

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
SANTA CATARINA - CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELETRÔNICA**

Fabio Schmitt Avelino

**Aplicação do protocolo ESP-NOW em antenas diretivas do tipo Yagi-Uda: uma
abordagem para comunicação de longo alcance no sistema PGEN**

FLORIANÓPOLIS, 2025.

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
SANTA CATARINA - CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELETRÔNICA**

Fabio Schmitt Avelino

**Aplicação do protocolo ESP-NOW em antenas diretivas do tipo Yagi-Uda: uma
abordagem para comunicação de longo alcance no sistema PGEN**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro em Eletrônica.

Orientador: Prof. Dr. Luis Carlos
Martinhago Schlichting

FLORIANÓPOLIS, 2025.

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor.

Avelino, Fabio Schmitt

Aplicação do protocolo ESP-NOW em antenas diretivas do tipo Yagi-Uda: uma abordagem para comunicação de longo alcance no sistema PGEN / Fabio Schmitt Avelino; orientação de Luis Carlos Martinhago Schlichting. - Florianópolis, SC, 2025.

70 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis. Bacharelado em Engenharia Eletrônica. Departamento Acadêmico de Eletrônica.

Inclui Referências.

1. ESP-NOW. 2. Yagi-Uda. 3. Comunicação longo alcance. 4. VNA. 5. Sistema PGEN. I. Schlichting, Luis Carlos Martinhago. II. Instituto Federal de Santa Catarina. III. Aplicação do protocolo ESP-NOW em antenas diretivas do tipo Yagi-Uda.

Aplicação do protocolo ESP-NOW em antenas diretivas do tipo Yagi-Uda: uma abordagem para comunicação de longo alcance no sistema PGEN

FABIO SCHMITT AVELINO

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro em Eletrônica e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso Engenharia Eletrônica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Florianópolis, 19 de dezembro 2025.

Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **LUIS CARLOS MARTINHAGO SCHLICHTING**
Data: 21/12/2025 18:27:45-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Luis Carlos Martinhago Schlichting, Dr.
Instituto Federal de Santa Catarina

Documento assinado digitalmente
 **MARIA CLAUDIA DE ALMEIDA CASTRO**
Data: 22/12/2025 12:03:33-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Maria Cláudia de Almeida Castro, Dr.
Instituto Federal de Santa Catarina

Documento assinado digitalmente
 **RAFAEL NILSON RODRIGUES**
Data: 21/12/2025 20:21:48-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Rafael Nilson Rodrigues, Dr.
Instituto Federal de Santa Catarina

Dedico este trabalho a todos que contribuíram, direta ou indiretamente, para que este momento fosse possível.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, pelo amor incondicional, pelo apoio constante e por acreditarem em mim em todos os momentos da minha trajetória. Sem a força e a dedicação de vocês, nenhuma das minhas conquistas teria sido possível.

Ao meu orientador, Dr. Luis Carlos Martinhago Schlichting expresso minha sincera gratidão pela orientação, paciência e incentivo ao longo deste trabalho. Suas contribuições, confiança e disposição em ajudar foram fundamentais para que eu pudesse evoluir e concluir esta etapa com segurança e maturidade acadêmica.

Estendo também meus agradecimentos ao Prof. Dr. Rafael Nilson Rodrigues, que me acolheu no labsmart com o projeto PGEN no qual atuei por alguns anos. Ali encontrei não apenas um espaço de aprendizado técnico, mas também uma oportunidade de crescimento pessoal e profissional. Sua orientação, apoio e dedicação tiveram um impacto profundo na minha formação, e serei sempre grato por ter acreditado no meu potencial e ter me guiado com tanta generosidade.

Agradeço igualmente à banca avaliadora, pela disponibilidade, pela atenção dedicada à leitura deste trabalho e pelas contribuições valiosas que certamente enriqueceram ainda mais este estudo. A participação de vocês é fundamental para meu crescimento acadêmico.

Agradeço, ainda, aos colegas e amigos que fizeram parte dessa jornada, pelos diálogos, pela parceria nas horas difíceis e pela motivação constante. Cada palavra de apoio e cada momento compartilhado tornaram esta caminhada mais leve e significativa.

Por fim, deixo meu agradecimento a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho, seja com palavras de incentivo, colaboração direta ou simplesmente estando presentes. A cada um de vocês, o meu mais sincero muito obrigado.

“Entre fios, cálculos e circuitos, descobre-se que a engenharia também é arte.”
— Autor desconhecido

RESUMO

Este trabalho apresenta o estudo, desenvolvimento e validação de uma alternativa de comunicação sem fio para a expansão do sistema PGEN, voltado ao monitoramento energético em instituições públicas de ensino. Diante das limitações de infraestrutura encontradas em subestações remotas, especialmente em campi agrícolas, investigou-se a aplicação do protocolo ESP-NOW em modo Long Range, utilizando o microcontrolador ESP32-C6 e antenas diretivas Yagi-Uda produzidas em PCB. A metodologia adotada envolveu a caracterização eletromagnética das antenas por meio do analisador vetorial de redes PocketVNA, a implementação de um sistema transmissor-receptor configurado para comunicação ponto a ponto, e a realização de testes experimentais em campo aberto com distâncias variando de 50 m a 1 000 m. As medições incluíram parâmetros como RSSI, taxa de perda de pacotes, sequência de transmissão, ganho das antenas e desempenho global do enlace. Os resultados demonstraram elevada robustez da comunicação até aproximadamente 900 m, com perda nula de pacotes e níveis de RSSI adequados para operação estável. Observou-se, contudo, que fatores ambientais incluindo desníveis do terreno, obstruções parciais e fenômenos de multipercurso influenciaram de maneira significativa o desempenho, levando a perdas abruptas no limite de 1 km, mesmo com RSSI relativamente alto. A análise permite concluir que a solução proposta é tecnicamente viável e representa uma alternativa prática, de fácil implementação para ampliar o alcance do PGEN em cenários com restrições de infraestrutura. O trabalho contribui para o avanço das tecnologias de monitoramento energético e abre possibilidades de expansão do sistema em ambientes rurais e distantes, bem como incentiva investigações futuras voltadas à melhoria da robustez e à adaptação do enlace para diferentes topologias e condições ambientais.

Palavras-chave: ESP-NOW. ESP32-C6. Antena Yagi-Uda. Long Range. Sistema PGEN.

ABSTRACT

This work presents the study, development, and validation of a wireless communication alternative designed to expand the PGEN system, which is used for energy monitoring in public educational institutions. Considering the infrastructure limitations found in remote substations, especially on agricultural campuses, this research investigates the application of the ESP-NOW protocol in Long Range mode, using the ESP32-C6 microcontroller and PCB-based Yagi-Uda directional antennas. The adopted methodology involved the electromagnetic characterization of the antennas using a PocketVNA vector network analyzer, the implementation of a transmitter–receiver system configured for point-to-point communication, and the execution of experimental field tests with distances ranging from 50 m to 1,000 m. Measurements included parameters such as RSSI, packet loss rate, transmission sequence, antenna gain, and overall link performance. The results demonstrated high communication robustness up to approximately 900 m, with zero packet loss and RSSI levels adequate for stable operation. However, environmental factors—including terrain unevenness, partial obstructions, and multipath phenomena—significantly influenced performance, leading to abrupt losses at the 1 km limit, even with relatively high RSSI values. The analysis indicates that the proposed solution is technically feasible and represents a practical and easily deployable alternative for extending PGEN’s reach in scenarios with infrastructure constraints. This work contributes to the advancement of energy monitoring technologies and opens opportunities for system expansion in rural and remote environments, as well as encourages future investigations aimed at improving robustness and adapting the link to different topographies and environmental conditions.

Keywords: ESP-NOW. ESP32-C6. Yagi-Uda antenna. Long Range. PGEN System.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Página Inicial Site PGEN	20
Figura 2 – Página de histórico do Sistema PGEN, ilustrando o Campus Manaus Centro do Instituto Federal do Amazonas, no dia 05 de julho de 2024	21
Figura 3 – Mapa da rede EPCT com dispositivos instalados	22
Figura 4 – Comunicação entre dispositivos ESP-NOW (peer-to-peer).	24
Figura 5 – Periféricos do ESP32-C6.	26
Figura 6 – Configuração da antena Yagi-Uda.	27
Figura 7 – Radiação de uma antena Yagi-Uda.	28
Figura 8 – Layout da antena Yagi-Uda DN034.	29
Figura 9 – DUT.	30
Figura 10 – Pocket VNA.	31
Figura 11 – Software PocketVNA v1.96.	34
Figura 12 – Medições da antena com o Pocket VNA	35
Figura 13 – Suporte com tripé para fixação da antena Yagi-Uda.	36
Figura 14 – Avenida onde os testes foram conduzidos.	37
Figura 15 – Reflexão Medido Antena 1.	40
Figura 16 – Reflexão e Impedância Medido Antena 1.	41
Figura 17 – Reflexão Medido Antena 2.	41
Figura 18 – Reflexão e Impedância Medido Antena 2.	42
Figura 19 – Ganho e magnitude entre as antenas.	43
Figura 20 – Fluxograma funcionamento código TX.	46
Figura 21 – Fluxograma funcionamento código RX.	48
Figura 22 – Transmissor posicionado para teste.	50
Figura 23 – Receptor posicionado para teste.	51
Figura 24 – Relatório final teste 50mts.	51
Figura 25 – Recepção de pacotes pela distância.	53
Figura 26 – RSSI médio pela distância.	54
Figura 27 – Taxa de perda pela distância.	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultados dos testes do ESP-NOW em função da distância.	52
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADC	<i>Analog-to-Digital Converter</i> (Conversor Analógico-Digital)
API	<i>Application Programming Interface</i> (Interface de Programação de Aplicações)
CAD	<i>Computer-Aided Design</i> (Desenho Assistido por Computador)
CCMP	<i>Counter Mode with Cipher Block Chaining Message Authentication Code Protocol</i> (Protocolo Contador com Autenticação de Mensagem em Encadeamento de Blocos de Cifra)
DSSS	<i>Direct-Sequence Spread Spectrum</i> (Sequência Direta de Espalhamento do Espectro)
DUT	<i>Device Under Test</i> (Dispositivo Sob Teste)
GPIO	<i>General-Purpose Input/Output</i> (Entrada/Saída de Uso Geral)
I2C	<i>Inter-Integrated Circuit</i> (Circuito Inter-Integrado)
IOT	<i>Internet of Things</i> (Internet das Coisas)
LOS	Line of Sight
MAC	Media Access Control Address (endereço de Controle de Acesso à Mídia)
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport (Transporte de Telemetria de Enfileiramento de Mensagens)
NVS	Non-Volatile Storage (Armazenamento de Dados não Voláteis)
OFDM	<i>Orthogonal Frequency-Division Multiplexing</i> (Multiplexação Ortogonal por Divisão de Frequência)
PCB	Printed circuit board (Placa de circuito impresso)
PDR	<i>Packet Delivery Ratio</i> (Protocolo de Depuração de Rede)
PGEN	Portal de gerenciamento de energia
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i> (Modulação por Largura de Pulso)
Procel	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
RISC-V	<i>Reduced Instruction Set Computing V</i> (Computação de Conjunto de Instruções Reduzidas)

ROM	<i>Read-Only Memory</i> (Memória Somente de Leitura)
RSSI	Received Signal Strength Indicator (Indicador de Intensidade do Sinal Recebido)
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i> (Interface Periférica Serial)
SRAM	<i>Static Random Access Memory</i> (Memória de Acesso Aleatório Estática)
STA	Station (Estação)
TWT	<i>Target Wake Time</i> (Tempo Alvo de Despertar)
UART	<i>Universal Asynchronous Receiver-Transmitter</i> (Transmissor-Receptor Assíncrono Universal)
VNA	Vector Network Analyzer (Analisador vetorial de redes)
labsmart	Laboratório de redes elétricas inteligentes

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Justificativa	16
1.2	Definição do Problema	16
1.3	Objetivo Geral	17
1.4	Objetivos Específicos	17
1.5	Estrutura do Trabalho	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1	Monitoramento Energético	19
2.1.1	Sistema PGEN	19
2.1.2	Dispositivo de monitoramento de energia elétrica	22
2.2	Comunicação de Dados em Ambientes Remotos	22
2.2.1	Desafios de conectividade em áreas rurais	23
2.2.2	Fibra Óptica vs Tecnologias sem fio	23
2.2.3	Solução alternativa de fácil implementação	23
2.3	Protocolo ESP-NOW	24
2.3.1	Funcionamento do Protocolo	24
2.3.2	Frequência de Operação	24
2.3.3	Segurança	25
2.3.4	Modulação	25
2.3.5	Eficiência em Ambientes de Longa Distância	25
2.4	Microcontrolador ESP32-C6	25
2.4.1	Rádio e Comunicação sem Fio	26
2.4.2	Consumo Energético e Modos de Sono	26
2.4.3	Modulação e Capacidades de Comunicação	26
2.5	Antenas Yagi-Uda em PCB	27
2.5.1	Princípio de funcionamento das antenas Yagi-Uda	27
2.5.1.1	<i>Diretividade, ganho, elementos parasitas</i>	28
2.5.2	Vantagem em fabricar em PCB	28
2.5.2.1	<i>Replicabilidade</i>	29
2.5.2.2	<i>Integração com Sistemas Embarcados</i>	29
2.6	VNA	30
2.6.1	Pocket VNA	31
3	METODOLOGIA	32
3.1	Motivação do hardware e protocolo de comunicação	32
3.2	Materiais e equipamentos utilizados	32
3.3	Configuração do sistema de comunicação	33
3.3.1	Estrutura do protocolo ESP-NOW	33
3.3.2	Ativação do modo Long Range	33
3.4	Caracterização das antenas Yagi-Uda	34
3.5	Procedimentos experimentais	35
3.6	Tratamento e análise dos dados	38
3.7	Justificativa dos parâmetros de medição.	38
4	APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	39
4.1	Caracterização das antenas utilizando o Pocket VNA	39
4.1.1	Antena 1	40

4.1.2	Antena 2	41
4.1.3	Ganho entre antenas	42
4.1.4	Comparação com a especificação declarada da antena	43
4.2	Implementação do Protocolo ESP-NOW no ESP32-C6	44
4.2.1	Estrutura Geral do Sistema	44
4.2.1.1	<i>Transmissor</i>	45
4.2.1.2	<i>Receptor</i>	47
4.3	Testes em campo	49
4.4	Análise e discussão dos resultados	52
4.4.1	Distância	53
4.4.2	RSSI médio	54
4.4.3	Taxa de perda	55
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	57
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	57
	REFERÊNCIAS	59
	ANEXOS	62
	ANEXO A – CÓDIGO-FONTE ESP-NOW TRANSMISSOR (TX)	63
	ANEXO B – CÓDIGO-FONTE ESP-NOW RECEPTOR (RX)	66

1 INTRODUÇÃO

O crescimento da demanda por soluções eficientes de monitoramento energético tem impulsionado o desenvolvimento de tecnologias capazes de coletar, transmitir e analisar dados de consumo de forma precisa e acessível. Nesse contexto, destaca-se o PGEN – Portal de Gerenciamento de Energia nos Institutos Federais, um sistema desenvolvido pelo laboratório labsmart e adotado nos últimos anos pela Rede Federal de Educação Profissional, Científica e Tecnológica (MASSUYAMA, 2024).

O PGEN consiste em uma plataforma integrada de monitoramento energético, composta por dispositivos de aquisição de dados instalados dentro de subestações e por um ambiente digital de armazenamento, visualização e análise das informações de consumo. Esses dados permitem o acompanhamento em tempo real da demanda energética, a identificação de desperdícios e o apoio à tomada de decisão para o uso racional da energia elétrica nas instituições. Atualmente, o sistema já conta com 217 unidades instaladas em diferentes campi da rede federal, evidenciando sua relevância e potencial de expansão.

Apesar dos benefícios proporcionados pelo PGEN, sua implantação em ambientes remotos, como subestações localizadas em campi agrícolas ou áreas afastadas dos centros administrativos, enfrenta desafios significativos relacionados à infraestrutura de rede e à conectividade. Em muitos desses cenários, a ausência de enlaces de comunicação adequados compromete a viabilidade da instalação do dispositivo.

A utilização de redes cabeadas, como a fibra óptica, embora ofereça alta confiabilidade e desempenho, apresenta custos elevados de implantação e manutenção, além de demandar logística complexa, o que limita a escalabilidade do PGEN em determinadas unidades. Diante dessa realidade, torna-se essencial investigar alternativas de comunicação sem fio que sejam de fácil implementação, baixo custo e capazes de oferecer desempenho satisfatório em longas distâncias.

Nesse contexto, o protocolo ESP-NOW, operando em modo long range, apresenta-se como uma solução promissora, por possibilitar comunicação direta entre dispositivos com baixa latência, consumo energético reduzido e sem a necessidade de infraestrutura de rede tradicional (ESPRESSIF, 2025b). Quando aliado ao uso de antenas diretivas do tipo Yagi-Uda, projetadas e fabricadas em placas de circuito impresso (PCB), o sistema de comunicação pode alcançar maiores distâncias e melhor imunidade a interferências, características essenciais para ambientes com obstáculos físicos e grandes áreas abertas.

A pesquisa contempla desde a revisão teórica dos componentes envolvidos até a implementação e análise de testes experimentais, buscando contribuir com

uma alternativa acessível para o avanço do monitoramento energético em instituições públicas de ensino.

1.1 Justificativa

O avanço das tecnologias de monitoramento energético tem possibilitado maior controle e eficiência no uso de recursos elétricos. Nesse contexto, o laboratório labsmart desenvolveu o PGEN, um dispositivo voltado à coleta e disponibilização de dados de consumo de energia em plataformas digitais, auxiliando no gerenciamento e na tomada de decisão quanto ao uso racional da eletricidade. Entretanto, a etapa de instalação desse dispositivo apresenta limitações significativas, devido as dificuldades de infraestrutura de prédios dos Institutos Federais de Educação (MASSUYAMA, 2024).

O elevado custo de implantação de infraestrutura de rede baseada em fibra óptica, aliado à necessidade de pontos de energia e de conectividade para viabilizar o funcionamento do PGEN, dificulta a expansão do projeto PGEN e limita a acessibilidade da solução (MASSUYAMA, 2024). Nesse cenário, torna-se relevante a busca por alternativas de comunicação sem fio que sejam de fácil implementação e que garantam desempenho adequado em longas distâncias.

Dessa forma, a utilização do protocolo ESP-NOW em conjunto com antenas diretivas do tipo Yagi-Uda, projetadas em placas de circuito impresso (PCB), apresenta-se como uma alternativa viável. As antenas Yagi-Uda oferecem ganho direcional significativo e podem ser fabricadas a baixo custo, enquanto o protocolo ESP-NOW, quando operado em modo long range, permite a transmissão de dados com baixa latência e sem a necessidade de infraestrutura complexa. O presente trabalho justifica-se, portanto, pela necessidade de investigar a aplicabilidade dessa solução como alternativa prática e econômica para o monitoramento energético em ambientes com restrições de infraestrutura.

1.2 Definição do Problema

A instalação do PGEN em subestações enfrenta dificuldades relacionadas à necessidade de pontos de energia e de conectividade via fibra óptica. Em campus agrícolas, essa limitação é ainda mais evidente, devido às grandes distâncias entre as subestações e os prédios que dispõem de infraestrutura de rede. A utilização de fibra óptica, embora eficiente, apresenta custos elevados, inviabilizando a expansão em larga escala do sistema.

Diante desse cenário, é possível desenvolver alternativas viáveis e com bom desempenho em longas distâncias para garantir a comunicação eficiente entre os dispositivos de monitoramento energético?

1.3 Objetivo Geral

Realizar o estudo e a aplicação de uma alternativa viável para comunicação em longas distâncias usando o protocolo ESP-NOW no modo long range, utilizando o microcontrolador ESP32-C6 em conjunto com antenas diretivas do tipo Yagi-Uda projetadas em PCB.

1.4 Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo geral apresentado, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- a) revisar bibliografia referente ao o protocolo ESP-NOW;
- b) revisar bibliografia referente ao funcionamento das antenas diretivas Yagi-Uda;
- c) implementar e configurar o protocolo ESP-NOW no ESP32-C6;
- d) conduzir testes em antena comercial;
- e) analisar os resultados obtidos;
- f) avaliar a viabilidade prática da solução proposta.

1.5 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está organizado em cinco capítulos, dispostos de forma a conduzir o leitor desde a contextualização do tema até a apresentação das conclusões obtidas.

No primeiro capítulo, apresenta-se a introdução ao tema da pesquisa, trazendo a contextualização do problema, sua justificativa e a formulação dos objetivos gerais e específicos que orientam o desenvolvimento do estudo.

O segundo capítulo reúne os fundamentos teóricos necessários para a compreensão da pesquisa. São abordados conceitos relacionados ao protocolo ESP-NOW, em especial no modo long range, e ao funcionamento das antenas diretivas do tipo Yagi-Uda, com destaque para sua implementação em placas de circuito impresso (PCB), o uso do pocket VNA para teste da antena. Esse referencial teórico tem o papel de embasar metodologicamente as etapas práticas do trabalho.

No terceiro capítulo, descreve-se a metodologia adotada, detalhando os materiais, ferramentas e procedimentos utilizados. São apresentadas as etapas de implementação do protocolo ESP-NOW no microcontrolador ESP32-C6, bem como os critérios estabelecidos para os testes experimentais, contemplando a utilização de antenas comerciais Yagi-Uda feitas em PCB.

O quarto capítulo apresenta os resultados obtidos nos experimentos, seguidos de análises e discussões. Os dados coletados são comparados e interpretados, de modo a avaliar o desempenho da solução proposta em termos de alcance, intensidade do sinal, estabilidade da comunicação e eficiência da transmissão de dados.

Por fim, o quinto capítulo é dedicado às conclusões e considerações finais. Nele, são sintetizados os principais achados da pesquisa, destacando-se a contribuição do trabalho para a área de monitoramento energético e propondo possibilidades de continuidade por meio de trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são apresentados os conceitos e fundamentos que sustentam o desenvolvimento deste trabalho. São discutidos aspectos relacionados ao monitoramento energético e ao Sistema PGEN, bem como os desafios de comunicação em ambientes remotos e as tecnologias que buscam suprir essas limitações.

Também são abordados o funcionamento do protocolo ESP-NOW e as características do microcontrolador ESP32-C6, destacando suas vantagens em aplicações de baixo consumo e baixa latência. Além disso, são explorados os princípios de operação das antenas Yagi-Uda e o uso do Pocket VNA como instrumento de validação experimental.

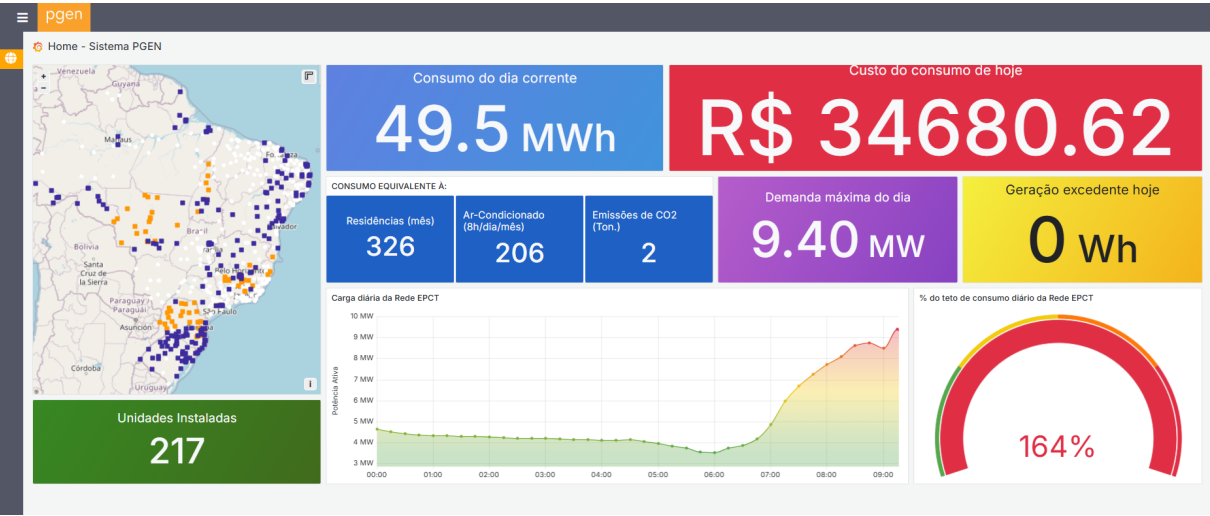
2.1 Monitoramento Energético

O monitoramento energético tem papel central na busca por eficiência no uso de recursos em ambientes institucionais e industriais. Segundo (MASSUYAMA, 2024), o acompanhamento em tempo real do consumo de energia permite identificar padrões de uso, detectar desperdícios e implementar estratégias de otimização. Além disso, o monitoramento contínuo auxilia na elaboração de políticas de sustentabilidade e na redução de custos operacionais, contribuindo para uma gestão mais racional da infraestrutura elétrica.

2.1.1 Sistema PGEN

Além de sua arquitetura distribuída, o PGEN caracteriza-se por sua ampla abrangência institucional e alinhamento com políticas públicas de eficiência energética. O projeto é financiado pelo Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL), coordenado pelo Ministério de Minas e Energia, e executado pela Empresa Brasileira de Participações em Energia Nuclear e Binacional (ENBPar), o que reforça seu caráter estratégico no contexto da administração pública federal. O objetivo central do sistema é reunir, em uma única plataforma, dados de consumo energético em tempo real, conforme demonstrado pela Figura 1 permitindo diagnósticos precisos e a implementação de ações assertivas voltadas à redução de desperdícios e à melhoria da eficiência energética (MASSUYAMA, 2024).

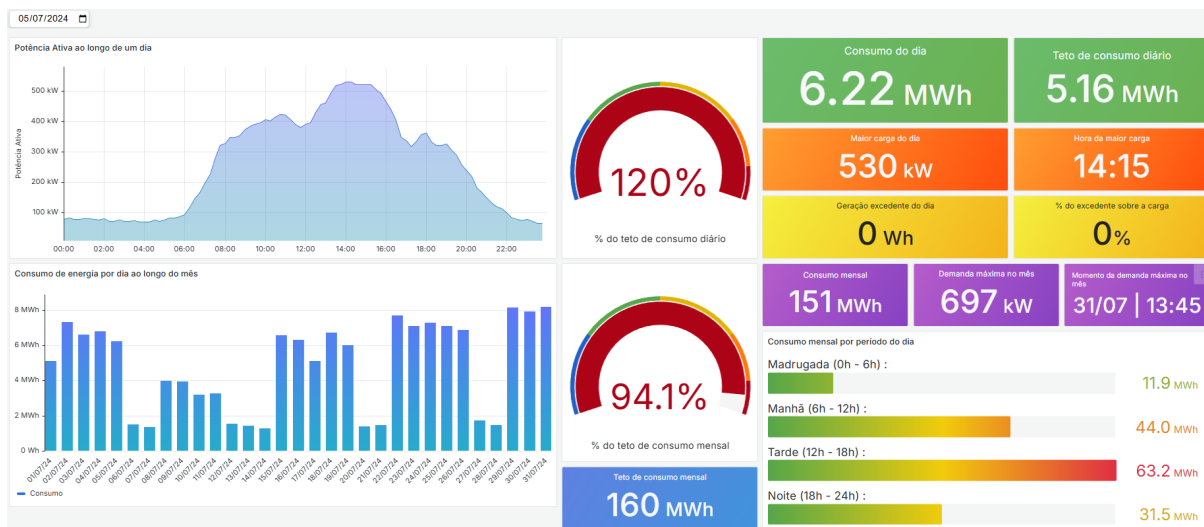
Figura 1 – Página Inicial Site PGEN



Fonte: Adaptado de Massuyama (2024).

O PGEN disponibiliza informações detalhadas de consumo, como curvas de carga horárias, consumo diário e mensal, histórico energético e indicadores de desempenho, a Figura 2 demonstra a página de histórico do Sistema PGEN, ilustrando o Campus Manaus Centro do Instituto Federal do Amazonas, no dia 05 de julho de 2024. Esses recursos permitem identificar picos de demanda, cargas predominantes e padrões de uso ao longo do tempo, possibilitando que gestores avaliem o impacto de intervenções operacionais sem a necessidade de investimentos imediatos em infraestrutura. Dessa forma, o sistema atua como uma ferramenta de apoio contínuo à gestão energética, alinhada aos princípios estabelecidos pela norma ISO 50001 para sistemas de gestão de energia (MASSUYAMA, 2024).

Figura 2 – Página de histórico do Sistema PGEN, ilustrando o Campus Manaus Centro do Instituto Federal do Amazonas, no dia 05 de julho de 2024



Fonte: Adaptado de Massuyama (2024).

Outro aspecto relevante do PGEN é a transparência das informações disponibilizadas. O acesso público aos dados de consumo energético das instituições, cujos custos são mantidos com recursos públicos, fortalece a prestação de contas à sociedade e incentiva práticas responsáveis de uso da energia elétrica. Paralelamente, o envolvimento de estudantes no uso do sistema promove aprendizado prático e conscientização quanto ao uso racional da energia, ampliando o impacto do PGEN para além da esfera administrativa e consolidando seu papel educacional (MASSUYAMA, 2024).

No que se refere à sua implementação em larga escala, o projeto PGEN encontra-se em expansão contínua desde 2022. Até o momento, mais de uma centena de unidades já foram instaladas em diferentes Institutos Federais, distribuídos por diversas regiões do país, conforme demonstrado pela Figura 3, onde os pontos na cor azul são os dispositivos instalados e os pontos na cor laranja os dispositivos com instalação programada, com a meta de alcançar a totalidade das cerca de 670 unidades da Rede EPCT. Essa ampla distribuição geográfica evidencia a diversidade de cenários de implantação, incluindo campi urbanos, rurais e agrícolas, cada qual com desafios específicos relacionados à infraestrutura elétrica e de comunicação (MASSUYAMA, 2024).

Figura 3 – Mapa da rede EPCT com dispositivos instalados

Fonte: Adaptado de Massuyama (2024).

2.1.2 Dispositivo de monitoramento de energia elétrica

No estudo de (JUNIOR *et al.*, 2023), é apresentado o desenvolvimento de um dispositivo inteligente portátil voltado para o monitoramento de energia elétrica. Os autores destacam que a utilização da lógica fuzzy na tomada de decisão permite uma otimização eficiente da gestão energética, especialmente no contexto da Indústria 4.0, em que a automação e a análise de dados em tempo real são essenciais para reduzir desperdícios e aumentar a eficiência operacional.

A pesquisa evidencia a importância da integração entre dispositivos físicos e plataformas digitais no gerenciamento do consumo energético, contribuindo para a evolução de sistemas de monitoramento mais precisos e inteligentes (JUNIOR *et al.*, 2023).

2.2 Comunicação de Dados em Ambientes Remotos

A lacuna digital entre zonas urbanas e rurais no Brasil permanece significativa: enquanto áreas urbanas apresentam penetração de internet em torno de 65%, nas áreas rurais esse valor cai para aproximadamente 34% (CAVALCANTE *et al.*, 2021). Esse cenário evidencia que novas tecnologias de conectividade, embora estejam em implantação nos centros urbanos, ainda enfrentam entraves para alcançar

regiões remotas caracterizadas por baixa densidade populacional, grandes distâncias e menor retorno econômico para os provedores.

Dessa forma, torna-se fundamental investigar modelos de negócio e arquiteturas de rede adaptadas a essas condições para viabilizar o acesso à banda larga em locais de difícil conectividade (CAVALCANTE *et al.*, 2021).

2.2.1 Desafios de conectividade em áreas rurais

A expansão da infraestrutura de fibra óptica em áreas rurais enfrenta desafios estruturais, econômicos e regulatórios significativos. Segundo (SANTOS, 2022), a baixa densidade populacional nessas regiões eleva substancialmente o custo por usuário, uma vez que os pontos de acesso estão muito distantes entre si, exigindo maior investimento em cabos, postes e equipamentos de transmissão. Além disso, fatores geográficos e logísticos como terrenos acidentados, longas distâncias até os backbones urbanos e dificuldades de acesso agravam os custos de instalação e manutenção da rede.

O autor também destaca que barreiras burocráticas e financeiras afetam diretamente a viabilidade de novos projetos: a obtenção de autorizações, a passagem por propriedades privadas e as variações nas exigências legais entre municípios criam entraves adicionais, sobretudo para provedores de pequeno porte com menor capacidade de investimento (SANTOS, 2022).

2.2.2 Fibra Óptica vs Tecnologias sem fio

Segundo (SILVA *et al.*, 2021), o estudo destaca que a tecnologia de fibra óptica pode oferecer alta performance e ser uma alternativa eficaz em áreas rurais, desde que próximas ao perímetro urbano, pois sua instalação requer cabeamento até os pontos de consumo, o que encarece ou inviabiliza sua aplicação em localidades muito remotas ou isoladas.

Em contraste, para regiões distantes onde a fibra não chega, o relatório sugere que soluções sem fio satélite, telecomunicações móveis (2G a 5G) e uso de espectro de baixa frequência *white spaces* são mais viáveis para expandir cobertura de conectividade, podendo alcançar comunidades rurais dispersas sem a necessidade de infraestrutura física extensa (SILVA *et al.*, 2021).

2.2.3 Solução alternativa de fácil implementação

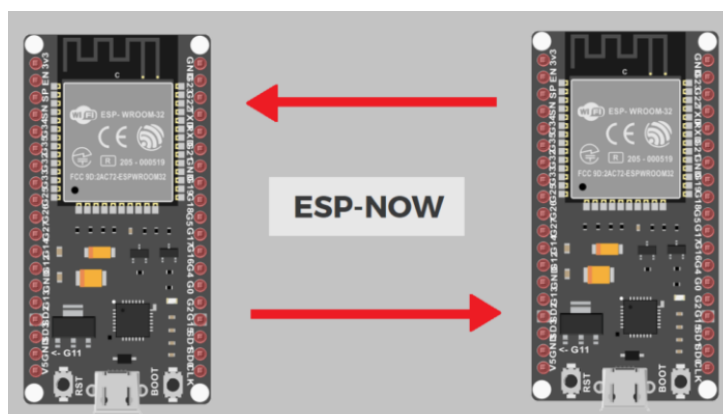
Segundo (KHAN *et al.*, 2020) antenas compactas de baixo custo, integradas diretamente em dispositivos, permitem a implementação rápida de redes de comunicação de dados em áreas afastadas, garantindo cobertura eficiente sem exigir infraestrutura complexa.

(SILVA *et al.*, 2021) enfatizam que a cobertura de internet no meio rural brasileiro é limitada e que soluções que não dependam de grandes investimentos em infraestrutura física são essenciais para ampliar o acesso à conectividade.

2.3 Protocolo ESP-NOW

O ESP-NOW é um protocolo de comunicação sem fio desenvolvido pela Espressif Systems, projetado para dispositivos da Internet das Coisas (IoT) que utilizam os SoCs *System on Chip* da empresa, como o ESP32 e o ESP8266. Este protocolo permite a comunicação direta entre dispositivos sem a necessidade de um ponto de acesso ou roteador, demonstrado pela Figura 4 caracterizando-se como uma solução de comunicação ponto a ponto (peer-to-peer) sem conexão (ESPRESSIF, 2022).

Figura 4 – Comunicação entre dispositivos ESP-NOW (peer-to-peer).



Fonte: Adaptado de (ENGINEERSGARAGE, 2024).

2.3.1 Funcionamento do Protocolo

Entre suas principais propriedades destacam-se a baixa latência, a possibilidade de comunicação em modo *unicast* ou *broadcast*, e o suporte a mensagens com carga útil de até 250 bytes. Além disso, o protocolo permite a inclusão de criptografia nas transmissões e a conexão simultânea com múltiplos pares, ainda que com limitações quanto ao número de dispositivos criptografados suportados (ESPRESSIF, 2022).

2.3.2 Frequência de Operação

O ESP-NOW opera na faixa de frequência de 2,4 GHz, que é a mesma utilizada pelo padrão Wi-Fi. Essa escolha permite que o protocolo aproveite as características de propagação e alcance típicas dessa faixa de frequência, facilitando a integração com dispositivos que utilizam Wi-Fi e Bluetooth (ESPRESSIF, 2022).

2.3.3 Segurança

A segurança no ESP-NOW é implementada por meio de criptografia, utilizando o protocolo CTR com CBC-MAC (CCMP). Essa abordagem assegura que os dados transmitidos entre os dispositivos sejam protegidos contra interceptações e acessos não autorizados, mantendo a integridade e confidencialidade das informações (ESPRESSIF, 2022).

2.3.4 Modulação

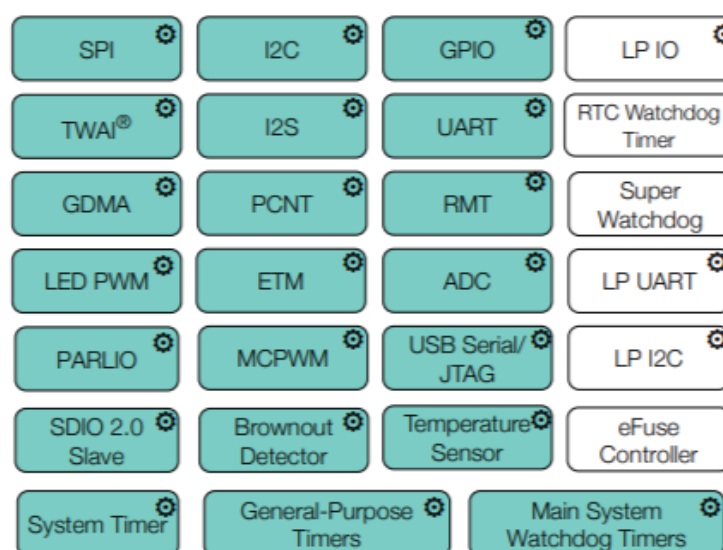
O protocolo ESP-NOW utiliza modulação DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) para a transmissão de dados. A modulação DSSS é uma técnica que espalha o sinal de dados sobre uma largura de banda maior, o que ajuda a reduzir a interferência e melhora a resistência do sinal a ruídos, características importantes para aplicações em ambientes com múltiplos dispositivos sem fio (ESPRESSIF, 2022).

2.3.5 Eficiência em Ambientes de Longa Distância

O desempenho do ESP-NOW em longas distâncias pode variar dependendo de diversos fatores, como obstáculos físicos, interferências e configurações dos dispositivos. Estudos experimentais realizados por (URAZAYEV *et al.*, 2023) avaliaram o desempenho do ESP-NOW em ambientes internos, utilizando dispositivos comuns disponíveis no mercado. Os resultados mostraram que fatores ambientais, como reflexões e obstáculos físicos, afetam significativamente o desempenho geral do protocolo. No entanto, mesmo diante dessas condições, o ESP-NOW apresentou uma melhoria de 15% no alcance interno em termos de taxa de entrega de pacotes (Packet Delivery Ratio - PDR) e uma redução superior a 30% no consumo de energia, em comparação com abordagens tradicionais baseadas em Wi-Fi.

2.4 Microcontrolador ESP32-C6

O ESP32-C6 é um microcontrolador de última geração da Espressif Systems, baseado em um núcleo RISC-V de 32 bits, operando até 160 MHz. Ele integra 512 KB de SRAM, 384 KB de ROM e suporte a flash externa de até 4 MB, além de incluir aceleradores criptográficos dedicados, o que o torna adequado para aplicações que exigem segurança na comunicação. Entre os periféricos disponíveis estão GPIOs configuráveis, ADCs, interfaces SPI, I2C, UART, I2S e PWM, demonstrados pela Figura 5 ampliando sua capacidade de integração com sensores, atuadores e outros módulos de hardware. Essas características posicionam o ESP32-C6 como um dispositivo versátil para aplicações em sistemas embarcados e IoT (ESPRESSIF, 2025d).

Figura 5 – Periféricos do ESP32-C6.

Fonte: Adaptado de (ESPRESSIF, 2025c).

2.4.1 Rádio e Comunicação sem Fio

Um dos principais diferenciais do ESP32-C6 é o suporte a múltiplos padrões de comunicação sem fio. Ele opera com Wi-Fi 6 (802.11 b/g/n/ax) na faixa de 2,4 GHz, oferecendo maior eficiência espectral, menor latência e melhor desempenho em cenários de alta densidade de dispositivos. Além disso, o microcontrolador é compatível com *Bluetooth* 5 (Low Energy) e protocolos baseados em IEEE 802.15.4, como Thread e Zigbee, permitindo aplicações em redes mesh de IoT. Essa diversidade de protocolos o torna uma solução adequada tanto para aplicações domésticas quanto para sistemas industriais de monitoramento e automação (ESPRESSIF, 2025c).

2.4.2 Consumo Energético e Modos de Sono

O consumo energético é um aspecto central no design do ESP32-C6. No modo ativo, com Wi-Fi em operação, o consumo típico situa-se entre 80 mA e 120 mA. Entretanto, quando configurado em modos de baixo consumo, como o Light Sleep e o Deep Sleep, a corrente pode ser reduzida para a faixa de 15 μ A, chegando a menos de 10 μ A no modo de sono profundo. Essa flexibilidade permite que o dispositivo seja utilizado em sistemas alimentados por bateria, mantendo um equilíbrio entre desempenho e autonomia. Os modos de sono podem ser configurados pelo desenvolvedor através da API do ESP-IDF, o que garante maior controle sobre a gestão de energia (ESPRESSIF, 2025d); (ESPRESSIF, 2025a).

2.4.3 Modulação e Capacidades de Comunicação

O ESP32-C6 utiliza OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) e DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) para transmissão sem fio, de acordo com

os padrões IEEE 802.11. Essas técnicas de modulação permitem maior robustez contra interferências e melhor aproveitamento da largura de banda disponível. O suporte ao Wi-Fi 6 também garante maior eficiência energética na comunicação, por meio de recursos como Target Wake Time (TWT), que organiza os intervalos de transmissão e recepção de dados, reduzindo o consumo em aplicações de longo prazo (ESPRESSIF, 2025d).

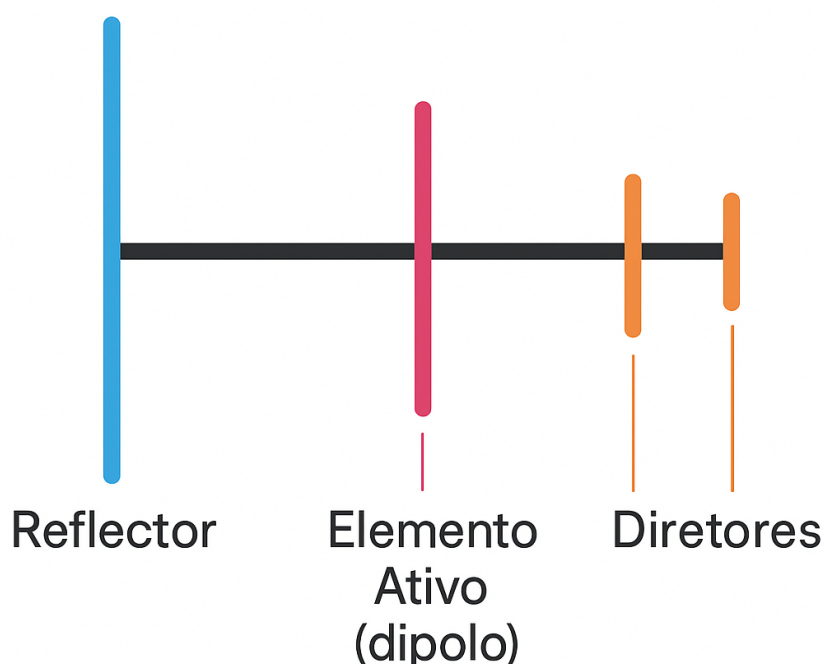
2.5 Antenas Yagi-Uda em PCB

As antenas Yagi-Uda são amplamente utilizadas em sistemas de comunicação sem fio devido à sua alta diretividade e ganho, características fundamentais para enlaces de longa distância e redução de interferência. Desenvolvida por Hidet Sugu Yagi e Shintaro Uda em 1926, essa antena consiste em um elemento ativo (dipolo excitado), um refletor e um ou mais diretores, dispostos linearmente sobre um mesmo eixo (BALANIS, 2005).

2.5.1 Princípio de funcionamento das antenas Yagi-Uda

O princípio de funcionamento baseia-se na interação eletromagnética entre os elementos. O refletor, posicionado atrás do elemento ativo, reflete parte da energia irradiada, reforçando a radiação para frente, enquanto os diretores, posicionados à frente, canalizam e concentram o feixe principal, aumentando o ganho e a diretividade da antena (STUTZMAN; THIELE, 2017), conforme demonstrado pela Figura 6.

Figura 6 – Configuração da antena Yagi-Uda.



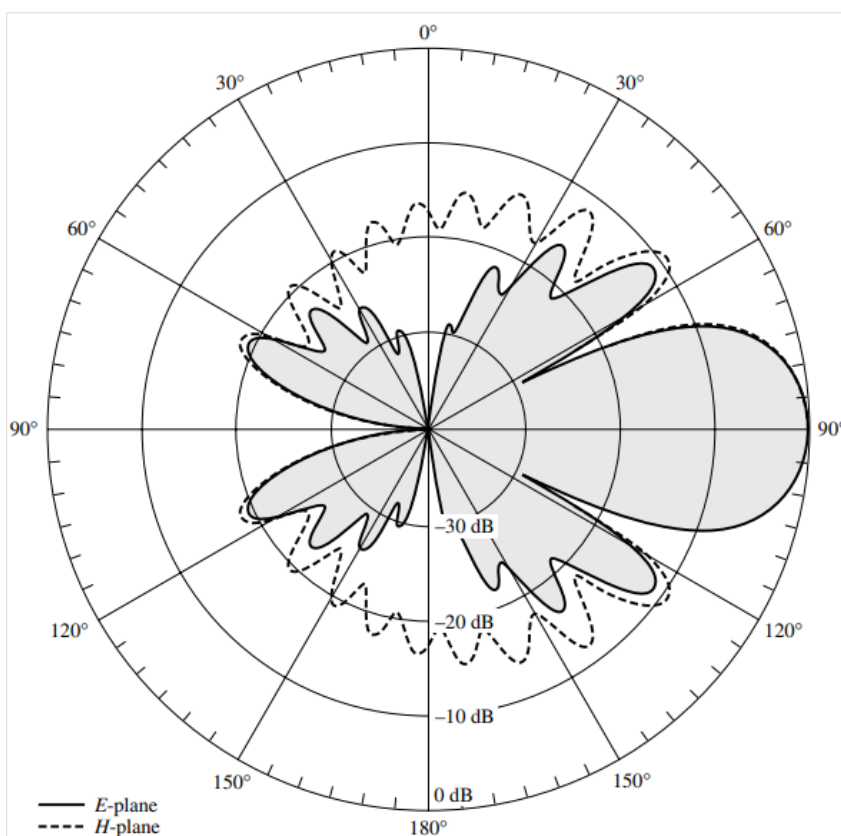
Fonte: Autoria Própria (2025).

2.5.1.1 Diretividade, ganho, elementos parasitas

A diretividade (D) é uma medida da capacidade da antena de concentrar energia em uma direção específica. Já o ganho (G) combina a diretividade com a eficiência do sistema, representando o aumento da potência radiada em comparação a uma antena isotrópica (BALANIS, 2005).

Os elementos parasitas (refletor e diretores) não são alimentados diretamente, mas induzem correntes por acoplamento eletromagnético. O refletor, ligeiramente mais longo que o dipolo ativo, produz uma corrente defasada que reforça a radiação para frente, enquanto os diretores, mais curtos, geram correntes em fase, estreitando o lóbulo principal conforme Figura 7, o aumento no número de diretores eleva o ganho, mas também aumenta o comprimento total da antena (STUTZMAN; THIELE, 2017).

Figura 7 – Radiação de uma antena Yagi-Uda.



Fonte: Adaptado de BALANIS (2005).

2.5.2 Vantagem em fabricar em PCB

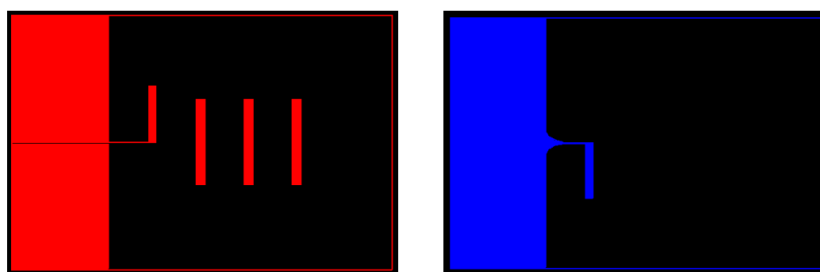
Segundo Agrawal, Lele e Deshmukh (2015), “podemos utilizar técnicas de circuitos impressos para gravar as antenas em substratos flexíveis, a fim de produzir antenas de baixo custo e com boa repetibilidade em um perfil reduzido”, destacando que o processo de gravação em substrato impresso torna as antenas mais baratas e

facilmente reproduzíveis, mantendo dimensões compactas (AGRAWAL; LELE; DESHMUKH, 2015).

2.5.2.1 Replicabilidade

Além do custo, outro benefício relevante é a facilidade de replicação do projeto em ferramentas CAD, como observado pela Texas Instruments (2010) em sua nota de aplicação DN034. O documento descreve que “uma abordagem para implementar a antena em uma ferramenta CAD de PCB e importar o layout da antena a partir de um arquivo Gerber para produção em escala”, reforçando que a reprodução do layout demonstrado na Figura 8 permite manter a precisão e o desempenho entre os protótipos (INSTRUMENTS, 2010).

Figura 8 – Layout da antena Yagi-Uda DN034.



Fonte: Adaptado de (INSTRUMENTS, 2010).

2.5.2.2 Integração com Sistemas Embarcados

A integração física e elétrica também é apontada como uma vantagem significativa. No trabalho de Wu et al. (2021), observa-se que o uso de substratos dielétricos permite o suporte mecânico e a “integrabilidade em chip com circuitos de alimentação planares”, ou seja, a integração direta com circuitos de alimentação planares presentes em sistemas embarcados, resultando em uma “fabricação facilitada” (WU et al., 2021).

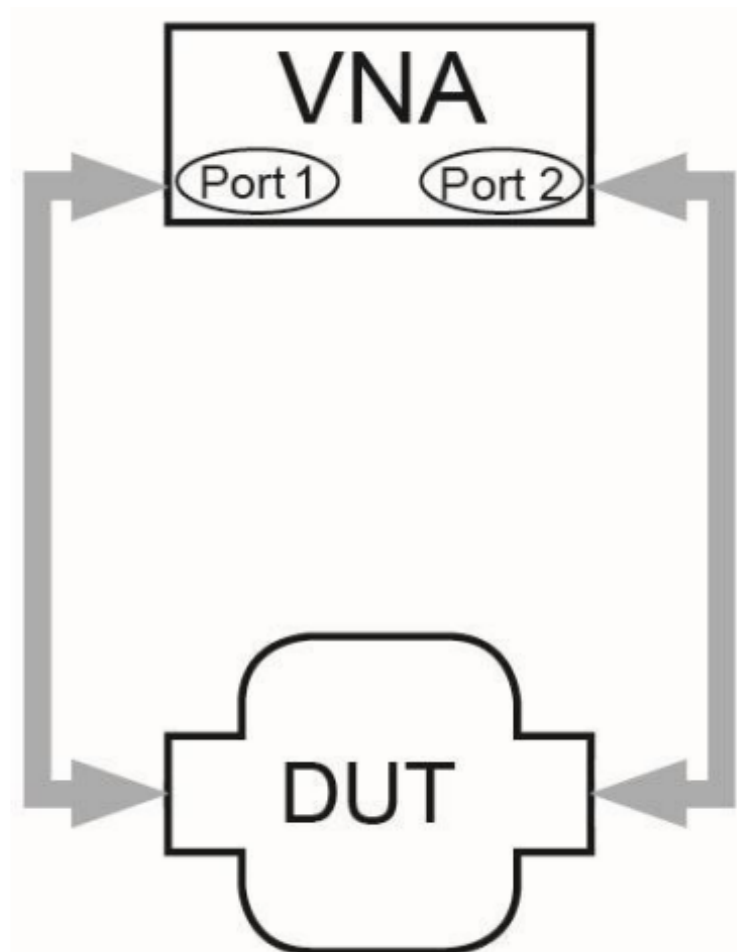
Ramos et al. (2018) reforçam essa visão ao afirmar que “as antenas Yagi-Uda combinam alto ganho com baixo custo e tamanho reduzido, podendo resultar em antenas compactas e eficientes para uso em sensores de IoT”, o que evidencia a aplicabilidade dessas antenas impressas em dispositivos inteligentes de baixo custo e alta eficiência (RAMOS; VARUM; MATOS, 2018).

Ozturk, Nahar e Sertel (2025) apresentam uma abordagem moderna baseada em PCB multicamadas, destacando que “uma antena Yagi-Uda alimentada diferencialmente ... fabricada em uma placa de circuito impresso (PCB) de 10 camadas ... permite um formato compacto”, comprovando que o uso de múltiplas camadas possibilita minimizar o volume físico e integrar os elementos condutores ao próprio empilhamento da placa (OZTURK; NAHAR; SERTEL, 2025).

2.6 VNA

O Analisador Vetorial de Redes (Vector Network Analyzer - VNA) é um instrumento amplamente utilizado em engenharia de radiofrequência (RF) e micro-ondas, sendo essencial para a caracterização de dispositivos como antenas, filtros, cabos e amplificadores. Seu princípio de funcionamento baseia-se na medição das ondas transmitidas e refletidas em um dispositivo sob teste (Device Under Test – DUT) demonstrado pela Figura 9, permitindo a análise completa do comportamento do sistema em termos de amplitude e fase (POOLE, 2024).

Figura 9 – DUT.



Fonte: Adaptado de (THILAGAM *et al.*, 2022).

O funcionamento básico de um VNA envolve um gerador de sinal de varredura *sweep generator* que aplica uma excitação de frequência variável ao DUT, enquanto detectores internos medem as ondas incidentes, refletidas e transmitidas. Com base nessas medições, o equipamento calcula os chamados parâmetros de espalhamento (S-parâmetros), como S11 (coeficiente de reflexão) e S21 (coeficiente de transmissão), que descrevem matematicamente o comportamento do dispositivo em

função da frequência (THILAGAM *et al.*, 2022).

2.6.1 Pocket VNA

O Pocket VNA apresentado pela Figura 10 é um analisador vetorial de redes portátil que permite medições de parâmetros de redes (como S-parâmetros) com tamanho reduzido, interface via USB e compatibilidade com múltiplos sistemas operacionais. O dispositivo oferece faixa de operação de 500 kHz a 4 GHz, medição bidirecional dos parâmetros S11, S21, S12, S22, magnitude e fase, e capacidade de variação de impedância entre aproximadamente 3 e 1000 Ohms (NIRSCHL, 2017).

Segundo (YOUSIF, 2021) é possível utilizar o software do dispositivo para aquisição dos dados, além de visualizar graficamente os resultados obtidos e exportar os dados em formato CSV ou .xls para uso em outro software gráfico.

Figura 10 – Pocket VNA.



Fonte: Autoria própria (2025).

3 METODOLOGIA

O presente trabalho caracteriza-se como uma pesquisa experimental e aplicada, uma vez que envolve o desenvolvimento, a implementação e a validação prática de um sistema de comunicação sem fio baseado no protocolo ESP-NOW, utilizando o microcontrolador ESP32-C6 e antenas Yagi-Uda projetadas em placas de circuito impresso (PCB).

O caráter experimental está na realização de testes controlados de comunicação, enquanto o aspecto aplicado refere-se à proposta de uma solução prática para a expansão do sistema PGEN em ambientes com restrições de infraestrutura.

3.1 Motivação do hardware e protocolo de comunicação

A escolha do microcontrolador ESP32-C6 e do protocolo ESP-NOW justifica-se por um conjunto de características técnicas alinhadas aos requisitos do Sistema PGEN. O ESP32-C6 destaca-se por ser um microcontrolador de baixo custo e baixo consumo energético, amplamente disponível no mercado e já dotado de módulo Wi-Fi integrado, o que elimina a necessidade de acoplamento de módulos externos de comunicação. Essa integração permite a utilização do protocolo ESP-NOW de forma nativa, simplificando o hardware, reduzindo custos e aumentando a confiabilidade do sistema.

Além disso, o ESP32 possui conector dedicado para antena externa, facilitando a utilização de antenas diretivas e possibilitando a adaptação do enlace de comunicação conforme o cenário de implantação. O protocolo ESP-NOW, por sua vez, permite comunicação direta em modo broadcast, com baixa latência e sem a necessidade de infraestrutura de rede convencional, sendo adequado para aplicações de coleta de dados distribuídos.

Adicionalmente, o protocolo incorpora mecanismos de segurança, como criptografia e autenticação entre dispositivos, e opera na faixa de 2,4 GHz, uma frequência amplamente conhecida e regulamentada, o que favorece sua adoção em ambientes educacionais e institucionais. Esses fatores tornam o conjunto ESP32–ESP-NOW uma solução prática, econômica e tecnicamente adequada para aplicações de comunicação sem fio de longo alcance no contexto do PGEN.

3.2 Materiais e equipamentos utilizados

Para o desenvolvimento e execução dos experimentos, foram utilizados os seguintes componentes, instrumentos e softwares:

- a) Microcontrolador ESP32-C6, responsável pela comunicação sem fio via

- protocolo ESP-NOW;
- b) Antenas Yagi-Uda fabricadas em PCB, projetadas para operação na frequência de 2,4 GHz;
- c) Computador pessoal para programação e coleta de dados;
- d) PocketVNA, utilizado para caracterização da antena;
- e) Software ESP-IDF, dentro do VScode para a programação dos microcontroladores;
- f) Tripé para suporte da antena e do microcontrolador.

3.3 Configuração do sistema de comunicação

A configuração do sistema de comunicação teve como objetivo estabelecer o enlace sem fio entre os dispositivos envolvidos no experimento, garantindo a transmissão confiável dos dados coletados. Nesta etapa, foram definidas as parametrizações do protocolo de comunicação, o modo de operação e os ajustes necessários para viabilizar a troca de informações em diferentes cenários de distância e ambiente. A seguir, são detalhados os principais aspectos relacionados à estrutura do protocolo ESP-NOW e à ativação do modo de longo alcance.

3.3.1 Estrutura do protocolo ESP-NOW

O protocolo ESP-NOW foi configurado no modo *unicast*, permitindo a comunicação direta entre dois dispositivos ESP32, sendo um responsável pela transmissão e o outro pela recepção dos pacotes de dados. Essa abordagem possibilita o envio de informações sem a necessidade de uma rede Wi-Fi intermediária, reduzindo a latência e o consumo de energia.

Cada nó do sistema foi identificado por meio de seu endereço MAC, garantindo que os dados sejam encaminhados corretamente entre os dispositivos participantes da comunicação.

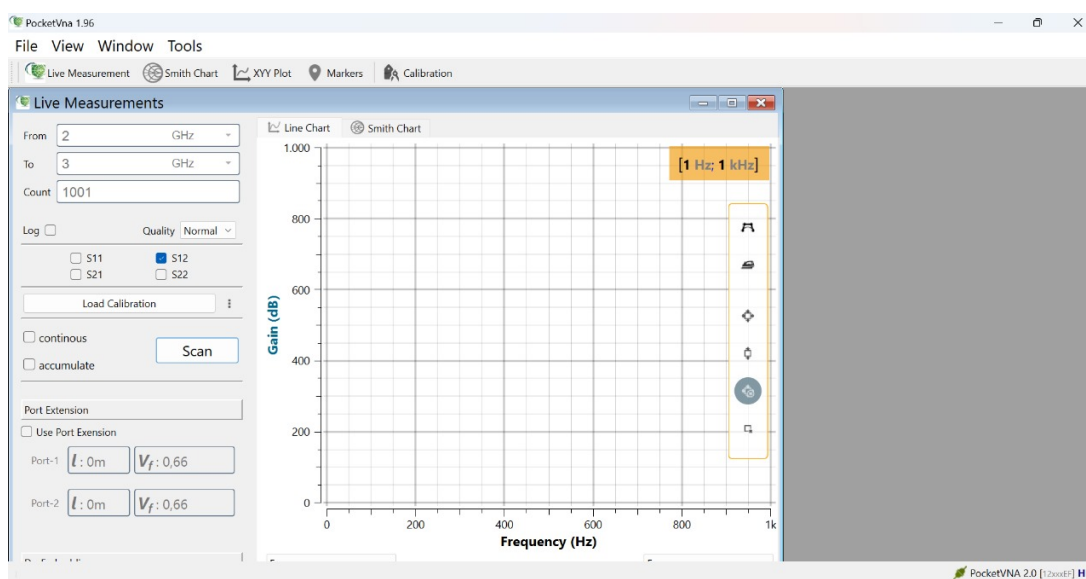
3.3.2 Ativação do modo Long Range

Para ampliar a cobertura e possibilitar testes em distâncias maiores, foi ativado o modo *Long Range* (LR) do ESP-NOW. Esse modo emprega técnicas de modulação e codificação que reduzem a taxa de transmissão de dados, porém aumentam significativamente a robustez do sinal em ambientes sujeitos à atenuação ou interferência. A utilização do modo LR permite avaliar o desempenho do sistema proposto em condições de comunicação mais desafiadoras, possibilitando a análise da estabilidade da conexão e da taxa de entrega de pacotes em longas distâncias.

3.4 Caracterização das antenas Yagi-Uda

A caracterização das antenas Yagi-Uda foi realizada por meio do analisador vetorial de rede portátil PocketVNA conforme já demonstrado pela Figura 10, utilizando o software disponibilizado pelo fabricante conforme Figura 11, instrumento utilizado para avaliar o comportamento eletromagnético de antenas e dispositivos de RF em função da frequência.

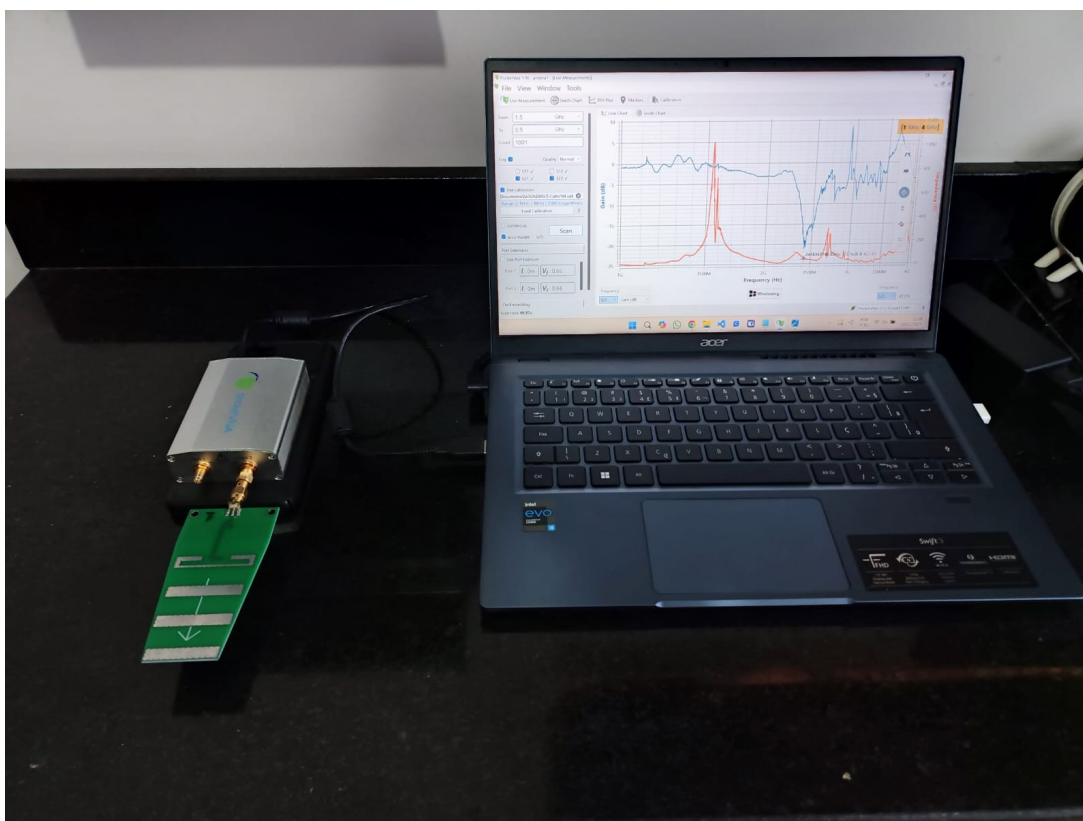
Figura 11 – Software PocketVNA v1.96.



Fonte: Autoria própria (2025).

Inicialmente, procedeu-se à calibração do dispositivo utilizando o kit de calibração padrão (open, short e load), com o objetivo de eliminar as influências dos cabos e conectores do sistema de medição, garantindo maior precisão nos resultados obtidos.

Após a calibração, foram realizadas as medições de cada antena foi conectada individualmente ao PocketVNA, conforme demonstrado pela Figura 12 de modo a obter o coeficiente de reflexão (S_{11}), parâmetro que indica a quantidade de potência refletida de volta para a fonte devido ao desajuste de impedância entre a antena e o cabo coaxial. Os dados coletados permitiram identificar a faixa de frequência de ressonância e a largura de banda útil de cada antena.

Figura 12 – Medições da antena com o Pocket VNA

Fonte: Autoria própria (2025).

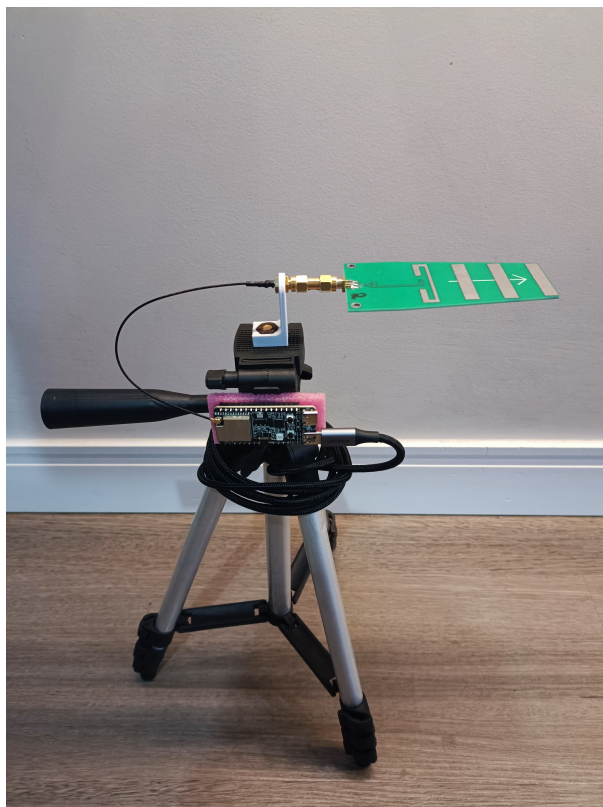
Em seguida, foi montado um arranjo experimental para a medição comparativa de ganho entre as duas antenas Yagi-Uda. Para isso, uma das antenas foi configurada como transmissora e a outra como receptora, mantendo uma distância fixa e linha de visada direta (LOS) entre elas, de forma a minimizar interferências externas e efeitos de multipercurso. As medições foram realizadas em um ambiente controlado, e o PocketVNA foi utilizado para registrar os parâmetros de transmissão (S_{21}), permitindo calcular o ganho relativo entre as antenas.

Os resultados obtidos nessa etapa possibilitam avaliar o desempenho de radiação e a eficiência de cada antena, servindo como base para análises comparativas e posteriores aplicações no sistema de comunicação sem fio proposto.

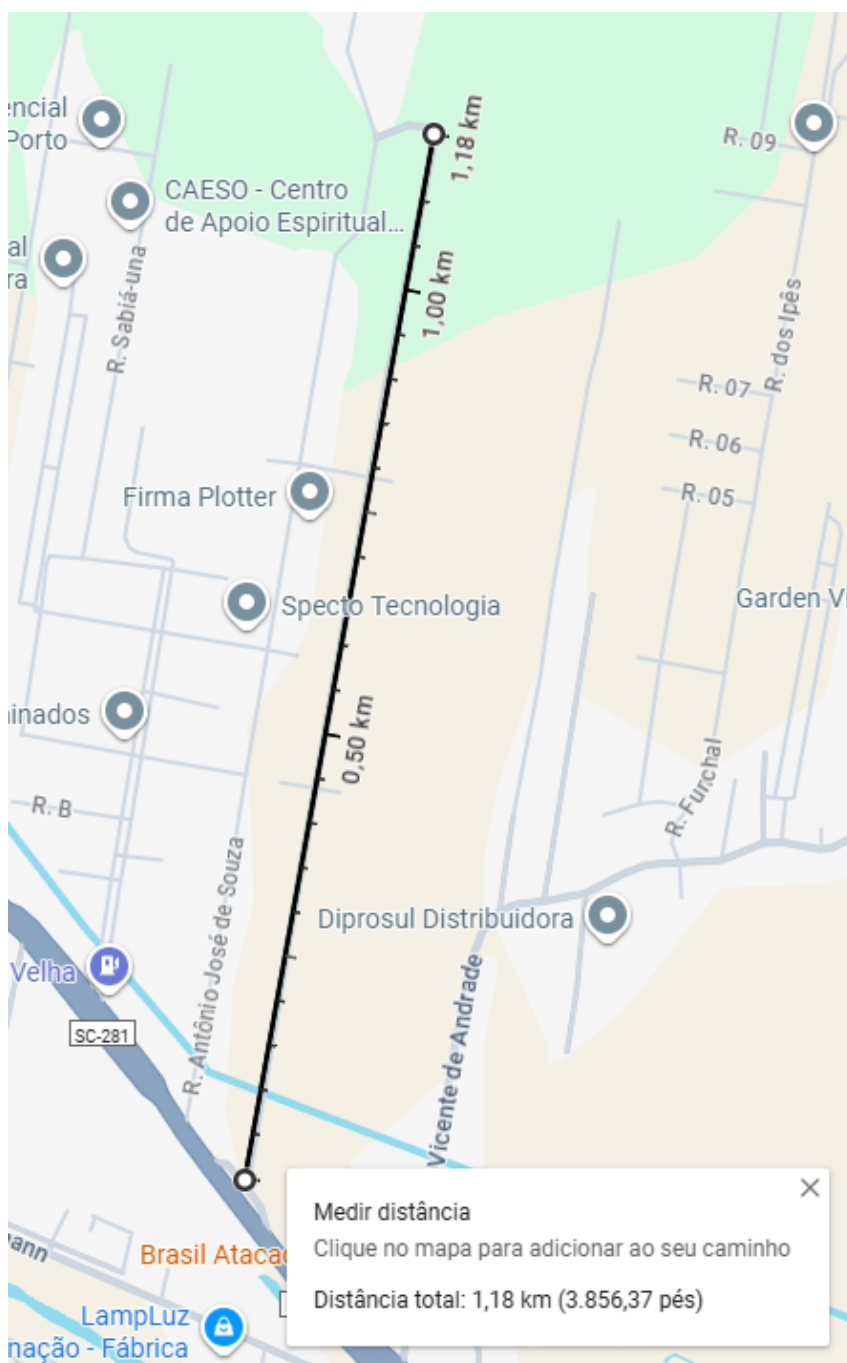
3.5 Procedimentos experimentais

Os testes foram conduzidos em ambiente externo, com visada direta entre as antenas, utilizando um tripé e um suporte feito em impressora 3D para fixação da antena, demonstrado pela Figura 13 em uma avenida com distância suficiente para o teste de longo alcance, conforme demonstrado pela Figura 14.

Figura 13 – Suporte com tripé para fixação da antena Yagi-Uda.



Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 14 – Avenida onde os testes foram conduzidos.

Fonte: Autoria própria (2025).

As medições foram realizadas em diferentes distâncias, para análise do comportamento do protocolo juntamente com a antena e coleta de parâmetros para comparações. Em cada distância, foram coletados os seguintes parâmetros:

- RSSI médio (dBm);
- Quantidade de pacotes esperados;
- Quantidade de pacotes recebidos;

- d) Taxa de perda de pacotes (%);
- e) Sequência inicial dos pacotes;
- f) Sequência final dos pacotes.

3.6 Tratamento e análise dos dados

Os dados obtidos foram registrados em planilhas e processados por meio de estatísticas descritivas. Os resultados foram representados graficamente e por meio de tabelas, permitindo avaliar o comportamento do sinal em função da distância.

A análise foi baseada nos seguintes critérios:

- a) Alcance máximo da comunicação estável;
- b) Variação do RSSI com a distância;
- c) Taxa de perda de pacotes com a distância.

Essas análises possibilitaram avaliar a viabilidade técnica da solução proposta, identificando as limitações e o potencial de aplicação do protocolo ESP-NOW em modo long range associado a antenas Yagi-Uda em PCB no contexto do sistema PGEN.

3.7 Justificativa dos parâmetros de medição.

Para avaliar o desempenho do enlace ESP-NOW em modo Long Range foram selecionados os parâmetros RSSI médio (dBm), taxa de perda de pacotes (%) e distância como métricas principais.

O RSSI indica o nível de potência do sinal recebido e permite verificar a degradação energética do enlace com o aumento da distância e variações do ambiente, sendo especialmente útil para relacionar mudanças de sinal a fenômenos físicos (relevo, obstruções e multipercurso), conforme demonstrado experimentalmente por (CERPA *et al.*, 2005). A taxa de perda traduz diretamente a efetividade da comunicação em termos de entrega de dados e é a métrica operacional mais relevante para aplicações práticas de telemetria: mesmo com RSSI aceitável, uma alta taxa de perda compromete a aplicabilidade do sistema. Por fim, a distância foi usada como variável independente para estudar a variação conjunta de RSSI e perda, permitindo identificar o alcance prático do sistema e detectar não-linearidades (p. ex. pontos com perda abrupta por obstrução) em ensaios controlados. A combinação dessas três medidas possibilita uma avaliação completa do enlace: o RSSI explica alterações físicas no canal, a taxa de perda demonstra a consequência em confiabilidade de entrega e a distância organiza os resultados espacialmente, permitindo inferir limites operacionais do protocolo em campo.

4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados obtidos a partir do desenvolvimento e da validação do sistema proposto, o qual integra o microcontrolador ESP32-C6, o protocolo de comunicação ESP-NOW e antenas Yagi-Uda para o estudo do desempenho em comunicação sem fio de longo alcance. São abordados os processos de caracterização das antenas, a implementação do protocolo no microcontrolador e a análise experimental dos dados coletados em diferentes condições de operação.

Inicialmente, é apresentada a caracterização das antenas Yagi-Uda, realizada por meio de medições com o analisador vetorial de redes PocketVNA. Essa etapa teve como finalidade identificar parâmetros fundamentais, como o coeficiente de reflexão (S_{22}), a impedância complexa e o ganho de transmissão (S_{21}), permitindo avaliar o comportamento das antenas nas faixas de frequência utilizadas nos testes.

Em seguida, é detalhada a implementação do protocolo ESP-NOW no ESP32-C6, destacando o funcionamento da comunicação ponto a ponto, a estrutura do código e os recursos empregados para a transmissão e recepção de dados entre os módulos.

Por fim, são apresentados e discutidos os resultados experimentais obtidos, nos quais foram realizadas medições variando-se a distância entre os dispositivos para avaliar parâmetros como potência do sinal recebido (RSSI), taxa de entrega de pacotes e alcance máximo de comunicação. Os resultados permitiram verificar a influência das antenas Yagi-Uda sobre o desempenho do sistema e validar a eficiência da solução proposta para aplicações de monitoramento do consumo de energia e para o projeto PGEN.

4.1 Caracterização das antenas utilizando o Pocket VNA

A caracterização das antenas Yagi-Uda teve como objetivo avaliar o desempenho em termos de reflexão, impedância e ganho de transmissão. Por meio das medições realizadas com o analisador vetorial de redes PocketVNA, foi possível observar o comportamento das antenas tanto na transmissão quanto na recepção, permitindo verificar sua eficiência em diferentes frequências de operação.

Entre os principais parâmetros avaliados está o coeficiente de reflexão (S_{22}), que indica a fração da potência incidente refletida de volta para a fonte. Para um bom desempenho de radiação, considera-se adequado um valor de S_{22} inferior a -10 dB, o que indica que a maior parte da energia está sendo irradiada.

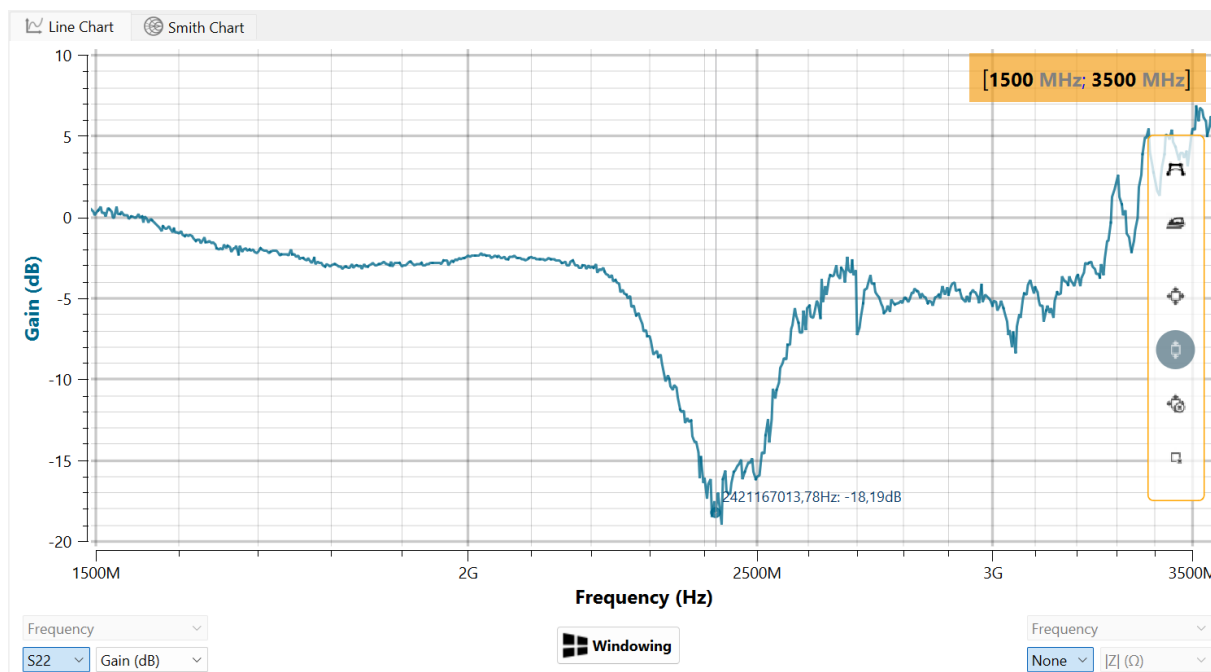
Também foi analisada a impedância complexa das antenas, com o intuito de identificar sua aproximação com os 50Ω característicos da linha de transmissão. Essa análise permite avaliar a compatibilidade elétrica e a eficiência de acoplamento entre o transmissor e a antena.

Além disso, foram realizadas medições do parâmetro S21, que representa o coeficiente de transmissão entre duas portas do VNA, indicando a quantidade de energia transferida de uma antena para outra. Valores mais elevados de S21 correspondem a um melhor acoplamento e, consequentemente, maior ganho do sistema de comunicação. Dessa forma, a avaliação conjunta de S22, impedância e S21 foi fundamental para determinar o desempenho e a diretividade das antenas utilizadas neste trabalho.

4.1.1 Antena 1

A Figura 15 apresenta o resultado obtido no Pocket VNA para o coeficiente de reflexão exibido no gráfico, em função da frequência (em Hertz) na antena 1, com seus valores atribuídos nos pontos do plano vertical.

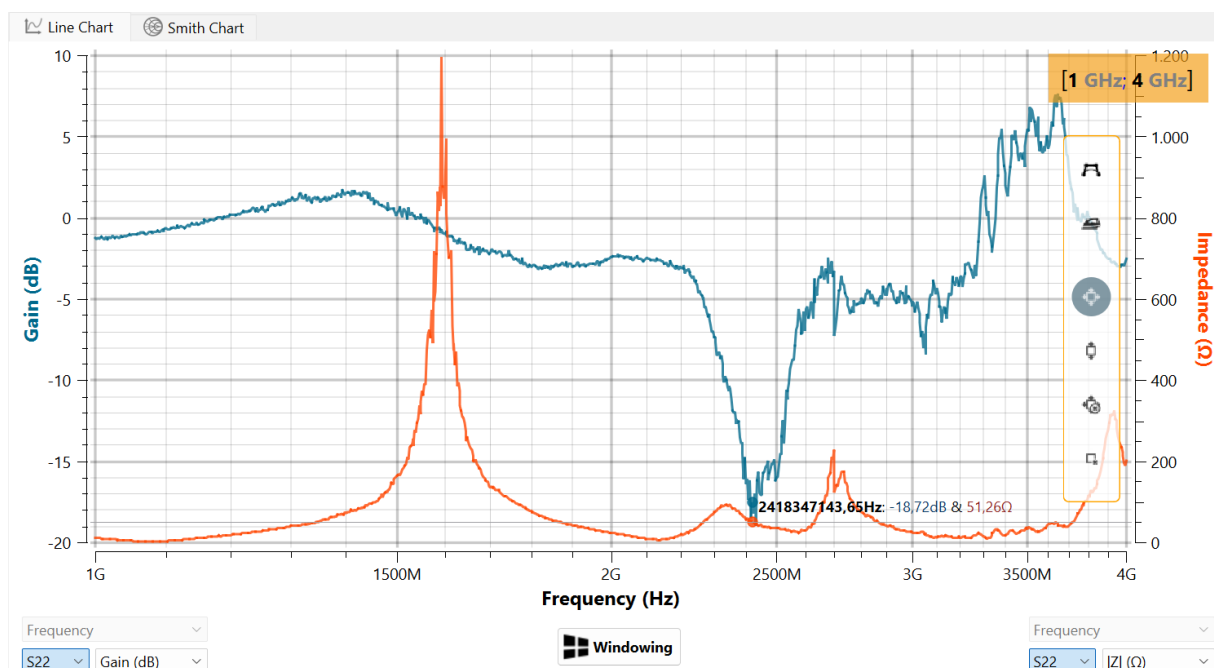
Figura 15 – Reflexão Medido Antena 1.



Fonte: Autoria própria (2025).

A Figura 16 apresenta o resultado obtido no Pocket VNA para o coeficiente de reflexão exibido no gráfico (em azul) e o gráfico (em laranja) a impedância ($|Z|$) em função da frequência (em Hertz) na antena 1, com seus valores atribuídos nos pontos do plano vertical.

Figura 16 – Reflexão e Impedância Medido Antena 1.

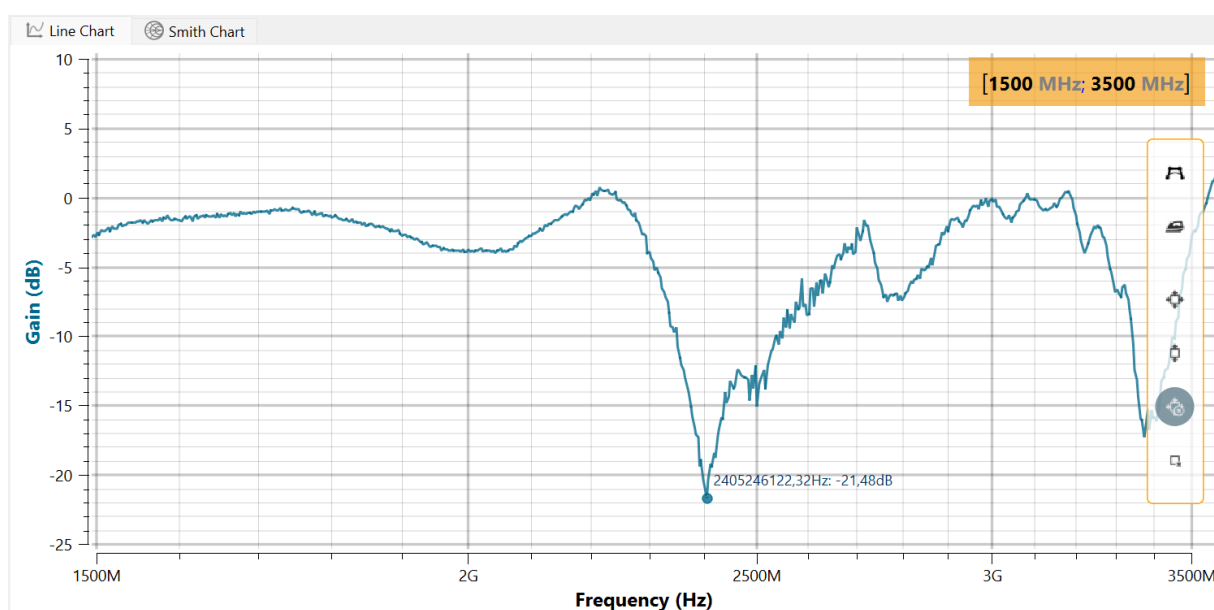


Fonte: Autoria própria (2025).

4.1.2 Antena 2

A Figura 17 apresenta o resultado obtido no Pocket VNA para o coeficiente de reflexão exibido no gráfico, em função da frequência (em Hertz) na antena 2, com seus valores atribuídos nos pontos do plano vertical.

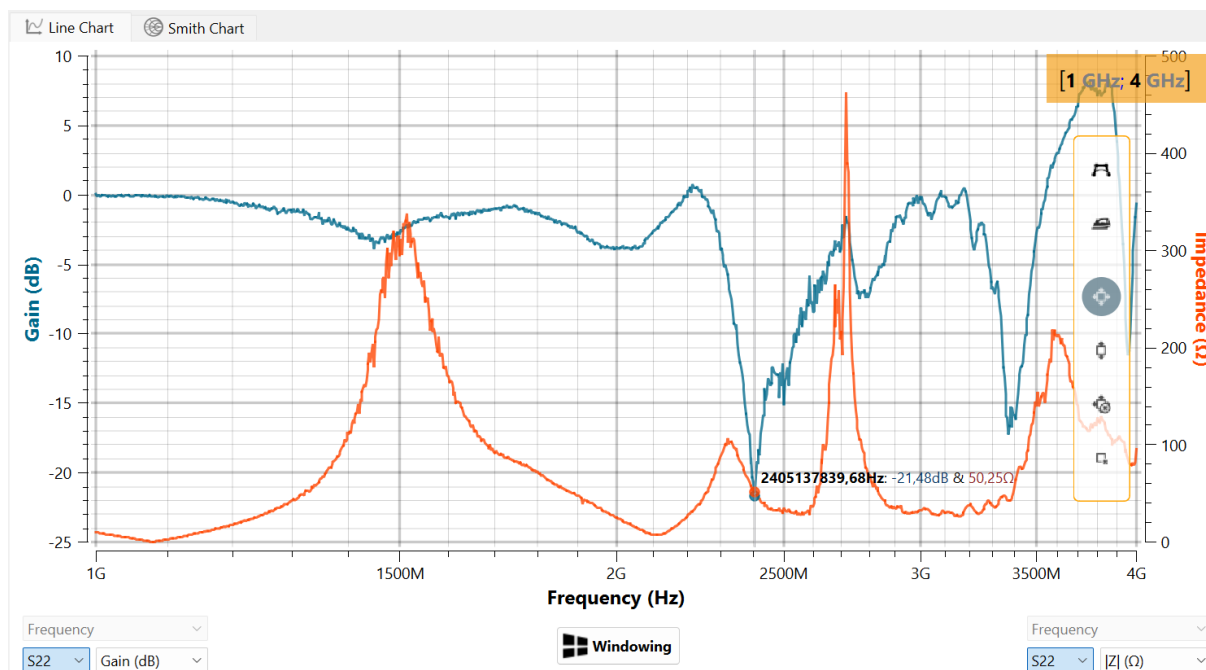
Figura 17 – Reflexão Medido Antena 2.



Fonte: Autoria própria (2025).

A Figura 18 apresenta o resultado obtido no Pocket VNA para o coeficiente de reflexão exibido no gráfico (em azul) e o gráfico (em laranja) a impedância ($|Z|$) em função da frequência (em Hertz) na antena 2, com seus valores atribuídos nos pontos do plano vertical.

Figura 18 – Reflexão e Impedância Medido Antena 2.

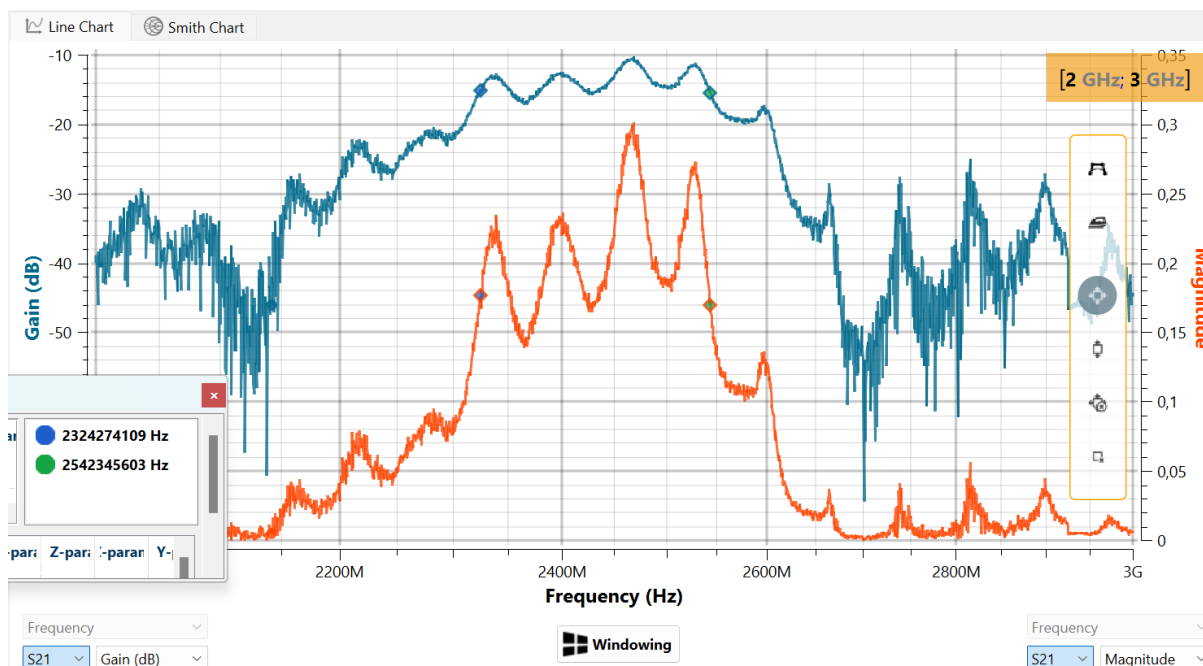


Fonte: Autoria própria (2025).

4.1.3 Ganho entre antenas

A Figura 19 apresenta o resultado obtido no Pocket VNA para o ganho entre as antenas 1 e 2 exibido no gráfico (em azul) e o gráfico (em laranja) a magnitude em função da frequência (em Hertz), com seus valores atribuídos nos pontos do plano vertical.

Figura 19 – Ganho e magnitude entre as antenas.



Fonte: Autoria própria (2025).

4.1.4 Comparação com a especificação declarada da antena

A antena utilizada neste trabalho é um modelo comercial genérico, cuja documentação disponibiliza apenas um conjunto reduzido de especificações técnicas. Entre os parâmetros declarados encontram-se a faixa de frequência operacional, definida entre 2,35–2,55 GHz, o ganho típico de 10,5 dBi e a capacidade máxima de potência de 10 W. Embora não haja identificação do fabricante ou ficha técnica completa, esses valores servem como referência inicial para a avaliação do desempenho.

As medições realizadas por meio do analisador vetorial de redes PocketVNA permitem verificar a aderência do comportamento real da antena em relação aos valores declarados. Durante os ensaios, observou-se que a frequência de melhor adaptação apresentou valor próximo a 2,4 GHz, situando-se, portanto, dentro da faixa especificada. Do mesmo modo, a análise dos parâmetros de transmissão indicou um ganho efetivo aproximado de 12 dBi, o que se mantém coerente com a estimativa de 10,5 dBi informada pelo fornecedor.

De maneira geral, os resultados obtidos experimentalmente demonstram que a antena apresenta desempenho compatível com os valores declarados, mesmo sendo um modelo sem identificação de fabricante. Assim, as medições confirmam que suas características elétricas atendem às expectativas para aplicações dentro da faixa de operação de 2,4 GHz compatíveis com o protocolo ESP-NOW, conforme descrito por (ESPRESSIF, 2022).

4.2 Implementação do Protocolo ESP-NOW no ESP32-C6

A implementação do protocolo ESP-NOW no ESP32-C6 teve como objetivo estabelecer uma comunicação direta, de baixa latência e baixo consumo de energia entre dois dispositivos sem a necessidade de um roteador Wi-Fi convencional. O ESP-NOW, desenvolvido pela Espressif, permite a troca de dados em modo unicast ou broadcast utilizando frames de controle do próprio Wi-Fi, o que torna sua operação muito mais rápida do que protocolos tradicionais como TCP/IP ou MQTT.

Neste trabalho, foi desenvolvido um sistema composto por um transmissor e um receptor, ambos operando no canal 1 do Wi-Fi e configurados com o protocolo de comunicação em modo Long Range (LR). O transmissor envia pacotes sequenciais contendo dados aleatórios e informações de controle, enquanto o receptor coleta métricas como RSSI, sequência dos pacotes, taxa de perda e tempo total de operação. Essa arquitetura foi empregada para avaliar a qualidade e estabilidade da comunicação ponto a ponto utilizando o ESP-NOW no ESP32-C6.

4.2.1 Estrutura Geral do Sistema

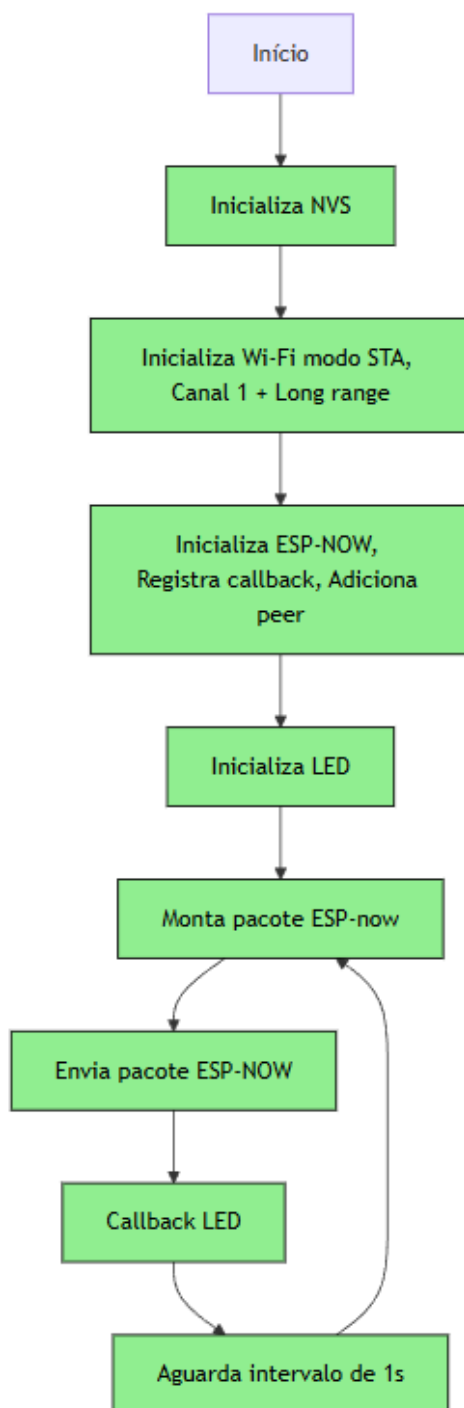
A aplicação foi separada em dois módulos principais: o transmissor e o receptor. Ambos compartilham uma estrutura semelhante de inicialização, composta pelos seguintes blocos:

- **Inicialização da memória NVS:** necessária para permitir o funcionamento adequado do Wi-Fi e do protocolo ESP-NOW.
- **Configuração do Wi-Fi em modo Station (STA):** inclui definição do canal de operação, habilitação do modo Long Range e, no receptor, ativação do modo promiscuous para leitura de RSSI.
- **Inicialização do ESP-NOW:** registro de callbacks, configuração de chaves PMK/LMK e criação de peers.
- **Controle de LED RGB:** no transmissor, o LED indica sucesso ou falha no envio; no receptor, o LED indica, através de cores, a intensidade do sinal recebido.
- **Loop principal:** no transmissor, o laço envia pacotes periodicamente; no receptor, a aplicação coleta dados até o final do período de teste e então gera um relatório estatístico.

Os detalhes completos de cada implementação encontram-se nos Anexos 1 e 2, referentes ao código do transmissor e receptor, respectivamente.

4.2.1.1 Transmissor

A Figura 20 apresenta o fluxograma do módulo transmissor, evidenciando a sequência de inicialização do sistema, configuração do Wi-Fi e do ESP-NOW, além do processo periódico de envio de pacotes. O diagrama resume o comportamento do algoritmo antes da análise detalhada apresentada posteriormente.

Figura 20 – Fluxograma funcionamento código TX.

Fonte: Autoria própria (2025).

O transmissor inicia configurando o ambiente de operação do ESP32-C6, incluindo inicialização da NVS, configuração do Wi-Fi no canal definido e habilitação do modo Long Range para aumentar o alcance de transmissão. Em seguida, o protocolo ESP-NOW é carregado, o peer de destino é adicionado e o callback de envio é

registrado.

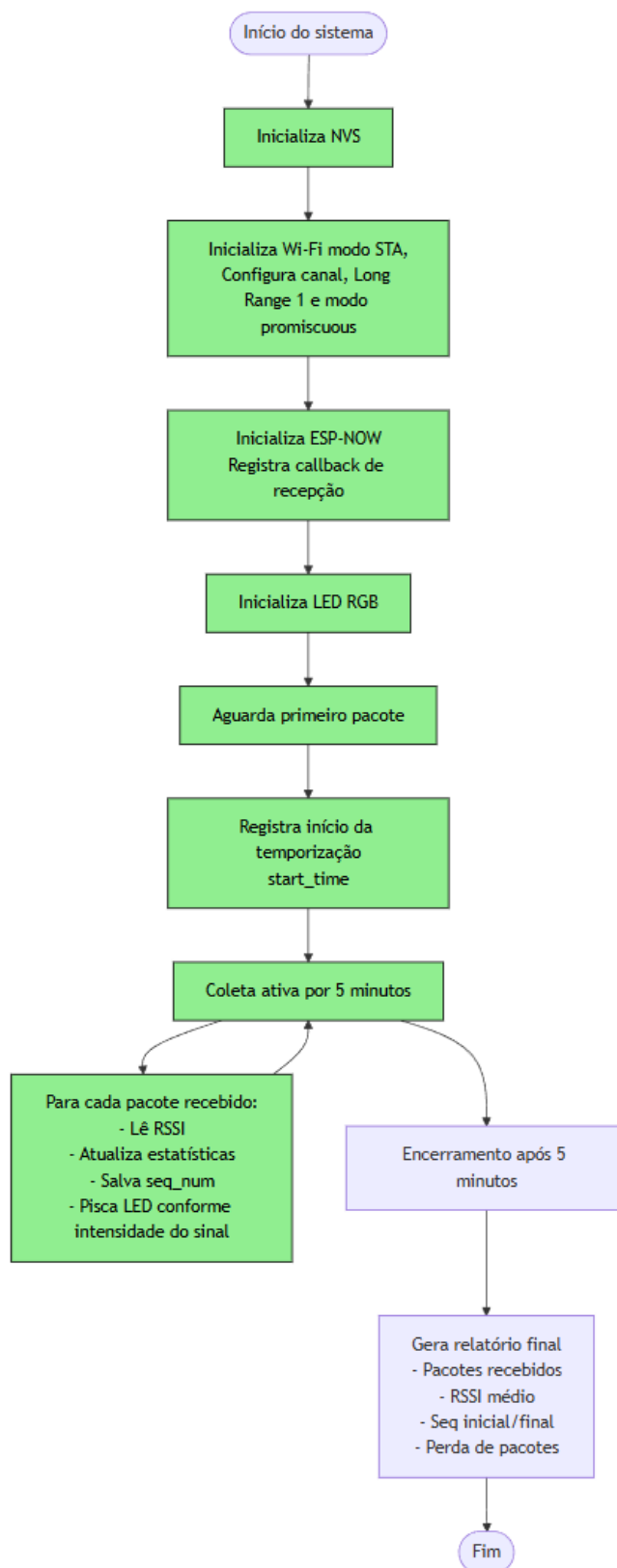
Durante a execução, o dispositivo monta periodicamente um pacote contendo um número de sequência, um valor mágico gerado aleatoriamente e um conjunto de bytes aleatórios no campo de payload. Esse pacote é enviado ao receptor usando o endereço MAC configurado.

A cada envio, o callback associado é acionado informando sucesso ou falha da transmissão. Um LED RGB conectado ao dispositivo é utilizado como indicador visual: verde para envio bem-sucedido e vermelho em caso de falha. Esse processo se repete continuamente, com um intervalo fixo entre envios. Os detalhes completos do código encontram-se no Anexo 1.

4.2.1.2 Receptor

A Figura 21 mostra o fluxograma do módulo receptor, destacando as etapas de inicialização, configuração do modo promiscuous, tratamento dos pacotes recebidos e registro dos dados utilizados na avaliação. O diagrama sintetiza o fluxo operacional do sistema e complementa a descrição técnica apresentada a seguir.

Figura 21 – Fluxograma funcionamento código RX.



Fonte: Autoria própria (2025).

O receptor segue uma lógica semelhante à do transmissor no processo de inicialização, porém com algumas diferenças importantes. Após configurar o Wi-Fi em modo Station, o dispositivo ativa o modo promiscuous, permitindo a leitura do RSSI diretamente dos pacotes Wi-Fi que passam pela interface. Em seguida, inicializa o protocolo ESP-NOW e registra o callback responsável pelo processamento dos pacotes recebidos.

Assim que o primeiro pacote válido chega, o sistema registra o horário de início do experimento e, a partir desse momento, passa a coletar informação por um período contínuo de cinco minutos. Durante esse tempo, cada pacote é analisado, registrando-se seu número de sequência, o valor mágico, o RSSI capturado e o total acumulado de pacotes.

O LED RGB é utilizado como indicação visual da intensidade do sinal, variando cores conforme o nível do RSSI no momento da recepção. Ao final do período estipulado, o receptor calcula métricas como taxa de perda, média de RSSI e quantidade total de pacotes recebidos, apresentando-as em um relatório final exibido no console. O código completo encontra-se no Anexo 2.

4.3 Testes em campo

Para a avaliação prática do enlace de comunicação utilizando o protocolo ESP-NOW, foi realizado um conjunto de medições em ambiente externo, com linha de visada direta entre os dispositivos. A Figura 22 apresenta o módulo transmissor devidamente montado e posicionado para o início do ensaio. Durante todo o procedimento, o transmissor permaneceu operando de forma contínua, enviando pacotes a cada 1 segundo, conforme configurado no firmware.

Figura 22 – Transmissor posicionado para teste.

Fonte: Autoria própria (2025).

Após a preparação do transmissor, o módulo receptor foi instalado inicialmente a uma distância de 50 metros, conforme ilustrado na Figura 23, marcando o início do primeiro ciclo de testes. Cada ensaio teve duração de 5 minutos, período no qual o receptor coletou os pacotes recebidos e registrou informações como intensidade do sinal (RSSI), taxa de sucesso e eventuais perdas. Ao término de cada ciclo, o próprio sistema gerou automaticamente um relatório consolidado, cuja saída é demonstrada na Figura 24.

Figura 23 – Receptor posicionado para teste.

Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 24 – Relatório final teste 50mts.

```
PROBLEMS  OUTPUT  DEBUG CONSOLE  TERMINAL  PORTS  ESP-IDF

I (300221) ESPNOW_RX: Recebido de 58:8C:81:4C:5B:3C | seq=1266 magic=306961502 | RSSI=-82 dBm
I (301221) ESPNOW_RX: Recebido de 58:8C:81:4C:5B:3C | seq=1267 magic=306961502 | RSSI=-84 dBm
I (301311) ESPNOW_RX: Encerrando recepção de pacotes...
I (301311) ESPNOW_RX: ===== RELATÓRIO FINAL =====
I (301311) ESPNOW_RX: Pacotes recebidos: 301
I (301311) ESPNOW_RX: Seq inicial: 967 | Seq final: 1267 | Esperados: 301
I (301321) ESPNOW_RX: RSSI médio: -80.51 dBm
I (301321) ESPNOW_RX: Taxa de perda: 0.00 %
I (301321) ESPNOW_RX: =====
I (301331) ESPNOW: espnow [version: 2.0] deinit

2c6  [Icons] Build [ESP-IDF: QEMU] [ES
```

Fonte: Autoria própria (2025).

As medições foram realizadas em um dia quente, com temperatura aproximada de 28 °C, sob condições de vento moderado. O teste ocorreu em uma rua reta, proporcionando em grande parte uma linha de visada direta entre transmissor e

receptor. Contudo, registrou-se um desnível natural do terreno ao longo do percurso: por volta de 500 metros, o solo apresentava uma elevação em relação ao ponto do transmissor, o que alterou parcialmente a visada direta entre os dispositivos. Após o ensaio realizado a 950 metros, o trajeto passava por uma região próxima a uma ponte, onde o nível do terreno era mais baixo do que o observado na elevação dos 500 metros, alterando novamente as condições de visada.

Após o primeiro ensaio, o receptor foi reposicionado progressivamente em incrementos de 50 metros, até atingir o limite de 1 quilômetro. A repetição sistemática dos testes permitiu analisar o comportamento do enlace em diferentes condições de distância e variações topográficas, possibilitando avaliar a influência direta das condições reais de campo no desempenho do protocolo ESP-NOW.

4.4 Análise e discussão dos resultados

A avaliação do desempenho do enlace ESP-NOW foi conduzida com base nos dados coletados durante os testes em campo, realizados em incrementos de 50 metros até o limite de 1.000 metros. Para cada distância, o sistema registrou o número de pacotes esperados e recebidos, além do RSSI médio e da taxa de perda correspondente. Esses valores permitem analisar a estabilidade do enlace, a degradação do sinal ao longo do percurso e a robustez da comunicação em diferentes condições de propagação.

A Tabela 1 apresenta o conjunto completo de medições obtidas ao longo dos testes. Nos tópicos subsequentes, cada métrica é analisada individualmente, destacando tendências, comportamentos anômalos e sua relação com as características do ambiente e da configuração experimental.

Tabela 1 – Resultados dos testes do ESP-NOW em função da distância.

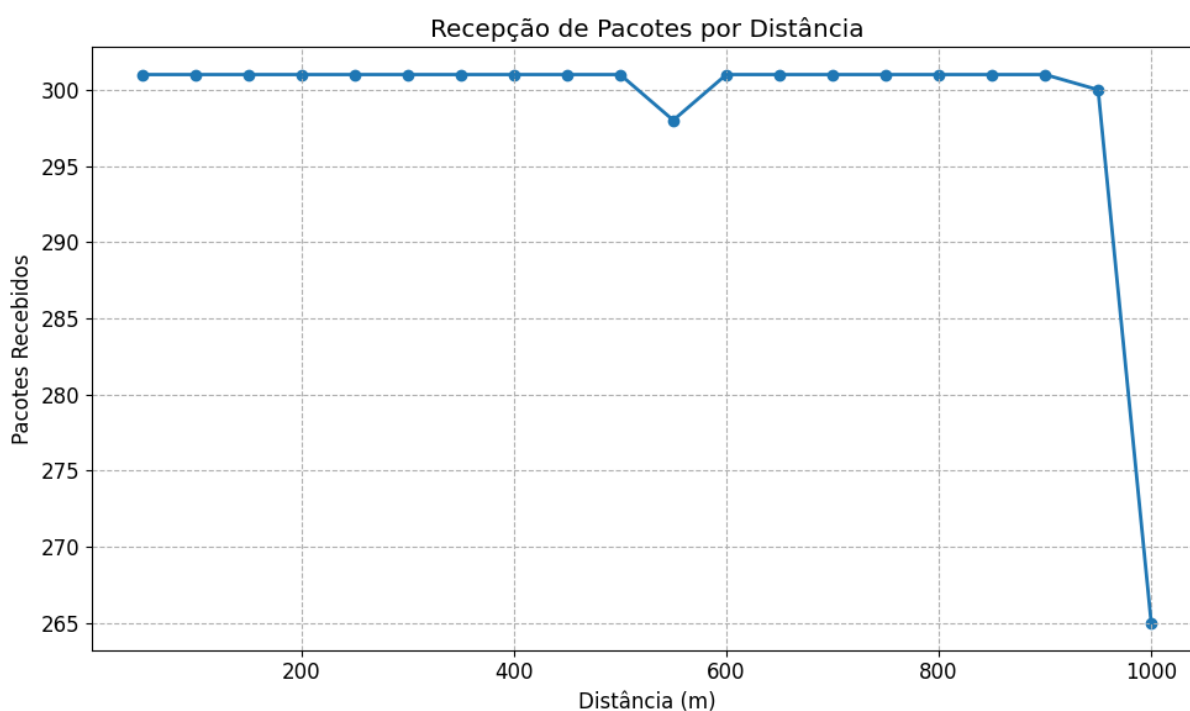
Distância (m)	Pacotes Esperados	Pacotes Recebidos	Seq Inicial	Seq Final	RSSI (dBm)	Perda (%)
50	301	301	967	1267	-80.51	0.00
100	301	301	1497	1797	-81.50	0.00
150	301	301	2023	2323	-82.52	0.00
200	301	301	2523	2823	-84.24	0.00
250	301	301	3108	3408	-85.94	0.00
300	301	301	3661	3961	-87.64	0.00
350	301	301	4165	4465	-83.07	0.00
400	301	301	4707	5007	-88.19	0.00
450	301	301	5290	5590	-86.41	0.00
500	301	301	5791	6091	-76.91	0.00
550	301	298	6323	6623	-77.13	1.00
600	301	301	6864	7194	-77.62	0.00
650	301	301	7410	7710	-79.34	0.00
700	301	301	7901	8201	-77.20	0.00
750	301	301	8386	8686	-82.77	0.00
800	301	301	8865	9165	-79.15	0.00
850	301	301	9369	9669	-80.49	0.00
900	301	301	9818	10118	-82.70	0.00
950	301	300	10298	10598	-76.91	0.33
1000	301	265	10807	11107	-76.05	11.96

4.4.1 Distância

A análise da distância evidencia que o enlace baseado em ESP-NOW no ESP32-C6 apresentou desempenho altamente consistente até aproximadamente 500 m, sem qualquer degradação perceptível na entrega de pacotes. Nessa faixa, todos os intervalos testados exibiram taxa de perda igual a 0%, demonstrando que o protocolo manteve estabilidade mesmo com variações moderadas do nível de sinal.

A partir de 550 m, observa-se o início de pequenas perdas esporádicas, indicando que o sistema começa a operar mais próximo de seu limite prático. Apesar disso, ainda há estabilidade significativa até cerca de 900 m, onde todas as amostras apresentaram recepção completa dos 301 pacotes esperados, conforme demonstrado pela Figura 25.

Figura 25 – Recepção de pacotes pela distância.



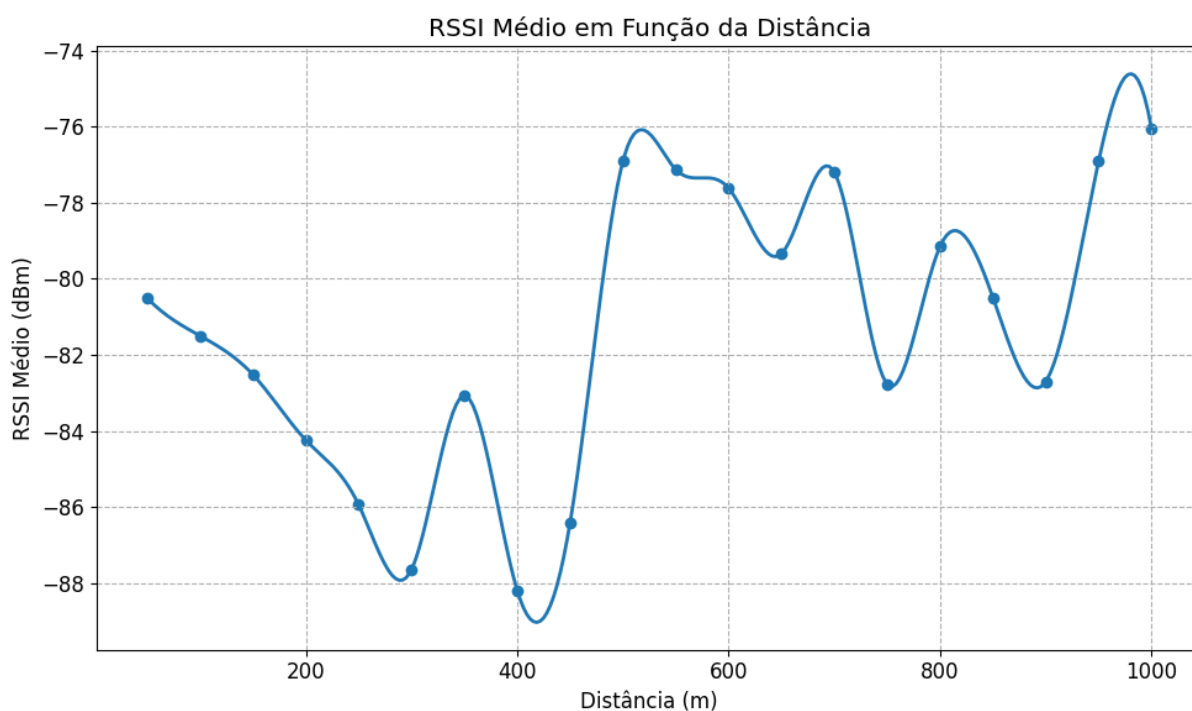
Fonte: Autoria própria (2025).

A distância de 1 km representou o ponto crítico do experimento. O receptor obteve apenas 265 pacotes, correspondendo a uma perda aproximada de 11,96%, mostrando que nesse ponto as condições de comunicação já não são suficientes para garantir um enlace confiável. Esse comportamento é compatível com o cenário físico do teste, no qual havia variações de altitude e obstáculos parciais de visada devido ao relevo e à ponte nos metros finais do percurso.

4.4.2 RSSI médio

O RSSI médio apresentou tendência de redução gradual conforme a distância aumentou, demonstrado pela Figura 26 como esperado em um enlace ponto-a-ponto em campo aberto. Até aproximadamente 300 m, o RSSI permaneceu entre -80 dBm e -88 dBm, faixa que ainda garante operação estável para o modo ESP-NOW em longo alcance.

Figura 26 – RSSI médio pela distância.



Fonte: Autoria própria (2025).

Entre 350 m e 900 m, o RSSI apresentou variações não estritamente monotônicas, oscilando entre -76 dBm e -83 dBm. Essas irregularidades são típicas de medições reais e podem ser atribuídas a:

- variações locais do relevo que modificam levemente a linha de visada;
- influência do vento sobre a vegetação e objetos ao redor;
- reflexões multi percurso provocadas por construções próximas;
- ligeiras diferenças de orientação relativa entre as antenas.

Apesar dessas oscilações, o RSSI manteve-se dentro de uma faixa considerada operacionalmente segura para o ESP-NOW. Nos pontos de 950 m e 1000 m, o RSSI médio medido (entre -76 dBm e -76.9 dBm) permaneceu relativamente alto,

o que indica que o nível de sinal não foi o principal fator limitante do enlace no maior alcance. Nesse caso, o impacto mais significativo decorre da degradação da qualidade do canal devido ao desnível do terreno e obstruções parciais, que reduzem a relação sinal-ruído e aumentam a probabilidade de erro na decodificação dos pacotes.

4.4.3 Taxa de perda

A taxa de perda reforça o comportamento observado nos demais parâmetros. Houve entrega perfeita (0%) em praticamente todo o percurso até 500 m, conforme demonstrado pela Figura 27 indicando um enlace extremamente robusto até essa faixa.

Figura 27 – Taxa de perda pela distância.



Fonte: Autoria própria (2025).

A primeira perda registrada ocorreu em 550 m, com 1%, valor ainda irrelevante para a estabilidade geral da comunicação. As amostras subsequentes voltaram a apresentar 0% de perda até os 900 m, demonstrando que a degradação não é progressiva e está fortemente influenciada por condições momentâneas do canal, e não simplesmente pela distância.

Em 950 m, houve perda de 0,33%, novamente pequena, mas já indicando que o sistema estava operando próximo ao limite útil. No ponto final, 1000 m, a taxa de perda subiu abruptamente para 11,96%, evidenciando que:

- O terreno desfavorável no trecho final comprometeu a visada direta;

- influência do vento sobre a vegetação e objetos ao redor;
- Reflexões e absorções adicionais reduziram a qualidade do enlace;
- O protocolo já não conseguia manter a entrega confiável dos pacotes.

Essa queda de desempenho no quilômetro marca o limite prático da aplicação nas condições testadas, reforçando que o ESP-NOW pode alcançar longas distâncias, mas ainda depende fortemente da geometria do ambiente e das condições locais de propagação.

Os resultados obtidos demonstram que a comunicação utilizando o protocolo ESP-NOW no ESP32-C6 apresentou desempenho altamente satisfatório em longas distâncias, alcançando enlaces estáveis de até 900 metros com perda nula de pacotes e RSSI dentro de limites operacionais adequados. A análise dos gráficos de distância, RSSI e taxa de perda evidencia que a degradação do enlace não ocorreu de forma linear com a distância, mas sim em função de fatores ambientais específicos do cenário de teste, como o desnível do terreno, a influência do vento e pequenas obstruções parciais à linha de visada.

A partir de 950 m, surgiram perdas ocasionais, indicando o início do limite prático do sistema. Em 1000 m, a perda significativa de 11,96% confirmou que o canal já não oferecia condições adequadas para comunicação confiável, ainda que o RSSI médio não tenha reduzido de maneira proporcional. Esses resultados reforçam que, embora o nível de sinal seja importante, a qualidade do enlace está mais associada à relação sinal-ruído e às características do ambiente do que ao RSSI isoladamente.

De modo geral, o comportamento observado está alinhado com o esperado para enlaces ponto-a-ponto em campo aberto utilizando antenas comerciais simples e operação em modo long range. Os dados mostram que o sistema é viável para aplicações de médio e longo alcance, desde que consideradas as limitações impostas pelo relevo e pelas condições locais de propagação.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho demonstrou a viabilidade do uso do protocolo ESP-NOW em modo Long Range associado a antenas Yagi-Uda em PCB para aplicações no sistema PGEN. As medições experimentais, realizadas em incrementos de distância até 1 000 m, mostraram que o enlace se mantém altamente robusto até aproximadamente 900 m, com taxa de perda nula em grande parte do percurso e RSSI médio dentro de faixas operacionais aceitáveis para o ESP-NOW. Porém, observou-se que a degradação do enlace não segue uma relação puramente linear com a distância: fatores locais de propagação como desníveis do terreno, obstruções parciais e efeitos de multitrajeto influenciaram fortemente a qualidade do canal, ocasionando perda significativa no ponto de 1 km apesar de RSSI médios relativamente altos. Esses achados indicam que, além do nível de sinal absoluto, a relação sinal-ruído e as condições geométricas do cenário são determinantes para a confiabilidade do enlace em longa distância. Assim, o sistema proposto é considerado viável para aplicações de médio e longo alcance em condições favoráveis, desde que consideradas as limitações impostas pelo relevo e pela geometria do local de instalação.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Testes em distâncias maiores e cenários variados: estender os ensaios para além de 1 km e em diferentes topografias (planícies, vales, áreas urbanas com maior reflexividade) para mapear com mais precisão o limite prático do ESP-NOW em modo LR e identificar zonas críticas de propagação. Recomenda-se também variar a altura das antenas e medir a sensibilidade às diferenças de alinhamento.

Ensaio de longa duração (teste de campo definitivo): instalar um par de nós (transmissor e receptor) em locais fixos por períodos prolongados (semanas a meses) para avaliar o comportamento em operação contínua e sob variações climáticas sazonais. Esse tipo de experimento confirma se a performance temporal observada em testes pontuais se mantém em operação real (drift de hardware, variações diurnas e sazonalidade), fornecendo dados valiosos para validação de implantação definitiva.

Medições adicionais de qualidade de canal: complementar RSSI e perda com medições de SNR (quando possível), taxa de erro de bit (BER) e monitoramento de interferência em múltiplos canais Wi-Fi para entender melhor a relação entre nível de sinal e confiabilidade de decodificação. Tais medições ajudam a explicar casos onde o RSSI se mantém “alto” mas a perda aumenta.

Avaliação com outros tipos de antenas e configurações de ganho: comparar as Yagi-Uda em PCB com antenas de ganho diferente (setoriais, omnidirecionais) e com variações de filtro/isolamento para entender trade-offs entre ganho, diretividade e

robustez em campo.

Testes em topologias reais do Sistema PGEN: realizar estudos integrados com múltiplos nós e coleta para a plataforma PGEN em áreas rurais/industriais reais, avaliando desempenho em rede (não só ponto-a-ponto) e a viabilidade operacional da solução em escala.

Recomenda-se a investigação do uso de outros protocolos de comunicação sem fio como alternativa ou complemento ao ESP-NOW. Em especial, tecnologias baseadas no padrão IEEE 802.15.4, operando na faixa de 900 MHz, podem ser avaliadas, uma vez que apresentam características de propagação mais favoráveis em ambientes com obstáculos físicos e grandes distâncias. A realização de testes comparativos entre essas tecnologias e o ESP-NOW permitiria analisar aspectos como alcance efetivo, consumo energético, latência e confiabilidade do enlace, contribuindo para a definição da solução mais adequada para diferentes cenários de implantação do Sistema PGEN.

REFERÊNCIAS

- AGRAWAL, S. R.; LELE, K. A.; DESHMUKH, A. A. Review on printed log periodic and yagi msa. *International Journal of Computer Applications*, v. 126, n. 8, p. 38–44, 2015. Disponível em: <https://ijcaonline.org/research/volume126/number8/agrawal-2015-ijca-906177.pdf>. 29
- BALANIS, C. A. *Antenna Theory: Analysis and Design*. 3. ed. Hoboken: Wiley, 2005. 27, 28
- CAVALCANTE, A. M. *et al.* 5g for remote areas: Challenges, opportunities and business modeling for brazil. *IEEE Access*, v. 9, p. 10829–10843, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3050742>. 22, 23
- CERPA, A. *et al.* Temporal properties of low power wireless links: Modeling and implications on multi-hop routing. In: *Proceedings of the 6th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc '05)*. Urbana–Champaign, IL, USA: ACM, 2005. p. 414–425. 38
- ENGINEERSGARAGE. *What is ESP-NOW?* 2024. Disponível em: <https://www.engineersgarage.com/what-is-esp-now/>. 24
- ESPRESSIF. *ESP-NOW User Guide*. 2022. Acesso em: 30 set. 2025. Disponível em: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp-now_user_guide_en.pdf. 24, 25, 43
- ESPRESSIF. *ESP-IDF Documentation – ESP32-C6 Sleep Modes*. 2025. Acesso em: 01 out. 2025. Disponível em: https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/stable/esp32c6/api-reference/system/sleep_modes.html. 26
- ESPRESSIF. *ESP-NOW for outdoor applications*. 2025. Acesso em: 30 set. 2025. Disponível em: https://docs.google.com/document/d/1EEMBrSMAF8PqhVpCFavtOTwVPbuzsg1uB_m7AVQ6yQ/edit?tab=t.0#heading=h.rztqdzmrh39b. 15
- ESPRESSIF. *ESP32-C6 Overview*. 2025. Acesso em: 01 out. 2025. Disponível em: <https://www.espressif.com/en/products/socs/esp32-c6>. 26
- ESPRESSIF. *ESP32-C6 Series Datasheet*. [S.l.], 2025. Acesso em: 01 out. 2025. Disponível em: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-c6_datasheet_en.pdf. 25, 26, 27
- INSTRUMENTS, T. *2.4 GHz Yagi PCB Directional Antenna (Application Note DN034)*. [S.l.], 2010. Application Note; inclui layout Gerber e cálculos de desempenho. Disponível em: <https://www.ti.com/lit/swra350>. 29
- JUNIOR, H. A. dos S. *et al.* *Desenvolvimento de um dispositivo inteligente de monitoramento de energia elétrica integrado à plataforma SGE com aplicação da lógica fuzzy para tomada de decisão na gestão energética da Indústria 4.0*. 2023. Acesso em: 08 out. 2025. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/388742406_Desenvolvimento_de_um_dispositivo_inteligente_de_monitoramento_de_energia_eletrica_integrado_a_plataforma_SGE_com_aplicacao_da_logica_Fuzzy_para_tomada_de_decisao_na_gestao_energetica_da_Industria_40. 22

- KHAN, M. S. *et al.* *Ultra-Wideband Antenna with MIMO Diversity for 5G Wireless Communication*. 2020. Acesso em: 08 out. 2025. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2007.02294>. 23
- MASSUYAMA, G. A. *Large-Scale Implementation of a Real Time Energy Management System for the Brazilian Federal Institutes of Technological Education*. 2024. Acesso em: 08 set. 2025. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10766808>. 15, 16, 19, 20, 21
- NIRSCHL, M. *PocketVNA – Especificações da Versão 2.0*. 2017. Datasheet / Manual do fabricante. Acesso em: 14 out. 2025. Disponível em: <https://download.kamami.pl/p563215-specification%20pocketvna2.0%20%281%29.pdf>. 31
- OZTURK, Y.; NAHAR, N. K.; SERTEL, K. Yagi-uda antenna on multilayered pcb for full-duplex mmw short-range communications. *IEEE*, 2025. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/395222015_Yagi-Uda_Antenna_on_Multilayered_PCB_for_Full-Duplex_mmW_Short-Range_Communications. 29
- POOLE, I. *What is a VNA – Vector Network Analyzer*. 2024. Acesso em: 14 out. 2025. Disponível em: <https://www.electronics-notes.com/articles/test-methods/rf-vector-network-analyzer-vna/what-is-a-vna.php>. 30
- RAMOS, A.; VARUM, T.; MATOS, J. N. Compact multilayer yagi-uda based antenna for iot/5g sensors. *Sensors*, 2018. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/327412652_Compact_Multilayer_Yagi-Uda_Based_Antenna_for_IoT5G_Sensors. 29
- SANTOS, R. G. d. *Desafios para a expansão da infraestrutura de fibra óptica em áreas rurais*. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Telecomunicações) – Instituto Federal da Paraíba, Campina Grande. Acesso em: 8 out. 2025. Disponível em: <https://repositorio.ifpb.edu.br/jspui/handle/177683/4761>. 23
- SILVA, A. L. *et al.* *Cenários e perspectivas da conectividade para o agro*. Brasília, DF: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), 2021. Disponível em: <https://repositorio-dspace.agricultura.gov.br/handle/1/168>. Acesso em: 8 out. 2025. Estudo realizado pela Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ/USP). ISBN 978-65-86803-45-7. Disponível em: <https://repositorio-dspace.agricultura.gov.br/handle/1/168>. 23, 24
- STUTZMAN, W. L.; THIELE, G. A. *Teoria e projeto de Antenas*. 3. ed. Hoboken: Wiley, 2017. 27, 28
- THILAGAM, J. S. T. *et al.* Measurement and analysis of vector network analyzer. *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*, v. 11, n. 6, 2022. Disponível em: <https://www.ijeat.org/wp-content/uploads/papers/v11i6/F36810811622.pdf>. 30, 31
- URAZAYEV, D. *et al.* *Indoor Performance Evaluation of ESP-NOW*. 2023. Acesso em: 30 set. 2025. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/369626626_Indoor_Performance_Evaluation_of_ESP-NOW. 25

- WU, Y. *et al.* Dual-resonant high gain wideband yagi-uda antenna. *IEEE Access*, p. 1–7, 2021. Disponível em: <https://scispace.com/pdf/dual-resonant-high-gain-wideband-yagi-uda-antenna-using-full-4z8d4meh17.pdf>. 29
- YOUSIF, S. *Estudo de técnicas aplicadas à redução do efeito crosstalk em placas de circuito impresso*. 45 p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Eletrônica)), Florianópolis, 2021. Disponível em: https://repositorio.ifsc.edu.br/bitstream/handle/123456789/2358/TCC-SuziYousif_final_17-10-2021.pdf?isAllowed=y&sequence=1. Acesso em: 21 out. 2025. 31

ANEXOS

ANEXO A – CÓDIGO-FONTE ESP-NOW TRANSMISSOR (TX)

O código a seguir apresenta a implementação completa do transmissor.

```

1  #include <string.h>
2  #include <stdlib.h>
3  #include "freertos/FreeRTOS.h"
4  #include "freertos/task.h"
5  #include "nvs_flash.h"
6  #include "esp_wifi.h"
7  #include "esp_now.h"
8  #include "esp_log.h"
9  #include "esp_mac.h"
10 #include "esp_random.h"
11 #include "led_strip.h"
12 #include "driver/gpio.h"
13 #include "driver/rmt_tx.h"
14
15 #define WIFI_CHANNEL 1
16 #define ESPNOW_PMK      "pmk1234567890123"
17 #define ESPNOW_LMK      "lmk1234567890123"
18 #define ESPNOW_SEND_DELAY 1000 // ms
19 #define ESPNOW_SEND_LEN  50
20
21 #define LED_PIN 8
22
23 static const char *TAG = "ESPNOW_TX";
24
25 static led_strip_handle_t led_strip;
26
27 static uint8_t broadcast_addr[] = {0x58, 0x8c, 0x81, 0x4c, 0x5d, 0x28};
28
29 typedef struct {
30     uint8_t type;
31     uint16_t seq_num;
32     uint32_t magic;
33     uint8_t payload[ESPNOW_SEND_LEN];
34 } espnow_packet_t;
35
36 static uint16_t seq_num = 0;
37
38 void led_init(void)
39 {
40     /* LED strip initialization with the GPIO and pixels number*/
41     led_strip_config_t strip_config = {
42         .strip_gpio_num = LED_PIN,
43         .max_leds = 1, // at least one LED on board
44     };
45     /* Using RMT backend for LED strip */
46     led_strip_rmt_config_t rmt_config = {
47         .resolution_hz = 10 * 1000 * 1000, // 10MHz
48         .flags.with_dma = false,
49     };
50     ESP_ERROR_CHECK(led_strip_new_rmt_device(&strip_config, &rmt_config,
51     &led_strip));
52     /* Set all LED off to clear all pixels */
53     led_strip_clear(led_strip);

```

```

53 }
54
55
56 /* Callback de envio */
57 static void espnow_send_cb(const esp_now_send_info_t *info, esp_now_send_status_t
    status)
58 {
59     if (info == NULL) return;
60     const uint8_t *mac_addr = info->des_addr;
61
62     ESP_LOGI(TAG, "Pacote enviado para %02X:%02X:%02X:%02X:%02X:%02X, status: %s",
63         mac_addr[0], mac_addr[1], mac_addr[2],
64         mac_addr[3], mac_addr[4], mac_addr[5],
65         status == ESP_NOW_SEND_SUCCESS ? "SUCESSO" : "FALHA");
66
67     if (status == ESP_NOW_SEND_SUCCESS) {
68         led_strip_set_pixel(led_strip, 0, 0, 16, 0);
69         led_strip_refresh(led_strip);
70     } else {
71         led_strip_set_pixel(led_strip, 0, 16, 0, 0);
72         led_strip_refresh(led_strip);
73     }
74 }
75
76
77 /* Inicializa Wi-Fi em modo STA */
78 static void wifi_init(void)
79 {
80     ESP_ERROR_CHECK(esp_netif_init());
81     ESP_ERROR_CHECK(esp_event_loop_create_default());
82     esp_netif_create_default_wifi_sta();
83     wifi_init_config_t cfg = WIFI_INIT_CONFIG_DEFAULT();
84     ESP_ERROR_CHECK(esp_wifi_init(&cfg));
85     ESP_ERROR_CHECK(esp_wifi_set_mode(WIFI_MODE_STA));
86     ESP_ERROR_CHECK(esp_wifi_start());
87     ESP_ERROR_CHECK(esp_wifi_set_channel(WIFI_CHANNEL, WIFI_SECOND_CHAN_NONE));
88     ESP_ERROR_CHECK(esp_wifi_set_protocol(WIFI_IF_STA,
89         WIFI_PROTOCOL_11B | WIFI_PROTOCOL_11G | WIFI_PROTOCOL_11N | WIFI_PROTOCOL_LR));
90     ESP_LOGI(TAG, "Wi-Fi inicializado no canal %d com modo Long Range habilitado",
91         WIFI_CHANNEL);
92 }
93
94 /* Inicializa ESPNOW */
95 static void espnow_init(void)
96 {
97     ESP_ERROR_CHECK(esp_now_init());
98     ESP_ERROR_CHECK(esp_now_set_pmk((uint8_t *)ESPNOW_PMK));
99     ESP_ERROR_CHECK(esp_now_register_send_cb(espnow_send_cb));
100
101     esp_now_peer_info_t peer = {0};
102     memcpy(peer.peer_addr, broadcast_addr, ESP_NOW_ETH_ALEN);
103     peer.channel = WIFI_CHANNEL;
104     peer.encrypt = false;
105     ESP_ERROR_CHECK(esp_now_add_peer(&peer));
106 }
107
108 void app_main(void)
109 {

```

```
109     ESP_ERROR_CHECK(nvs_flash_init());
110     wifi_init();
111     espnow_init();
112     led_init();
113
114     espnow_packet_t packet;
115     memset(&packet, 0, sizeof(packet));
116     packet.magic = esp_random();
117
118     while (true) {
119         packet.seq_num = seq_num++;
120         packet.type = 1;
121         esp_fill_random(packet.payload, sizeof(packet.payload));
122
123         esp_err_t result = esp_now_send(broadcast_addr, (uint8_t *)&packet,
sizeof(packet));
124         if (result == ESP_OK) {
125             ESP_LOGI(TAG, "Pacote %d enviado (%d bytes)", packet.seq_num,
sizeof(packet));
126         } else {
127             ESP_LOGE(TAG, "Erro ao enviar pacote: %s", esp_err_to_name(result));
128         }
129
130         vTaskDelay(pdMS_TO_TICKS(ESPNOW_SEND_DELAY));
131     }
132 }
```

Código A.1 – Código do transmissor ESP-NOW em modo Long Range

ANEXO B – CÓDIGO-FONTE ESP-NOW RECEPTOR (RX)

```

134 #include <string.h>
135 #include "freertos/FreeRTOS.h"
136 #include "freertos/task.h"
137 #include "nvs_flash.h"
138 #include "esp_wifi.h"
139 #include "esp_now.h"
140 #include "esp_log.h"
141 #include "esp_mac.h"
142 #include "led_strip.h"
143 #include "driver/gpio.h"
144 #include "driver/rmt_tx.h"
145 #include "esp_timer.h"
146
147 #define WIFI_CHANNEL 1
148 #define ESPNOW_PMK "pmk1234567890123"
149 #define LED_PIN 8
150 #define TEST_DURATION_MS (5 * 60 * 1000) // 5 minutos
151
152 static const char *TAG = "ESPNOW_RX";
153
154 typedef struct {
155     uint8_t type;
156     uint16_t seq_num;
157     uint32_t magic;
158     uint8_t payload[50];
159 } espnow_packet_t;
160
161 static led_strip_handle_t led_strip;
162 static int8_t last_rssi = 0;
163
164 /* Variáveis de estatística */
165 static uint32_t packet_count = 0;
166 static int32_t rssi_sum = 0;
167 static uint16_t seq_first = 0xFFFF;
168 static uint16_t seq_last = 0;
169 static bool test_running = true;
170 static int64_t start_time = 0; // tempo em microssegundos
171
172 /* Inicializa LED */
173 void led_init(void)
174 {
175     led_strip_config_t strip_config = {
176         .strip_gpio_num = LED_PIN,
177         .max_leds = 1,
178     };
179     led_strip_rmt_config_t rmt_config = {
180         .resolution_hz = 10 * 1000 * 1000,
181         .flags.with_dma = false,
182     };
183     ESP_ERROR_CHECK(led_strip_new_rmt_device(&strip_config, &rmt_config,
184         &led_strip));
184     led_strip_clear(led_strip);
185     led_strip_refresh(led_strip);
186 }
187

```

```

188 /* Converte RSSI em cor LED */
189 void led_set_rssi_color(int8_t rssi)
190 {
191     uint8_t r=0, g=0, b=0;
192
193     if (rssi >= -90) {          // sinal forte
194         r=0; g=16; b=0;        // verde
195     } else if (rssi < -90) {    // sinal medio
196         r=16; g=8; b=0;        // laranja
197     } else if (rssi < -80) {    // sinal intermediário
198         r=16; g=16; b=0;       // amarelo
199     } else {                   // fraco
200         r=16; g=16; b=0;       // vermelho
201     }
202
203     led_strip_set_pixel(led_strip, 0, r, g, b);
204     led_strip_refresh(led_strip);
205 }
206
207 /* Callback promiscuous apenas para capturar RSSI */
208 static void wifi_promisc_cb(void *buf, wifi_promiscuous_pkt_type_t type)
209 {
210     if (type != WIFI_PKT_DATA && type != WIFI_PKT_MISC) return;
211
212     wifi_promiscuous_pkt_t *pkt = (wifi_promiscuous_pkt_t *)buf;
213     last_rssi = pkt->rx_ctrl.rssi;
214 }
215
216 /* Callback de recepção ESPNOW */
217 static void espnow_rcv_cb(const esp_now_rcv_info_t *info, const uint8_t *data,
218     int len)
219 {
220     if (!test_running) return;
221
222     if (len != sizeof(espnow_packet_t)) {
223         ESP_LOGW(TAG, "Pacote de tamanho inesperado: %d bytes", len);
224         return;
225     }
226
227     espnow_packet_t pkt;
228     memcpy(&pkt, data, sizeof(pkt));
229
230     // Marca o início do teste no momento da primeira recepção
231     if (start_time == 0) {
232         start_time = esp_timer_get_time(); // tempo atual em microssegundos
233         ESP_LOGI(TAG, "Início da coleta registrado!");
234     }
235
236     if (seq_first == 0xFFFF)
237         seq_first = pkt.seq_num;
238     seq_last = pkt.seq_num;
239
240     packet_count++;
241     rssi_sum += last_rssi;
242
243     ESP_LOGI(TAG, "Recebido de %02X:%02X:%02X:%02X:%02X:%02X | seq=%d magic=%lu |
RSSI=%d dBm",
244         info->src_addr[0], info->src_addr[1], info->src_addr[2],

```

```

244         info->src_addr[3], info->src_addr[4], info->src_addr[5],
245         pkt.seq_num, pkt.magic, last_rssi);
246
247     // LED conforme intensidade
248     led_set_rssi_color(last_rssi);
249     vTaskDelay(pdMS_TO_TICKS(100));
250     led_strip_clear(led_strip);
251     led_strip_refresh(led_strip);
252 }
253
254 /* Inicializa Wi-Fi */
255 static void wifi_init(void)
256 {
257     ESP_ERROR_CHECK(esp_netif_init());
258     ESP_ERROR_CHECK(esp_event_loop_create_default());
259     esp_netif_create_default_wifi_sta();
260     wifi_init_config_t cfg = WIFI_INIT_CONFIG_DEFAULT();
261     ESP_ERROR_CHECK(esp_wifi_init(&cfg));
262     ESP_ERROR_CHECK(esp_wifi_set_mode(WIFI_MODE_STA));
263     ESP_ERROR_CHECK(esp_wifi_start());
264     ESP_ERROR_CHECK(esp_wifi_set_channel(WIFI_CHANNEL, WIFI_SECOND_CHAN_NONE));
265     ESP_ERROR_CHECK(esp_wifi_set_protocol(WIFI_IF_STA,
266     WIFI_PROTOCOL_11B | WIFI_PROTOCOL_11G | WIFI_PROTOCOL_11N |
267     WIFI_PROTOCOL_LR));
268
269     // Ativa modo promiscuous para capturar RSSI
270     ESP_ERROR_CHECK(esp_wifi_set_promiscuous(true));
271     ESP_ERROR_CHECK(esp_wifi_set_promiscuous_rx_cb(&wifi_promisc_cb));
272
273     ESP_LOGI(TAG, "Wi-Fi inicializado no canal %d com modo Long Range e
274     promiscuous ativado", WIFI_CHANNEL);
275 }
276
277 /* Inicializa ESPNOW */
278 static void espnow_init(void)
279 {
280     ESP_ERROR_CHECK(esp_now_init());
281     ESP_ERROR_CHECK(esp_now_set_pmk((uint8_t *)ESPNOW_PMK));
282     ESP_ERROR_CHECK(esp_now_register_recv_cb(espnow_recv_cb));
283 }
284
285 /* Função para exibir relatório */
286 static void print_report(void)
287 {
288     float avg_rssi = (packet_count > 0) ? ((float)rssi_sum / packet_count) : 0;
289     int expected_packets = (seq_last >= seq_first) ? (seq_last - seq_first + 1) : 0;
290     float loss_rate = 0;
291
292     if (expected_packets > 0)
293         loss_rate = 100.0f * (expected_packets - packet_count) / expected_packets;
294     if (loss_rate < 0) loss_rate = 0; // segurança
295
296     ESP_LOGI(TAG, "===== RELATÓRIO FINAL =====");
297     ESP_LOGI(TAG, "Pacotes recebidos: %lu", packet_count);
298     ESP_LOGI(TAG, "Seq inicial: %u | Seq final: %u | Esperados: %d",
299     seq_first, seq_last, expected_packets);
300     ESP_LOGI(TAG, "RSSI médio: %.2f dBm", avg_rssi);
301     ESP_LOGI(TAG, "Taxa de perda: %.2f %%", loss_rate);

```

```
300     ESP_LOGI(TAG, "=====");
301 }
302
303 /* Tarefa principal */
304 void app_main(void)
305 {
306     ESP_ERROR_CHECK(nvs_flash_init());
307     wifi_init();
308     espnow_init();
309     led_init();
310
311     ESP_LOGI(TAG, "Aguardando primeiro pacote para iniciar o teste...");
312
313     // Espera o primeiro pacote
314     while (start_time == 0) {
315         vTaskDelay(pdMS_TO_TICKS(100));
316     }
317
318     ESP_LOGI(TAG, "Coleta iniciada, executando por 5 minutos...");
319
320     // Aguarda 5 minutos após o primeiro pacote
321     vTaskDelay(pdMS_TO_TICKS(TEST_DURATION_MS));
322
323     test_running = false;
324     ESP_LOGI(TAG, "Encerrando recepção de pacotes...");
325
326     print_report();
327
328     // Desativa ESPNOW e Wi-Fi
329     esp_now_unregister_recv_cb();
330     esp_now_deinit();
331     esp_wifi_stop();
332
333     ESP_LOGI(TAG, "Teste finalizado.");
334 }
```

Código B.1 – Código do receptor ESP-NOW em modo Long Range