as 12:00 h, a intensidade solar aumenta, chegando a seu valor máximo próximo de 12:00 h; e então diminui gradativamente durante o decorrer do dia. Esse comportamento pode ser observado neste sensor, por meio da Figura 29.

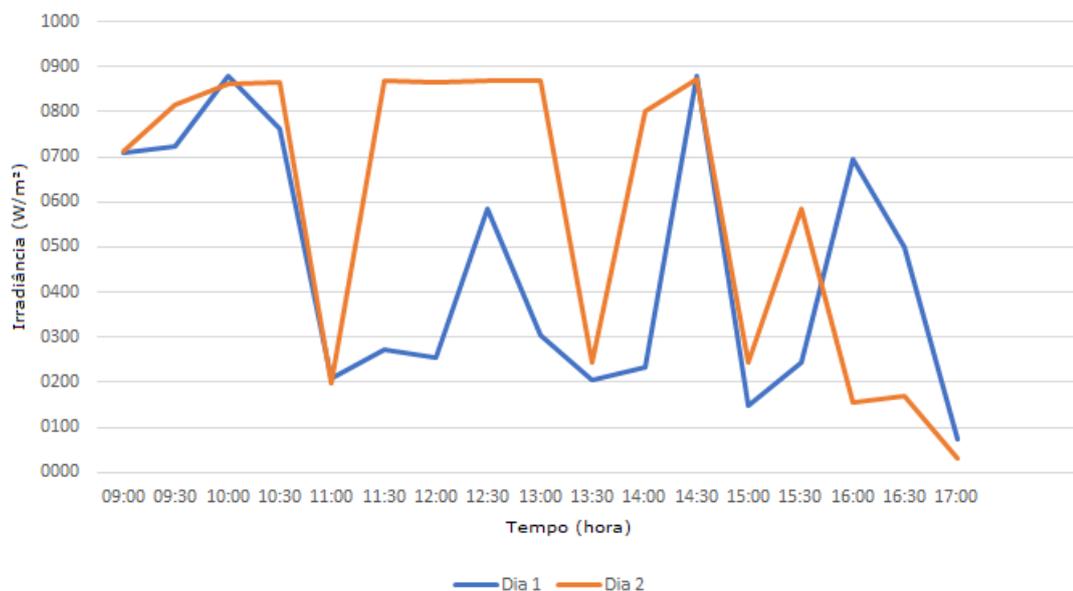


Figura 29 – Gráfico do comportamento do sensor durante o dia

Os erros encontrados no gráfico podem ter ocorrido pois não é possível controlar as condições climáticas. Nos dias que foram feitas as medições, o clima em Ouro Preto era muito instável, portanto nuvens podem ter ocasionado a diminuição de irradiância em momentos inesperados.

5 Considerações Finais

O piranômetro desenvolvido, juntamente com o sistema supervisório criado para ele, mostrou-se efetivo para medir a irradiância solar diária, e disponibilizar os dados para o operador. Além disso, o piranômetro se mostrou relativamente portátil, podendo ser instalado em qualquer lugar, porém o sistema completo é pesado e difícil de ser carregado completamente montado (a trave com as caixas herméticas instaladas nela). A transmissão utilizada foi ideal e sem falhas nos testes realizados (não houve uma única perda de dados no envio) sendo extremamente confiável.

A função de calibração obtida usando os dados medidos durante três dias de medição foi $y = 0,0389 \times e^{0,002x}$ e se mostrou ideal pois conseguiu explicar o comportamento de 96,33% dos dados. A validação desta função de calibração demonstrou um erro pequeno no amanhecer e no anoitecer, mas no decorrer do dia obteve erros maiores, tendo um RMSE de 101,432 W/m^2 .

O erro visto na validação não é considerado um problema para o caso específico deste sensor pois, como o objetivo proposto é de gerar uma referência para um sistema de monitoramento de limpeza de placas fotovoltaicas, o sensor não precisa de demonstrar, com exatidão, a irradiância daquele dia. O seu objetivo é ser o fator de comparação para as placas, ou seja, avaliar se em determinada faixa de irradiância, o comportamento da placa é o esperado ou não.

O piranômetro desenvolvido pode ser utilizado para outras finalidades, mas não é recomendado para situações em que o valor da irradiância é um fator crítico de medição, ou seja, quando é importante saber com uma pequena faixa de incerteza este valor. Dito isso, ele pode ser utilizado, por exemplo, para sistemas de iluminação automática (ligar a luz quando estiver com baixa luminosidade solar e desligar quando houver) ou detecção de luz (se existe luz no recinto ou falta). Nos casos citados acima, não é tão importante que a saída do sensor seja em W/m^2 , a menos que o sistema necessite que várias ações para diferentes intensidades solares (dimerização da luz para diferentes intensidades solares, por exemplo).

Para o sistema de detecção de sujeira, o sensor desenvolvido consegue criar a referência de irradiância para que o operador consiga analisar a resposta de saída dos módulos fotovoltaicos e identificar se os módulos estão sujos ou não. Ou seja, se, em dois momentos diferentes, sob a mesma irradiância, ocorreu uma diminuição da produção de um momento para o outro, a placa está suja. Isso é possível de ser feito, desde que o sensor

seja higienizado todos os dias, para que sua medição seja fiel.

Recomenda-se para trabalhos futuros utilizar outro elemento sensor (fotodiodo por exemplo) para observar se o comportamento da medição se torna melhor ou pior. Também pode-se criar um sistema de autoalimentação, no qual a energia que a própria placa fotovoltaica de medição gera a alimentação do sistema, descartando a necessidade de bateria. Outra recomendação é fazer uma logica em que o modo SLEEP do microcontrolador dure toda a duração da noite, pois não há finalidade do sensor funcionar nesse período, já que não há luz solar. Uma outra ideia interessante seria criar um sistema de auto-higienização do sensor automático, de forma que não seja necessário intervenção do operador para que ocorra essa higienização diária. Por fim, recomenda-se criar um banco de dados dentro do sistema supervisorio, de forma que os dados são salvados automaticamente nele.

Referências

- APOGEE, I. I. *Pyranometer Models SP-110 and SP-230*. 1. ed. [S.l.]: Apogee, Instruments INC, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 24.
- BARROS, E. et al. Fundamentos do amplificador operacional. 2018. 2018. Citado na página 32.
- BOLZAN, M. B. *Desenvolvimento de um Piranômetro baseado em Componentes Semicondutores*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014. Citado 3 vezes nas páginas 8, 15 e 23.
- BORCHARDT, I. G.; GOMES, A. F. *Termometria Termoelétrica: Termopares*. 2. ed. [S.l.]: PPGEM-UFRGS 1979, 1979. Citado na página 16.
- CARLOS, R. *Microcontroladores Pic*. [S.l.]: Ayerve, 2004. Citado na página 26.
- Deceglie, M. G.; Micheli, L.; Muller, M. Quantifying soiling loss directly from pv yield. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2018. v. 8, n. 2, p. 547–551, March 2018. ISSN 2156-3403. Citado na página 21.
- Digi. *XBee-PRO 802.15.4 through-hole module w/ wire antenna*. 2019. Disponível em: <<https://www.digi.com/products/models/xbp24cawit-001>>. Acesso em: 17 dez. 2019. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 25.
- DUARTE, M. H. C. et al. Eficiência de placas fotovoltaicas relacionado a limpeza. In: *Congresso Mineiro de Engenharias e Arquitetura CENAR*. Patos de Minas: [s.n.], 2015. v. 1, n. 1. ISSN 2525-6424. Citado na página 15.
- Energia Solar. *Tipos de Células Fotovoltaicas*. 2016. Disponível em: <<https://pt.solar-energia.net/energia-solar-fotovoltaica/tipos-celulas-fotovoltaicas>>. Acesso em: 25 nov. 2019. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 20.
- FREIRE, L. A. D. *Desenvolvimento de um piranômetro fotovoltaico*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Pernambuco, 2008. Citado 3 vezes nas páginas 8, 22 e 29.
- IRENA. *International Renewable Energy Agency*. 2018. Disponível em: <<http://resourceirena.irena.org/gateway/dashboard/index.html>>. Acesso em: 17 nov. 2018. Citado na página 14.
- JUCÁ, S. Apostila de microcontroladores pic e periféricos. *Instituto Federal (IF), sd*, 2011. 2011. Citado na página 27.
- JÚNIOR, J. G. S.; CRUZ, S. R.; AMARAL, L. S. Impacto da sujeira sobre o desempenho de sistemas fotovoltaicos. In: *VII Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS 2018*. Gramado: [s.n.], 2018. Citado na página 15.

- KUMAR, A. et al. Smart irrigation using low-cost moisture sensors and xbee-based communication. In: IEEE. *IEEE Global Humanitarian Technology Conference (GHTC 2014)*. [S.l.], 2014. p. 333–337. Citado na página 25.
- MARQUES, A. E. B. *Dispositivos semicondutores: diodos e transistores*. [S.l.]: Saraiva Educação SA, 1996. Citado na página 18.
- MAYALARP, V. et al. Wireless mesh networking with xbee. In: *2nd ECTI-Conference on Application Research and Development (ECTI-CARD 2010), Pattaya, Chonburi, Thailand*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 10–12. Citado na página 24.
- MONTEITH, J. Solarimeter for field use. *Journal of Scientific Instruments*, 1959. IOP Publishing, v. 36, n. 8, p. 341, 1959. Citado na página 16.
- MUNTWYLER, U.; SCHUEPBACH, E.; LANZ, M. Infrared (ir) drone for quick and cheap pv inspection. In: *Proceedings of the 31st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1804–1806. Citado 3 vezes nas páginas 8, 20 e 21.
- MURPHY, N.; BARR, M. Watchdog timers. *Embedded Systems Programming*, 2001. v. 14, n. 11, p. 79–80, 2001. Citado na página 26.
- NASCIMENTO, C. A. D. Princípio de funcionamento da célula fotovoltaica. *Diss. Universidade Federal de Lavras*, 2004. 2004. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 18.
- NAZIAZENO, R. N. *Construção, calibração e análise de desempenho de um piranômetro de baixo custo, baseado no modelo Kimball-Hobbs*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2009. Citado 3 vezes nas páginas 8, 15 e 22.
- ONUDI. *Curso online gratuito sobre Energias Renováveis*. 2013. Citado na página 14.
- PEREIRA, E. B. et al. *Atlas Brasileiro de Energia Solar*. [S.l.]: Inpe São José dos Campos, 2006. Citado na página 14.
- PEREIRA, E. B. et al. *Atlas Brasileiro de Energia Solar*. 2. ed. [S.l.]: Inpe São José dos Campos, 2017. ISBN 978-85-17-00089-8. Citado na página 15.
- PINTO, P. *Instrumentos digitais endereçáveis com base na tecnologia 1-wire™*. 2005. Tese (Doutorado) — Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola)-Universidade Federal de Viçosa ..., 2005. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 23.
- Portal Solar. *Tudo sobre a eficiência do painel solar*. 2019. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/tudo-sobre-a-eficiencia-do-painel-solar.html>>. Acesso em: 17 dez. 2019. Citado na página 19.
- Solarvolt. *Células Orgânicas Produzidas em Território Nacional: Conheça o Trabalho do CSEM Brasil*. 2015. Disponível em: <https://www.solarvoltenergia.com.br/blog/celulas-organicas-csem-brasil/?fbclid=IwAR0JtattlkaWJ6A_tHjUfAID8VC8uDfo8Im2qpEvgy2GdF_eyRAqCHzYDbk>. Acesso em: 27 nov. 2019. Citado na página 20.
- SOUZA, D. J. de. *Desbravando o PIC: ampliado e atualizado para PIC 16F628A*. [S.l.]: Saraiva Educação SA, 2005. Citado na página 29.

TAYLOR, M.; RALON, P.; ILAS, A. The power to change: solar and wind cost reduction potential to 2025. *International Renewable Energy Agency (IRENA)*, 2016. 2016. Citado na página 14.

TESSARO, A. R.; SOUZA, S. N. et al. Desempenho de um painel fotovoltaico acoplado a um rastreador solar. *Proceedings of the 6. Encontro de Energia no Meio Rural*, 2006. SciELO Brasil, 2006. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 20.

VILLAVA, M.; GAZOLI, J. *Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações. 1.* [S.l.: s.n.], 2012. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 19.

ZHAO, J. et al. 19.8% efficient “honeycomb” textured multicrystalline and 24.4% monocrystalline silicon solar cells. *Applied Physics Letters*, 1998. AIP, v. 73, n. 14, p. 1991–1993, 1998. Citado na página 19.

Apêndices

Anexos