



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS  
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E COMPUTAÇÃO

SÉRGIO LIMA DE SOUZA FILHO  
GEFFERSON MARTINS DE AZENHA

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA IOT DE BAIXO  
CUSTO PARA MONITORAMENTO DE GRANDEZAS  
ELÉTRICAS E SUA APLICAÇÃO EM USINAS  
FOTOVOLTAICAS**

GOIÂNIA  
2025



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS  
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

## TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE GRADUAÇÃO NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio do Repositório Institucional (RI/UFG), regulamentado pela Resolução CEPEC no 1240/2014, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei no 9.610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo dos Trabalhos de Conclusão dos Cursos de Graduação disponibilizado no RI/UFG é de responsabilidade exclusiva dos autores. Ao encaminhar(em) o produto final, o(s) autor(a)(es)(as) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

### 1. Identificação do Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação (TCCG)

Nome(s) completo(s) do(a)(s) autor(a)(es)(as): Sérgio Lima de Souza Filho e Gefferson Martins de Azenha

Título do trabalho: **Desenvolvimento de um Sistema IoT de Baixo Custo para Monitoramento de Grandezas Elétricas e sua Aplicação em Usinas Fotovoltaicas**

### 2. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador) Concorda com a liberação total do documento [ x ] SIM [ ] NÃO<sup>1</sup>

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante: a) consulta ao(à)(s) autor(a)(es)(as) e ao(à) orientador(a); b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo do TCCG. O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

#### Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro.

**Obs.: Este termo deve ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.**



Documento assinado eletronicamente por **Jose Wilson Lima Nerys, Professor do Magistério Superior**, em 11/12/2025, às 10:03, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Sérgio Lima De Souza Filho, Discente**, em 11/12/2025, às 10:08, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Gefferson Martins De Azenha, Discente**, em 11/12/2025, às 10:10, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

---



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufg.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **5851887** e o código CRC **26E02C09**.

---

**Referência:** Processo nº 23070.043933/2025-20

SEI nº 5851887

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS  
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E COMPUTAÇÃO

SÉRGIO LIMA DE SOUZA FILHO  
GEFFERSON MARTINS DE AZENHA

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA IOT DE BAIXO  
CUSTO PARA MONITORAMENTO DE GRANDEZAS  
ELÉTRICAS E SUA APLICAÇÃO EM USINAS  
FOTOVOLTAICAS**

Monografia apresentada na disciplina de Trabalho de  
Conclusão de Curso da graduação em Engenharia  
Elétrica pela Universidade Federal de Goiás.

Orientador(a): Prof. Dr. José Wilson Lima Nerys

GOIÂNIA  
2025

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Azenha, Gefferson Martins de

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA IOT DE BAIXO CUSTO PARA MONITORAMENTO DE GRANDEZAS ELÉTRICAS E SUA APLICAÇÃO EM USINAS FOTOVOLTAICAS [Monografia] / Gefferson Martins de Azenha, Sérgio Lima de Souza Filho. - 2025.

VIII, 35 f.: il. 2025

Orientador: Prof. Dr. José Wilson Lima Nerys

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC), Engenharia Elétrica, Goiânia, 2025.

Ilustrações.

Bibliografia.

Inclui: siglas, grafico, lista de figuras.

1. Internet das Coisas. 2. Monitoramento Remoto. 3. Usina Fotovoltaica. 4. Esp32. 5. Power BI.

I. Souza Filho, Sérgio Lima de . II. Nerys, José Wilson Lima, orient. III. Título.

CDU 621.3



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS  
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

## ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Ao(s) 11 (onze) dia(s) do mês de dezembro do ano de 2025 iniciou-se a sessão pública de defesa do Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) intitulado “**Desenvolvimento de Sistema IoT para monitoramento e controle de Usinas Fotovoltaicas**”, alterado para "**Desenvolvimento de um Sistema IoT de Baixo Custo para Monitoramento de Grandezas Elétricas e sua Aplicação em Usinas Fotovoltaicas**" de autoria de **Sérgio Lima de Souza Filho** e **Gefferson Martins de Azenha**, do curso de Engenharia Elétrica, da Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação da UFG (EMC). Os trabalhos foram instalados pelo **Prof. Dr. José Wilson Lima Nerys** (EMC/UFG) com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: **Prof. Dr. Alisson Assis Cardoso** (EMC/UFG) e **TAE Dr. Gustavo Souto de Sá e Souza** (EMC/UFG). Após a apresentação, a banca examinadora realizou a arguição dos estudantes. Posteriormente, de forma reservada, a Banca Examinadora atribuiu a nota final de 10,0 (dez) , tendo sido o TCC considerado APROVADO.

Proclamados os resultados, os trabalhos foram encerrados e, para constar, lavrou-se a presente ata que segue assinada pelos Membros da Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Jose Wilson Lima Nerys, Professor do Magistério Superior**, em 11/12/2025, às 09:57, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#) .



Documento assinado eletronicamente por **Alisson Assis Cardoso, Professor do Magistério Superior**, em 11/12/2025, às 09:57, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#) .



Documento assinado eletronicamente por **Gustavo Souto De Sa E Souza, Técnico de Laboratório**, em 11/12/2025, às 09:57, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#) .



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufg.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **5851827** e o código CRC **E18962C2**.

# AGRADECIMENTOS

## **Sérgio Lima de Souza Filho**

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me dado saúde e força para superar todas as dificuldades.

A minha família e amigos que sempre me apoiaram, incentivaram e me deram a base para esta conquista, em destaque minha mãe, Claudilene Santana, minha namorada e futura esposa, Nathália Vitória, minha irmã, Jordanna Rieli e minha avó, Dinorá Mendonça. Sem vocês eu não teria conseguido.

Ao meu orientador, Prof. José Wilson, por ter aceitado o desafio de me orientar neste tema complexo.

## **Gefferson Martins de Azenha**

Agradeço a Deus por ter me dado força, saúde e paciência para chegar até aqui. Em muitos momentos, foi a fé que me ajudou a continuar quando o caminho parecia difícil.

À minha família, deixo minha gratidão por todo apoio, carinho e compreensão durante essa trajetória. Cada conquista minha carrega um pouco do amor de vocês.

Em especial, agradeço à minha mãe, que já não está mais aqui, mas continua presente em tudo o que faço. Seus ensinamentos e seu exemplo de força me acompanham todos os dias. Dedico este trabalho também à sua memória, com todo meu carinho e saudade.

Aos meus amigos, agradeço pela parceria, pelas conversas, pelas risadas e pelo incentivo nos momentos em que eu mais precisei. Vocês tornaram essa caminhada mais leve.

Agradeço também ao meu orientador, professor José Wilson, pela orientação, pela paciência e pelas contribuições fundamentais para a realização deste trabalho.

A todos que fizeram parte desta etapa da minha vida, o meu muito obrigado.

## RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento e a validação de um sistema de monitoramento baseado em Internet das Coisas (IoT) aplicado a uma usina fotovoltaica de médio porte. A proposta busca oferecer uma alternativa de baixo custo, flexível e independente aos sistemas de monitoramento nativos dos inversores, que frequentemente apresentam limitações quanto à personalização de indicadores, ao acesso aos dados e à profundidade das análises. A solução foi implementada utilizando um microcontrolador ESP32 como dispositivo de aquisição, realizando leituras via protocolo Modbus TCP e transmitindo os dados para a nuvem por meio do protocolo MQTT. As medições foram armazenadas em banco de dados e integradas a um dashboard desenvolvido no Power BI.

Para validar o sistema, foi conduzido um estudo de caso na usina UFV 05 – Solar Power – Oeste, localizada em Terezópolis de Goiás, composta por três inversores Sungrow SG333HX e 1.944 módulos fotovoltaicos. A aplicação prática demonstrou que o sistema foi capaz de coletar, processar e transmitir dados operacionais de forma contínua, permitindo análises instantâneas, diárias e mensais da geração. Os resultados obtidos mostraram coerência com o desempenho esperado para a planta, confirmando a precisão das leituras e a estabilidade da solução em ambiente real de operação.

Além da validação técnica, foi realizada uma análise de viabilidade econômica que evidenciou o baixo custo da solução proposta — aproximadamente R\$ 30,00 de investimento inicial mais R\$ 30,00 mensais de infraestrutura — em comparação com sistemas comerciais de monitoramento, cujos valores podem ultrapassar R\$ 250,00 por ativo/mês ou R\$ 1.500,00 mensais em plataformas especializadas. Essa diferença reforça o potencial da solução para ampliar o monitoramento em usinas de pequeno e médio porte, democratizando o acesso a ferramentas avançadas de supervisão.

Os resultados obtidos demonstram que a solução IoT desenvolvida é tecnicamente viável, economicamente vantajosa e aplicável em contextos reais de geração distribuída, constituindo uma alternativa robusta e escalável para o acompanhamento do desempenho de usinas fotovoltaicas.

**Palavras-chave:** Energia solar fotovoltaica; Internet das Coisas (IoT); Monitoramento remoto; Modbus TCP; MQTT; Sistemas de aquisição de dados.

# **ABSTRACT**

*This work presents the development and validation of an Internet of Things (IoT)-based monitoring system applied to a medium-sized photovoltaic power plant. The proposed solution aims to provide a low-cost, flexible, and independent alternative to the native monitoring platforms embedded in inverters, which often limit data access, customization of indicators, and the depth of performance analysis. The system was implemented using an ESP32 microcontroller as the acquisition device, performing readings through the Modbus TCP protocol and transmitting the collected measurements to the cloud via MQTT. The data were stored in a database and visualized through a dashboard developed in Power BI.*

*To validate the system, a case study was conducted at the UFV 05 – Solar Power – Oeste plant, located in Teresópolis, Goiás, composed of three Sungrow SG333HX inverters and 1,944 photovoltaic modules. The practical application demonstrated that the system was able to continuously collect, process, and transmit operational data, enabling instant, daily, and monthly generation analyses. The results obtained were consistent with the expected performance of the plant, confirming the accuracy of the readings and the stability of the solution under real operating conditions.*

*In addition to the technical validation, an economic feasibility analysis was performed, highlighting the low cost of the proposed system — approximately R\$ 30.00 initial investment plus R\$ 30.00 per month for infrastructure — compared to commercial monitoring solutions, which can exceed R\$ 250.00 per asset per month or R\$ 1,500.00 per month in specialized platforms. This cost difference reinforces the potential of the solution to expand monitoring capabilities in small and medium-sized photovoltaic plants, democratizing access to advanced supervision tools.*

*The results demonstrate that the developed IoT solution is technically feasible, economically advantageous, and suitable for real distributed generation contexts, offering a robust and scalable alternative for monitoring the performance of photovoltaic power plants.*

**Keywords:** *Photovoltaic solar energy; Internet of Things (IoT); Remote monitoring; Modbus TCP; MQTT; Data acquisition systems.*

# SUMÁRIO

<b>SUMÁRIO.....</b>	<b>vi</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>viii</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>1.2 JUSTIFICATIVA .....</b>	<b>2</b>
<b>1.3 OBJETIVOS .....</b>	<b>2</b>
<b>1.3.1 OBJETIVO GERAL.....</b>	<b>2</b>
<b>1.3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS .....</b>	<b>2</b>
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>3</b>
<b>2.1 ARQUITETURA DE USINAS FOTOVOLTAICAS.....</b>	<b>3</b>
<b>2.2 GRANDEZAS ELÉTRICAS RELEVANTES PARA MONITORAMENTO .....</b>	<b>4</b>
<b>2.3 IOT APLICADA AO MONITORAMENTO FOTOVOLTAICO.....</b>	<b>5</b>
<b>2.4 PROTOCOLO MODBUS.....</b>	<b>6</b>
<b>2.5 PROTOCOLO MQTT .....</b>	<b>8</b>
<b>2.6 POWER BI.....</b>	<b>9</b>
<b>3 METODOLOGIA E DESENVOLVIMENTO DO PROJETO.....</b>	<b>9</b>
<b>3.1 ARQUITETURA GERAL DO SISTEMA.....</b>	<b>9</b>
<b>3.2 LEVANTAMENTO DA INFRAESTRUTURA DA USINA .....</b>	<b>10</b>
<b>3.3 FONTE DE DADOS .....</b>	<b>10</b>
<b>3.4 AQUISIÇÃO, PROCESSAMENTO E TRANSMISSÃO DE DADOS .....</b>	<b>11</b>
<b>3.4.1 Aquisição dos dados .....</b>	<b>12</b>
<b>3.4.2 Processamento e organização dos dados .....</b>	<b>12</b>
<b>3.4.3 Publicação das informações no broker MQTT .....</b>	<b>12</b>
<b>3.5 INTEGRAÇÃO COM POWER BI E CRIAÇÃO DE RELATÓRIOS.....</b>	<b>13</b>
<b>3.5.1 Conexão do Power BI com o Banco de Dados .....</b>	<b>13</b>
<b>3.5.2 Tratamento e Limpeza dos Dados .....</b>	<b>13</b>
<b>3.5.3 Modelagem de Dados .....</b>	<b>14</b>
<b>3.5.4 Criação de medidas em DAX .....</b>	<b>15</b>
<b>3.5.5 Construção da Interface Visual .....</b>	<b>15</b>
<b>3.5.6 Publicação na rede .....</b>	<b>16</b>
<b>3.6 DESENVOLVIMENTO DO FIRMWARE .....</b>	<b>16</b>

3.6.1	Configurações da rede para comunicação .....	17
3.6.2	Criação de blocos separados para leitura dos registradores .....	17
3.6.3	Atribui-se o valor retornado pelos endereços aos blocos .....	17
3.6.4	Construção da mensagem JSON.....	18
3.6.5	Publicação do JSON via protocolo MQTT .....	19
3.6.6	Ciclo de leitura com intervalo definido .....	20
4	<b>ESTUDO DE CASO: RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>21</b>
4.1	<b>CARACTERIZAÇÃO DA USINA FOTOVOLTAICA EM ANÁLISE .....</b>	<b>22</b>
4.2	<b>IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA IOT NA USINA .....</b>	<b>24</b>
4.3	<b>APRESENTAÇÃO DOS DADOS COLETADOS .....</b>	<b>25</b>
4.3.1	Análise Instantânea.....	25
4.3.2	Análise Diária.....	26
4.3.3	Análise Mensal .....	27
4.4	<b>DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....</b>	<b>28</b>
5	<b>Análise de viabilidade econômica.....</b>	<b>29</b>
6	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>30</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>32</b>

# LISTA DE FIGURAS

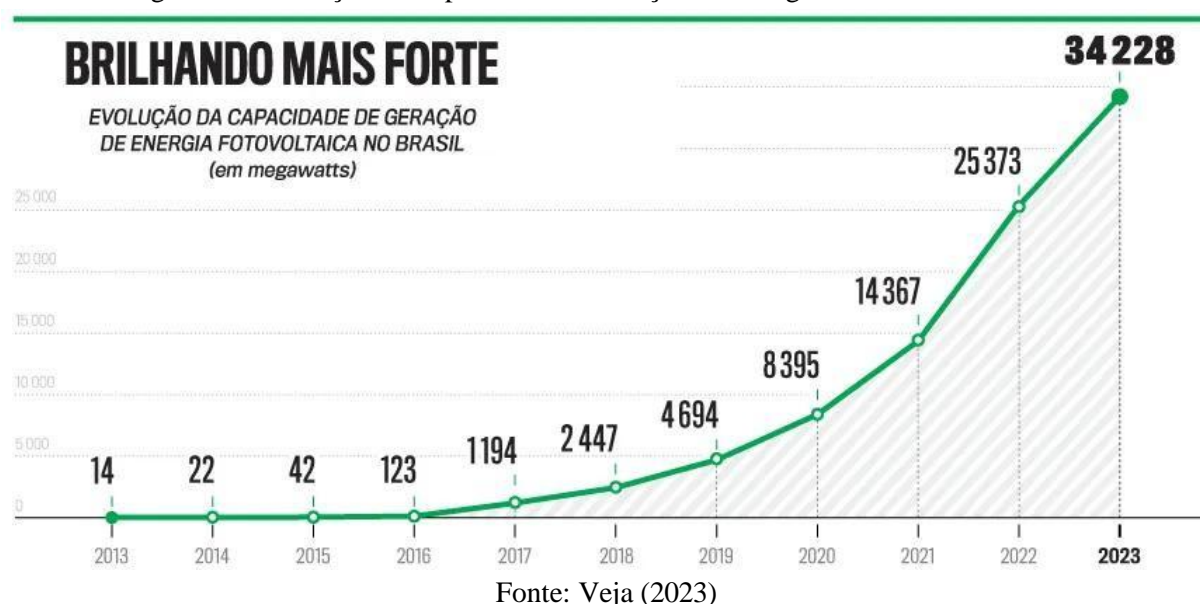
Figura 1.1. Evolução da Capacidade de Geração de Energia Fotovoltaica no Brasil.....	1
Figura 1.2. Inversores e módulos fotovoltaicos .....	4
Figura 1.3. Painel de Monitoramento da Usina.....	5
Figura 2.1. Arquitetura Iot.....	6
Figura 2.2. Protocolo MODBUS TCP/IP .....	7
Figura 2.3. Arquitetura MQTT .....	8
Figura 3.1. Diagrama de conexão dos inversores e datalogger.....	11
Figura 3.2. Visualização dos Dados Processados no PowerQuery .....	14
Figura 3.3. Visualização da Modelagem dos dados no Power BI .....	15
Figura 3.4. Exemplo de medida Dax Power BI.....	15
Figura 3.5. Dashboard PowerBI Usina Solar Power .....	16
Figura 3.6. Código ESP32 - Configurações da Rede .....	17
Figura 3.7. Código ESP32 - Criação dos blocos .....	17
Figura 3.8. Código ESP32 - Atribuição dos valores aos blocos.....	18
Figura 3.9. Código ESP32 - Construção da Mensagem JSON.....	19
Figura 3.10. Código ESP32 - Publicação MQTT.....	20
Figura 3.11. Código ESP32 – Loop para repetição do processo .....	21
Figura 4.1. Usina Fotovoltaica SOLARPOWER .....	22
Figura 4.2. Inversor Sungrow. ....	23
Figura 4.3 ESP32 Instalado na Usina .....	24
Figura 4.4. PowerBI - Análise instantânea .....	26
Figura 4.5. PowerBI - Análise diária.....	27
Figura 4.6. PowerBI - Análise mensal.....	28

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

O setor fotovoltaico brasileiro vem crescendo de forma acelerada desde a regulamentação da Geração Distribuída (GD) pela ANEEL, em 2012. A queda no custo dos equipamentos, a facilidade de conexão e a busca por alternativas renováveis estimularam a implantação de usinas solares em propriedades rurais, comércios, indústrias e empreendimentos coletivos. Esse movimento consolidou as usinas fotovoltaicas (UFVs) como um dos principais motores da expansão energética recente no país, conforme ilustrado na **Figura 1.1**, que apresenta a evolução da capacidade instalada de geração fotovoltaica ao longo dos últimos anos.

Figura 1.1. Evolução da Capacidade de Geração de Energia Fotovoltaica no Brasil



Com a popularização dessas usinas, acompanhar o desempenho dos sistemas tornou-se essencial. Grandezas como potência instantânea, energia gerada ao longo do dia, tensão e corrente ajudam a identificar perdas de eficiência, falhas em strings e anomalias nos inversores. Esses dados são fundamentais para que proprietários, investidores e equipes de operação consigam manter a usina funcionando dentro do esperado e garantir o retorno econômico do investimento.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

A maior parte dos inversores do mercado possui sistemas próprios de monitoramento. Embora úteis, essas plataformas normalmente apresentam limitações importantes: poucas opções de indicadores personalizáveis, ausência de ferramentas avançadas de análise, visualizações rígidas e pouca flexibilidade para criar alertas, relatórios ou comparações adaptadas à realidade de cada usina. Assim, o proprietário fica restrito ao que o fabricante disponibiliza, sem autonomia para aprofundar a análise ou integrar os dados com outras ferramentas.

Sistemas SCADA profissionais poderiam suprir essas limitações, mas seu custo elevado e a necessidade de infraestrutura e mão de obra especializada tornam sua adoção inviável para a maior parte das usinas de pequeno e médio porte — justamente aquelas que dominam a GD no Brasil.

Diante desse cenário, torna-se necessária uma solução intermediária: um sistema de monitoramento leve, acessível e totalmente flexível, que permita ao proprietário definir seus próprios indicadores, configurar alertas específicos, integrar os dados com outras plataformas e visualizar as informações de forma realmente útil para a tomada de decisão.

A *Internet das Coisas (IoT)* surge como uma alternativa prática para preencher essa lacuna. Microcontroladores de baixo custo com conectividade nativa, como o ESP32, aliados a protocolos abertos como Modbus TCP e MQTT, permitem a criação de uma solução independente, personalizável e economicamente viável para o monitoramento de usinas fotovoltaicas.

## 1.3 OBJETIVOS

### 1.3.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolver e validar um protótipo de sistema IoT para monitoramento remoto de grandezas elétricas em uma usina fotovoltaica, aplicando-o em um estudo de caso real para avaliar seu desempenho e utilidade prática.

### 1.3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

a) Mapear a infraestrutura de comunicação da usina fotovoltaica, identificando o datalogger, os inversores conectados e os registradores Modbus necessários para a leitura das grandezas elétricas.

b) Desenvolver o dispositivo de aquisição de dados, implementando as rotinas de comunicação Modbus TCP, tratamento das medições e envio das informações a um servidor remoto por meio de protocolo adequado de telemetria.

c) Configurar o ambiente de recepção e armazenamento dos dados, estruturando o banco de dados e o fluxo de mensagens para garantir integridade, organização e disponibilidade das medições.

d) Integrar as informações coletadas a uma plataforma de visualização, criando um painel capaz de exibir dados instantâneos, diários e mensais da usina.

e) Validar o sistema em operação contínua, avaliando estabilidade, confiabilidade das medições e funcionamento do fluxo completo de aquisição, transmissão e visualização.

f) Aplicar o sistema em um estudo de caso real, analisando o comportamento dos três inversores da usina e identificando diferenças de geração, anomalias, quedas de eficiência ou comportamentos atípicos.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, apresentaremos os conceitos e tecnologias que servem de alicerce para o desenvolvimento do sistema de monitoramento proposto. São discutidos elementos fundamentais sobre a estrutura de uma usina fotovoltaica, além das principais grandezas elétricas envolvidas no processo de geração e supervisão. Esses tópicos fornecem a base necessária para compreender, mais adiante, o funcionamento do sistema IoT e dos protocolos de comunicação utilizados na solução implementada.

### 2.1 ARQUITETURA DE USINAS FOTOVOLTAICAS

Uma usina fotovoltaica é composta por um conjunto de equipamentos responsáveis por converter a energia solar em energia elétrica e disponibilizá-la à rede. Os módulos fotovoltaicos, instalados em estruturas fixas ou móveis, são agrupados em strings — conjuntos de módulos conectados em série — que conduzem a energia em corrente contínua (DC) até as entradas do inversor. Cada conjunto de strings é associado a controladores *MPPT* (*Maximum Power Point Tracking*), componentes que ajustam constantemente o ponto de operação para extrair a máxima potência possível dos módulos em cada condição de irradiância e temperatura.

O inversor desempenha papel central no sistema ao realizar a conversão da energia DC em corrente alternada (AC), compatível com a rede elétrica. Além disso, ele realiza medições

internas de tensão, corrente, potência, energia e outros parâmetros operacionais, permitindo o acompanhamento em tempo real do desempenho da usina.

Grande parte das usinas utiliza um datalogger para coletar os dados dos inversores e organizá-los em uma interface centralizada. O datalogger também viabiliza o acesso remoto às informações e possibilita a comunicação com plataformas externas por meio de protocolos industriais, como o Modbus TCP. Dessa forma, o sistema de supervisão é estruturado em uma cadeia que envolve a geração em corrente contínua nos módulos, o rastreamento de máxima potência pelos MPPTs, a conversão para corrente alternada no inversor, a proteção nos quadros elétricos e, por fim, a disponibilização dos dados via datalogger ou interfaces de comunicação.

Compreender essa arquitetura é fundamental para identificar em que etapa o sistema IoT desenvolvido neste trabalho se integra ao processo de coleta e transmissão dos dados operacionais da usina.

Figura 2.1. Inversores e módulos fotovoltaicos



Fonte: SMA (2019)

## 2.2 GRANDEZAS ELÉTRICAS RELEVANTES PARA MONITORAMENTO

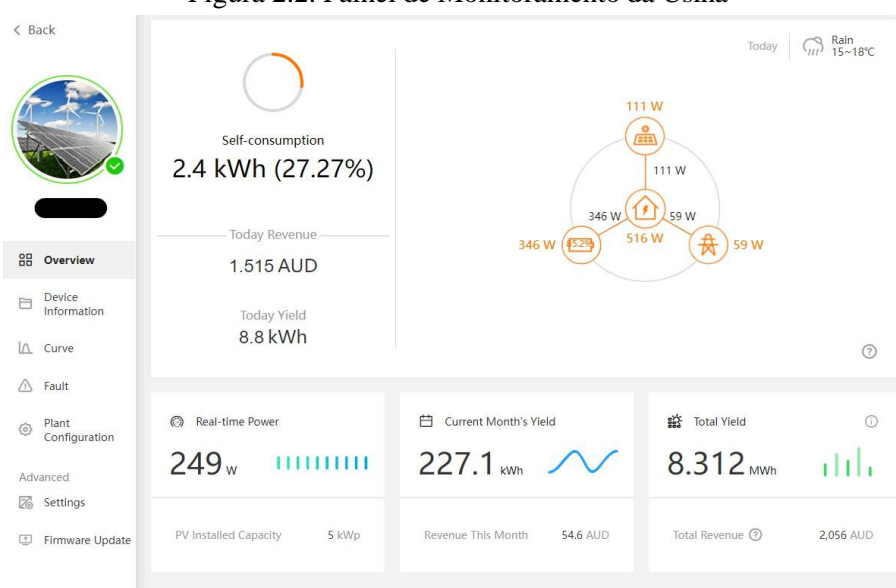
O monitoramento de uma usina fotovoltaica depende da análise contínua de diversas grandezas elétricas que refletem o comportamento dos módulos, strings, inversores e da própria rede elétrica. Entre elas, a tensão e a corrente — tanto no lado DC quanto no AC — são essenciais para identificar condições anormais, tais como strings desconectadas, sombreamento parcial, falhas de módulos, limitações térmicas ou problemas de conexão.

A potência ativa representa a quantidade de energia instantânea que a usina está entregando, sendo uma das principais referências para avaliar a curva diária de geração. Já a energia acumulada permite estimar o desempenho ao longo de períodos maiores, como dias,

meses ou anos, possibilitando análises históricas e comparações com valores previstos em projeto.

Durante um dia típico de operação, a curva de potência tende a seguir um padrão característico, com aumento gradual nas primeiras horas da manhã, pico próximo ao meio-dia e queda ao final da tarde. Desvios significativos desse comportamento podem indicar falhas em um dos inversores, sujeira nos módulos, sombreamento acidental ou degradação de componentes. Por isso, a observação sistemática dessas grandezas é indispensável para a operação e manutenção da usina, permitindo detectar rapidamente situações anormais e evitar perdas de geração.

Figura 2.2. Painel de Monitoramento da Usina



Fonte: Solar Analytics (2024)

## 2.3 IOT APLICADA AO MONITORAMENTO FOTOVOLTAICO

A Internet das Coisas (IoT – Internet of Things) refere-se à integração de dispositivos capazes de coletar, processar e transmitir dados pela internet sem intervenção humana constante. Esses dispositivos variam desde sensores simples até microcontroladores mais avançados, permitindo a automação e a supervisão de processos em larga escala. A IoT tem se consolidado como uma das principais tecnologias associadas à *Indústria 4.0*, viabilizando aplicações em setores como automação residencial, agricultura de precisão, cidades inteligentes e, mais recentemente, sistemas de geração distribuída.

No contexto de usinas fotovoltaicas, a IoT desempenha um papel especialmente relevante ao permitir o monitoramento remoto e contínuo das grandezas elétricas envolvidas no processo de geração. Diferentemente das plataformas proprietárias de fabricantes de inversores — que

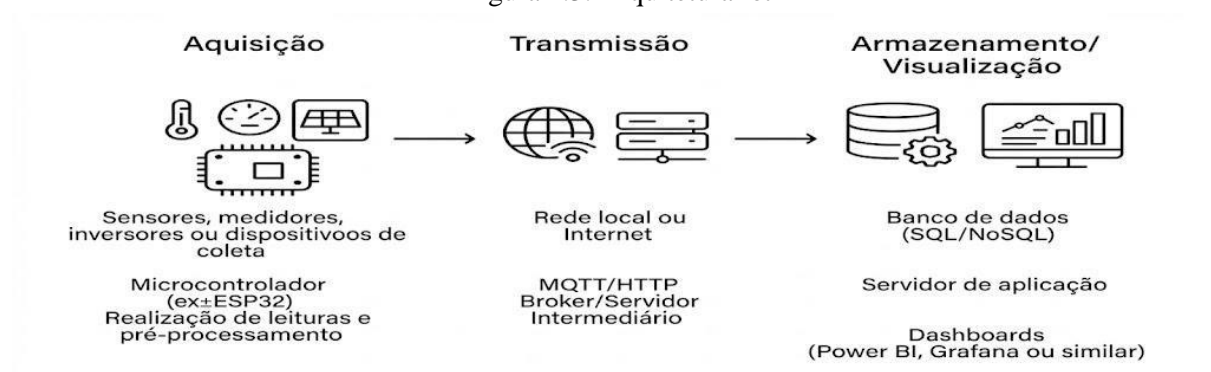
geralmente oferecem indicadores limitados e interfaces pouco flexíveis — uma arquitetura IoT possibilita a criação de soluções personalizadas, capazes de integrar dados de diferentes fontes, gerar alertas específicos, organizar informações de maneira unificada e disponibilizar análises em tempo real.

A arquitetura básica de um sistema IoT para monitoramento fotovoltaico pode ser compreendida em três etapas principais. A primeira envolve o dispositivo de aquisição, responsável por acessar os dados dos inversores por meio de protocolos de comunicação industrial e estruturar as medições para envio. A segunda etapa corresponde à transmissão dos dados, normalmente realizada por protocolos leves e eficientes, adequados à comunicação entre dispositivos e servidores em redes locais ou remotas. Por fim, a terceira etapa envolve o armazenamento e a visualização, nas quais os dados são recebidos por um servidor, organizados em um banco de dados e apresentados ao usuário por meio de *dashboards*, gráficos ou relatórios personalizados.

Essa abordagem oferece vantagens significativas para proprietários e gestores de usinas, pois permite acompanhar o desempenho da geração em tempo real, identificar rapidamente eventuais falhas, comparar inversores entre si e gerar análises adequadas às necessidades específicas da operação. Além disso, a IoT reduz custos ao possibilitar a substituição de sistemas proprietários complexos por soluções modulares, abertas e de baixo custo.

Com isso, a integração de dispositivos IoT ao ambiente fotovoltaico representa uma evolução natural dos sistemas de monitoramento, ampliando a autonomia do usuário e favorecendo a construção de um ecossistema mais acessível, flexível e orientado a dados.

Figura 2.3. Arquitetura Iot



Fonte: Autor (2025)

## 2.4 PROTOCOLO MODBUS

O Modbus é um protocolo de comunicação amplamente utilizado em sistemas industriais para troca de informações entre dispositivos eletrônicos. Sua versão Modbus TCP mantém a

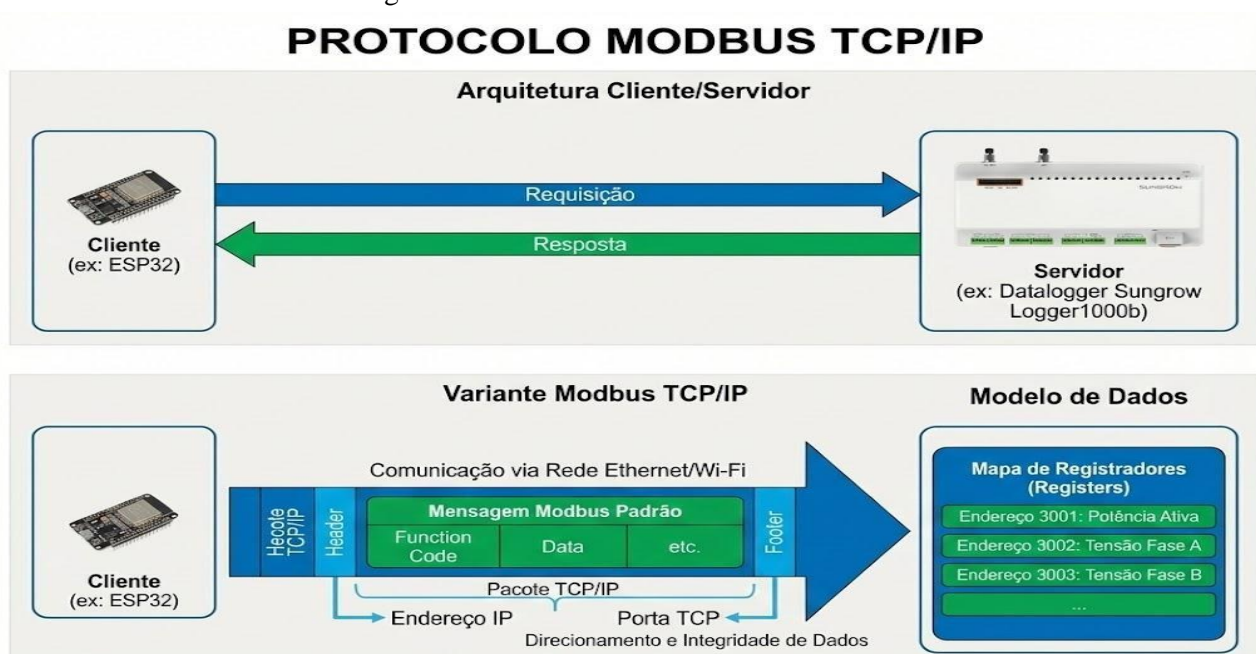
mesma estrutura lógica do Modbus tradicional, porém encapsulada em pacotes *TCP/IP*, permitindo comunicação direta por redes Ethernet. Essa adaptação tornou o protocolo mais rápido, confiável e compatível com infraestruturas modernas de automação.

A comunicação Modbus ocorre sempre no formato mestre–escravo (ou cliente–servidor), no qual o dispositivo mestre envia solicitações e o servidor responde com os valores requisitados. Nos sistemas fotovoltaicos, inversores e dataloggers frequentemente atuam como servidores Modbus, disponibilizando grandezas elétricas como tensão, corrente, potência e energia por meio de registradores específicos.

Essas informações ficam organizadas em endereços chamados *holding registers*, que podem ser lidos periodicamente pelo dispositivo de monitoramento. Cada registrador armazena um valor referente ao estado ou desempenho do inversor, permitindo que o sistema obtenha os dados necessários para análise em tempo real.

No presente trabalho, o Modbus TCP é utilizado como camada de aquisição de dados, possibilitando que o dispositivo IoT acesse os registradores do datalogger e extraia as grandezas elétricas da usina de forma simples e eficiente. Sua compatibilidade com redes existentes e o fato de ser um protocolo aberto tornam essa solução prática, robusta e adequada para aplicações de monitoramento fotovoltaico.

Figura 2.4. Protocolo MODBUS TCP/IP



Fonte: Gemini (2025)

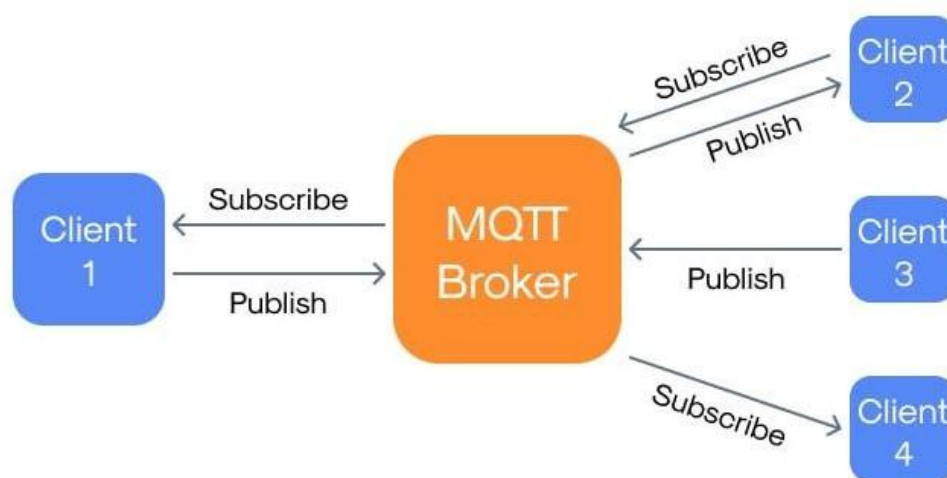
## 2.5 PROTOCOLO MQTT

O *MQTT* (*Message Queuing Telemetry Transport*) é um protocolo leve e eficiente, amplamente empregado em aplicações de Internet das Coisas devido ao baixo consumo de banda e à simplicidade de implementação. Diferentemente de protocolos baseados em requisições diretas, ele utiliza o modelo *publish/subscribe*, no qual a comunicação ocorre por meio de um servidor intermediário, o *broker*, que distribui as mensagens entre os dispositivos conectados. Isso reduz o tráfego na rede e permite alta escalabilidade, mesmo em sistemas com numerosos dispositivos enviando dados simultaneamente.

Nesse modelo, cada mensagem é publicada em um tópico específico, que funciona como um identificador. Qualquer dispositivo que desejar receber determinada informação apenas se inscreve nesse tópico, enquanto o dispositivo que gera os dados publica nele. Esse desacoplamento entre remetente e destinatário torna a comunicação mais flexível, independente da estrutura física da rede e adequada a arquiteturas distribuídas.

Outra vantagem do MQTT é sua leveza: as mensagens possuem cabeçalhos pequenos e exigem pouco processamento, o que o torna ideal para microcontroladores e redes com recursos limitados. No monitoramento fotovoltaico, esse protocolo permite transmitir medições do campo para o servidor de forma rápida e contínua, possibilitando atualizações quase em tempo real do desempenho da usina. Por essas características, o MQTT desempenha um papel central na arquitetura IoT adotada neste trabalho.

Figura 2.5. Arquitetura MQTT



Fonte: Wallarm (2025)

## 2.6 POWER BI

O Power BI é uma plataforma de *Business Intelligence* desenvolvida pela Microsoft, utilizada para integração, tratamento, modelagem e visualização de dados provenientes de diferentes fontes, como bancos de dados, arquivos e serviços em nuvem. Sua arquitetura combina três componentes principais: o *Power Query*, responsável pela etapa de extração e transformação dos dados (ETL); o modelo tabular, que organiza as tabelas e relacionamentos; e a linguagem *DAX*, utilizada para criação de medidas e indicadores analíticos. Essa combinação permite que dados operacionais sejam convertidos em informações consolidadas e facilmente interpretáveis.

No contexto deste trabalho, o Power BI foi empregado como camada de visualização do sistema IoT, consumindo os dados armazenados no banco e organizando-os em análises instantâneas, diárias e mensais. O uso do Power Query foi fundamental para padronizar tipos de dados, tratar registros inconsistentes e estruturar as tabelas antes da modelagem, garantindo a qualidade das informações utilizadas nos dashboards. Em seguida, por meio de medidas em *DAX*, foram construídos indicadores de potência, energia e desempenho dos inversores, apresentados em um painel visual que facilita o acompanhamento da operação da usina. Apesar das limitações da versão gratuita, especialmente quanto ao número de atualizações automáticas, a ferramenta se mostrou adequada ao monitoramento proposto, integrando de forma eficiente o sistema de aquisição aos recursos de análise e visualização.

## 3 METODOLOGIA E DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

### 3.1 ARQUITETURA GERAL DO SISTEMA

A metodologia adotada neste trabalho foi estruturada para permitir o desenvolvimento e a validação de um sistema IoT aplicado ao monitoramento de uma usina fotovoltaica. O processo envolveu inicialmente o levantamento da infraestrutura da usina e a identificação dos recursos de comunicação disponíveis no datalogger. Em seguida, foram desenvolvidas as rotinas de aquisição de dados via Modbus TCP, a transmissão das medições por meio do protocolo MQTT e o armazenamento das informações em banco de dados. Por fim, o sistema foi implantado na usina real, operando de forma contínua para verificar a estabilidade da

comunicação e a consistência dos dados coletados, os quais serviram de base para o estudo de caso apresentado posteriormente.

### **3.2 LEVANTAMENTO DA INFRAESTRUTURA DA USINA**

O desenvolvimento do sistema teve início com o levantamento da infraestrutura existente na usina fotovoltaica analisada. Durante essa etapa, foram realizadas visitas técnicas para identificar os equipamentos responsáveis pela supervisão da planta, com ênfase no datalogger utilizado e nos inversores conectados. Também foi verificada a topologia de rede disponível, incluindo a presença de comunicação Ethernet e o acesso ao protocolo Modbus TCP, essencial para a aquisição das grandezas elétricas diretamente do datalogger.

Com o objetivo de garantir a compatibilidade da solução proposta, analisaram-se os mapas de registradores disponibilizados pelo fabricante, bem como a organização interna das informações medidas pelos inversores. Essa investigação permitiu definir quais grandezas seriam monitoradas — como tensão, corrente, potência ativa e energia acumulada — e confirmar a disponibilidade desses dados por meio de registradores Modbus acessíveis externamente. Além disso, foram avaliadas as condições de conectividade do local, garantindo que o dispositivo de aquisição pudesse operar dentro da área de cobertura da rede e manter comunicação estável durante o período de testes.

Essa etapa de levantamento foi fundamental para orientar as fases seguintes do desenvolvimento, assegurando que o sistema IoT fosse projetado de acordo com as características reais da usina e capaz de integrar-se de forma eficiente à infraestrutura já existente.

### **3.3 FONTE DE DADOS**

As informações utilizadas pelo sistema de monitoramento têm origem nos próprios inversores instalados na usina fotovoltaica. Esses equipamentos registram continuamente grandezas elétricas essenciais para a análise do desempenho, como tensão e corrente nos lados DC e AC, potência ativa instantânea, energia acumulada, temperatura interna e parâmetros operacionais dos controladores MPPT. As medições são processadas internamente pelo inversor e disponibilizadas ao datalogger da usina, que atua como concentrador desses dados.

O datalogger, por sua vez, reúne as informações provenientes dos três inversores e as organiza em registradores acessíveis por meio do protocolo Modbus TCP. Esse dispositivo é responsável por manter uma interface padronizada de comunicação, permitindo que sistemas externos consultem as medições de forma estruturada e em tempo real. Assim, o datalogger

funciona como uma camada intermediária entre os inversores e o sistema de monitoramento desenvolvido neste trabalho, simplificando o acesso às grandezas elétricas e garantindo que o dispositivo de aquisição obtenha os dados de maneira centralizada.

Ao utilizar as medições produzidas pelos próprios inversores, o sistema evita a necessidade de sensores adicionais ou modificações na infraestrutura elétrica da usina. Essa abordagem torna o monitoramento mais simples, confiável e economicamente viável, garantindo que todas as etapas do fluxo de dados — desde a medição até a coleta pelo dispositivo IoT — sejam realizadas de forma integrada aos recursos já existentes na instalação.

Figura 3.1. Diagrama de conexão dos inversores e datalogger



Fonte: Autor (2025)

### 3.4 AQUISIÇÃO, PROCESSAMENTO E TRANSMISSÃO DE DADOS

O sistema de monitoramento desenvolvido neste trabalho utiliza como núcleo de operação um microcontrolador *ESP32*, escolhido por combinar conectividade Wi-Fi integrada, baixo consumo de energia, capacidade de operação contínua e custo significativamente inferior ao de controladores industriais tradicionais. Além disso, o *ESP32* oferece recursos de processamento suficientes para executar todas as etapas necessárias ao monitoramento da usina, incluindo a leitura de registradores Modbus, o tratamento das grandezas recebidas e a transmissão dos dados ao servidor por meio do protocolo MQTT.

O dispositivo foi programado para operar de forma autônoma, realizando três funções principais:

- (i) Aquisição das grandezas elétricas diretamente do datalogger por meio de requisições Modbus TCP
- (ii) Processamento e organização das medições, garantindo a padronização e integridade dos valores coletados
- (iii) Publicação dos dados estruturados no broker MQTT responsável pela distribuição e armazenamento das informações.

Para descrever de maneira clara o funcionamento do dispositivo, este tópico foi dividido em três sub-seções, correspondentes às etapas executadas pelo microcontrolador, apresentadas a seguir.

### **3.4.1 Aquisição dos dados**

A etapa de aquisição consiste na leitura das grandezas elétricas disponibilizadas pelo datalogger da usina, realizada pelo ESP32 por meio de requisições Modbus TCP. Configurado como cliente na rede local, o dispositivo consulta periodicamente os registradores que armazenam informações como tensão, corrente, potência ativa e energia acumulada, previamente identificados durante o levantamento da infraestrutura. Cada requisição retorna os valores medidos pelos inversores e organizados pelo datalogger, permitindo que o ESP32 obtenha as variáveis necessárias com regularidade e precisão. Essa etapa estabelece a base do fluxo de dados do sistema, garantindo que todas as informações essenciais estejam disponíveis para o processamento subsequente.

### **3.4.2 Processamento e organização dos dados**

Após a leitura dos registradores, o ESP32 realiza o processamento das informações coletadas, reunindo todas as grandezas em uma única estrutura padronizada. Nessa etapa, o dispositivo interpreta os valores retornados pelo datalogger, aplica as conversões necessárias e organiza as medições em um formato coerente, estruturando tudo em uma única mensagem no padrão *JSON*. Essa formatação facilita o envio e o armazenamento das informações, além de garantir que cada pacote transmitido represente de forma clara e organizada o conjunto completo de dados referentes ao instante de leitura.

### **3.4.3 Publicação das informações no broker MQTT**

Com as medições estruturadas em formato *JSON*, o ESP32 realiza a etapa final do fluxo: a publicação dos dados no broker MQTT. Utilizando sua conectividade Wi-Fi integrada, o dispositivo conecta-se a um broker hospedado na nuvem e envia a mensagem *JSON* para um

tópico específico destinado ao monitoramento da usina. O ciclo de operação foi configurado para realizar uma leitura a cada 20 segundos por inversor, o que resulta em um intervalo de 1 minuto para completar a aquisição dos três inversores presentes na usina. A cada leitura concluída, o ESP32 publica o pacote JSON correspondente, permitindo que as informações sejam disponibilizadas quase em tempo real para o servidor responsável pelo armazenamento e análise. O uso do protocolo MQTT torna o envio leve e eficiente, garantindo estabilidade mesmo com transmissões frequentes ao longo do dia.

### **3.5 INTEGRAÇÃO COM POWER BI E CRIAÇÃO DE RELATÓRIOS**

#### **3.5.1 Conexão do Power BI com o Banco de Dados**

Com os dados devidamente armazenados no banco, tornou-se possível avançar para a etapa de desenvolvimento do dashboard no Power BI. O primeiro passo consistiu em estabelecer a conexão direta com o banco de dados, permitindo que as leituras enviadas pelo sistema IoT fossem acessadas praticamente em tempo real. Essa conexão foi configurada de forma a garantir que as atualizações ocorressem continuamente, respeitando o limite permitido pela licença gratuita.

#### **3.5.2 Tratamento e Limpeza dos Dados**

Após o estabelecimento da conexão, iniciou-se o processo de tratamento e padronização no Power Query (ferramenta de transformação de dados presente no Power BI). Essa etapa exigiu uma revisão completa de tipos de dados, correção de registros incompletos e a normalização de nomes. Essa padronização foi fundamental para a organização e o desenvolvimento do dashboard.

Figura 3.2. Visualização dos Dados Processados no PowerQuery

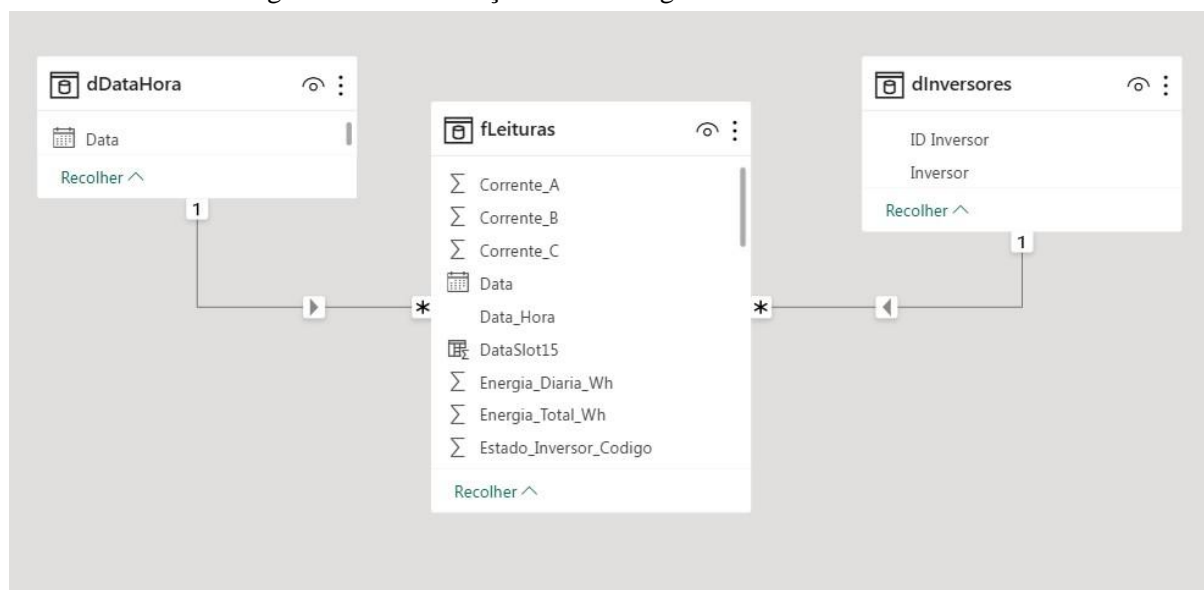
	Data_Hora	Potencia_Ativa_W	Potencia_Aparente_VA	Potencia_Reativa_VAR
825	30/10/2025 05:54:00	0	0	0
826	30/10/2025 05:55:00	2288	2288	2
827	30/10/2025 05:55:00	2330	2330	-1
828	30/10/2025 05:55:00	2346	2346	2
829	30/10/2025 05:56:00	2747	2747	0
830	30/10/2025 05:56:00	2788	2788	0
831	30/10/2025 05:56:00	2808	2808	0
832	30/10/2025 05:57:00	3428	3428	0
833	30/10/2025 05:57:00	3398	3398	0
834	30/10/2025 05:57:00	3462	3462	1
835	30/10/2025 05:58:00	4076	4076	2
836	30/10/2025 05:58:00	4163	4163	5
837	30/10/2025 05:58:00	4101	4101	4
838	30/10/2025 05:59:00	4623	4623	3
839	30/10/2025 05:59:00	4625	4625	0
840	30/10/2025 05:59:00	4715	4715	-2
841	30/10/2025 06:00:00	5145	5145	-1
842	30/10/2025 06:00:00	5100	5100	1
843	30/10/2025 06:00:00	5083	5083	2
844	30/10/2025 06:01:00	5690	5690	3

Fonte: Autor (2025)

### 3.5.3 Modelagem de Dados

Com os dados já limpos, seguiu-se para a modelagem dimensional. A estrutura adotada foi simples, porém eficiente, baseada em uma tabela fato contendo todas as medições recebidas via MQTT e complementada por tabelas de dimensão para inversores e calendário. Essa modelagem possibilitou a organização dos dados de forma analítica, permitindo cruzamentos por data, por equipamento e por intervalo de tempo sem comprometer o desempenho do modelo.

Figura 3.3. Visualização da Modelagem dos dados no Power BI



Fonte: Autor (2025)

### 3.5.4 Criação de medidas em DAX

A partir dessa estrutura, iniciaram-se as construções das medidas em DAX, necessárias para transformar as medições brutas em indicadores compreensíveis. A criação dessas medidas permitiu comparar inversores entre si, monitorar a geração real da usina e identificar comportamentos que fogem do padrão esperado.

Figura 3.4. Exemplo de medida Dax Power BI

```

1 Atual - Status =
2 VAR LastRowThisInv =
3     CALCULATETABLE(
4         TOPN(
5             1,
6             ALLSELECTED('fLeituras'),      -- respeita filtros do relatório, mas permite ordenar
7             livremente                      -- pega a linha mais recente
8             'fLeituras'[Data_Hora], DESC
9         ),
10        KEEPFILTERS(VALUE('fLeituras'[ID_Inversor])) -- mantém o inversor do contexto
11 )
12 RETURN
13 MAXX(LastRowThisInv, 'fLeituras'[Estado_Inversor_Texto])

```

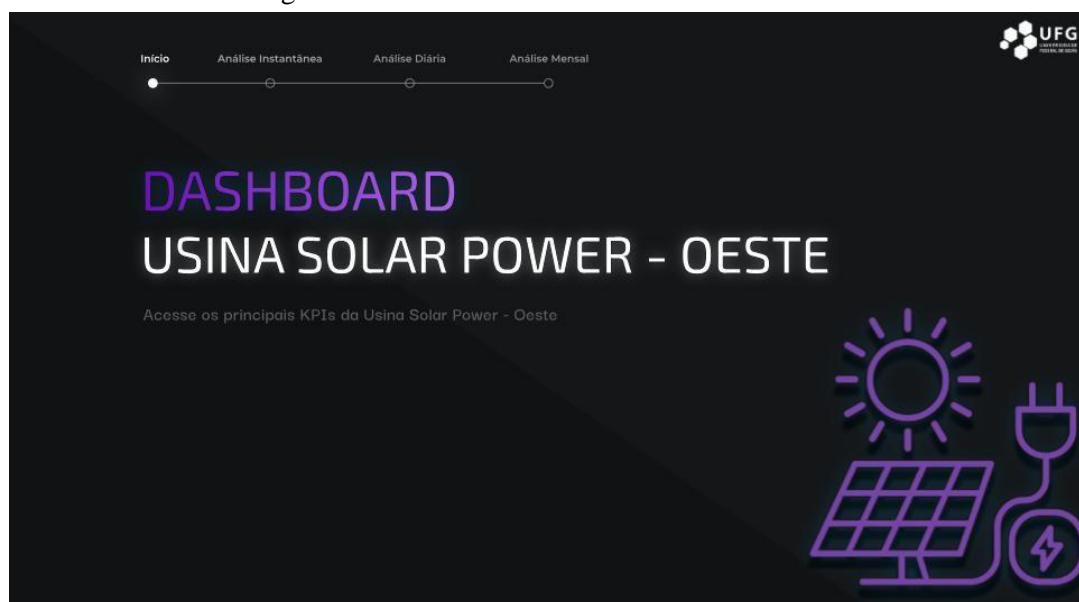
Fonte: Autor (2025)

### 3.5.5 Construção da Interface Visual

Com todos os indicadores prontos, passou-se ao desenvolvimento da interface visual do dashboard. O design priorizou clareza, simplicidade e a ideia de navegação por etapas, estruturando as análises em três níveis: instantâneo, diário e mensal. A tela inicial apresenta uma visão rápida da operação atual da usina, com informações de potência, tensões, status e

alarmes. Na análise diária, o usuário pode observar a curva real de geração ao longo do dia, o pico registrado e o comportamento individual de cada inversor. Já na análise mensal, é possível acompanhar a evolução da geração, comparar períodos e relacionar a produção com a capacidade estimada da usina.

Figura 3.5. Dashboard PowerBI Usina Solar Power



Fonte: Autor (2025)

### 3.5.6 Publicação na rede

Por fim, depois de concluído e validado, o dashboard foi publicado no Power BI Service. Isso permitiu que ele fosse acessado pela equipe responsável pela usina, tanto localmente quanto remotamente, além de possibilitar atualizações automáticas e a criação de alertas baseados em limites específicos, como quedas inesperadas de geração ou paralisação de um dos inversores. A publicação completou o ciclo de integração entre hardware, banco de dados e visualização analítica, consolidando o sistema IoT como ferramenta de monitoramento contínuo.

## 3.6 DESENVOLVIMENTO DO FIRMWARE

O firmware do ESP32 foi desenvolvido em C/C++ utilizando o *framework* Arduino e constitui o núcleo lógico da solução, funcionando como um *gateway* capaz de traduzir o protocolo industrial Modbus TCP para o protocolo IoT MQTT. Sua estrutura foi projetada para garantir operação contínua, eficiência na aquisição das grandezas elétricas e estabilidade durante a transmissão dos dados pela rede. Para isso, foram empregadas bibliotecas amplamente utilizadas em aplicações IoT, como **WiFi.h** e **WiFiClient.h** para conexão à rede sem fio e

abertura de canais TCP, **PubSubClient.h** para publicação das mensagens JSON no broker MQTT, e **ArduinoJson.h** para a formatação e organização dos dados coletados. Essa combinação de recursos permitiu criar um firmware robusto, modular e capaz de executar de forma confiável todas as etapas do monitoramento.

### 3.6.1 Configurações da rede para comunicação

No início do firmware são definidas as configurações básicas de comunicação, incluindo as credenciais do Wi-Fi, o endereço do broker MQTT e os parâmetros de acesso ao datalogger via Modbus TCP. Esses valores permitem que o ESP32 estabeleça automaticamente todas as conexões necessárias para operar, conforme mostrado na Figura 3.6.

Figura 3.6. Código ESP32 - Configurações da Rede

```
const char* ssid = "...";
const char* password = "...";
const char* mqtt_server = "...";
const int mqtt_port = 1883;
const char* logger_ip = "...";
const int logger_port = 502;
```

Fonte: Autor (2025)

### 3.6.2 Criação de blocos separados para leitura dos registradores

Para otimizar o desempenho da comunicação Modbus TCP, o firmware foi estruturado em blocos independentes de leitura. Cada bloco corresponde a um conjunto específico de registradores do datalogger, permitindo que o ESP32 organize as requisições de forma mais eficiente e reduza o tempo de resposta. A Figura 3.7 mostra a criação desses blocos no código, utilizados para armazenar temporariamente os valores retornados antes do processamento e montagem da mensagem JSON.

Figura 3.7. Código ESP32 - Criação dos blocos

```
uint16_t block1[50];
uint16_t block2[40];
uint16_t block3[30];
uint16_t block4[35];
uint16_t block5[24];
```

Fonte: Autor (2025)

### 3.6.3 Atribui-se o valor retornado pelos endereços aos blocos

Após a leitura dos registradores Modbus, o firmware utiliza uma função auxiliar para identificar a qual bloco cada endereço pertence e armazenar o valor retornado na posição

correta. Essa estratégia permite organizar as respostas do datalogger de forma estruturada, facilitando o processamento posterior e evitando buscas repetidas em áreas de memória. A Figura 3.8 apresenta o trecho do código responsável por essa lógica de associação entre endereço lido e bloco correspondente.

Figura 3.8. Código ESP32 - Atribuição dos valores aos blocos

```
auto u16 = [&](int addr) -> uint16_t {
    if (addr <= 5049) return block1[addr - 5000];
    if (addr <= 5089) return block2[addr - 5050];
    if (addr <= 5119) return block3[addr - 5090];
    if (addr <= 5154) return block4[addr - 5120];
    if (addr >= 7013 && addr <= 7036) return block5[addr - 7013];
    return 0;
};
```

Fonte: Autor (2025)

### 3.6.4 Construção da mensagem JSON

Após organizar os valores lidos nos blocos, o firmware utiliza a biblioteca *ArduinoJson* para estruturar todas as medições em um único documento JSON. Nesse processo, são criados objetos aninhados que agrupam informações gerais do inversor, dados de energia, temperatura interna e tensões dos MPPTs. Cada campo do JSON recebe o valor correspondente do registrador Modbus já convertido e padronizado. A Figura 3.11 ilustra o trecho do código responsável por essa montagem, que prepara a mensagem final a ser enviada ao broker MQTT.

Figura 3.9. Código ESP32 - Construção da Mensagem JSON

```
DynamicJsonDocument doc(3072);
time_t now = time(nullptr);

JsonObject root = doc.to<JsonObject>();
root["timestamp"] = now;
root["inverter_id"] = inverterId;

JsonObject info = root.createNestedObject("info");
info["device_type"] = String(u16(5000), HEX);
info["nominal_power"] = u16(5001) / 10.0;
info["output_type"] = u16(5002);

JsonObject energy = root.createNestedObject("energy");
energy["daily_yield"] = u16(5003) / 10.0;
energy["total_yield"] = u32(5004);
energy["total_running_time"] = u32(5006);
energy["Potencia Aparente1"] = u32(5009);
energy["Potencia Aparente2"] = u32(5010);
energy["daily_running_time"] = u16(5113);

JsonObject temp = root.createNestedObject("temperature");
temp["internal"] = s16(5008) / 10.0;

JsonObject dc = root.createNestedObject("dc");
dc["mppt1_voltage"] = u16(5011) / 10.0;
dc["mppt2_voltage"] = u16(5013) / 10.0;
dc["mppt3_voltage"] = u16(5015) / 10.0;
dc["mppt4_voltage"] = u16(5115) / 10.0;
dc["mppt5_voltage"] = u16(5117) / 10.0;
dc["mppt6_voltage"] = u16(5119) / 10.0;
dc["mppt7_voltage"] = u16(5121) / 10.0;
```

Fonte: Autor (2025)

### 3.6.5 Publicação do JSON via protocolo MQTT

Com o JSON já montado, o firmware realiza a etapa final do ciclo: a publicação da mensagem no broker MQTT. Antes de cada envio, o ESP32 verifica o estado da conexão e executa rotinas de reconexão quando necessário, garantindo a transmissão contínua dos dados. Em seguida, a mensagem JSON é publicada no tópico correspondente ao inversor, utilizando QoS 1 para assegurar que o envio ocorra ao menos uma vez. A Figura 3.10 apresenta o trecho do código responsável por essa operação, que conclui o processo de aquisição, processamento e transmissão do sistema.

Figura 3.10. Código ESP32 - Publicação MQTT

```
String topic = String(MQTT_INVERTER_PREFIX) + "/" + String(inverterId);

if (mqtt.connected()) {
  mqtt.disconnect();
  delay(100);
  connectMQTT();
  delay(100);

  // Publicar uma única vez com QoS 1 (at least once)
  bool published = mqtt.publish(topic.c_str(), json.c_str(), false, 1);

  Serial.print(String(u16(5019)/10.0, 0) + "V ");
  Serial.print(String(u32(5031), 0) + "W ");
  Serial.println(published ? "✅" : "❌");

  lastPublishTime = millis();
} else {
  Serial.println("❌ MQTT desconectado");
}
```

Fonte: Autor (2025)

### 3.6.6 Ciclo de leitura com intervalo definido

O ciclo principal do firmware controla a repetição periódica do processo de aquisição e publicação dos dados. A cada iteração, o ESP32 verifica o estado da conexão MQTT e realiza a reconexão quando necessário. Em seguida, o código verifica se o intervalo de leitura foi atingido e, quando isso ocorre, executa a função responsável por coletar as medições do inversor correspondente. O identificador do inversor é atualizado a cada ciclo, garantindo que o ESP32 percorra todos os equipamentos dentro do período estabelecido. A Figura 3.11 apresenta o trecho do *loop()* que implementa essa lógica de temporização e alternância entre os inversores.

Figura 3.11. Código ESP32 – Loop para repetição do processo

```
void loop() {
  esp_task_wdt_reset();
  ArduinoOTA.handle();

  if (!mqtt.connected()) {
    connectMQTT();
  }

  if (millis() - lastRead >= readInterval) {
    lastRead = millis();

    readInverterData(inverterIDs[currentID]);

    currentID = (currentID + 1) % inverterCount;

    delay(500);
  }

  delay(10);
}
```

Fonte: Autor (2025)

## 4 ESTUDO DE CASO: RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com o objetivo de validar o sistema de monitoramento IoT desenvolvido, foi realizado um estudo de caso na usina fotovoltaica UFV – Solar Power Oeste. Esta usina está localizada em Terezópolis Goiás e é administrada pela empresa Aupus Engenharia, que possibilitou que os testes fossem realizados. O estudo permitiu avaliar o desempenho do sistema em condições reais de operação, verificando sua capacidade de coletar, transmitir, armazenar e disponibilizar dados operacionais dos inversores em tempo real.

Figura 4.1. Usina Fotovoltaica SOLARPOWER.



Fonte: Autor (2025)

#### **4.1 CARACTERIZAÇÃO DA USINA FOTOVOLTAICA EM ANÁLISE**

A caracterização da usina foi elaborada a partir de visitas técnicas realizadas no local e da análise dos diagramas elétricos e projetos executivos disponibilizados pela empresa responsável. Essas duas fontes permitiram compreender de forma precisa a configuração da planta, a organização das strings e a topologia de ligação dos inversores.

Figura 4.2. Inversor Sungrow.



Fonte: Autor (2025)

A UFV 05 – Solar Power – Oeste está localizada nas coordenadas 16° 29' 04" S, 49° 05' 37" O, sendo classificada como uma usina de minigeração. No lado CA, a planta possui 999 kW de potência instalada, distribuídos entre três inversores Sungrow SG333HX, cada um com potência nominal de 333 kW operando em 800 Vca. No lado CC, a usina utiliza 1.944 módulos Canadian Solar CS7N-650MB-AG, cada um com potência de 650 Wp, formando o campo fotovoltaico responsável por alimentar a conversão de energia.

Durante a visita técnica e conforme o projeto, foi verificado que os módulos estão organizados em 72 strings, cada uma composta por 27 módulos em série. Dessa forma, cada inversor recebe 24 strings, distribuídas uniformemente entre seus 12 MPPTs, totalizando duas strings por MPPT. Considerando o módulo de 650 Wp, cada string possui aproximadamente 17,55 kWp de potência, com Voc estimado em torno de 1.215 V (STC) e corrente nominal de aproximadamente 14,4 A, valores compatíveis com a arquitetura adotada.

No lado CA, os três inversores operam em paralelo em 800 V, convergindo para um transformador elevador de 1000 kVA – 34,5/0,8 kV. Essa etapa garante a adequação da tensão para conexão com a rede de média tensão da concessionária, atendendo às normas vigentes e assegurando a entrega da energia produzida.

Com base na potência instalada no campo fotovoltaico e na localização geográfica da usina, estima-se que a produção diária típica esteja entre 7 e 8 MWh em dias ensolarados, 5 a 6,5 MWh em dias parcialmente nublados e 2,5 a 4,5 MWh em dias nublados. Esses valores

foram utilizados como parâmetro de comparação para a análise dos dados coletados durante a operação do sistema IoT.

## 4.2 IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA IOT NA USINA

A implementação do sistema de monitoramento IoT na UFV 05 foi realizada durante visitas técnicas à usina. O ESP32, previamente programado conforme descrito nos tópicos anteriores, foi instalado em um ponto protegido da infraestrutura, alimentado por uma fonte adequada e posicionado dentro da área de cobertura da rede sem fio da planta, garantindo estabilidade na comunicação tanto com o datalogger quanto com o broker MQTT. Essa etapa assegurou as condições necessárias para o funcionamento contínuo do dispositivo em ambiente real.

Figura 4.3 ESP32 Instalado na Usina



Fonte: Autor (2025)

Após a instalação, foi possível confirmar, por meio do próprio broker MQTT, que o ESP32 havia estabelecido corretamente a conexão com o datalogger e estava transmitindo as leituras conforme o ciclo configurado. Em seguida, procedeu-se à verificação no banco de dados, onde se constatou que todas as mensagens enviadas pelo dispositivo estavam sendo registradas de forma íntegra e consistente. Essa análise garantiu que o fluxo completo — aquisição, transmissão e armazenamento — estava operando sem perdas ou falhas.

Com o funcionamento validado, a solução passou a disponibilizar dados em tempo quase real, possibilitando sua integração imediata a ferramentas de análise e visualização, como dashboards desenvolvidos em Power BI. Esse resultado confirmou a viabilidade prática do

sistema IoT e sua capacidade de operar de forma contínua no ambiente da usina, atendendo aos requisitos definidos para o monitoramento proposto.

### **4.3 APRESENTAÇÃO DOS DADOS COLETADOS**

Após a integração do sistema IoT com os inversores da UFV 05 – Solar Power – Oeste, as medições passaram a ser registradas continuamente e enviadas ao banco de dados, possibilitando sua visualização no dashboard desenvolvido no Power BI. Nesta seção, são apresentados os dados coletados ao longo do período monitorado, conforme exibidos nas telas do painel, sem interpretações ou discussões, que serão tratadas na subseção seguinte.

Os dados disponíveis no dashboard são organizados em três níveis principais:

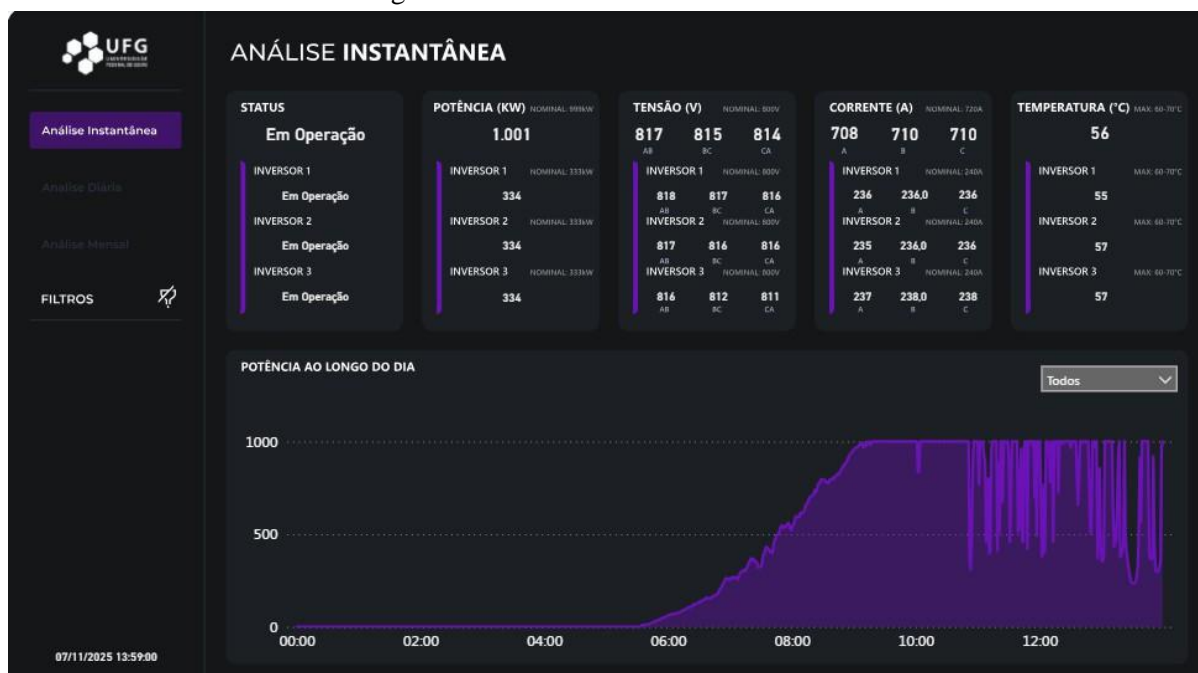
- (i) Análise Instantânea
- (ii) Análise Diária
- (ii) Análise Mensal

#### **4.3.1 Análise Instantânea**

A análise instantânea apresenta o estado operacional dos inversores e suas principais grandezas elétricas no momento da leitura. No painel referente ao dia 07/11/2025 às 13:59, verifica-se que os três inversores estavam em condição “Em Operação”, registrando uma potência ativa total de 1.001 kW. As tensões trifásicas variaram entre 814 V e 818 V, enquanto as correntes nas fases permaneceram próximas de 708 A a 710 A. A temperatura interna dos inversores, entre 55°C e 57°C, também é exibida, caracterizando as condições térmicas da operação no instante analisado.

A seguir, apresenta-se a imagem correspondente ao painel de operação instantânea exibido no Power BI.

Figura 4.4. PowerBI - Análise instantânea



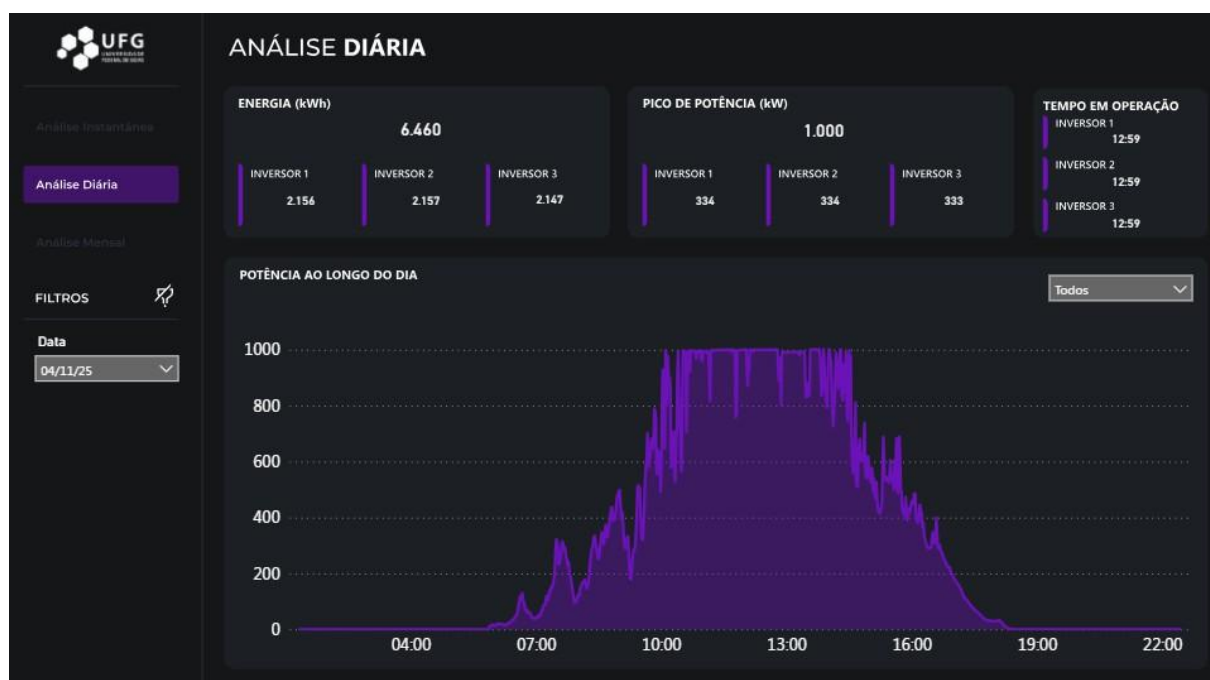
Fonte: Autor (2025)

### 4.3.2 Análise Diária

A análise diária exibe a curva de potência ao longo do dia 07/11/2025, permitindo observar a evolução da geração desde o início da manhã até o final da tarde. O gráfico apresenta a progressão típica de um dia de boa irradiância, com aumento gradual da potência nas primeiras horas, estabilização próxima ao valor máximo por volta do meio-dia e declínio no final do período. A energia acumulada registrada para esse dia foi de 6,460 MWh, valor que reflete um desempenho compatível com a configuração e localização da usina.

A imagem correspondente à curva diária de geração é apresentada a seguir.

Figura 4.5. PowerBI - Análise diária



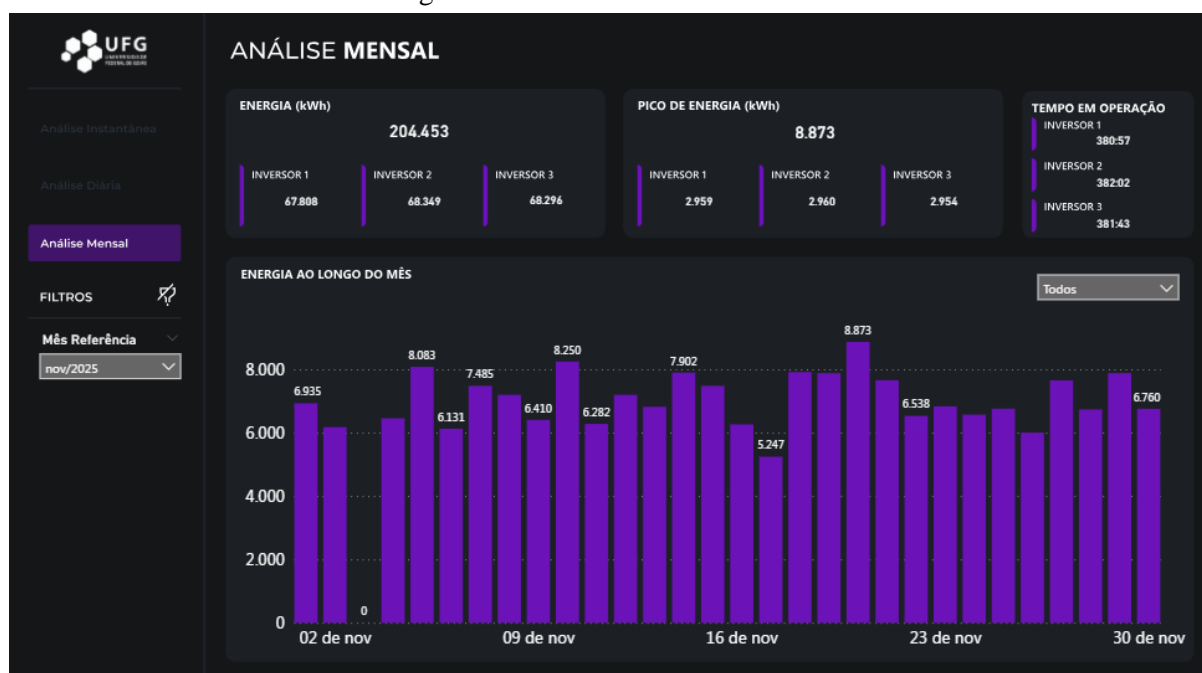
Fonte: Autor (2025)

### 4.3.3 Análise Mensal

A análise mensal consolida a produção energética diária ao longo de novembro de 2025, permitindo observar o desempenho global da usina no período. O painel evidencia dias de maior geração, como 8,083 MWh, 8,250 MWh, 7,902 MWh e 8,873 MWh — este último representando o pico mensal. Também foi registrado 1 dia com valor zerado, devido a uma anomalia dentro da subestação, o que acarretou o corte de geração por segurança e por normas da concessionária. A energia total acumulada no mês, conforme exibido no painel, é de 204,453 MWh, distribuída entre os três inversores: 67,808 MWh (Inversor 1), 68,349 MWh (Inversor 2) e 68,296 MWh (Inversor 3).

A seguir, apresenta-se a imagem correspondente ao painel de consolidação mensal.

Figura 4.6. PowerBI - Análise mensal



Fonte: Autor (2025)

Esses dados coletados representam o conjunto bruto de informações que servirá de base para a próxima etapa do estudo, onde os resultados serão analisados de forma técnica, comparando-se o comportamento registrado com o esperado para a configuração da usina.

#### 4.4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A análise dos dados coletados pelo sistema IoT permitiu avaliar o comportamento operacional da usina durante o período monitorado, demonstrando compatibilidade entre as medições obtidas, a infraestrutura da planta e o desempenho esperado para usinas fotovoltaicas da região Centro-Oeste. As leituras apresentadas nos painéis instantâneo, diário e mensal revelam que o sistema de monitoramento operou de forma estável e com precisão adequada ao objetivo proposto.

Nas leituras instantâneas, verificou-se que os três inversores funcionaram de maneira equilibrada, com potência total de 1.001 kW, tensões próximas de 817 V e temperaturas internas em torno de 56°C, valores coerentes com o horário de maior irradiância. Esses resultados indicam que o sistema IoT capturou corretamente as grandezas via Modbus TCP e transmitiu os dados sem distorções relevantes.

A curva diária de potência do dia analisado apresentou comportamento típico de dias ensolarados, com aumento gradual pela manhã, estabilização próxima ao pico ao meio-dia e queda ao final da tarde. A energia acumulada de 6,460 MWh está de acordo com a faixa

estimada para a usina, o que confirma a aderência dos dados coletados ao desempenho real da planta.

Na análise mensal, observou-se uma variação normal da geração ao longo dos dias, com diversos momentos acima de 7 MWh, incluindo picos como 8,083 MWh, 8,250 MWh e 8,873 MWh, típicos de dias com alta irradiância. Os registros zerados correspondem a falhas eventuais de geração. Ainda assim, a energia total do mês, 204,453 MWh, situa-se dentro do esperado para uma planta de aproximadamente 1,26 MWp na região, reforçando a consistência geral do monitoramento.

De forma sintética, os resultados demonstram que o sistema IoT foi capaz de coletar, processar e transmitir os dados da usina com precisão suficiente para análises energéticas e acompanhamento do desempenho dos inversores, evidenciando que a solução proposta atende adequadamente ao propósito de monitoramento contínuo.

## **5 ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA**

A adoção de sistemas de monitoramento em usinas fotovoltaicas envolve não apenas aspectos técnicos, mas também considerações econômicas que influenciam diretamente a decisão de investimento de proprietários e gestores. Nesse contexto, a solução IoT desenvolvida neste trabalho foi projetada com foco em baixo custo e alta acessibilidade, buscando preencher a lacuna existente entre os sistemas SCADA comerciais — normalmente caros e complexos — e os monitoramentos nativos dos inversores, que muitas vezes apresentam limitações de personalização e flexibilidade. Este capítulo apresenta uma análise comparativa entre o custo de implementação do sistema desenvolvido e os valores praticados por soluções comerciais disponíveis no mercado.

O sistema proposto possui estrutura enxuta, composta essencialmente por:

1. ESP32 para aquisição e transmissão dos dados – aproximadamente R\$ 30,00;
2. Broker MQTT - gratuito;
3. Servidor VPS Hostinger para persistência dos dados – cerca de R\$ 30,00/mês;
4. Power BI Desktop – licença gratuita;

Assim, o custo mensal total da solução aproxima-se de R\$ 30,00, referente apenas à VPS, enquanto o custo inicial de hardware permanece irrisório. Trata-se de uma abordagem de baixo custo que, mesmo com algumas limitações, atende à maior parte das necessidades de acompanhamento de usinas de pequeno e médio porte.

Em contraste, soluções de monitoramento IoT comerciais apresentam valores significativamente superiores. De acordo com empresas que atuam no segmento, o custo médio de monitoramento IoT especializado gira em torno de R\$ 250,00 por ativo/mês, variando conforme a quantidade de sensores, tipo de comunicação e nível de profundidade das análises. Considerando que uma usina como a UFV 05 opera com três inversores, o custo mensal estimado seria de aproximadamente R\$ 750,00, valor 25 vezes maior que o da solução desenvolvida.

Além disso, plataformas completas de gerenciamento, como o *Fractal*, utilizadas amplamente em manutenção e gestão de ativos, apresentam valores ainda mais altos. O ponto de partida para uma operação mínima gira em torno de R\$ 1.500,00/mês, dependendo das funcionalidades habilitadas, quantidade de usuários e perfis de acesso. Apesar de oferecerem recursos avançados, tais soluções tornam-se financeiramente inviáveis para muitos proprietários de usinas fotovoltaicas de pequeno e médio porte.

A comparação evidencia que o sistema IoT proposto apresenta uma vantagem econômica significativa, reduzindo os custos de monitoramento em mais de 95% quando comparado às alternativas comerciais. Ao mesmo tempo, oferece flexibilidade, possibilidade de personalização de indicadores, total autonomia sobre os dados e integração com ferramentas analíticas como o Power BI. Esses fatores tornam a solução desenvolvida não apenas tecnicamente funcional, mas também altamente atrativa em termos de custo-benefício, especialmente para operadores que buscam monitoramento eficiente sem depender de plataformas proprietárias de alto custo.

## 6 CONCLUSÃO

O desenvolvimento deste trabalho permitiu projetar, implementar e validar uma solução de monitoramento baseada em Internet das Coisas (IoT) aplicada a uma usina fotovoltaica de médio porte. A proposta buscou superar limitações comuns nos sistemas de monitoramento nativos dos inversores, especialmente no que se refere à flexibilidade dos indicadores, personalização das análises e autonomia sobre os dados. A solução desenvolvida utiliza tecnologias de baixo custo e protocolos amplamente difundidos na indústria, como Modbus TCP e MQTT, integrados por meio de um firmware dedicado implementado em um microcontrolador ESP32.

A aplicação prática realizada na UFV 05 – Solar Power – Oeste demonstrou que o sistema é capaz de coletar, processar, transmitir e armazenar dados operacionais dos inversores de

maneira contínua e confiável. As medições obtidas foram compatíveis com o comportamento esperado para a usina, refletindo a dinâmica real de operação ao longo do dia e do mês. A análise das curvas instantâneas, diárias e mensais evidenciou que o sistema IoT capturou adequadamente as grandezas elétricas, confirmando a precisão das leituras via Modbus e a eficiência na transmissão MQTT. Mesmo diante de falhas pontuais de geração — inerentes a ambientes reais —, a integridade dos dados e a qualidade das informações coletadas foram preservadas.

Outro aspecto relevante foi a análise de viabilidade econômica, que destacou o baixo custo de implementação e manutenção da solução proposta. Com um investimento inicial reduzido e custo mensal significativamente inferior ao de plataformas comerciais, o sistema se apresenta como uma alternativa acessível para proprietários e gestores de usinas fotovoltaicas que buscam ampliar o nível de monitoramento sem comprometer o orçamento operacional. A economia obtida, somada à flexibilidade e à capacidade de personalização, reforça o potencial da solução para aplicação em diversos cenários de geração distribuída.

Em síntese, o sistema proposto atingiu os objetivos estabelecidos, demonstrando viabilidade técnica, operacional e econômica. Além disso, o trabalho contribui com uma abordagem prática e replicável para monitoramento de usinas fotovoltaicas, oferecendo uma solução que pode ser expandida, adaptada ou integrada a novas funcionalidades, como detecção automática de falhas, previsão de geração, alertas inteligentes e integração com plataformas de manutenção. Assim, a pesquisa abre espaço para aprimoramentos futuros e para a continuidade da evolução digital no setor fotovoltaico brasileiro.

O uso do Power BI cumpriu o objetivo de visualização dos dados, contudo, a dependência de licenças para recursos avançados de atualização automática impõe barreiras à escalabilidade do projeto. Dessa forma, recomenda-se a migração da interface de visualização para um ambiente SCADA desenvolvido sobre tecnologias livres (como ScadaBR ou soluções web full stack). Essa abordagem preservaria a premissa de baixo custo defendida neste trabalho, ao mesmo tempo que asseguraria a capacidade de processamento e visualização de dados em tempo real (real-time streaming) sem restrições proprietárias

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012. Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída. Brasília, DF, 2012. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>
- BOYLESTAD, R.; NASHELSKY, L. Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos. 11. ed. São Paulo: Pearson, 2013.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Balanço Energético Nacional 2024. Brasília, DF: EPE, 2024. Disponível em: <https://www.epe.gov.br>. Acesso em: 20 nov. 2025.
- GOOGLE. MQTT Essentials — Protocolo de Comunicação IoT. 2025. Disponível em: <https://cloud.google.com>
- IBRAHIM, A.; HUANG, T. Deep Learning for Time Series Forecasting: LSTM Networks and Applications. *Journal of Energy Systems*, v. 5, n. 2, p. 55–70, 2020.
- KUO, C. Internet of Things Architecture: Concepts and Practical Implementation. New York: Springer, 2017.
- LUQUE, A.; HEGEDUS, S. Handbook of Photovoltaic Science and Engineering. 2. ed. New York: Wiley, 2011.
- MICROSOFT. Power BI Documentation: Data Modeling and DAX. 2024. Disponível em: <https://learn.microsoft.com/power-bi>. Acesso em: 15 nov. 2025.
- OASIS. MQTT Version 3.1.1. OASIS Standard. 2019. Disponível em: <https://docs.oasis-open.org/mqtt>. Acesso em: 22 nov. 2025.
- SUNGROW. Manual Técnico – Inversor SG333HX. 2022. Disponível em: <https://www.sungrowpower.com>. Acesso em: 12 nov. 2025.
- SUNGROW. Manual Técnico – Datalogger Logger1000. 2022. Disponível em: <https://www.sungrowpower.com>. Acesso em: 12 nov. 2025.
- VILLAS BOAS, A. Análise de Desempenho de Usinas Fotovoltaicas no Brasil Central. *Revista de Energia Solar*, v. 12, n. 3, p. 45–59, 2021.
- VOLTOLINI, D. Telemetria em Usinas Fotovoltaicas: Arquitetura, Desafios e Aplicações. *Revista Brasileira de Sistemas Inteligentes*, v. 8, n. 1, p. 77–90, 2022.
- EPE [Empresa de Pesquisa Energética] Balanço Energético Nacional (BEN) 2021: Ano base 2021, 2022. Disponível em < <https://ben.epe.gov.br> >. Acesso em mar/2022.
- MORETTI, I. **Regras da ABNT para TCC: conheça as principais normas**. 2019. Disponível em: <https://viacarreira.com/regras-da-abnt-para-tcc-conheca-principais-normas>. Acesso em: 15 jan. 2019.