



Universidade Federal de Ouro Preto
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas
Departamento de Engenharia Elétrica



Trabalho de Conclusão de Curso

**Projeto de uma rede sem fio em malha para
gerenciamento de sistemas microcontrolados**

Leonardo Rodrigues Teodoro Campos

João Monlevade, MG
2024

Leonardo Rodrigues Teodoro Campos

Projeto de uma rede sem fio em malha para gerenciamento de sistemas microcontrolados

Trabalho de Conclusão de curso apresentado à Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica pelo Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas da Universidade Federal de Ouro Preto.
Orientador: Prof. Marcelo Moreira Tiago

Universidade Federal de Ouro Preto
João Monlevade
2024

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

C198p Campos, Leonardo Rodrigues Teodoro.
Projeto de uma rede sem fio em malha para gerenciamento de sistemas microcontrolados. [manuscrito] / Leonardo Rodrigues Teodoro Campos. - 2024.
75 f.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Moreira Tiago.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas. Graduação em Engenharia Elétrica .

1. Microcontroladores. 2. Processamento de sinais. 3. Redes de sensores sem fio. 4. Sistemas de controle inteligente. 5. Sistemas de comunicação sem fio. I. Tiago, Marcelo Moreira. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 681.5

Bibliotecário(a) Responsável: Flavia Reis - CRB6-2431



FOLHA DE APROVAÇÃO

Leonardo Rodrigues Teodoro Campos

Projeto de uma rede sem fio em malha para gerenciamento de sistemas microcontrolados

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica

Aprovada em 11 de dezembro de 2023.

Membros da banca

Dr. Marcelo Moreira Tiago — Orientador — Universidade Federal de Ouro Preto
Dr. Igor Dias Neto de Souza — Universidade Federal de Ouro Preto
Dr. Welbert Alves Rodrigues — Universidade Federal de Ouro Preto

Marcelo Moreira Tiago, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 21/02/2024.



Documento assinado eletronicamente por **Marcelo Moreira Tiago, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 21/02/2024, às 10:40, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0670904** e o código CRC **A0572078**.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, que me proporcionou a vida. Agradeço aos meus pais e irmãs, por sempre me apoiarem. Agradeço a minha esposa, que esteve ao meu lado em todos os momentos. Finalizo agradecendo ao meu orientador pela paciência e humanidade ao me conduzir neste trabalho.

"É impossível para um homem aprender aquilo que ele acha que já sabe."

– Epiteto

Resumo

Este trabalho apresenta as etapas de desenvolvimento de uma rede malha de baixo custo, projetados para realizar a comunicação de forma contínua, sendo autocurável e recuperável. O kit de desenvolvimento ESP32-DevKit-V1 foi utilizado como plataforma para processamento de sinais, e a biblioteca de código aberto painlessmesh foi empregado para controlar o procedimento de envio e recepção de sinais através da rede. Foram realizados ensaios para determinação da variação da intensidade do sinal em função da distância de propagação, considerando ambiente com visada direta e ambientes urbanos com barreiras e sinais de interferência na mesma faixa de frequência do sistema proposto. Os resultados mostram que, para um limite mínimo de intensidade do sinal definido em -70 dBm, pode-se utilizar o sistema considerando distâncias de até 20 m para ambientes sem barreiras no meio e com obstruções de sinal em placas de antena externa, e 10 m para ambientes sem barreira e 4 m em ambientes com obstrução em placas de antena embutida.

Palavras-chave: Sensores inteligentes, redes em malha, microcontroladores.

Abstract

This work presents the stages of development of a low-cost mesh network, designed to carry out communication continuously, being self-healing and recoverable. The ESP32-DevKit-V1 development kit was used as a platform for signal processing, and the `painlessMesh` open source library was used to control the procedure for sending and receiving signals over the network. Tests were carried out to determine the variation in signal intensity depending on the propagation distance, considering environments with unobstructed line of sight and urban environments with barriers and interfering signals in the same frequency range as the proposed system. The results show that, for a minimum signal strength limit defined at -70 dBm, the system can be used considering distances of up to 20 m for environments with unobstructed line of sight and with signal obstructions on external antenna cards; as for built-in antenna cards, 10m for environments with unobstructed line of sight and 4m in environments with obstructions.

Keywords: Intelligent sensors, mesh networks, microcontrollers.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Topologia física dos tipos de redes em malha conforme a conexão dos seus nós.	7
Figura 2 – Modelo de rede em malha de envio de dados para roteadores de cobertura limitada.	8
Figura 3 – Exemplo de rede em malha de comunicação por múltiplos saltos até o destino.	9
Figura 4 – Aplicação de adhoc em comunicação veicular para o controle de infrações de trânsito e acidentes.	10
Figura 5 – Ilustração de uma RSSF de comunicação intra malha integrada ao um ponto de acesso à internet.	11
Figura 6 – Diagramas de bloco da RSSF e seus elementos.	11
Figura 7 – Camadas dos protocolos de comunicação de uma RSSF integradas aos planos de gerenciamento.	12
Figura 8 – Fluxograma da camada de enlace.	13
Figura 9 – Encapsulamento da subcamada LLC para otimização do envio de pacotes.	14
Figura 10 – Diagrama de bloco ESP32.	17
Figura 11 – ESP32-DevKi-V1.	18
Figura 12 – Estrutura RTOs.	19
Figura 13 – ESP32 multitask.	20
Figura 14 – Rede em malha composta por clientes nas extremidades conectados aos pontos de acessos ao centro da rede.	22
Figura 15 – Envio de mensagem por transmissão geral para todos os nós na área de cobertura representada pelo círculo tracejado.	23
Figura 16 – Envio de mensagem por endereço único pela definição da rota até o destino.	24
Figura 17 – Interface do programa Wi-Fi scan apresentando as redes disponíveis, suas potências e canais utilizados.	26
Figura 18 – Reprodução do experimento no Campus do ICEA, utilizando duas cadeiras como suporte para as placas, variando a distância com o auxílio da trena.	27
Figura 19 – Representação da variação da distância para cálculo da RSSI para placas de antena interna e antena externa.	28
Figura 20 – Estrutura de rede do algoritmo modelo disponibilizado pela biblioteca.	30
Figura 21 – Tipos de conexões dos nós presentes na malha.	31
Figura 22 – Montagem das placas ao carregador portátil.	32
Figura 23 – Protocolo de comunicação da biblioteca painlessMesh.	33

Figura 24 – Fluxograma de retransmissão de pacotes.	33
Figura 25 – Rede em malha estabelecida mediante a área de cobertura de cada nó.	34
Figura 26 – Estágios da transmissão de mensagens conforme novas conexões de malha.	35
Figura 27 – Disposição geográfica dos elementos da rede em malha.	36
Figura 28 – Estrutura das placas com identificação e alimentação energética.	37
Figura 29 – Disposição geográfica dos elementos da malha em meio urbano, sendo o ponto preto o nó base, os pontos em azul-escuro as placas de antena externa e os pontos em azul-claro as placas de antena embutida.	38
Figura 30 – Fluxograma dos estágios de operação do algoritmo de comunicação por réplica de pacote por ID.	39
Figura 31 – Medição dos trezentos pontos captados para primeira passada com distância de um metro do transmissor em situação de visada direta.	41
Figura 32 – Medições obtidas durante os ensaios realizados considerando a condição de visada direta. Os pontos em azul, são os valores médios obtidos juntamente com as barras de margem de erro para cada distância analisada.	42
Figura 33 – Medições obtidas durante os ensaios realizados considerando a condição com barreira. Os pontos em azul, são os valores médios obtidos juntamente com as barras de margem de erro para cada distância analisada.	43
Figura 34 – Média da somatória dos pontos das três medições.	44
Figura 35 – Medições obtidas durante os ensaios realizados considerando a condição de visada direta para placas de antena externa. Os pontos em azul, são os valores médios obtidos juntamente com as barras de margem de erro para cada distância analisada.	46
Figura 36 – Medições obtidas durante os ensaios realizados considerando a condição com barreira para placas de antena externa. Os pontos em azul, são os valores médios obtidos juntamente com as barras de margem de erro para cada distância analisada.	47
Figura 37 – Médias da somatória de todas as medições realizadas.	48
Figura 38 – Média da somatória das medições obtidas durante os ensaios realizados considerando condições de visada direta e com barreira. Em azul, a curva resultante de medições da placa de antena externa e em vermelho a curva resultante de medições da placa de antena interna.	49
Figura 39 – Modelo de perda de Friis representado em azul para cada distância em comparação a dois ensaios realizados em placas de antena interna sem barreiras no meio representados pelos pontos pretos e vermelhos.	50

Figura 40 – Modelo de perda de Friis representado em azul para cada distância em comparação a dois ensaios realizados em placas de antena interna com barreiras no meio representados pelos pontos pretos e vermelhos.	51
Figura 41 – Modelo de perda de Friis representado em azul para cada distância em comparação a dois ensaios realizados em placas de antena externa sem barreiras no meio representados pelos pontos pretos e vermelhos.	52
Figura 42 – Modelo de perda de Friis representado em azul para cada distância em comparação a dois ensaios realizados em placas de antena externa com barreiras no meio representados pelos pontos pretos e vermelhos.	53
Figura 43 – Fluxograma de atualização da malha.	54
Figura 44 – Ensaio de malha da biblioteca painlessmesh composta por três nós a metro de distância dos vizinhos.	54
Figura 45 – Composição inicial da malha de comunicação por ID.	55
Figura 46 – Composição final da malha de comunicação por ID.	56
Figura 47 – Conexão do tipo estrela formada após o cálculo de atraso para melhores rotas de uma rede em malha disposta em meio urbano representado pela cor vermelha.	57
Figura 48 – Remoção de nós da malha e sua reestruturação.	58

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Objetivos	3
1.2	Revisão Bibliográfica	3
1.3	Estrutura do Trabalho	6
2	REVISÃO TEÓRICA	7
2.1	Redes em malha	7
2.2	Rede de sensores sem fio	10
2.3	Camadas de rede	12
2.4	Planos de gerenciamento	15
2.5	Modelos de propagação para redes sem fio	15
2.5.1	Modelo de propagação de espaço livre	16
2.6	Microcontrolador ESP32	16
2.7	Sistema de tempo real (RTOS)	18
2.8	Biblioteca PainlessMesh	21
2.8.1	Layout da rede	21
2.8.2	Sincronização de tempo	22
2.8.3	Envio de pacotes	23
2.9	Considerações parciais	24
3	DESENVOLVIMENTO	25
3.1	Caracterização da RSSI em relação à distância das placas ESP32- Devkit	25
3.1.1	Ensaio considerando visada direta	27
3.1.2	Ensaio considerando obstáculos entre transmissor e receptor	28
3.2	Ensaios da rede em malha	29
3.2.1	Modelo de rede em malha disponibilizado pela biblioteca painlessmesh	29
3.2.2	Projeto de rede em malha em meio urbano com interferência externas	31
3.2.2.1	Estruturação da malha	31
3.2.2.2	Ensaio do algoritmo de adição nó e réplica de pacote	32
3.2.2.3	Algoritmo de réplica de pacote por ID via funções da biblioteca	36
3.3	Considerações parciais	38
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	40
4.1	RSSI em relação à distância para casos com visada direta e com barreira	40

4.1.1	Resultados da medição da RSSI para placas de antena interna	42
4.1.2	Resultados da medição da RSSI para placa de antena externa	45
4.1.3	Comparação das médias da RSSI das placas	45
4.2	Comparação da RSSI pelo modelo de perdas da equação de Friis . .	46
4.2.1	Modelo de perda comparado aos ensaios da placa de antena interna	47
4.2.2	Modelo de perda comparado aos ensaios da placa de antena externa	49
4.3	Apuração da comunicação da rede em malha	49
4.3.1	Comunicação da biblioteca painlessmesh	50
4.3.2	Rede em malha por algoritmo de rota de transmissão geral	53
4.3.3	Rede em malha por algoritmo de rota de endereço único	56
4.4	Considerações Parciais	58
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	60
5.1	Proposta para trabalhos futuros	61
	REFERÊNCIAS	62

1 Introdução

O desenvolvimento e avanço dos sistemas eletrônicos embarcados surge a partir das necessidades relacionadas ao projeto de sistemas de monitoramento e controle de processos industriais. Esses sistemas são compostos por circuitos eletrônicos analógicos e digitais. Os circuitos analógicos são normalmente utilizados nas etapas de condicionamento de sinais provenientes de sensores ou transdutores, e para o acionamento de cargas elétricas ou eletromecânicas. Os circuitos digitais costumam ser utilizados na forma de dispositivos programáveis, responsáveis por executar algoritmos desenvolvidos para resolver tarefas específicas, tais como controle de processos, processamento digital de sinais, monitoramento de parâmetros físicos, entre outras (HEATH, 2002).

A versatilidade dos sistemas eletrônicos embarcados fez com que a utilização dos mesmos não se limitasse ao setor industrial. Com a redução dos custos e popularização dos sistemas microprocessados e microcontrolados, esses sistemas passaram a ser utilizados em uma série de aplicações residenciais, tais como controle e automação de eletrodomésticos, aparelhos de comunicação, periféricos de computadores, equipamentos de entretenimento, entre outros

Apesar de toda evolução proporcionada pela microeletrônica com os sistemas embarcados, há um crescente aumento das exigências do mercado em relação aos índices de produtividade, qualidade dos produtos e segurança. Em contrapartida, no segmento das aplicações residenciais, há um aumento na demanda de novos equipamentos capazes de simplificar tarefas do dia a dia, aumentar o conforto dos usuários e reduzir o consumo energético dos equipamentos eletro-eletrônicos presentes nas residências.

A ascensão de um novo modelo industrial para atender essas necessidades faz parte dos tópicos abordados pela quarta revolução industrial, marcada pelo uso da internet com o propósito de deixar os sistemas de produção flexíveis e colaborativos (HERMANN et al., 2015). Neste novo cenário, tem-se como objetivo conectar os dispositivos em redes, que podem ser de uso exclusivo ou de acesso público como a internet, possibilitando que esses equipamentos possam se comunicar por meio de protocolos de comunicação pré-estabelecidos (BCG, 2015).

Esses equipamentos podem estar disposto em redes dedicadas, interligados por meio de conexões cabeadas, ou por redes sem fio. Atualmente, as redes cabeadas são predominantes, podendo ser construídas a partir de cabos elétricos (coaxiais, pares trançados, entre outros) ou por fibras ópticas. Como principais vantagens, podem apresentar taxas de transmissão de dados elevadas, resultando em maiores velocidades de comunicação. Como desvantagem, apresentam baixa mobilidade.

As conexões sem fio, por sua vez, vem ganhando espaço pelo baixo custo, pelo aumento da capacidade de transmissão e pela mobilidade proporcionada. Essas redes podem

existir de forma independente ou podem estar interligadas a outras redes para realizar troca de informações. Essa abordagem vem ganhando destaque ao longo dos últimos anos por permitir que dispositivos com características diversas possam ser conectados por meio de uma rede de sensores sem fio (RSSF) (DELICATO et al., 2004).

Essas redes, denominadas RSSF, possibilitam que sistemas de medição de grandezas diversas, fisicamente dispostos em locais distintos, possam ser conectados sem a necessidade de utilização de cabos. Essa conexão permite que informações adquiridas por meio de sensores e transdutores possa ser compartilhada entre todos os elementos da rede (nós). Além disso, pode-se realizar operações de pré-processamento com os sinais adquiridos por cada nó de forma local, transmitindo as informações obtidas após a etapa de processamento para os demais nós que compõe a rede ou para um dispositivo central, responsável por gerenciar as informações adquiridas a partir de cada nó.

Uma das formas de se aumentar o alcance dessas redes sem a necessidade de se adicionar repetidores ou reforçadores de sinal é por meio de uma conexão em malha. A comunicação deve ser feita usando protocolos específicos, visando melhorar o alcance dos sinais transmitidos, reduzir o volume de dados com o auxílio de processos de compactação de dados e aumentar a segurança dos dados enviados ou recebidos. Nas redes em malha, todos os nós podem trocar informações entre si, desde que o sinal enviado/recebido apresente potência suficiente para tal.

Uma segunda vantagem desta abordagem é que pode-se transferir dados entre os diversos nós de forma local, sem a necessidade de se utilizar a internet em todos os pontos. Além disso, para casos onde é necessário compartilhar as informações adquiridas por meio da internet, pode-se conectar somente um dos nós a rede, uma vez que os demais nós estarão conectados ao nó principal por meio da malha (DE; CUNHA, 2008).

A interconexão entre os diversos nós aumenta a robustez das redes em malha, haja vista que nos momentos em que um nó falha, os dados podem ser enviados ou recebidos por meio de outro caminho, desde que a potência do sinal entre os nós restantes apresente valores minimamente suficientes para tal. Essas boas características permitiram que as RSSF pudessem ser utilizadas tanto em aplicações residenciais, em aplicações voltadas para automação residencial, quanto em aplicações industriais.

O campo de pesquisa das redes de sensores sem fios vem ganhando destaque nos últimos anos, motivado pelo aumento da utilização de dispositivos eletrônicos em aplicações industriais e residenciais, visando a conexão de sistemas de medição, monitoramento e atuação. Esse fator motivou o desenvolvimento deste trabalho, cujo objetivo é desenvolver uma rede em malha robusta, composta por sistemas embarcados, que garanta a transmissão e integridade dos dados de forma contínua e que seja de baixo custo.

1.1 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é projetar uma rede em malha utilizando sistemas embarcados e que seja robusta e confiável, garantindo a transmissão e segurança dos dados em tempo real.

Os objetivos específicos são:

- Realizar testes de comunicação entre os microcontroladores usando redes Wi-Fi (do inglês, *Wireless Fidelity*), analisando a potência do sinal transmitido/recebido nas condições sem visada e com visada;
- Definir as distâncias máximas para disposição dos embarcados no ambiente considerando situações sem e com barreira;
- Desenvolver o algoritmo de critério de envio e recebimento de mensagens, bem como o algoritmo responsável por estabelecer as rotas.
- Realizar a transmissão baseada no tempo de resposta entre os nós;
- Garantir a transmissão contínua e ininterrupta do algoritmo de envio de pacotes.

1.2 Revisão Bibliográfica

As redes em malha tem se tornado cada vez mais populares nos últimos anos devido ao aumento de aplicações relacionadas a automação residencial, que está diretamente relacionada à redução dos custos dos sistemas eletrônicos embarcados e dos roteadores usados em aplicações domésticas.

Afifie et al. (2021) projetaram uma rede de sensores conectados em malha utilizando dois tipos diferentes de microcontroladores, ambos fabricados pela empresa Espressif: ESP8266 e ESP32. Os autores conectaram sensores de umidade e temperatura (modelos DHT11 e DHT22) em cada um dos nós, e avaliaram os tempos de atraso para transmissão das informações, considerando casos sem interferências. No trabalho, os autores avaliaram a eficiência da transmissão de informações considerando inicialmente uma situação onde há uma linha de visada (LOS, do inglês *Line-of-Sight*) entre os dois dispositivos e, posteriormente, considerando obstáculos entre os dois microcontroladores, numa condição onde não há uma linha de visada (NLOS, do inglês *Non-line-of-sight*) entre os dois dispositivos. Os resultados mostram uma queda de potência de sinal significativa nos ensaios com obstáculos, que em algumas situações, atenuaram por completo o sinal transmitido antes que o mesmo alcançasse o receptor.

Manvi e Maakar (2020) apresentam um projeto de uma rede de sensores sem fio projetada para operar sem a necessidade de utilização de um roteador. Nessa rede, composta por três microcontroladores ESP32, apenas um microcontrolador foi conectado a

internet, e os outros dois foram utilizados para adquirir, processar e compartilhar informações adquiridas a partir da aquisição de sinais de sensores. Os autores realizaram testes alterando a disposição dos microcontroladores e inserindo obstáculos entre eles, e verificaram que desde que os valores de potência transmitida/recebida pelos nós esteja dentro dos limites mínimos definidos pelo fabricante (acima de -80 dBm), a RSSF é capaz de operar corretamente. Os autores destacam que o índice de perdas de pacotes transmitidos aumenta quando a potência do sinal cai para valores abaixo de -70 dBm, e que nessa situações, os algoritmos utilizados juntamente com a rede em malha tentam buscar uma rota alternativa para o envio dos dados.

Wicaksono e Rahmatya (2021) projetaram um sistema de monitoramento para analisar informações adquiridas a partir de 10 casas diferentes. Foram utilizados microcontroladores ESP32, conectador por meio de uma rede em malha seguindo o protocolo ESP-MESH, desenvolvido pela empresa Espressif. Para enviar os sinais adquiridos para um servidor, os autores utilizaram dois microcontroladores, um para operar como servidor *mesh* e outro para operar como *gateway* para transmissão de dados. Os dados adquiridos por cada nó conectado à malha foram processados e enviados para o servidor. Um sistema supervisor foi desenvolvido para exibir os resultados obtidos.

Foltýnek, Babiuch e Šuránek (2019) utilizaram microcontroladores ESP32 e uma rede sem fio para implementar um sistema de monitoramento de vibração. Os autores utilizaram o protocolo de comunicação MQTT (do inglês, *Message Queue Telemetry Transport*), desenvolvido pela companhia IBM, para transferir os dados de interesse do sistema embarcado para o servidor. Foram desenvolvidos algoritmos utilizando sistemas operacionais de tempo real (RTOS, do inglês *Real Time Operating System*) para permitir que os dois núcleos de processamento disponíveis no ESP32 fossem utilizados ao longo do processo de aquisição, processamento e transmissão dos dados.

Uma análise com as vantagens e desvantagens de se utilizar sistemas de medição individuais com mais de um núcleo foi tema do trabalho desenvolvido por Arm et al. (2022). Os autores realizaram ensaios utilizando sistemas de medição e processamento de sinais. As tarefas de processamento foram divididas entre dois ou mais núcleos de um sistema microcontrolado, e a definição das prioridades de execução e sincronização das atividades foi gerenciada por meio de um sistema RTOS. Os autores encontraram valores altos de tempos de comutação nos momentos em que foi necessário enviar dados para outro núcleo, que poderiam ser críticos para casos onde se deseja executar tarefas que demandam processamento de sinais mais complexos em tempo real.

Munadi, Sumaryo e Perdana (2019) desenvolveram um sistema de monitoramento de consumo de energia inteligente baseado no conceito de internet das coisas (IoT). O medidor desenvolvido utiliza um circuito integrado (ST Electronics, modelo STPM01) para monitorar as potências ativa, reativa e aparente, e um microcontrolador (Espressif, modelo ESP32) para adquirir, processar e transmitir esses sinais pela internet. Os autores

destacam que o sistema desenvolvido, apesar de eficaz para as medições propostas, apresentou sensibilidade às interferências associadas ao sistema de comunicação sem fio, algo crítico para um sistema desenvolvido para operar conectado a uma RSSF.

Os trabalhos apresentados nesta seção foram utilizados como referência para o desenvolvimento deste trabalho, cujo foco é desenvolver uma rede em malha para compartilhar informações intramalha destinando os pacotes a uma base. Foram realizados testes para determinação da potência máxima transmitida/recebida por esses microcontroladores em função da distância de propagação do sinal, para condições com visada direta (sem barreira) e sem visada direta (com barreira). A metodologia adotada, bem como os principais resultados obtidos, serão apresentados nos próximos Capítulos.

1.3 Estrutura do Trabalho

Este trabalho foi dividido em cinco capítulos. No Capítulo 1, apresenta-se uma introdução ao tema abordado, as motivações para o desenvolvimento e os objetivos que se pretende alcançar. Além disso, são apresentadas algumas das principais referências utilizadas como base para o desenvolvimento do sistema proposto.

O Capítulo 2 apresenta uma revisão teórica, descrevendo os principais conceitos necessários para a compreensão da metodologia proposta neste tema.

O Capítulo 3 apresenta a metodologia utilizada, destacando as técnicas usadas para implementar uma rede em malha a partir de microcontroladores ESP32 e os métodos empregados para se determinar a potência do sinal transmitido/recebido pelos microcontroladores em função da distância de propagação do sinal, para condições sem visada e com visada.

O Capítulo 4 apresenta os principais resultados obtidos, bem como uma análise estatística das incertezas associadas ao procedimento experimental realizado.

O Capítulo 5 apresenta as considerações finais obtidas após a captação de todos os dados no desenvolvimento do projeto. O capítulo apresenta as dificuldades e limitações encontradas no caminho e as possíveis aplicações do projeto.

Finalmente, o capítulo 6 apresenta as sugestões de aplicação deste projeto em trabalhos futuros, tanto para novas estruturas de redes em malha, como para o uso deste projeto para captação de dados.

2 Revisão teórica

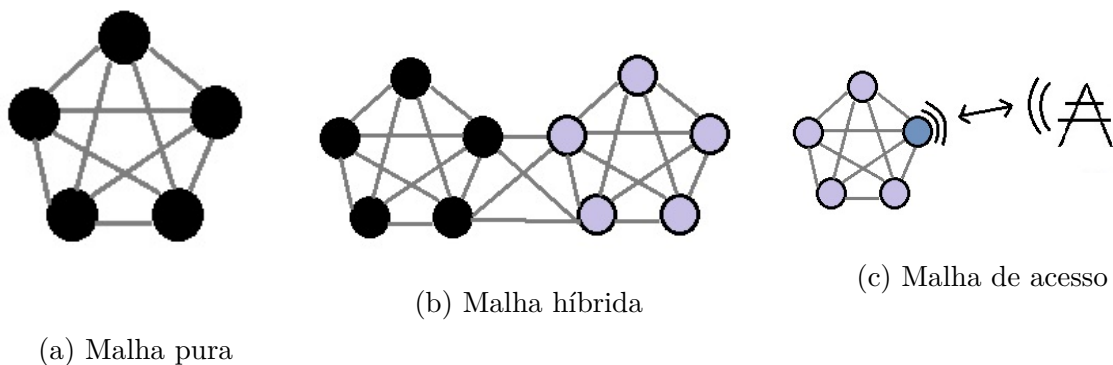
Este capítulo apresenta os principais conceitos necessários para compreender o princípio de funcionamento das redes em malha. Além disso, são apresentados conceitos relacionados ao projeto de rede de sensores sem fio, tais como arquitetura e programação desses dispositivos. Finalmente, são introduzidos conceitos necessários para ser possível compreender o funcionamento dos sistemas operacionais de tempo real, destacando suas principais vantagens e desvantagens.

2.1 Redes em malha

Uma rede em malha é composta por interconexões de dispositivos conhecidos como nós, capazes de enviar e receber dados por meio de múltiplos saltos, sem a obrigatoriedade de existência de uma base central para comunicação (METHLEY, 2009). Tais características proporcionam grande flexibilidade quando deseja-se criar ou expandir uma rede.

As redes em malha podem ser divididas em três categorias, em função da arquitetura utilizada para implementação da rede, como representado na Figura 1. A primeira delas, conhecida como malha pura, é composta por nós de mesma importância, realizando a comunicação intra-malha. A segunda categoria, chamada malha híbrida, possui uma hierarquia de nós, havendo sobreposição de malhas que proporciona rotas principais de escoamento de dados. Essa sobreposição garante tráfegos de maiores distâncias. Finalmente, a terceira categoria, definida como malha de acesso, possui uma hierarquia entre nós, porém, contém tráfego extra malha, possibilitando acesso a outras redes. Como a internet, por exemplo.

Figura 1 – Topologia física dos tipos de redes em malha conforme a conexão dos seus nós.



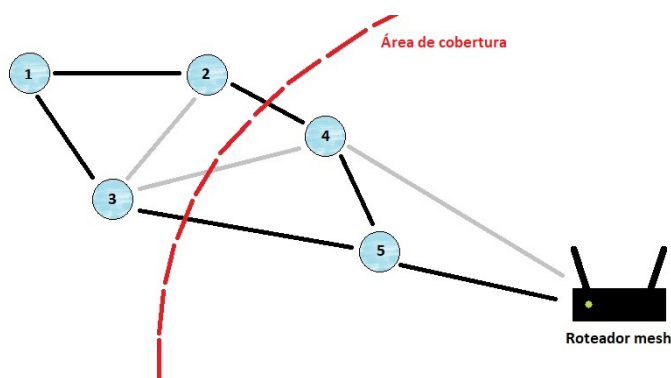
Fonte: Do Autor.

A escolha da arquitetura de uma rede em malha depende da forma de acesso ao conteúdo. Neste trabalho, optou-se por projetar uma rede em malha de acesso que realiza

a cobertura de uma determinada área sem que seja necessário conectar todos os nós a um *gateway*, minimizando a quantidade de nós conectados à internet. Dessa forma, o conteúdo transmitido percorre a malha por meio de conexão Wi-Fi, realizando múltiplos saltos até alcançar pontos conectados a uma estação-base.

A base é responsável por receber os dados dos nós conectados a malha e transferir essas informações para a internet. Segundo Akyildiz, Wang e Wang (2005), as bases podem ser classificadas como roteadores, e os nós como clientes de uma rede em malha (do inglês, *Mesh Grid*). Nesse contexto, os roteadores são os elementos responsáveis por garantir uma infraestrutura básica de conexão, garantindo a comunicação entre os clientes por meio de redes cabeadas ou sem fio. Caso não seja possível estabelecer uma conexão direta com todos os clientes, esses dispositivos podem utilizar protocolos de roteamento, estabelecendo rotas para a conexão (BENYAMINA; HAFID; GENDREAU, 2012). A Figura 2 apresenta o modelo de uma rede em malha, e considera um alcance aumentado para o roteador.

Figura 2 – Modelo de rede em malha de envio de dados para roteadores de cobertura limitada.



Fonte: Do Autor

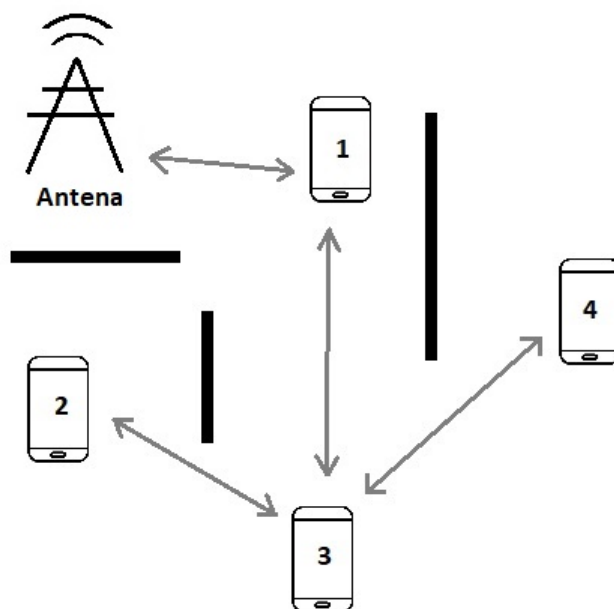
Na Figura, os clientes foram representados pelos círculos enumerados de um a cinco, e enviam dados para o roteador. Como a cobertura não consegue abranger todos os dispositivos da malha, para que os dados dos dispositivos fora da área de cobertura possam ser transmitidos, os próprios clientes passam a funcionar como roteadores, enviando o sinal a ser transmitido adiante até alcançar o roteador *mesh*.

Os melhores caminhos foram representados pelas linhas em preto, entretanto, conforme as necessidades da rede, caminhos auxiliares (representados em cinza) podem ser traçados, sendo fundamentais para casos de falha ou desligamento de um dos nós. É importante ressaltar que os clientes 4 e 5 podem funcionar como *gateways* por estarem na área de cobertura da base, sendo usados como porta para entrada dos dados na Internet.

As redes em malha sem fio são oriundas de aplicações militares, e nos últimos anos passaram a ser largamente exploradas em aplicações civis, como redes locais (LANs, do inglês *Local Area Network*) ou redes metropolitanas (MANs, do inglês *Metropolitan area*

network) (METHLEY, 2009). A Figura 3 representa uma aplicação bastante conhecida das redes em malha na área de telecomunicações.

Figura 3 – Exemplo de rede em malha de comunicação por múltiplos saltos até o destino.



Fonte: Do Autor

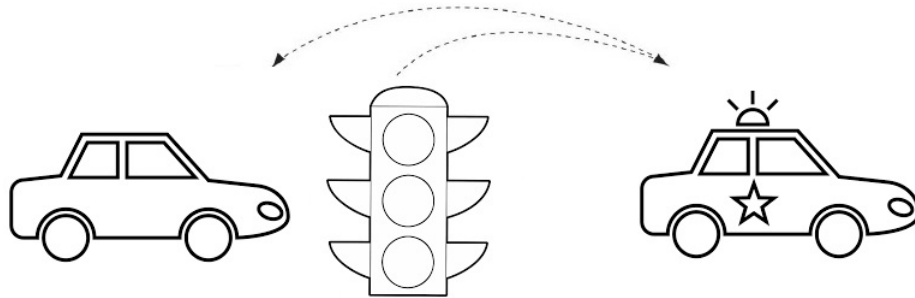
Na imagem, a estação é responsável pela comunicação entre os 4 dispositivos presente na malha. Entretanto, obstruções presentes interferem na comunicação com os dispositivos, prejudicando a intensidade do sinal. Com a necessidade de melhorar a comunicação entre base e dispositivos 2 e 4, habilita-se a comunicação por múltiplos saltos. Dessa forma, a informação desses dispositivos realiza o salto para o dispositivo 3, posteriormente para o dispositivo 1 e, finalmente, para a base. Esse processo garante uma transmissão de maior potência e, conseqüentemente, maior relação sinal-ruído (SNR, do inglês *signal to noise ratio*) do que a obtida a partir da comunicação direta com a estação base.

A Figura 4 apresenta outro exemplo de aplicação das redes em malha, onde veículos dispostos num sistema rodoviário compartilham informações em tempo real.

Esse tipo de aplicação pode ser usada para aumentar a segurança dos passageiros dos veículos ao longo do percurso, pois pode ser utilizada para informar, de modo automático, infrações das leis de trânsito aos órgãos de segurança envolvidos ou para comunicar viaturas ou postos de atendimento situações envolvendo acidentes ou obstáculos na pista (METHLEY, 2009). Nos dois casos, pode-se utilizar uma malha pura de dispositivos, que se comunicam por múltiplos saltos.

Como observado nos casos apresentados, nota-se que para que as redes em malha funcionem de maneira adequada, é necessário que elas sejam capazes de organizar de modo automático para garantir uma comunicação contínua entre elementos. Devido à

Figura 4 – Aplicação de adhoc em comunicação veicular para o controle de infrações de trânsito e acidentes.



Fonte: Adaptado de (METHLEY, 2009)

mobilidade dos clientes, novas rotas devem ser traçadas constantemente, de modo que por meio dos múltiplos saltos a mensagem transmitida possa alcançar o destino.

2.2 Rede de sensores sem fio

Com o avanço dos sistemas de medição inteligentes, as redes de sensores sem fio (RSSF) passaram a ser utilizadas para conectar dispositivos fisicamente dispostos em locais distintos, permitindo que seja possível monitorar parâmetros do ambiente, processar os dados adquiridos de forma local e transmitir essas informações até uma base.

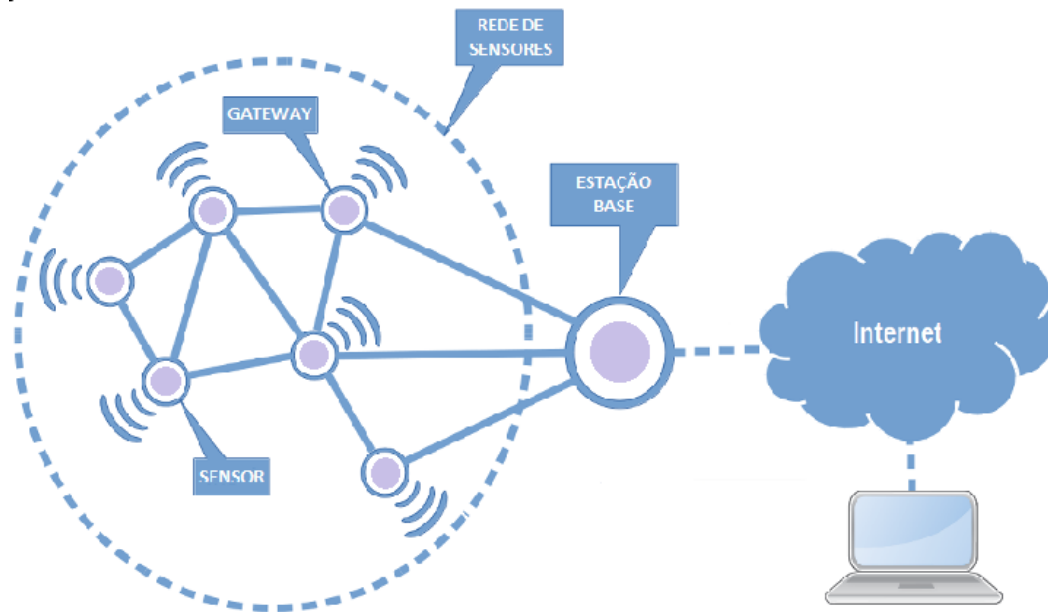
Essas redes permitem que seja realizado um monitoramento de alta intensidade no espaço e no tempo, por possibilitarem que vários sensores possam ser interligados por meio de uma rede capaz de cobrir grandes áreas. Essa abordagem vem sendo utilizada para desenvolver soluções nas áreas de controle, monitoramento ambiental, tráfego veicular, segurança, medicina, entre outras (LOUREIRO et al., 2003).

A Figura 5 apresenta uma RSSF composta por nós estáticos ou móveis. Os nós comunicam-se com o *gateway* que, posteriormente, conecta-se a um computador responsável por armazenar e enviar os dados a uma estação-base.

A Figura 6 apresenta um diagrama de blocos com os elementos tipicamente utilizados nas etapas de construção de sistemas de monitoramento sem fio. Esses dispositivos são compostos por microcontroladores, circuitos eletrônicos para condicionamento de sinais, transmissores sem fio e, em algumas situações específicas, baterias. Internamente, os microcontroladores contam com memórias voláteis e não voláteis, que podem ser utilizadas para armazenar os dados adquiridos e processados até a etapa de transmissão das informações.

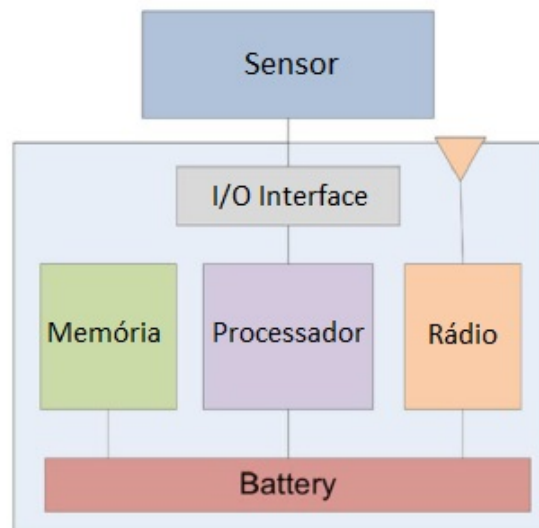
A implementação de uma RSSF apresenta uma série de desafios, que devem ser considerados antes do início da etapa de desenvolvimento do projeto. Como exemplo, pode-se citar a escolha da fonte de alimentação que será utilizada em conjunto com o medidor,

Figura 5 – Ilustração de uma RSSF de comunicação intra malha integrada ao um ponto de acesso à internet.



Fonte: (RIOS, 2018)

Figura 6 – Diagramas de bloco da RSSF e seus elementos.



Fonte: (LABRADOR; WIGHTMAN, 2009)

a escalabilidade do sistema, o algoritmo de auto-organização utilizado para sincronizar a rede, a heterogeneidade dos dispositivos conectados e a segurança dos dados envolvidos no processo de transmissão de informações.

O protocolo de comunicação utilizado por uma RSSF pode ser dividido em camadas, como apresentado na Figura 7. Esses protocolos têm como função gerenciar a energia

envolvida no processo de transmissão, garantir a mobilidade das tarefas, mantendo a comunicação eficiente e promover a cooperação entre os nós da malha.

Figura 7 – Camadas dos protocolos de comunicação de uma RSSF integradas aos planos de gerenciamento.

Camada de Aplicação	Plano de Gerenciamento de Energia	Plano de Gerenciamento de Mobilidade	Plano de Gerenciamento de Tarefas
Camada de Transporte			
Camada de Rede			
Camada de Enlace			
Camada Física			

Fonte: Do Autor

A projeção da camada física de uma rede de sensores visa reduzir o consumo energético do sistema e minimizar problemas causados pelas reflexões das ondas ou sombreamento. Esse estudo pode ser feito considerando-se modelos de propagação de ondas, modelos de consumo de energia e modelos de detecção e erros. É importante ressaltar que existem modelos que podem ser usados para representar redes cabeadas e redes sem fio com diferentes características, mas neste trabalho, serão abordados somente os modelos utilizados para representar redes Wi-Fi.

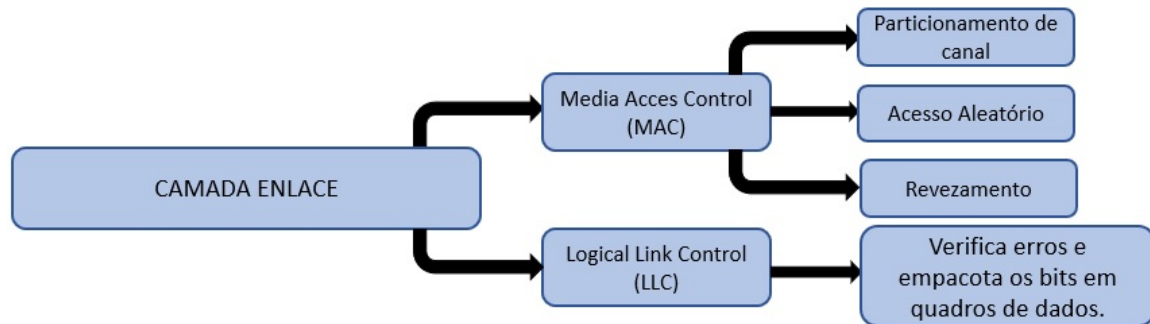
2.3 Camadas de rede

A organização de uma rede de comunicação pode ser dividida em camadas, utilizadas para controlar o processo de transferência de dados entre emissor e receptor. Nesse sentido, a camada de enlace é a responsável pela multiplexação de dados, acesso ao meio, detecção dos quadros e controle de erro. Sua função é garantir uma comunicação ponto a ponto e ponto a multiponto, por meio de algoritmos e protocolos que visam economia de energia.

A camada de enlace é a segunda camada na pilha de protocolos de comunicação, tendo duas subcamadas: a subcamada de controle de acesso ao meio (MAC, do inglês *Media access control*), que se encontra no topo da camada física, e a subcamada de

controle de *link* lógico (LLC, do inglês *Logical link control*), que faz comunicação com as camadas superiores. O controle de acesso ao meio (MAC) tem por objetivo criar uma infraestrutura para estabelecer comunicação salto a salto, fornecendo a rede a capacidade de se auto-organizar e realizar a divisão justa e eficiente dos meios de comunicação entre os nós-sensores. O fluxograma da camada de enlace é demonstrado na Figura 8.

Figura 8 – Fluxograma da camada de enlace.



Fonte: Do Autor

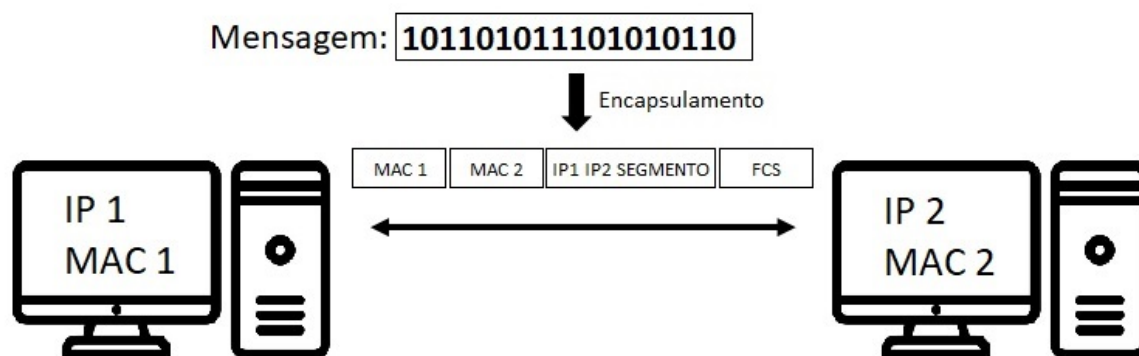
Uma vez que as redes em malha sem fio se comunicam por rádio frequência, o canal utilizado nesse processo é considerado um canal de meios compartilhados, podendo receber ondas de rádio provenientes de outras fontes. Conseqüentemente, não há definição de prioridade para acessar o meio. Para obter o controle de acesso ao meio, é necessário desenvolver protocolos para controlar o processo de transmissão.

- **Particionamento de canal:** O meio é compartilhado no tempo ou na frequência. No tempo, os nós acessam o meio por um período pré-estabelecido. A limitação desse tipo de compartilhamento está relacionada ao volume de dados que se deseja transferir, que pode variar para cada nó.
- **Acesso Aleatório:** O nó acessa o canal nos momentos em que necessita enviar uma nova informação. Como desvantagem, os nós podem acessar o meio ao mesmo tempo, essas ocorrências, é necessário que o protocolo atue de forma a recuperar o controle do processo.
- **Revezamento;** método de controle por revezamento, em que um dispositivo tem acesso a um *token*, que é um código atribuído pela estação transmissora a um nó sensor em um dado instante de tempo.

A subcamada LLC é responsável por obter os dados do protocolo da rede e adicionar informações de controle para a entrega dos pacotes no nó destino. Uma das funções da subcamada LLC envolve o enquadramento dos dados. Nesse processo, os dados são encapsulados em quadros de subcamadas, adicionando ao cabeçalho as informações necessárias para enviá-los para camadas inferiores de entrega. Os quadros são de tamanho

mínimo, visando economia energética. Além disso, são funções da subcamada LLC atuar no controle de erros, utilizando para isso mecanismos de detecção e correção de erros introduzidos na mídia, no controle de fluxo, evitando que o receptor receba mais dados do que o permitido, e no gerenciamento de *link*, que envolve a descoberta de vizinhos, manutenção, e estimativa da qualidade do sinal. A Figura 9 apresenta o processo de encapsulamento na subcamada LLC.

Figura 9 – Encapsulamento da subcamada LLC para otimização do envio de pacotes.



Fonte: Do Autor

Como citado anteriormente, para que a rede em malha sem fio opere de forma adequada, é necessário que o sistema seja capaz de realizar múltiplos saltos para abranger uma maior área de cobertura. Devido a isso, os nós intermediários devem retransmitir os pacotes de dados até que os mesmos alcancem seu destino. Essa é a função da camada de rede, responsável por rotear pacotes do nó de origem para o destino através dos múltiplos saltos.

Protocolos e algoritmos de roteamento são utilizados para contornar as restrições computacionais e energéticas das redes em malha sem fio, e são empregados em aplicações que envolvem a troca de informações entre nós. As informações geradas são enviadas como pacotes da camada de rede, podendo ser informações globais ou locais, e contendo uma ou mais variáveis de informação. Essas informações contêm os vizinhos disponíveis, caminhos para destino, energia disponível, congestionamento de *link* e média de tempo de atraso do *link*. Em geral, o processo de troca de informações ocorre de forma periódica.

Os algoritmos de roteamento são responsáveis por traçar o melhor caminho de propagação do nó de origem ao nó destino a partir das informações disponibilizadas pelo protocolo de roteamento. Esses algoritmos utilizam alguns critérios de otimização pré-definidos, que variam conforme a necessidade da rede ou da aplicação. Comumente, utiliza-se o caminho mais curto, pois é o caminho que utiliza menores quantidades de recursos da rede e apresenta menor tempo de atraso.

Após a execução do protocolo e do algoritmo de roteamento, os nós recebem uma tabela de roteamento que determina qual dos vizinhos próximos deve ser acessado para que a transmissão do pacote de dados desejado seja realizada. Essas tabelas são atualizadas periodicamente, ou na ocorrência de alterações na rede. Ao projetar uma rede sem fio, deve-se considerar os tempos necessários para que esta tabela seja atualizada e compartilhada.

A camada de transporte é responsável pela transmissão de dados entre dois dispositivos. Devido a sua característica, as redes sem fio possuem restrições em comparação com a rede com fio. Essas restrições limitam, por exemplo, o volume de dados transferido em função do tempo.

Dentre as funções da camada de transporte, pode-se citar o controle de fluxo, o controle de congestionamento, mecanismo que evita a sobrecarga de tráfego na rede, e o controle de erros, responsável por detectar e recuperar segmentos ausentes ou corrompidos, geralmente a partir de mecanismos baseados em correção ponta a ponta.

2.4 Planos de gerenciamento

Os planos de gerenciamento monitoram a energia, movimentação e distribuição de tarefas entre os nós-sensores, contribuindo com as tarefas de sensoriamento e reduzindo o consumo energético dos nós sensores. Esses planos são responsáveis pelo gerenciamento energético dos sensores, possibilitando, por exemplo, o desligamento de um nó receptor após a recepção de uma mensagem; pelo gerenciamento de mobilidade, detectando e registrando a movimentação das informações entre os nós e mantendo uma rota até a estação-base; e pelo plano de gerenciamento de tarefas, cuja função é balancear e escalonar as tarefas de sensoriamento. É importante destacar que os nós-sensores necessitam obrigatoriamente monitorar novos dados o tempo todo, podendo funcionar apenas como pontos de passagem de dados. Dessa forma, é fundamental que as tarefas sejam gerenciadas de forma eficiente, para que os nós possam trabalhar em conjunto, compartilhando os recursos da rede.

2.5 Modelos de propagação para redes sem fio

Essa seção aborda o modelo matemáticos de propagação utilizados para representar a potência recebida pelo receptor sem fio. Esse modelo pode ser empregado para representar o comportamento dos sinais que se propagam de um emissor para um receptor por meio de um canal de rádio, sendo possível estimar as limitações e influências existentes no meio. As principais fontes de perda nesse processo são causadas pelo aumento da distância de propagação entre emissor e receptor, frequência de operação e obstáculos.

2.5.1 Modelo de propagação de espaço livre

Nesse modelo de propagação, considera-se que o receptor receberá sinais transmitidos pelo emissor e também outros sinais presentes no meio, que podem ser, por exemplo, sinais de interferência gerados por outros dispositivos. Essas características permitem que esse modelo apresente resultados próximos aos obtidos experimentalmente. A potência recebida a uma distância $d \geq d_0$ [m] entre o transmissor e o receptor é descrita pela equação do espaço livre de Friis (KARL; WILLIG, 2007).

$$P_{revd}(d) = \frac{P_{tx} \times G_t \times G_r \times \lambda^2}{(4\pi)^2 \times d^2 \times L} \quad (2.1)$$

$$\frac{P_{tx} \times G_t \times G_r \times \lambda^2}{(4\pi)^2 \times d_0^2 \times L} \times \left(\frac{d}{d_0}\right)^2 = P_{revd}(d_0) \times \left(\frac{d}{d_0}\right)^2, \quad (2.2)$$

sendo P_{tx} a potência de transmissão, G_t e G_r são os ganhos da antena do transmissor e receptor, d_0 a distância de referência utilizada. $d \geq d_0$ a distância entre o transmissor e o receptor, λ o comprimento de onda e $L \geq 1$ as perdas do meio. Essa equação é válida para ambientes de espaço livre, para modelos generalizados é utilizado a equação:

$$P_{revd}(d) = P_{revd}(d_0) \times \left(\frac{d}{d_0}\right)^\gamma, \quad (2.3)$$

sendo γ o expoente de perda de caminho, que normalmente varia entre 2 para caminho no espaço livre e de 5 a 6 para áreas com cenário obstruído.

A perda de caminho é definido como a razão entre a potência irradiada e a potência recebida, podendo ser expressa em decibéis como:

$$PL(d) [dB] = PL(d_0) [dB] + 10\gamma \log\left(\frac{d}{d_0}\right), \quad (2.4)$$

este é o modelo de perda de caminho de log-distância, sendo $PL(d_0) [dB]$ a perda de caminho conhecida na distância de referência.

Há um modelo que leva em consideração a presença de obstáculos expressa por uma variável gaussiana de média zero X_σ com variância de σ^2 , chamada de variância de sombreamento demonstrada na equação:

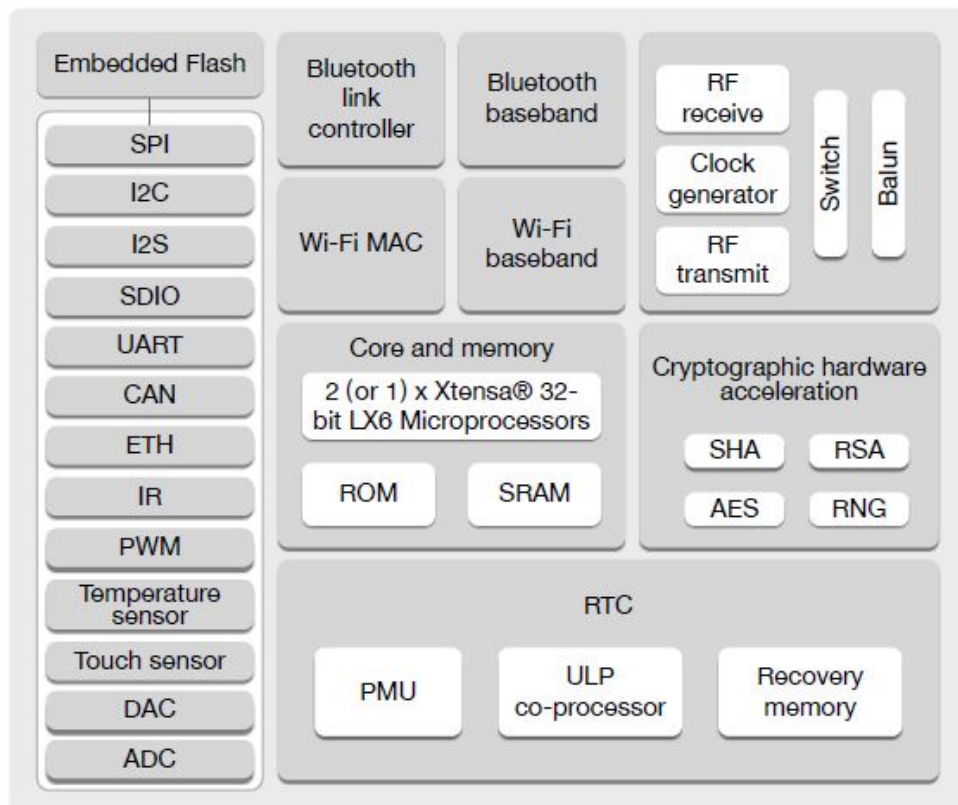
$$PL(d) [dB] = PL(d_0) [dB] + 10\gamma \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_\sigma [dB], \quad (2.5)$$

2.6 Microcontrolador ESP32

Este trabalho foi desenvolvido usando como plataforma de processamento o microcontrolador ESP32, da fabricante Espressif. Trata-se de um sistema SoC (do inglês, *System on chip*), que reúne em um mesmo encapsulamento microprocessador, memórias e periféricos com diferentes características. A Figura 10 apresenta um diagrama de blocos

representando os principais dispositivos presentes na estrutura interna do microcontrolador ESP32.

Figura 10 – Diagrama de bloco ESP32.

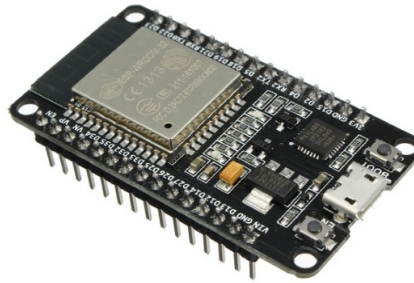


Fonte: (ESPRESSIF, 2023)

Há diversas versões de SoCs utilizando o microcontrolador ESP32 disponíveis no mercado. Neste trabalho, optou-se por utilizar o modelo kit de desenvolvimento ESP32-DevKit-C, composto pelo microcontrolador ESP-WROOM-32. Essa escolha foi motivada pelo baixo custo do kit de desenvolvimento (aproximadamente 4 dólares), capacidade de processamento do microcontrolador, facilidade de acesso ao produto no mercado local e grande quantidade de bibliotecas e APIs (do inglês, *Application Programming Interface*) disponibilizadas pelo fabricante. A Figura 11 apresenta uma imagem do kit de desenvolvimento utilizado.

O ESP32 utiliza os protocolos TCP/IP e MAC Wi-Fi 802.11 b/g/n. Além disso, podem ser utilizados para implementar redes BSS (do inglês, *Basic Service Set*), compostas por um ou mais clientes sem fio em todos os elementos se comunicam por meio de um AP (do inglês, *Access Point*). Essa funcionalidade permite que o ESP32 se conecte a um roteador Wi-Fi, por exemplo, permitindo que o mesmo se torne um ponto de acesso entre dispositivos Wi-Fi e uma rede local. A potência do sinal Wi-Fi do ESP32 foi fator preponderante para sua escolha no projeto.

Figura 11 – ESP32-DevKi-V1.



Fonte: Espressif (2023)

O consumo energético desses dispositivos pode ser bastante reduzido caso o período de serviço ativo seja minimizado, podem operar com larguras de banda entre 20 MHz e 40 MHz, e possuem taxa de transmissão de dados de até 150 Mbps.

2.7 Sistema de tempo real (RTOS)

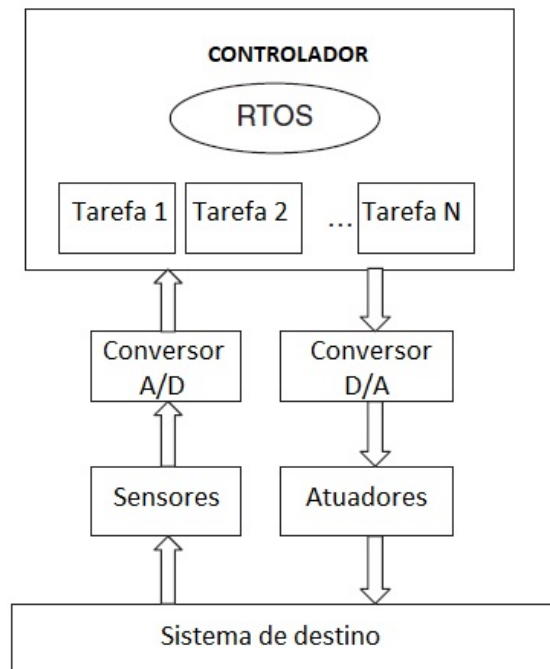
Os sistemas embarcados são reativos por natureza. Os mesmos são projetados para regular uma variável via uma resposta baseada no sinal de entrada fornecida por um usuário final ou por sensores que estão conectados a entrada do sistema. O tempo de resposta desses sistemas podem ser classificados em tempo real ou não real, sendo um sistema de tempo não real projetado e desenvolvido para entregar funções ao receber estímulos externos ou gatilhos internos, com um grau de QoS (Quality of Service) satisfeito. Já os sistemas de tempo real são projetados para dar respostas corretas num prazo de tempo definido. Em situações que o prazo seja perdido, o resultado será inútil, mesmo que correto.

Para se obter uma saída com tempo de resposta definido, o sistema de tempo real interage com ambiente, de forma contínua e oportuna, por sensores. Um sistema ABS, por exemplo, possui vários tipos de sensores como velocidades das rodas, sensores de desaceleração e sensores de pressão de freio. Como a grandeza monitorada pelos sensores são analógicas, para se realizar a manipulação desses dados utilizando um microprocessador, é necessário que os dados analógicos sejam convertidos em sinais para poderem ser lidos, processados e manipulados. A Figura12 representa a estrutura de funcionamento de um sistema de tempo real:

As principais vantagens do uso de sistemas embarcados de tempo real são:

- Simultaneidade: a capacidade de executar várias tarefas ao mesmo tempo, de forma

Figura 12 – Estrutura RTOs.



Fonte: Wang, 2017

simultânea. Podendo realizar múltiplos processos de controle e cada processo numa faixa, sendo multitarefa.

- Previsibilidade: É previsível em relação ao tempo, tendo uma tarefa concluída antes de um determinado prazo. Em outras palavras, o comportamento será como pretendido em termos de funcionalidade, desempenho e tempo de resposta.
- Segurança e confiabilidade: Em alguns casos os sistemas são de difícil acesso e necessitam funcionar por anos sem apresentar erros ou necessitar de reparos. Para isso os mesmos são desenvolvidos e testados por milhão de hora de operação.
- Ambientes hostis: Possuem a capacidade de atuarem em ambientes altamente limitados, com altas temperaturas, ruídos, vibrações, descargas elétricas e umidade.

A determinação do sistema embarcado de tempo real depende do sistema operacional de tempo real (RTOS). Um RTOS é um sistema que suporta uma programação que atenda as restrições de tempo real e forneça resultados computacionais logicamente corretos com o uso de mecanismos e serviços para realizar agendamentos de tarefas, gerenciamento de recursos de comunicação entre tarefas.

A tarefa é uma instância de um programa em execução que requer recursos, como CPU, memória e arquivos para completar a tarefa. O encabeçamento de uma tarefa consiste na atribuição do espaço de memória e outros recursos, estabelecendo uma prioridade

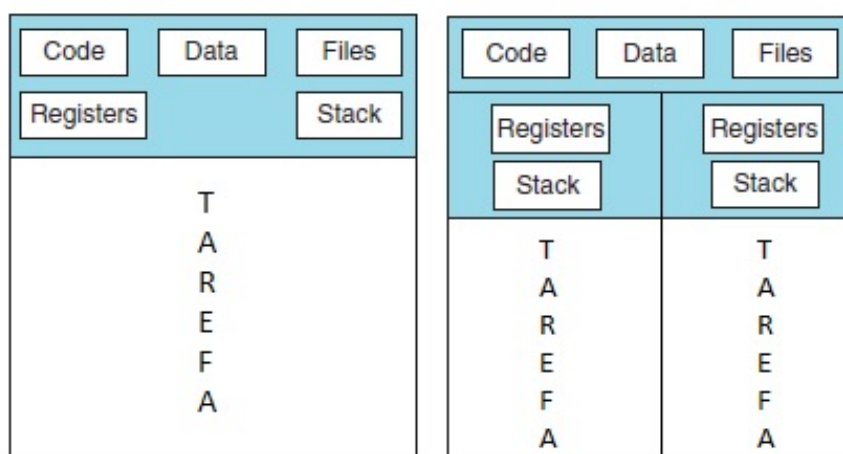
para o processo em sistemas multitarefas, posteriormente carregando o código binário na memória e iniciando a execução da atividade proposta.

O suporte a tarefas permite que funções determinadas sejam executadas em paralelo em microcontrolador multicore (mais de núcleo). A tarefa em execução prossegue até que sua fatia de tempo expire, tendo seu estado salvo nos registros pelo agendador. Posteriormente o agendador salta para a próxima tarefa na fila de execução. A tarefa de prioridade mais alta que está pronta para execução é restaurada e retomada de onde parou. A fatia de tempo de execução é pequena suficiente para que um microcontrolador possa executar várias tarefas por segundo, sendo conhecido como simultâneo.

O temporizador de hardware é fundamental para o processamento simultâneo, pois impede a monopolização da CPU. Tarefas presas em loop não impedirá que outras tarefas sejam executadas. O escalonamento preemptivo permite que a função tarefa seja escrita como se fosse o único programa do sistema.

O ESP32 dual-core pode executar duas tarefas de forma simultânea, potencializando o trabalho como exemplificado na Figura 13. As tarefas podem ser determinadas por núcleo criando a afinidade de tarefa por núcleo, ou podem ser direcionadas pelo RTOS entregando a tarefa para o núcleo disponível. Tarefas com afinidade no ESP32 possuem preferência na execução através de um protocolo utilizado pelo RTOS, são posteriormente executadas as tarefas sem afinidade. Se o núcleo não identifica nenhuma tarefa com sua afinidade, ele escolhe outra tarefa sem afinidade, mantendo o protocolo de preempção padrão, ou seja, executa a de maior prioridade. Em casos de tarefas com mesma prioridade, o núcleo escolhe a task por ordem de chegada.

Figura 13 – ESP32 multitask.



Fonte: Do Autor

O controle de acesso e sincronização dessas tarefas são feitos através do uso de semáforos binários e de contagem. Em semáforos binários possui dois estados, disponível e indisponível, e a execução da tarefa é bloqueada se o semáforo estiver indisponível. Esse

recurso é comumente utilizado para sincronizar a execução de uma tarefa com uma função responsável por tratar uma interrupção. Semáforos de contagem realizam o controle de acesso de recursos, podendo contar a partir de zero ou realizar contagem regressiva. Ambos servem como controle de limite.

No início de um processo, o sistema operacional aloca memória e em seguida carrega o módulo de carregamento da memória alocada no processo fazendo o gerenciamento da memória para aumentar a capacidade de execução. Em sistemas de tempo real a alocação e desalocação de memórias é feito através de funções disponibilizadas na biblioteca do compilador.

2.8 Biblioteca PainlessMesh

Foi utilizado neste trabalho a biblioteca colaborativa de código aberto `painless-mesh`, disponibilizada em (PAINLESSMESH, 2023), para conectar os kits de desenvolvimento ESP32-DevKit-V1, por meio de uma rede local sem fio (WLAN, do inglês *Wireless Local Area Network*). O objetivo da biblioteca é fornecer ao projetista uma rede em malha já gerenciada e estruturada, necessitando de algumas adaptações conforme cada projeto.

A `painlessMesh` utiliza o módulo de comunicação Wi-Fi para controlar o processo de transmissão e retransmissão de mensagens, possui auto-organização e autorrecuperação, permitindo que a rede opere de forma autônoma. Além disso, em situações de remoção, falha ou queda de sinal de algum nó, a rede se reorganiza, visando garantir a transmissão.

2.8.1 Layout da rede

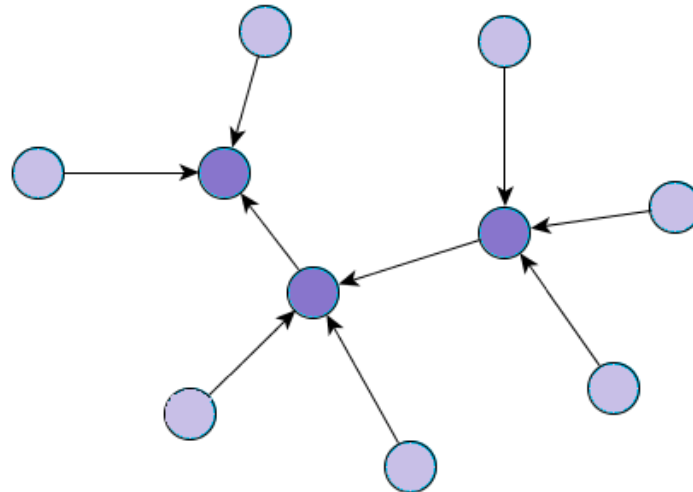
A biblioteca forma uma rede mesh que utiliza topologia do tipo estrela, que evita caminhos circulares e realiza a comunicação por múltiplos saltos, dispensando controlador central ou roteador. Seus dispositivos podem atuar como ponto de acesso (PA), para outros ramos da malha, ou como cliente ao conectar-se a um PA, tendo limitação de 10 conexões para os ESP32 como citado em (PAINLESSMESH, 2023).

Quando a rede é criada, é gerada uma lista de conexões que fica armazenada em cada nó. Essas listas são atualizadas conforme ocorrem mudanças na rede ou de forma periódica. A atualização é solicitada conforme um nó detecta alguma alteração na sua rede de vizinhos, atualizando a sua lista de conexões e repassando as alterações para toda malha. Por outro lado, a solicitação periódica é feita para remanejar as conexões em situação de fortalecimento ou enfraquecimento de sinal nas conexões dos nós, podendo alterar a conexão dos ramos da malha. Conseqüentemente, todos os nós têm o conhecimento da topologia da malha.

Quando um novo nó detecta a malha, ele verifica a intensidade do sinal dos pontos de acessos disponíveis e se conecta ao que tem o sinal mais forte, verificando se seu ID não

está presente na lista de conexões. Ao conectar apenas a PA desconhecidos, a malha evita a criação de loops na rede, criando uma única rota entre cada par de nós da malha. A Figura 14 apresenta uma conexão em malha gerada pela biblioteca composta por clientes em tonalidade clara e pontos de acesso em tonalidade escura.

Figura 14 – Rede em malha composta por clientes nas extremidades conectados aos pontos de acessos ao centro da rede.



Fonte: Do autor

2.8.2 Sincronização de tempo

A sincronização da malha é necessário para evitar conflito de tarefas dos ESP32 conectados a rede em um sistema RTOs. Para contornar esses conflitos, a biblioteca atualiza os relógios das placas após a conexão de um nó a malha. O tempo do nó é sincronizado ao seu vizinho através do cálculo do atraso da viagem entre eles, tendo precisão de milissegundos. O cálculo de atraso entre os nós pode ser definido como

$$atraso = T_3 - T_0 + T_2 - T_1 \quad [\mu s], \quad (2.6)$$

sendo T_0 o tempo quando o pacote foi gerado no transmissor $[\mu s]$, T_1 o tempo no momento que o receptor recebe a mensagem $[\mu s]$, T_2 o tempo no momento que o receptor gera a resposta $[\mu s]$. e T_3 o tempo quando o transmissor recebe a resposta $[\mu s]$. Se o valor mínimo de $10 \mu s$ não for alcançado, o processo se repete até ter uma boa precisão de sincronização da malha. Este processo ocorre também de forma periódica a cada 10 minutos, para essa situação é adicionado um atraso aleatório de $\pm 35\%$ para evitar colisões de sincronização de tempo. Mesmo que essas aconteçam, a biblioteca possui medidas para considerar a mensagem.

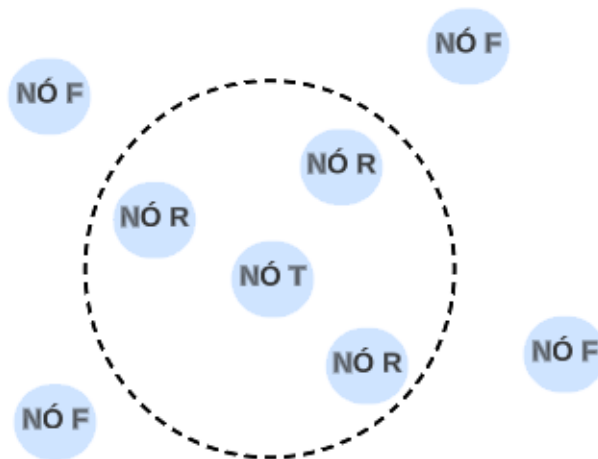
As rotas do envio de pacotes utilizado pela biblioteca para definir as melhores conexões são determinadas pelo melhor tempo obtido através do cálculo do deslocamento do tempo do nó emissor ao nó destino, representada pela equação

$$\text{deslocamento} = \frac{T_1 - T_0}{2} + \frac{T_2 - T_3}{2} \quad [\mu s], \quad (2.7)$$

2.8.3 Envio de pacotes

O envio de pacote é possibilitado via dois tipos de mensagens que utilizam a linguagem do tipo JSON, contendo informações de rota e a mensagem a ser enviada. O primeiro modo de envio é por mensagens de transmissão geral, sendo utilizado para o envio de mensagens a todos os nós ao alcance do transmissor. Esse modelo não possui critérios de envio, não tendo um nó de destino definido, nem replicando a mensagem por toda malha. O conteúdo da mensagem fica restrito somente ao nó transmissor e aos vizinhos presentes na sua área de cobertura. A Figura 15 representa o modo de envio, sendo o nó transmissor (nó T), os nós receptores na sua área de cobertura (nó R) e os nós fora da sua área de cobertura (nó F). A mensagem fica restrita ao círculo de alcance do nó transmissor definido pela linha tracejada na figura.

Figura 15 – Envio de mensagem por transmissão geral para todos os nós na área de cobertura representada pelo círculo tracejado.

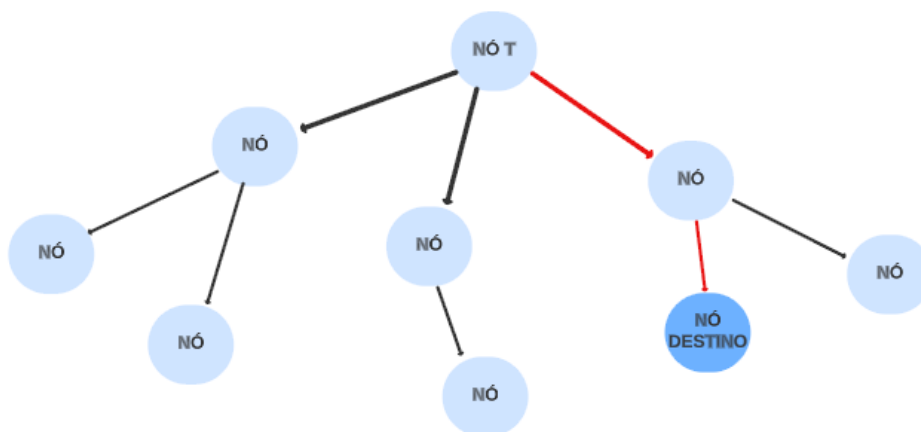


Fonte: Do autor

O segundo modo de transmissão utilizado pela biblioteca é a mensagem de endereço único. O seu arquivo JSON contém o endereço do nó de origem e o endereço do nó de destino. O critério de envio é baseado na rota entre o nó transmissor e o nó destino, o caminho é escolhido utilizando a lista de conexões disponíveis em todos os nós presente

na malha. A Figura 16 ilustra o envio, após definido o ID do nó destino, o nó transmissor procura em seus ramos a rota a ser percorrida, demonstrado pela linha vermelha na imagem, após traçado o caminho a transmissão ocorre e o nós no caminho são utilizados para realizar múltiplos saltos até o destino.

Figura 16 – Envio de mensagem por endereço único pela definição da rota até o destino.



Fonte: Do autor

É importante ressaltar que a biblioteca possibilita a utilização desses dois modos. Porém, o projetista é responsável por desenvolver os algoritmos de envio de mensagens com as ferramentas e funções disponíveis, permitindo diversas combinações, definições de critérios de comunicação e uso dos pacotes conforme cada projeto.

2.9 Considerações parciais

Neste capítulo, foram apresentados os principais conceitos teóricos utilizados para o desenvolvimento deste trabalho. Inicialmente, foram descritas as principais características de uma rede em malha, apresentando conceitos válidos tanto para redes cabeadas quanto para redes sem fio. Foram destacadas as principais características das RSSF e introduzidos conceitos necessários para a compreensão das suas camadas, bem como técnicas para gerenciamento de energia e caminho de propagação de dados entre nó emissor e nó receptor.

Posteriormente foi apresentada a placa utilizada, suas características, limitações, uso de sistemas de tempo real em embarcados e a biblioteca responsável por implementar a malha. Foi abordado o modo de operação de um sistema RTOs, o layout utilizado pela biblioteca e seu funcionamento baseado no cálculo do atraso. Finalmente foi apresentado o envio dos pacotes e o seu tipo de operação, sendo mensagens de transmissão geral e mensagens de endereço único. Ambos foram utilizados durante o trabalho e serão descritos nas próximas seções.

3 Desenvolvimento

Esse capítulo apresenta o desenvolvimento deste trabalho. Inicialmente, utilizaram-se microcontroladores ESP32 de antena interna e externa, desenvolvidos pela fabricante Espressif, para estimar os limites máximos da distância de propagação entre nós emissor e receptor, em função da potência do sinal recebido. O transmissor utilizou um algoritmo modelo de envio de mensagens disponibilizado na biblioteca de código aberto `painlessmesh` (PAINLESSMESH, 2023), e o receptor, um algoritmo de medição de intensidade de sinal disponibilizado na IDE Arduíno. Foi adotado até -70 dBm como valor de potência aceitável para que a rede em malha possa operar em condições adequadas sem a ocorrência de perda de pacotes (OLIVEIRA, 2017).

As medições foram realizadas em ambientes urbanos, inicialmente em condição ideal, onde não há barreiras entre emissor e receptor, e posteriormente em condição real, com a presença de barreiras e interferência de sinais provenientes de roteadores operando na mesma frequência dos módulos de comunicação sem fio dos microcontroladores.

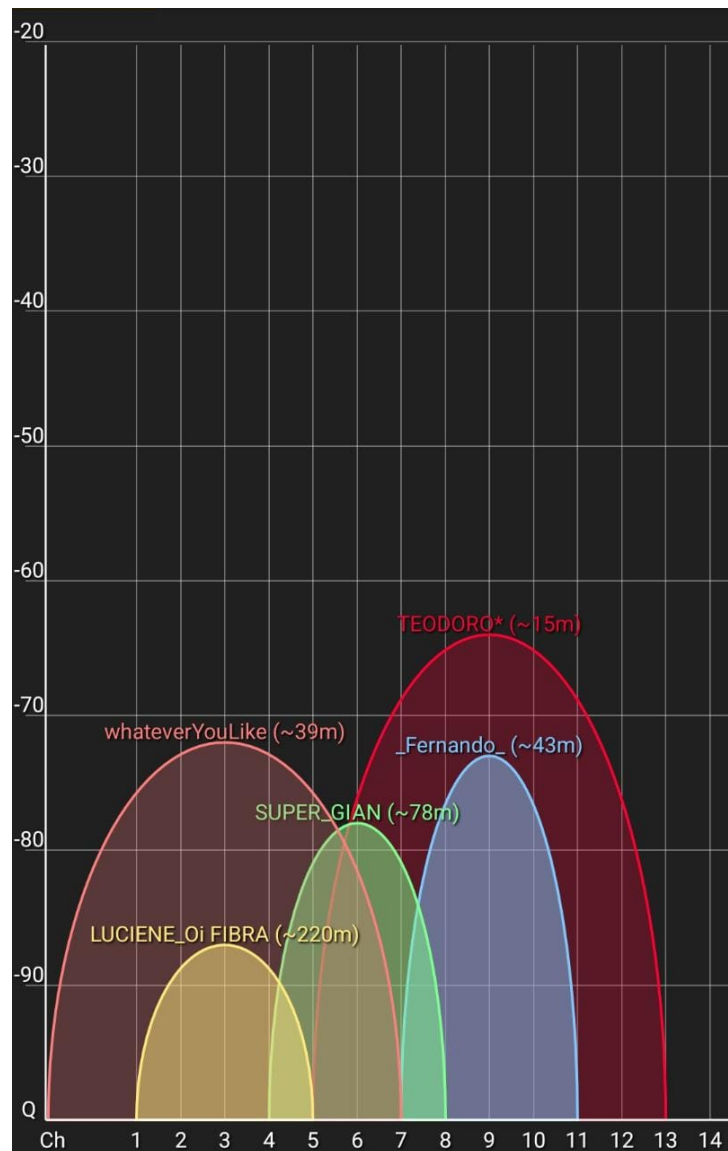
Após a capitação desses dados foi realizado testes em malha utilizando o algoritmo modelo e posteriormente com o desenvolvimento de dois algoritmos de rota. Os algoritmos foram desenvolvidos para reproduzir uma malha com diversos nós, em distâncias variadas. Para o aumento da complexidade da malha, foi utilizado placas com antena interna e externa, visando estabelecer o comportamento, limitações e suas possíveis aplicações.

3.1 Caracterização da RSSI em relação à distância das placas ESP32-Devkit

Para verificar o alcance do módulo Wi-Fi do ESP32, foram realizados testes relacionando a potência do sinal recebido por cada nó em função da distância de propagação dos sinais entre nó emissor e receptor. Foram realizados dois conjuntos de testes, sendo o primeiro com visada direta e sem interferências, considerando um ambiente aberto em área livre, e o segundo em ambiente urbano, admitindo as interferências geradas por barreiras e sinais de rádio-frequência dentro da faixa de operação do módulo de comunicação Wi-Fi presente no microcontrolador.

Inicialmente, um *smartphone* com sistema Android foi utilizado para monitorar a potência dos sinais dos nós em função da distância por meio do aplicativo Wi-Fi Analyzer. Nessa configuração, o *smartphone* foi conectado à rede em malha, sendo considerado como um receptor de sinais. Um exemplo de diagrama da magnitude obtida a partir deste aplicativo pode ser visualizado na Figura 17. A rede da placa esta definida como *whateverYouLike*.

Figura 17 – Interface do programa Wi-Fi scan apresentando as redes disponíveis, suas potências e canais utilizados.



Fonte: Do Autor

Os ensaios preliminares mostraram que a medição da potência a partir desse aplicativo poderia resultar em valores muito diferentes dos obtidos considerando-se apenas os microcontroladores, uma vez que os *smartphone* possuem antenas ativas e melhores circuitos de recepção e amplificação de sinais em comparação aos kits de desenvolvimento utilizados neste trabalho.

Dessa forma, optou-se por embarcar num dos microcontroladores um algoritmo dedicado ao monitoramento do indicador de intensidade do sinal recebido (RSSI, do inglês *Received Signal Strength Indication*). O algoritmo foi ajustado para adquirir um novo valor de RSSI por segundo, e para cada distância analisada, foram adquiridos 300 pontos. Esses pontos foram usados nos cálculos do valor médio e do desvio padrão dos valores de RSSI para cada distância analisada.

As distâncias entre emissor e receptor das placas com antena interna foram ajustadas de 1 m a 15 m, em passos de 1 m, para os ensaios com visada direta, e de 1 m a 10 m, em passos de 1 m, para os ensaios com barreiras e interferências. Todas as medições foram realizadas em triplicata, buscando minimizar os erros experimentais durante o processo de aquisição dos dados.

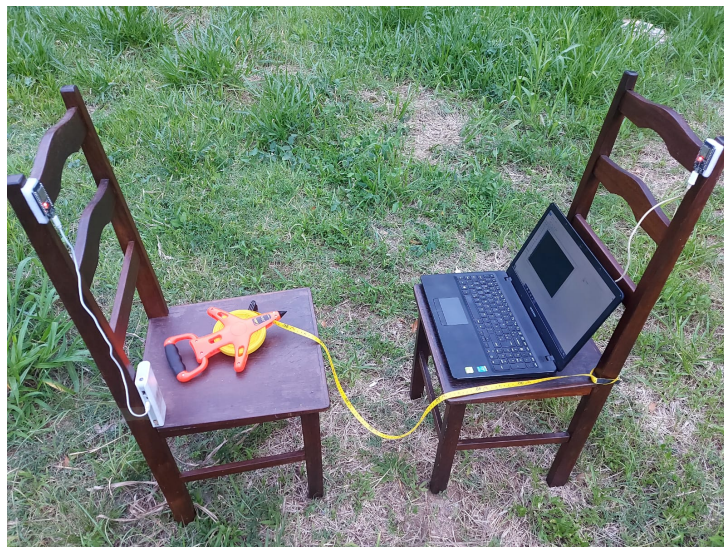
Para as placas de antena externa, as distâncias foram ajustadas de 1 m a 20 m, em passos de 2 m, para os ensaios com visada direta e ensaios com barreiras e interferências. As medições das placas com antena externa foram realizadas em distâncias e passos maiores devido à percepção da capacidade de transmissão da antena. Este ensaio foi realizado em duplicata.

Os valores de RSSI adquiridos foram enviados por meio de comunicação serial RS-232 para um computador, e o *software* PuTTY foi utilizado para adquirir e armazenar essas informações. O *software* Matlab foi empregado para analisar os dados e calcular os valores médio e de desvio padrão para cada ensaio. Ao final, realizou-se um ajuste polinomial considerando os valores médios obtidos e comparou-se os dados obtidos com a equação de perda de Friis para validação dos resultados.

3.1.1 Ensaio considerando visada direta

Os testes de distância considerando visada direta foram realizados no campus do Instituto de Ciência Exatas e Aplicadas (ICEA), em área aberta. Duas cadeiras foram utilizadas como suporte para os kits de desenvolvimento, fixados a um metro de altura por meio de fita dupla face, como pode ser visto na Figura 18.

Figura 18 – Reprodução do experimento no Campus do ICEA, utilizando duas cadeiras como suporte para as placas, variando a distância com o auxílio da trena.

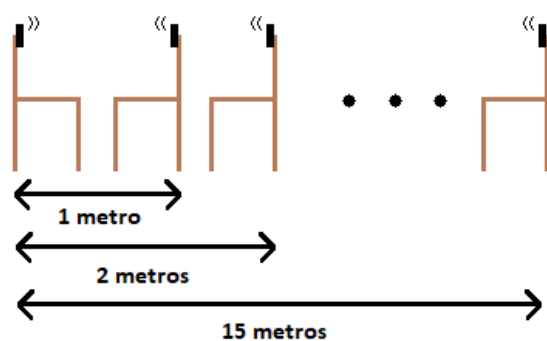


Fonte: Do Autor

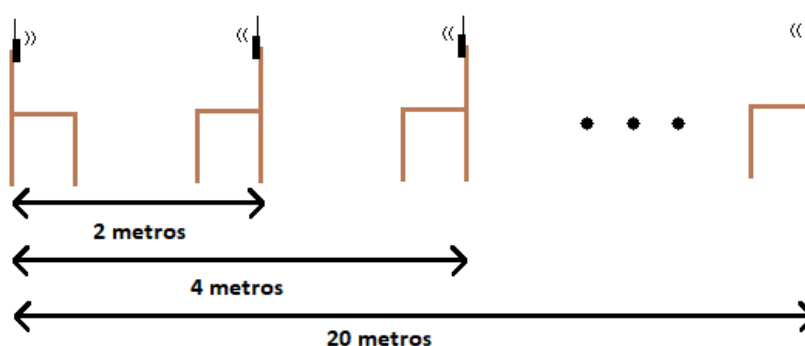
Uma trena de 20 metros foi empregada para medir a distância entre as duas cadeiras, considerando as variações de 1 m para placas de antena interna e 2 m para placas de antena externa. Além disso, optou-se por manter o paralelismo entre emissor e receptor, evitando assim efeitos causados por variações angulares entre os elementos.

Ao longo do processo de medição, inicialmente os nós foram posicionados a uma distância de 1 m na placa de antena interna e 2 m na placa de antena externa. Essa distância foi variada em passos, conforme cada placa, até alcançar o valor final, sendo 15 m para placas de antena interna e 20 m para placas de antena externa. Na sequência, iniciou-se os testes a partir da distância final, reduzindo-se essa distância em passos, até atingir a distância inicial novamente. Com esse procedimento, espera-se verificar possíveis efeitos associados à histerese ou zona morta que possa afetar a intensidade do sinal. A exemplificação do experimento é encontrada na Figura 19.

Figura 19 – Representação da variação da distância para cálculo da RSSI para placas de antena interna e antena externa.



(a) Variação de 1 metro de distância para placas de antena interna



(b) Variação de 2 metros distâncias para placas de antena externa

Fonte: Do Autor.

3.1.2 Ensaio considerando obstáculos entre transmissor e receptor

A medição com obstáculos foi realizada em uma residência em meio urbano. O kit responsável por adquirir os valores de RSSI foi posicionado na parte interna do terreno e o módulo composto pelo nó transmissor foi posicionado na parte externa do terreno,

sendo ambos foram fixados na lateral da cadeira de maneira análoga à demonstrada no procedimento sem barreira. O nó receptor, posicionado no interior do terreno, foi mantido a uma distância fixa de 1 m em relação ao muro frontal da residência. Em contrapartida, o nó emissor foi afastado do muro frontal em passos de 1 m para placa de antena interna e 2 m para placa com antena externa, até que a distância entre emissor e receptor atingisse o limite máximo pré-estabelecido para cada placa. Assim como no caso anterior, o módulo emissor foi inicialmente afastado do muro e, na sequência, aproximado. Foram adquiridos 300 pontos para cada distância, realizado em triplicata para placa de antena interna e duplicata para placa de antena externa. Esses dados foram utilizados nos cálculos dos valores médios e de desvio padrão para cada posição analisada.

3.2 Ensaios da rede em malha

Essa seção apresenta o desenvolvimento da rede em malha após obtido as limitações de distância do ESP32. Para montagem da rede foi necessário estabelecer sua estrutura de operação, como a montagem das placas, disposição geográfica dos elementos e o desenvolvimento dos critérios do algoritmo de rota. Inicialmente, foram realizados testes em cima do algoritmo modelo disponibilizado pela biblioteca para observar o seu funcionamento. Posteriormente, foi definido como nó base o destino dos pacotes a serem enviados via múltiplos saltos, tendo como objetivo garantir a integridade dos dados e a centralização de todas as informações em um local, possibilitando sua análise e manipulação.

Dois algoritmos foram desenvolvidos para a convergência das mensagens até o destino. Porém, o primeiro mostrou-se obsoleto e insatisfatório em termos de eficiência energética e escalabilidade, pois replicava o pacote recebido com a adição da sua mensagem. Para contornar esse problema, o segundo algoritmo foi desenvolvido calculando a melhor rota, replicando somente a mensagem recebida, diminuindo assim o pacote enviado. Ambos os algoritmos são abordados de forma explícita nesta seção.

Após definido a estrutura e o algoritmo da malha. A mesma foi disposta em um ambiente urbano para simular um projeto real com interferências. A disposição dos nós foram feitas de forma variada devido à utilização de placas de antena interna e externa. Ambas placas foram utilizadas com o propósito de aumentar a complexidade da rede e testar a escalabilidade da malha. Os pacotes a serem enviados por cada nó foi definido pelo projetista, tendo que chegar de forma íntegra no seu destino.

3.2.1 Modelo de rede em malha disponibilizado pela biblioteca `painlessmesh`

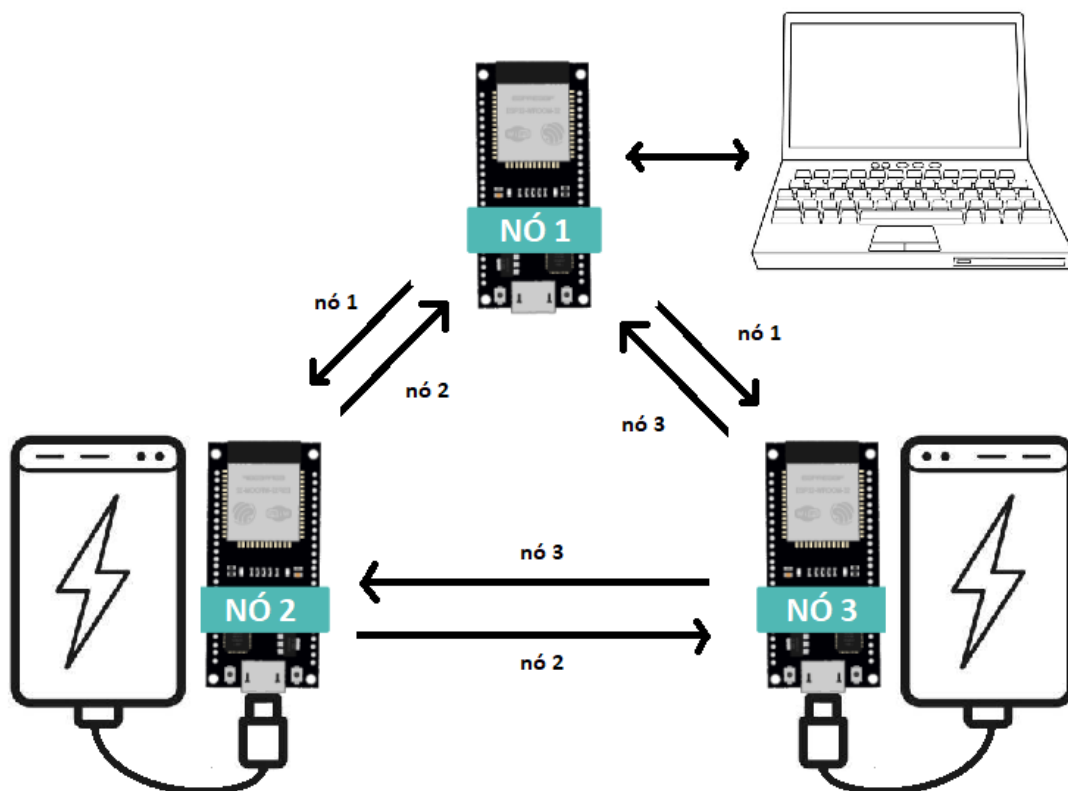
Para o primeiro ensaio realizado, foi utilizado um algoritmo modelo disponibilizado pela biblioteca, baseado em mensagens de transmissão geral, sendo definido a frequência de envio, os parâmetros de conexão e a mensagem a ser enviada. Nesse ensaio, foram utilizados três nós configurados para enviar o seu número de identificação (ID, do inglês

Identification) para os nós vizinhos conectados à malha. Um dos nós estava conectado ao computador e recebia as informações enviadas pelos dois nós vizinhos, conectados a carregadores portáteis, exibindo essas informações por meio do serial monitor da IDE do arduino possibilitando verificar quais dos nós da rede estão enviando e recebendo informações.

Um sistema operacional de tempo real (RTOS, do inglês *Real Time Operating System*) foi utilizado para controlar o módulo Wi-Fi. Nessa etapa, a biblioteca foi utilizada para definir a configuração dos nós, e todos os kits conectados a rede foram conectados com o mesmo *login* e senha de acesso.

Após definidos os parâmetros, os microcontroladores foram dispostos em posições pré-estabelecidas, considerando-se inicialmente uma distância máxima de 1 m entre os dispositivos. O microcontrolador base foi conectado e alimentado por um computador, e os outros dois microcontroladores foram alimentados por baterias de 5 V representados pela Figura 20.

Figura 20 – Estrutura de rede em malha desenvolvida através do algoritmo modelo disponibilizado pela biblioteca.



Fonte: Do Autor

Todos os algoritmos implementados neste trabalho foram desenvolvidos a partir da IDE (do inglês, *Integrated Development Environment*) Arduino. Optou-se por trabalhar com essa IDE devido a praticidade e simplicidade de uso, mas convém ressaltar que

versões semelhantes desses algoritmos poderiam ser implementadas por meio de uma IDE diferente, como a Espressif-IDE, por exemplo.

A documentação completa referente as bibliotecas e APIs, e os *links* de acesso aos algoritmos de exemplo utilizados ao longo deste trabalho, podem ser encontrados em painlessmesh (2023).

3.2.2 Projeto de rede em malha em meio urbano com interferência externas

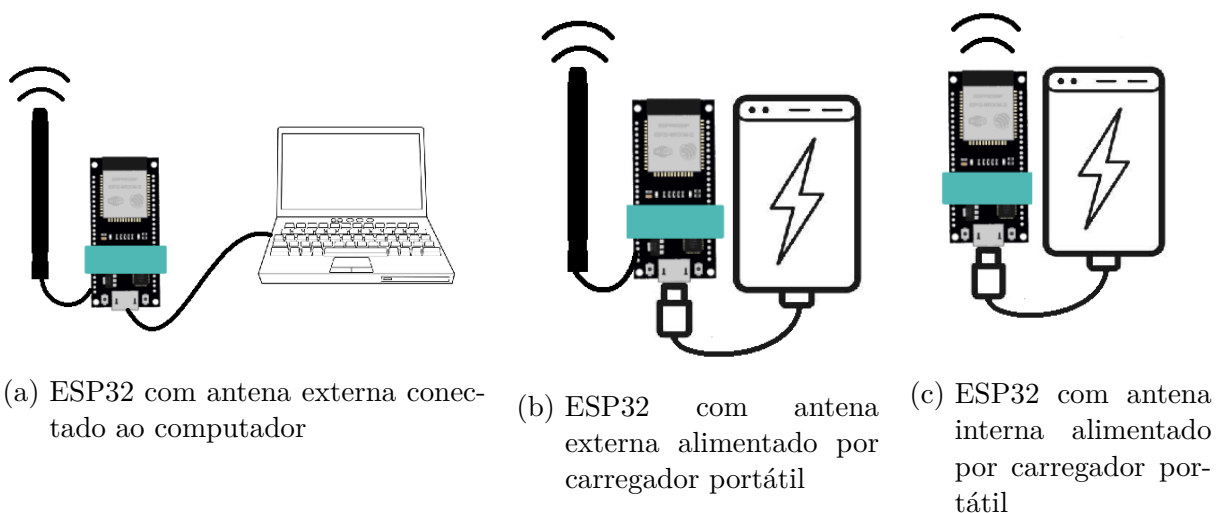
Após reproduzido os ensaios com o algoritmo modelo para interpretação do funcionamento da biblioteca, foi desenvolvido o projeto final da rede em malha para aplicação real através do aprimoramento deste algoritmo através do uso de lógica de programação para direcionar os pacotes. O meio urbano foi escolhido para sua reprodução por conter uma grande variedade de aplicação. Para esse projeto foi simulado uma malha com aplicação residencial visando estabelecer a comunicação de residências com uma boa conexão.

Os parâmetros e a estruturação da malha foram mantidos para todos os testes, havendo alterações apenas no algoritmo de rota e na disposição geográfica das placas conforme cada ensaio. Dois algoritmos foram desenvolvidos, o primeiro baseado em lógica de programação para o tratamento e replica de mensagens, e o segundo baseado no uso de funções disponíveis na biblioteca painlessmesh. Ambos são descritos a seguir.

3.2.2.1 Estruturação da malha

A malha foi composta por três tipos de nós, sendo nó com antena externa conectado ao computador, responsável por receber todos os dados da malha, e nós com antena externa e interna conectados a carregadores portáteis como na Figura 21.

Figura 21 – Tipos de conexões dos nós presentes na malha.



Fonte: Do Autor.

O nó conectado ao computador, definido como nó base, foi alimentado pela conexão USB. Este nó foi definido como destino das mensagens, tendo os pacotes reproduzidos na tela do computador via o serial monitor da IDE arduino. Os demais nós foram alimentados com carregadores portáteis de 5V como demonstrado na Figura 22. As antenas foram posicionadas para cima como forma padrão de transmissão, e o ID de cada placa foi fixado junto a mesma para uma melhor identificação. O tamanho da malha e disposição dos elementos no ambiente variou conforme os ensaios dos algoritmos utilizado e os tipos de nós foram escolhidos conforme a sua capacidade de comunicação reconhecida nos testes de RSSI.

Figura 22 – Montagem das placas ao carregador portátil.



Fonte: Do Autor

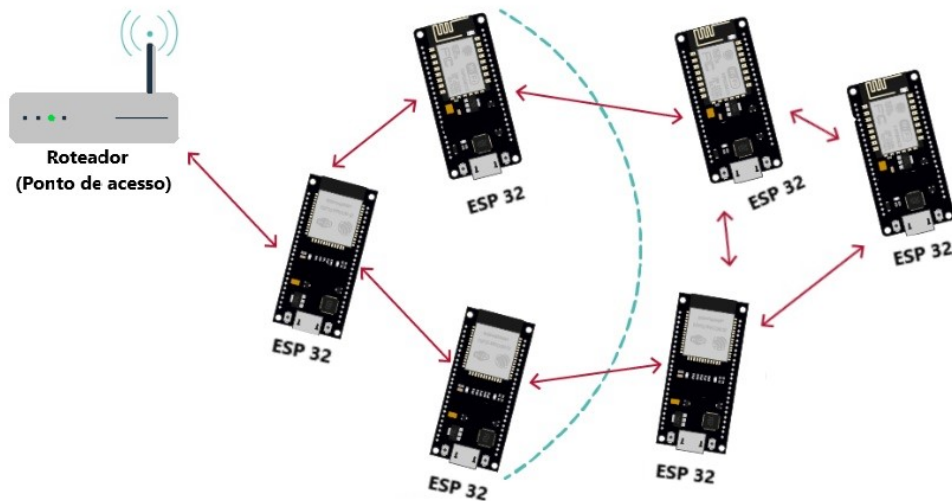
3.2.2.2 Ensaio do algoritmo de adição nó e réplica de pacote

A biblioteca de código aberto permite diversas formas de desenvolver o código para estabelecer a conexão da malha, para este projeto, o algoritmo modelo foi utilizado como base para o aprimoramento da transmissão. Com o seu uso, foi necessário definir rotas, critérios de comunicação, parâmetros de conexões e os dados dos pacotes conforme o projeto. Esse fator é levado em consideração, pois em casos envolvendo redes sem fios que operem com o roteador fora da área de cobertura de todos os nós, é necessário aprimorar o algoritmo para realizar a comunicação entre as placas até que o pacote alcance um nó coberto pelo sinal do roteador.

A Figura 23 ilustra um exemplo desse tipo de situação. Neste exemplo, um roteador com cobertura limitada (indicada pela linha azul tracejada) é capaz de receber informações

enviadas por nós localizados fora da área de cobertura do sinal, via múltiplos saltos, cuja comunicação é representada por meio de setas bidirecionais (em vermelho).

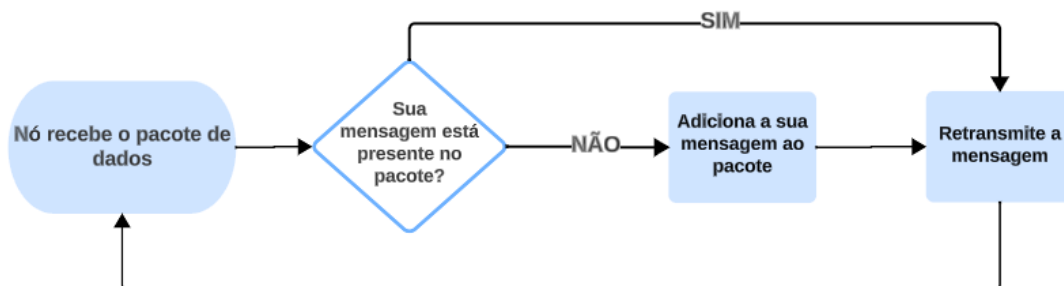
Figura 23 – Protocolo de comunicação da biblioteca painlessMesh.



Fonte: Do Autor

Para obter esses dados fora da área de cobertura, o primeiro algoritmo desenvolvido utiliza do modo de envio de mensagem direta proporcionado pela biblioteca. O objetivo é enviar uma mensagem por toda a malha até o destino, e como critério, o nó recebe a mensagem e retransmite os pacotes juntamente com as demais informações adquiridas localmente. Para evitar mensagens duplicadas e loops, o nó verifica a existência da sua mensagem no pacote de dados recebido, caso sua mensagem não esteja presente na malha ele a adiciona ao pacote recebido e a envia o novo pacote. O fluxograma da Figura 24 apresenta as etapas do processo.

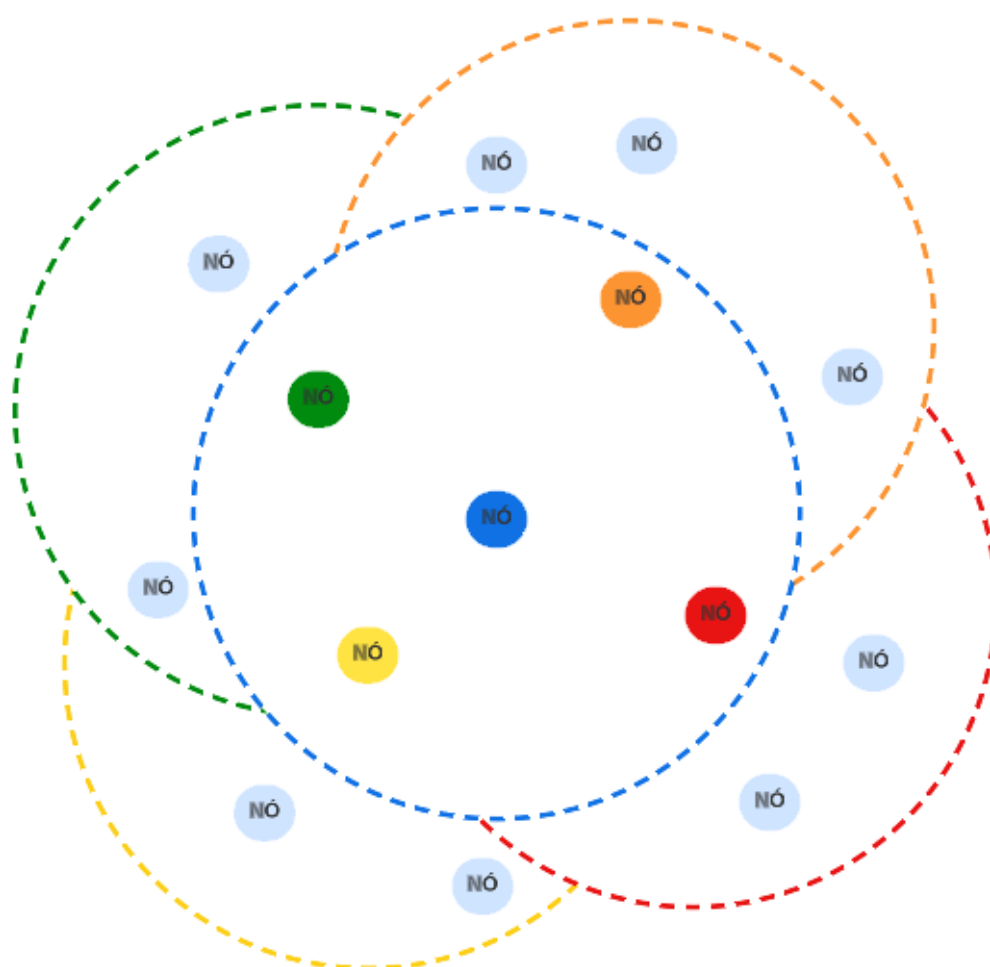
Figura 24 – Fluxograma de retransmissão de pacotes.



Fonte: Do autor

Basicamente, cada nó possui a sua área de cobertura enviando mensagens para os demais nós presente nela. Um nó ao fazer parte da área de cobertura de seu vizinho, recebe sua mensagem e a passa por uma lógica de programação que verifica a existência dos seus dados local, caso seus dados não esteja presente na malha ele o adiciona ao pacote recebido e repassa o novo pacote, caso contrário a mensagem é apenas retransmitida. Isso causa um efeito em cascata, mudando toda a mensagem presente na malha. A Figura 25 ilustra o modo de operação deste algoritmo, sendo o nó azul capaz de comunicar com os demais nós presente na sua área de cobertura representada pelo círculo tracejado em azul. Os nós coloridos dentro da área de cobertura do nó azul, também possui a sua própria área de cobertura representada pela sua cor, verificando e replicando posteriormente a mensagem para os demais nós fora da área de cobertura do nó azul. Isso se repete para todos os nós da malha até que a mensagem de todos estejam presente por toda malha.

Figura 25 – Rede em malha estabelecida mediante a área de cobertura de cada nó.



Fonte: Do autor

A Figura 26 apresenta o crescimento da mensagem conforme o crescimento da malha representada por estágios. Cada nó envia um pacote contendo sua mensagem para

os nós vizinhos. Inicialmente, o primeiro estágio é composto por um nó sem nenhuma conexão. Ao verificar a existência de um nó com os mesmo parâmetros, representando pelo estágio 2, é realizado a verificação e adição de seus dados ao pacote. A partir de então, a mensagem enviada por toda a malha contem a mensagem dos dois nós. A inserção de um terceiro nó no estágio 3 faz o processo se repetir e a mensagem na malha passa a ser composta pelo conteúdo dos três nós. No estágio 4, um novo nó é conectado a extremidade da malha, realizando comunicação somente com o nó dois, o mesmo altera a mensagem da malha com a adição do seu nome e retransmite novamente para o nó 2, que confirma a existência da sua mensagem no pacote recebido, e passa a replicar para o restante da malha o conteúdo dos quatro nós.

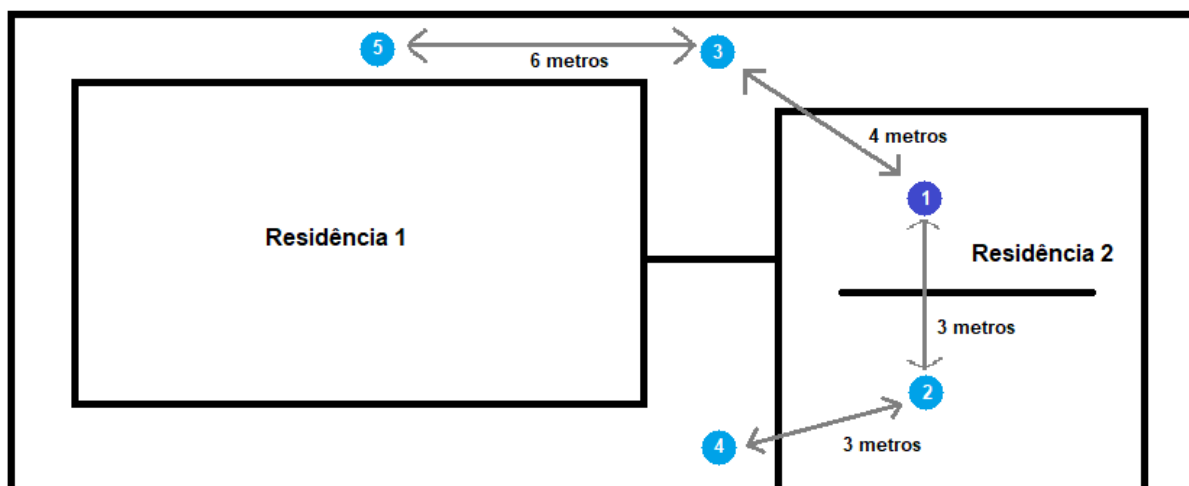
Figura 26 – Estágios da transmissão de mensagens conforme novas conexões de malha.

Estágio	Composição da malha	Mensagem na malha
Estágio 1		A
Estágio 2		AB
Estágio 3		ABC
Estágio 4		ABCD

Fonte: Do autor

A reprodução deste ensaio foi realizada em um terreno que continha duas residências. Foram utilizadas somente placas de antena interna, que eram as disponíveis no momento, fixadas em cadeiras como no experimento de medição de RSSI. O nó 1 foi conectado ao computador para leitura dos dados seguindo o mesmo processo de leitura do teste do algoritmo modelo. Os demais nós foram adicionados à malha de forma sequencial e colocados no ambiente, como demonstrado na enumeração dos nós na Figura 27. As distâncias entre os elementos seguiram o critério de potência de até -70 dBm como qualidade do sinal aceitável, respeitando as distâncias encontradas para este valor nos testes de RSSI. As conexões estabelecidas estão representadas pelas setas bidirecionais com as respectivas distâncias e as barreiras estão representadas pelas linhas pretas.

Figura 27 – Disposição geográfica dos elementos da rede em malha.



Fonte: Do autor

3.2.2.3 Algoritmo de réplica de pacote por ID via funções da biblioteca

A segunda malha desenvolvida utilizou os mesmos parâmetros e estruturação da malha dos ensaios anteriores. Este ensaio foi realizado com a quantidade máxima de nós disponíveis, sendo 5 nós de antena interna e 4 nós de antena externa, que foram adquiridos durante os ensaios de RSSI. A Figura 28 apresentam os nós que integraram a malha com sua identificação e alimentação. O único nó sem carregador portátil foi conectado ao computador, sendo utilizado como nó base para a recepção de todos os dados da malha.

A disposição dos elementos da malha foi feita em meio urbano, respeitando os limites da perda de potência captados nos ensaios de RSSI. O computador ficou conectado a uma placa de antena externa para melhor captação dos pacotes. Posteriormente, os nós de antena interna e externa foram posicionados de forma intercalada para aumentar a capacidade de alcance da rede. A Figura 29 demonstra o ensaio no meio urbano com a placa de antena externa conectada ao computador sendo representada pelo ponto preto, as placas de antena embutida conectadas a carregadores pelos pontos azul-claro e as placas

Figura 28 – Estrutura das placas com identificação e alimentação energética.



Fonte: Do Autor

de antena externa conectadas a carregadores representadas pelos pontos azul-escuros. As placas com antena interna foram colocadas do lado de fora das residências no encosto das cadeiras de maneira análoga ao teste de RSSI, as placas de antena externa foram posicionadas na área interna das residências como no ensaio de RSSI com barreira. Cada nó enviava em seu pacote uma mensagem definida pelo projetista com o seu ID já definido de fábrica. Os ensaios foram feitos ao longo de 2 horas.

O algoritmo de comunicação, representado pela Figura 30 utilizou funções da biblioteca baseadas no envio de pacote pelo endereço de cada nó. Assim como nos testes anteriores, o primeiro passo foi a definição dos parâmetros da malha. Posteriormente, a malha verificava a existências de nós no seu campo de cobertura. Para cada nova conexão ou desconexão, uma função de cálculo de delay era chamada para estabelecer qual nó o novo integrante irá se conectar.

Definida a conexão, um ajuste de tempo é chamado para manter o sincronismo das tarefas. Na sequência as conexões da malha são salvas em todas as placas pelo seu ID. Com as rotas estabelecidas, o envio de pacote era iniciado por uma função que procurava o destino nas conexões salvas através do ID do nó base, todos os nós repetiam esse processo para enviar a mensagem ao nó conectado ao computador. O processo fica em um ciclo de envio de mensagem e verificação de mudança da malha até que haja o desligamento da placa. A frequência de envio foi definida a cada 10 segundos, enviando pacotes enquanto a rede não fosse alterada ou o tempo de resincronização da malha fosse chamado.

Figura 29 – Disposição geográfica dos elementos da malha em meio urbano, sendo o ponto preto o nó base, os pontos em azul-escuro as placas de antena externa e os pontos em azul-claro as placas de antena embutida.



Fonte: Do Autor

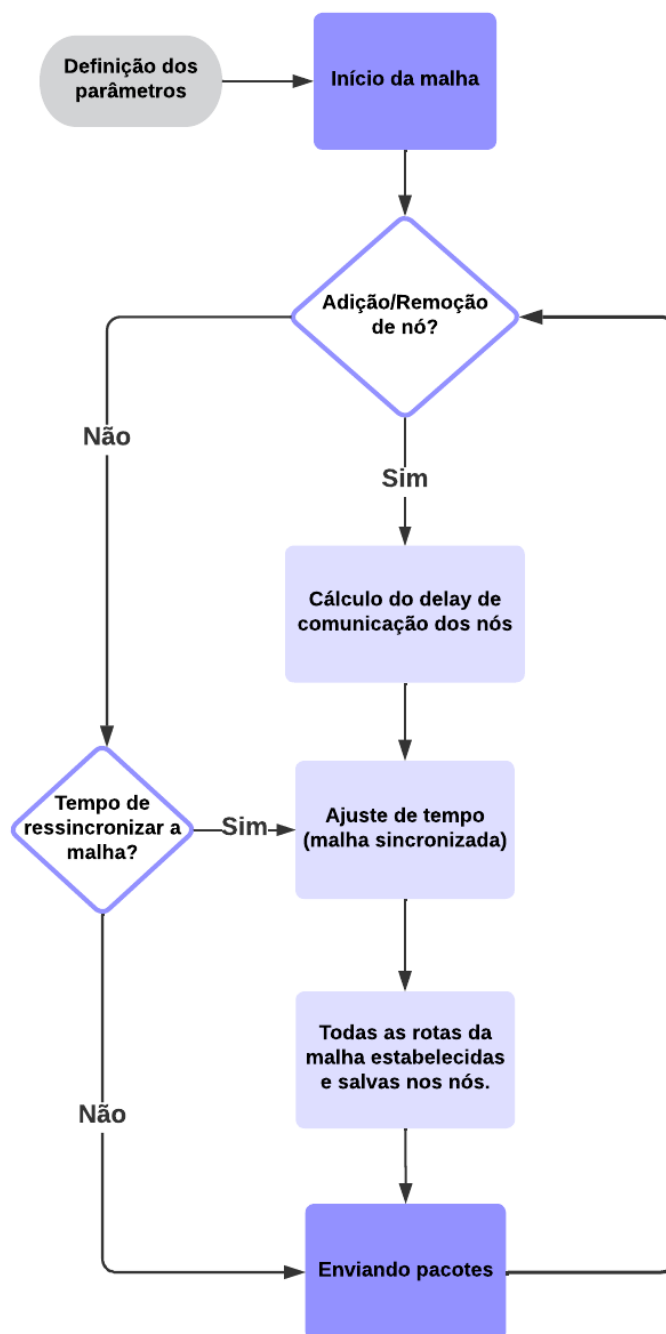
3.3 Considerações parciais

Neste capítulo, foram descritos os procedimentos utilizados durante os ensaios de caracterização do ESP32, visando estabelecer as capacidades de comunicação da placa através da estimativa da potência do sinal em relação à distância. Esses resultados foram aplicados em uma rede de malha autônoma com capacidade de reorganização, recuperação e eficiência nas transmissões dos dados, abrindo possibilidades de diversas aplicações.

Foram descritas as principais características da documentação e da biblioteca utilizada, bem como o procedimento adotado para se determinar a intensidade do sinal recebido pelos módulos em função da distância de propagação do sinal, para casos com visada direta e situações onde há obstáculos e interferências entre os módulos emissor e receptor. Os procedimentos foram iniciados com placas de antena embutida, adquiridas inicialmente, posteriormente, percebido a baixa capacidade da placa de antena embutida, foi adquirido as placas com antena externa. Com as novas placas os ensaios de RSSI foram repetidos para apurar os resultados.

Os resultados dos testes de intensidade de sinal permitiu estabelecer os limites de distância dos componentes ao desenvolver a rede em malha. Finalmente, algoritmos de rota foram definidos para estabelecer os critérios de transmissão dos pacotes. Os ensaios da rede foram realizados em meio urbano para estimar as capacidades de comunicação em situações com interferências físicas e de sinais de outras fontes.

Figura 30 – Fluxograma dos estágios de operação do algoritmo de comunicação por réplica de pacote por ID.



Fonte: Do Autor

4 Resultados e Discussões

Neste capítulo são apresentados os principais resultados obtidos ao longo do desenvolvimento deste trabalho. Inicialmente, são apresentados os valores obtidos pela medição da relação da potência pela distância das placas de antena interna e externa. Com os valores obtidos foi possível caracterizar a potência das placas em ambientes com visada direta e com obstáculos, considerando distâncias entre 1 m a 20 m.

Posteriormente, é apresentado o ensaio de malhas realizado utilizando os teste anteriores. Primeiramente foi apresentado os resultados referente a comunicação do algoritmo modelo, disponibilizado pela biblioteca *painlessmesh*, utilizado durante o trabalho. Esses resultados permitiram a compreensão da dinâmica de funcionamento da biblioteca como a ação de medidas de manutenção da malha.

Finalmente, após estabelecido a malha disponibilizado pela biblioteca, aprimoramentos foram feitos mediante lógica de programação e funções disponíveis na biblioteca. A lógica de programação desenvolvida na primeira malha aprimorada, apresentou resultados insatisfatórios em questões de escalabilidade e gerenciamento energético e de dados. Para contornar esses problemas, o segundo algoritmo baseado em funções de endereçamento de pacotes disponíveis na biblioteca apresentou bons resultados para uma aplicação real.

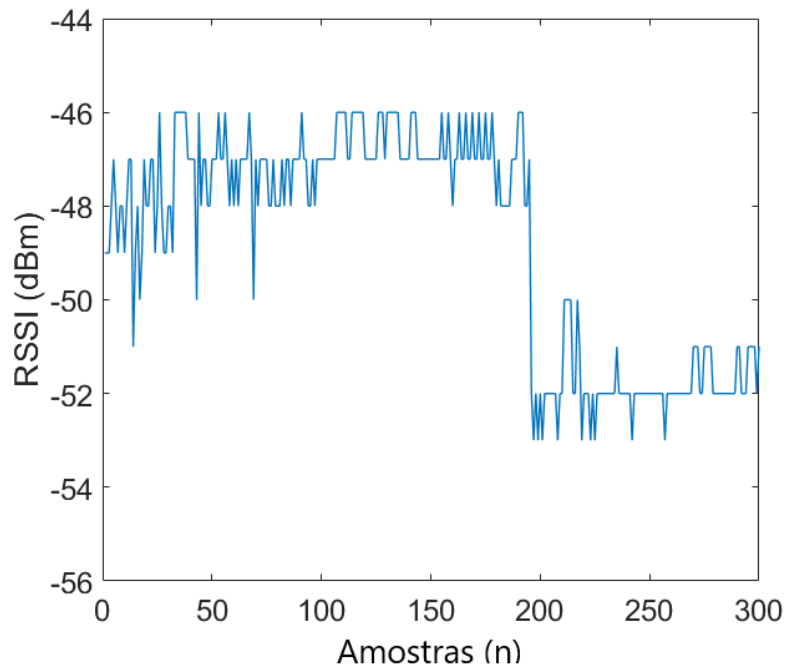
4.1 RSSI em relação à distância para casos com visada direta e com barreira

Inicialmente foi realizado uma análise da variação da intensidade do sinal transmitido/recebido em função da distância de propagação, para casos com visada direta e com barreira em placas de antena interna e externa. Os resultados foram obtidos via captação da intensidade do sinal por segundo, totalizando 300 pontos de medição captados em cinco minutos para cada distância. Os valores adquiridos nos 300 pontos são apresentados pela Figura 31.

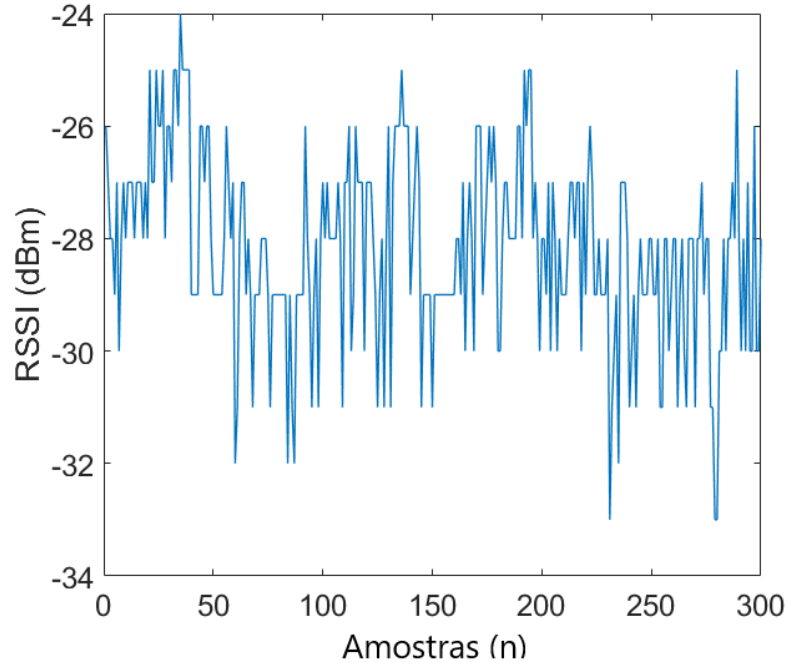
Os pontos adquiridos pela placa com o algoritmo de medição foram armazenados num arquivo de texto pelo *software* Putty e, posteriormente, repassados para uma tabela no Excel formando uma matriz em que cada coluna representava uma distância. Após adquiridos, os dados foram carregados no *software* Matlab, que realizou o cálculo dos valores médios e o desvio padrão para cada distância analisada.

Os dados captados demonstram a diferença de sensibilidade das antenas interna e externa considerando a medição dos 300 pontos na mesma distância. Para placas de antena interna, foi apresentado um gap na captação dos pontos em algumas distâncias. Consequentemente, a barra de erro apresentou valores maiores por esse fator. Apesar do

Figura 31 – Medição dos trezentos pontos captados para primeira passada com distância de um metro do transmissor em situação de visada direta.



(a) ESP32 com antena interna



(b) ESP32 com antena externa

Fonte: Do Autor

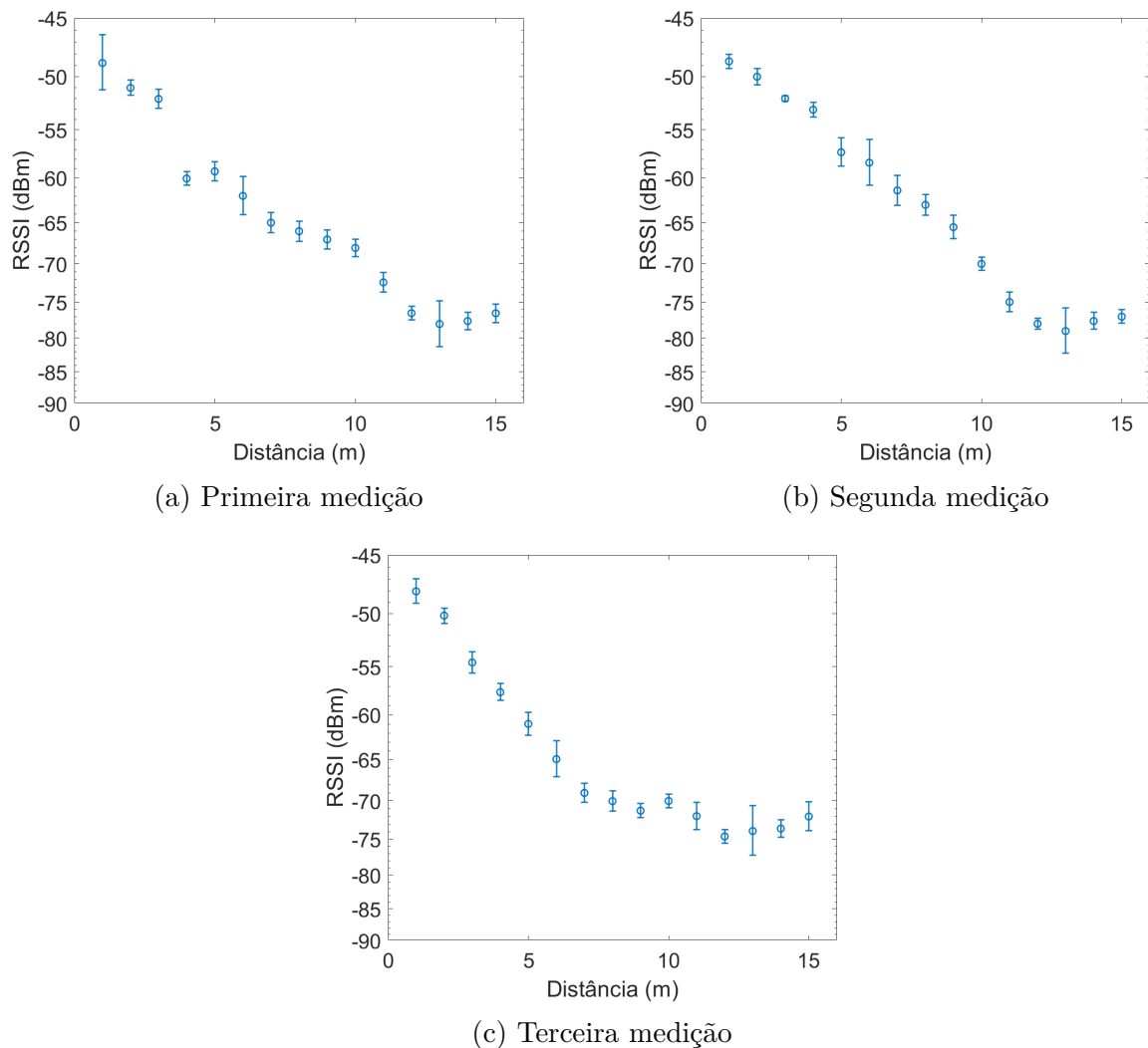
gap, nota-se pouca variação em alguns instantes da medição das placas de antena interna, sendo percebida a captação em torno de degraus como observado em -48 dBm para os primeiro 40 pontos, -47 dBm de 40 a 190 pontos e -52 dBm de 190 a 300 pontos.

Nas placas de antena externas, os valores de potências encontrados foram melhores, porem a variação da medição de um ponto a outro foi maior. Isso demonstra uma capacidade melhor de captação da antena externa e sua maior sensibilidade de sinal. Apesar da alta variação da medição, as placas de antena externa apresentaram poucos gaps.

4.1.1 Resultados da medição da RSSI para placas de antena interna

Os resultados para placa de antena externa foram captados em três medições de 300 pontos para cada distância. A Figura 32 apresenta os gráficos com as três medições de potência com margem de erro para cada distância.

Figura 32 – Medições obtidas durante os ensaios realizados considerando a condição de visada direta. Os pontos em azul, são os valores médios obtidos juntamente com as barras de margem de erro para cada distância analisada.

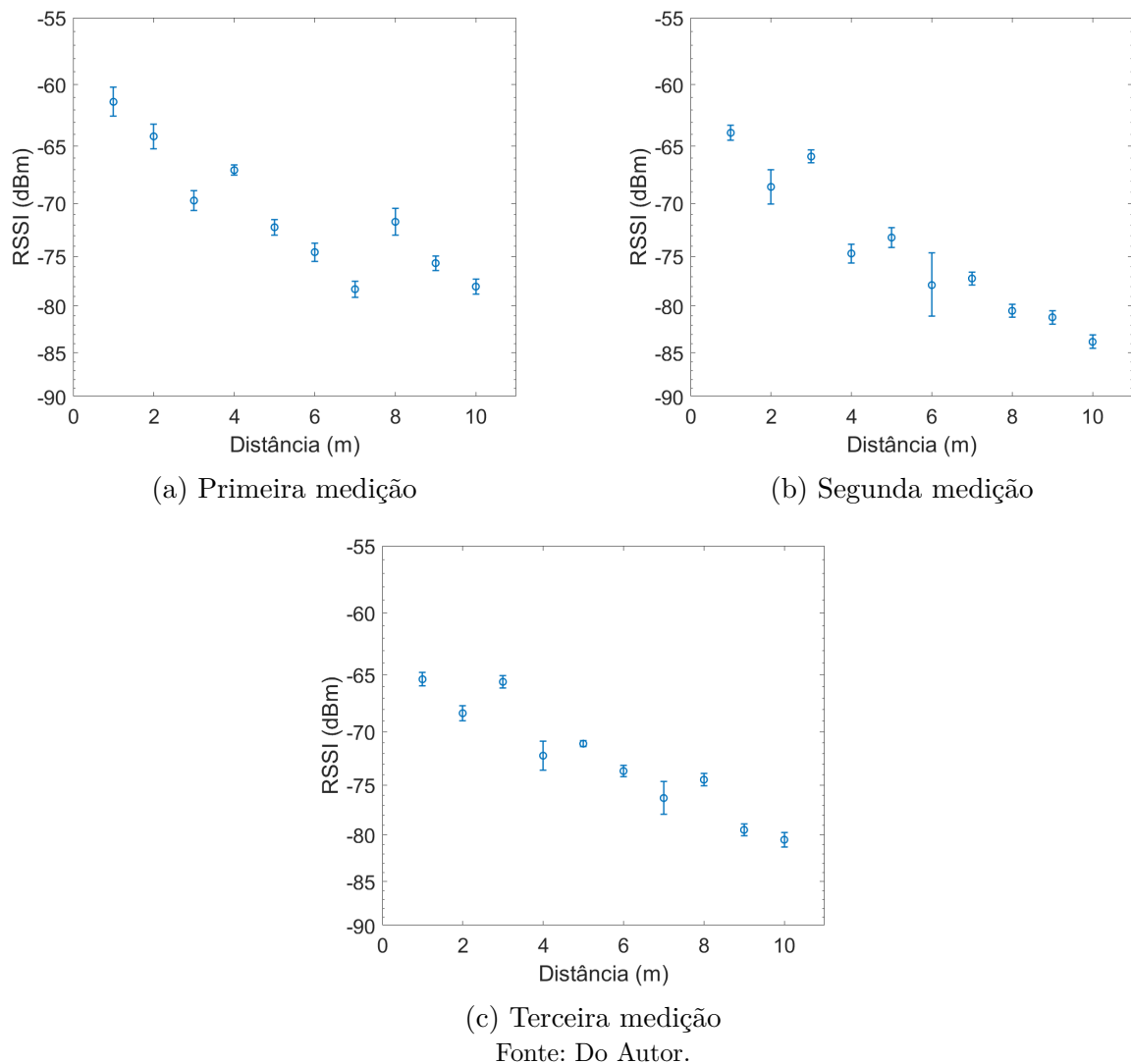


Nota-se que as medições obtidas nos três gráficos apresentam um comportamento semelhante. Entretanto, observa-se que a distância máxima aceitável para garantir um

valor mínimo de RSSI de -70 dBm é de, aproximadamente, 10 m. Para valores próximos ou maiores, a biblioteca apresentava repetidas chamadas para sincronizar o horário da malha. Isso ocorria devido o tempo de resposta ser alto e consequentemente o atraso ser maior que o requerido pela biblioteca, o que resultava na perda de sincronia.

O procedimento foi repetido em ambiente urbano, adicionando barreiras e sinais de interferência gerados por roteadores Wi-Fi ao processo. A Figura 33 apresenta as medições obtidas ao longo deste ensaio.

Figura 33 – Medições obtidas durante os ensaios realizados considerando a condição com barreira. Os pontos em azul, são os valores médios obtidos juntamente com as barras de margem de erro para cada distância analisada.

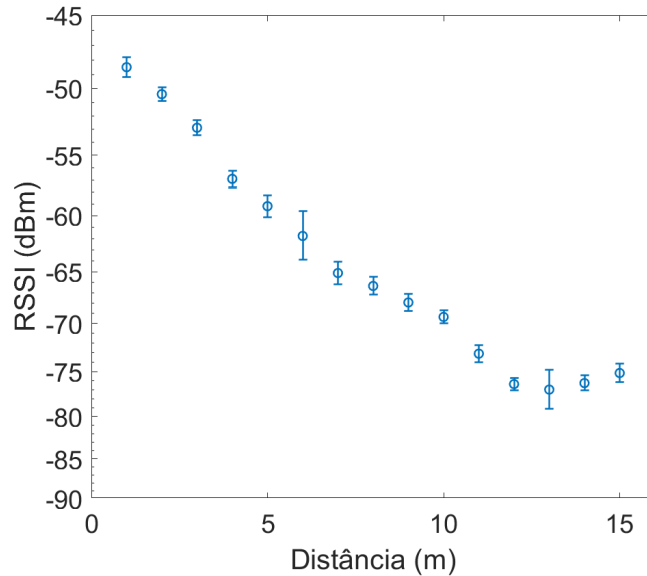


Observa-se que a adição de barreiras e sinais de interferência presentes na mesma faixa de frequências da RSSF resultaram numa maior variação do comportamento das medições. Além disso, nota-se que para manter o sistema operando dentro dos limites pré-definidos de RSSI de -70 dBm, a distância máxima de propagação do sinal passa

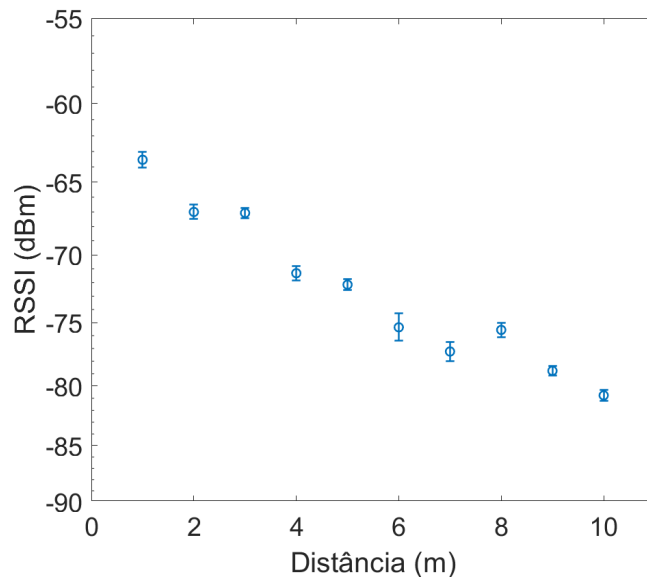
a ser reduzida para, aproximadamente, 4 m, limitando a aplicação da placa em muitas situações.

Foi calculado na Figura 34 as medições médias, obtidas a partir das médias das três curvas obtidas ao longo dos ensaios. Essa curva representa o resultado do cálculo da média dos 900 pontos adquiridos para cada valor de distância analisado.

Figura 34 – Média da somatória dos pontos das três medições.



(a) Média visada direta



(b) Média com barreira

Fonte: Do Autor.

Observa-se que a média considerando os 900 pontos não altera de forma significativa o resultado obtido individualmente. Possivelmente, a potência do sinal emitido/recebido pela antena encapsulada no SoC ESP32-WROOM-32 não possui potência

suficiente para aplicações em distâncias maiores que 10 metros em visada direta e maiores que 4 metros com barreiras no meio envolvendo ambiente urbano. Como ponto de melhoria, foi realizado a substituição do modelo de microcontrolador utilizado, optando por uma versão com antena externa e os experimentos foram repetidos.

4.1.2 Resultados da medição da RSSI para placa de antena externa

Os ensaios das placas de antena externa foram repetidos seguindo o mesmo procedimento descritos no ensaio anterior, com ressalva para as medições realizadas em duplicata para cada situação. A Figura 35 apresenta o primeiro ensaio realizado em visada direta.

É notório a melhora da potência do sinal nas placas de antena externa, obtendo ganhos de 25 dBm em cada medição. Devido à capacidade de comunicação de antena externa ser maior, a adição se estendeu até 20 metros. As conexões ficaram estáveis com poucos requisitos de sincronização até os 20 metros.

Para os ensaios com barreira demonstrados na Figura 36 percebe-se o mesmo ganho de cerca de 25 dBm. A placa com antena externa possibilitou explorar a mesma distância para ensaios de visada direta, demonstrando que a antena externa é menos afetada por objetos presentes no meio. Por esses fatores, as placas de antena externa podem ser usadas até 20 metros considerando a presença de barreiras no meio. Um ganho significativo comparado ao ensaio das placas de antena interna.

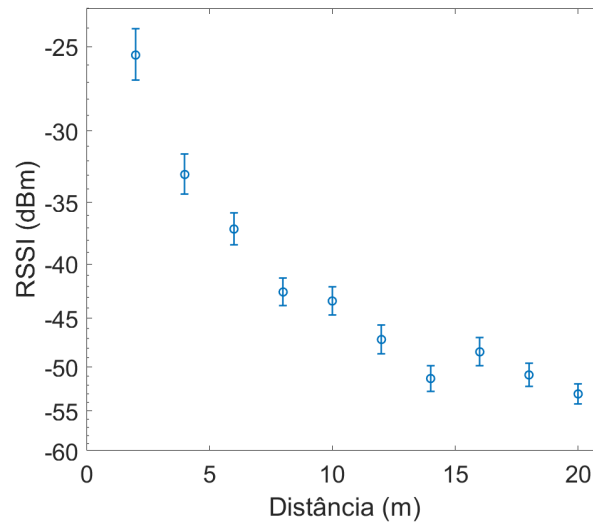
Foi calculado na Figura 37 a média dos pontos, obtidas a partir das médias das duas curvas obtidas ao longo dos ensaios. Esses dados representam o resultado do cálculo da média dos 600 pontos adquiridos para cada valor de distância analisada.

Observa-se que a média considerando os 600 pontos não altera de forma significativa o resultado obtido individualmente. A potência do sinal emitido/recebido pela antena externa no SoC ESP32-WROOM-32 possui potência suficiente para aplicações em distâncias de até 20 metros para situações de visada direta e com barreira. O uso dessa placa possibilita a aplicação em diversos meios e projetos com interferências externas.

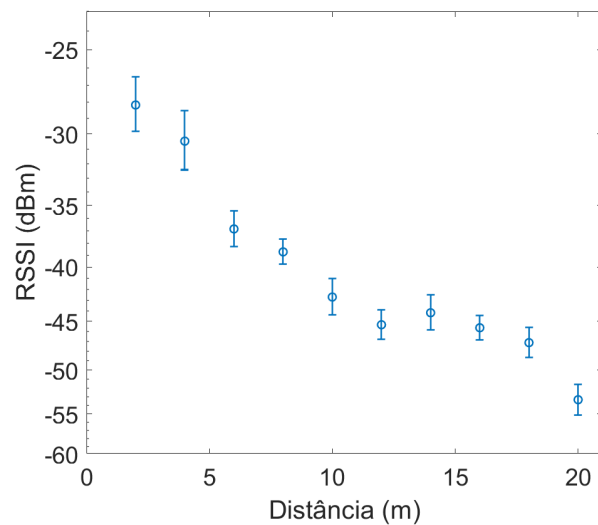
4.1.3 Comparação das médias da RSSI das placas

Para efeito de comparação, as médias das duas placas foram plotadas, com suas curvas características, no mesmo gráfico para situações de visada direta e com barreira na Figura 38 a fim de se obter a relação do ganho proporcional ao uso da antena externa. A curva em azul representa o uso da antena externa e a curva em vermelho o uso da antena embutida. Nota-se um comportamento semelhante da curva para os dois casos nas mesmas distâncias medidas, tendo a sua diferença de potência caracterizada por um offset. Esse resultado demonstra um ganho expressivo em relação à antena.

Figura 35 – Medições obtidas durante os ensaios realizados considerando a condição de visada direta para placas de antena externa. Os pontos em azul, são os valores médios obtidos juntamente com as barras de margem de erro para cada distância analisada.



(a) Primeira medição



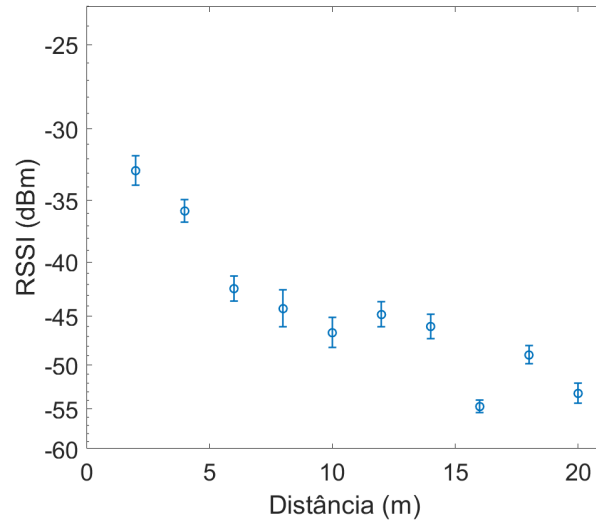
(b) Segunda medição

Fonte: Do Autor

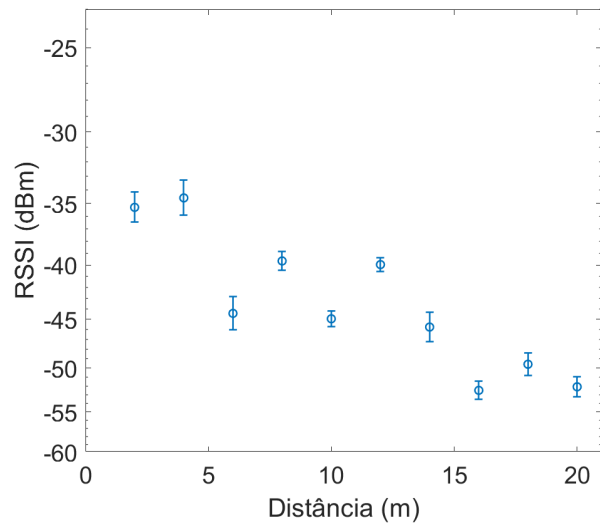
4.2 Comparação da RSSI pelo modelo de perdas da equação de Friis

O modelo de perdas de Friis possibilita verificar a validade dos ensaios para cada caso registrado. Nessa seção é apresentado o resultado dos dois ensaios em comparação ao resultado ideal de perda calculado pelo modelo. O valor do expoente de perda de caminho foi fixado em 2 considerando situação de visada direta. Para ambientes com barreira foi utilizado 1,9 como apresentando em (KARL; WILLIG, 2007) para construções no

Figura 36 – Medições obtidas durante os ensaios realizados considerando a condição com barreira para placas de antena externa. Os pontos em azul, são os valores médios obtidos juntamente com as barras de margem de erro para cada distância analisada.



(a) Primeira medição



(b) Segunda medição

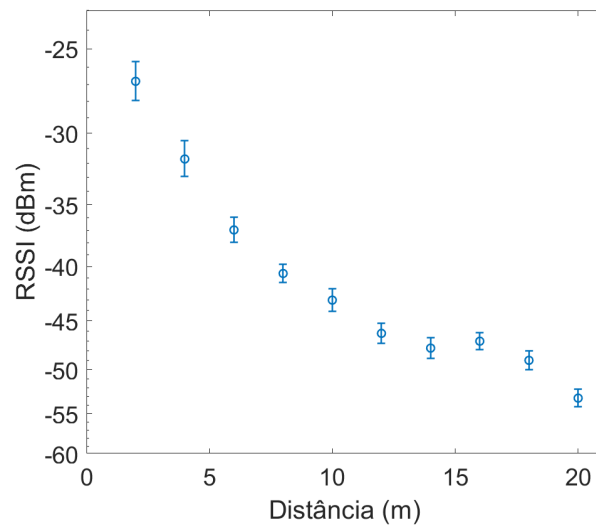
Fonte: Do Autor

meio. Posteriormente é apresentado o histograma da frequência em relação ao X_σ que é a gaussiana numa média zero. Os resultados dessa gaussiana apresenta um ligeiro *offset*, porém os valores foram próximos ao esperado na maioria dos ensaios.

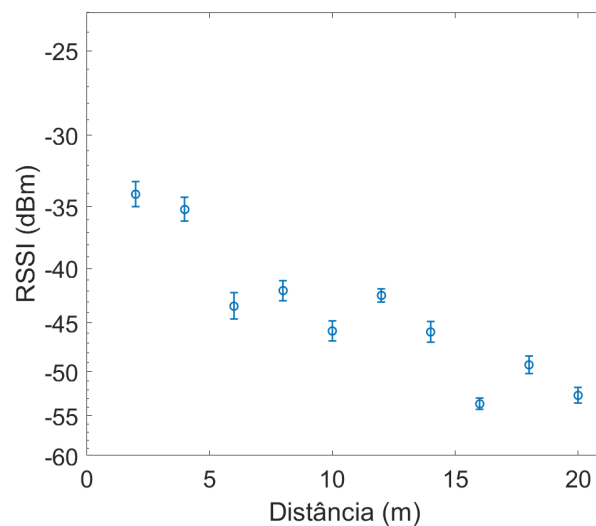
4.2.1 Modelo de perda comparado aos ensaios da placa de antena interna

A comparação do modelo de perda representado pelos losangos azuis em relação a dois ensaios da placa de antena interna em situação de visada direta, está representado

Figura 37 – Médias da somatória de todas as medições realizadas.



(a) Média visada direta



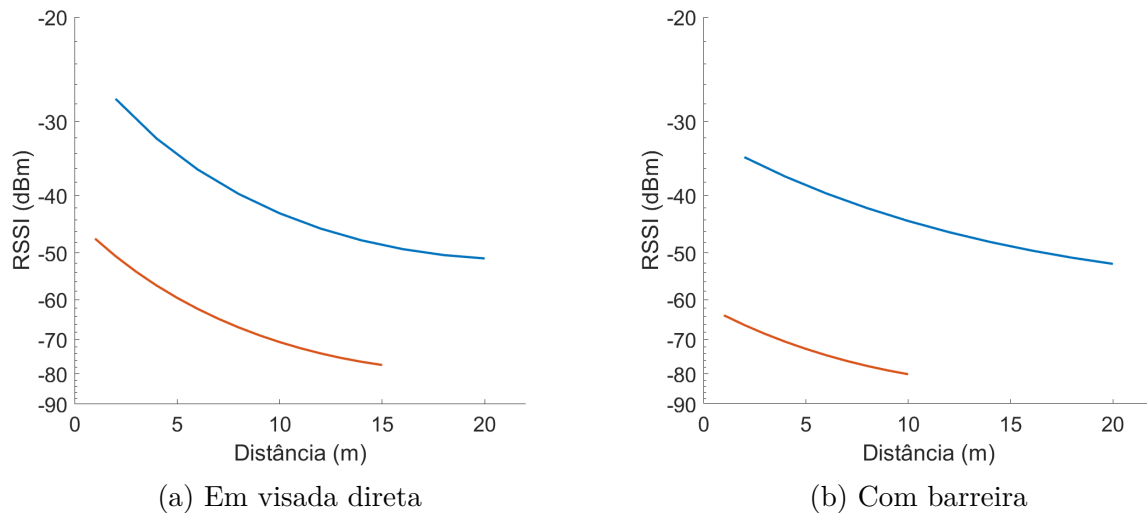
(b) Média com barreira

Fonte: Do Autor.

na Figura 39. Para este ensaio foi considerado somente os pontos que apresentam o resultado igual à média dos 300 pontos $\pm\sigma$, sendo σ o desvio padrão da média. Percebe-se que os resultados encontrados nos ensaios apresentam-se ligeiramente melhores do que o calculado pelo modelo até os 10 metros de distância. Posteriormente os valores passam a apresentar uma discrepância maior, tendo piores resultados do que o modelo. É possível verificar, assim como no teste de RSSI, que a placa de antena interna possui uma boa capacidade de comunicação até os 70 dBm, tendo os valores do ensaio 1 bem próximos ao modelo de perda para maioria dos pontos até 10 metros.

Para o ensaio com barreira em ambiente urbano nas placas de antena embutida, os ensaios apresentaram alguns pontos de discrepância como demonstrado na Figura 40.

Figura 38 – Média da somatória das medições obtidas durante os ensaios realizados considerando condições de visada direta e com barreira. Em azul, a curva resultante de medições da placa de antena externa e em vermelho a curva resultante de medições da placa de antena interna.



Fonte: Do Autor.

Esses valores podem estar sofrendo interferências de fontes de perturbação presentes no meio, aparecendo pontos acima do modelo. Porém, o ensaio 2 apresentou valores próximos do modelo.

4.2.2 Modelo de perda comparado aos ensaios da placa de antena externa

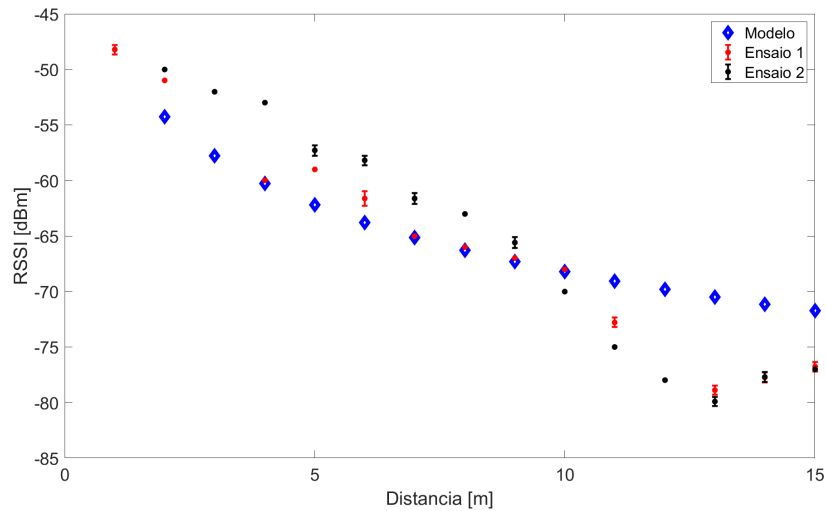
Para ensaios nas placas com antena externa em visada direta, os valores ficaram próximos do esperado, com alguns pontos se sobrepondo ao modelo de perda. Abre-se um adendo que alguns pontos fora da curva são esperados em algumas medições, podendo ter essa diferença por interferências no meio, angulação e altura das antenas, como na distância 14 do ensaio 1 da Figura 41.

No procedimento com barreira para placas de antena externa, os valores encontrados nos ensaios ficaram mais próximos do modelo de perda se comparado as placas de antena embutida. Porém, também é possível encontrar pontos discrepantes a curva modelo, possivelmente presentes pela barreira no meio, angulação e altura das antenas.

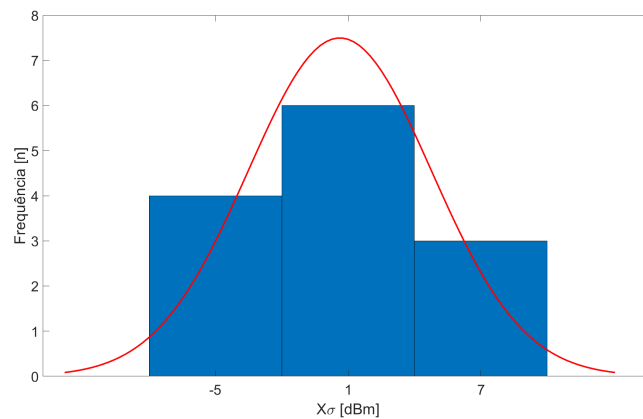
4.3 Apuração da comunicação da rede em malha

Esta seção apresenta os resultados das comunicações das redes em malhas estabelecidas. Para este trabalho foram montadas três redes, sendo a primeira a rede do algoritmo modelo disponibilizado pela biblioteca utilizada. A montagem dessa rede possibilitou a compreensão do funcionamento da biblioteca, como seus estágios de atuação.

Figura 39 – Modelo de perda de Friis representado em azul para cada distância em comparação a dois ensaios realizados em placas de antena interna sem barreiras no meio representados pelos pontos pretos e vermelhos.



(a) Modelo de perda



(b) Desvio padrão

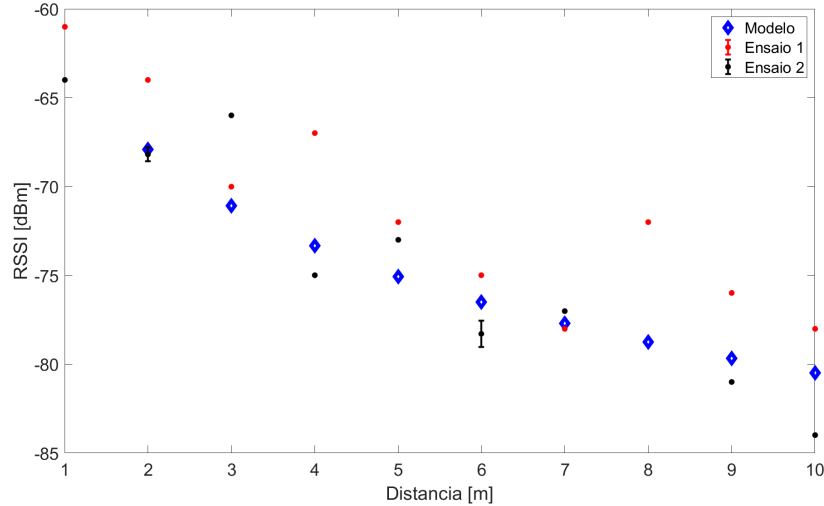
Fonte: Do Autor.

Posteriormente, foram montadas duas redes baseadas na capacidade de envio de pacotes da biblioteca, utilizando a primeira o envio de mensagem por transmissão geral por uma lógica de processamento desenvolvida dentro do algoritmo modelo da biblioteca, e a segunda malha utilizou o envio de mensagens por endereço único, sendo o algoritmo formado por funções da biblioteca.

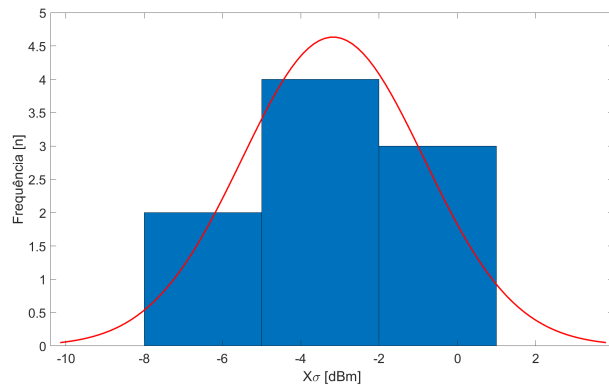
4.3.1 Comunicação da biblioteca painlessmesh

Este ensaio consistiu na construção de uma malha de somente três ESP32 com o algoritmo modelo para compreender o funcionamento da biblioteca. O primeiro ESP foi conectado ao computador para que a comunicação entre as placas fossem apresentadas no serial monitor da IDE Arduíno. Posteriormente foram adicionados mais duas placas

Figura 40 – Modelo de perda de Friis representado em azul para cada distância em comparação a dois ensaios realizados em placas de antena interna com barreiras no meio representados pelos pontos pretos e vermelhos.



(a) Modelo de perda



(b) Desvio padrão

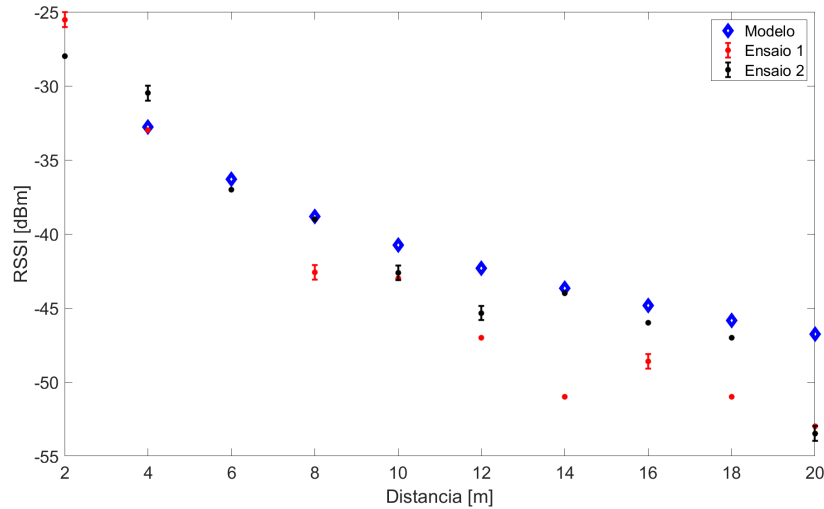
Fonte: Do Autor.

de forma sequencial para acompanhar o funcionamento da biblioteca. A reestruturação da malha foi testada com a adição e remoção de nós.

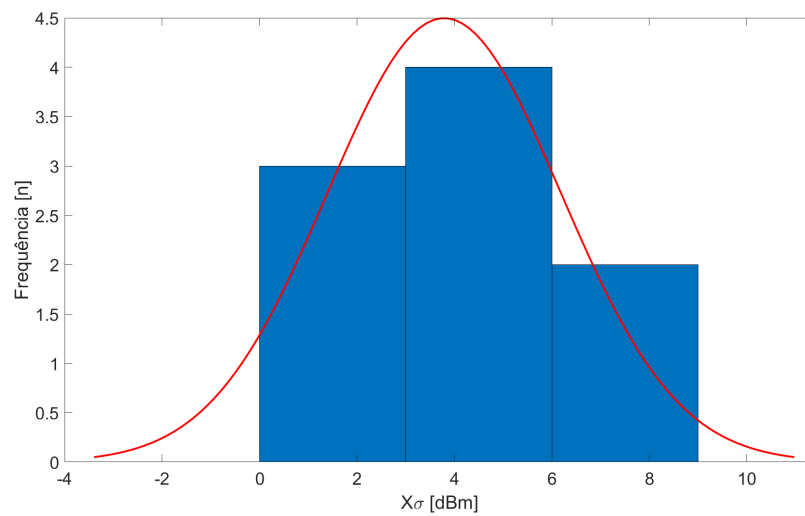
Ao energizar os kits de desenvolvimento carregados com o algoritmo modelo com os parâmetros definidos, o algoritmo disponibilizado pela biblioteca permite que os microcontroladores se conectem de forma automática, e que se reorganizem sempre que necessário para manter a malha em funcionamento. Ao retirar ou adicionar um nó da malha, a mesma se reestrutura, mantendo a comunicação em funcionamento. A cada conexão um ajuste de tempo é aplicado para manter os dispositivos da malha em sincronismo. O fluxograma na Figura 43, demonstra as etapas de atualização da malha.

Após a atualização da malha, os dispositivos passam a se comunicar enviando em seu pacote a mensagem e o ID correspondente ao nó base, conectado ao computador. como apresentado na Figura 44. Todas as etapas da malha, desde o instante em que o

Figura 41 – Modelo de perda de Friis representado em azul para cada distância em comparação a dois ensaios realizados em placas de antena externa sem barreiras no meio representados pelos pontos pretos e vermelhos.



(a) Modelo de perda



(b) Gaussiana de perda

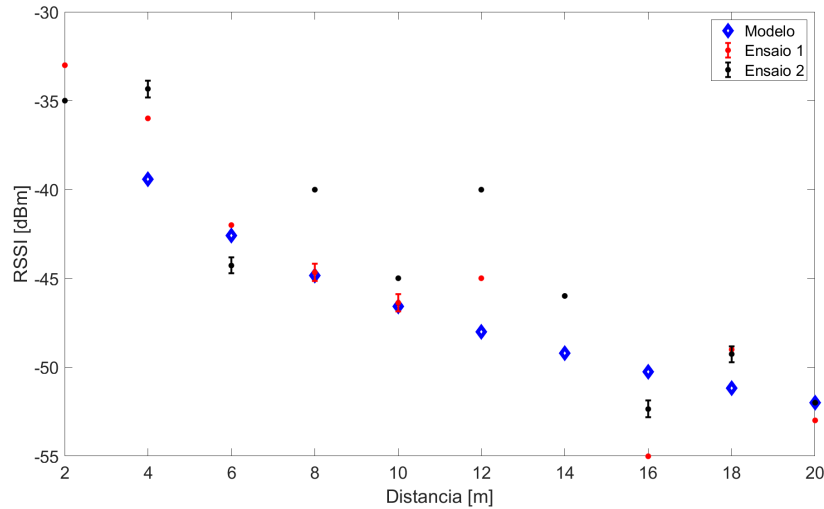
Fonte: Do Autor.

nó base detecta a adição ou remoção de um nó, até o recebimento das mensagens pelo nó base, uma mensagem mostrando a etapa é enviada por meio da conexão serial RS-232 para o computador, que exibe na tela qual procedimento está ocorrendo.

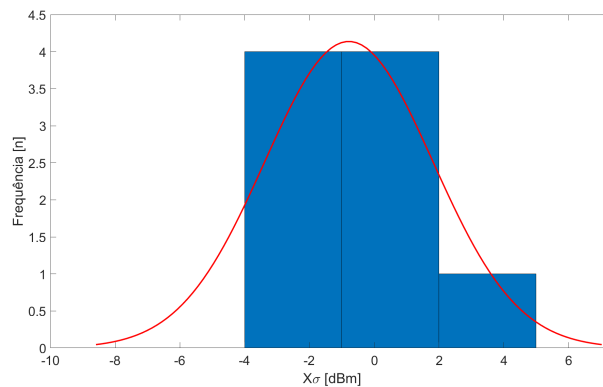
A biblioteca apresentou boa capacidade de reestruturação e manutenção da malha, possuindo resposta rápida para alterações na rede. Entretanto, esse modelo não possui retransmissão de pacotes por múltiplos saltos, deixando a mensagem de cada nó contida em sua área de cobertura.

É importante ressaltar que por se tratar de uma biblioteca para sistema de tempo real, o algoritmo precisa preservar o sincronismo para a execução das tarefas. Portanto,

Figura 42 – Modelo de perda de Friis representado em azul para cada distância em comparação a dois ensaios realizados em placas de antena externa com barreiras no meio representados pelos pontos pretos e vermelhos.



(a) Modelo de perda



(b) Desvio padrão

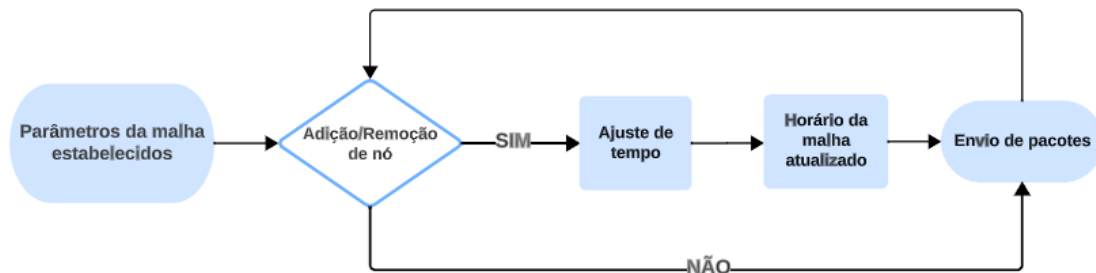
Fonte: Do Autor.

a biblioteca não aceita o uso de atraso no código, nem lógicas de programação extensas que possam quebrar o sincronismo do código.

4.3.2 Rede em malha por algoritmo de rota de transmissão geral

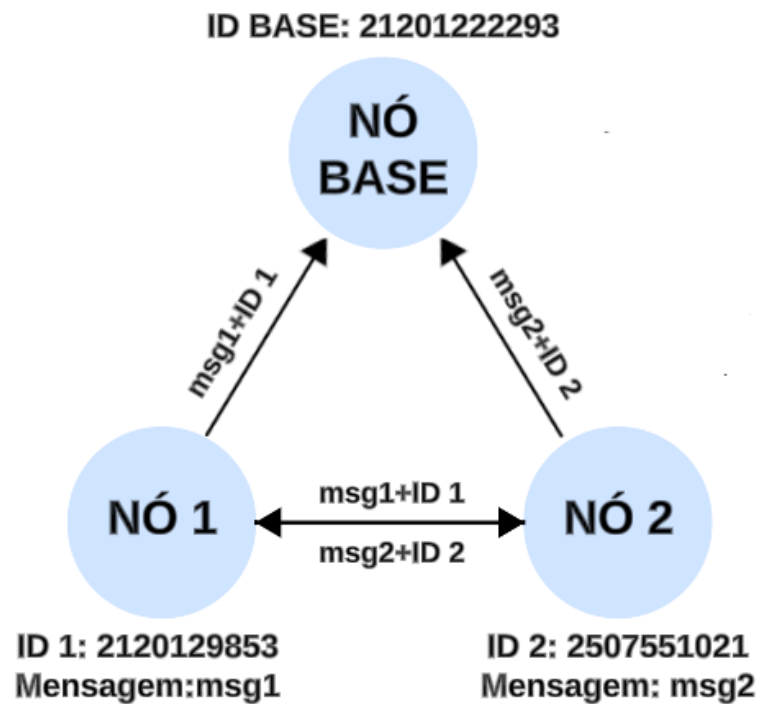
O algoritmo de transmissão geral manteve os mesmos estágios de funcionamento da rede em malha testada anteriormente. Para adicionar a capacidade de transmissão por múltiplos saltos, foi desenvolvido uma lógica de programação capaz de retransmitir o pacote por verificação. Cada nó passou a verificar a presença de seu conteúdo no pacote recebido, retransmitindo caso a sua mensagem já estivesse inserida no pacote, ou adicionando os seus dados ao pacote quando não encontrasse a existência do mesmo. Dessa forma, o conteúdo de todos os nós estava presente em toda a malha.

Figura 43 – Fluxograma de atualização da malha.



Fonte: Do Autor

Figura 44 – Ensaio de malha da biblioteca painlessmesh composta por três nós a metro de distância dos vizinhos.

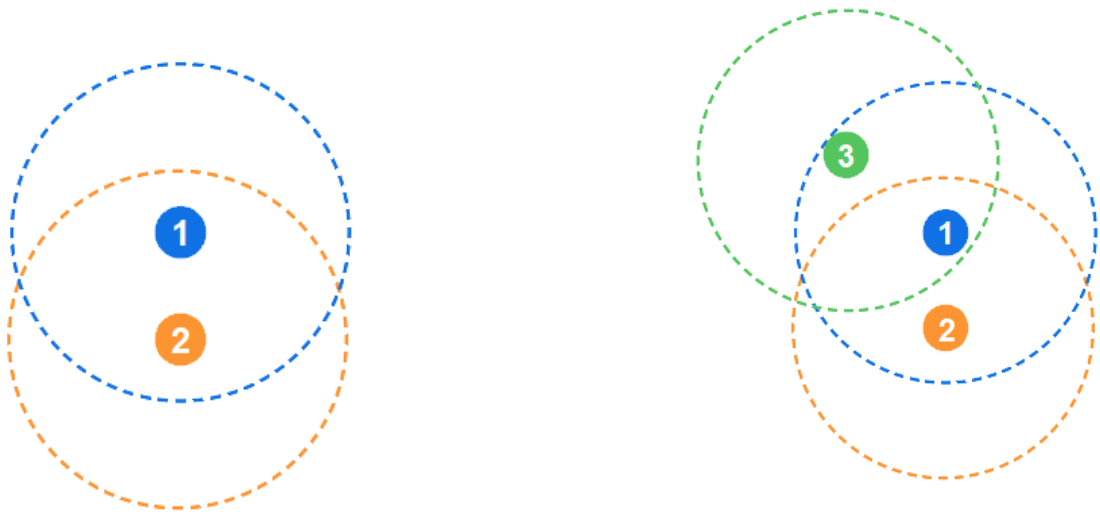


Fonte: Do Autor

A malha foi composta por 5 nós adicionados de forma sequencial. As novas conexões atualizavam o conteúdo do pacote que era enviado por toda malha, cada nó verificava a mensagem em circulação. Até o terceiro nó, a malha manteve o sincronismo e realizou a verificação de forma precisa. A Figura 45 apresenta a forma sequencial dos dois primeiros nós a malha.

A partir do quarto nó, o algoritmo apresentou instabilidade, não realizando a verificação de forma precisa e duplicando as mensagens da malha. Possivelmente a falha na

Figura 45 – Composição inicial da malha de comunicação por ID.



(a) Mensagem na malha composta pelos conteúdos dos nós 1 e 2.

(b) Mensagem na malha composta pelos conteúdos dos nós 1, 2 e 3.

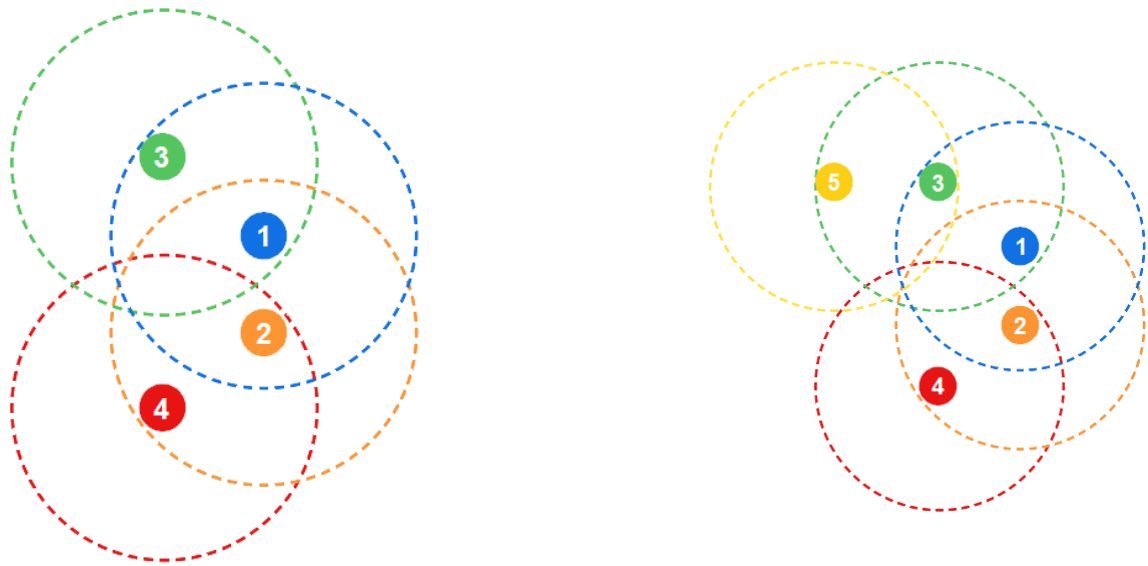
Fonte: Do Autor.

verificação foi proporcionada pelo tempo de verificação gasto que retirava o sincronismo da malha. Alterações na estrutura do código foram realizadas, porém as falhas se mantiveram com o crescimento da malha. Outro fator determinante foi que o código se mostrou inviável em questão de escalabilidade, pois a mensagem crescia de forma proporcional ao número de nós.

As mensagens destinadas ao nó 1 para captação de dados, estava presente em toda a malha, mostrando-se ineficiente na economia de dados e conseqüentemente no consumo energético. O nó 4 e 5, que estava presente na extremidade da malha como representado na Figura 46, recebia o conteúdo de todos os outros nós mesmo não sendo o destino dos pacotes. Portanto, além do problema de verificação que não era esperado na teoria, o algoritmo não foi suficiente para suprir as necessidades de escalabilidade e compactação de dados requeridos para uma rede em malha, limitando os números de nós para o seu funcionamento.

Para contornar estes problemas, o segundo código foi testado utilizando funções da própria biblioteca. Dentre as funções utilizadas, destaca-se a função de envio de mensagem por endereço único. A descrição dos resultados obtidos está presente no ensaio seguinte.

Figura 46 – Composição final da malha de comunicação por ID.



(a) Mensagem na malha composta pelos conteúdos dos nós 1, 2 e 3, apresentando erro de verificação e duplicidade da mensagem a partir do quarto nó.

(b) Mensagem na malha composta pelos conteúdos dos nós 1, 2 e 3, apresentando erro de verificação e duplicidade da mensagem no quarto e quinto nó.

Fonte: Do Autor.

4.3.3 Rede em malha por algoritmo de rota de endereço único

O nó ao ser alimentado passa a procurar conexões, com os mesmos parâmetros que o seu, na sua área de cobertura. Ao identificar conexões em potencial é realizado o cálculo de delay para determinar a melhor conexão possível. Esses valores são determinados pelo atraso de mensagem proposto pela biblioteca. A Tabela 1, ilustra os resultados de 5 medições realizados a cada 5 metros para duas placas de antena externa que estão presentes na mesma malha.

Tabela 1 – Tabela de atraso de mensagem entre o nó transmissor e receptor pela distância.

Distância[m]	Medição 1	Medição 2	Medição 3	Medição 4	Medição 5
1 metro	27562 us	28308 us	25869 us	26901 us	71063 us
5 metros	92338 us	86557 us	72334 us	90563 us	90586 us
10 metros	92566 us	92648 us	93465 us	93478 us	92205 us
15 metros	95438 us	94235 us	96591 us	92739 us	94321 us
20 metros	97887 us	93712 us	194264 us	94788 us	193243 us

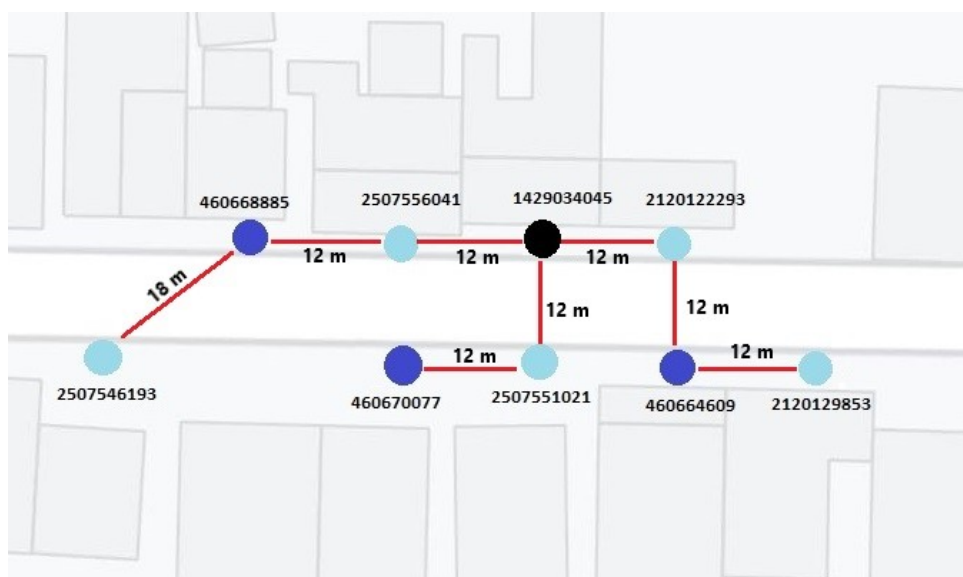
Fonte: Do Autor.

O atraso da resposta aumenta conforme a distância, não tendo uma relação proporcional. Com as placas distanciadas a um metro, os valores encontrados ficaram abaixo das outras medições. O que percebe-se, é um aumento expressivo de 1 a 5 metros e um

sutil aumento nos ensaios de 5 a 15 metros, e partir dos 20 metros algumas medições apresentam valores discrepantes mostrando a saturação da comunicação para valores maiores. Nesse estágio diversas solicitações de sincronização da malha pode ser realizado durante o seu funcionamento. Os valores altos de algumas medições na mesma distância, podem ser conseqüências de interferências externas ou de perda do sinal, como nos 20 metros.

As conexões foram estabelecidas conforme cada nó entrava na rede e realizava o cálculo de atraso. Após adicionar todos os nós as rotas finais ficaram definidas como na Figura 47.

Figura 47 – Conexão do tipo estrela formada após o cálculo de atraso para melhores rotas de uma rede em malha disposta em meio urbano representado pela cor vermelha.

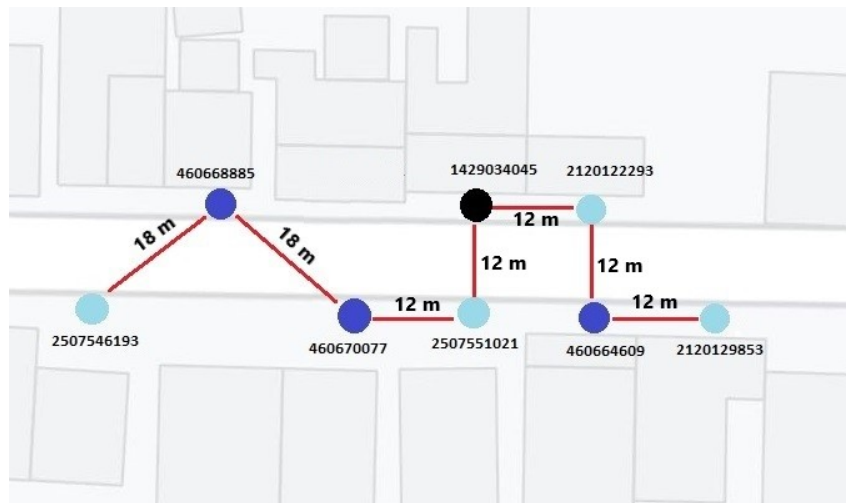


Fonte: Do Autor

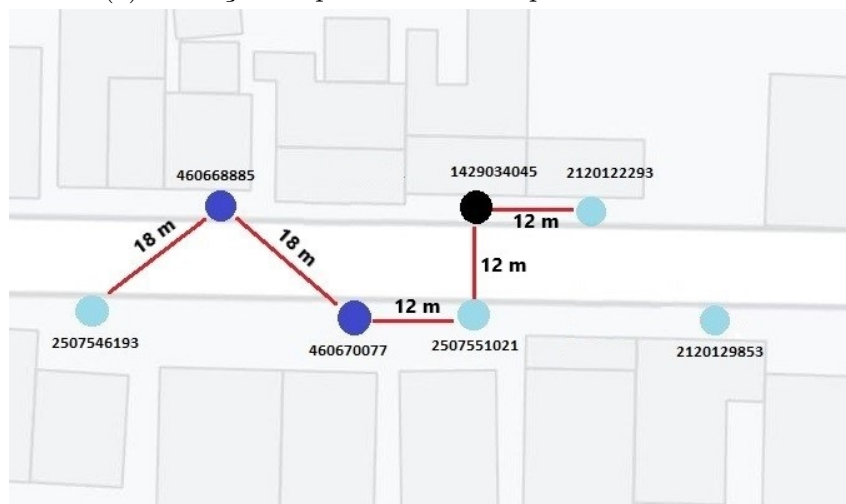
Alguns testes de conexão e desconexão foram realizados para testar a reorganização da malha. Com a remoção de um nó o processo de definição de rota seguia os mesmos critérios de adição. O ramo ou nó que ficasse fora da conexão procurava sua reintegração a malha em outras placas disponíveis na sua área de cobertura. Duas situações foram simuladas para reorganização da malha. Na primeira situação o nó à esquerda da base foi removido desligando o ramo seguinte, a nova conexão é estabelecida com o nó do outro lado da rua como representado na Figura 48(a). Posteriormente, o nó de antena externa à direita do nó base desconectado da malha, deixando o nó seguinte flutuando sem capacidade de reconectar a malha como representado na Figura 48(b). As placas possuem capacidade de reconexão na presença da área de cobertura de um dos nós da malha.

Finalmente foram realizados os testes de envio de mensagem ao longo de 2 horas. As mensagens enviadas pelas placas, chegaram ao destino sem nenhuma interferência ou perda de dados. A comunicação foi efetuada por múltiplos saltos entre o nó emissor e

Figura 48 – Remoção de nós da malha e sua reestruturação.



(a) Remoção do primeiro nó à esquerda do nó base.



(b) Remoção do nó de antena externa à direita do nó base.

Fonte: Do Autor.

receptor, com os nós presentes no meio servindo como passagem. Os dados que passam nesse caminho não são visíveis em dispositivos conectados as placas, como computadores com IDE Arduino.

4.4 Considerações Parciais

Neste capítulo, foram apresentados os principais resultados obtidos ao longo deste trabalho. A princípio, os testes de RSSI foram feitos com placas de antena embutida em situação de visada direta e posteriormente com barreira. Os dados obtidos foram insatisfatórios, pois a distâncias de comunicação das placas de antena embutida limitaria a sua aplicação em diversos projetos. Devido a esse fator, placas de antena externa foram adquiridas e os testes de RSSI foram repetidos nas mesmas condições. A capacidade de comunicação dessa placa possibilitou ganhos de 25 dBm em relação às placas de antena

interna. Consequentemente, foram alcançados distâncias duas vezes maiores, ampliando suas possíveis aplicações.

Após realizados os testes de RSSI, os resultados foram comparados com modelo de perda de Friis visando caracterizar e validar os dados captados. Os resultados ficaram próximos do esperado, apresentando algumas variações perceptíveis nos experimentos com barreira no meio. Essas diferenças dos ensaios em relação ao modelo, são consequências de interferências de outras fontes de sinais ou barreiras físicas consideradas no modelo de Friis, mas que variam conforme o meio, sendo difícil modelar com exatidão quais são essas interferências.

Caracterizado a capacidade de comunicação das placas, foi realizado ensaios de redes em malha. Para possibilitar a implementação da rede, foi estabelecido o algoritmo de rota baseado em verificação das mensagens. Toda vez que um nó recebia uma mensagem na malha, ele verificava o seu conteúdo e adicionava os seus dados a mensagem antes de retransmitir. Esse método possibilitava os dados estarem presentes em todos os nós, porem a mensagem crescia de forma proporcional. Como consequência, a malha perdia o sincronismo, duplicando mensagens ou realizando a verificação de forma errada. Como alternativa, um segundo algoritmo foi desenvolvido baseado no envio de mensagens por ID, utilizando funções disponíveis na biblioteca. As mensagens passaram a utilizar os nós presentes no meio via múltiplos saltos até o seu destino.

Por fim, com a área de atuação das malhas definido e o algoritmo de rota traçado, a rede em malha foi disposta no meio urbano para realizar o envio de mensagens pré-programadas. Foi testado a capacidade de reestruturação da malha com o desligamento e reintrodução de nós, bem como a integridade dos dados ao chegar ao destino. Durante duas horas, as mensagens chegaram de forma íntegra, mesmo com as interferências do meio e as mudanças forçadas na malha.

5 Considerações finais

Este trabalho apresentou as etapas de desenvolvimento e validação de uma rede em malha por comunicação Wi-Fi. O sistema caracterizado utilizou como plataforma base o ESP32-DevKit-V1. Inicialmente foi considerado somente o uso das placas de antena interna, sendo as primeiras a serem adquiridas. Para verificar sua capacidade de comunicação, foram utilizados algoritmos de medição de potência disponibilizados pela biblioteca Wi-Fi do Arduino, para realizar testes de RSSI em relação à distância em ambientes de visada direta e ambientes com interferências e barreiras. Os resultados de RSSI foram insatisfatórios, considerando -70 [dBm] o valor mínimo para realizar a transmissão. A placa de antena interna apresentou capacidade de se comunicar até 10 metros sem barreira e 4 metros com barreira.

Placas de antena externas foram adquiridas e os ensaios de RSSI repetidos. Os resultados foram expressivamente melhores, apresentando ganhos de 20 a 25 [dBm] nas suas medições. Distâncias de até 20 metros foram alcançadas para casos de visada direta e com barreira. Os resultados demonstraram que placas de antena externas são menos sensíveis a perdas e apresentam um alcance maior de sinal, possibilitando cobrir uma área maior de cobertura.

Com os ensaios de RSSI foi possível estimar a área de cobertura de uma rede em malha que se utiliza dessas placas. Como próxima etapa foi desenvolvido algoritmos de rota capazes de realizar a comunicação entre os nós da malha até um destino definido como nó base. Foi explorado os dois modos de comunicação possíveis da malha, sendo o primeiro baseado na comunicação por transmissão geral de mensagem. Esse modo de transmissão foi explorado mediante um modelo disponibilizado pela biblioteca, sendo necessário o desenvolvimento dos critérios de comunicação. A lógica do critério foi desenvolvida com base na verificação do pacote recebido em cada nó da malha, adicionando o dado local e retransmitindo a mensagem. O algoritmo apresentou falhas devido à perda de sincronismo da malha, duplicando as mensagens ou não verificando o pacote. Consequentemente, a malha apresentou falhas de escalabilidade e na preservação dos dados.

Como alternativa, o segundo algoritmo utilizou a segunda forma de comunicação da biblioteca, baseada na comunicação por ID. Toda placa apresenta um ID definido de fábrica e as funções da biblioteca possibilitam uma comunicação direta por múltiplos saltos entre o nó transmissor e o nó destino. Finalmente, o algoritmo foi testado em uma rede em malha composta por 9 nós alocada em meio urbano, sendo posicionado em residências, realizando 2 horas de medição. Testes de reestruturação da malha foram realizados com a adição e remoção de nós e em todos a biblioteca se mostrou capaz de reorganizar as ligações da rede. O envio de dados foi definido em uma frequência de 15 segundos, mantendo a comunicação em todo momento mesmo com interferências externas.

Portanto, o projeto de rede mostrou-se capaz de realizar a comunicação, mantendo a integridade dos dados, e de se reorganizar a possíveis mudanças ou interferências na malha. A área de cobertura das placas de antena externa apresentam boa comunicação até 20 metros, sendo válida para uso de curtas distâncias, podendo ser aplicadas em meios urbanos, residencias e industriais, mas apresentando limitação em situação de espaço aberto para longas distâncias, como meio rural e florestal.

5.1 Proposta para trabalhos futuros

Outras bibliotecas estão disponíveis para o controle da rede em malha, como a biblioteca da fabricante Espressif. Possivelmente, por se tratar de uma biblioteca da fabricante, um número maior de funções e opções de códigos de transmissão e tratamento dos dados devem estar disponíveis.

O trabalho em questão focou no desenvolvimento da rede em malha utilizando mensagens já definidas para envios de pacote. Projetos que utilizem sensores como captação de dados, podem utilizar desses trabalho para realizar o envio dos dados captados.

Referências

- AFIFIE, N. A. et al. Evaluation method of mesh protocol over esp32 and esp8266. *Baghdad Science Journal*, University of Baghdad, v. 18, p. 1397–1405, 2021.
- AKYILDIZ, I. F.; WANG, X.; WANG, W. Wireless mesh networks: a survey. *Computer Networks*, v. 47, n. 4, p. 445–487, 2005.
- ARM, J. et al. Measuring the performance of freertos on esp32 multi-core. *IFAC-PapersOnLine*, Elsevier, v. 55, n. 4, p. 292–297, 2022.
- BCG, T. B. C. G. Industry 4.0: the future of productivity and growth in manufacturing industries. Alemanha, 2015.
- BENYAMINA, D.; HAFID, A.; GENDREAU, M. Wireless mesh networks design — a survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, v. 14, n. 2, p. 299–310, 2012.
- DE, D.; CUNHA, O. *Redes sem fio de múltiplos saltos: protocolos específicos para aplicações e roteamento com suporte à diversidade cooperativa*. 2008. 20-25 p.
- DELICATO, F. et al. *Middleware orientado a serviços para redes de sensores sem fio*. 2004.
- ESPRESSIF. *ESP32 Series*. USA: Espressif, 2023.
 Urlhttps://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf.
- FOLTÝNEK, P.; BABIUCH, M.; ŠURÁNEK, P. Measurement and data processing from internet of things modules by dual-core application using esp32 board. *Measurement and Control*, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 52, n. 7-8, p. 970–984, 2019.
- HEATH, S. *Embedded systems design*. Burlington MA: Series for design engineers, 2002.
- HERMANN, M. et al. Design principles for industrie 4.0 scenarios: a literature review. *Technische Universität Dortmund, Dortmund*, v. 45, 2015.
- KARL, H.; WILLIG, A. *Protocols and architectures for wireless sensor networks*. USA: John Wiley & Sons, 2007.
- LABRADOR, M. A.; WIGHTMAN, P. M. *Topology Control in Wireless Sensor Networks: with a companion simulation tool for teaching and research*. Tampa, FL: Springer Science & Business Media, 2009.
- LOUREIRO, A. A. et al. Redes de sensores sem fio. Belo Horizonte, MG, p. 179–226, 2003.
- MANVI, M. M.; MAAKAR, M. S. K. Implementing wireless mesh network topology between multiple wi-fi powered nodes for iot systems. *International Research Journal of Engineering and Technology*, v. 7, n. 10, p. 1242–1244, 2020.
- METHLEY, S. *Essentials of wireless mesh networking*. USA: Cambridge University Press, 2009.

MUNADI, R.; SUMARYO, S.; PERDANA, D. Design and implementation of a new monitoring system for electrical energy consumption with smart metering based on internet of things (iot). *International journal of simulation: systems, science & technology*, UK Simulation Society, 2019.

OLIVEIRA, S. de. *Internet das coisas com ESP8266, Arduino e Raspberry PI*. São Paulo, SP: Novatec Editora, 2017.

PAINLESSMESH. *painlessmesh*. 2023. <https://gitlab.com/painlessMesh/painlessMesh>.

RIOS, G. d. A. e. M. S. B. *Redes de sensores sem fio*. Rio de Janeiro, RJ: UFRJ, 2018. [Urlhttps://www.gta.ufrj.br/ensino/eel878/redes1-2018-1/trabalhos-vf/rssf/](https://www.gta.ufrj.br/ensino/eel878/redes1-2018-1/trabalhos-vf/rssf/).

WICAKSONO, M. F.; RAHMATYA, M. D. Smart cluster housing monitoring with esp32, esp-mesh and django. *Journal of Engineering Research (Kuwait)*, University of Kuwait, v. 9, 2021.



TERMO DE RESPONSABILIDADE

O texto do trabalho de conclusão de curso intitulado “Projeto de uma rede sem fio em malha para gerenciamento de sistemas microcontrolados” é de minha inteira responsabilidade. Declaro que não há utilização indevida de texto, material fotográfico ou qualquer outro material pertencente a terceiros sem a devida citação ou consentimento dos referidos autores.

João Monlevade, 21 de fevereiro de 2024 .

Leonardo Rodrigues Teodoro Campos