

# Monitoramento Distribuído de Usinas Fotovoltaicas Utilizando Redes de Sensores Sem Fio LoRa com Topologia Mesh

Alex F R Trajano<sup>1</sup>, João Pedro Brasil Lima<sup>1</sup>

<sup>1</sup>LITEC - Laboratório de Inovação Tecnológica e Exploração Científica  
Instituto Atlântico – Fortaleza – Ceará – Brasil

`alex.ferreira@atlantico.com.br, joao.brasil@atlantico.com.br`

**Abstract.** *This study employs a LoRa wireless sensor network to monitor operational parameters in a photovoltaic power plant. Adopting a mesh topology, the network collects data on fuse status and temperature in stringboxes, transmitting them to a central station. The tests demonstrate reliable collection, even in a challenging environment with solar panel movement throughout the day. The results validate LoRa mesh networks as a robust alternative for continuous monitoring of photovoltaic power plants.*

**Resumo.** *Este estudo emprega uma rede de sensores sem fio LoRa para supervisionar parâmetros operacionais numa usina fotovoltaica. Adotando uma topologia mesh, a rede coleta dados sobre estado de fusíveis e temperatura em stringboxes, transmitindo-os para uma estação central. Os testes demonstram uma coleta confiável, mesmo num ambiente desafiador com movimentação dos painéis solares ao longo do dia. Os resultados validam as redes LoRa mesh como uma alternativa robusta para o monitoramento contínuo de usinas fotovoltaicas.*

## 1. Introdução

A crescente demanda por energia limpa impulsiona a expansão de usinas solares, mas garantir sua eficiência exige monitoramento preciso e contínuo. Coletar dados em tempo real é crucial para otimizar a produção, prevenir falhas e tomar decisões estratégicas. No entanto, essa coleta enfrenta desafios como a vastidão das usinas, a dificuldade de instalar antenas, os custos de cabeamento e as interferências eletromagnéticas. Fatores climáticos adversos e a necessidade de manutenção constante da infraestrutura impõem dificuldades adicionais.

As *Wireless Sensor Networks* (WSNs), ou Redes de Sensores Sem Fio, surgem como solução para superar esses desafios. Auto configuráveis, tolerantes a falhas e escaláveis, as WSNs oferecem uma alternativa robusta e eficiente para monitorar dados nos mais diversos tipos de ambientes e aplicações [Ali et al. 2017]. Assim, através de sensores interconectados, as WSNs também seriam capazes de auxiliar no monitoramento de múltiplos ativos de uma usina fotovoltaica, permitindo a detecção de falhas e a otimização da produção de energia.

Este trabalho apresenta um estudo de caso detalhado da implementação de uma WSN com tecnologia LoRa [Sun et al. 2022] em topologia mesh para monitorar temperatura e o estado de fusíveis em *string boxes* de uma usina solar de grande porte localizada no Rio Grande do Norte, Brasil. A tecnologia LoRa, com baixo consumo de energia,

longo alcance e alta resistência a interferências, é ideal para esse tipo de aplicação. A pesquisa avalia a eficácia dessa solução na coleta de dados, otimização da produção e detecção de falhas, contribuindo para aprimorar a gestão e manutenção da usina.

## 2. Trabalhos relacionados

Estudos recentes [Siddikov et al. 2020, Li 2023] indicam a relevância de WSNs para o monitoramento eficiente de usinas fotovoltaicas, mitigando desafios na aquisição de dados e manutenção. Pesquisadores exploraram WSNs para coleta de dados em tempo real e detecção de falhas, empregando sensores para parâmetros como tensão, corrente e temperatura, e utilizando ZigBee para transmissão eficiente. As arquiteturas de WSN aplicadas por esses estudos são inerentemente baseadas em topologias mesh devido a própria especificação do ZigBee. Em conjunto, esses estudos destacam WSNs, notadamente aquelas baseadas em ZigBee, como solução robusta para otimizar a eficiência e a estabilidade operacional de plantas fotovoltaicas. Especificamente o trabalho de [Li 2023] aplica uma arquitetura hierárquica que utiliza o LoRa para comunicação em longa distância.

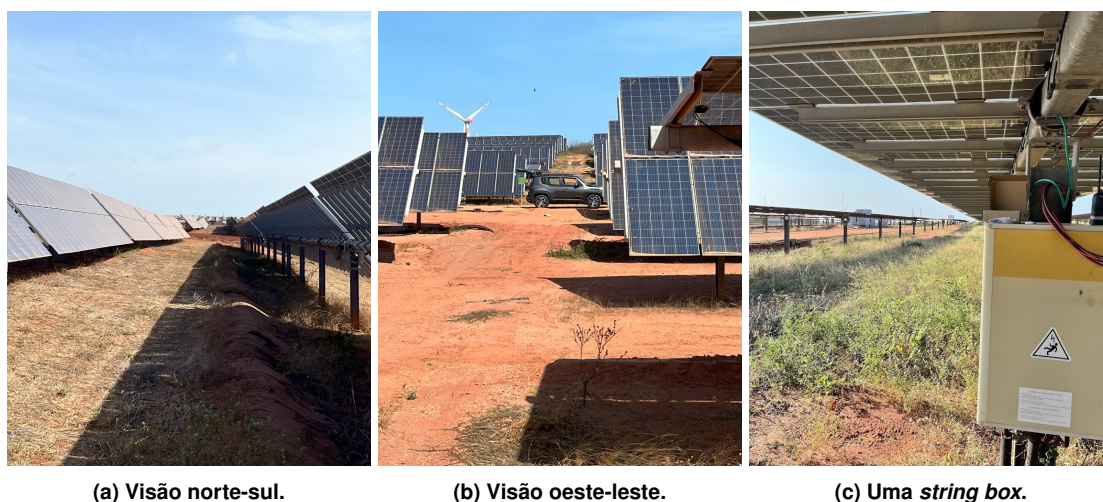
Este trabalho se baseia em uma arquitetura de rede mesh LoRa construída sobre uma pesquisa anterior que explora conectividade em áreas remotas [Trajano et al. 2022]. Enquanto essa pesquisa focava na extensão da cobertura Wi-Fi por meio de uma rede mesh LoRa, este trabalho adapta esses conceitos para monitorar parâmetros críticos em usinas fotovoltaicas. Ao aproveitar as características de longo alcance e baixo consumo de energia da tecnologia LoRa, estabelecemos uma rede mesh robusta que permite a coleta e transmissão de dados em tempo real para uma estação central da usina fotovoltaica.

## 3. Usina fotovoltaica e arquitetura da solução de monitoramento

Usinas de energia solar são projetadas para maximizar a eficiência da conversão de energia solar em eletricidade. Os painéis solares são montados em *trackers*, que acompanham o movimento do sol ao longo do dia para otimizar a produção de energia. Esses painéis são dispostos em fileiras denominadas *strings*, com cada *string* compreendendo vários painéis conectados em série, tendo seus condutores canalizados para uma *string box*. A *string box* combina os circuitos de múltiplas *strings* num barramento que conduz a energia gerada para o inversor, além de manter dispositivos de proteção, como fusíveis e disjuntores. O inversor, por sua vez, transforma a corrente contínua produzida pelos painéis em corrente alternada, que pode ser utilizada na rede elétrica.

A usina fotovoltaica, ilustrada na Figura 1, está situada numa região privilegiada pela alta irradiação solar e condições climáticas propícias à geração de energia fotovoltaica. Contudo, a intensa radiação solar e as elevadas temperaturas características da região impõem desafios aos componentes localizados nas *string boxes*. Componentes como fusíveis, projetados para operar dentro de faixas de temperatura específicas, podem ter seu desempenho comprometido e sua vida útil drasticamente reduzida sob condições de calor excessivo. Este superaquecimento pode levar à falha prematura dos fusíveis, fazendo com que eles abram o circuito indevidamente, impactando negativamente a confiabilidade do sistema como um todo e a consequente produção de energia da usina.

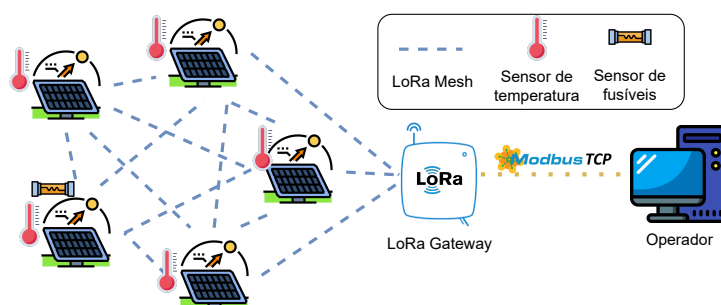
Diante dos desafios relacionados às condições internas das *string boxes*, foram desenvolvidos dois tipos de dispositivos baseados no microcontrolador ESP32, ambos utilizando um módulo de comunicação LoRa operando na frequência de 915 MHz e SF



**Figura 1. Ambiente da usina fotovoltaica do estudo de caso.**

7. O primeiro tipo compreende oito dispositivos projetados para monitorar a temperatura das *string boxes*, equipados com sensores DS18B20 e alimentados por um painel solar externo de 15W, acompanhado de uma bateria 18650 com capacidade de 2600mAh. O segundo tipo consiste em um dispositivo adicional que, além do sensor DS18B20, conta com cinco sensores para monitoramento do estado (aberto ou fechado) dos fusíveis. Esse dispositivo detecta a condição dos fusíveis por meio da medição da diferença de tensão entre o barramento e os fusíveis monitorados. Como já está conectado ao barramento, não possui bateria própria e é alimentado diretamente por ele, operando apenas durante o dia. Vale destacar que o detalhamento desse sensor específico não faz parte do escopo deste trabalho.

Todos os dispositivos formam uma rede LoRa mesh e transmitem dados para um *gateway* central. O *gateway* mantém o estado atual de cada dispositivo na rede e expõe essas informações por meio do Modbus TCP. Cada sensor recebe um registrador específico no protocolo Modbus, permitindo que o operador da planta consulte o último estado relatado de cada sensor. Ao monitorar continuamente esses parâmetros críticos e transmitir dados para a estação de monitoramento central, esses dispositivos permitem a detecção de problemas potenciais, permitindo a manutenção oportuna e evitando paradas de produção. A arquitetura geral é ilustrada na Figura 2.

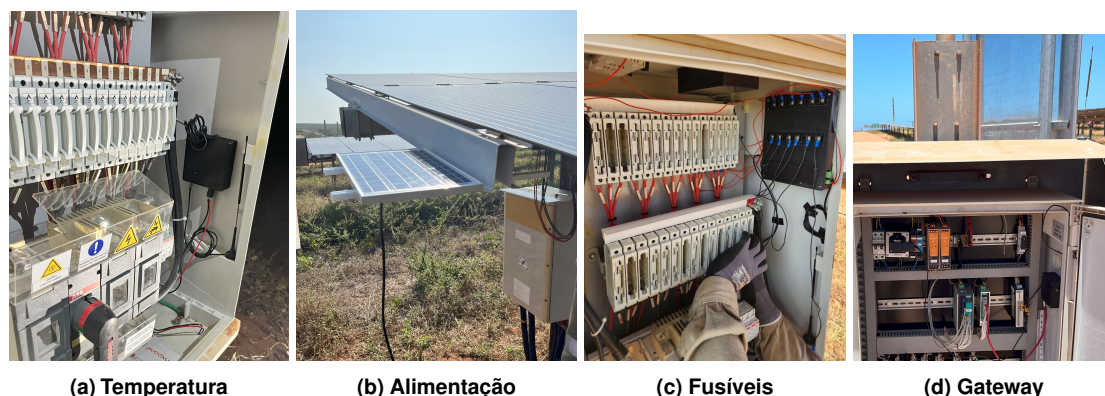


**Figura 2. Arquitetura geral do sistema de monitoramento.**

Como citado na Seção 2, a rede mesh estabelecida entre os dispositivos segue a arquitetura de rede do trabalho anterior [Trajano et al. 2022]. De modo geral, o roteamento é definido dinamicamente pelo protocolo *Babel*, definido na RFC 8966 [Chroboczek and Schinazi 2021]. O código utilizado na implementação da comunicação pode ser encontrado em repositório público<sup>1</sup>. Os dispositivos herdaram toda a gestão da comunicação LoRa mesh do projeto anterior, enquanto implementaram novos mecanismos de coleta e gestão de dados própria. Cada dispositivo realizou leituras de todos os seus sensores em intervalos aleatórios que variavam uniformemente entre 30 e 90 segundos.

#### 4. Resultados

A instalação dos dispositivos ocorreu no dia 31 de julho de 2024, monitorando as *string boxes* até o dia 25 de novembro de 2024. A Figura 3a mostra o dispositivo com sensor de temperatura, enquanto a Figura 3b o painel solar para alimentação do mesmo dispositivo. Já a Figura 3c mostra o dispositivo com sensor de fusíveis e temperatura, com capacidade de monitorar até 5 fusíveis simultaneamente. Finalmente, a Figura 3d mostra o *gateway*. Os dispositivos, de cor preta, sempre estão instalados na lateral direita do compartimento.



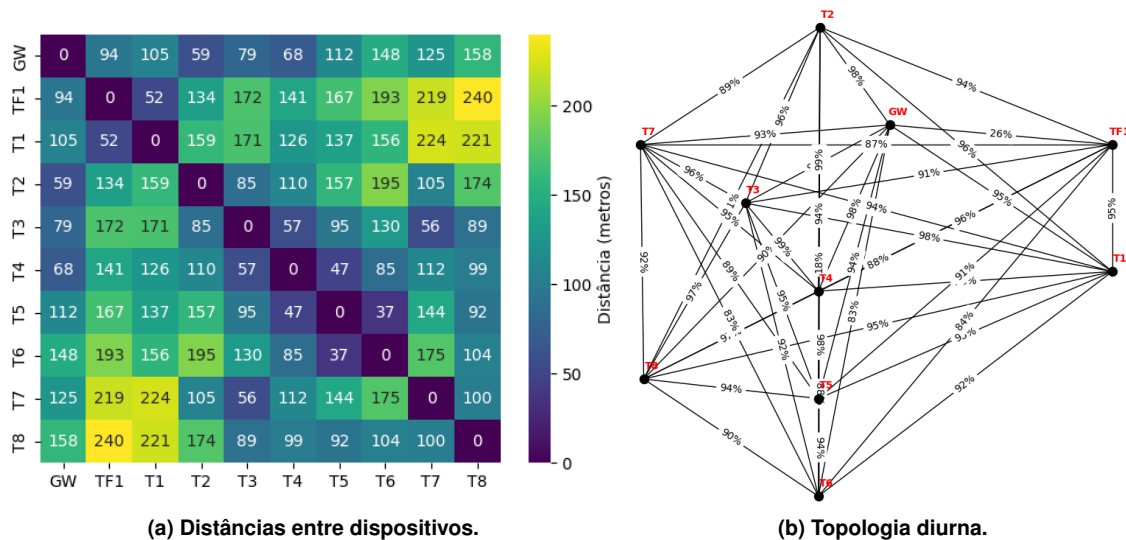
**Figura 3. Dispositivos implantados para monitoramento da usina fotovoltaica.**

O operador da usina realizou a configuração de um sistema de monitoramento que coletou os dados diretamente do *gateway* em intervalos fixos de 1 minuto. Assim, a cada minuto os dados de todos os sensores eram recuperados do *gateway*, permitindo a análise dos dados de acordo com a lógica de operação esperada da usina.

Os dispositivos foram instalados dentro de uma área limitada da usina de 29.088 m<sup>2</sup>. Usinas fotovoltaicas costumam ser projetadas com o inversor em um local central para minimizar a quantidade de cabeamento elétrico dos painéis até o inversor. Assim, para aproveitar esse local central, o *gateway* foi posicionado perto do gabinete do inversor. A Figura 4a mostra as distâncias entre dispositivos, ilustrando a área de implantação compacta e o potencial para transmissão de dados eficiente dentro da rede. Os dispositivos foram nomeados como GW para o *gateway*, TF1 para o dispositivo com sensor de fusíveis e temperatura, e T1 a T8 para os dispositivos apenas com sensor de temperatura.

Por sua vez, a Figura 4b exibe a topologia da rede durante o dia, quando o TF1 está operacional. As arestas do grafo indicam o percentual de tempo em que cada enlace

<sup>1</sup>Código fonte da rede mesh disponível em <https://github.com/Instituto-Atlantico/mesh-connect>.



**Figura 4. Distâncias entre os dispositivos e topologia da rede durante o dia.**

da topologia mesh permaneceu ativo. Assim, é possível perceber que de modo geral, a topologia permaneceu relativamente estável, dado que a maior parte dos enlaces estão ativos por pelo menos 80% do tempo. Esse era um resultado esperado, visto que o LoRa é capaz de atingir longas distâncias com relativa facilidade, e, como possível ver na Figura 4a, as distâncias entre os dispositivos eram relativamente curtas.

Mesmo que a topologia tenha estado suficientemente estável e tenha permitido a coleta de dados durante todo o período de avaliação, houveram momentos em que os dispositivos foram considerados *offline*, isto é, o *gateway* não foi capaz de receber dados atualizados de um certo dispositivo por tempo superior a 15 minutos. Após uma análise nos períodos de indisponibilidade, percebeu-se que existia uma maior incidência durante o início do dia e o final da tarde, como ilustrado nas Figuras 5a e 5b. Na Figura 5a observa-se a distribuição da hora em que os períodos de indisponibilidade iniciaram, enquanto na Figura 5b se observa a distribuição da hora em que a indisponibilidade termina, ou seja, que o dispositivo volta a ficar *online*.

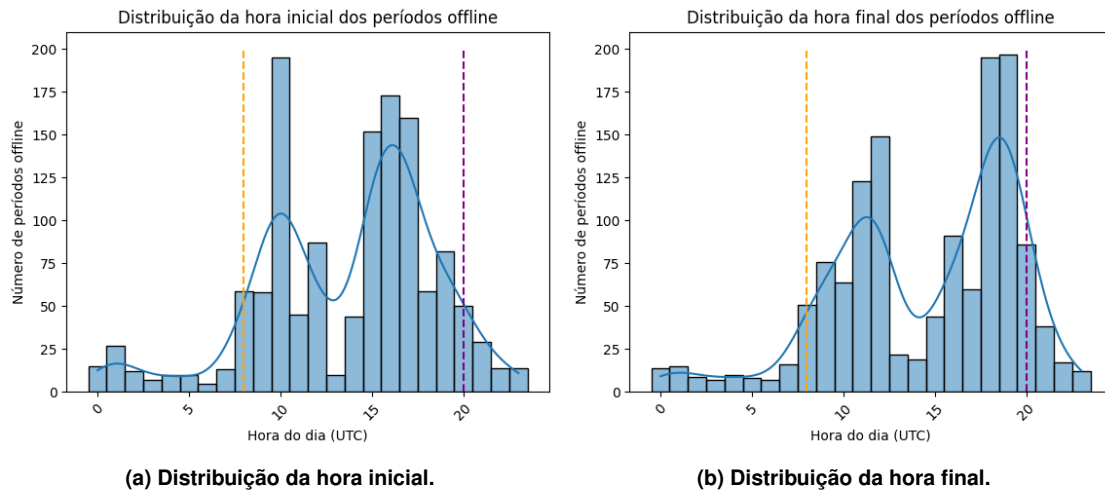
A explicação para o comportamento mencionado reside na forma como os painéis solares se movimentam ao longo do dia. Os painéis, acoplados a rastreadores que seguem o movimento do sol, apresentam um ângulo de inclinação de aproximadamente 80 graus no início da manhã e no final da tarde. Essa configuração, embora otimize a captação de luz solar, resulta na criação de obstáculos entre os dispositivos, que estão posicionados abaixo dos painéis, conforme demonstra a Figura 1c.

## 5. Conclusão

Este estudo demonstrou a viabilidade da utilização de redes de sensores sem fio LoRa em topologia mesh para o monitoramento de parâmetros operacionais em usinas fotovoltaicas. A solução proposta permitiu a coleta confiável de dados sobre temperatura e estado dos fusíveis das *string boxes*, contribuindo para a detecção de falhas.

A análise dos dados de indisponibilidade, distâncias e topologia indicou que, embora a WSN tenha apresentado um bom grau de conectividade, melhorias no algoritmo de





**Figura 5. Distribuição dos períodos em que os dispositivos ficaram offline.**

roteamento são necessárias. A principal limitação foi a latência na adaptação a quebras de enlace, especialmente devido ao movimento dos painéis solares. Para mitigar esse problema, pode-se explorar o padrão previsível desse movimento para ajustar dinamicamente o roteamento e otimizar a conectividade.

Dessa forma, o estudo valida a tecnologia LoRa mesh como uma alternativa robusta e de baixo consumo energético para monitoramento contínuo em usinas fotovoltaicas. Trabalhos futuros podem explorar a integração dessa solução com algoritmos de roteamento adaptativo, que antecipem mudanças no ambiente e reajam rapidamente a variações na conectividade, além de incorporar técnicas de análise preditiva para otimizar ainda mais a eficiência da comunicação na rede.

## Referências

- Ali, A., Ming, Y., Chakraborty, S., and Iram, S. (2017). A comprehensive survey on real-time applications of wsn. *Future Internet*, 9(4).
- Chroboczek, J. and Schinazi, D. (2021). Rfc 8966: The babel routing protocol.
- Li, K. (2023). The algorithm optimization of data layering wireless sensor network for photovoltaic power station based on zigbee and lora. In *2023 15th International Conference on Communication Software and Networks (ICCSN)*, pages 291–296. IEEE.
- Siddikov, I., Khujamatov, K., Khasanov, D., and Reypnazarov, E. (2020). Iot and intelligent wireless sensor network for remote monitoring systems of solar power stations. In *World Conference Intelligent System for Industrial Automation*, pages 186–195. Springer.
- Sun, Z., Yang, H., Liu, K., Yin, Z., Li, Z., and Xu, W. (2022). Recent advances in lora: A comprehensive survey. *ACM Trans. Sen. Netw.*, 18(4).
- Trajano, A. F. R., Andrade, P. C. F., Pimenta, I. A., Cavalcante, J., and de Souza, J. N. (2022). Delivering wifi connectivity to remote locations through lora mesh networking. In *NOMS 2022-2022 IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium*, pages 1–6.