

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS**  
**INSTITUTO DE COMPUTAÇÃO**  
**COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INFORMÁTICA**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA IOT DE BAIXO CUSTO  
PARA MONITORAMENTO INTEGRADO DE VARIÁVEIS  
CLIMÁTICAS E DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA**

**MESTRANDO**

**GUSTAVO COSTA GOMES DE MELO**

**ORIENTADORES**

**PROF. DR. ERICK ANDRADE BARBOZA**

**PROF. DR. DAVI BIBIANO BRITO**

**MACEIÓ, AL**  
**ABRIL DE 2021**

**Catálogo na fonte**  
**Universidade Federal de Alagoas**  
**Biblioteca Central**  
**Divisão de Tratamento Técnico**

Bibliotecário: Marcelino de Carvalho Freitas Neto – CRB-4 - 1767

M528d Melo, Gustavo Costa Gomes de.  
Desenvolvimento de sistema IoT de baixo custo para monitoramento integrado de variáveis climáticas e de geração fotovoltaica / Gustavo Costa Gomes de Melo. – 2021.  
73 f. : il.

Orientador: Erick Andrade Barboza.

Orientador: Davi Bibiano Brito.

Dissertação (mestrado em Informática) - Universidade Federal de Alagoas. Instituto de Computação. Maceió, 2021.

Bibliografia: f. 58-63.

1. Variáveis climáticas - Monitoramento. 2. Aquisição de dados. 3. Energia - Fontes alternativas. I. Título.

CDU: 004:681.34



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS/UFAL  
**Programa de Pós-Graduação em Informática – PPGI**  
**Instituto de Computação/UFAL**  
Campus A. C. Simões BR 104-Norte Km 14 BL 12 Tabuleiro do Martins  
Maceió/AL - Brasil CEP: 57.072-970 | Telefone: (082) 3214-1401



## Folha de Aprovação

GUSTAVO COSTA GOMES DE MELO

### DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA IOT DE BAIXO CUSTO PARA MONITORAMENTO INTEGRADO DE VARIÁVEIS CLIMÁTICAS E DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA

Dissertação submetida ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Informática da Universidade Federal de Alagoas e aprovada em 28 de abril de 2021.

#### Banca Examinadora:

*Erick de A. Barboza*

**Prof. Dr. ERICK DE ANDRADE BARBOZA**  
UFAL – Instituto de Computação  
**Orientador**

*Bruno C.S. Nogueira*

**Prof. Dr. BRUNO COSTA E SILVA NOGUEIRA**  
UFAL – Instituto de Computação  
**Examinador Interno**

*MB*

Assinado de forma digital por MAURICIO  
BELTRAO DE ROSSITER CORREA:84149175420  
Dados: 2021.04.28 15:13:05 -03'00'

**Prof. Dr. MAURÍCIO BELTRÃO DE ROSSITER CORREA**  
UFCG- Universidade Federal de Campina Grande  
**Examinador Externo**

## Resumo

A participação das energias renováveis na geração de eletricidade vem crescendo em todo o mundo. O monitoramento e a aquisição de dados são essenciais para reconhecer os recursos renováveis disponíveis no local, avaliar a eficiência da conversão elétrica, detectar falhas e otimizar a produção elétrica. Os sistemas comerciais para o monitoramento de sistemas fotovoltaicos são geralmente caros e fechados para modificações. Este trabalho propõe um sistema IoT em tempo real e de baixo custo, para sistemas de micro e mini geração fotovoltaica, que pode monitorar tensão contínua, corrente contínua, potência (corrente alternada) e sete variáveis meteorológicas. O sistema proposto mede todas as variáveis meteorológicas relevantes, mede variáveis de geração fotovoltaica diretamente da planta (não do inversor), é implementado usando software aberto, conecta-se com a internet sem fios, armazena dados localmente e na nuvem, e usa Network Time Protocol (NTP) para sincronizar os relógios dos dispositivos. Segundo nossa revisão sistemática da literatura, nenhum outro trabalho apresenta todas essas características. Além disso, os experimentos realizados com o sistema proposto mostraram boa eficácia e confiabilidade. Este sistema permite o uso de *fog* e computação em nuvem em um sistema fotovoltaico, e a criação de um conjunto de dados de medições de séries temporais, que permite o uso de aprendizado de máquina para criar sistemas fotovoltaicos inteligentes.

**Palavras-chaves:** monitoramento, sistema de aquisição de dados, energia renovável.

## Abstract

The share of renewable energies in electricity generation has been growing worldwide. Monitoring and acquiring data is essential to recognize the renewable resources available on-site, evaluate the efficiency of electrical conversion, detect failures and optimize electrical production. Commercial monitoring systems for the photovoltaic system are generally expensive and closed for modifications. This work proposes a low-cost real-time IoT system, for micro and mini photovoltaic generation systems, that can monitor DC voltage and current, AC power, and seven meteorological variables. The proposed system measures all the relevant meteorological variables, measures PV generation variables directly from the plant (not from the inverter), is implemented using open software, connects with the internet without cables, stores data locally and in the cloud, and uses Network Time Protocol (NTP) to synchronize the devices' clocks. According to a systematic literature review, no work reported in the literature presents these features altogether. Besides, experiments carried out with the proposed system showed good effectiveness and reliability. This system enables the use of fog and cloud computing in a photovoltaic system, and the creation of a time series measurements dataset, which enables the use of machine learning to create smart photovoltaic systems.

**Keywords:** monitoring; data acquisition systems; renewable energy.

## Lista de Símbolos

$\beta$	Constante do NTC;
$CP$	Pulsos acumulados;
$G$	Irradiância;
$h$	Umidade;
$He$	Aquecimento do módulo PV;
$I_b$	Corrente da bateria;
$I_{CA}$	Corrente alternada;
$I_{CC}$	Corrente contínua;
$I_{MPP}$	Corrente no MPP;
$I_{OC}$	Corrente de circuito aberto;
$I_{SC}$	Corrente de curto-circuito;
$K$	Constante de calibração do piranômetro;
$mV$	Tensão em milivolts;
$n$	Número de amostras;
$p$	Pressão atmosférica;
$P$	Período;
$P_{CA}$	Potência em corrente alternada;
$P_{CC}$	Potência em corrente contínua;
$P_{MPP}$	Potência no MPP;
$r$	Raio;
$R$	Resistência ou resistor;
$R_{25}$	Resistência do NTC na temperatura de referência;
$R_a$	Chuva;
$RPM$	Rotações por minuto;
$T_{25}$	Temperatura de referência do NTC;
$T_a$	Temperatura ambiente;
$T_m$	Temperatura do módulo PV;
$V_b$	Tensão da bateria;
$V_{CA}$	Tensão alternada;

$V_{CC}$	Tensão contínua;
$V_{MPP}$	Tensão no MPP;
$V_{OC}$	Tensão de circuito aberto;
$V_{SC}$	Tensão de curto-circuito;
$W_d$	Direção do vento;
$W_s$	Velocidade do vento;
$x_i$	I-ésima amostra do sistema proposto;
$y_i$	I-ésima amostra do CR1000.

## Lista de Abreviaturas e Siglas

ACK	<i>Acknowledgement;</i>
A/D	<i>Analógico/Digital;</i>
ADC	<i>Analog-to-Digital Converter;</i>
ANELL	<i>Agência Nacional de Energia Elétrica;</i>
CA	<i>Corrente Alternada;</i>
CC	<i>Corrente Contínua;</i>
CI	<i>Circuito Integrado;</i>
CRC	<i>Cyclic Redundancy Check;</i>
cRIO	<i>CompactRIO;</i>
CSV	<i>Comma-Separated Values;</i>
DL	<i>Data Logger;</i>
DPS	<i>Dispositivo de Proteção contra Surtos;</i>
GPRS	<i>General Packet Radio Service;</i>
GPIO	<i>General Purpose Input/Output;</i>
GCP	<i>Google Cloud Platform;</i>
I2C	<i>Inter-Integrated Circuit;</i>
IDE	<i>Integrated Development Environment;</i>
IoT	<i>Internet of Things;</i>
MAE	<i>Mean Absolute Error;</i>
MCU	<i>Microcontroller Unit;</i>
MPP	<i>Maximum Power Point;</i>
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracker;</i>
MQTT	<i>Message Queuing Telemetry Transport;</i>
NTC	<i>Negative Temperature Coefficient;</i>
NTP	<i>Network Time Protocol;</i>
PCB	<i>Printed Circuit Board;</i>
PGA	<i>Programmable Gain Amplifier;</i>
P&O	<i>Pertube and Observer;</i>
PTP	<i>Precision Time Protocol;</i>

PV	<i>Photovoltaic;</i>
PVDL	<i>PV Generation Data Logger;</i>
RF	<i>Radiofrequência;</i>
RFID	<i>Radio Frequency Identification;</i>
RMSD	<i>Root Mean Square Deviation;</i>
RTC	<i>Real-Time Clock;</i>
SD	<i>Secure Digital;</i>
SDK	<i>Software Development Kit;</i>
SPI	<i>Serial Peripheral Interface;</i>
SPS	<i>Samples Per Second;</i>
SSDL	<i>Solarimetric Station Data Logger;</i>
STC	<i>Standard Testing Conditions;</i>
UFAL	<i>Universidade Federal de Alagoas;</i>
USB	<i>Universal Serial Bus;</i>
WAPE	<i>Weighted Absolute Percent Error.</i>

## Lista de Figuras

1	Representação da junção P-N. [Wik21] . . . . .	7
2	Representação de uma curva I-V de um módulo PV. [Autorial] . . . . .	8
3	Exemplo do efeito da irradiância na curva I-V para uma temperatura constante. [Autorial] . . . . .	11
4	Exemplo do efeito da temperatura na curva I-V para uma irradiância constante. [Autorial] . . . . .	11
5	Visão geral do sistema proposto. [Autorial] . . . . .	22
6	Diagrama representando a metodologia seguida. [Autorial] . . . . .	23
7	Placa de desenvolvimento WiFi LoRa 32 (V2). [Ali21] . . . . .	26
8	Diagrama simplificado do SSDL, com ênfase nos sensores e componentes para aquisição de dados. [Autorial] . . . . .	29
9	Circuito divisor de tensão para leitura de sensores analógicos. [Autorial] . . . . .	32
10	Diagrama simplificado do PVDL, com ênfase nos transdutores e componentes para aquisição de dados. [Autorial] . . . . .	33
11	Placa de aquisição de dados da estação solarimétrica (SSDL). [Autorial] . . . . .	36
12	Placa de aquisição de dados da geração PV (PVDL). [Autorial] . . . . .	36
13	Diagrama simplificado que representa a operação dos dispositivos DLs. [Autorial] . . . . .	38
14	Estrutura proposta de <i>payload</i> LoRa. [Autorial] . . . . .	41
15	Diagrama representando a arquitetura IoT. [Autorial] . . . . .	43
16	Página inicial da aplicação Web, exibindo o submenu. [Autorial] . . . . .	44
17	Página da aplicação web para monitoramento em tempo real da estação solarimétrica. [Autorial] . . . . .	45
18	Página da aplicação web para consultar o histórico de dados de geração PV. [Autorial] . . . . .	46
19	Sistema proposto instalado. (a) Estação solarimétrica, com ênfase em seu <i>data logger</i> e sensores. (b) Gabinete com os transdutores e o PVDL. [Autorial] . . . . .	50

20	Comparação gráfica dos dados obtidos durante uma semana (1 de março a 7 de março de 2021) pelo sistema proposto (azul) e pelo CR1000 (vermelho). Os gráficos mostram as seguintes medidas: <b>(a)</b> temperatura ambiente, <b>(b)</b> temperatura do módulo PV, <b>(c)</b> irradiância, <b>(d)</b> potência CA, <b>(e)</b> corrente da String 1, <b>(f)</b> corrente da String 2. [Autorial] . . . . .	54
20	(continuação) <b>(g)</b> tensão da String 1, <b>(h)</b> tensão da String 2. [Autorial] . . . . .	55
21	Esquemático do SSDL - Parte 1. . . . .	67
22	Esquemático do SSDL - Parte 2. . . . .	68
23	Esquemático do SSDL - Parte 3. . . . .	69
24	Esquemático do PVDL - Parte 1. . . . .	70
25	Esquemático do PVDL - Parte 2. . . . .	71
26	Esquemático do PVDL - Parte 3. . . . .	72
27	Esquemático do PVDL - Parte 4. . . . .	73

## Lista de Tabelas

1	Comparação técnica entre o sistema proposto e trabalhos relacionados da literatura. [Autorial] . . . . .	16
2	Especificações técnicas do WiFi LoRa 32 (V2). [Hel21] . . . . .	27
3	Relação entre resistência e direção do indicador de direção do vento. [Autorial]	31
4	Faixa de leitura e precisão do ADC1115 para cada nível do PGA. [Ins21b] .	31
5	Bit-packing para diferentes tipos de dados. [Autorial] . . . . .	42
6	Dados elétricos por <i>string</i> . [Igor Torres] . . . . .	48
7	Especificações do Inversor PHB5000D-NS. [Sol21] . . . . .	49
8	Tamanho do <i>payload</i> em bytes, considerando diferentes protocolos. [Autorial]	51
9	Comparação estatística entre as medidas do sistema proposto e o CR1000 considerando os 16 dias de experimento e três tipos de métricas: MAE, RMSD e WAPE. [Autorial] . . . . .	53

# Conteúdo

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Motivação . . . . .	2
1.2	Questão de pesquisa e hipóteses . . . . .	2
1.3	Objetivo geral e específico . . . . .	3
1.4	Justificativa . . . . .	4
<b>2</b>	<b>Referencial Teórico</b>	<b>6</b>
2.1	História dos módulos fotovoltaicos . . . . .	6
2.2	Elementos e estrutura de um sistema fotovoltaico . . . . .	9
2.3	Impacto das variáveis meteorológicas na geração fotovoltaica . . . . .	10
2.4	Impacto do sistema fotovoltaico na rede elétrica . . . . .	12
<b>3</b>	<b>Trabalhos Relacionados</b>	<b>14</b>
3.1	Trabalhos da literatura que tratam sobre o monitoramento de plantas fotovoltaicas . . . . .	14
3.2	Soluções comerciais para o monitoramento de sistemas fotovoltaicos . . . . .	20
<b>4</b>	<b>Solução proposta</b>	<b>22</b>
4.1	Metodologia . . . . .	23
4.1.1	Pesquisa bibliográfica . . . . .	23
4.1.2	Hardware . . . . .	24
4.1.3	Software . . . . .	24
4.1.4	Integração IoT e aplicação web . . . . .	25
4.1.5	Experimento e validação . . . . .	25
<b>5</b>	<b>Projeto e Desenvolvimento do <i>Hardware</i> dos Dispositivos <i>Data Loggers</i></b>	<b>26</b>
5.1	Componentes base dos <i>Data Loggers</i> . . . . .	26
5.2	Cadeia de medição do <i>data logger</i> da estação solarimétrica . . . . .	28
5.2.1	Sensores . . . . .	29
5.2.2	Processamento analógico e conversão analógico/digital . . . . .	31
5.3	Cadeia de medição do <i>data logger</i> da geração fotovoltaica . . . . .	33

5.3.1	Transdutores . . . . .	33
5.3.2	Processamento analógico e conversão analógico/digital . . . . .	34
5.4	Design e projeto das placas de circuito impresso . . . . .	34
5.5	Montagem das placas de circuito impresso . . . . .	35
<b>6</b>	<b>Projeto e Desenvolvimento do <i>Software</i></b>	<b>37</b>
6.1	Desenvolvimento do <i>software</i> dos <i>data loggers</i> . . . . .	37
6.2	Operação dos <i>data loggers</i> . . . . .	37
6.3	Protocolo LoRa . . . . .	40
6.4	Arquitetura e aplicação da internet das coisas . . . . .	42
6.5	Aplicação WEB . . . . .	44
<b>7</b>	<b>Resultados e Discussões</b>	<b>47</b>
7.1	Descrição e comparação de custos . . . . .	47
7.2	Resultados experimentais . . . . .	48
7.2.1	Operação e confiabilidade do sistema . . . . .	50
7.2.2	Precisão do sistema . . . . .	52
<b>8</b>	<b>Considerações Finais</b>	<b>56</b>
<b>A</b>	<b>Protocolo de revisão sistemática</b>	<b>64</b>
<b>B</b>	<b>Esquemáticos do SSDL e do PVDL</b>	<b>67</b>

# 1 Introdução

A participação das energias renováveis na geração de eletricidade vem crescendo em todo o mundo. Em 2019 houve um aumento de 200 gigawatts de energias renováveis na matriz energética mundial, sendo a energia fotovoltaica responsável por 57,5% deste aumento segundo [REN20]. Os sistemas de pequeno e médio portes de geração fotovoltaica distribuída foram os que mais cresceram. No Brasil, ao final de 2020, a geração distribuída representou 59% das fontes fotovoltaicas instaladas, com um crescimento de 107% em relação a 2019, enquanto a geração centralizada teve um acréscimo de somente 24% [ABS21].

A expansão de energias renováveis distribuídas trazem diversos benefícios, como menor impacto ambiental, redução da emissão de gás carbônico e menor degradação da fauna e da flora. Em relação a impactos sociais, esse tipo de sistema de geração pode ser empregado em locais remotos que não possuem acesso à rede elétrica, possibilitando o acesso também à comunicação, à educação e à melhoria da produção agrícola. Devido ao crescimento do mercado que é formado principalmente por pequenas e médias empresas, as energias renováveis, em especial a energia solar, tendem a gerar mais empregos do que a geração de energia não-renovável e sistemas menos centralizados podem produzir mais oportunidades.

Uma das principais características dos sistemas PV (do inglês *photovoltaic*) é a forte dependência entre as condições climatológicas e a geração de energia elétrica. Fatores como a disponibilidade de luz solar, a temperatura e outros fatores climáticos não controláveis afetam diretamente a produção de energia [C+17]. Em sistemas fotovoltaicos centralizados de grande e médio porte, muitos dos esforços e recursos são empregados no monitoramento e aquisição de dados, que é essencial para reconhecer os recursos renováveis disponíveis no local, avaliar a eficiência de conversão elétrica, detectar falhas e otimizar a produção elétrica [FBJC+17].

Em pequenos sistemas fotovoltaicos, o alto custo da implantação desse monitoramento geralmente torna a sua realização inacessível, podendo levar a situações em que não é possível detectar falhas como: perda de eficiência, picos e quedas de tensão, e inserção de harmônicos na rede [BKN+12, AS11]. Essas falhas podem prejudicar o funcionamento do sistema fotovoltaico ou até causar danos à rede elétrica que o sistema está conectado [LVFV18].

A aplicação do conceito de internet das coisas (IoT, do inglês *Internet of Things*) aos

dispositivos de monitoramento pode trazer diversos benefícios, como o acesso aos dados em tempo real, gerenciamento remoto dos dispositivos, redução de custos e fornecer escalabilidade ao sistema. Além disso, permite a integração dos dispositivos à *Smart Grid* melhorando as habilidades de processamento, recuperação de falhas e confiabilidade do sistema fotovoltaico [Gha19].

Este trabalho apresenta o projeto, desenvolvimento e validação de um sistema de aquisição de dados IoT e de baixo custo, com foco no monitoramento em tempo real da geração de energia fotovoltaica e dos principais fatores meteorológicos que influenciam a geração. A proposta consiste em três elementos principais: 1) dois dispositivos *data loggers* para aquisição de dados, um para dados meteorológicos e outro para dados de geração PV; 2) um sistema de nuvem IoT que processa e armazena os dados obtidos; 3) e um aplicativo da web que exibe os dados em tempo real e os dados anteriores coletados.

Esta proposta faz parte do projeto de Eficiência Energética e Minigeração na UFAL, que é um projeto de pesquisa e desenvolvimento da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) com participação da Universidade Federal de Alagoas (UFAL) e da Equatorial Energia.

## 1.1 Motivação

A principal motivação é fornecer uma solução alternativa para sistemas de monitoramento comerciais, que seja de baixo custo, em tempo real, permita modificações e que traga melhorias em relação ao *software*, ao *hardware*, e à arquitetura do sistema. A intenção é aplicar o sistema desenvolvido para o monitoramento da miniusina da UFAL, que também pertence ao projeto Eficiência Energética e Minigeração na UFAL.

A mini usina será instalada no Campus A. C. Simões localizado na cidade de Maceió, na região nordeste do Brasil. O sistema será composto por 406 módulos PV, que serão divididos em 20 *strings*, e 5 inversores com MPPT integrado, cada inversor será conectado a 4 *strings*. A capacidade de geração será de até 134 kWp de potência.

## 1.2 Questão de pesquisa e hipóteses

A questão de pesquisa deste trabalho é a seguinte:

"É possível desenvolver um sistema de monitoramento de geração fotovoltaica completo,

custando menos que sistemas comerciais e em tempo real que seja uma alternativa aos sistemas comerciais?"

Duas hipóteses foram propostas para responder questão:

- Hipótese nula: sim, utilizando *hardware* e *software* de baixo custo e *open-source*;
- Hipótese alternativa: desenvolver um sistema completo e em tempo real requer componentes com alto custo.

O tratamento utilizado para tornar a hipótese nula válida será desenvolver do zero o *hardware*, *software* e a arquitetura do sistema, visando atingir as características desejadas.

### **1.3 Objetivo geral e específico**

Este trabalho apresenta como objetivo geral o projeto, o desenvolvimento e a validação de um sistema para monitoramento e análise de mini e micro sistemas fotovoltaicos que possua no mínimo as seguintes características:

- Baixo custo: utilizar *hardware* e *software* de baixo custo, fazendo com que o sistema final seja acessível economicamente aos usuários e seja compatível com o custo de micro e mini sistemas PV;
- Monitoramento completo: realizar o monitoramento da geração PV e dos principais fatores meteorológicos que influenciam a geração PV;
- Sensores dedicados: empregar sensores próprios para realizar o monitoramento dos fatores de geração PV e meteorológicos, sendo independente de sistemas externos;
- Tempo real: o sistema deve utilizar ferramentas IoT para fornecer em tempo real os dados coletados.

Já os objetivos específicos do trabalho são:

- Projetar e desenvolver o *hardware* e o *software* dos dispositivos de monitoramento visando o baixo custo e o tempo real;

- Disponibilizar os dados em tempo real ao integrar os dispositivos com um sistema em nuvem;
- Testar os dispositivos desenvolvidos em condições reais;
- Validar os dados coletados pelo sistema desenvolvido ao compará-los com os dados obtidos por outras soluções.

## 1.4 Justificativa

O monitoramento da geração elétrica é fundamental para garantir a sustentabilidade de um sistema de energia renovável. Primeiramente, sistemas de monitoramento permitem analisar locais e ambientes onde se pretende instalar plantas fotovoltaicas, avaliando a disponibilidade do recurso solar e possibilitando melhores escolhas em relação ao local de instalação, inclinação e orientação dos módulos PV, às configurações das *strings* e outras decisões da pré-instalação.

Além disso, o monitoramento de sistemas PV torna possível a otimização do processo de produção e da confiabilidade, aumentando a vida útil de seus elementos, ao mesmo tempo, reduzindo os custos de operação e manutenção. O monitoramento também é essencial para detecção de falhas, permitindo a localização e mitigação mais rápida, e consequentemente reduz as perdas de receita e o tempo de inatividade da planta PV.

Até onde sabemos, este é o primeiro sistema de monitoramento fotovoltaico proposto que agrega todos os seguintes recursos:

- Medições de todas as variáveis meteorológicas relevantes;
- Implementação com *software* aberto;
- LoRa como a tecnologia de transmissão de dados e conexão com a internet sem cabos;
- Armazenamento de dados localmente e na nuvem;
- Network Time Protocol (NTP) para sincronizar os relógios dos dispositivos;
- Variáveis de geração de PV medidas diretamente da planta, não do inversor.

O desenvolvimento de hardware foi focado na flexibilidade e redução de custos. Além disso, com a aplicação do sistema IoT em nuvem, o sistema proposto permite controle remoto, acesso em tempo real aos dados e escalabilidade. Considerando essas características, o sistema se torna uma boa alternativa para o monitoramento de sistemas PV, desde pequeno porte até de médio ou grande porte.

Vale ressaltar que este é um sistema capacitador para a criação de sistemas fotovoltaicos inteligentes, pois, fornece uma arquitetura IoT que pode ser adaptada para ter técnicas de aprendizado de máquina executadas usando os paradigmas de computação em nuvem ou *fog*. Além disso, os dados obtidos pelo sistema podem ser empregados em aplicações para detecção automática de falhas e previsão de geração de energia.

O resto da dissertação está estruturada da seguinte forma. Capítulo 2 apresenta alguns conceitos básicos para um melhor entendimento deste trabalho. Capítulo 3 detalha algumas das soluções propostas encontradas na literatura ou comercialmente para o monitoramento de sistemas PV. A metodologia utilizada, incluindo uma visão geral da proposta, é apresentada no Capítulo 4. O *hardware* e o *software* projetados e desenvolvidos são detalhados nos Capítulos 5 e 6, respectivamente. O Capítulo 7 contém os resultados do trabalho desenvolvido e as discussões derivadas. A dissertação é concluída no Capítulo 8 com as considerações finais e sugestões de trabalhos futuros.

## 2 Referencial Teórico

Neste capítulo será apresentado o referencial teórico para um melhor entendimento do problema em estudo. Serão discutidos a história dos módulos fotovoltaicos, a estrutura e os elementos mais importantes de um sistema fotovoltaico, o impacto que algumas variáveis meteorológicas causam à geração PV e os problemas que a inserção de um sistema PV pode causar na rede de distribuição elétrica.

### 2.1 História dos módulos fotovoltaicos

O módulo PV é um dispositivo capaz de gerar energia elétrica através do efeito fotovoltaico que ocorre quando certos materiais produzem corrente elétrica ao serem expostos a uma fonte de luz. Esse fenômeno foi descoberto em 1839 pelo físico francês Edmond Becquerel. Becquerel colocou dois eletrodos de platina revestidos em um recipiente com um eletrólito e descobriu que a força da corrente mudou quando o recipiente foi exposto à luz.

Em 1873, o engenheiro britânico Willoughby Smith e seu assistente Joseph May descobriram que o selênio semicondutor mudou sua resistência quando exposto à luz. Eles viram assim, pela primeira vez, o foto efeito que é relevante para a energia fotovoltaica, onde os elétrons no semicondutor são separados de suas ligações covalentes pela luz, criando transportadores de carga livres no corpo de estado sólido.

Em 1876, os ingleses William Adams e Richard Day descobriram que uma haste de selênio com eletrodos de platina pode produzir energia elétrica quando exposta à luz. Com isso, comprovou pela primeira vez que um sólido pode converter diretamente energia luminosa em energia elétrica.

Em 1883, o inventor Charles Fritts construiu um pequeno módulo de células de selênio com uma área superficial de aproximadamente  $30 \text{ cm}^2$  que teve uma eficiência de quase 1% na conversão fotovoltaica. Ele enviou um módulo para Werner von Siemens (inventor e empresário alemão, 1816-1892) para avaliação. Siemens reconheceu a importância da descoberta e declarou à Real Academia da Prússia que considerou como a primeira demonstração da conversão direta de luz em eletricidade.

Nos anos seguintes, a física do foto efeito foi melhor explorada, em parte devido a Albert Einstein (1879-1955), que apresentou sua teoria quântica em 1905, utilizada para explicar

a natureza da luz. Ao mesmo tempo, houve avanços tecnológicos em 1916, quando o químico polaco Jan Czochralski, da AEG Company, descobriu o processo de crescimento de cristais. Com o processo Czochralski tornou-se possível produzir cristais de semicondutores monocristalinos de alta qualidade.

Em 1950, o co-inventor do transistor, William B. Shockley (1910-1989), apresentou uma explicação do método de funcionamento da junção P-N e, assim, definiu as bases teóricas das células solares usadas hoje. Com esta base, Daryl Chapin, Calvin Fuller e Gerald Pearson no Bell Labs desenvolveram em 1954 a primeira célula solar de silício com uma área de  $2 \text{ cm}^2$  e uma eficiência da conversão fotovoltaica de até 6%.

Atualmente a maioria dos módulos fotovoltaicos são formados por células PV constituídas por uma junção P-N de silício cristalino. A junção P-N é composta por duas camadas de silício. Uma das camadas é dopada com um elemento que possui mais elétrons na camada de valência que o silício, sendo chamada de camada tipo N. Com a dopagem, a camada tipo N apresenta elétrons livres que possuem uma fraca ligação atômica. A segunda camada é conhecida por tipo P. Ela é dopada com um elemento que possui uma menor quantidade de elétrons na camada de valência, formando lacunas devido à falta de elétrons para completar as ligações atômicas.

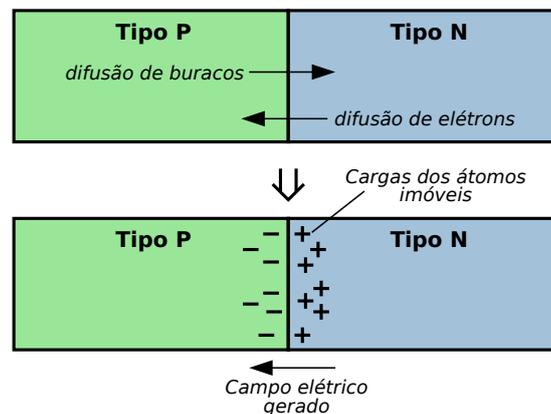


Figura 1: Representação da junção P-N. [Wik21]

Quando a junção P-N é formada, os elétrons da camada N passam para camada P preenchendo as lacunas através do processo de difusão como mostrado na Figura 1. Conforme as lacunas próximas da junção P-N vão sendo preenchidas, um campo elétrico começa a surgir, jogando os elétrons para camada N e as lacunas para camada P. O balanço é alcançado quando a difusão e o campo elétrico se anulam. Ao serem expostas à luz, as células absorvem fótons que geram pares de elétron-lacuna na junção. O par é separado pelo campo elétrico fazendo com que os elétrons e as lacunas se movam para os contatos elétricos da célula gerando uma corrente elétrica.

As células PV que constituem os módulos podem ser ligadas em série e/ou em paralelo. A quantidade, o tipo de células e a forma como são ligadas umas às outras definem a corrente e a tensão fornecidas pelo módulo PV. O tipo da célula PV tem um alto impacto na eficiência de geração elétrica e é definido pelo seu processo de fabricação. As células PV comuns atuais possuem entre 15% a 25% de eficiência de conversão, alguns estudos nessa área conseguem ultrapassar esse intervalo gerando módulos muito mais eficientes.

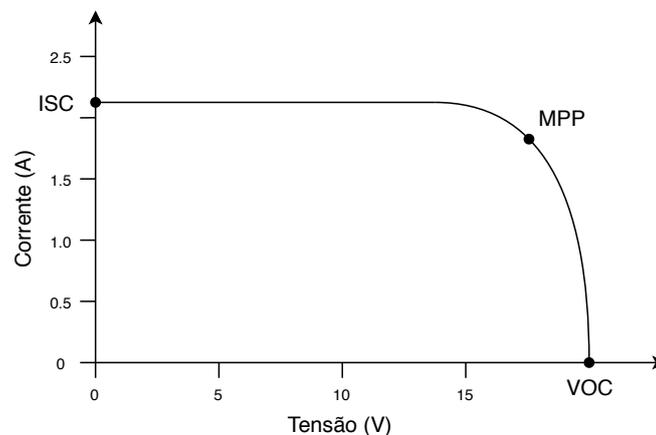


Figura 2: Representação de uma curva I-V de um módulo PV. [Autorial]

O módulo fotovoltaico pode ser caracterizado por uma curva I-V, como a curva mostrada na Figura 2, que relaciona a tensão e a corrente que o módulo pode gerar quando está sob determinadas condições climáticas. Alguns pontos dessa curva são importantes destacar: o ponto de corrente de curto-circuito ( $I_{SC}$ ), o ponto de tensão de circuito aberto ( $V_{OC}$ ) e o ponto onde o módulo apresenta a maior potência de geração (MPP, do inglês *Maximum Power Point*).

A curva I-V de um módulo é definida pelas condições climáticas em que o módulo está

inserido, já o ponto de operação sobre a curva é definido pela carga que o módulo está alimentando. A operação ideal de um módulo ocorre quando ele trabalha no MPP, fornecendo a máxima potência possível. Como normalmente as condições climáticas e a carga não são constantes, torna-se difícil manter a operação do módulo de forma constante em um único ponto.

## 2.2 Elementos e estrutura de um sistema fotovoltaico

O módulo PV é o principal elemento de um sistema PV, utilizado para converter a energia luminosa em energia elétrica. O conjunto de módulos PV conectados em série e/ou em paralelo é conhecido como *string* ou arranjo fotovoltaico. É importante realçar que na associação de módulos fotovoltaicos devem ser utilizados módulos do mesmo tipo, de forma a minimizar as perdas de potência no sistema. A associação em série de módulos PV permite obter tensões mais elevadas, mantendo a corrente estipulada do módulo. Já a conexão em paralelo dos módulos mantém a tensão que pode ser gerada, mas permite a geração de uma corrente mais elevada.

O *Maximum Power Point Tracker* (MPPT) é um dispositivo de extrema importância para elevar a eficiência da geração elétrica. Como o próprio nome indica, o MPPT rastreia o ponto de máxima potência e força que o módulo PV ou a *string*, que estiver conectado a ele, opere o mais próximo possível desse ponto.

Os algoritmos normalmente utilizados no MPPT são dinâmicos permitindo a se adaptarem às mudanças das condições climáticas e da carga do sistema em tempo real. Desses algoritmos, o *Perturb and Observer* (P&O) é o mais utilizado na prática e é um dos métodos mais simples, não necessitando o conhecimento das características do módulo fotovoltaico, podendo ser aplicado a todos os tipos de módulos. A utilização de um MPPT evita a perda de potência e reduz o custo de instalação do sistema PV, já que menos módulos precisam ser utilizados para atingir a potência desejada.

O inversor de potência é um dispositivo elétrico, ou eletromecânico, capaz de converter um sinal elétrico contínuo em um sinal elétrico alternado. No caso dos sistemas PV, os inversores realizam a conversão da geração PV para um sinal elétrico compatível com a rede de distribuição de energia, que no caso de Alagoas é uma tensão alternada de 220 V a 60 Hz trifásica. Atualmente os inversores dedicados para sistemas PV já possuem um MPPT

integrado a eles.

Quadros de proteção realizam a proteção elétrica tanto da parte contínua como da parte alternada do sistema. Esses quadros contêm fusíveis, barramento de aterramento, dispositivo de proteção contra surtos de tensão (DPS), dispositivos de seccionamento, etc.

Alguns sistemas PV podem possuir baterias para armazenar a energia em excesso, quando a produção é alta e a demanda é baixa, e fornecer energia quando não há geração. Esses sistemas também possuem controladores de carga que são responsáveis por gerenciar e condicionar a energia fornecida do sistema para bateria ou da bateria para a rede. Os controladores de cargas podem ser integrados ao inversor e/ou MPPT.

### **2.3 Impacto das variáveis meteorológicas na geração fotovoltaica**

A irradiância solar é uma das variáveis meteorológicas mais importantes, uma vez que a corrente gerada pelo módulo PV é diretamente proporcional à irradiância. A Figura 3 mostra a curva característica de um módulo PV hipotético com o ângulo de incidência e temperatura constantes e com uma variação da irradiância incidente. Pode ser observado que a corrente de curto-circuito aumenta linearmente com a irradiância, enquanto a tensão de circuito aberto se altera pouco. Cerca de 15% a 25% da irradiância incidente é transformada em energia elétrica pelo módulo PV, a eficiência de conversão depende das características físicas do módulo e pode variar com a influência de elementos externos, como temperatura e sujeira.

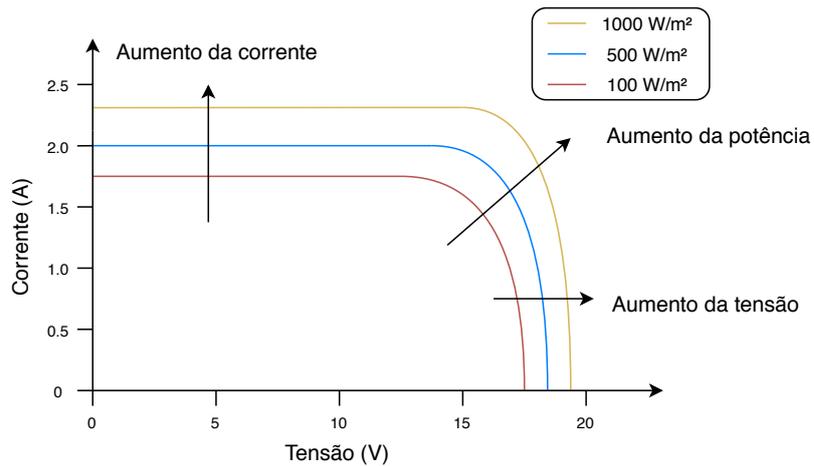


Figura 3: Exemplo do efeito da irradiância na curva I-V para uma temperatura constante. [Autorial]

A temperatura de um módulo fotovoltaico influencia diretamente sua eficiência de conversão fotovoltaica. Foi estimado que 0,5% de eficiência do módulo PV é reduzida com o aumento de 1 °C em sua temperatura [LH11]. A Figura 4 exemplifica esse efeito da temperatura sobre a curva I-V de um módulo PV hipotético com o ângulo de incidência e irradiância incidente constantes. Pode ser observado que há uma queda da tensão gerada com o aumento da temperatura, enquanto a corrente sofre um pequeno aumento.

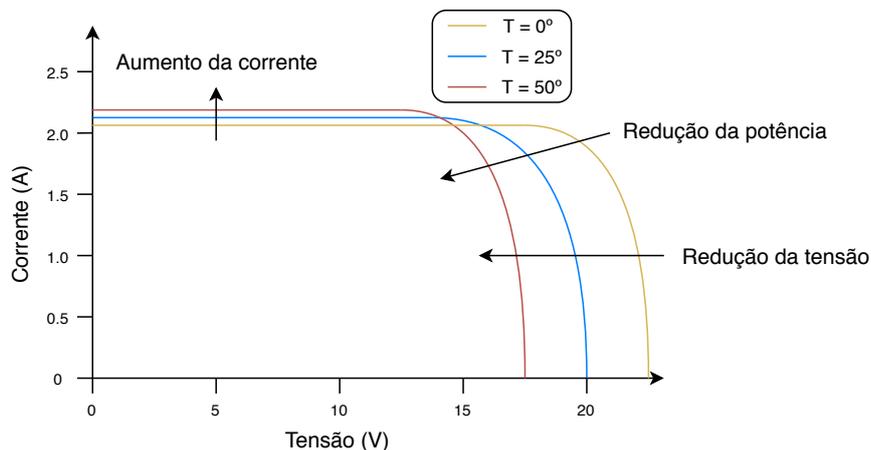


Figura 4: Exemplo do efeito da temperatura na curva I-V para uma irradiância constante. [Autorial]

Os demais fatores climáticos influenciam a geração de forma indireta. O vento, por exemplo, pode ajudar a reduzir a temperatura do módulo fotovoltaico, melhorando sua eficiência.

Já a temperatura ambiente pode resfriar ou esquentar o módulo PV, dependendo do clima do local que ele está instalado.

A umidade do ar pode absorver ou refletir a energia solar, diminuindo a quantidade de irradiação que atinge o módulo fotovoltaico. Segundo [Ama16], o aumento da pressão atmosférica no módulo fotovoltaico melhora sua eficiência de conversão. A chuva pode afetar muitos fatores ao mesmo tempo, como reduzir a irradiação solar e a temperatura do painel. Alguns fatores como a chuva e a umidade também aceleram a degradação do módulo fotovoltaico.

## 2.4 Impacto do sistema fotovoltaico na rede elétrica

Os sistemas de distribuição de energia foram originalmente projetados para facilitar o fluxo de energia da geração para os consumidores através de níveis de tensões decrescentes. A adição de geração fotovoltaica pode causar diversos problemas técnicos devido ao fluxo oposto de energia que é criado. Esses problemas se tornam mais significativos quanto maior é o nível de penetração de energia PV na rede. O nível de penetração é definido como a relação entre a potência nominal fotovoltaica (Wp) e a carga máxima vista no alimentador de distribuição (Watt), e é limitada por certas restrições técnicas relacionadas à operação do sistema de energia elétrica e às classificações dos componentes elétricos. Alguns dos problemas mais relevantes são:

- **Sobretensão:** alteração do perfil de tensão normal da rede devido à exportação do excesso de energia fotovoltaica gerada, pode causar o fluxo reverso de energia danificando equipamentos. A sobretensão é comum acontecer em períodos próximos ao meio-dia onde se tem uma alta geração fotovoltaica, devido à irradiação, e uma baixa demanda de carga.
- **Desequilíbrio de tensão:** ocorre quando a magnitude da tensão entre as três fases difere em amplitude ou as fases se desviam umas das outras da diferença normal de 120 graus. A geração fotovoltaica irregular devido a problemas, como sombreamento parcial do sistema PV, pode causar uma condição de desequilíbrio de tensão na rede.
- **Distorção harmônica:** Os harmônicos são componentes sinusoidais de sinais de tensão ou corrente com a frequência igual a um múltiplo inteiro da frequência fundamen-

tal. Correntes harmônicas se traduzem em tensões harmônicas através da impedância da rede. Tensões e correntes distorcidas no sistema de distribuição podem causar efeitos indevidos na rede, tais como sobrecarga, sobretensão, estresse mecânico na rede, operação não confiável de dispositivos de proteção e redução da eficiência dos equipamentos. A geração harmônica por um sistema fotovoltaico depende principalmente da tecnologia do inversor, do nível de irradiância solar, da temperatura ambiente, das características de carga e das características do sistema de distribuição.

- **Estabilidade de tensão:** A estabilidade de tensão é definida como o estado de operação onde as tensões de todos os barramentos na rede são mantidas em um nível estável e aceitável sob condições operacionais normais ou sob perturbações dentro da norma prescrita. A estabilidade de tensão é alcançada quando a demanda de energia reativa na rede é atendida a partir das gerações. A maior parte dos sistemas fotovoltaicos consomem ou injetam energia reativa na rede, dependendo das perdas da rede e do transformador, da potência ativa de saída do sistema PV e também da tecnologia de conversão. Flutuações na potência de saída podem ser causadas por mudanças rápidas nas condições climáticas, como as coberturas de nuvens, ou pela conexão e desconexão do sistema fotovoltaico.

## 3 Trabalhos Relacionados

Este capítulo detalha trabalhos relacionados encontrados na literatura e sistemas comerciais que possam ser empregados no monitoramento de plantas fotovoltaicas, incluindo discussões das semelhanças e diferenças entre o sistema proposto e os relacionados.

### 3.1 Trabalhos da literatura que tratam sobre o monitoramento de plantas fotovoltaicas

Vários trabalhos relacionados podem ser encontrados na literatura. Apesar das vantagens e avanços dos sistemas da literatura apresentados a seguir, todos eles apresentam pelo menos uma limitação. A tabela 1 apresenta uma comparação de algumas das características técnicas dos sistemas disponíveis na literatura e do sistema proposto neste trabalho.

O sistema de monitoramento proposto em [CMR<sup>+</sup>15] é constituído por dois tipos de dispositivos: *smart meter* e *main brain*. *Smart meter* são os dispositivos responsáveis por monitorar em tempo real os dados de tensão e corrente do sistema PV, enquanto o *main brain* é a central onde os dados coletados pelos dispositivos *smart meter* serão armazenados. Ambos são baseados no MCU ATmega 328P-PU e se comunicam através de uma rede sem fio com radiofrequência (RF) operando a 315 MHz. Os dados podem ser acessados por um aplicativo para dispositivos móveis que se comunica com o *main brain* por Bluetooth (IEEE 802.15.1).

Os autores do trabalho [SCZ<sup>+</sup>17] desenvolveram uma rede de sensores de dois níveis para o monitoramento de sistemas PV. O primeiro nível é formado por nós sensores que monitoram a tensão e a temperatura de cada módulo PV, já o segundo nível é constituído por nós sensores que monitoram irradiância, temperatura ambiente, tensão e corrente de cada *string*. Além disso, os nós do segundo nível mesclam seus dados monitorados com os dados obtidos pelo primeiro nível e os envia para uma central de dados. Os dois níveis se comunicam através de radiofrequência e o segundo nível utiliza ZigBee [All21] para enviar todos os dados coletados para a central.

Irradiância, temperatura do módulo PV, tensão e corrente são os quatro fatores monitorados pelo sistema proposto em [KIA<sup>+</sup>19]. O sistema é constituído pelo microcontrolador 89C51 e por um módulo Xbee. Os dados são enviados para um computador onde são arma-

zenados e podem ser visualizados através de um *software* baseado na ferramenta LabVIEW.

A conexão com a internet é crucial para fornecer o monitoramento dos dados em tempo real e permitir o acesso remoto ao sistema. Em [CMR<sup>+</sup>15], [SCZ<sup>+</sup>17] e [KIA<sup>+</sup>19] os dados estão disponíveis apenas localmente, isso também dificultaria uma integração futura desses sistemas em uma rede *smart grid*. Os sistemas conectados à internet podem ser configurados em duas topologias diferentes: os dispositivos DLs se conectam diretamente à internet ou existem dispositivos intermediários entre a internet e os DLs.

Os autores em [ANH18] desenvolveram uma rede de sensores sem fio baseada no microcontrolador (MCU, do inglês *Microcontroller unit*) ESP8266 para monitorar o sistema fotovoltaico. Cada nó de rede monitora os dados de corrente e tensão de um conjunto de módulos fotovoltaicos e se conecta à internet via Wi-Fi para enviar os dados coletados para a ThingSpeak IoT Platform. O sistema também é capaz de monitorar umidade e temperatura da planta solar.

Em [Swa19] um sistema baseado no ESP8266 foi desenvolvido para realizar o monitoramento da produção energética de sistemas PV. Além dos dados da geração PV, o sistema também coleta os dados da temperatura ambiente a cada 10 segundos. Os dados são enviados a um servidor remoto na nuvem de onde podem ser acessados pelo usuário.

Em [AI17], um serviço web para monitorar os parâmetros elétricos de um sistema fotovoltaico foi implementado diretamente em um ESP32. O ESP32 realiza a aquisição de dados de tensão e corrente e os armazena em um cartão SD (do inglês *Secure Digital*), onde podem ser acessados por meio do serviço web. No entanto, devido ao espaço de armazenamento limitado, os dados são armazenados por apenas uma semana.

Em [PJC19], o sistema proposto é baseado em ESP32 e ESP8266, que se comunicam com um sistema de nuvem não especificado via Wi-Fi. Os dados de temperatura, irradiância, umidade, velocidade do vento e geração PV continua são coletados a cada 47 segundos e disponibilizados por meio de um aplicativo web.

Inicialmente, os *data loggers* da proposta foram configurados para se comunicarem diretamente com a internet via Wi-Fi, semelhante a [ANH18], [Swa19], [AI17] e [PJC19]. No entanto, esta abordagem apresentou uma limitação no posicionamento dos dispositivos DLs devido ao curto alcance do Wi-Fi, portanto, a segunda topologia usando LoRa e Wi-Fi foi adotada na versão atual.

Tabela 1: Comparação técnica entre o sistema proposto e trabalhos relacionados da literatura. [Autoral]

Sistema	Parâmetros Monitorados	Controlador	SW aberto	Transmissão de Dados	Conexão à internet	Armazenamento de Dados	Sincronização	Sensores dedicados	Acesso aos Dados
Aghenta and Iqbal [AI19]	Icc,Vcc,Vb	Arduino Uno	Sim	Serial	Ethernet	Servidor local EmonCMS	Não mencionado	Sim	Aplicação web e <i>mobile</i> EmonCMS
Zago and Fruett [ZF17]	Icc,Vcc	Arduino Uno	Sim	ZigBee	Wi-Fi	Raspberry Pi local	Não mencionado	Sim	Aplicação web
Al-Naima and Hamad [ANH18]	Ta,h,Icc,Vcc	ESP8266	Sim	-	Wi-Fi	Banco de dados na nuvem ThingSpeak	Não mencionado	Sim	Aplicação web
Swart [Swa19]	Ta,Icc,Vcc	ESP8266	Sim	-	Wi-Fi	Banco de dados na nuvem	Não mencionado	Sim	Aplicação web
Ali and Paracha[AP20]	Ta,h,He,Icc,Vcc	Arduino Uno e ES8266	Não mencionado	Não especificado	Wi-Fi	Banco de dados na nuvem	Não mencionado	Sim	Aplicação <i>mobile</i>
Caruso et al. [CMR+15]	Icc,Vcc	ATmega 328P-PU	Sim	315 MHz RF e Bluetooth	Sem conexão	Cartão SD local	Não mencionado	Sim	Aplicação <i>mobile</i>
Ayesh et al. [ARR17]	Voc,Icc,Vsc,Isc	PIC18F4620	Não mencionado	MiWi	Via computador local	Computador local	Não mencionado	Sim	Aplicação web
Xia et al. [XNY+20]	Icc,Vcc	Não especificado	Não mencionado	ZigBee	4G	Banco de dados na nuvem	Não mencionado	Não	Aplicação web e <i>mobile</i>
Su et al. [SCZ+17]	Ta,Tm,G,h,Icc,Vcc	nRF24L01	Não	RF e ZigBee	Sem conexão	Computador local	Não mencionado	Sim	Aplicação no computador local
Allafi and Iqbal [AI17]	Icc,Vcc,Ib,Vb	ESP32	Sim	-	Wi-Fi	Cartão SD local	Não mencionado	Sim	Aplicação web
Adhya et al. [ASD+16]	Tm,G,Icc,Vcc,Ib,Vb	PIC18F46K22	Não	RF	GPRS	Cartão SD local e banco de dados na nuvem	Não mencionado	Sim	Aplicação web
Deriche et al. [DRS19]	Tm	-	Não mencionado	RFID e USB	Não especificado	Banco de dados remoto	Não mencionado	Sim	Aplicação web
Khan et al. [KIA+19]	Tm,G,Icc,Vcc	89C51	Não	ZigBee	Não mencionado	Computador local	Não mencionado	Sim	Aplicação no computador local
Al-Nuaimi et al. [ANASK+18]	Ta,G,Icc,Vcc	Arduino Uno	Sim	Wi-Fi	Wi-Fi	Computador local	Não mencionado	Sim	Aplicação web
Paredes-Parra et al. [PPGSMAMG19]	Ta,Tm,G,Icc,Vcc,Ica,Vca	Arduino Uno	Sim	LoRa	Ethernet	Servidor na nuvem The Things Network	Não mencionado	Sim	Site web The Things Network
Lazzaretti et al. [LCR+20]	Ta,Tm,G,h,Ws,Wd,Icc,Vcc,Ica,Vca	cRIO	Não	-	Ethernet	Banco de dados local	LabVIEW	Sim	Interface Homem-Máquina local
Moreno-Garcia et al. [MGGPPL+16]	Ta,Tm,G,p,Ra,Ws,Wd,Icc,Vcc,Ica,Vca	cRIO	Não	Não especificado	Ethernet	Banco de dados local	PTP	Sim	Aplicação web
Zedak et al. [ZLB+18]	Ta,Tm,G,Icc,Vcc,Ica,Vca	Arduino Uno	Não mencionado	I2C	Não definido	Raspberry Pi local e banco de dados na nuvem	Não mencionado	Sim	Site web do serviço de nuvem
Erraissi et al. [ERA+18]	Ta,Tm,G,Ws,Wd,Icc,Vcc,Pcc,Ica,Vca,Pca	PcDuino	Sim	I2C, SPI, Bluetooth	Ethernet	Cartão SD local	Não mencionado	Não	Aplicação web
Pereira et al. [PJC19]	Ta,Tm,G,h,Ws,Icc,Vcc,Pcc	ESP32 e ESP8266	Sim	-	Wi-Fi	Memória <i>flash</i> local e banco de dados na nuvem	NTP	Não	Aplicação web
<b>Proposed system</b>	<b>Ta,Tm,G,h,Ra,Ws,Wd,Icc,Vcc,Pca</b>	<b>ESP32</b>	<b>Sim</b>	<b>LoRa</b>	<b>Wi-Fi</b>	<b>Cartão SD local e banco de dados na nuvem</b>	<b>NTP</b>	<b>Sim</b>	<b>Aplicação web</b>

Em [AI19] é apresentada uma abordagem IoT que foca no monitoramento da geração PV sem realizar a aquisição de dados meteorológicos. Um Arduino realiza a aquisição de dados do sensor e se comunica com um Raspberry Py por meio de um barramento serial. O Raspberry Pi é conectado à internet por meio de um cabo Ethernet por meio do qual os dados coletados serão enviados para uma plataforma IoT do servidor EmonCMS local, onde serão armazenados e poderão ser acessados.

O sistema proposto em [ZLB+18] monitora tensão, corrente, temperatura e irradiância. Este sistema é baseado em um Arduino e usa um Raspberry Py como *gateway*. Os dois dispositivos se comunicam por meio do protocolo I2C (do inglês *Inter-Integrated Circuit*), enquanto o Raspberry Py se comunica com um serviço de nuvem por meio do protocolo MQTT (do inglês *Message Queuing Telemetry Transport*). Além de armazenar e disponibilizar dados, o serviço na nuvem também pode enviar comandos de configuração aos dispositivos.

Em relação à transmissão de dados entre dispositivos, em [AI19] e [ZLB+18] foram utilizadas comunicações de curta distância com fio, limitando a disposição dos dispositivos e tornando a instalação mais complexa.

O sistema apresentado em [ZF17] possui uma estrutura baseada em redes de sensores sem fio, em que cada nó sensor monitora a corrente e a tensão geradas por um módulo fotovoltaico individual. Um Raspberry Py armazena os dados coletados e uma página HTML permite o acesso aos dados localmente e pela internet. O nó consiste em sensores de tensão e corrente, um módulo Arduino Uno e um módulo XBee ZigBee. Um Raspberry Py integrado com um módulo XBee é usado como um *hub* para receber e armazenar os dados coletados pelos nós, uma página HTML permite acessar os dados tanto localmente quanto via internet.

Em [XNY+20], módulos ZigBee são utilizados para coletar e transmitir os dados dos inversores de um sistema PV, construindo uma rede de sensores local. Um *gateway* 4G é utilizado para conectar a rede local à internet, permitindo acesso remoto aos seus dados. Uma verificação *checksum* de 16 bits é usada para garantir a estabilidade da transmissão de dados e verificar sua integridade.

Tecnologia ZigBee geralmente tem um alcance de 10 a 100 metros e baixo consumo de energia. O LoRa normalmente tem um alcance de 2 a 5 km em áreas urbanas ou 15 km em áreas suburbanas e tem um consumo de energia ainda menor do que o ZigBee. Essas foram

as principais razões para a adoção do LoRa na proposta. No entanto, LoRa tem uma taxa de transferência de dados menor do que a do ZigBee.

LoRa também é usado no sistema implementado em [PPGSMAMG19] para transmissão de dados. O sistema pode monitorar dados elétricos DC e AC, a temperatura dos módulos fotovoltaicos, irradiância, temperatura ambiente e umidade. Um *gateway* LoRa é responsável por disponibilizar os dados em uma rede local para serem acessados a partir de um computador.

Poucos trabalhos da literatura relatam um método para sincronizar os relógios dos dispositivos que compõem o sistema. Isso é importante tanto para sistemas que utilizam um único dispositivo, quanto para sistemas compostos por vários dispositivos. A sincronização do relógio permite que as medições tenham um *timestamp* correto e representem com precisão os eventos no sistema PV, e em sistemas com múltiplos dispositivos permite sincronizar a realização das medições.

Um sistema para detecção de falhas em sistemas PV foi apresentado em [LCR+20]. O controlador CompactRIO (cRIO) da National Instruments é utilizado para obter os dados de irradiância solar e temperatura ambiente de uma estação meteorológica e os dados de corrente e tensão CC e CA do sistema PV. Os dados coletados são então empregados em técnicas para detecção e classificação de falhas no sistema PV.

Em [MGPGPL+16], Precision Time Protocol (PTP - IEEE 1588) foi utilizado para sincronizar os *timestamp* dos dispositivos que compõem uma rede de sensores sem fio. A rede é composta por sensores sem fios que monitoram irradiância, temperatura ambiente, temperatura dos módulos PV, corrente e tensão CC e CA. Além disso, cRIOS são utilizados para obter os dados dos sensores e enviá-los para um computador.

O Network Time Protocol (NTP) foi utilizado no sistema proposto devido ao seu fácil acesso às informações e por ser amplamente utilizado em aplicações que requerem um *timestamp* preciso (Windows, Unix, macOS). Em [PJC19] o NTP também foi empregado, como os dispositivos se conectam diretamente à internet, basta acessar a informação de data e hora através do endereço IP do servidor NTP. Na proposta, para que os dados do NTP fossem transmitidos aos dispositivos DLs, foi necessário integrá-los ao *payload* do LoRa.

Uma rede de sensores para monitorar corrente de circuito aberto, corrente de curto-circuito, tensão de circuito aberto e tensão de curto-circuito dos módulos PV foi apresen-

tado em [ARR17]. A rede de sensores foi implementada utilizando o microcontrolador PIC18F4620 e sua comunicação sem fio é realizada pelo protocolo MiWi [Mic21b] da Microchip. Os dados coletados são enviados para um computador para armazenamento.

Um sistema IOT de baixo custo para monitorar pontos quentes de células PV é apresentado em [DRS19]. O sistema usa sensores de temperatura com RFID (do inglês *Radio Frequency Identification*) e sem bateria, um leitor de RFID lê os dados dos sensores enquanto fornece energia. Os dados são enviados para o *hub* via USB (do inglês *Universal Serial Bus*), em seguida, os dados são armazenados em um banco de dados remoto.

Os dados obtidos pelo sistema de monitoramento proposto em [ANASK<sup>+</sup>18] são comparados com os valores nominais fornecidos pelos fabricantes do sistema PV, provendo ao usuário uma visão do estado da saúde. É realizado o monitoramento de tensão, corrente, temperatura ambiente e irradiância, empregando um Arduino Uno para coletar os dados dos sensores e transmiti-los para um computador através de uma rede Wi-Fi.

Um Arduino Uno e um ESP8266 foram utilizados em conjuntos para formar um sistema de monitoramento IoT em [AP20]. Ele pode monitorar tensão, corrente, temperatura e aquecimento do módulo PV. Os dados são enviados para o sistema Adafruit Cloud onde podem ser acessados através de um aplicativo de celular.

Um *data logger* customizado baseado no PIC18F46K22 foi desenvolvido em [ASD<sup>+</sup>16], sendo capaz de monitorar parâmetros elétricos, temperatura e irradiância solar. Os dados são coletados a cada segundo e transferidos via GPRS (do inglês *General Packet Radio Services*) para um computador que armazena e fornece acesso aos dados.

O sistema proposto em [ERA<sup>+</sup>18] é baseado no PcDuino (descontinuado), que combina Arduino com Raspberry Pi operando em Linux, sendo capaz de monitorar temperatura, irradiância, velocidade e direção do vento e dados elétricos AC e DC. Os dados são armazenados localmente em um cartão SD e podem ser acessados pela internet. Armazenar dados apenas localmente no sistema pode criar dificuldades e uma maior complexidade ao fornecer acesso remoto. Esta forma de armazenamento é realizada em [AI19, ZF17, ARR17, AI17, DRS19, ANASK<sup>+</sup>18, LCR<sup>+</sup>20, MGPGPL<sup>+</sup>16].

Armazenar dados apenas em servidores remotos pode causar perda de dados se houver alguma falha de comunicação. Isso é feito em [ANH18, Swa19, AP20, XNY<sup>+</sup>20, PPGSMAMG19]. Executar os dois tipos de armazenamento pode evitar esses problemas

e tornar o sistema mais confiável, como foi feito em [ZLB<sup>+</sup>18], [ASD<sup>+</sup>16], [PJC19] e em nossa proposta.

*Softwares* comerciais que requerem licença são usados em [SCZ<sup>+</sup>17], [ASD<sup>+</sup>16], [KIA<sup>+</sup>19], [LCR<sup>+</sup>20] e [MGPGPL<sup>+</sup>16], além de dificultar as mudanças no sistema, também o torna mais caro. No sistema proposto utilizamos *software* aberto, o *software* dos dispositivos DLs é desenvolvido em C++ utilizando o *framework* Arduino, que é *open-source* e amplamente utilizado e apoiado pela comunidade.

Por fim, para o monitoramento completo de um sistema fotovoltaico, é necessário monitorar: 1) os fatores meteorológicos aos quais o sistema PV está sujeito; 2) a geração elétrica CC dos módulos fotovoltaicos; 3) e a saída CA do inversor, isso é realizado em [PPGSMAMG19, LCR<sup>+</sup>20, MGPGPL<sup>+</sup>16, ERA<sup>+</sup>18]. Nossa proposta envolve a aquisição desses três tipos de dados, além disso, são utilizados sensores dedicados sem depender dos dados fornecidos pelo inversor. Isso permite que o sistema proposto seja aplicado a qualquer sistema fotovoltaico e seja independente da amostragem e codificação de dados fornecidos pelo inversor. Os sistemas em [XNY<sup>+</sup>20, ERA<sup>+</sup>18, PJC19] são dependentes do inversor.

### 3.2 Soluções comerciais para o monitoramento de sistemas fotovoltaicos

A estação meteorológica Tesa WS1081 [SFOEC21] monitora os dados de velocidade e direção do vento, índice pluviométrico, temperatura ambiente, umidade relativa do ar e pressão atmosférica, porém, não é capaz de realizar nenhuma medição relacionada a geração PV. A estação tem uma taxa de amostragem de 5 minutos, os dados coletados são enviados para um supervisor onde são armazenados e podem ser visualizados e acessados por um computador.

SOLAR1000 [Sci21b] é uma estação solarimétrica da Campbell Scientific voltada para aplicações de monitoramento solar. A estação contém dois piranômetros, um na horizontal, para medição da irradiância global, e outro com a inclinação dos módulos PV, para medição da irradiação no plano das strings. Também são empregados sensores de temperatura dos módulos PV, velocidade e direção do vento, temperatura ambiente e umidade, pressão e chuva. Os dados dos sensores são coletados pelo *data logger* CR1000X [Sci21a] e podem

ser acessados de um computador.

A solução da Sigma Sensors para o monitoramento PV é a estação EPE-RX3000 [Sen21b] baseada no *data logger* HOBO RX3000 [Aus21]. Não é detalhado os sensores inclusos na EPE-RX3000. Porém, o HOBO RX3000 suporta os sensores para os seguintes monitoramentos: temperatura, umidade, corrente CA, tensão CA, velocidade do vento, ampère-hora, pressão, corrente CC, tensão CC, quilowatt-hora, quilowatt, intensidade luminosa, fator de potência, precipitação pluvial, Volt-Amp reativo, Volt-Amp reativo por hora, Volt-Amps, watt-hora e watts. Além disso, a estação já vem integrada com a plataforma de dados online Hobolink, e nela o usuário pode reprogramar o *data logger*, mudar parâmetros do funcionamento do sistema, assim como programar os alarmes de segurança.

## 4 Solução proposta

A proposta consiste em três elementos principais: 1) dois dispositivos *data loggers* (DL) para aquisição de dados, um para dados meteorológicos e outro para dados de geração PV; 2) um sistema de nuvem IoT que processa e armazena os dados obtidos; 3) e um aplicativo da web que exibe os dados em tempo real e os dados anteriores coletados. A Figura 5 mostra uma visão geral dessa solução.

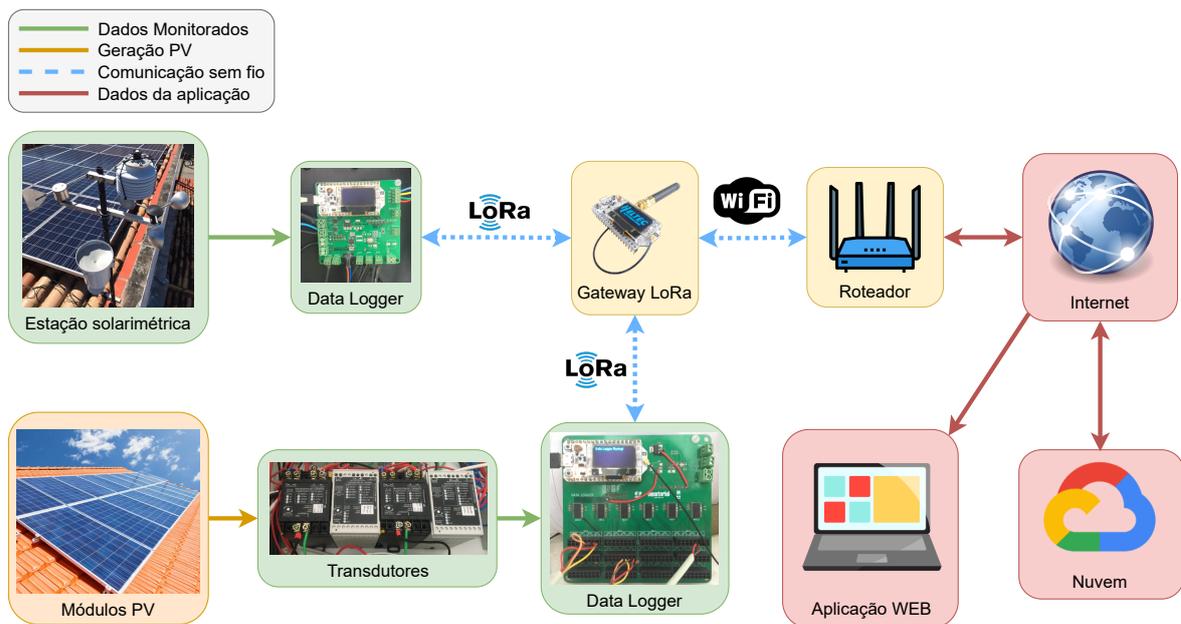


Figura 5: Visão geral do sistema proposto. [Autorial]

Os *data loggers* são responsáveis por coletar, condicionar, armazenar e transmitir dados de todos os sensores. Dois dispositivos diferentes foram desenvolvidos. O SSDL (do inglês *Solarimetric Station Data Logger*) é responsável por coletar os dados meteorológicos dos sensores de uma estação solarimétrica, sendo eles: irradiância, temperatura do módulo fotovoltaico, velocidade e direção do vento, temperatura ambiente, umidade e chuva. Já o PVDL (do inglês *Photovoltaic Data Logger*) foi projetado para monitorar a geração fotovoltaica, incluindo a tensão e corrente de *strings* e a potência na saída de inversores.

Os *data loggers* utilizam a comunicação sem fio LoRa para enviar os dados obtidos a um *gateway* LoRa (do inglês *Long Range*) que está conectado à internet via Wi-Fi (IEEE 802.11). O *gateway* é o intermediário entre os dispositivos e o sistema em nuvem, redirecionando os dados monitorados para a nuvem, onde serão armazenados, ou direcionando

comandos e configurações enviados pela nuvem para os dispositivos. A utilização de comunicações sem fio remove as limitações e custos que existiriam com o uso de fios.

Por fim, a aplicação web oferece uma maneira simples e fácil para o usuário visualizar os dados monitorados em tempo real ou adquirir os dados armazenados no banco de dados. O aplicativo é hospedado em um servidor remoto e pode ser acessado em qualquer navegador.

## 4.1 Metodologia

O sistema de monitoramento proposto foi desenvolvido seguindo o método científico de pesquisa aplicada, com o objetivo de gerar inovação tecnológica para aplicações práticas, envolvendo o conhecimento disponível e sua ampliação, aplicando o conhecimento visando utilidade econômica e técnica. A figura 6 mostra um diagrama com o passo a passo do desenvolvimento do sistema.

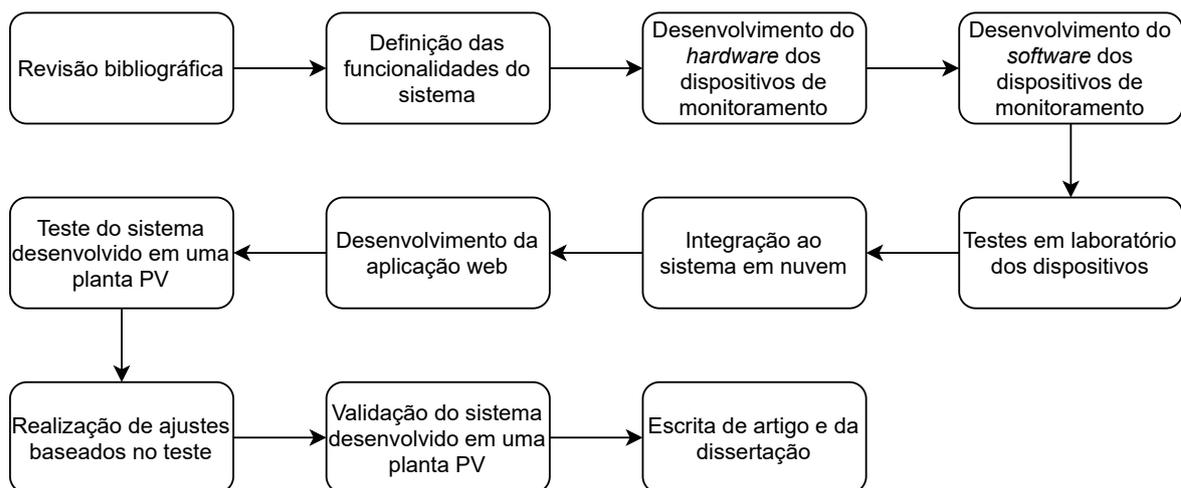


Figura 6: Diagrama representando a metodologia seguida. [Autorial]

### 4.1.1 Pesquisa bibliográfica

A pesquisa bibliográfica forneceu uma análise comparativa entre os diferentes tipos de arquiteturas e tecnologias utilizados em sistemas de monitoramento PV, além disso, uma comparação técnica dos sistemas apresentados na literatura com o sistema proposto foi realizada e foi apresentada no Capítulo 3. O estudo secundário foi realizado com base no protocolo de revisão sistemática apresentado no Apêndice A e com o auxílio da ferramenta Parsifal [Par21].

Das limitações encontradas nos trabalhos da literatura foram definidas as principais características que o sistema proposto deveria alcançar e os fatores climáticos e de geração PV que deveriam ser monitorados.

#### 4.1.2 Hardware

Uma estação solarimétrica já foi desenvolvida em trabalhos anteriores, assim os componentes eletrônicos e sensores dessa estação que tiveram bons resultados e atenderam os requisitos do sistema proposto foram mantidos no sistema descrito neste trabalho, enquanto os demais foram trocados. Um processo de seleção foi realizado para escolher os novos componentes eletrônicos e sensores que compõem os dispositivos do sistema de monitoramento. Os componentes foram selecionados de forma que atendam os requisitos do sistema.

As placas de circuito impresso foram projetadas utilizando o *software* KiCad [KiC21]. Kicad é um programa computacional de código aberto para desenvolvimento de circuitos integrados e PCBs. A ferramenta oferece a possibilidade de projetar o esquemático do circuito, converter para uma placa de circuito impresso, visualização 3D da PCB e exportação de arquivos para fabricação.

Os passos para se projetar uma PCB no Kicad são: criação de um esquemático, associação dos componentes a seus *footprints*, e por último realizar o *designs* da PCB. O esquemático é onde são definidos todos os componentes e as ligações entre eles. A associação do *footprint* é a definição do tamanho, formato e conexões elétricas dos componentes. O *designs* da PCB é a definição de como será a placa fisicamente. Além disso, bibliotecas contendo os componentes mais comumente utilizados estão incluídas nativamente no KiCad.

#### 4.1.3 Software

Os *softwares* dos dispositivos DL foram desenvolvidos com base no *framework* do Arduino e na plataforma Espressif 32. Além de ser mais acessível que outros *frameworks*, o Arduino já possui diversas bibliotecas abertas que permitem realizar a comunicação e a aquisição dos dados dos sensores. Já a plataforma Espressif 32 fornece predefinições, conjuntos de ferramentas e *scripts* de compilação voltados para o ESP32.

Para realizar a implementação do *software* foi utilizado o PlatformIO IDE [Pla21] em conjunto com o editor de texto Visual Studio Code. O PlatformIO é uma IDE (do inglês

*Integrated Development Environment*) voltada para o desenvolvimento de sistemas embarcados. Ela permite a implementação de programas em C++ ou C, com suporte a diversos *frameworks* e plataformas, e de forma independente do sistema operacional. Isso traz uma maior liberdade de desenvolvimento permitindo utilizar conceitos de orientação a objetos enquanto mantém o suporte às especificidades do sistema embarcado, como o acesso às GPIO e a recursos internos.

#### 4.1.4 Integração IoT e aplicação web

Para fornecer os dados obtidos pelo sistema de forma remota e em tempo real para os usuários os dispositivos de monitoramentos foram integrados ao sistema em nuvem Google Cloud Platform (GCP) [Goo21], no entanto, qualquer outro sistema de nuvem, como Amazon Web Service ou Microsoft Azure, também poderiam ser usados. A linguagem JavaScript foi utilizada nas implementações realizadas dentro dos serviços do GCP.

A aplicação web foi desenvolvida usando o *framework* Django Web, que usa Python para gerenciar e renderizar páginas da web. Em Python, *endpoints* foram criados para acessar os serviços em nuvem usando o GCP SDK. Em relação ao *front-end*, as paginas foram implementadas utilizando HTML e JavaScript.

#### 4.1.5 Experimento e validação

Uma abordagem experimental foi usada para avaliar e validar o sistema desenvolvido. O experimento consistiu em observar a confiabilidade do sistema ao operar na em uma planta PV e os dados coletados foram comparados com os dados de um sistema comercial para avaliar a precisão das medições.

## 5 Projeto e Desenvolvimento do *Hardware* dos Dispositivos *Data Loggers*

O objetivo ao projetar os *data loggers* foi de atingir baixo custo de produção, fornecer comunicação sem fio e ser flexível para permitir alterações de *software* e *hardware*. Neste capítulo serão detalhados os componentes eletrônicos que são comuns entre os *data loggers*, em seguida será apresentado o *hardware* específico de cada dispositivo e por fim será discutido o processo de design das placas de circuito impresso (PCB, do inglês *Printed Circuit Board*) e sua montagem. O Apêndice B contém os esquemáticos completos dos dispositivos.

### 5.1 Componentes base dos *Data Loggers*

O principal componente desses dispositivos é o WiFi LoRa 32 (V2) [Hel21]. WiFi LoRa 32 (V2) é uma placa de desenvolvimento voltada para aplicações IoT produzida pela Heltec Automation, e inclui diversos recursos integrados que microcontroladores tradicionais não possuem. A Tabela 2 apresenta as principais características técnicas do WiFi LoRa 32 (V2). Dessas características, a utilização do ESP32 como MCU e o suporte a comunicação via Wi-Fi e LoRa foram decisivas para a escolha dessa placa. A Figura 7 mostra a placa WiFi LoRa 32 (V2) com uma antena LoRa acoplada.



Figura 7: Placa de desenvolvimento WiFi LoRa 32 (V2). [Ali21]

O SSDL requer um MCU robusto que pode operar em ambientes adversos, uma vez que a estação estará exposta a diferentes condições climáticas. O ESP32 [Esp21] foi construído para uso em ambientes industriais. É capaz de trabalhar em temperaturas entre  $-40^{\circ}\text{C}$  e  $125^{\circ}\text{C}$  e pode se adaptar dinamicamente às mudanças nas condições externas. O ESP32 é extremamente poderoso, para um MCU, com dois núcleos de processamento à  $240\text{ MHz}$  e uma

memória RAM de 520 KB. Além disso, ele é totalmente compatível com Arduino, podendo utilizar o ambiente de desenvolvimento, a linguagem de programação e as bibliotecas.

Ambos os DLs possuem um *Shield Arduino Data Logger*, que provê dois recursos essenciais para a operação correta dos dispositivos: cartão SD e RTC (*Real-Time Clock*). O cartão SD é usado para armazenar temporariamente os dados antes de serem enviados ao *gateway* LoRa. Isso garante que os dados não sejam perdidos se a comunicação com o *gateway* ou com a nuvem não estiverem disponíveis. A comunicação entre o MCU e o cartão SD é realizada pelo *buffer* 74HC125D [Nex21] através de um barramento SPI (Interface Periférica Serial).

Tabela 2: Especificações técnicas do WiFi LoRa 32 (V2). [Hel21]

Recurso	Detalhes		
Microcontrolador	ESP32 (240 MHz Tensilica LX6 dual-core + ULP core)		
Comunicação Sem Fio	Wi-Fi	Bluetooth	LoRa
	802.11 b/g/n	Bluetooth V4.2 e especificação <i>low enegy</i>	Comunicação nó-para-nó ou LoRaWAN
LoRa Chip	SX1276/SX1278		
RAM	520 KB SRAM interna		
Flash	8 MB Flash via SPI		
Interfaces nos pinos	UART x 3, SPI x 2, I2C x 2, I2S x 1, 12-bits ADC canais x 18, 8-bits DAC canais x 2, GPIO x 22		
Outras Interfaces	Micro USB x 1, Antena LoRa (IPEX) x 1, Antena Wi-Fi (integrada) x 1		
Display	OLED 0.96 polegadas		
Suporte a bateria	Sim, 3,7 V Lítio		

Já o RTC [Int21] é utilizado para monitorar a data e hora de cada medição, fornecendo um horário preciso quando os dados dos sensores são lidos e enviados pelo MCU. O ESP32 possui um RTC integrado, porém, foi optado pela utilização do RTC do *shield* por ele possuir uma bateria dedicada, isso permite que o tempo rastreado seja contínuo mesmo se o DL estiver desligado. O RTC se comunica diretamente com o MCU através de um barramento I2C.

Dois tipos de componentes estão presentes nos DLs, ou há suporte a eles, mas não estão

sendo utilizados. O primeiro desses componentes é um *shield* Ethernet baseado no circuito integrado (CI) ENC28J60 [Mic21a] que deveria fornecer uma opção de comunicação com a internet, contudo, em testes iniciais não foi possível estabelecer comunicação com o serviço em nuvem devido à falta de suporte do ENC28J60 à segurança na camada de transporte (SSL/TLS).

O segundo tipo de componente são os gerenciadores de bateria, cujo objetivo seria de gerenciar a alimentação dos dispositivos alternando entre a fonte de alimentação externa e a bateria conforme fosse necessário, além de recarregar a bateria quando não estivesse sendo utilizada. No SSDL foi utilizado o LTC4162-L [Dev21] que tem suporte a alimentação por módulos PV, já o BQ24075 [Ins21c] foi aplicado no PVDL. Nos testes em laboratório nenhum dos dois gerenciadores operaram de maneira correta e ambos foram removidos das PCBs.

Os DLs foram projetados de forma que os gerenciadores fossem opcionais, com a fonte de energia externa podendo ser ligada diretamente aos reguladores de tensão. Ambos os DLs possuem um regulador de tensão um com saída de 5 V, sendo do tipo LDL1117 [ST21]. A saída do regulador tem uma corrente máxima de 1,2 A e suporta como entrada uma tensão entre 2,5 V e 18 V. Uma outra possibilidade de alimentar os dispositivos é através do micro USB contido no WiFi LoRa 32 (V2), utilizando uma fonte de 5 V.

## 5.2 Cadeia de medição do data logger da estação solarimétrica

Muitos dos sinais em um monitoramento de sistema PV são elétricos, permitindo serem lidos diretamente ou via transdutores elétricos, como é o caso das tensões e correntes das *strings*. Outros sinais requerem a utilização de um sensor para converter sua unidade e quantidade física em elétrica. Muitas vezes ainda é necessário realizar um processamento analógico desse sinal elétrico para adequá-lo à leitura. Por fim, o processo de conversão analógica para digital (A/D) transforma o sinal elétrico contínuo em um sinal discreto: os níveis de tensão são convertidos em números em intervalos de tempo.

A Figura 8 mostra um diagrama simplificado da cadeia de medição do SSDL para os seguintes fatores: irradiância, temperatura do módulo fotovoltaico, velocidade e direção do vento, temperatura ambiente, umidade e chuva. Originalmente estava planejado também monitorar pressão atmosférica, tensão de circuito aberto e corrente de curto-circuito, porém,

devido a dificuldades no desenvolvimento, esses fatores foram descartados e não vão ser apresentados nesse trabalho, apesar de seus componentes ainda estarem presentes no SSDL. A seguir serão detalhados os demais elementos presentes na cadeia de medição do SSDL.

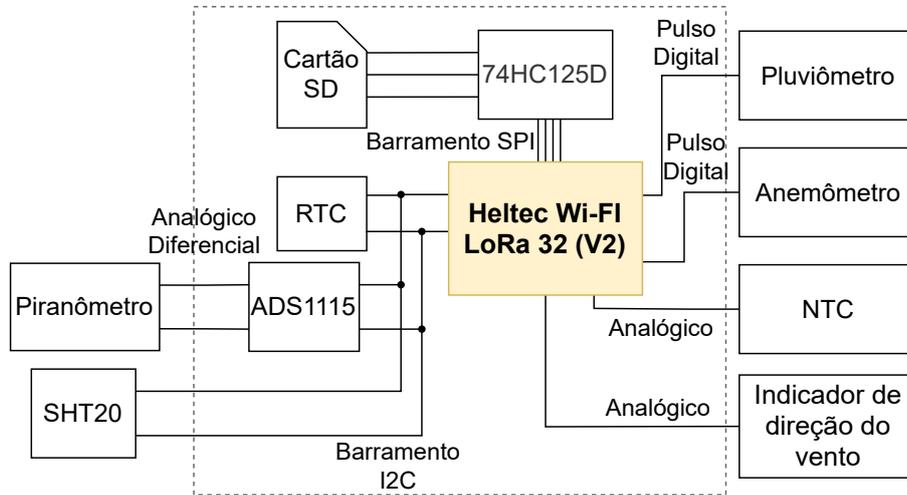


Figura 8: Diagrama simplificado do SSDL, com ênfase nos sensores e componentes para aquisição de dados. [Autoral]

### 5.2.1 Sensores

Para realizar a medição da irradiância é utilizado um piranômetro de baixo custo da empresa LUZdoSOL. O piranômetro tem uma faixa de medição entre 0 e 1479 W/m<sup>2</sup> e uma saída analógica entre 0 e 25 mV. A relação entre a entrada e a saída do piranômetro é dada pela Eq. 1, onde  $G$  é a irradiância incidente no piranômetro,  $K$  é a constante de calibração do piranômetro e  $mV$  é a tensão de saída em milivolts. O piranômetro foi calibrado na saída da fábrica e o  $K$  fornecido foi utilizado no SSDL.

$$G = \frac{mV}{K} \quad (1)$$

A medição da temperatura do módulo PV é realizada pelo NTC (do inglês *Negative Temperature Coefficient*) de 10 K $\Omega$ , que funciona como um resistor onde sua resistência varia com uma relação inversa a sua temperatura. A Eq. 2 expressa essa relação,  $R$  é a resistência atual do NTC,  $R_{25}$  é a resistência do NTC na temperatura de referência,  $T_{25}$  é a temperatura de referência (25 °C) e  $\beta$  é a constante do NTC. Essa equação utiliza as temperaturas em Kelvin (K), então  $T_{25}$  já é utilizada em Kelvin e a saída da equação é convertida para graus

Celsius.  $R_{25}$  e  $\beta$  variam de um NTC para o outro, não foi realizado nenhum tipo de calibração para encontrar esses valores, foram utilizados valores esperados para um NTC de 10 K $\Omega$  ideal.

$$T_m(R) = \frac{1}{\frac{\ln\left(\frac{R}{R_{25}}\right)}{\beta} + \frac{1}{T_{25}}} \quad (2)$$

SHT20 [Sen21a] é utilizado para monitorar a temperatura ambiente e a umidade relativa do ar. Os dados são fornecidos de forma digital através do barramento I2C e já são entregues à MCU nas unidades de graus Celsius e porcentagem, respectivamente, não necessitando de nenhum processamento adicional. O SHT possui uma faixa de medição de -40 a 125 °C para temperatura, com precisão de  $\pm 0,3$  °C, e 0 a 100% para umidade, com precisão de 3%.

A velocidade do vento é monitorada através de um anemômetro. O anemômetro utilizado gera um pulso digital a cada volta, os pulsos acumulados ( $CP$ ) durante um determinado período ( $P$ ) são utilizados para calcular as rotações por minuto ( $RPM$ ), como mostrado na Eq. 3. As rotações por minuto são então convertidas para km/h utilizando a Eq. 4, onde  $r$  é o raio do anemômetro.

$$RPM = \frac{CP * 60 * 1000}{P} \quad (3)$$

$$W_s = \frac{4 * \pi * r * RPM}{60 * 1000} * 3.6 \quad (4)$$

A medição da direção do vento foi realizada por um indicador de direção do vento que possui uma saída analógica que varia de acordo com a direção que o indicador está apontando. A documentação do indicador informa uma resistência fixa para cada posição. Porém, testes mostraram que a resistência gerada pelo indicador não era compatível com a indicada na documentação e que não era fixa, apresentando uma pequena variação. Uma calibração foi realizada em laboratório para encontrar faixas de resistências para cada posição do indicador, a Tabela 3 apresenta essas faixas. Um pluviômetro foi utilizado para executar o monitoramento do índice pluviométrico, ele gera um pulso digital a cada 0,25 mm de chuva medido.

Tabela 3: Relação entre resistência e direção do indicador de direção do vento. [Autorial]

Faixa de resistência	Posição do indicador
$R \leq 6,5 \text{ K}\Omega$	0° - Norte
$6,5 \text{ K}\Omega < R \leq 17,5 \text{ K}\Omega$	45° - Nordeste
$17,5 \text{ K}\Omega < R \leq 32,85 \text{ K}\Omega$	90° - Leste
$32,85 \text{ K}\Omega < R \leq 47,89 \text{ K}\Omega$	135° - Sudeste
$47,89 \text{ K}\Omega < R \leq 63,33 \text{ K}\Omega$	180° - Sul
$63,33 \text{ K}\Omega < R \leq 89,19 \text{ K}\Omega$	225° - Sudoeste
$89,19 \text{ K}\Omega < R \leq 122 \text{ k}\Omega$	270° - Oeste
$R > 122 \text{ k}\Omega$	315° - Noroeste

### 5.2.2 Processamento analógico e conversão analógico/digital

Devido à baixa tensão gerada pelo piranômetro é necessário realizar a amplificação desse sinal antes de realizar a conversão A/D. Foi optado por utilizar no SSDL um conversor analógico-digital (ADC) de alta precisão que já possuísse uma amplificação de sinal integrada. O ADC adotado foi o ADS1115 [Ins21b] que possui 16-bits de precisão, 860 SPS (do inglês *Samples Per Second*) e um amplificador de ganho programável (PGA, do inglês *Programmable Gain Amplifier*) de 6 níveis, a Tabela 4 apresenta a faixa de leitura e precisão do ADC1115 para cada nível do PGA.

Tabela 4: Faixa de leitura e precisão do ADC1115 para cada nível do PGA. [Ins21b]

Faixa de Leitura	Precisão
$\pm 6.144 \text{ V}$	$187.5 \mu\text{V}$
$\pm 4.096 \text{ V}$	$125 \mu\text{V}$
$\pm 2.048 \text{ V}$	$62.5 \mu\text{V}$
$\pm 1.024 \text{ V}$	$31.25 \mu\text{V}$
$\pm 0.512 \text{ V}$	$15.625 \mu\text{V}$
$\pm 0.256 \text{ V}$	$7.8125 \mu\text{V}$

O ADS1115 possui quatro canais de entrada que podem ser utilizados em duas configurações diferentes. Em *single ended* cada canal é independente, onde ele recebe o sinal positivo do sensor, enquanto o sinal negativo é colocado no *ground* (referência elétrica) compartilhado entre os outros dispositivos, incluído o ADC. Já no modo diferencial os canais formam pares, onde um recebe o sinal positivo e o outro recebe o sinal negativo, essa configuração foi utilizada para a leitura do piranômetro, já que ela reduz a inserção de ruído e interferências no sinal de medição.

A comunicação entre o ADS1115 e o MCU é realizada pelo barramento I2C. O endereçamento I2C do ADS1115 é configurável através do pino ADDR, fornecendo quatro opções de endereços diferentes. Para a medição do piranômetro foi utilizado o endereço 0x48 no ADC, onde o ADDR é ligado ao *ground*.

Para a leitura do NTC e da direção do vento foram utilizados divisores de tensão, o divisor é empregado de forma que o sensor substitua um de seus resistores (Figura 9), assim, conhecendo a tensão de entrada, a tensão de saída e o valor do resistor fixo, é possível calcular a resistência apresentada pelo sensor. As tensões de saída dos dois divisores são lidas pelo ADC integrado ao ESP32.

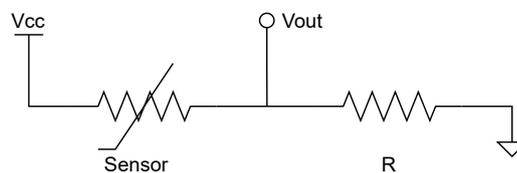


Figura 9: Circuito divisor de tensão para leitura de sensores analógicos. [Autorial]

O ESP32 integra dois ADCs de 12-bits, suportando um total de 18 canais de medição. O ADC1 tem 8 canais, conectados as GPIOs 32-39 (do inglês *General Purpose Input/Output*), e o ADC2 tem 10 canais conectados às GPIOs 0, 2, 4, 12-15 e 25-27. No entanto, o uso do ADC2 tem algumas limitações, já que o drive Wi-Fi o utiliza e alguns de seus pinos são utilizados no processo de programação do ESP32.

Já os sensores digitais podem ser lidos diretamente pelas GPIOs ou pelos barramentos seriais. No caso do pluviômetro e do anemômetro foi adicionado um resistor *pull-down* para garantir que o GPIO, em que cada sensor está conectado, permaneça com nível lógico baixo enquanto o sensor não for acionado.

### 5.3 Cadeia de medição do data logger da geração fotovoltaica

A cadeia de medição do PVDL é exibida na Figura 10. Como os fatores monitorados pelo PVDL são elétricos, são utilizados transdutores para realizar o processamento analógico, condicionando os sinais elétricos para a leitura. Assim o requisito mais importante se torna a capacidade de monitorar pelo menos 45 sinais, que seriam eles a tensão e corrente das 20 strings e a saída dos cinco inversores na mini usina da UFAL.

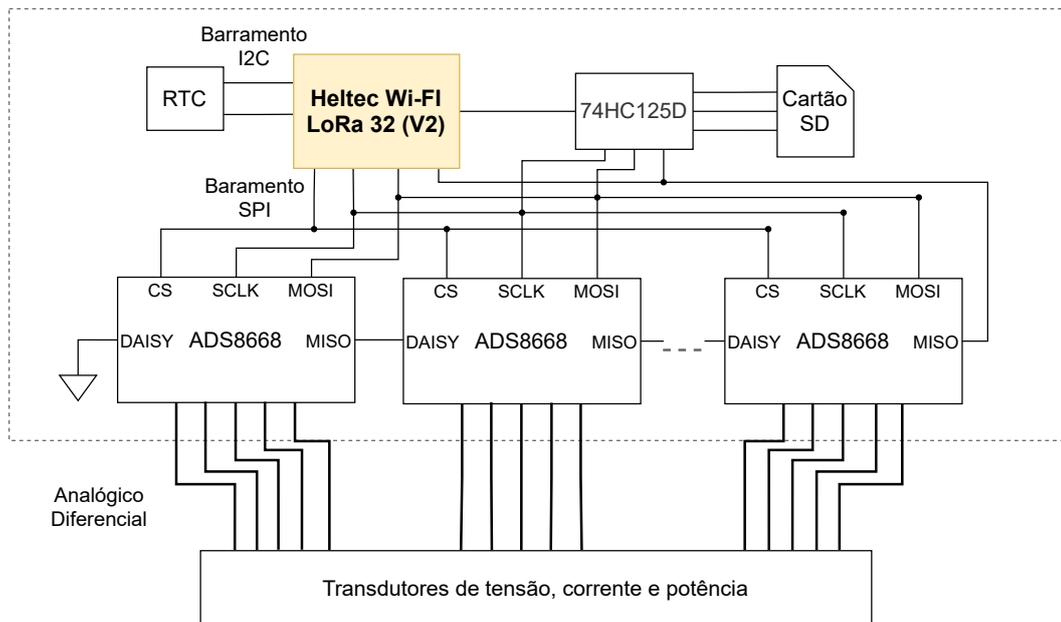


Figura 10: Diagrama simplificado do PVDL, com ênfase nos transdutores e componentes para aquisição de dados. [Autorial]

#### 5.3.1 Transdutores

Transdutores da marca SECON [SEC21] foram escolhidos para obter os dados de tensão, corrente e potência. Durante o experimento e validação do sistema, detalhados no Capítulo 7, foram utilizados cinco transdutores, sendo dois para corrente, dois para tensão e um para potência. O transdutor de corrente converte proporcionalmente uma corrente de entrada entre 0 e 10 A em uma tensão entre 0 e 5 V. Já os dois transdutores de tensão possuem faixas de medição diferentes, o primeiro realiza leitura entre 0 e 400 V e o segundo entre 0 e 500 V, ambos possuem uma saída proporcional entre 0 e 10 V.

A potência CA é medida por um transdutor trifásico bidirecional de  $\pm 9$  kW que recebe como entrada uma tensão de até 300 V e uma corrente de até 30 A e como saída fornece uma

tensão entre 0 e 5 V. Por ser bidirecional, a relação entre a saída do transdutor e potência medida é fornecida pela equação 5, onde  $P$  é potência e  $V_{out}$  é a tensão de saída. Na mini usina se pretende utilizar os mesmos tipos de transdutores.

$$P = V_{out} * 3600 - 9000 \quad (5)$$

### 5.3.2 Processamento analógico e conversão analógico/digital

Para a leitura dos transdutores pelo PVDL não seria necessário nenhum processamento analógico adicional. Contudo, durante o experimento, esses transdutores também foram utilizados pelo *data logger* CR1000, presente na planta PV do experimento, que só suporta leituras de até 5 V. Por isso, divisores de tensão foram empregados nos transdutores de tensão para reduzir as saídas pela metade, de forma que fiquem entre 0 e 5 V. Estes divisores não fazem parte do *hardware* do PVDL.

Para o PVDL foi necessário escolher um ADC que fornecesse suporte para as 45 entradas de dados referentes aos fatores de geração PV. O ADS8668 [Ins21a] foi escolhido, pois, ele permite um encadeamento conhecido como *Daisy Chain* através de um barramento SPI. O *Daisy Chain* permite que vários ADS8668 sejam ligados em série e cria uma abstração para o microcontrolador de forma que toda a cadeia se torna um único dispositivo.

Além disso, o ADS8668 possui 8 canais diferenciais com PGA para ajuste da faixa de entrada analógica que pode ser bipolar de  $\pm 10,24$  V,  $\pm 5,12$  V,  $\pm 2,56$  V,  $\pm 1,28$  V e  $\pm 0,64$  V, bem como unipolar de 0 V a 10,24 V, 0 V a 5,12 V, 0 V a 2,56 V e 0 V a 1,28 V. Outras características são uma aproximação analógica-digital sucessiva de 12 bits operando a uma taxa de transferência de 500 kSPS. Seis ADS8668 são utilizados no PVDL, totalizando 48 entradas analógicas diferenciais.

## 5.4 Design e projeto das placas de circuito impresso

Alguns dos componentes que foram utilizados não estavam disponíveis nas bibliotecas fornecidas pelo KiCad. Para esses componentes seus símbolos e *footprint* foram criados do zero seguido as indicações presentes em seus *datasheets*.

Em relação ao design das PCBs alguns pontos podem ser destacados. As PCBs foram

criadas em duas camadas e o posicionamento dos componentes foi realizado visando uma melhor usabilidade do usuário e do desenvolvedor, também foram adicionados marcadores nas PCBs para indicar a funcionalidade de cada conector. Furos mecânicos (que não possuem conexões elétricas) foram colocados, permitindo que as PCBs possam ser fixadas em superfícies com parafusos. Esses mesmos furos foram colocados para fixar os *shields* de *ethernet* e *data logger* as PCBs.

O circuito de alimentação foi projetado de forma que os controladores de carga fossem opcionais e, caso não fossem utilizados, a entrada de potência poderia ser conectada diretamente ao regulador de tensão. Dessa forma o *power path*, em ambas as PCBs, foi projetado da seguinte maneira: a entrada de alimentação da placa é ligada ao controlador de carga que realiza o gerenciamento da bateria para que em sua saída sempre seja fornecido energia. O regulador de tensão de 5 V recebe a saída do controlador de carga ou diretamente da entrada de alimentação da placa, dependendo de como os componentes forem soldados. O regulador de tensão de 5 V alimenta todos os componentes de 5 V, incluindo o WiFi LoRa 32 V2. O regulador de tensão de 3,3 V integrado ao WiFi LoRa 32 V2, reduz a tensão de 5 V para 3 V e alimenta o restante dos componentes.

Por último, as trilhas elétricas de potência (5 V, 3,3 V, GND) foram feitas com uma técnica chamada *planing* que cria áreas de cobre nos locais não utilizados da PCB. Para realizar a conexão dessas áreas entre as duas camadas das PCBs foi utilizada uma segunda técnica conhecida como *stitching*, que cria diversas pequenas vias de conexão. Essas duas técnicas permitem um suporte a maiores potências de alimentação da PCB e também ajudam a resfriar a placa em casos de temperaturas elevadas.

## 5.5 Montagem das placas de circuito impresso

As PCBs foram fabricadas pela PCBWay, uma empresa sediada na China especializada na fabricação de PCBs. A soldagem dos componentes elétricos nas PCBs foi realizada no laboratório de prototipagem Thomas Edison no Instituto de Computação da UFAL. O processo de soldagem consiste em quatro etapas. Na primeira etapa, a solda em pasta é aplicada aos *pads* da PCB onde os componentes de montagem em superfície serão colocados. A aplicação da solda é realizada com o auxílio de um *stencil*, uma folha metálica que possui aberturas nos lugares onde será aplicada a solda.

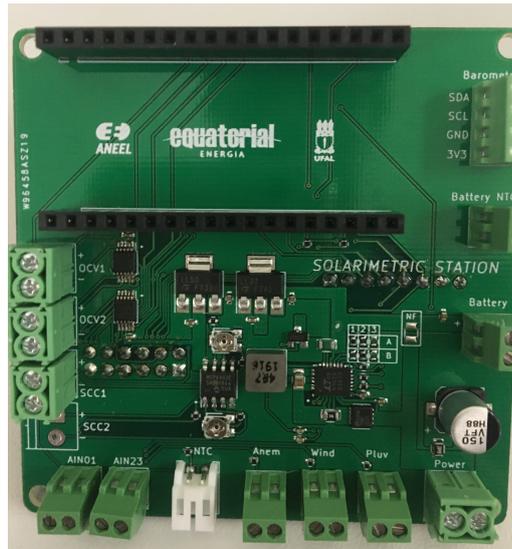


Figura 11: Placa de aquisição de dados da estação solarimétrica (SSDL). [Autorial]

Na segunda etapa, usando uma máquina *pick-and-place*, os componentes de montagem em superfície são colocados em suas posições sobre a PCB. Durante a terceira etapa, a placa passa por um forno onde a solda será fundida. Por último, os componentes *troughole* são soldados na PCB e os erros das etapas anteriores, como curtos-circuitos, são corrigidos usando um ferro de solda. As Figuras 11 e 12 mostram o SSDL e o PVDL, respectivamente.

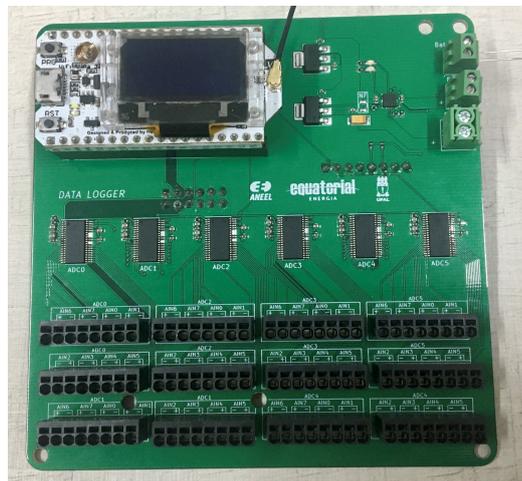


Figura 12: Placa de aquisição de dados da geração PV (PVDL). [Autorial]

## 6 Projeto e Desenvolvimento do Software

### 6.1 Desenvolvimento do software dos data loggers

O PlatformIO tem suporte a diversos sistemas embarcados e microcontroladores, incluindo ao WiFi LoRa 32 V2. O gerenciador de bibliotecas integrado facilita a encontrar, instalar e utilizar as bibliotecas necessárias para desenvolvimento do *software*. O PlatformIO oferece um conjunto de ferramentas para *debug* que não necessitam de configurações complexas e específicas para cada plataforma. Essas ferramentas incluem o monitor de porta serial que permite testar e depurar o dispositivo.

A maioria dos componentes periféricos utilizados possuíam uma biblioteca criada e disponibilizada pela comunidade, com exceção do ADS8668. Para o ADS8668 foram implementadas funções de configuração e leitura dos canais utilizando a biblioteca SPI do Arduino e considerando o encadeamento *Daisy Chain*. Além disso, foi implementada uma função para converter os dados recebidos em bits para os valores de tensão lidos nos canais.

### 6.2 Operação dos data loggers

A Figura 13 mostra um fluxograma ilustrando as principais etapas do funcionamento dos dispositivos, ambos os dispositivos *data loggers* operam de forma semelhante. Quando ligados, os DLs primeiramente inicializam o rádio LoRa, o RTC e o cartão SD. Em seguida, é verificada a existência dos arquivos de dados e configurações no cartão SD, e caso esses arquivos não existam, eles são criados em um formato CSV (do inglês *Comma-Separated Values*). O arquivo de dados é criado com um cabeçalho que informa o tipo de dado em cada coluna do arquivo. Já o arquivo de configurações é criado com as configurações padrões dos sensores.

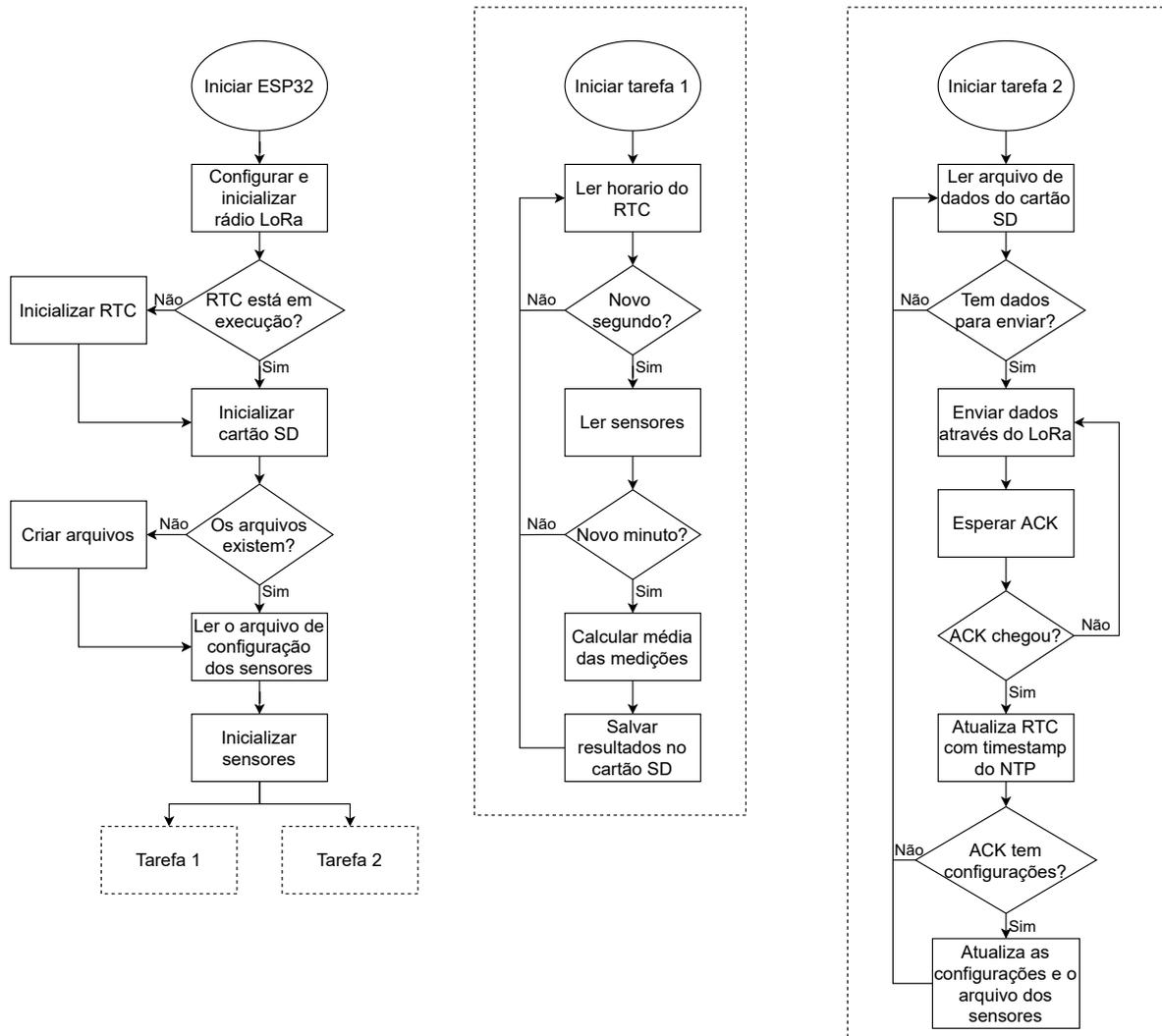


Figura 13: Diagrama simplificado que representa a operação dos dispositivos DLs. [Autorial]

Em seguida, todos os sensores conectados são inicializados e as configurações salvas são aplicadas aos transdutores e ao piranômetro. Após a inicialização dos sensores, duas tarefas são criadas e atribuídas a cada um dos núcleos do ESP32, para que possam ser executadas em paralelo.

A primeira tarefa é responsável pela leitura dos dados dos sensores. Ela contém um loop que em cada iteração realiza um *polling* do tempo marcado pelo RTC. Caso o segundo do tempo obtido for diferente do segundo em que foi realizada a última amostragem dos dados, uma nova amostragem é realizada e cada um dos dados obtidos é somado ao valor armazenado em sua respectiva variável. Quando o segundo for 00 os valores acumulados nas variáveis são divididos pelo número de amostras, calculando uma média dos dados do último minuto (60 amostras). Esse método é baseado em [RCJ+09].

Em suma, os dados são amostrados a cada segundo durante um minuto e, em seguida, uma média é calculada. Esse método não é aplicado ao monitoramento da chuva, que é o acúmulo diário, e a direção do vento, que é determinada pela direção mais frequente nesse último minuto. Após o cálculo da média, um *timestamp* é obtido do RTC. Em seguida, os resultados e o *timestamp* são salvos no arquivo de dados do cartão SD e as variáveis de armazenamento são zeradas.

A segunda tarefa é executada a cada cinco segundos (utilizando a função *delay*) e é encarregada de gerenciar a comunicação LoRa. Esse intervalo foi definido a partir de testes, de forma que mantenha a ideia de tempo real no envio dos dados e que não tenha interferência na execução da primeira tarefa. A cada execução da tarefa é verificado se existem dados no cartão SD a serem enviados. Caso existam, um conjunto de dados é comprimido, adicionado a um pacote LoRa e enviados para o *gateway* LoRa. Após o envio, a tarefa espera receber uma confirmação (ACK, do inglês *Acknowledgment*) de que os dados alcançaram o *gateway*. Se a confirmação não chegar dentro de um determinado intervalo de tempo, os dados são reenviados. Quando o ACK é recebido, o conjunto de dados que foi enviado é removido do cartão SD e um novo conjunto é preparado para envio, caso exista.

Portanto, em operação normal, os dados são enviados dos registradores de dados para a nuvem a cada minuto. Em caso de falha de comunicação, ao retornar, os dados acumulados serão enviados a cada cinco segundos até que todos os dados sejam enviados e o funcionamento seja normalizado.

O *gateway* LoRa está sempre sincronizado com o servidor NTP.br [NTP21]. Quando um ACK é enviado a um dispositivo pelo *gateway*, um *timestamp* atual é obtido por meio do NTP e enviado junto. A segunda tarefa dos DLs também tem a função de atualizar o RTC com o *timestamp* recebido, permitindo manter sempre o tempo preciso e sincronizado entre os dispositivos.

É possível que configurações de sensores também estejam incluídas no pacote ACK. Essas configurações podem ser definidas no sistema em nuvem e contêm constantes que são utilizadas na inicialização e na leitura dos transdutores e do piranômetro, permitindo ajustes remotos das medições. A segunda tarefa também é responsável por aplicar as configurações dos sensores e salvá-las no arquivo do cartão SD, para que possam ser mantidas mesmo que o DL seja reiniciado ou perca a comunicação com a nuvem.

Para evitar que as tarefas utilizem os barramentos I2C e SPI simultaneamente e que as operações sobre esses barramentos sejam mutuamente exclusivas, foram implementados dois *mutex*, um para cada barramento. *Mutex* é um mecanismo simples para evitar que duas tarefas tenham acesso simultaneamente a um recurso compartilhado. O travamento por *mutex* é feito pela tarefa antes de utilizar o recurso, e é liberado após o uso. Enquanto o recurso estiver travado, qualquer outra tarefa que deseje utilizá-lo deve esperar a sua liberação.

Como os dispositivos podem ser aplicados em locais remotos e/ou com difícil acesso, foram implementados alguns mecanismos de recuperação de falhas, caso elas ocorram. O primeiro deles é um *watch dog* que reinicia o dispositivo em casos de uma tarefa ou operação parar de responder. O segundo mecanismo é implementado somente no *gateway* LoRa e é relacionado a comunicação entre os DLs e o *gateway* utilizado LoRa ou entre o *gateway* e a internet por meio do Wi-Fi. Em caso de falha em alguma das comunicações, o respectivo rádio é reiniciado e reconfigurado, e caso a falha persista todo o dispositivo é reiniciado.

### 6.3 Protocolo LoRa

A fim de enviar os dados da maneira mais eficiente possível, um protocolo de rede LoRa personalizado foi desenvolvido para o sistema proposto. Para transmitir e receber pacotes LoRa, a biblioteca Arduino-LoRa [aL21] foi usada para ambos os dispositivos DLs e no *gateway*. Esta biblioteca expõe o rádio LoRa diretamente e permite enviar dados para qualquer rádio dentro do alcance com os mesmos parâmetros de rádio, sem usar compressão ou

endereçamento.

Em relação aos parâmetros de rádio utilizados, foram adotados valores suportados pelo rádio LoRa e que atendessem às normas e resoluções do Brasil [Net21]. Para a frequência central de transmissão foi utilizado 915 MHz, com uma largura de banda de 125 kHz, potência de transmissão de 10 db, SF7 para fator de espalhamento (quantidade de código de espalhamento aplicado ao sinal de dados original) e taxa de código de 4/5 (define quantos bits são utilizados na redundância da mensagem).

Duas funções oferecidas pela biblioteca foram utilizadas: *Sync Word* e *Cyclic Redundancy Check (CRC)*. A função *Sync Word* limita a transmissão de dados apenas para dispositivos que compartilham o mesmo valor de *sync word*, criando uma rede LoRa isolada. CRC é um método de detecção de erros para detectar mudanças acidentais nos pacotes de dados transmitidos.

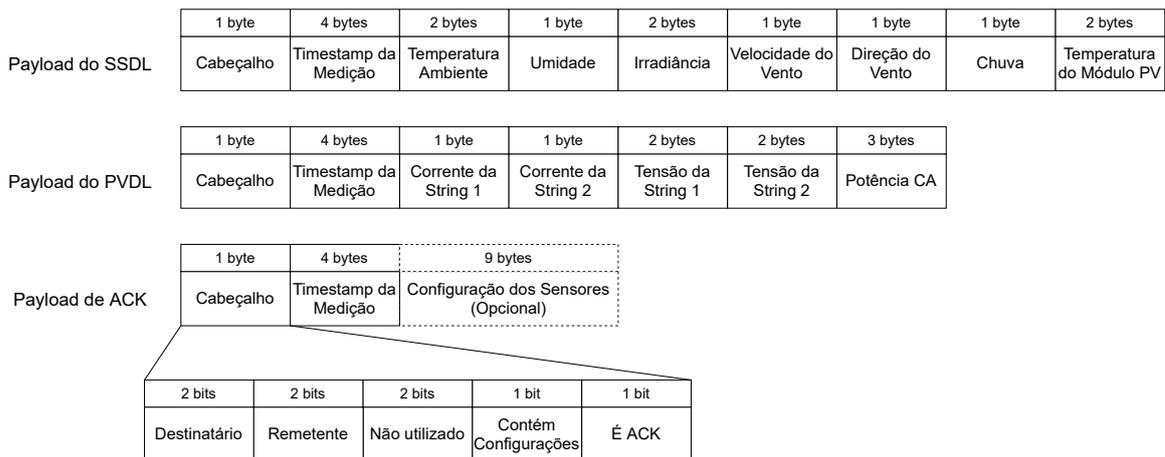


Figura 14: Estrutura proposta de *payload* LoRa. [Autorial]

Uma estrutura de *payload* foi desenvolvida para maximizar a transferência de dados usando o menor número de bits. A Figura 14 mostra a estrutura de transmissão de dados dos sensores e das informações ACK. O primeiro byte é um cabeçalho que contém as informações de quem são o remetente e o destinatário, realizando o endereçamento, e também contém bits que informam se o *payload* é um ACK e se contém informações de configurações dos sensores.

Os dados são compactados usando *bit-packing*, de modo que sua representação usa menos bits do que se fossem transmitidos como código ASCII. O *bit-packing* é uma compressão simples, onde os dados são primeiro representados em um valor inteiro usando a fórmula de

*bit-packing* e, em seguida, são representados em binário, a Tabela 5 detalha essa representação para cada tipo de dados.

Tabela 5: Bit-packing para diferentes tipos de dados. [Autorial]

Tipo de dado	Formula Bit-Packing	Bits	Faixa	Precisão
<i>Timestamp</i>	B = segundos a partir de 1 Jan 1970 00:00:00	32	1 Jan 1970 00:00:00 até 19 Jan 2038 03:14:07	1 segundo
Temperatura	$B = (T+40)*10$	16	-40 to 125 °C	0.1 °C
Umidade	$B = H$	7	0 to 100%	1%
Irradiância	$B = I*10$	16	0 to 6553.5 W/m <sup>2</sup>	0.1 W/m <sup>2</sup>
Velocidade do vento	$B = S$	8	0 to 255 Km/h	1 Km/h
Direção do vento	Mapeia para um valor representativo da direção	3	0, 45, 90, 135, 180, 225, 270, 315 °	-
Chuva	$B = R/0.25$	8	0 to 63.75 mm	0.25 mm
Tensão	$B = V*10$	16	0 to 6553.5 V	0.1 V
Corrente	$B = C*10$	8	0 to 25.5 A	0.1 A
Potência	$B = (P+9000)*10$	24	-9000 to 9000 W	0.1 W

Como o Arduino-LoRa só suporta a transmissão de char (1 byte em linguagem C), mesmo os dados menores que 8 bits foram alocados em um byte na estrutura, isso também facilita a separação dos dados no receptor.

## 6.4 Arquitetura e aplicação da internet das coisas

Os dados coletados pelo sistema proposto são disponibilizados ao usuário por meio do GCP. A Figura 15 ilustra a arquitetura IoT proposta. O módulo GCP IoT Core é responsável por gerenciar os dispositivos e definir qual protocolo de comunicação pode ser usado por eles. Como gerenciador de dispositivos, o IoT Core oferece opções para registrar, atualizar e monitorar o status dos dispositivos. Nesta proposta, o *gateway* LoRa foi registrado como um dispositivo IoT e um par de chaves foi gerado para realizar a autenticação do dispositivo e permitir uma comunicação segura. A chave pública gerada foi registrada no IoT Core

enquanto a chave privada é implementada no *gateway* LoRa.

Para comunicação entre o GCP e o *gateway* LoRa, o protocolo MQTT é usado. MQTT é um protocolo de comunicação máquina para máquina baseado no padrão *publish/subscribe* para a troca de mensagens assíncronas. O módulo Pub/Sub é o *broker* MQTT do GCP, responsável por gerenciar tópicos e assinaturas. O Pub/Sub oferece armazenamento temporário de mensagens e entrega de mensagens em tempo real com alta disponibilidade e desempenho consistente em grande escala.

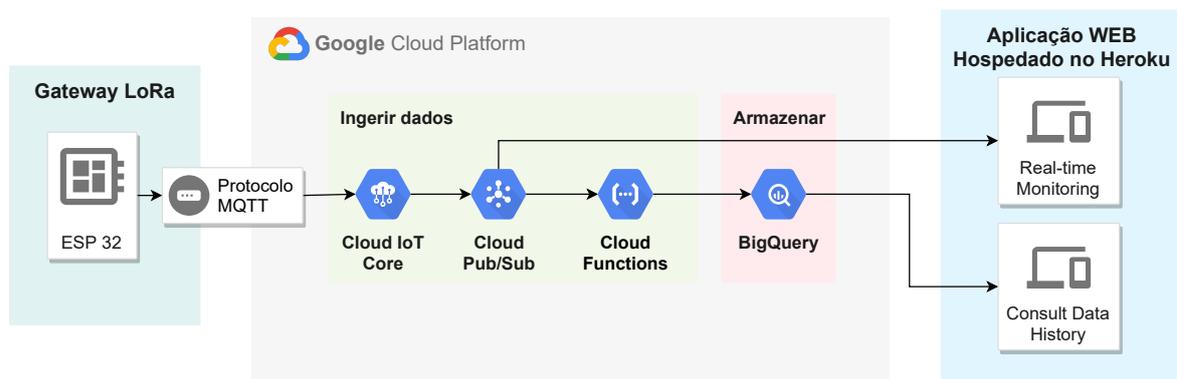


Figura 15: Diagrama representando a arquitetura IoT. [Autorial]

Dois tópicos MQTT foram criados, um para receber dados enviados do SSDL e outro para receber dados do PVDL. Cada um desses tópicos possui dois assinantes, o primeiro assinante é a página *Real-time Monitoring* da aplicação web, permitindo uma exibição de dados em tempo real para o usuário. O segundo assinante é o módulo Cloud Functions do GCP, que transfere os dados para o BigQuery para armazenamento.

O módulo GCP BigQuery é um banco de dados SQL (Standard Query Language) para grandes conjuntos de dados. Foi criada uma tabela para armazenar os dados de cada dispositivo DL. A aplicação web pode fazer consultas ao BigQuery com base em datas e obter um histórico de dados para exibição.

Além disso, o IoT Core cria automaticamente dois tópicos para cada dispositivo registrado, um tópico de configuração e um tópico de comando. O tópico de configuração é usado para transmitir as configurações de sensores dos dispositivos DLs e o tópico de comando pode ser usado para reiniciar o *gateway* LoRa remotamente. As configurações são enviadas sempre que um dispositivo é conectado ao GCP ou quando uma nova configuração é submetida. Ambos os tópicos são acessíveis apenas por meio da página web do IoT Core.

## 6.5 Aplicação WEB

A aplicação web fornece uma maneira simples e fácil para o usuário visualizar e obter os dados adquiridos pelo sistema proposto. Quatro *endpoints* foram criados para acessar os serviços do GCP: dois *endpoints* para assinatura nos tópicos MQTT de cada registrador de dados e dois outros para consultar as tabelas do BigQuery.

Três páginas da web foram implementadas: página inicial, *Real-time Monitoring* e *Consult Data History*. A figura 16 mostra a página inicial da aplicação que contém algumas informações sobre o trabalho desenvolvido. Cada dispositivo possui uma página *Real-time Monitoring* e *Consult Data History*, acessadas a partir do menu superior. Quando o cursor passa pelos nomes dos dispositivos no menu superior, um submenu suspenso é exibido para selecionar a página desejada.

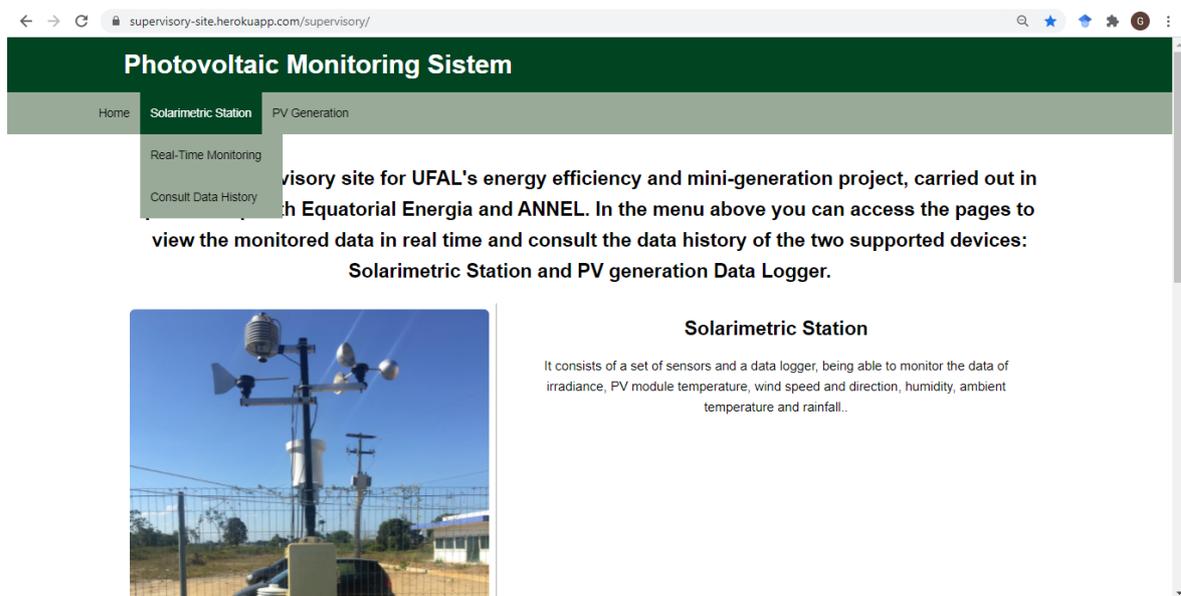


Figura 16: Página inicial da aplicação Web, exibindo o submenu. [Autoral]

A página *Real-time Monitoring* usa um dos *endpoints* para se inscrever no tópico de dados do dispositivo. Assim que os dados são recebidos por meio do MQTT, eles são exibidos em duas seções desta página. A primeira seção mostra o último conjunto de dados que chegou, incluindo a data e hora em que foi obtido. Na segunda seção, cada variável monitorada é exibida em um gráfico de linha diferente. Os gráficos passam a exibir os dados recebidos a partir do momento em que a página é aberta e podem exibir até 1440 pontos simultaneamente (24 horas de monitoramento). Quando o limite máximo de pontos é atingido, os pontos mais

antigos são removidos à medida que novos dados são recebidos. A Figura 17 mostra a página *Real-time Monitoring* da estação solarimétrica, com a primeira seção e o primeiro gráfico da segunda seção.

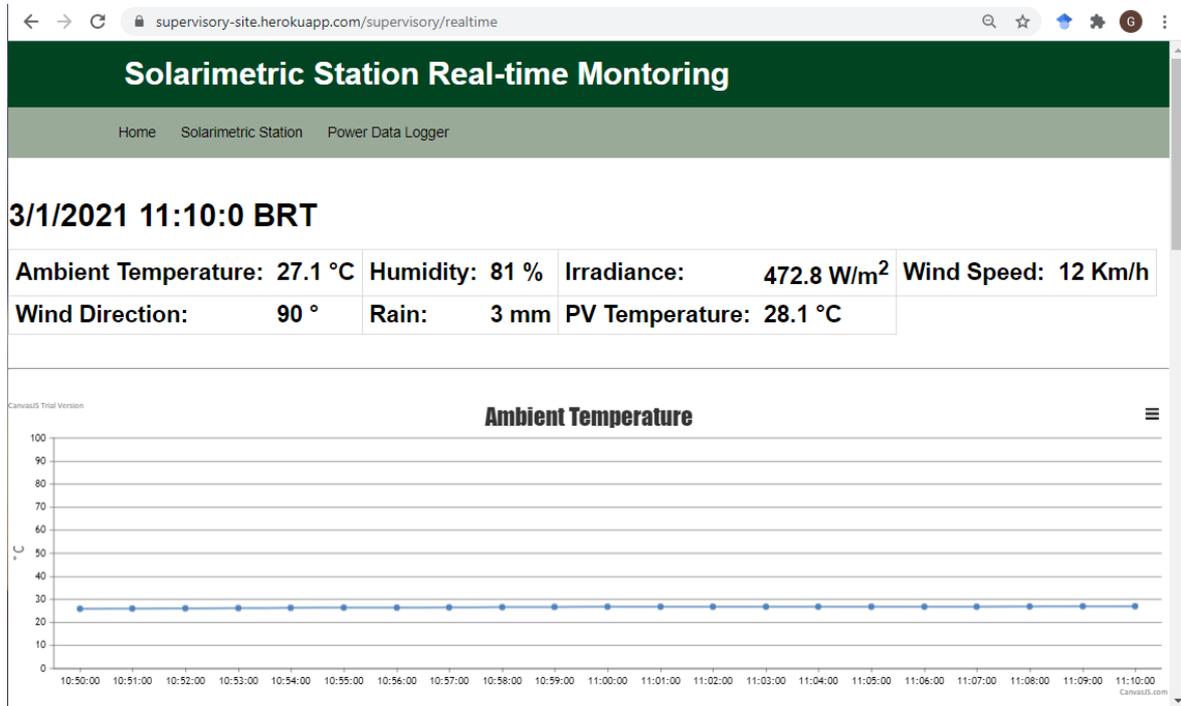
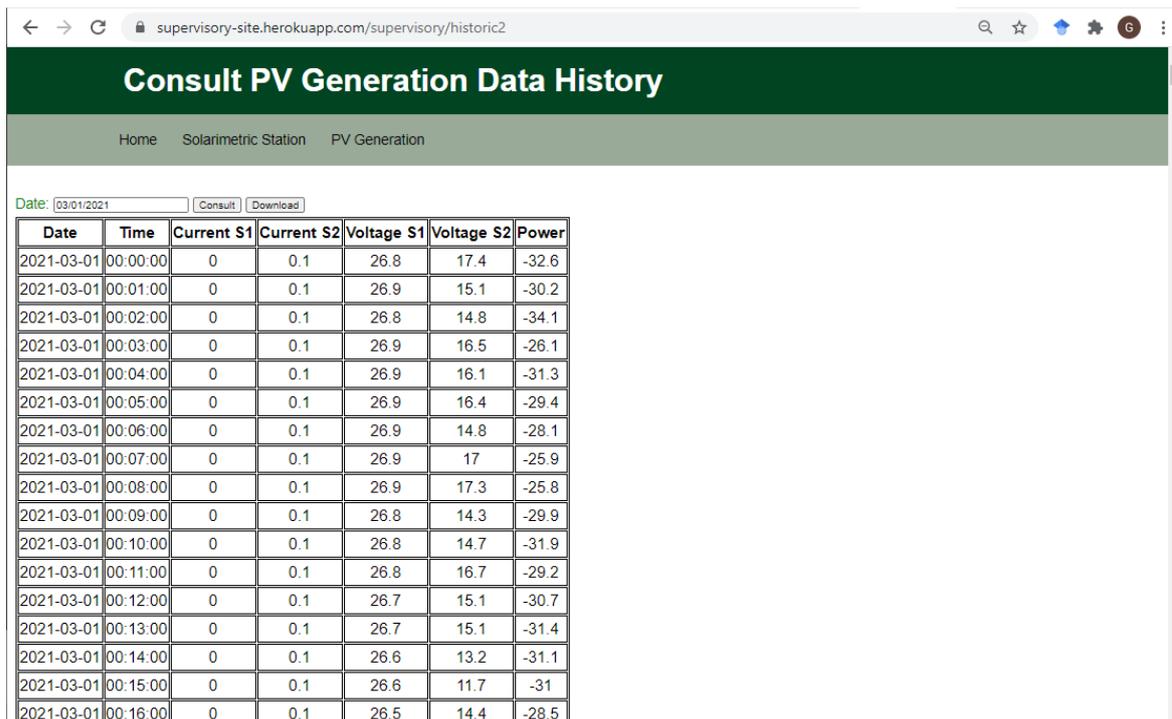


Figura 17: Página da aplicação web para monitoramento em tempo real da estação solarimétrica. [Autorial]

Na página *Consult Data History* (Figura 18), o usuário pode escolher um dia, digitando manualmente no formato MM/DD/AAAA ou usando um calendário interativo para consultar os dados salvos no BigQuery. Ao escolher a data e pressionar o botão *Consult*, o *endpoint* consulta a tabela no BigQuery e os dados obtidos, se houver, são exibidos na página em formato de tabela. O botão *Download* converte os dados exibidos na tabela em um arquivo CSV transferido para o computador do usuário.



Date	Time	Current S1	Current S2	Voltage S1	Voltage S2	Power
2021-03-01	00:00:00	0	0.1	26.8	17.4	-32.6
2021-03-01	00:01:00	0	0.1	26.9	15.1	-30.2
2021-03-01	00:02:00	0	0.1	26.8	14.8	-34.1
2021-03-01	00:03:00	0	0.1	26.9	16.5	-26.1
2021-03-01	00:04:00	0	0.1	26.9	16.1	-31.3
2021-03-01	00:05:00	0	0.1	26.9	16.4	-29.4
2021-03-01	00:06:00	0	0.1	26.9	14.8	-28.1
2021-03-01	00:07:00	0	0.1	26.9	17	-25.9
2021-03-01	00:08:00	0	0.1	26.9	17.3	-25.8
2021-03-01	00:09:00	0	0.1	26.8	14.3	-29.9
2021-03-01	00:10:00	0	0.1	26.8	14.7	-31.9
2021-03-01	00:11:00	0	0.1	26.8	16.7	-29.2
2021-03-01	00:12:00	0	0.1	26.7	15.1	-30.7
2021-03-01	00:13:00	0	0.1	26.7	15.1	-31.4
2021-03-01	00:14:00	0	0.1	26.6	13.2	-31.1
2021-03-01	00:15:00	0	0.1	26.6	11.7	-31
2021-03-01	00:16:00	0	0.1	26.5	14.4	-28.5

Figura 18: Página da aplicação web para consultar o histórico de dados de geração PV.

[Autorial]

O aplicativo da web está hospedado em Heroku [Her21], uma plataforma de nuvem como serviço com suporte para diferentes linguagens de perfil, incluindo o *framework* Django.

## 7 Resultados e Discussões

### 7.1 Descrição e comparação de custos

O custo de produção do SSDL foi de USD \$65,42, este valor inclui a placa de circuito impresso e componentes eletrônicos, como resistores, capacitores, regulador de tensão, ADS1115, RTC, cartão SD e Heltec WiFi LoRa 32 (V2). A produção do PVDL foi de USD \$109,11, o preço mais alto se deve aos ADCs que o dispositivo contém, o valor também inclui a PCB e demais componentes. O *gateway* LoRa é um Heltec WiFi LoRa 32 (V2), portanto, custando USD \$20,80.

Os custos dos sensores usados são: piranômetro - USD \$279,45, NTC 10K - USD \$3,14, SHT20 (com proteção à prova d'água) - USD \$27,97, anemômetro - USD \$37,10, indicador de direção do vento - USD \$37,10, pluviômetro - USD \$48,44, transdutor de tensão - USD \$55,93, transdutor de corrente - USD \$82,96 e transdutor de potência - USD \$236,24. Adicionando os custos dos registradores de dados e seus sensores, temos um custo total de USD \$498,62 para a estação solarimétrica e USD \$623,13 para o monitor de geração fotovoltaica. Assim, o custo total de hardware do sistema proposto é de USD \$1.142,55.

O custo de produção pode ser menor ao considerar apenas os componentes usados no experimento e se for feita a otimização da compra dos componentes. Por exemplo, apenas um dos ADCs do PVDL foi utilizado durante os experimentos, desse modo, os demais podem ser removidos, dependendo do caso de uso, reduzindo USD \$44,4, para um custo total de USD \$1.098,15. Além disso, como o sistema é flexível, qualquer um dos sensores ou transdutores pode ser facilmente substituídos por alternativas mais baratas.

Pode-se fazer uma comparação com o trabalho desenvolvido em [ERA<sup>+</sup>18] por ser um dos mais completos da literatura e fornecer o custo de seu desenvolvimento. Os autores relataram um custo de USD \$25.000,00 para desenvolver 20 unidades do sistema, portanto, pode ser estimado que cada unidade tem um valor em torno de USD \$1.250,00. Para monitorar os fatores meteorológicos e de geração PV, são necessárias duas unidades deste sistema, totalizando USD \$2.500,00. Portanto, nosso sistema é cerca de duas vezes mais barato que este.

Outra comparação pode ser feita com o *data logger* comercial CR1000, cujo custo é cerca de USD \$2.850,00. O CR1000 não inclui quaisquer sensores ou transdutores, ao adicionar

esses dispositivos ao CR1000 para formar um sistema de monitoramento fotovoltaico, que monitora os mesmos fatores que o sistema proposto, o custo seria ainda mais elevado. Hipoteticamente, a aplicação dos sensores e transdutores usados no sistema proposto, que custam USD \$926,42 (piranômetro, NTC, SHT20, anemômetro, indicador de direção do vento, pluviômetro e tradutores de tensão, corrente e potência), ao CR1000 resultaria em um sistema com um custo total de aproximadamente USD \$3.776,42 (CR1000 + sensores).

Todo o software utilizado era de código aberto, sem nenhum custo extra. Em relação ao GCP, o custo mensal é de USD \$0,20, baseado no custo no mês de março (31 dias) e sem considerar os descontos no uso de alguns dos serviços. Pretendemos implementar no futuro a mesma infraestrutura de IoT baseada no agente de mensagens de código aberto Mosquitto [Mos21], oferecendo uma alternativa gratuita ao GCP. O Heroku oferece 1000 horas por mês para rodar aplicativos gratuitos sem nenhum custo, portanto, o aplicativo web não adiciona custos ao sistema.

## 7.2 Resultados experimentais

Como a miniusina ainda não estava em operação até o desenvolvimento do sistema e escrita deste trabalho, outras plantas PV foram considerados para testar e validar o sistema proposto. O sistema selecionado é constituído por 19 painéis de silício policristalino (Si-p), com potência nominal de 270 Wp (watt-pico) cada, associados em série a 5130 Wp nominais. O sistema fotovoltaico foi configurado em duas *strings*, devido às limitações de tensão máxima do inversor utilizado, a String 1 possui 10 painéis associados em série e a String 2 possui 9 painéis associados também em série. Os dados operacionais de cada *string* são exibidos na Tabela 6, nas condições padrões de teste (STC, do inglês *Standard Testing Conditions*), 1000 W/m<sup>2</sup>, 1.5 AM e 25 °C.

Tabela 6: Dados elétricos por *string*. [Igor Torres]

String	$V_{OC}$	$V_{MPP}$	$I_{SC}$	$I_{MPP}$	$P_{MPP}$
1	349 V	317 V	9,09 A	8,52 A	2700 W
2	388 V	285 V	9,09 A	8,52 A	2482 W

A ligação das *strings* é feita através de um inversor CC/CA com potência nominal de 5000 W, atingindo um pico máximo de 6500 W. O inversor utilizado é o PHB5000D-NS da fabricante PHB do Brasil. O inversor está integrado à rede elétrica seguindo os padrões estabelecidos pela ANEEL. A Tabela 7 apresenta alguns dos dados do inversor. O sistema PV também inclui dispositivos de proteção e seccionamento. Essa planta PV se encontra na residência do Prof. Igor Torres do Campus de Engenharias e Ciências Agrárias da UFAL, que além de permitir a utilização da planta, também contribuiu na instalação e validação do sistema proposto.

Tabela 7: Especificações do Inversor PHB5000D-NS. [Sol21]

Potência máxima	6500 W
Máxima tensão CC	580 V
Mínima tensão CC	125 V
Faixa do MPPT	125 - 550 V
Entradas MPPT	2
Corrente CC	11,4 A / 11,4 A
Tensão de fase CA nominal	220 V / 60 Hz
Eficiência de conversão ( $\eta$ )	97,8 %

O sistema PV possui um segundo sistema de monitoramento aplicado. Este segundo sistema de monitoramento é baseado no *data logger* CR1000 da Campbell Scientific [CS21], e possui sensores externos para medir a temperatura ambiente, irradiância solar e temperatura de um módulo fotovoltaico, já os dados de geração PV são obtidos pelos mesmos transdutores usados pelo sistema proposto. Esse sistema baseado no CR1000 foi utilizado para validar as medições realizadas pelo sistema proposto.

A figura 19 mostra o sistema instalado no local. A Figura 19a mostra a estação solarimétrica discutida no Capítulo 5.2, com destaque 1 mostrando o piranômetro, anemômetro, pluviômetro e indicador de direção do vento. O SHT20 está posicionado dentro de um abrigo climático no meio da estrutura da estação. O NTC é fixado na parte traseira de um dos módulos fotovoltaicos. O SSDL está contido em uma caixa hermética para proteção e é mostrado no destaque 2.

O gabinete mostrado na Figura 19b está localizado próximo ao inversor e possui dispositivos para proteção e seccionamento do sistema FV. O destaque 3 mostra os transdutores de tensão DC (branco) e a corrente DC (preto). Ao lado deles está o transdutor de alimentação CA. Conforme detalhado no Capítulo 5.3.2, os dados dos transdutores são adquiridos pelo PVDL (destaque 4).

Os resultados a seguir referem-se aos dados monitorados durante o período de 27 de fevereiro de 2021 a 14 de março de 2021<sup>1</sup>. Até a escrita desse trabalho (17 de Abril de 2021) o sistema proposto estava instalado e operando nessa planta PV.

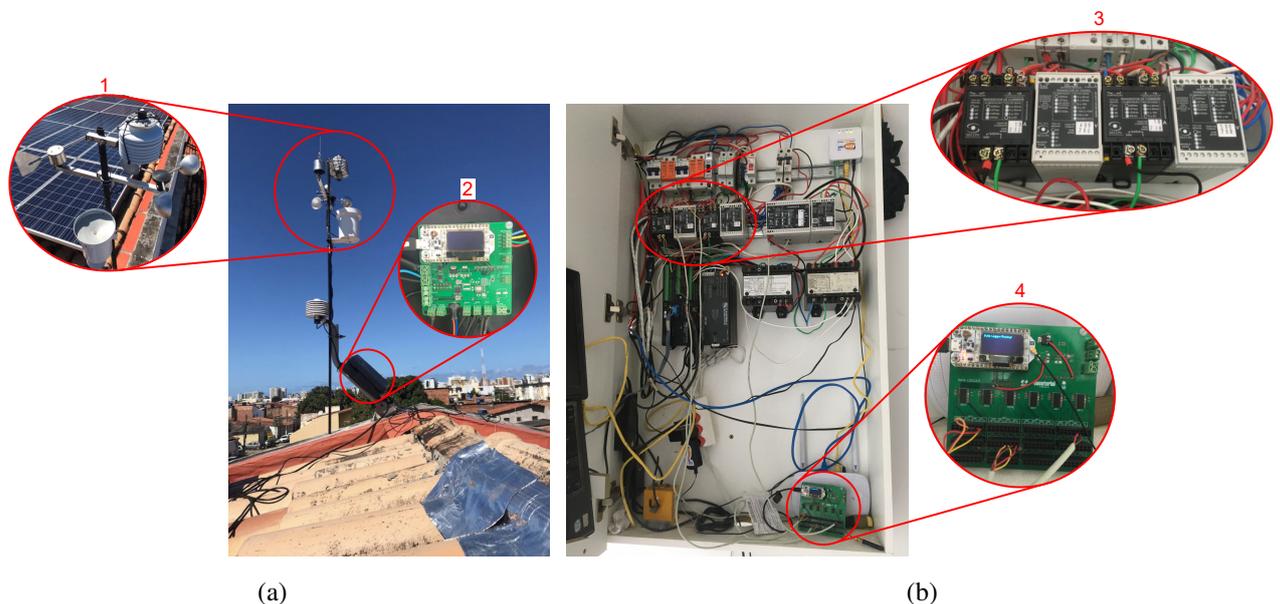


Figura 19: Sistema proposto instalado. (a) Estação solarimétrica, com ênfase em seu *data logger* e sensores. (b) Gabinete com os transdutores e o PVDL. [Autoral]

### 7.2.1 Operação e confiabilidade do sistema

A arquitetura do sistema proposto possui boa confiabilidade e foi eficaz na exibição dos dados coletados em tempo real. Durante o período experimental de 16 dias, esperava-se que 23.040 conjuntos de dados de cada registrador de dados fossem coletados e enviados. Um

<sup>1</sup>Todos os dados obtidos nesse período estão disponíveis nos seguintes links:

SSDL - [https://figshare.com/articles/dataset/Meteorological\\_Data\\_Proposed\\_System/14216969](https://figshare.com/articles/dataset/Meteorological_Data_Proposed_System/14216969),

PVDL - [https://figshare.com/articles/dataset/PV\\_Generation\\_Data\\_Proposed\\_System/13953845](https://figshare.com/articles/dataset/PV_Generation_Data_Proposed_System/13953845)

e CR1000 - [https://figshare.com/articles/dataset/CR1000\\_Data/14225111](https://figshare.com/articles/dataset/CR1000_Data/14225111).

total de 99,13% dos conjuntos de dados da estação solarimétrica e 99,40% dos conjuntos de dados de geração FV chegaram à nuvem, demonstrando a confiabilidade do sistema.

Todos os dados que chegaram ao GCP foram salvos com sucesso no BigQuery e enviados ao aplicativo da web via MQTT. Em relação à eficácia de estar em tempo real, o cálculo da média dos dados obtidos pela tarefa 1 até que esses dados sejam exibidos na aplicação web é rápido, com um atraso de no máximo cinco segundos. A maior parte desse atraso é introduzida pela execução da tarefa 2 dos registradores de dados a cada cinco segundos, que é necessária para manter a consistência da operação do dispositivo.

A utilização de sensores dedicados permite que o sistema proposto seja aplicado a outros sistemas fotovoltaicos, independente do inversor utilizado. Além disso, a amostragem da proposta não depende da amostragem dos dados de geração PV fornecidos pelo inversor. A amostragem a cada segundo, seguida pela média de 1 minuto dos dados, fornece medições precisas, mantendo a transmissão de dados, armazenamento e computação em baixa complexidade [RCJ<sup>+</sup>09].

O protocolo LoRa proposto reduz o tamanho da carga útil permitindo uma transmissão mais eficiente, o que reduz o tempo de transmissão e o consumo de energia. A Tabela 8 compara o tamanho aproximado em bytes do *payload* transmitido pela estrutura proposta, pelo LoRaWAN usando Cayenne LPP (Low Power Payload) [Cay21] e como uma *string* de texto.

Tabela 8: Tamanho do *payload* em bytes, considerando diferentes protocolos. [Autoral]

Protocolo	Dados SSDL	Dados PVDL	ACK (mín)
Proposta	15 B	14 B	5 B
Cayenne LPP [Cay21]	33 B	28 B	9 B
<i>String</i> de texto	61 B	56 B	27 B

O uso do NTP para sincronizar RTCs trouxe grandes vantagens. Primeiro, permitiu que os RTCs tivessem a data e a hora corretas. Antes de usar o NTP, o RTC apresentava um pequeno erro de precisão que poderia se acumular, gerando um erro de vários minutos. Em segundo lugar, permitiu uma maneira simples de sincronizar as medições entre os dois DLs.

### 7.2.2 Precisão do sistema

Antes de realizar as comparações e cálculos estatísticos entre os dados obtidos pelo sistema proposto e os dados do sistema baseado no CR1000, foi realizado um pré-processamento em todos os dados. Em relação aos dados obtidos pelo sistema proposto, alguns dos valores de geração de PV apresentaram erros em suas medições (por exemplo, estando fora da faixa esperada), esses valores foram substituídos pela última leitura válida. Alguns dados obtidos pelo CR1000 mostraram o valor NAN (Not A Number), esses valores também foram removidos e substituídos pelo último valor lido válido.

Após o pré-processamento, as seguintes métricas estatísticas foram calculadas entre os dados obtidos nos dois sistemas: Erro Médio Absoluto (MAE, do inglês *Mean Absolute Error*) (Eq. 6), Desvio Médio Quadrático (RMSD, do inglês *Root Mean Square Deviation*) (Eq. 7) e Erro Percentual Absoluto Médio Ponderado (WAPE, do inglês *Weighted Absolute Percent Error*) (Eq. 8). Onde  $n$  é o número de amostras de dados,  $y_i$  é a  $i$ -ésima amostra de dados coletados pelo CR1000 e  $x_i$  é a  $i$ -ésima amostra de dados coletados pelo sistema proposto. A Tabela 9 mostra os resultados.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - x_i| \quad (6)$$

$$RMSD = \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2 \right]^{0.5} \quad (7)$$

$$WAPE = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - x_i|}{\sum_{i=1}^n |y_i|} \quad (8)$$

O MAE mede a magnitude média dos erros entre os dois conjuntos de dados, sem considerar sua direção. Da mesma forma, no RMSD os erros são elevados ao quadrado antes de serem calculados, atribuindo um peso relativamente alto aos erros grandes. MAE e RMSD fornecem o erro em unidades da variável de interesse, o que pode gerar uma comparação enganosa entre os erros das diferentes medições. Por esse motivo, o WAPE também foi calculado, apresentando os erros em porcentagem.

Tabela 9: Comparação estatística entre as medidas do sistema proposto e o CR1000 considerando os 16 dias de experimento e três tipos de métricas: MAE, RMSD e WAPE. [Autorial]

<b>Dado</b>	<b>MAE</b>	<b>RMSD</b>	<b>WAPE</b>
Temp. Ambiente	1,21 °C	1,46 °C	4,13%
Irradiância	37,05 W/m <sup>2</sup>	68,12 W/m <sup>2</sup>	13,54%
Temp. Módulo PV	5,67 °C	6,73 °C	17,56%
Corrente String 1	0,12 A	0,41 A	5,37%
Corrente String 2	0,17 A	0,41 A	7,29%
Tensão String 1	21,46 V	48,02 V	15,15%
Tensão String 2	14,51 V	38,23 V	11,99%
Potência CA	74,01 W	210,90 W	6,60%

Os fatores que apresentaram WAPE abaixo de 10% foram considerados aceitáveis, isto inclui temperatura ambiente (4,13%), correntes das duas *strings* (5,37% e 7,29%) e potência CA (6,6%). Considerando as unidades e magnitudes desses fatores, eles também apresentaram um baixo MAE que não deve impactar na qualidade da medição. Porém, o RMSD da potência (210,9 W) e das correntes (0,41 A para ambos) ficaram entre 2,4 e 3,2 vezes maiores que o MAE, o que pode indicar a presença de *outliers* nessas medidas. A irradiância (13,54%), a temperatura do módulo PV (17,56%) e as medidas de tensão (15,15% e 11,99%) apresentaram WAPE maior que o valor aceitável. Embora, para todos esses fatores, o WAPE seja inferior a 18%, e esses valores podem ser melhorados com alguns ajustes discutidos abaixo.

A Figura 20 mostra as comparações gráficas das medições durante 7 dias (1 a 7 de março de 2021). A linha azul representa as medições retornadas pelo sistema proposto, e a linha vermelha representa as medições retornadas pelo CR1000. Dados sobre umidade, velocidade do vento, direção do vento e chuva não são monitorados pelo sistema baseado em CR1000, portanto, não foram comparados.

Percebe-se que o erro na medição da irradiância está presente principalmente quando este fator atinge seu valor máximo (Figura 20c), isso pode ser devido à diferença no local de instalação dos piranômetros. Em relação ao piranômetro do sistema proposto, ele está

instalado no topo da estrutura da estação solarimétrica (Figura 19a), em contrapartida, o piranômetro do sistema CR1000 está instalado em um nível inferior, próximo a os módulos fotovoltaicos. Além disso, o sinal de irradiância do sistema proposto também apresenta ruído, a aplicação de um filtro pode reduzir este ruído e o erro.

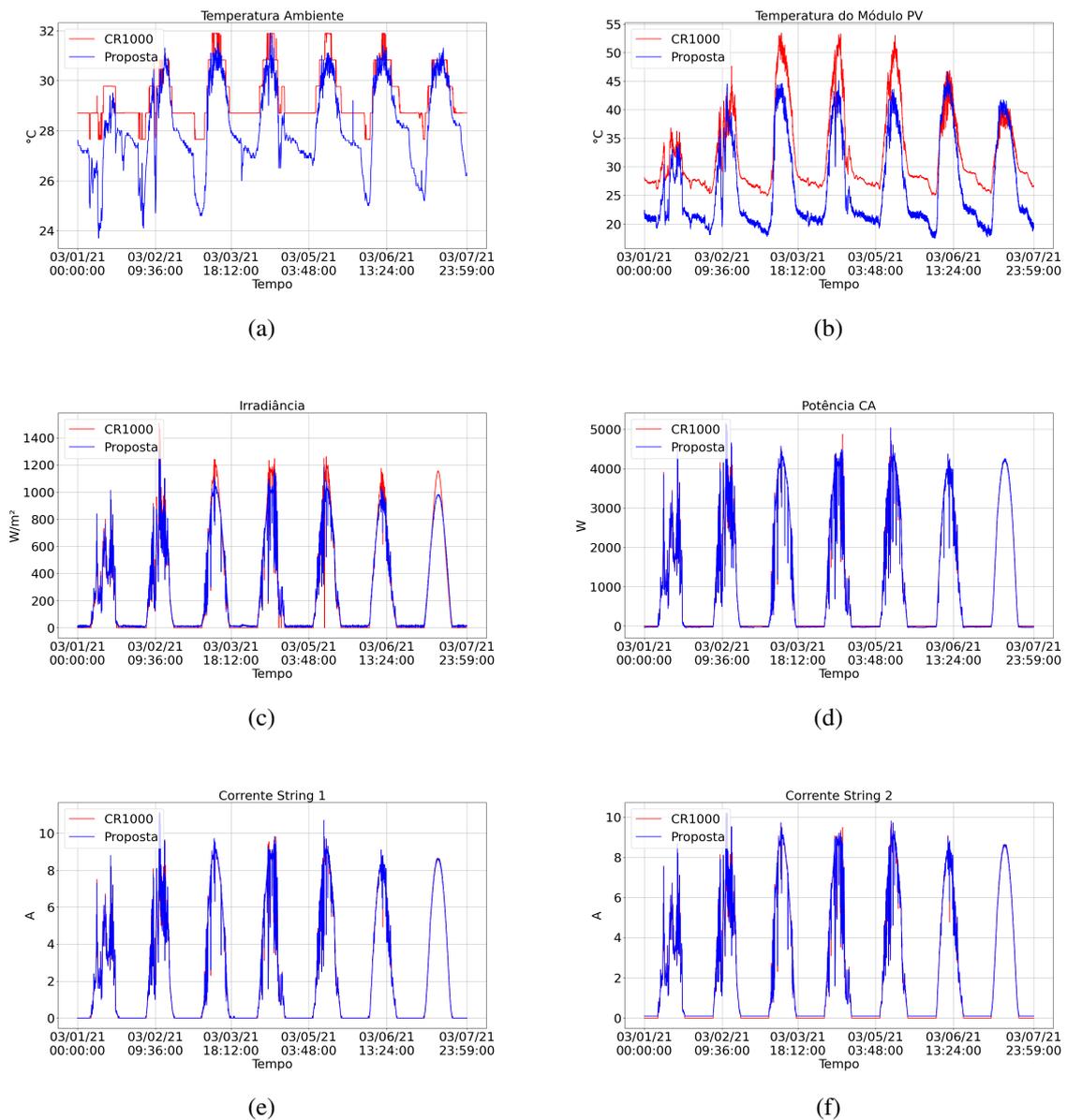


Figura 20: Comparação gráfica dos dados obtidos durante uma semana (1 de março a 7 de março de 2021) pelo sistema proposto (azul) e pelo CR1000 (vermelho). Os gráficos mostram as seguintes medidas: (a) temperatura ambiente, (b) temperatura do módulo PV, (c) irradiância, (d) potência CA, (e) corrente da String 1, (f) corrente da String 2. [Autoral]

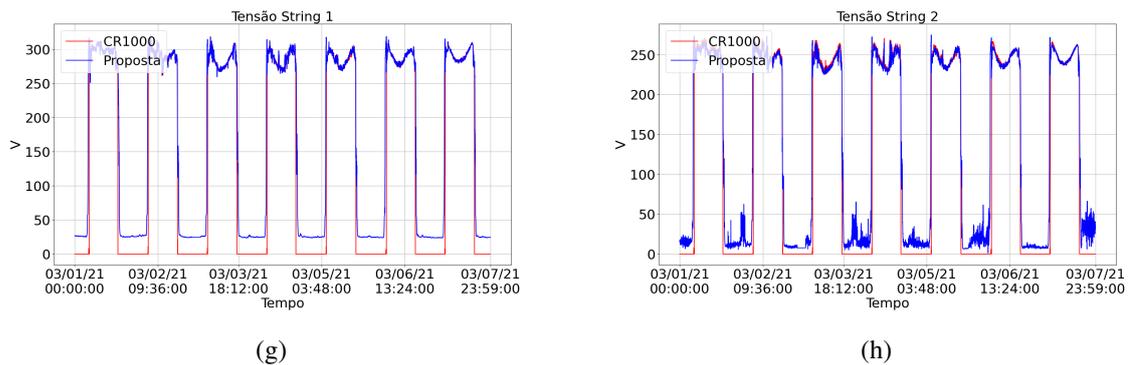


Figura 20: (continuação) **(g)** tensão da String 1, **(h)** tensão da String 2. [Autoral]

A maior parte dos erros nas medições de tensão são gerados durante a noite, onde o SSDL mede valores acima de 0 V quando deveria ser zero (Figuras 20g e 20h). Esse erro pode ser causado pelos divisores de tensão aplicados aos transdutores ou por alguma interferência externa com um efeito parasita. Aplicar um filtro, zerando a leitura abaixo de um valor limite reduziria esses erros nas leituras de tensão.

A temperatura do módulo PV apresentou o maior erro entre todos os fatores ao usar um NTC para monitorar esses dados. Na equação usada para converter a resistência apresentada pelo NTC em temperatura, as constantes aplicadas foram para um NTC ideal de 10 k  $\Omega$ . Realizar uma calibração para encontrar as constantes específicas do NTC utilizado reduziria o erro apresentado.

## 8 Considerações Finais

Neste trabalho, foi desenvolvido um sistema IoT para monitoramento em tempo real de sistemas fotovoltaicos. O sistema IoT é composto por dois dispositivos *data loggers*, um sistema em nuvem e uma aplicação web. Ele pode monitorar dados meteorológicos e de geração de PV.

O diferencial do sistema proposto é que ele mede todas as variáveis meteorológicas relevantes, é implementado em software aberto, usa LoRa como tecnologia para transmissão de dados e se conecta à internet sem cabos, armazena dados localmente e na nuvem, usa NTP para sincronizar os relógios dos dispositivos, mede as variáveis de geração PV diretamente da planta (não do inversor). Até onde sabemos, nenhum trabalho relatado na literatura apresenta todas essas características.

Além disso, os resultados experimentais mostraram a correta eficácia na exibição em tempo real dos dados e boa confiabilidade do sistema proposto. O custo de produção mostrou-se baixo, sendo quase a metade de um sistema baseado em *data logger* comercial e um dos sistemas mais completos da literatura. Portanto, o sistema proposto pode ser uma boa alternativa aos micro e mini sistemas PV. No entanto, por se tratar de um sistema aberto, é escalonável e facilmente modificado, o que permite sua utilização em sistemas PV de diferentes topologias e tamanhos. Também, este sistema pode ser usado como um sistema habilitador para criar sistemas fotovoltaicos inteligentes, uma vez que a arquitetura IoT pode ser usada para executar computação em nuvem ou *fog*, e o conjunto de dados criado pelo histórico das medições pode ser aplicado para detecção automática de falhas, e previsão de geração de energia.

Algumas sugestões de trabalhos futuros são:

- Realizar algumas melhorias de sistemas, como calibração de sensores e implementação de filtros nos DLs, para melhorar a precisão das medições que tiveram um erro mais considerável;
- Implementar a arquitetura IoT utilizando Mosquitto como uma alternativa aberta e sem custo ao GCP;
- Aplicar o sistema desenvolvido na mini usina da UFAL, uma vez que ela esteja em

operação;

- Integração do sistema desenvolvido com técnicas de aprendizado de máquina para prever a geração fotovoltaica com base em dados meteorológicos e detectar automaticamente as falhas que ocorram na planta PV, permitindo otimizar o processo de produção elétrica e aumentar a confiabilidade do sistema fotovoltaico.

## Referências

- [ABS21] ABSOLAR. Infográfico absolar. Technical report, ABSOLAR, 2021.
- [AI17] Ibrahim Allafi and Tariq Iqbal. Design and implementation of a low cost web server using esp32 for real-time photovoltaic system monitoring. In *2017 IEEE electrical power and energy conference (EPEC)*, pages 1–5. IEEE, 2017.
- [AI19] Lawrence O Aghenta and M Tariq Iqbal. Development of an iot based open source scada system for pv system monitoring. In *2019 IEEE Canadian Conference of Electrical and Computer Engineering (CCECE)*, pages 1–4. IEEE, 2019.
- [aL21] arduino LoRa. arduino-lora, 2021.
- [Ali21] Alibaba. New 433mhz esp32 lora sx1278 esp32 led 0.96 inch blue oled display ble wifi lora kit 32 v2 development board for arduino, 2021.
- [All21] ZigBee Alliance. Zigbee, 2021.
- [Ama16] Joseph Amajama. Effect of air pressure on the output of photovoltaic panel and solar illuminance (or intensity). *International Journal of Scientific Engineering and Applied Science (IJSEAS)*, 2(8):139–144, 2016.
- [ANASK<sup>+</sup>18] Hala Al-Nuaimi, Afnan Abu-Serdaneh, Hanin Kablan, Ghaya Al-Darmaki, and Atef Abdrabou. A low-cost online performance monitoring system for home photovoltaic generators. In *2018 Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET)*, pages 1–5. IEEE, 2018.
- [ANH18] Fawzi Al-Naima and Abdullah Hamad. A low-cost solar farm monitoring system based on cloud database. In *International Conference on Innovation and Intelligence for Informatics, Computing, and Technologies (3ICT)*, pages 1–5. IEEE, 2018.

- [AP20] Mubashir Ali and Mahnoor Khalid Paracha. An iot based approach for monitoring solar power consumption with adafruit cloud. *Int. J. Eng. Appl. Sci. Technol*, 4(9):335–341, 2020.
- [ARR17] Shaik Ayesha, P. Ramesh, and Sabitha Ramakrishnan. Design of wireless sensor network for monitoring the performance of photovoltaic panel. In *2017 Trends in Industrial Measurement and Automation (TIMA)*, pages 1–6. IEEE, 2017.
- [AS11] Julio Romero Agüero and Steve J Steffel. Integration challenges of photovoltaic distributed generation on power distribution systems. In *2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, pages 1–6. IEEE, 2011.
- [ASD<sup>+</sup>16] Soham Adhya, Dipak Saha, Abhijit Das, Joydip Jana, and Hiranmay Saha. An iot based smart solar photovoltaic remote monitoring and control unit. In *2016 2nd international conference on control, instrumentation, energy & communication (CIEC)*, pages 432–436. IEEE, 2016.
- [Aus21] HOBO Data Loggers Australia. Hobo rx3000, 2021.
- [BKN<sup>+</sup>12] Miroslav M Begovic, Insu Kim, Damir Novosel, Julio Romero Agüero, and Ajeet Rohatgi. Integration of photovoltaic distributed generation in the power distribution grid. In *2012 45th Hawaii International Conference on System Sciences*, pages 1977–1986. IEEE, 2012.
- [C<sup>+</sup>17] Guillermo Andres Rodriguez Cantor et al. Influência dos fatores climáticos no desempenho de módulos fotovoltaicos em regiões de clima tropical. *Repositório Institucional da UFPB*, 2017.
- [Cay21] Cayenne. Cayenne low power payload, 2021.
- [CMR<sup>+</sup>15] M Caruso, R Miceli, P Romano, G Schettino, C Spataro, and F Viola. A low-cost, real-time monitoring system for pv plants based on atmega 328p-pu microcontroller. In *2015 IEEE International Telecommunications Energy Conference (INTELEC)*, pages 1–5. IEEE, 2015.

- [CS21] Inc. Campbell Scientific. Cr1000, 2021.
- [Dev21] Analog Devices. Ltc4162-1 datasheet, 2021.
- [DRS19] Mohamed Deriche, Muhammad Wasim Raad, and Wael Suliman. An iot based sensing system for remote monitoring of pv panels. In *2019 16th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD)*, pages 393–397. IEEE, 2019.
- [ERA<sup>+</sup>18] Nouredine Erraissi, Mustapha Raoufi, Noura Aarich, Mohamed Akh-sassi, and Amin Bennouna. Implementation of a low-cost data acquisition system for “propre. ma” project. *Measurement*, 117:21–40, 2018.
- [Esp21] Espressif. Esp32, 2021.
- [FBJC<sup>+</sup>17] Sérgio de Oliveira Frontin, Antônio Cesar Pinho Brasil Jr, Maria Te-reza Diniz Carneiro, Nara Rúblia Dante de Godoy, et al. Usina fotovol-taica jaíba solar–planejamento e engenharia. *Brasília, Teixeira Gráfica e Editora Ltda*, page 532, 2017.
- [Gha19] Alireza Ghasempour. Internet of things in smart grid: Architecture, appli-cations, services, key technologies, and challenges. *Inventions*, 4(1):22, 2019.
- [Goo21] Google. Google cloud platform, 2021.
- [Hel21] Heltec. Wifi lora 32 (v2), 2021.
- [Her21] Heroku. Heroku: Cloud application platform, 2021.
- [Ins21a] Texas Instruments. Ad8668, 2021.
- [Ins21b] Texas Instruments. Ads1115 datasheet, 2021.
- [Ins21c] Texas Instruments. Bq24075, 2021.
- [Int21] Maxim Integrated. Ds1307 datasheet, 2021.

- [KIA<sup>+</sup>19] Mahmood Khan, Javed Iqbal, Muhammad Ali, Afaq Muhmmad, Ali Zahir, and Nadir Ali. Designing and implementation of energy-efficient wireless photovoltaic monitoring system. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, page e3685, 2019.
- [KiC21] KiCad. Kicad eda, 2021.
- [LCR<sup>+</sup>20] André Eugênio Lazzaretti, Clayton Hilgemberg da Costa, Marcelo Paludetto Rodrigues, Guilherme Dan Yamada, Gilberto Lexinoski, Guilherme Luiz Moritz, Elder Oroski, Rafael Eleodoro de Goes, Robson Ribeiro Linhares, Paulo César Stadzisz, et al. A monitoring system for online fault detection and classification in photovoltaic plants. *Sensors*, 20(17):4688, 2020.
- [LH11] Antonio Luque and Steven Hegedus. *Handbook of photovoltaic science and engineering*. John Wiley & Sons, 2011.
- [LVFV18] Ascensión López-Vargas, Manuel Fuentes, and Marta Vivar. Iot application for real-time monitoring of solar home systems based on arduino<sup>TM</sup> with 3g connectivity. *IEEE Sensors Journal*, 19(2):679–691, 2018.
- [MGPGPL<sup>+</sup>16] Isabel M Moreno-Garcia, Emilio J Palacios-Garcia, Victor Pallares-Lopez, Isabel Santiago, Miguel J Gonzalez-Redondo, Marta Varo-Martinez, and Rafael J Real-Calvo. Real-time monitoring system for a utility-scale photovoltaic power plant. *Sensors*, 16(6):770, 2016.
- [Mic21a] Microchip. Enc28j60, 2021.
- [Mic21b] Microchip. Miwi protocol, 2021.
- [Mos21] Mosquitto. Eclipse mosquitto, 2021.
- [Net21] The Things Network. Frequency plans by country, 2021.
- [Nex21] Nexperia. 74hc125 datasheet, 2021.
- [NTP21] NTP.br. Ntp.br, 2021.

- [Par21] Parsifal. Parsifal, 2021.
- [PJC19] Renata IS Pereira, Sandro CS Jucá, and Paulo CM Carvalho. Iot embedded systems network and sensors signal conditioning applied to decentralized photovoltaic plants. *Measurement*, 142:195–212, 2019.
- [Pla21] PlatformIO. Platformio ide, 2021.
- [PPGSMAMG19] José Miguel Paredes-Parra, Antonio Javier García-Sánchez, Antonio Mateo-Aroca, and Ángel Molina-García. An alternative internet-of-things solution based on lora for pv power plants: data monitoring and management. *Energies*, 12(5):881, 2019.
- [RCJ<sup>+</sup>09] Daniel M Riley, Christopher P Cameron, Joshua A Jacob, Jennifer E Granata, and Gary M Galbraith. Quantifying the effects of averaging and sampling rates on pv system and weather data. In *2009 34th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, pages 000456–000461. IEEE, 2009.
- [REN20] Secretariat REN21. Renewables 2020 global status report. Technical report, REN21, 2020.
- [Sci21a] Campbell Scientific. Cr1000x, 2021.
- [Sci21b] Campbell Scientific. Solar1000, 2021.
- [SCZ<sup>+</sup>17] FP Su, ZC Chen, HF Zhou, LJ Wu, PJ Lin, SY Cheng, and YF Li. A distributed monitoring system for photovoltaic arrays based on a two-level wireless sensor network. In *Proceedings of the IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (EES)*, volume 93, page 012077, 2017.
- [SEC21] Grupo SECON. Transdutores/transmissores para medidas de parâmetros elétricos, 2021.
- [Sen21a] Sensirion. Sht20 datasheet, 2021.
- [Sen21b] Sigma Sensors. Epe-rx3000, 2021.

- [SFOEC21] Ltd. Shenzhen Fine Offset Electronics Co. Solar powered touch panel weather center with pc interface, 2021.
- [Sol21] PHB Solar. Catalogo inversores monofásicos linha nf, 2021.
- [ST21] ST. Ld11117, 1.2 a high psrr low dropout linear voltage regulator, 2021.
- [Swa19] Arthur James Swart. Cost-effective remote energy monitoring using the esp8266 nodemcu. *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*, 7(6S), 2019.
- [Wik21] Wikipedia. Junção p-n difusão e barreira de potencial, 2021.
- [XNY<sup>+</sup>20] Kun Xia, Jiawen Ni, Yanhong Ye, Po Xu, and Yiming Wang. A real-time monitoring system based on zigbee and 4g communications for photovoltaic generation. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 6(1):52–63, 2020.
- [ZF17] Ricardo Mazza Zago and Fabiano Fruett. A low-cost solar generation monitoring system suitable for internet of things. In *2nd International Symposium on Instrumentation Systems, Circuits and Transducers (INS-CIT)*, pages 1–6. IEEE, 2017.
- [ZLB<sup>+</sup>18] Chaimae Zedak, Anass Lekbich, Abdelaziz Belfqih, Jamal Boukherouaa, Touria Haidi, and Faissal El Mariami. A proposed secure remote data acquisition architecture of photovoltaic systems based on the internet of things. In *2018 6th International Conference on Multimedia Computing and Systems (ICMCS)*, pages 1–5. IEEE, 2018.

## **A Protocolo de revisão sistemática**

- Objetivo principal de pesquisa:
  - Desenvolvimento e validação de um sistema de baixo custo para monitoramento e análise de mini e micro sistemas fotovoltaicos.
  
- Questões de pesquisa:
  - Quais as variáveis meteorológicas têm um maior impacto na geração fotovoltaica?
  - Quais os sensores estão sendo utilizados para o monitoramento da geração elétrica e das variáveis meteorológicas?
  - Qual a taxa de amostragem e a precisão das aquisições de dados necessários para se ter um monitoramento confiável?
  - Como o uso do conceito IoT tem sido aplicado para reduzir o custo do monitoramento fotovoltaico?
  - Como o monitoramento da geração fotovoltaica pode ser aplicado para melhorar os indicadores de eficiência energética?
  - Como o monitoramento fotovoltaico pode auxiliar na análise e avaliação da inserção da geração distribuída na rede elétrica?
  
- Base de artigos:
  - IEEE Digital Library;
  - ACM Digital Library;
  - El Compendex;
  - ISI Web of Science;
  - Science Direct;
  - Scopus;
  - SpringerLink.
  
- Principais termos:

- Data acquisition
- Monitoring
- Photovoltaic
- IoT
- Renewable energy
- String de busca:
  - ("data acquisition"OR "monitoring") AND ("photovoltaic"OR "PV"OR "micro-generation"OR "minigeneration") AND ("IoT"OR "low cost"OR "real time"OR "real-time")
- Critérios de inclusão:
  - Fontes primárias;
  - Estudos revisados por pares;
  - A Partir de 2016.
- Critérios de exclusão:
  - Artigos duplicados;
  - Artigos redundantes;
  - Estudos secundários;
  - Literatura cinzenta;
  - Artigos que não estejam escritos em inglês;
  - Artigos que não apresentam evidências suficientes para validação de sua metodologia.
- Critérios de qualidade:
  - Existe uma justificativa clara para realização do trabalho?
  - Os objetivos do trabalho são claros?
  - A metodologia é claramente descrita?

- As variáveis monitoradas são bem definidas?
- As características do sistema são descritas?
- Foi validado?
- O ambiente de validação foi descrito?
- Os resultados obtidos são discutidos?
- O estudo é comparado a outras soluções?
- Dados a serem extraídos dos artigos selecionados:
  - DOI;
  - Autores;
  - Título;
  - Ano de publicação;
  - Onde foi publicado;
  - Qualis;
  - Quantidade de citações;
  - Variáveis monitoradas:
  - Variáveis de geração;
  - Variáveis meteorológicas.
  - Características do sistema:
    - Frequência de aquisição de dados;
    - Sensores utilizados;
    - Tipo de comunicação;
    - Armazenamento dos dados;
    - Acesso os dados em tempo real?
    - Faz alguma análise dos dados?

## B Esquemáticos do SSDL e do PVDL

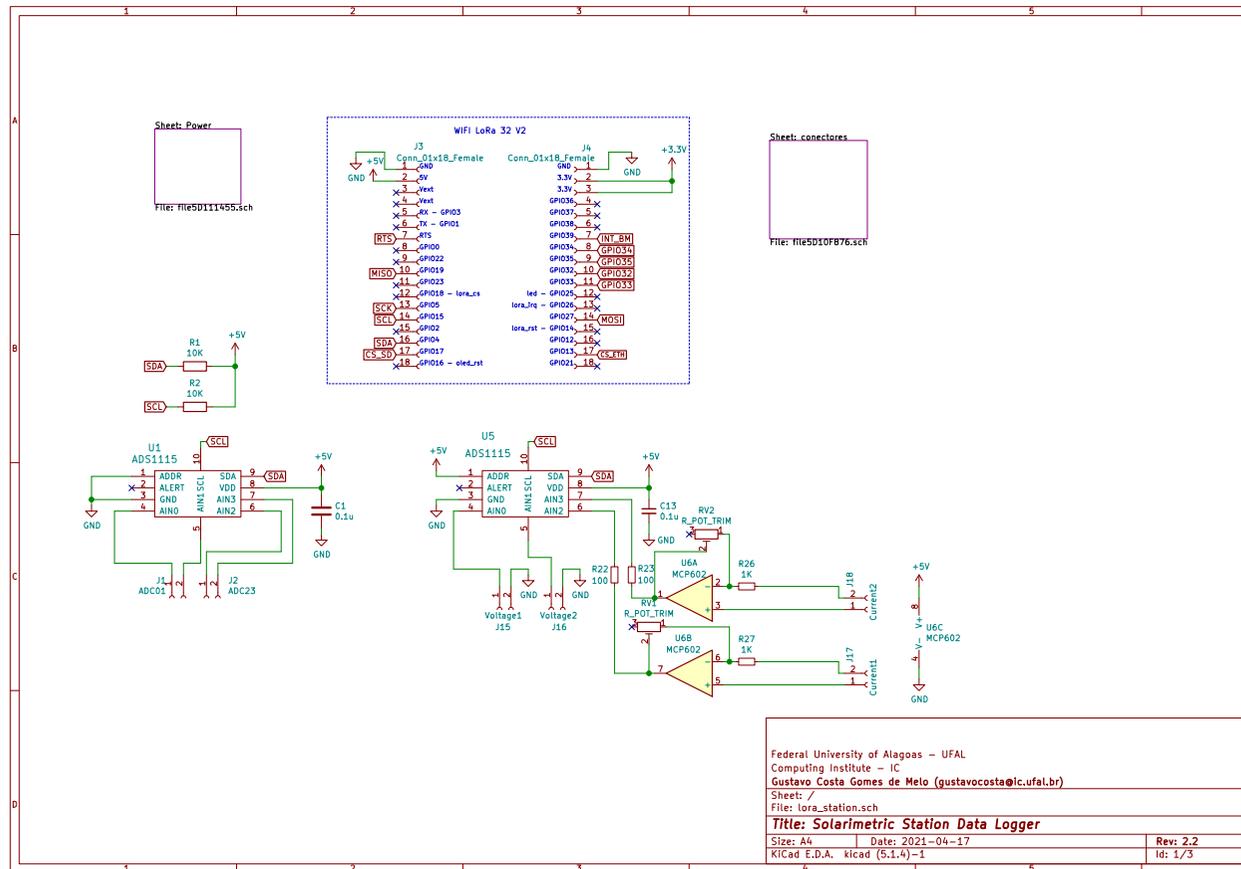


Figura 21: Esquemático do SSDL - Parte 1.

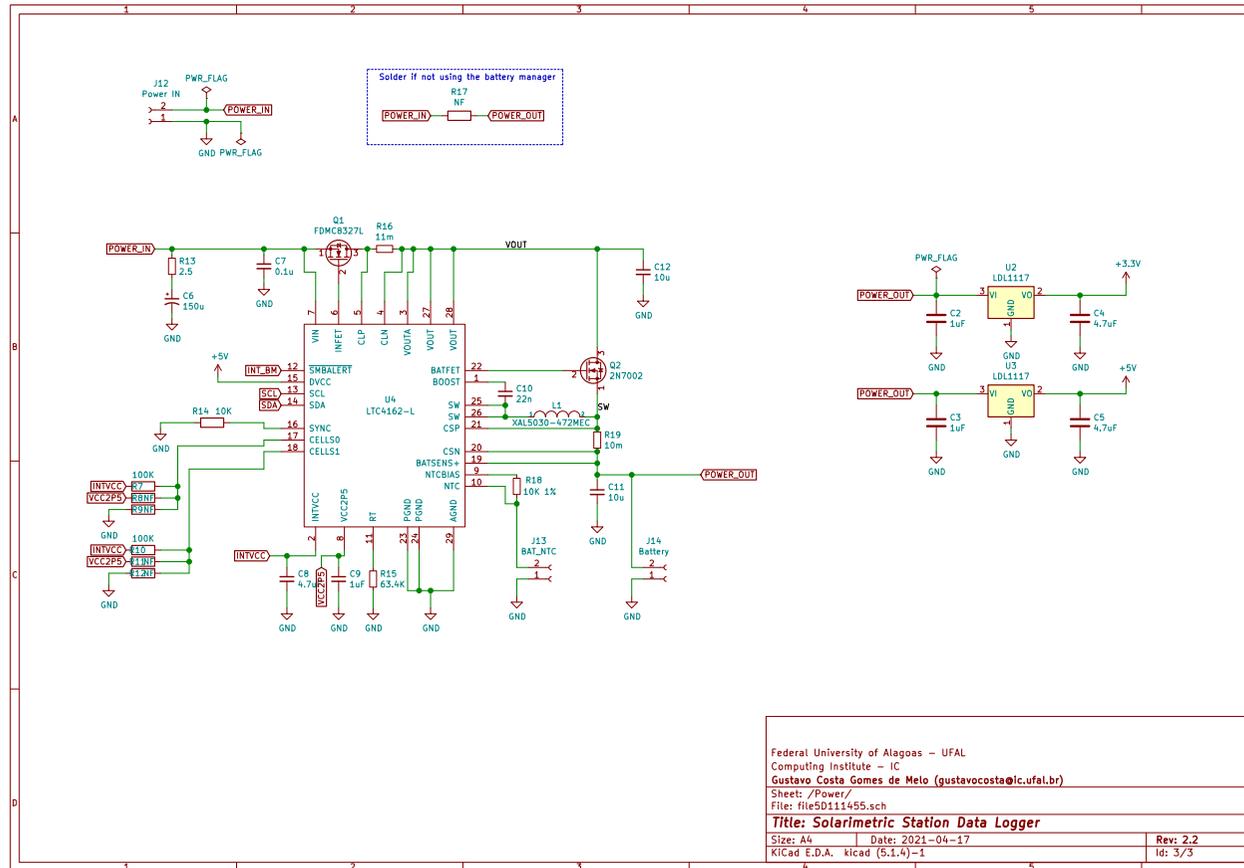


Figura 22: Esquematício do SSDL - Parte 2.

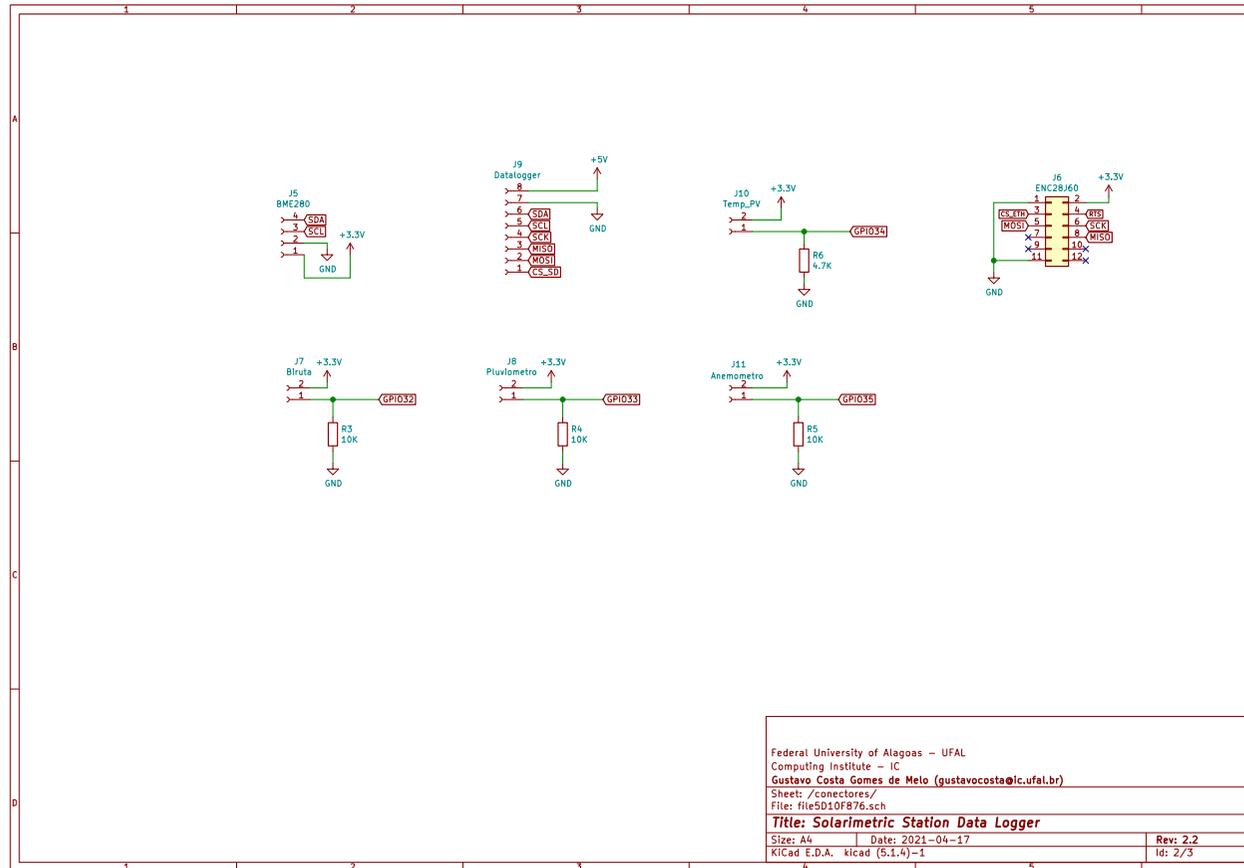


Figura 23: Esquemático do SSDL - Parte 3.

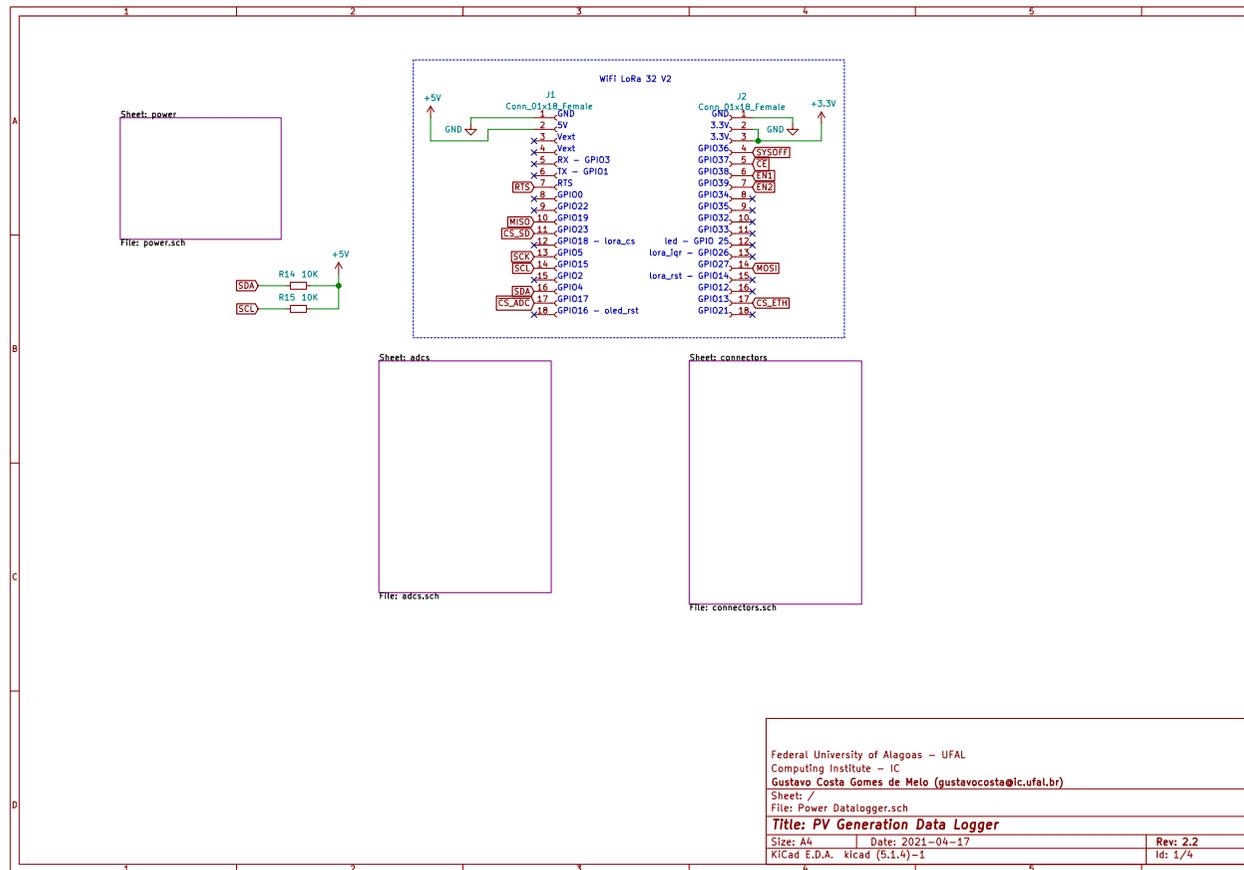


Figura 24: Esquemático do PVDL - Parte 1.

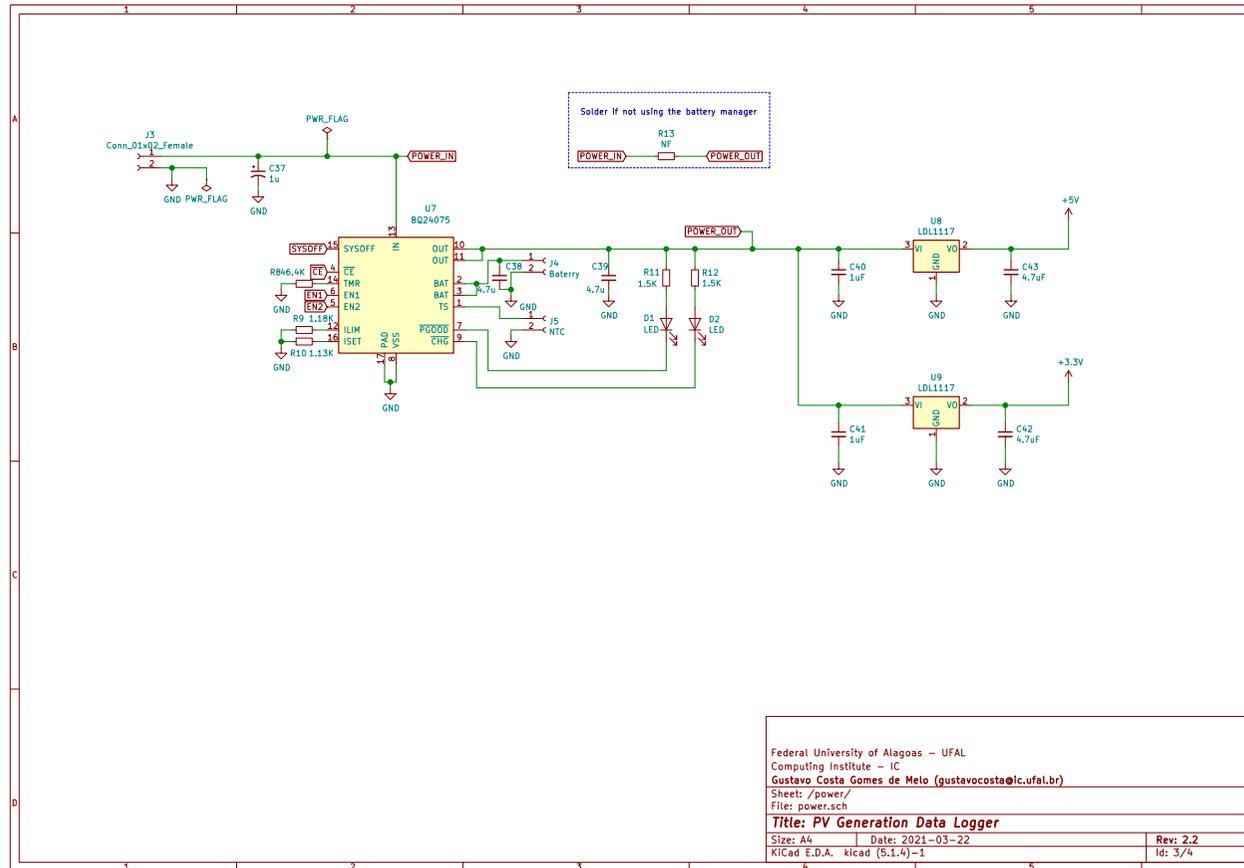


Figura 25: Esquemático do PVDL - Parte 2.

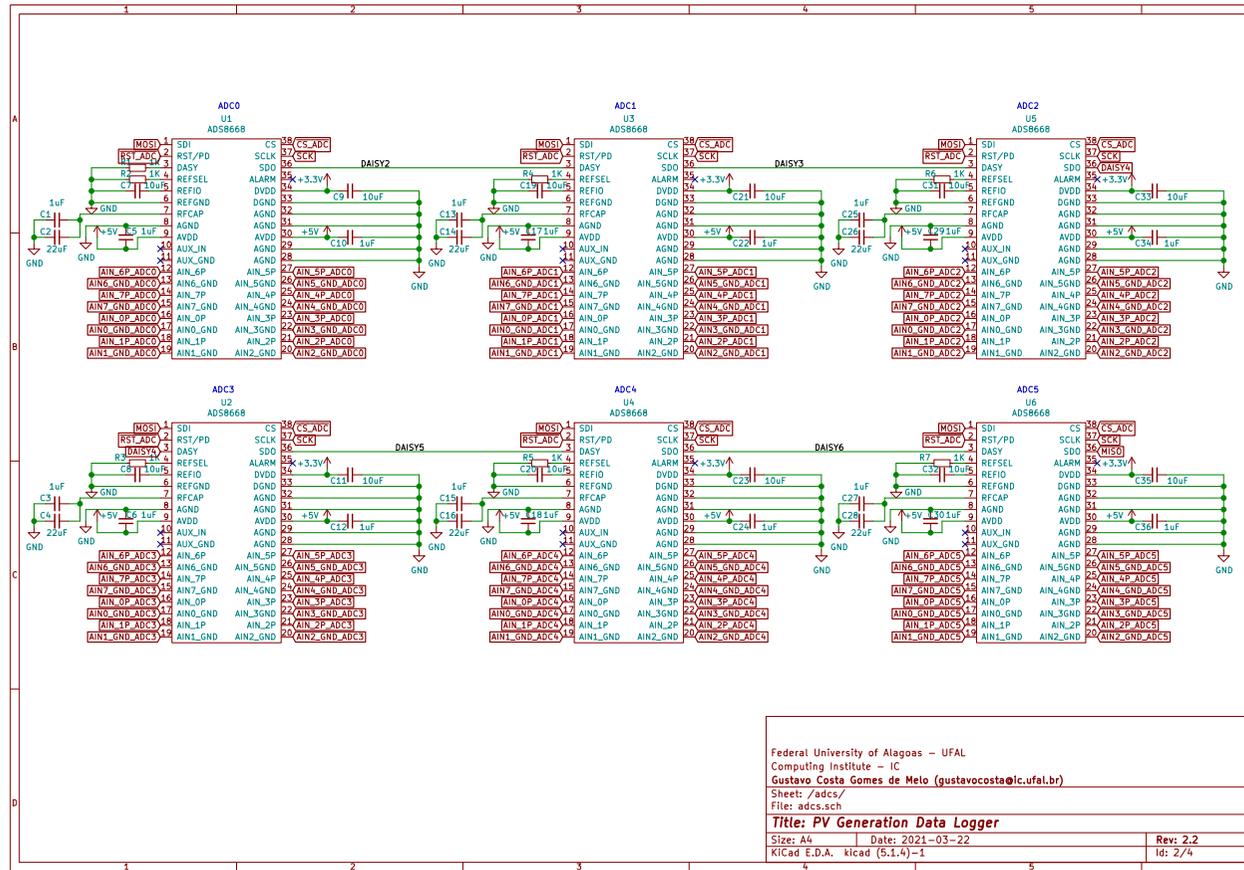


Figura 26: Esquemático do PVDL - Parte 3.

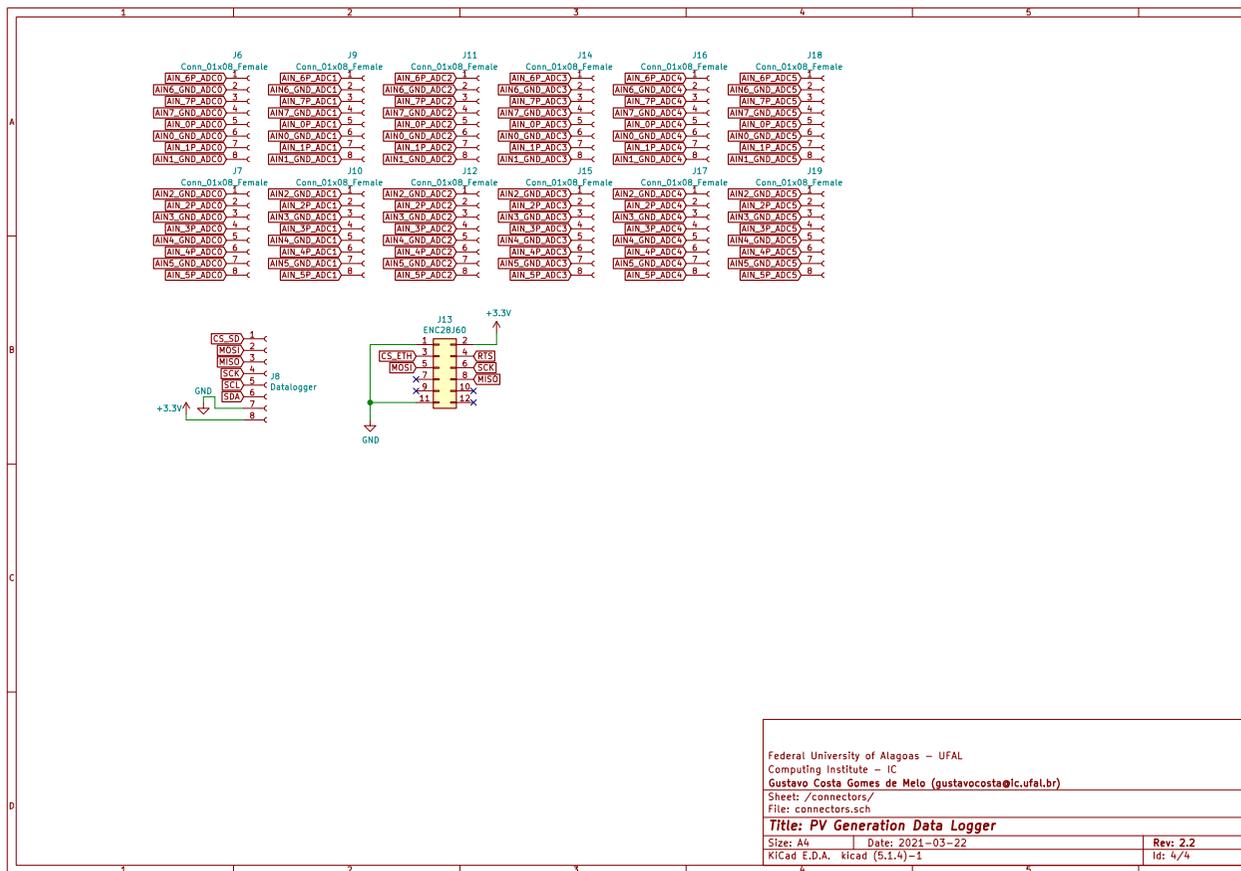


Figura 27: Esquemático do PVDL - Parte 4.