

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ÂNDERSON BIEGELMEYER

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DA
TOPOLOGIA MESH DO BLUETOOTH 5
EM REDES DE SENSORES SEM FIO
PARA VEÍCULOS DO TRANSPORTE
PÚBLICO**

Porto Alegre
2023

ÂNDERSON BIEGELMEYER

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DA
TOPOLOGIA MESH DO BLUETOOTH 5
EM REDES DE SENSORES SEM FIO
PARA VEÍCULOS DO TRANSPORTE
PÚBLICO**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Controle e Automação

ORIENTADOR: Prof. Dr. Edison Pignaton de Freitas

Porto Alegre
2023

ÂNDERSON BIEGELMEYER

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DA
TOPOLOGIA MESH DO BLUETOOTH 5
EM REDES DE SENSORES SEM FIO
PARA VEÍCULOS DO TRANSPORTE
PÚBLICO**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: _____

Prof. Dr. Edison Pignaton de Freitas, UFRGS

Doutor pela Universidade de Halmstad, Suécia e pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Ivan Muller, UFRGS

Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

Prof. Dr. João Cesar Netto, UFRGS

Doutor pela Université Catholique de Louvain, Bélgica

Prof. Dr. Rafael Kunst, UNISINOS

Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

Coordenador do PPGEE: _____

Prof. Dr. Jeferson Vieira Flores

Porto Alegre, Novembro de 2023.

DEDICATÓRIA

Aos meus pais Carlito e Lurdes, e minha esposa Francine.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por ter a oportunidade de cursar um mestrado acadêmico.

Agradeço à minha esposa Francine, que sempre me motivou e suportou minhas ausências em cada momento investido no mestrado.

Agradeço à minha família por estarem sempre comigo.

Agradeço à empresa LOHR Sistemas que permitiu minhas ausências em horário de trabalho para cursar o mestrado, como também ajudou em todos os custos que tive durante o curso.

Agradeço ao Sr. Willi Hilbert, através da Vermont-rep representando a Silabs no Brasil, que apoiou este trabalho fornecendo diversos nodos Bluetooth 5 para a execução dos testes.

Agradeço ao professor Alexandre dos Santos Roque que co-orientou o desenvolvimento deste trabalho. Foram algumas reuniões online e muitas revisões, opiniões, sugestões e ideias compartilhadas por e-mail. Agradeço por ter aceitado essa co-orientação e por todo seu empenho e tempo.

Agradeço ao meu orientador Edison que me guiou na execução deste trabalho. Foram inúmeros e-mails trocados e horas dedicadas nesta orientação. Agradeço ao tempo dedicado e à oportunidade de ter trabalhado com você.

RESUMO

Atualmente as redes de sensores sem fio veiculares (RSSFV) estão cada vez mais sendo utilizadas por fabricantes de veículos por reduzirem os gastos com cabeamento elétrico, diminuírem o tempo de instalação na linha de montagem e também por permitirem um menor peso no veículo, ajudando na economia de combustível. Não existe uma tecnologia de rede sem fio própria para utilização em RSSFV, pois cada uma possui suas próprias características e diferenças e, provavelmente, este é um dos motivos para a sua tímida utilização na indústria automotiva. Uma lacuna identificada nas RSSF para o domínio automotivo é que a atual literatura é focada somente em carros pequenos na topologia em estrela e poucos destes na topologia *mesh*. Esta pesquisa visa preencher essa lacuna apresentando um estudo experimental com a nova tecnologia Bluetooth 5, em uma topologia de rede *mesh*, aplicada em um ônibus do transporte público. Mensurando as métricas de qualidade do serviço (QoS) da rede, o sistema foi instalado em um ônibus articulado em pleno funcionamento no sistema de transporte público de Caxias do Sul, sendo sujeito a condições adversas durante o trajeto para determinar a influência das pessoas e do ambiente na transmissão de dados. Os resultados obtidos indicam o Bluetooth 5 em uma topologia *mesh* como promissor candidato para RSSFV devido à robustez que apresentou, perdendo somente 0,16% dos pacotes de dados no pior caso, como também mostrou uma maior cobertura da rede sem fio comparado à sua versão anterior, além de um melhor RSSI e *jitter* com um consumo de energia menor comparado à topologia estrela. Os resultados para o *round trip time* podem contribuir para uma análise em aplicações de tempo crítico.

Palavras-chave: Rede de Sensores Sem Fio, Transporte Público, Bluetooth 5, Comunicação Mesh, Comunicação Automotiva.

ABSTRACT

Nowadays In-Vehicle Wireless Sensor Networks (IVWSN) are taking place in car manufacturers because it saves time in the assembling process, saves costs in harness and after-sales, and represents less weight on vehicles helping in diminishing fuel consumption. There is no definition for wireless solution technology for IVWSN, because each one has its own characteristics, and probably this is one of the reasons for its smooth usage in the automotive industry. A gap identified in Wireless Sensor Networks (WSN) for the automotive domain is that the related literature focuses only on ordinary cars with a star topology and few of them with *mesh* topology. This research aims to cover this gap by presenting an experimental study performed on verifying the new Bluetooth 5 technology working in a *mesh* topology applied to public transportation systems (buses). In order to perform this evaluation, a setup to emulate an IVWSN was deployed in a working city bus. Measuring the network metrics, the bus was placed under work in a variety of conditions during its trajectory to determine the influence of the passengers and the whole environment in the data transmission. The results suggest Bluetooth 5 in a *mesh* topology as a promising candidate for IVWSN because it showed the robustness of losing only 0.16% packets in the worst test, as well as its ability to cover a wider range compared to its previous version, indeed a better RSSI and jitter, with lower transmission power, compared to a star topology. The round trip time results can support the analysis for time-critical applications.

Keywords: Wireless Sensor Network, Public Transportation, Bluetooth 5, *mesh* Communication, Automotive Communication..

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 –	Estudos de dispositivos conectados até 2030	16
Figura 2 –	Estrutura típica de uma RSSF.	22
Figura 3 –	Aplicações de uma RSSF.	22
Figura 4 –	Estrutura de um nodo sensor sem fio.	23
Figura 5 –	Topologias de uma rede de sensores sem fio.	24
Figura 6 –	Exemplo de um <i>multipath propagation</i>	25
Figura 7 –	Histórico de versões do Bluetooth.	26
Figura 8 –	Canais Bluetooth.	28
Figura 9 –	Modulação FSK.	28
Figura 10 –	Formato do sinal GFSK	30
Figura 11 –	Formatação do pacote de dados Bluetooth.	31
Figura 12 –	Funcionamento do <i>Message Integrity Code</i>	32
Figura 13 –	Mínimo pacote de dados enviado via Bluetooth (bytes).	32
Figura 14 –	Máximo pacote de dados enviado via Bluetooth (bytes).	33
Figura 15 –	Tempo de conexão para envio de um <i>payload</i> de 251 bytes a 1 Mbps.	33
Figura 16 –	Diferença entre FDMA e TDMA.	34
Figura 17 –	Topologias de rede do Bluetooth 5.	36
Figura 18 –	Topologia estrela comparado ao <i>mesh</i>	37
Figura 19 –	Pilha do protocolo do Bluetooth <i>mesh</i>	38
Figura 20 –	Formato PDU para o Bluetooth <i>mesh</i>	39
Figura 21 –	Tipos de nodos da rede <i>mesh</i>	41
Figura 22 –	Expansão do Bluetooth para a Internet das coisas.	46
Figura 23 –	Componentes que geram o fenômeno de <i>multipath propagation</i> no ônibus	52
Figura 24 –	Placas de desenvolvimento utilizadas nos experimentos	58
Figura 25 –	<i>Demoboard</i> BRD4166A com alimentação por bateria CR2032	58
Figura 26 –	<i>Demoboard</i> SLWSTK6005A com alimentação por powerbank USB	59
Figura 27 –	Tipos de antenas utilizadas nos experimentos	60
Figura 28 –	Pacote de dados do usuário baseado no formato de pacote do protocolo BLE	60
Figura 29 –	Diagrama de sequência do <i>firmware</i>	61
Figura 30 –	Definições do protocolo pelo SIG	62
Figura 31 –	Ambiente de trabalho para o desenvolvimento e experimentos controlados	62
Figura 32 –	Simulação do número mínimo de amostras em função do tamanho da população.	66
Figura 33 –	BER aplicado ao BLE com canal AWGN	67

Figura 34 – Disposição dos 8 nodos na rede simulada no Matlab	68
Figura 35 – Resultados simulação no Matlab para 8 nodos	69
Figura 36 – Disposição dos nodos - 25 e 50	70
Figura 37 – Comparativo do caminho percorrido pelo pacote	71
Figura 38 – Resultados simulação no Matlab para até 100 nodos	72
Figura 39 – Descrição do ambiente de experimentos interno	73
Figura 40 – Resultados dos experimentos em ambiente controlado	74
Figura 41 – Experimento com nodos vizinhos	76
Figura 42 – Posicionamento sequencial dos nodos em estrada rural	77
Figura 43 – Medidas experimentais do RTT em função do número de saltos	77
Figura 44 – Possibilidades de atenuação do sinal RF em um ônibus	78
Figura 45 – Posição dos nodos e visão do ônibus articulado utilizado	79
Figura 46 – Ambiente interno do ônibus articulado utilizado nos experimentos	80
Figura 47 – Resultados dos experimentos a bordo de um ônibus articulado	81
Figura 48 – RSSI registrado ao longo da trajetória	82
Figura 49 – Trajetória realizada pelo ônibus no experimento	83
Figura 50 – PER na comunicação motor para cabine do BLE	84
Figura 51 – Requisitos para RSSFI	85
Figura 52 – Resultados de PER e delay para comparação	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Canal e sua respectiva frequência no Bluetooth	29
Tabela 2 –	Bluetooth 5 Data Coding	35
Tabela 3 –	Definições de cada parâmetro do PDU de rede <i>mesh</i>	39
Tabela 4 –	Síntese dos trabalhos relacionados	50
Tabela 5 –	Diferenças entre ônibus e carros com relação à implementação de uma IVWSN	53
Tabela 6 –	Parâmetros utilizados na rede Bluetooth <i>mesh</i> no Matlab	57
Tabela 7 –	Definições de ruídos para o ambiente controlado	73
Tabela 8 –	Informações e configurações do experimento	80

LISTA DE ABREVIATURAS

AFH	<i>Adaptative Frequency Hopping</i>
BLE	<i>Bluetooth Low Energy</i>
BLE5	<i>Bluetooth 5</i>
BRT	<i>Bus Rapid Transport</i>
CAN	<i>Controller Area Network</i>
CRC	<i>Cyclic Redundancy Check</i>
FDMA	<i>Frequency Division Multiple Access</i>
FHSS	<i>Frequency Hopping Spread Spectrum</i>
GATT	<i>Generic Attribute Profile</i>
GFSK	<i>Gaussian Frequency Shift Keying</i>
FSK	<i>Frequency Shift Keying</i>
IIoT	<i>Internet das Coisas Industrial</i>
ISM	<i>Industrial, científico e médico</i>
IVWSN	<i>In-Vehicle Wireless Sensor Network</i>
LoS	<i>Line of Sight</i>
MIC	<i>Message Integrity Code</i>
PDU	<i>Protocol Data Unit</i>
PER	<i>Packet Error Rate</i>
PHY	<i>Physical Layer</i>
RSSF	<i>Redes de Sensores sem Fio</i>
RSSFI	<i>Redes de Sensores sem Fio Industriais</i>
RSSFV	<i>Redes de Sensores sem Fio Veiculares</i>
RSSI	<i>Received Signal Strength Indicator</i>
RST	<i>Rede sob Teste</i>
RTC	<i>Real Time Clock</i>
RTT	<i>Round Trip Time</i>

SDK	<i>Software Development Kit</i>
SIG	<i>Special Interest Group</i>
SIR	<i>Signal Interference Ratio</i>
SMD	<i>Surface Mount Technology</i>
TDMA	<i>Time Division Multiple Access</i>
TTL	<i>Time to Live</i>
UCE	<i>Unidade de Controle Eletrônico</i>
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
USB	Barramento serial universal
V2V	<i>Vehicle-to-vehicle</i>
V2X	<i>Vehicle-to-anything</i>
WSN	<i>Wireless Sensor Networks</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Motivação	16
1.1.1	Bluetooth <i>mesh</i>	16
1.1.2	Rede de sensores sem fio veiculares	18
1.2	Objetivos	18
1.3	Hipóteses	19
1.4	Contribuições	20
1.5	Organização do texto	20
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
2.1	Redes de Sensores sem Fio	21
2.1.1	Nodo de Comunicação	22
2.1.2	Topologia	23
2.1.3	Desafios em uma rede de sensores sem fio	24
2.2	Bluetooth 5	26
2.2.1	Linha do tempo	26
2.2.2	Camada física atual	27
2.2.3	Formatação do pacote de dados	29
2.2.4	Tempo de frame	31
2.2.5	Salto de frequência adaptativo e divisão do tempo	33
2.2.6	<i>Melhorias do Bluetooth 5</i>	34
2.2.7	Bluetooth <i>mesh</i>	36
2.3	Redes de Sensores sem Fio no Transporte Público	42
3	TRABALHOS RELACIONADOS	45
3.1	Bluetooth 5 e Bluetooth <i>mesh</i>	45
3.2	Bluetooth em RSSFV	48
3.3	Redes de Sensores sem Fio Intra Veiculares	48
4	DECLARAÇÃO DO PROBLEMA	51
5	SOLUÇÃO PROPOSTA	54
5.1	Metodologia	54
5.2	Materiais e métodos	55
5.2.1	Simulação computacional	55
5.2.2	Experimentação prática	56

6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	63
6.1	Métricas de Performance da Rede	63
6.2	Definição do número de amostras	64
6.3	Simulação computacional	66
6.3.1	Comparação do <i>bit error rate</i> com diferentes PHYs	66
6.3.2	Simulação com 8 nodos	67
6.3.3	Simulação para experimento de escala	69
6.4	Primeiros experimentos em laboratório	72
6.5	Latência de salto	75
6.6	A bordo de um ônibus articulado	78
6.6.1	Experimento geral com os nodos de comunicação	78
6.6.2	Análise do RSSI	82
6.7	Comparativo com trabalhos relacionados	84
7	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	87
	REFERÊNCIAS	89

1 INTRODUÇÃO

Carros não são mais somente um meio de transporte, mas sim um conjunto de modernas tecnologias que ajudam e melhoram seu uso e segurança, tais como sistema de auxílio de estacionamento, comandos de voz, piloto automático e também a conectividade sem fio. Os sistemas automotivos embarcados aumentaram sua tecnologia seguindo o setor de consumo, trazendo ao veículo tecnologias que são amigáveis e sofisticadas ao mesmo tempo. Entretanto, geralmente, a comunicação entre unidades de controle eletrônico (UCE) com sensores e atuadores ainda é feita, na maioria das vezes, por cabos ao invés de novas soluções de comunicação sem fio. Este fato aumenta os custos de todo o processo produtivo de um veículo, desde o projeto na engenharia, a compra de insumos, o processo de produção e, futuramente, as manutenções realizadas nos cabos, pois podem se tornar complexas devido ao difícil acesso.

De acordo com (PENG *et al.*, 2019) e (WU *et al.*, 2019) os avanços atuais nas redes veiculares trazem diferentes desafios, pois consideram a comunicação dentro do veículo conhecida por *in-vehicle wireless sensor networks* (IVWSN), entre eles *vehicle-to-vehicle* (V2V) e com a infraestrutura *vehicle-to-anything* (V2X). Neste contexto, é importante considerar o estudo de técnicas de comunicação, estruturas de rede, protocolos de rotas e estratégias inovadores que forneçam confiabilidade e robustez nas redes veiculares. Com relação às comunicações internas de veículos, o surgimento de novas tecnologias aliadas à sua produção em massa permitiram reduzir o custo envolvido da solução e aumentar sua aplicabilidade, tornando as RSSFV (redes de sensores sem fio veiculares) uma tendência promissora para resolver os problemas relacionados a aquisição de dados (COSTA *et al.*, 2018) (GHEORGHIU; IORDACHE; MINEA, 2019).

A literatura neste assunto é bastante focada em RSSFVs aplicadas a carros comuns, mas a indústria automotiva contempla uma gama muito maior de veículos, incluindo ônibus e caminhões que, na aplicação final, representam um ambiente com diferentes características físicas. Uma diferença muito importante entre carros e ônibus visando aplicações de redes sem fio é o tamanho total do veículo. Carros geralmente não ultrapassam 5 metros de comprimento, o que permite soluções sem fio mais simples e com menos potência de transmissão. Ônibus e caminhões representam uma importante fatia deste setor, porém

não podem aproveitar as mesmas soluções de rede sem fio projetadas para carros comuns, pois o ambiente é totalmente diferente. Além das diferenças em tamanho, as redes de comunicação em carros comuns possuem uma quantidade menor de nodos quando comparado a grandes veículos. Ônibus possuem muitos sensores tais como cinto de segurança afivelado (mais de 40 sensores), contador de passageiros, sensor de porta aberta, sensores de parada solicitada distribuídos entre botões e cordel, parada solicitada do cadeirante, entre outros. Para todos esses sensores, uma RSSFV é uma ótima opção para otimizar o projeto. Outro ponto importante para uma rede sem fio quanto à diferença entre carros comuns e ônibus é a quantidade de possíveis fontes de interferência. Quando um ônibus está em operação normal ele pode transportar até 270 passageiros ao mesmo tempo. Supondo que alguns destes passageiros utilizem *smartphones*, fones de ouvido Bluetooth, *smartwatches* e muitos outros dispositivos, a confiabilidade da rede de comunicação sem fio pode ser afetada. A grande quantidade de pessoas também pode ter um efeito de atenuação no sinal sem fio.

Alguns modelos de ônibus urbano, com a finalidade de transportar a maior quantidade de pessoas possível, podem alcançar 28 metros de comprimento e transportar até 270 passageiros. Encarroçadoras de ônibus possuem um gasto elevado com cabos no veículo. O projeto deve prever todos os cabos utilizados para sensoriamento e atuadores, como também cabos de comunicação entre equipamentos. Também devem ser previstos os conectores de cada cabo com o respectivo equipamento. Tudo isso gera um custo considerável para o fabricante. A manutenção deste cabeamento também é outro fator importante, pois após anos de uso curto-circuitos podem acontecer na fiação devido à vibração intensa do veículo, comprometendo o funcionamento e sua correção pode não ser uma tarefa trivial.

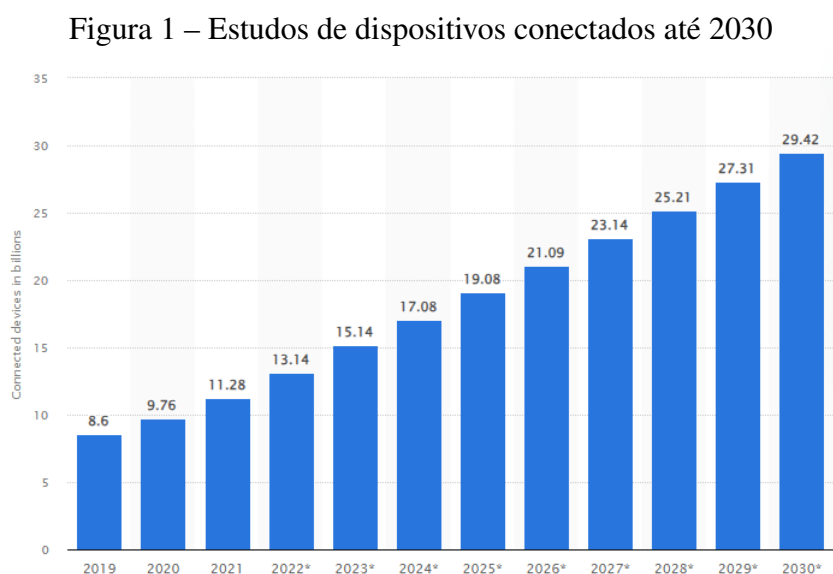
A proposta deste trabalho é analisar uma RSSFV aplicada ao transporte público em ônibus, onde as distâncias envolvidas entre sensores são maiores e interferências podem ser mais fortes que carros comuns. Para executar essa análise, um estudo experimental foi realizado utilizando a nova tecnologia Bluetooth 5 na topologia *mesh* em um ônibus urbano em pleno seu funcionamento. O Bluetooth 5 trouxe novas melhorias tais como uma área de cobertura até quatro vezes maior, o dobro de velocidade na transmissão de dados e a capacidade de operar em topologia *mesh*, permitindo sua aplicabilidade em RSSFV (COLLOTTA *et al.*, 2018). Deste modo, a principal contribuição deste trabalho é explorar uma nova versão de tecnologia de comunicação sem fio para implantar uma RSSFV em veículos utilizados no transporte público, preenchendo a lacuna encontrada na literatura, onde estudos similares foram realizados focados em veículos de menor porte na topologia de rede em estrela.

1.1 Motivação

1.1.1 Bluetooth *mesh*

Enquanto a adoção e aplicação do Bluetooth tem sido requisitada pelo setor de consumo, existem outros setores que aplicam ou que estão aumentando sua fatia de dispositivos Bluetooth, como é o caso da Internet das Coisas Industrial (IIoT) e dispositivos de inteligência artificial e de borda. De acordo com (SIG, 2022) em 2021 foram produzidos um total de 4,7 bilhões de dispositivos com a tecnologia Bluetooth e para 2026 a previsão é que alcance os 7 bilhões de dispositivos. A sua massiva adoção em diversos produtos de diversas aplicações tem contribuído para reduzir o custo de fabricação do chip, reduzindo também o custo para a adesão dessa tecnologia, o que encoraja seu uso em novas aplicações.

Conforme mostra a Figura 1, proveniente de um estudo para a previsão de dispositivos (STATISTA, 2022), teremos até 2030 uma estimativa de 29,42 bilhões de dispositivos conectados à Internet.



Fonte: (STATISTA, 2022)

Outro ponto importante quanto ao Bluetooth é sua evolução. Conforme será apresentado no subcapítulo 2.2.1, essa tecnologia de comunicação sem fio foi lançada no ano de 1999 e, desde então, vem sofrendo atualizações importantes que trazem melhorias significativas, ao passo que outras soluções de comunicação sem fio foram esquecidas no tempo. A constante evolução e dedicação de várias empresas em fazer parte do SIG (*Special Interest Group*) do Bluetooth o impulsionam para uma tecnologia que tende sempre a estar atualizada.

O interesse da indústria na tecnologia BLE (*Bluetooth Low Energy*) tem instigado diversas atualizações nas especificações do BLE (DARROUDI; GOMEZ, 2020) (RON-

DÓN; GIDLUND; LANDERNÄS, 2017), que atualmente está na versão 5.4. Outro fator impulsionado pela demanda é quanto à sua topologia. Originalmente, o BLE suportava somente a topologia em estrela. Entretanto, diversas tecnologias concorrentes já suportavam uma topologia *mesh*, o que era um grande diferencial em aplicações visto sua robustez e área de cobertura (DARROUDI; GOMEZ, 2020). Com isso, o SIG lançou o BLE *mesh*, forçando uma nova atualização e permitindo ao Bluetooth diversas novas aplicações que antes estavam reservadas às outras tecnologias de comunicação sem fio.

Algumas características relevantes para o uso do Bluetooth *mesh*:

- Cobertura de áreas muito extensas;
- Interoperabilidade;
- Habilidade de monitorar e controlar um grande número de dispositivos;
- Otimizado para baixo consumo de energia;
- Mundialmente padronizado em legislações locais;
- Compatibilidade com os *Smartphones*.

Esta última característica entrega ao Bluetooth um grande diferencial frente a outras soluções, que é a possibilidade de um *Smartphone* ou *tablet* se conectar diretamente à rede *mesh* sem a necessidade de um *gateway* ou *proxy* específico. Outro lado positivo do Bluetooth *mesh* é que os nodos não necessitam de outra tecnologia para o provisionamento, pois os *Smartphones* possuem nativamente a capacidade de se conectar ao BLE, o que reduz custos e permite o provisionamento sem intermediários (ERAS; DOMÍNGUEZ; MARTINEZ, 2022).

Membros do SIG, oriundos de grandes empresas de tecnologia, frequentemente reportavam as limitações de outras tecnologias de rede *mesh* que estavam utilizando, como, por exemplo, baixa taxa de transmissão de dados, número limitado de saltos ao retransmitir mensagens ao longo da rede, limites de escalabilidade geralmente causados pelo modo de uso dos canais do rádio e latências elevadas (SIG, 2023a). Muitos destes fatores foram levados em consideração pelo SIG ao modelar o Bluetooth *mesh*.

Um significativo aumento no número de dispositivos nas redes, como também a área de cobertura, é uma tendência na maioria das aplicações recentes. Nestes casos, as redes *mesh* Ad Hoc são preferidas em comparação com redes em topologia em estrela, onde um ponto de falha central pode ter impactos severos na comunicação (RONDÓN *et al.*, 2019).

1.1.2 Rede de sensores sem fio veiculares

As redes de sensores sem fio veiculares (RSSFV), mais conhecida na literatura por sua versão em inglês *in-vehicle wireless sensor networks*, estão cada vez mais tomando espaço em fabricantes de veículos por reduzirem os gastos com cabeamento elétrico, diminuírem o tempo de instalação na linha de montagem e também por permitirem um menor peso no veículo, ajudando na economia de combustível.

Diversos trabalhos na literatura são focados em análises de redes de sensores sem fio aplicadas a carros de passeio, que possuem características distintas que os ônibus, conforme será aprofundado mais adiante. A partir desta lacuna identificada surgiu uma motivação para aplicação do Bluetooth *mesh* em RSSFV, avaliando seu desempenho em uma aplicação real, diferente da maioria dos trabalhos encontrados onde foram feitas simulações e análises teóricas.

Conforme a ABNT NBR 15570 (NBR-15570, 2020) existem limites de peso específicos para cada tipo de veículo que fabricantes devem cumprir. A utilização de cabos para conexão de sensores, que é amplamente utilizada, aumenta consideravelmente o peso do veículo, afetando diretamente o cumprimento desta normativa. Uma estratégia para diminuir o peso do ônibus é aplicar sensores sem fio ao invés de sensores cabeados. Entretanto, não é qualquer tipo de rede de sensores sem fio que consegue trabalhar adequadamente em aplicações automotivas.

Recentemente, o CONTRAN, órgão regulador do sistema de trânsito brasileiro, publicou uma nova resolução que exige que todos os veículos possuam um sistema de aviso de não afivelamento dos cintos de segurança. Esta medida se aplica também aos ônibus do transporte público, sejam veículos urbanos ou rodoviários. O aviso deve ser visual para o motorista do veículo, que deve ser capaz de identificar qual poltrona está com cinto desafivelado. Para tal função é necessário que todas as poltronas enviem seu *status* para o dispositivo central na cabine do motorista. Esta comunicação pode ser feita via cabos, percorrendo todo o veículo, ou então em formato sem fio. Se considerarmos os dispositivos básicos de um ônibus urbano de passageiros, temos então os dispositivos para leitura do afivelamento de cinto de segurança, os botões de parada solicitada distribuídos ao longo do corredor e sensores de porta aberta. Este número de sensores pode alcançar a marca de 60 dispositivos, e considerar um sistema de comunicação cabeado reflete em dezenas de metros de cabo. A aplicação de uma RSSFV para a aquisição destes dados pode trazer diversos benefícios na instalação, custos e futuras manutenções.

1.2 Objetivos

O objetivo deste trabalho é avaliar a nova tecnologia Bluetooth *mesh* como sendo uma opção para RSSFV aplicada ao transporte público em ônibus, onde as distâncias envolvidas e as interferências podem ser maiores que em carros de passeio. Para avaliar a

RSSFV são realizados estudos experimentais em um ônibus em pleno seu funcionamento diário, monitorando métricas de performance da rede e comparando os resultados com trabalhos relacionados na área.

São definidos como objetivos específicos deste trabalho:

1. Simular diferentes quantidades de nodos mediante software de simulação;
2. Determinar a latência de cada salto na rede *mesh*;
3. Realizar experimentos em ambiente controlado monitorando as métricas de performance da rede;
4. Embarcar a rede em um ônibus do transporte público, em pleno seu funcionamento, e realizar experimentos monitorando as métricas de performance da rede;
5. Comparar os resultados obtidos com os trabalhos relacionados na literatura.

1.3 Hipóteses

Uma importante hipótese que precisa ser destacada é que não são somente os dispositivos dos passageiros podem afetar a comunicação, mas também o ambiente ao qual a rede está inserida. Os ônibus geralmente possuem estruturas internas feitas de metal, como, por exemplo, o piso, os corrimões, possíveis divisórias, e isso tudo pode contribuir para a reflexão do sinal sem fio, atuando como barreiras no caminho das ondas de rádio ou simplesmente adicionando uma reflexão da onda no sinal original (*multipath propagation*), conforme será discutido no subcapítulo 2.1.3. Outra variável que pode afetar a integridade do sinal são todas as ondas de rádio presentes no ambiente que operam na mesma frequência. A frequência não licenciada de 2,4 GHz tende a estar bastante ocupada, portanto é importante realizar diferentes experimentos para validação da rede nestes cenários mais desafiadores.

Para uma mesma área é esperado que uma maior quantidade de nodos seja benéfica para a rede como um todo. Em virtude do tamanho do ônibus ser maior que carros comuns, mas também menor que aplicações de campo ou industriais, portanto é possível que acima de uma quantidade determinada de nodos o aumento deles pode não trazer tantos benefícios à rede. Esse comportamento será avaliado ao longo deste trabalho.

Abaixo está o resumo de cada hipótese para referência ao longo deste trabalho.

1. Hipótese 1 : Uma maior quantidade de pessoas a bordo do ônibus pode atenuar o sinal sem fio;
2. Hipótese 2 : Obstáculos internos podem afetar a comunicação entre os dispositivos;

3. Hipótese 3 : Interferência de outras redes no ambiente podem afetar a comunicação entre os dispositivos;
4. Hipótese 4 : O aumento da quantidade de nodos é benéfico para uma rede até determinado número.

1.4 Contribuições

O presente trabalho contribui para a literatura apresentando uma opção de rede de sensores sem fio veicular baseada no Bluetooth *mesh* aplicado ao transporte público, que possui características mais desafiadoras que ambientes de carros comuns. Devido aos experimentos, foi possível identificar como a rede *mesh*, e também a rede em topologia estrela, respondem a determinados ambientes e interferências.

Foi possível avaliar uma solução de mercado, verificando os *delays* existentes na transmissão e reencaminhamento de mensagens. Foram obtidas diversas métricas de qualidade da rede que podem servir como referência em comparativos para outros projetos e trabalhos futuros.

Simulações da rede Bluetooth *mesh* também foram realizadas a fim de corroborar com os experimentos práticos, sendo possível escalar a quantidade de nodos aproveitando do recurso computacional. As simulações indicam uma similaridade com os experimentos práticos.

Os resultados apresentados sugerem que o Bluetooth *mesh* é uma solução promissora de RSSFV, podendo ser utilizada para coleta de dados em veículos do transporte público. Seu comportamento foi superior aos resultados de vários trabalhos relacionados e sua aplicabilidade se torna acessível visto sua massiva utilização, produção e disponibilidade mundialmente.

1.5 Organização do texto

O trabalho a seguir está organizado da seguinte forma. O capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica necessária para o desenvolvimento e compreensão do trabalho. No capítulo 3, são apresentados e comparados os principais trabalhos relacionados, sendo o estado da arte sobre o tema. O capítulo 4 mostra a declaração do problema, uma síntese da motivação e diferenças na aplicação. O capítulo 5 apresenta a proposta de trabalho com o detalhamento da metodologia aplicada aos experimentos, os desenvolvimentos necessários e o material utilizado. O capítulo 6 mostra os resultados obtidos e discussões pertinentes. Por fim, o capítulo 7 apresenta as conclusões e trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão revisados conceitos importantes para o desenvolvimento e entendimento deste trabalho.

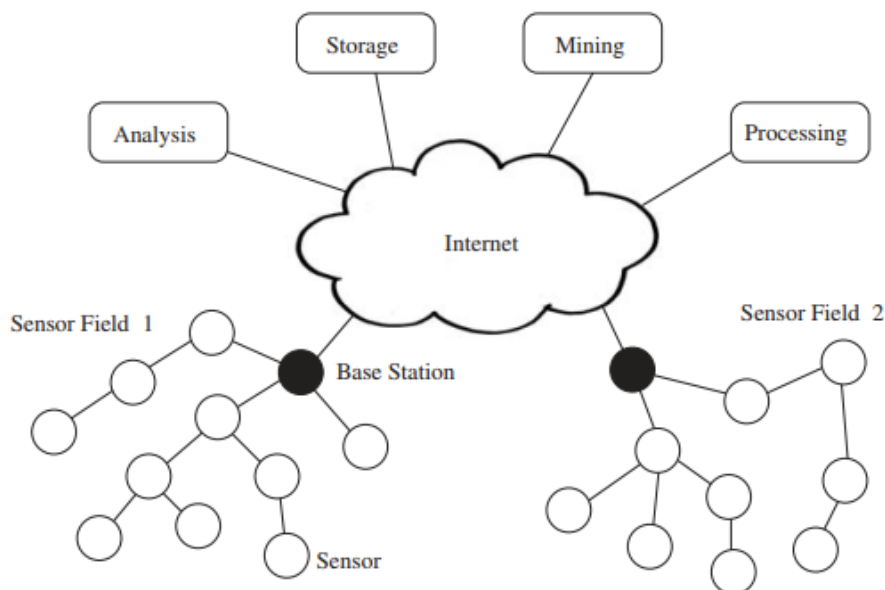
2.1 Redes de Sensores sem Fio

As redes de sensores sem fio (RSSF), também conhecidas no termo em inglês *wireless sensor networks* (WSN), consistem em vários dispositivos que realizam sensoriamento, processamento local e se comunicam internamente de uma rede ajudando a um administrador a observar, reacionar e computar eventos em uma aplicação específica (DUMKA *et al.*, 2019). Entretanto, as WSN não são somente utilizadas no sentido de sensorear o ambiente ou aplicação, elas são grupos de sensores e também de atuadores autônomos com intenção de monitorar e controlar o ambiente de sua aplicação e cooperativamente enviar seus dados para um local central e/ou enviar comandos para o atuador desejável (YANG, 2014). A Figura 2 ilustra a estrutura típica de uma RSSF. Anteriormente, era utilizado o termo *wireless sensor and actuator networks* devido a essa funcionalidade de controle, mas com o tempo se adotou o termo mais curto *wireless sensor networks*.

Algumas características diferem uma WSN de uma rede comum de computador. Uma delas é a sua capacidade de se adaptar ao ambiente ao qual está inserida, ou seja, possuir uma espécie de inteligência para garantir a autonomia e funcionabilidade da rede ao ser submetida a variações como perda de nodos, mudança de topologia, interferências, entre outros. Restrições de energia também são um diferencial, pois, na maioria das aplicações, os nodos são operados por bateria, exigindo uma atenção especial ao consumo de energia de cada nodo. Outro ponto diferencial é a escalabilidade de uma RSSF que pode variar desde dezenas a milhares de nodos comunicando entre si.

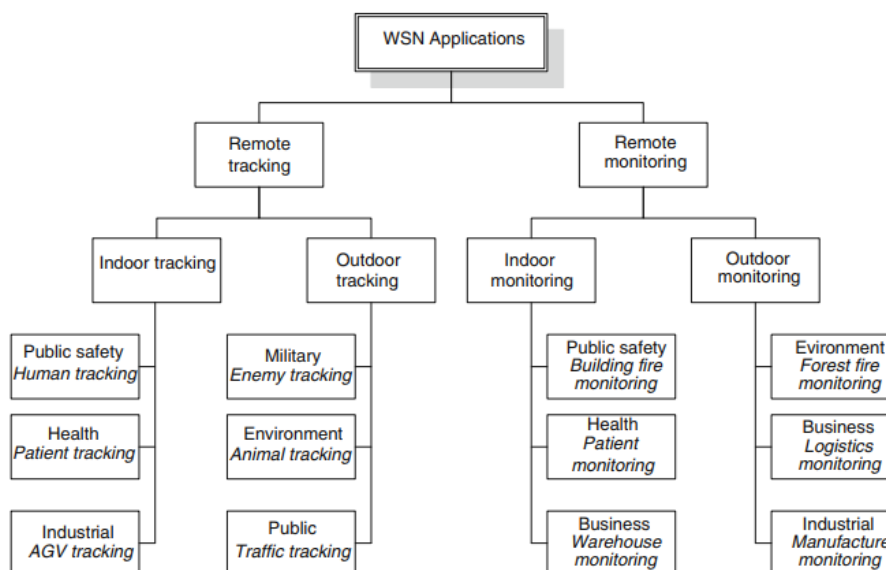
As RSSF podem ser usadas em uma ampla variedade de aplicações em diversas áreas tais como civil, comercial e industrial conforme Figura 3.

Figura 2 – Estrutura típica de uma RSSF.



Fonte:(DARGIE; POELLABAUER, 2010)

Figura 3 – Aplicações de uma RSSF.



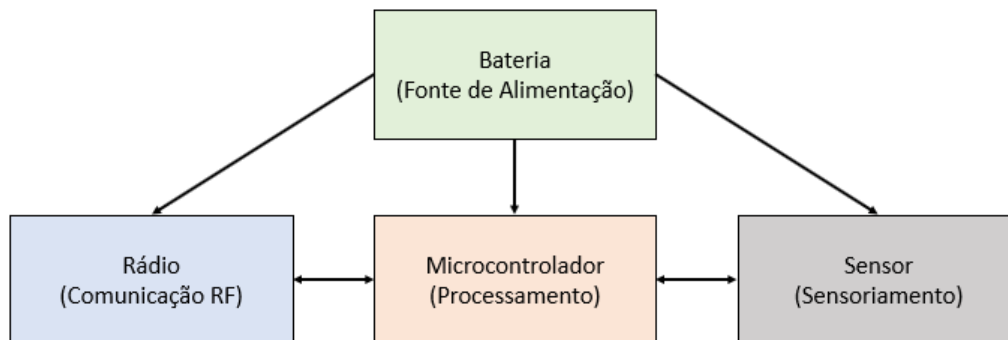
Fonte:(YANG, 2014)

2.1.1 Nodo de Comunicação

Um nó sensor pode não ser somente responsável pela coleta de dados, mas também pela análise, correlação e fusão dos dados do próprio nodo com os dados de outros nodos (DARGIE; POELLABAUER, 2010). Tais habilidades exigem que o nodo seja composto por basicamente por 4 blocos, como mostra a Figura 4.

- Comunicação RF: A comunicação RF é responsável por enviar e receber dados na rede. Neste bloco se tem um dos maiores desafios de uma WSN, pois a comuni-

Figura 4 – Estrutura de um nodo sensor sem fio.



Fonte: do autor

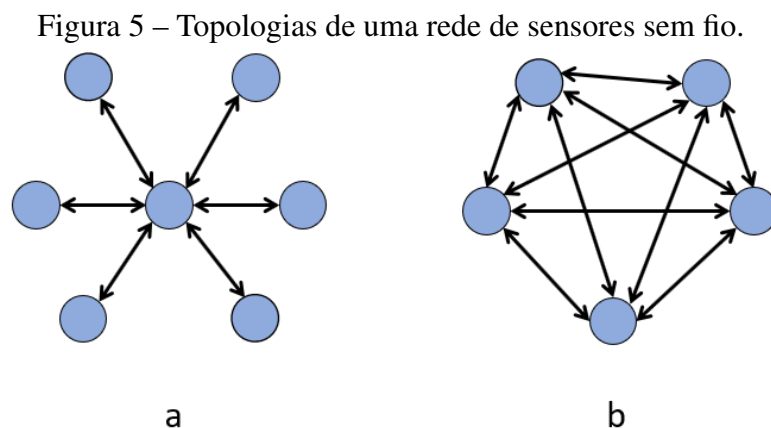
cação deve ser confiável, robusta, atender aos requisitos da aplicação, ter um custo aceitável e ser viável. Unir estes fatores pode não ser trivial. Atualmente se tem um grande leque de tecnologias de comunicação sem fio, muito baseadas na popular banda de comunicação ISM (industrial, científica e médica), aberta e livre de licenças, como também bandas de frequência reservadas e privadas.

- **Processamento:** É responsável por ler os dados disponíveis do sensor, processar os dados, controlar possíveis outras funções do nodo e executar tarefas relativas à comunicação sem fio.
- **Sensoriamento:** Os sensores são dispositivos estimulados por qualquer variação física no ambiente a ser monitorado e então convertido para um sinal analógico capaz de ser lido pelo microcontrolador.
- **Fonte de alimentação:** É responsável por prover energia para todos os blocos já citados do nodo. A escolha do microcontrolador, da tecnologia de comunicação RF e do sensor influenciam diretamente no consumo de energia e, conseqüentemente, no tempo de vida útil da bateria. Por exemplo, quanto maior o processamento de dados realizado pelo microcontrolador, maior será a energia consumida por ele. Quanto maior o uso da comunicação RF, maior também será o consumo. Portanto, um balanço entre consumo de energia do sistema e as necessidades da aplicação deve ser avaliado no projeto.

2.1.2 Topologia

O projeto de uma RSSF pode exigir diferentes tipos de topologias quanto aos nodos dentro da rede. Algumas topologias que se destacam para o uso em WSN são em estrela, *mesh* e híbrida (DUMKA *et al.*, 2019). A Figura 5 apresenta um exemplo de topologia em estrela (a) e *mesh* (b).

Assim como a escolha da tecnologia de comunicação sem fio, a topologia da rede também irá depender de vários fatores dependendo da demanda da aplicação. Por exemplo, uma rede *mesh*, num primeiro momento, pode ser a melhor opção para cobertura da rede,



Fonte: do autor

porém ela pode exigir uma maior complexidade no roteamento de mensagens, exigindo mais processamento do nodo. A topologia em estrela pode ser fácil de ser implementada e também ser útil para a maioria das aplicações, porém pode apresentar limitações nas comunicações end-to-end (E2E), incluindo como principal desvantagem a situação em que caso o nodo central entre em falha, a rede como um todo ficará comprometida (YANG, 2014). Portanto, os requisitos da aplicação devem ser considerados também para a escolha da topologia de rede.

2.1.3 Desafios em uma rede de sensores sem fio

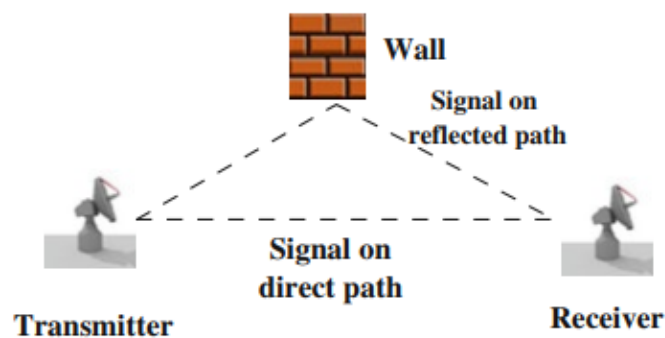
As RSSF apresentam alguns desafios tanto no projeto quanto na sua implementação no que diz respeito à eficiência energética, interferência, segurança, gerenciamento dos dados e implementação em larga escala (YANG, 2014). Essas questões devem ser consideradas independentemente da tecnologia de comunicação sem fio escolhida.

- **Consumo energético:** Os nodos são geralmente alimentados por bateria e podem estar localizados em regiões de difícil acesso, com isso o consumo energético deve ser otimizado ao máximo. Um dos meios para melhorar a eficiência energética é utilizando uma tecnologia de comunicação sem fio e hardware apropriados para a aplicação. Tecnologias mais recentes podem utilizar circuitos integrados com menor consumo de energia. Outro meio é otimizar o firmware do nodo, incluindo algoritmos de roteamento da comunicação sem fio, o que torna a rede mais eficiente e, conseqüentemente, diminui o consumo de energia.
- **Interferências:** Um ponto extremamente importante para o funcionamento de uma RSSF é a sua robustez contra interferências. Tal interferência pode ser proveniente de outras redes de comunicação com frequência base próximas ou até mesmo de equipamentos geradores de ruídos, podendo reduzir significativamente a performance de uma RSSF (YANG, 2014). Atualmente existem várias técnicas para

melhorar a imunidade contra interferências e algumas delas serão abordadas na tecnologia escolhida neste trabalho.

As interferências não estão somente relacionadas a dispositivos externos, mas a própria RSSF pode gerar sua interferência por meio de um fenômeno físico conhecido como *multipath propagation*. O *multipath propagation* consiste no fenômeno onde o sinal transmitido chega ao receptor por diferentes caminhos, sejam eles de forma direta ou mediante reflexões de construções, janelas e obstáculos (YANG, 2014). A Figura 6 exemplifica tal situação. O sinal transmitido pode chegar ao receptor através do caminho direto, conhecido por *Line of Sight* (LoS), como também através do sinal refletido por uma parede próxima. O receptor deve possuir mecanismos para distinguir os sinais refletidos do sinal original, para assim evitar que um interfira no outro (YANG, 2014).

Figura 6 – Exemplo de um *multipath propagation*.



Fonte: (YANG, 2014)

Entretanto, o sinal refletido que chega ao receptor nem sempre é prejudicial para uma rede sem fio. Ele pode ser benéfico quando a onda de rádio refletida é somada à onda de caminho direto, resultando em um sinal de maior intensidade no receptor (EREN, 2018). Essa soma depende do ângulo de fase relativo entre os sinais, sendo benéfica quando os sinais são somados e prejudicial quando subtraídos. Geralmente os sinais com múltiplos caminhos não são desejáveis, mas podem ser vantajosos em alguns casos específicos.

- **Segurança:** Devido ao fato de uma rede de comunicação sem fio estar justamente descoberta na região de seu alcance é imprescindível que a rede possua mecanismos de segurança contra invasões externas, tais como *hackers* e decodificadores de dados para roubar informações. Artifícios como encriptação dos dados podem ser implementados nas RSSF a fim de elevar o nível de segurança da rede.
- **Custo de produção:** Uma RSSF geralmente possui de centenas a milhares de nodos, portanto o custo da solução deve ser viável e considerado no projeto.

- Latência: Receber os dados de forma íntegra e no tempo requerido são características primárias em uma RSSF, isso pode ser alcançado reduzindo o delay através de uma topologia e uma tabela de roteamento da rede apropriada para a aplicação (DUMKA *et al.*, 2019).

2.2 Bluetooth 5

O Bluetooth é uma tecnologia de comunicação sem fio globalmente utilizada e difundida, estando presente em diversos dispositivos do nosso dia a dia tais como *Smartphones*, fones de ouvido sem fio, eletrodomésticos, dispositivos vestíveis, entre outros. O Bluetooth surgiu pela união de um comitê formado por representantes das principais empresas de tecnologias, sendo elas a Apple, Intel, Microsoft, Ericsson, entre outras, denominado por SIG (*Special Interest Group*). O SIG é responsável pelos avanços do Bluetooth e pela definição dos seus padrões. Sua primeira versão foi lançada em 1999 e, ao longo do tempo, vem sofrendo uma série de atualizações e melhorias, justificando seu posto de um dos pilares da Internet das Coisas (COLLOTTA *et al.*, 2018).

Basicamente existem duas classificações da tecnologia com aplicações e características diferentes. O Bluetooth Classic que é mais focado para aplicações de áudio sem fio, as quais exigem maiores taxas de transferência e comunicação ponto a ponto e o Bluetooth Low Energy (BLE) que permite as mais diversas aplicações focado no baixo consumo e na disponibilidade de outras topologias de rede como ponto a ponto, broadcast e *mesh* (SIG, 2023b). Este trabalho se baseia no estudo do Bluetooth Low Energy.

2.2.1 Linha do tempo

A Figura 7 mostra o histórico da evolução do Bluetooth e seus lançamentos de versões. Enquanto a trajetória de mais de 25 anos lançou várias versões e todas elas retro compatíveis, o Bluetooth evoluiu consideravelmente e a versão atual difere bastante das versões anteriores.

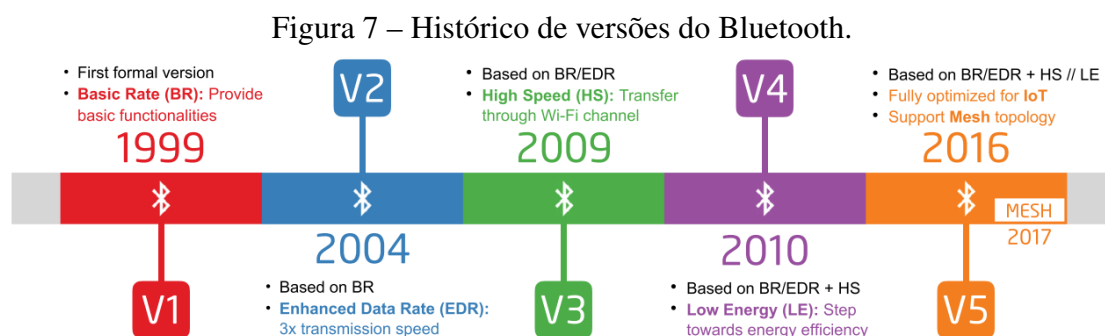


Fig. 1. A brief history of Bluetooth.

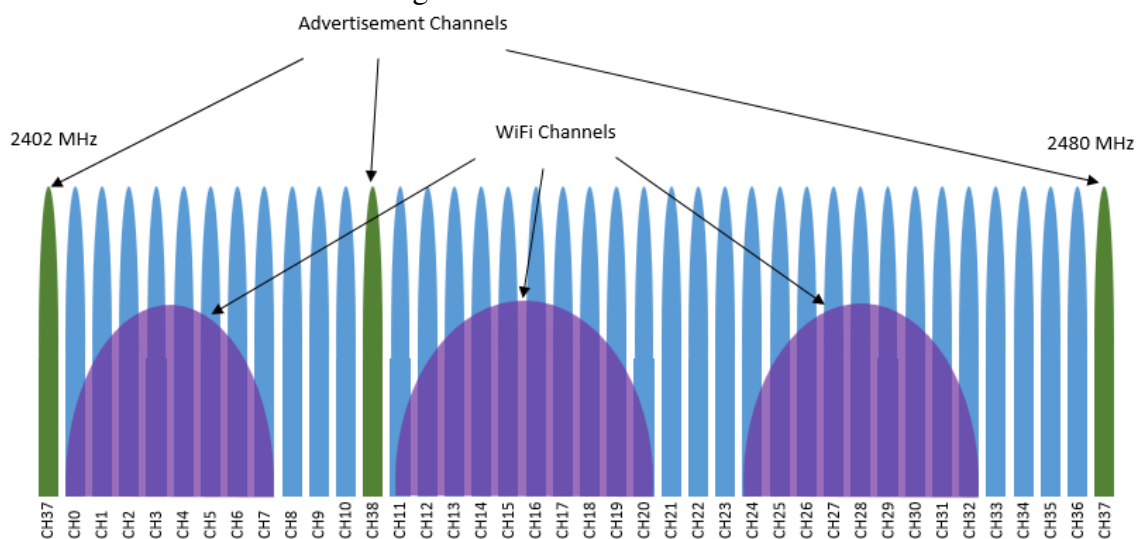
Fonte: (YIN *et al.*, 2019)

- Bluetooth v1.0 (1999): Foi a primeira versão oficial do Bluetooth. Com taxa de transmissão de até 0,7 Mbps, distância máxima de 10 metros, permitindo somente fala na comunicação, foi lançada como substituição aos cabos físicos.
- Bluetooth v2.0 (2004): Lançada com o *Enhanced Data Rate*, permitiu uma maior transferência de dados com velocidades até 3 Mbps, uma distância de até 30 metros e permitia o envio de músicas pela comunicação.
- Bluetooth v3.0 (2009): Essa versão permite o envio de dados no modo alta velocidade a uma taxa de 24 Mbps utilizando o link 802.11 (WiFi). Foram implementadas melhoras no gerenciamento de energia.
- Bluetooth v4.0 (2010): Nesta versão se introduziu o Bluetooth Low Energy (BLE), que permitiu uma transferência de dados em até 1 Mbps com um consumo muito menor de energia comparado às suas versões anteriores. Essa versão permitiu o início dos dispositivos com Bluetooth operando através de bateria.
- Bluetooth v4.2 (2014): Com o crescimento elevado de dispositivos Bluetooth conectados, essa versão adicionou maior segurança às conexões visando a Internet das Coisas.
- Bluetooth v5.0 (2016): É a versão do Bluetooth onde se teve as maiores melhorias, por exemplo, a inclusão do *Long Range Mode* com o novo *Physical Layer* (PHY), que permite uma cobertura até 4 vezes maior, como também o *Physical Layer* (2M PHY) adicional, que permite dobrar a velocidade para 2 Mbps no modo *Low Energy*. Outra funcionalidade adicionada que abre caminho para diversas novas aplicações é a capacidade de operar na topologia *mesh*. A partir desta versão o trabalho se aprofundará nos conceitos das melhorias neste capítulo.

2.2.2 Camada física atual

O Bluetooth opera dentro da banda de radiofrequência não licenciada de 2,4 GHz conhecida por ISM. As faixas de frequência utilizadas iniciam em 2402 MHz até 2480 MHz, totalizando 40 canais separados por 2 MHz de banda. Ao longo dos 40 canais, 37 deles são utilizados propriamente para a troca de dados e 3 deles para a função de *Advertisement*. A potência máxima de transmissão é limitada em +20 dBm (100 mW). A Figura 8 mostra o espectro de frequência utilizado pelo Bluetooth, como também os utilizados pelo WiFi. Devido ao fato de ser uma banda de frequência não licenciada, diversas tecnologias de comunicação sem fio baseiam seu funcionamento nessa faixa, o que acaba sendo prejudicial no sentido de saturação de canais. A Tabela 1 lista cada canal e sua correspondente frequência no Bluetooth.

Figura 8 – Canais Bluetooth.

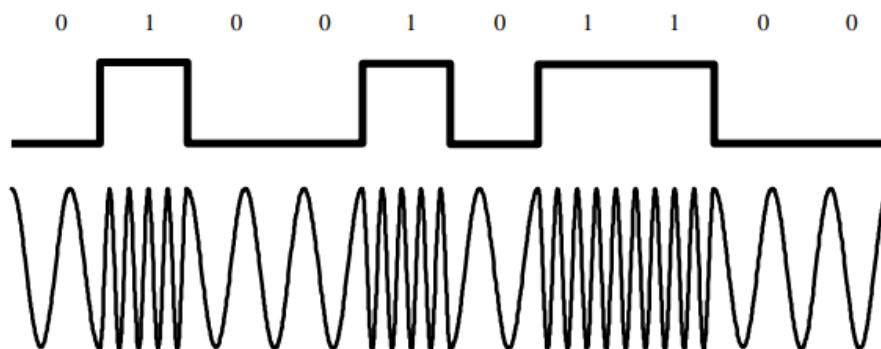


Fonte: do autor

2.2.2.1 Modulação GFSK

O Bluetooth utiliza para modulação do sinal o GFSK (*Gaussian Frequency Shift Keying*), que é uma melhoria do FSK (*Frequency Shift Keying*). O FSK é uma modulação que altera a frequência da portadora para indicar o dado a ser transmitido. Por exemplo, para transmitir o binário **zero** se utiliza uma frequência **a** e para transmitir o binário **um** se utiliza uma frequência **b**, mantendo a amplitude do sinal constante (EREN, 2018). A Figura 9 mostra um sinal modulado com FSK. É possível observar uma mudança abrupta da frequência.

Figura 9 – Modulação FSK.



Fonte: (EREN, 2018)

Já o GFSK aplica um filtro Gaussiano na troca das duas frequências da portadora, com isso a resposta em frequência do sinal possui uma menor largura espectral, tornando a troca de frequências mais suave. Em outras palavras, as variações de amplitude e fase do sinal modulado são relativamente menores quando comparados ao tradicional FSK (EVERYTHINGRF, 2022). A Figura 11a mostra a resposta ao impulso do filtro Gaussi-

Tabela 1 – Canal e sua respectiva frequência no Bluetooth

Canal	Frequência (MHz)	Canal	Frequência (MHz)	Canal	Frequência (MHz)
0	2404	14	2434	28	2462
1	2406	15	2436	29	2464
2	2408	16	2438	30	2466
3	2410	17	2440	31	2468
4	2412	18	2442	32	2470
5	2414	19	2444	33	2472
6	2416	20	2446	34	2474
7	2418	21	2448	35	2476
8	2420	22	2450	36	2478
9	2422	23	2452	37	2402
10	2424	24	2454	38	2426
11	2428	25	2456	39	2480
12	2430	26	2458		
13	2432	27	2460		

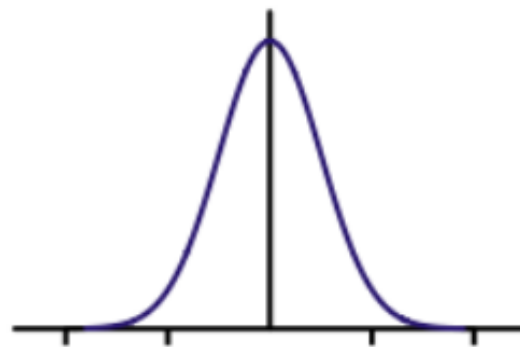
ano e a Figura 11b mostra um sinal modulado com GFSK e a resposta ao sinal.

2.2.3 Formatação do pacote de dados

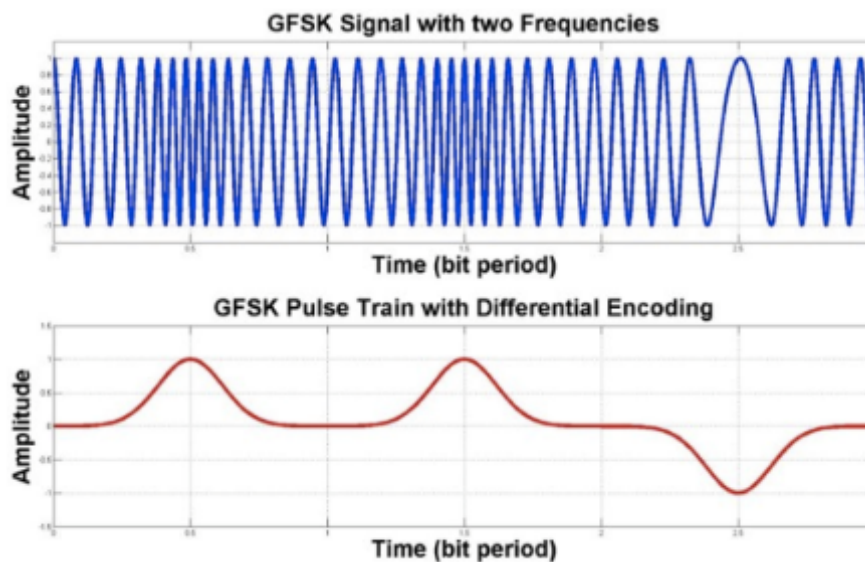
No Bluetooth 5, o formato do pacote de dados permaneceu igual ao do Bluetooth v4.2, com o *payload* podendo chegar a 251 bytes (SIG, 2020a)(MATHWORKS, 2023), com exceção do preâmbulo que pode aumentar para 2 bytes na taxa de dados de 2 Mbps. A Figura 11 mostra o formato do pacote.

- **Preamble:** Utilizado para sincronização do pacote a ser enviado por uma sequência de bits conhecidos. Quando utilizado o 1M PHY (1Mbps) o preâmbulo é de 1 byte e para o 2M PHY (2Mbps) o preâmbulo assume o tamanho de 2 bytes.
- **Access Address:** Quando o rádio do Bluetooth está aguardando por dados em um canal, ele recebe todos os sinais sem fio que estão no seu alcance em determinada frequência (SIG, 2020b). Estes sinais podem ser:
 - Pacotes Bluetooth para esse dispositivo;
 - Pacotes Bluetooth que não são endereçados para esse dispositivo;
 - Pacotes relativos a outras tecnologias de comunicação sem fio operando na mesma banda ISM e no mesmo canal;
 - Ruídos.

Figura 10 – Formato do sinal GFSK



(a) Resposta ao impulso do filtro Gaussiano



(b) Sinal com filtro Gaussiano e resposta ao sinal da modulação GFSK

Fonte: (EVERYTHINGRF, 2022)

Para que o rádio consiga diferenciar os pacotes de forma precisa, o Bluetooth possui 4 bytes que são gerados pelo mestre da comunicação de forma aleatória em cada início de conexão (SIG, 2019). Então o valor do *access address* é compartilhado com o(s) dispositivo(s) da rede para que eles possam filtrar os pacotes recebidos por esse parâmetro. Para pacotes de *Advertising* o valor do *access address* é fixo definido pelo Bluetooth SIG em 0x8E89BED6. O campo é formado por 4 bytes.

- **PDU:** O PDU (*Protocol Data Unit*) se refere à toda informação do protocolo a ser transmitida. Existem diversos tipos de PDUs tais como *Advertising*, conexão, controle, dados, aplicação, entre muitos outros. O PDU é composto pelo menos do *LL Header*, onde são definidos os parâmetros como o tipo de PDU e o *payload* da mensagem, o qual são os dados efetivos da mensagem.

Figura 11 – Formatação do pacote de dados Bluetooth.

Preamble	Access Address	PDU (2-257 bytes)					CRC
		LL Header	Payload (0-251 bytes)			MIC (Optional)	
			L2CAP Header	ATT Data (0-247 bytes)			
1 byte (1M PHY) 2 bytes (2M PHY)	4 bytes	2 bytes	4 bytes	ATT Header	ATT Payload	4 bytes	3 bytes
			Op Code	Attribute Handle	Up to 244 bytes		
			1 byte	2 bytes			

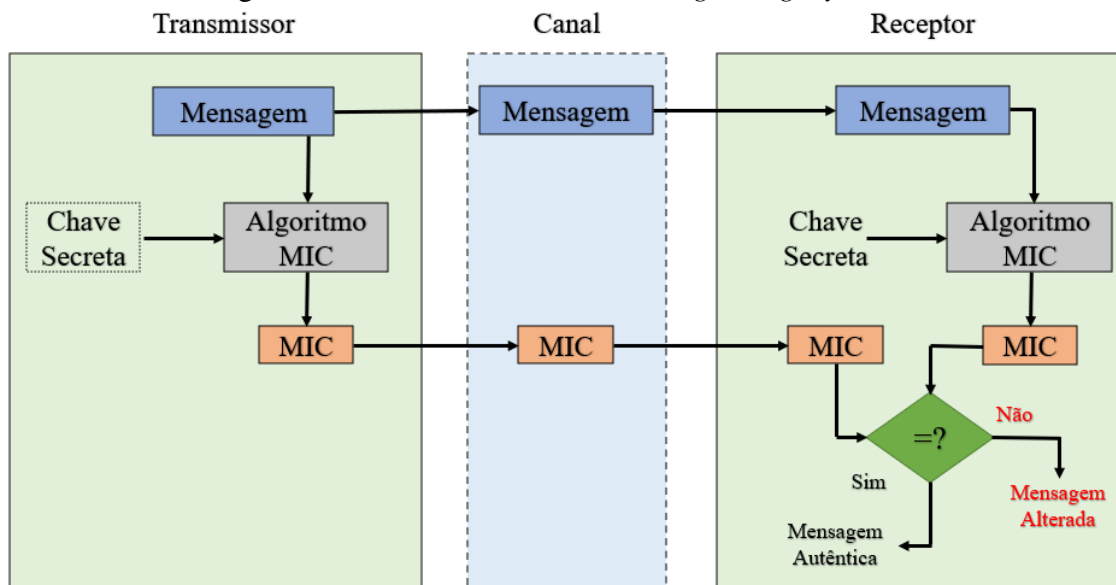
Fonte: (NOVELBITS, 2017)

- **CRC:** O CRC (*Cyclic Redundancy Check*) acompanha todos os pacotes Bluetooth e serve como mecanismo de verificação de algum possível erro na mensagem. Ao enviar uma mensagem, o *link layer* calcula o CRC da mensagem e adiciona esse valor no campo correspondente. O receptor executa o mesmo cálculo com a mensagem recebida e confere com o valor enviado pelo transmissor. Se ambos valores forem iguais à mensagem é considerada válida, caso não sejam a mensagem é descartada. É importante salientar que o CRC não é um mecanismo de segurança dos dados, pois a mensagem pode ser intencionalmente burlada e o CRC recalculado (SIG, 2020b). Para essa situação existe o campo MIC (*Message Integrity Code*).
- **MIC:** O MIC é adicionado ao pacote de dados sempre que a mensagem possuir encriptação. Com isso cada pacote possui uma autenticação com uma chave específica de 4 bytes, garantindo que a mensagem enviada pelo dispositivo remetente seja realmente a mensagem entregue ao destinatário. A Figura 12 mostra o funcionamento do MIC. O transmissor calcula através do algoritmo o valor do MIC, tendo como parâmetro de entrada uma chave conhecida. Este valor então é adicionado na mensagem. O receptor, por sua vez, calcula o MIC a partir da chave secreta que ele também possui e confere com o valor de MIC enviado pelo transmissor. Se os valores coincidirem a mensagem é considerada autêntica, caso contrário é considerada burlada e inválida.

2.2.4 Tempo de frame

O tempo de um frame no Bluetooth, assim como o tempo de conexão, depende da velocidade da comunicação configurada. O Bluetooth 5 permite a seleção de até 2 velocidades, sendo que, na prática, possui até 4 velocidades efetiva de dados.

- 2 Mbps: Até 2 mega bits por segundo utilizando o 2M PHY;
- 1 Mbps: Até 1 mega bits por segundo utilizando o 1M PHY;
- 500 kbps: Atinge uma taxa de dados efetiva de 500 quilo bits por segundo através do LE CODED PHY. Neste caso o *symbol rate* é configurado para 2 ($S=2$) e, conforme a Tabela 2, para cada bit transmitido são utilizados 2 símbolos;

Figura 12 – Funcionamento do *Message Integrity Code*.

Fonte: do autor

- 125 kbps: Atinge uma taxa de dados efetiva de 125 kilo bits por segundo através do LE CODED PHY. Neste caso o *symbol rate* é configurado para 8 (S=8) e, conforme a Tabela 2, para cada bit transmitido são utilizados 8 símbolos.

Para o envio de um PDU vazio, ou seja, sem nenhum dado de usuário (payload), é necessário o envio do preâmbulo, *access address*, *header* e CRC conforme mostra a Figura 13. Portanto, a menor mensagem a ser enviada no Bluetooth possui pelo menos 10 bytes (NOVELBITS, 2017).

Figura 13 – Mínimo pacote de dados enviado via Bluetooth (bytes).

Preamble	Access Address	Header	CRC
1	4	2	3

Fonte: do autor

O tempo para envio de um frame é dado pela Equação 1:

$$Tempo(s) = \frac{\text{bits transmitidos}}{\text{velocidade da comunicação (símbolos por segundo)}} \quad (1)$$

Considerando uma velocidade de comunicação de 1 Msp/s e um pacote mínimo de dados (10 bytes), chegamos a um tempo de frame de 80 μ s. Já para o maior pacote de dados possível do Bluetooth o *payload* pode ter até 251 bytes. Ainda habilitando a encriptação da mensagem, chegamos a um tamanho de frame conforme a Figura 14.

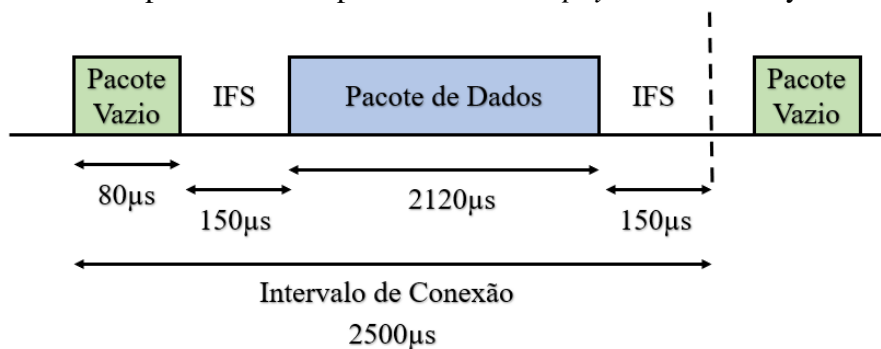
Neste caso, o tamanho total do frame é de 265 bytes, equivalendo a um tempo de envio do pacote de 2120 μ s. As especificações do Bluetooth 5 definem um intervalo mínimo de

Figura 14 – Máximo pacote de dados enviado via Bluetooth (bytes).

Preamble	Access Address	Header	Payload	MIC	CRC
1	4	2	251	4	3

Fonte: do autor

tempo entre pacotes de dados no mesmo canal. Este intervalo é denominado de *Inter Frame Space* (IFS) e deve ser de 150 μ s (SIG, 2019). A Figura 15 mostra o tempo total de duração para enviar a quantidade máxima de dados úteis (251 bytes) a uma velocidade de 1 Mbps que é de 2500 μ s.

Figura 15 – Tempo de conexão para envio de um *payload* de 251 bytes a 1 Mbps.

Fonte: do autor.

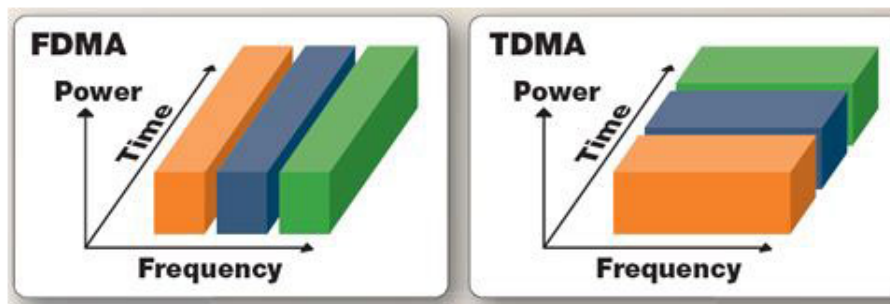
2.2.5 Salto de frequência adaptativo e divisão do tempo

Em virtude do Bluetooth ser baseado na banda ISM de 2,4 GHz, ele compartilha o meio físico com diversas outras tecnologias de transmissão sem fio, como, por exemplo, Wi-Fi e 802.15.4, ocasionando inevitavelmente interferências e colisões na comunicação. Artíficos para permitir que diversos dispositivos compartilhem o mesmo meio são tipicamente chamados de métodos de múltiplos acessos (SIG, 2020a). O Bluetooth utiliza a combinação de dois destes métodos para compartilhar o meio, um deles sendo o *Frequency Division Multiple Access* (FDMA) e o *Time Division Multiple Access* (TDMA).

O FDMA permite que vários pacotes sejam enviados, ao mesmo tempo, através de diferentes frequências por diferentes dispositivos. O Bluetooth possui 40 canais de transmissão, permitindo que diversos dispositivos transmitam simultaneamente. Já o TDMA garante um intervalo de tempo específico para cada transmissão, assim diversos dispositivos podem utilizar o mesmo canal por um período determinado de tempo. A Figura 16 mostra a diferença do TDMA e o FDMA. A combinação destes dois métodos entrega ao Bluetooth uma maior capacidade de evitar colisões de pacotes no ar, aumentando a confiabilidade da rede (SIG, 2020c).

Outra técnica que o Bluetooth utiliza para evitar interferências e encontrar o melhor

Figura 16 – Diferença entre FDMA e TDMA.



Fonte: (POLYTECHNIC, 2017)

caminho de transmissão disponível que evita a colisão de pacotes é uma forma de aplicação do *frequency-hopping spread spectrum* (FHSS), denominada de *adaptive frequency hopping* (AFH) (SIG, 2023c). Com a disponibilidade dos 40 canais de frequência, o mecanismo analisa quais canais estão menos congestionados e salta dinamicamente entre eles. A cada início do evento de conexão, o salto em frequência ocorre com o canal sendo selecionado deterministicamente através do algoritmo de seleção de canais.

Com o FHSS habilitado, a duração da conexão de cada evento é limitada a 40 ms, ou seja, só é possível enviar pacotes durante esse intervalo de tempo (SILABS, 2023a). Geralmente isso não é um problema, visto que para transmitir um *payload* de 251 bytes são gastos 2,5 ms a uma taxa de transmissão de 1000 kbps (SILABS, 2023b).

2.2.6 Melhorias do Bluetooth 5

Existem 4 grandes características que diferenciam e melhoram o Bluetooth 5 em comparação à sua versão anterior.

1. Taxa de dados: Bluetooth 5 adiciona duas novas camadas físicas (PHY), cada uma com um propósito diferente. Essas duas novas PHY são nomeadas como LE2M e LE Coded. A primeira é responsável por dobrar a velocidade da comunicação de 1 mega symbol per second (Ms/s) no Bluetooth 4 para 2 Ms/s, permitindo uma maior taxa de transferência de dados na nova versão. A técnica para alcançar essa taxa é baseada no uso da Gaussian Frequency Shift Keying (GSFK), que é a mesma utilizada na versão anterior, porém com um desvio de pelo menos 370 kHz. Com o aumento da taxa de dados, o tempo necessário para transmitir e receber a mesma quantidade de dados é reduzido, com isso o sistema pode permanecer em um modo de baixo consumo por mais tempo, reduzindo o consumo de energia médio do sistema. Outro aspecto importante é a melhora na coexistência com outras tecnologias operando na mesma frequência, já que o tempo de transmissão é reduzido, a probabilidade de colisão de pacotes também reduz.

2. Cobertura: Uma das mais importantes melhorias nesta nova versão está relacionada com a cobertura da rede. A criação do LE Coded PHY permitiu que a cobertura da rede sem fio seja quadruplicada em relação ao Bluetooth 4 (COSTA *et al.*, 2018). Existem diversos meios para melhorar o *link budget* de uma rede sem fio, um deles é aumentando a potência do transmissor. Entretanto, isso também aumenta o consumo de energia necessário para transmitir a mesma quantidade de dados, comprometendo a eficiência energética do sistema na totalidade. Ao invés de aumentar a potência de transmissão, o Bluetooth 5 melhorou a sensibilidade do receptor. Isso é possível por meio de código adicionando técnicas no receptor. No Bluetooth 4 os símbolos e os bits são os mesmos, ou seja, o bit enviado para o transmissor é modulado em um símbolo no ar. Isso significa que 1 Msps (mega símbolos por segundo) é igual a uma taxa de dados de 1 Mbps (mega bits por segundo). Na nova versão, mais símbolos são utilizados para representar 1-bit de dado. Dois símbolos podem ser utilizados para cada bit, isso significa dividir a taxa de dados por dois, alcançado 500 kbps e dobrando a cobertura da rede. Da mesma forma, oito símbolos pode ser usados para o mesmo bit, dividindo a taxa de dados por oito (125 kbps) e aumentando a cobertura da rede em quatro vezes. A Tabela 2 mostra como os dados são codificados.

Tabela 2 – Bluetooth 5 Data Coding

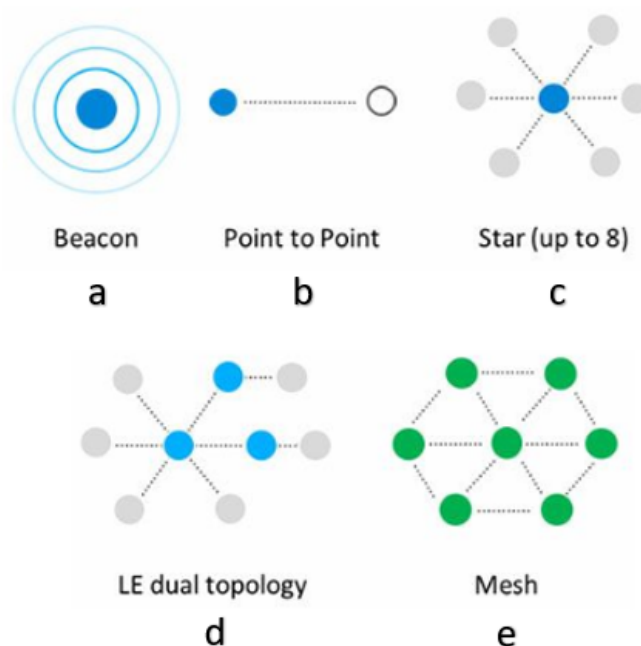
Data de Entrada	Saída (S=2)	Saída (S=8)
0	10	11000011
1	01	00111100

3. Capacidade de Mensagens Broadcast: Os *beacons* são pequenos pacotes Bluetooth que são enviados para qualquer outro dispositivo Bluetooth dentro da cobertura da rede (SILABS, 2019a). É extremamente importante que dispositivos de baixo consumo enviem pequenas mensagens para se comunicar, exigindo um menor consumo de energia. O Bluetooth 5 apresenta oito vezes mais capacidade de transferência de dados, reduzindo o duty-cycle e conseqüentemente a energia total consumida. Os *beacons* são utilizados no conceito de serviços sem conexão, que podem enviar dados para qualquer dispositivo simplesmente enviando neste formato.
4. Topologia de Rede *mesh*: Será melhor detalhado no subcapítulo 2.2.7.

2.2.7 Bluetooth *mesh*

O Bluetooth sempre foi uma rede de topologia em estrela como mostra a Figura 17.a, tornando a rede dependente de um nodo central, como também limitando a cobertura para os nodos mais distantes. Essa limitação, até então, reservou ao Bluetooth a característica de ser uma rede sem fio de curto alcance, limitando sua implementação em aplicações que necessitem de uma maior cobertura, tais como cenários industriais e agrícolas (PEI *et al.*, 2008). A versão 5 do Bluetooth trouxe como grande diferencial a possibilidade de se implementar uma rede com topologia *mesh*, como mostra a Figura 17.e.

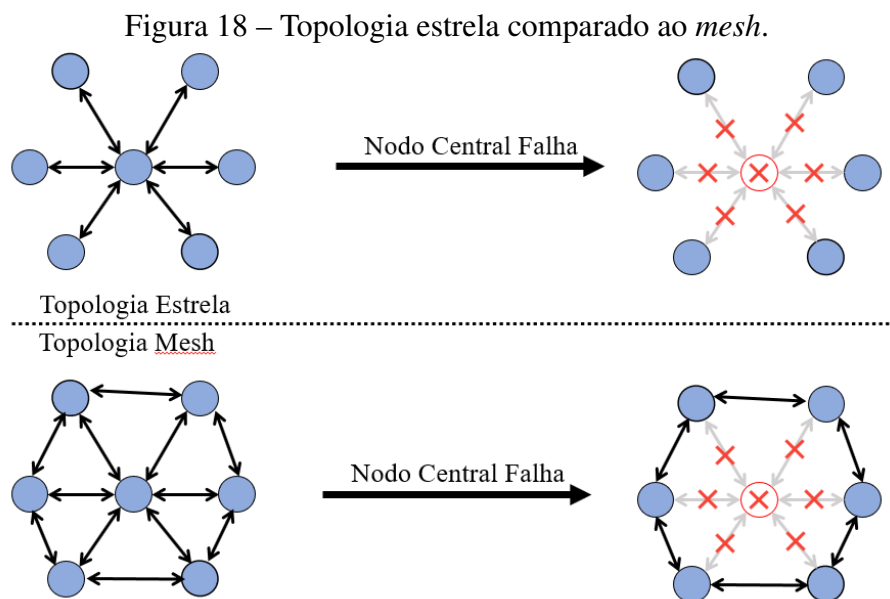
Figura 17 – Topologias de rede do Bluetooth 5.



Fonte: adaptado de (SILABS, 2019a)

Nesta topologia, os nodos são capazes de formar enlace uns com os outros e permitir que mensagens sejam reenviadas. Uma rede com topologia *mesh* consegue alcançar maiores distâncias na sua cobertura, algumas literaturas chamam isso de rede virtual sem limite devido ao fato da área de cobertura da rede depender somente do número de nodos. Além disto, quando comparado com a topologia em estrela, uma rede *mesh* apresenta uma confiabilidade maior, já que na situação de falha de um nodo, existem outros caminhos possíveis para a entrega da mensagem, conforme exemplifica a Figura 18.

Embora a topologia *mesh* apresente tais benefícios em comparação a uma rede em estrela, ela também pode apresentar um tempo maior na entrega de pacotes, devido às diversas possibilidades de caminhos. Em virtude da maior complexidade da rede, os dispositivos em uma rede *mesh* podem consumir mais energia ao executar o gerenciamento da rede. Portanto, existem diferenças entre as topologias de rede que devem ser levadas



Fonte: do autor

em consideração junto aos os requisitos de projeto.

O Bluetooth *mesh* é construído nas camadas superiores do Bluetooth Low Energy, portanto utiliza diversos recursos do BLE. Também elimina a necessidade de tabelas de roteamento, logo as mensagens podem ser enviadas para qualquer nó desde que se tenha pelo menos um link físico e tempo de vida do pacote (TTL) (YIN *et al.*, 2019). Essa topologia pode ser um ótimo benefício quando empregada em um ônibus do transporte público, pois a distância entre as extremidades da rede é elevada, melhorando a confiabilidade e a funcionalidade devido aos nós intermediários.

Existem diversas configurações no Bluetooth *mesh* que permitem otimizar a rede com base nas suas características de campo e dos requisitos da aplicação (ERICSSON, 2020). Exemplos de configurações na rede *mesh* incluem a funcionalidade de *relays*, uso de mensagens com *Acknowledge*, esquemas de repetição de mensagens e transmissão aleatória.

2.2.7.1 Pilha do protocolo

O Bluetooth *mesh* é um protocolo de rede que utiliza o Bluetooth Low Energy como seu núcleo de funcionamento (RONDÓN *et al.*, 2019). Conforme definido nas especificações do SIG quanto ao perfil *mesh* (SIG, 2023c), o Bluetooth é uma pilha de protocolo completo, apresentando uma arquitetura de várias camadas, conforme mostra a Figura 19.

- *Physical layer*: A camada física é responsável por converter os sinais analógicos em digitais e vice-versa. É a camada mais baixa da pilha do BLE que faz a interface com o rádio. Está também relacionada aos modos de *advertising*, escaneamento e criação de conexões BLE.
- *Bearer layer*: Essa camada define como os diferentes pacotes BLE *mesh* são tra-

Figura 19 – Pilha do protocolo do Bluetooth *mesh*.

<i>Model Layer</i>	Define os modelos de aplicação e suas funcionalidades
<i>Foundation Model Layer</i>	Define modelos para configurar e gerenciar a rede <i>mesh</i>
<i>Access Layer</i>	Define o formato dos dados da aplicação, mantém chaves da aplicação
<i>Upper Transport Layer</i>	Encriptação, desencriptação e autenticação dos dados da aplicação
<i>Lower Transport Layer</i>	Gerencia a segmentação e construção das mensagens dos PDUs de transporte
<i>Network Layer</i>	Define o endereçamento das mensagens para um ou mais nodos, regras de retransmissão
<i>Bearer Layer</i>	Define como as mensagens são transportadas entre nodos
<i>Physical Layer</i>	Bluetooth Low Energy Core Specification

Fonte: Adaptado de (SIG, 2023c)

tados. O padrão define dois modos *bearers*: o *ADV bearers* e o *GATT (Generic Attribute Profile) bearers*. O *advertising bearer* gerencia os pacotes transmitidos via o *advertising mode* do BLE, enquanto que o *GATT bearer* é utilizado por nodos *proxy* para configurar a conexão com dispositivos que não operam no *mesh*.

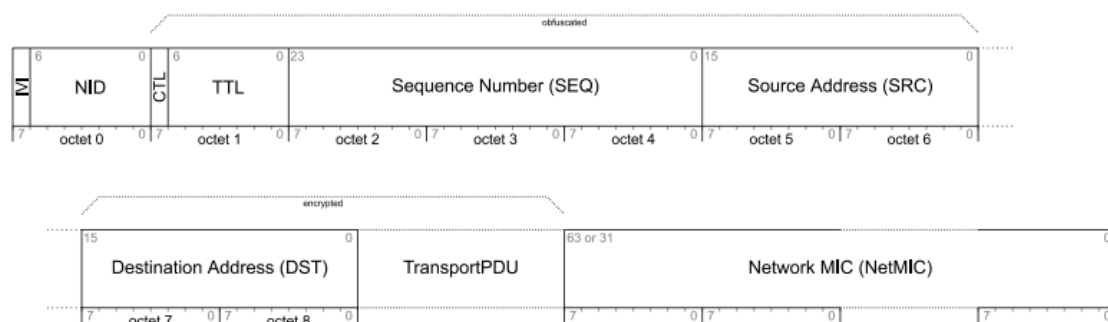
- *Network layer*: A camada de rede é responsável por gerenciar os PDUs, mais precisamente com endereço de pacotes, autenticação e encriptação utilizando a chave de rede.
- *Lower transport layer*: A camada de transporte baixa visa segmentar e remontar mensagens grandes. Reconhecimento do recebimento das mensagens também é feito nesta camada.
- *Upper transport layer*: A camada de transporte alta gerencia a autenticação e encriptação para a camada acima (*access layer*) utilizando a chave do dispositivo.
- *Access layer*: A camada de acesso garante que as mensagens sejam transmitidas e recebidas no correto contexto da aplicação, ou seja, é uma interface entre a aplicação e a parte mais técnica do BLE.
- *Foundation and Model layer*: Essas duas camadas padronizam os métodos para

trabalhar com os dados na aplicação utilizando modelos. Os modelos definem o estado de cada objeto presente na mensagem.

2.2.7.2 PDU da rede mesh

Para aplicações do Bluetooth em topologia *mesh* o SIG define um formato de mensagem distinto (PDU), que, na verdade, é uma aplicação construída nas camadas superiores e embasada no protocolo discutido no subcapítulo 2.2.3. A Figura 20 apresenta o formato de dados para o PDU da rede *mesh* e a Tabela 3 explica cada campo do pacote.

Figura 20 – Formato PDU para o Bluetooth *mesh*.



Fonte: (SIG, 2023c)

Tabela 3 – Definições de cada parâmetro do PDU de rede *mesh*

Campo	Bits	Função
IVI	1	Bit menos significativo do índice IV
NID	7	Valor derivado do NetKey usado para identificar a chave de criptografia e a chave de privacidade
CTL	1	Controle da rede
TTL	7	Tempo de vida do pacote
SEQ	24	Número sequencial
SRC	16	Endereço de origem
DST	16	Endereço de destino
TransportPDU	8 a 128	PDU de transporte
NetMIC	32 ou 64	Verificador de integridade da mensagem

Fonte: Adaptado de (SIG, 2023c)

2.2.7.3 Tempo de vida do pacote - TTL

O PDU (*Protocol Data Unit*) do Bluetooth *mesh* fornece um mecanismo o qual limita a quantidade de saltos que uma mensagem será encaminhada (SIG, 2018). Por exemplo, um valor zero neste parâmetro indica que a mensagem não será reencaminhada por outros nodos, será recebida somente pelos nodos que estiverem ao alcance do rádio do

nodo transmissor. Este mecanismo evita que mensagens tenham um *loop* dentro da rede, otimizando os recursos de cada nodo e maximizando a capacidade da rede *mesh*. O TTL é configurado no projeto de cada rede e pode ser calibrado com testes práticos em campo.

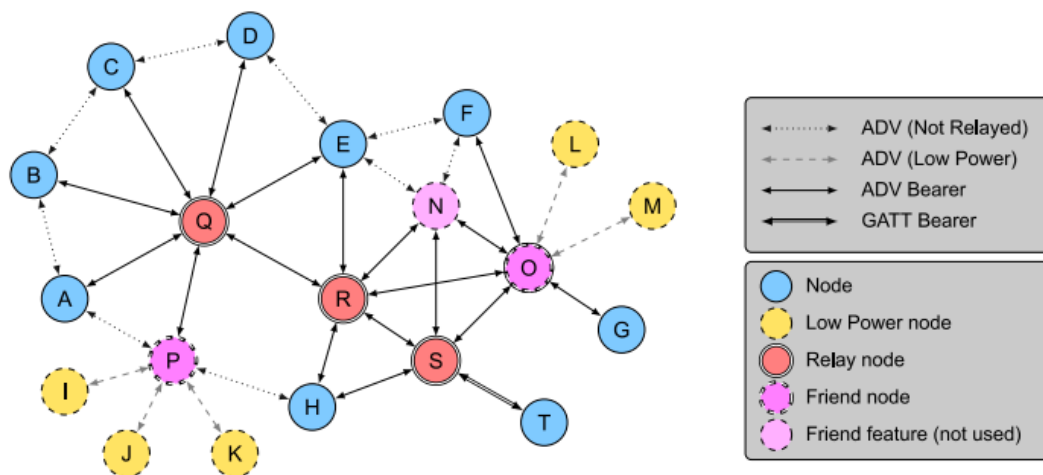
2.2.7.4 Tipos de nodos

A funcionalidade de cada nodo na estrutura do Bluetooth é determinada pelas funções que ele suporta. Todos os nodos tem a habilidade de transmitir e receber mensagens tipo *mesh* e podem ainda suportar uma ou mais funções (SIG, 2023c). Ainda, o limite teórico máximo de nodos que uma rede *mesh* Bluetooth pode possuir é de 32767.

- *Relay*: Habilidade de receber e retransmitir mensagens *mesh*, aumentando a cobertura da rede. Somente os nodos que possuem essa funcionalidade habilitada são capazes de encaminhar as mensagens recebidas para a rede. O protocolo prevê um sistema de *cache* das mensagens para garantir que os *relays* retransmitam a mensagem uma única vez, como também o TTL, que controla quantos saltos o pacote pode ser retransmitido (BAERT *et al.*, 2018). A cada salto o TTL é decrementado em uma unidade;
- *Proxy*: Habilidade de receber e retransmitir mensagens *mesh*, assim como mensagens no protocolo GATT (versões anteriores). Essa habilidade proporciona à rede uma compatibilidade com redes Bluetooth de versões anteriores. Por exemplo, um celular que possua o BLE v4.2, consegue se conectar à rede *mesh* através deste nodo configurado como *proxy*, garantindo a interoperabilidade nesta tecnologia (BAERT *et al.*, 2018).
- *Low power*: Habilidade de operar dentro da rede *mesh* com um ciclo de trabalho significativamente reduzido em conjunto com um nodo que suporte a função de *Friend*;
- *Friend*: Habilidade de trocar mensagens com um nodo *Low power* armazenando mensagens destinadas a esse nodo. Também recebe e retransmite mensagens *mesh*. Devido ao mecanismo de *flooding* do sistema de mensagens utilizado no Bluetooth *mesh*, os nodos estão a todo momento escaneando diferentes canais de *advertisement*, o que aumenta o consumo de energia e limita sua aplicação em dispositivos de extremo baixo consumo (BAERT *et al.*, 2018). Para lidar com essa situação, o nodo *low power* se tornou parte da rede *mesh* e o nodo amigo tem a função de salvar as mensagens destinadas ao nodo de baixo consumo para, cada vez que este nodo se comunicar, as mensagens destinadas a ele sejam entregues pelo nodo amigo. Da mesma forma, mensagens que o nodo baixo consumo queira enviar para a rede são encaminhadas pelo nodo amigo.

A Figura 21 exemplifica cada funcionalidade dos nodos na rede *mesh*. Se uma mensagem é enviada do nodo T para L, inicialmente a mensagem é enviada para S através do protocolo GATT, sendo T um nodo com versões anteriores e fora da rede *mesh* (*Proxy*). Após, o nodo S retransmite a mensagem no padrão Bluetooth *mesh* e os nodos H, R, N e O, por estarem no alcance do nodo S, são quem recebe a mensagem. O nodo O, por ser um nodo *Friend* de L, armazena a mensagem e aguarda que L acorde para solicitar mensagens pendentes.

Figura 21 – Tipos de nodos da rede *mesh*.



Fonte: (SIG, 2023c)

2.2.7.5 Sistema de mensagens

O Bluetooth *mesh* utiliza um sistema de publicação e subscrição de mensagens (*publish and subscribe*). Os dispositivos podem enviar mensagens com determinados PDUs para a rede, isso é denominado publicação. Já os dispositivos que desejam receber tal mensagem devem se inscrever ao PDU em questão. Em um contexto geral, todos os nodos que estão inscritos a esse PDU recebem a mensagem publicada, já os dispositivos que não se inscreveram não processam a mensagem, mas de igual forma podem reencaminhar a mensagem para a rede.

A rede *mesh* do Bluetooth utiliza uma técnica na publicação de mensagens conhecida por *Flooding* (SIG, 2023a). Isso significa que as mensagens não são roteadas na rede através de uma tabela de roteamento, a qual é constantemente atualizada para se ter a melhor rota de determinado instante, por exemplo. Ao invés disso, todos os dispositivos no alcance recebem a mensagem e, caso o nodo seja um *Relay*, retransmite para todos os nodos ao seu alcance. Existe um gerenciamento de mensagens que já foram processadas através do *cache* de mensagens, para que não seja criado um *loop* infinito de mensagens, portanto mensagens que já foram processadas são descartadas. Neste controle é utilizado o parâmetro "número sequencial" presente no pacote de dados do BLE *mesh*. O tempo de

vida do pacote (TTL) também é avaliado neste gerenciamento. Cada vez que a mensagem é retransmitida, o TTL é decrementado em uma unidade.

Para as RSSF que utilizam o mecanismo de *flooding* um dos maiores problemas que podem ser encontrados é a *broadcast storm* (RONDÓN *et al.*, 2019). Isso representa um aumento na probabilidade de colisão de pacotes, congestionamento da rede e também na taxa de perda de pacotes. Uma das ferramentas que o protocolo *mesh* do Bluetooth implementa para diminuir as consequências do *flooding* é a aleatoriedade nos parâmetros de tempo. Com isso, a retransmissão pelos nodos *relays* não acontece de forma periódica, mas sim com aleatoriedade, o que ajuda a evitar múltiplas colisões de pacotes.

Outro ponto importante do funcionamento da rede *mesh* é a capacidade de configurar o PDU para trabalhar em pares, ou seja, o nodo transmissor envia uma mensagem no modo *request* e aguarda que o receptor envie uma mensagem de *response*, confirmando o processamento de tal PDU (SIG, 2023c). Esse mecanismo é comumente conhecido por *Acknowledge* de cada mensagem e pode ser habilitado ou desabilitado individualmente. Ele proporciona à cada mensagem um nível de confiabilidade maior, porém existem situações onde não é indicado seu uso. Mensagens configuradas no formato *one-to-many*, por exemplo, um controlador enviado para 100 nodos atuadores, a configuração do *Acknowledge* na mensagem irá gerar 100 mensagens de resposta, congestionando a rede e consumindo recursos do rádio.

Quando uma mensagem é transmitida, os nodos utilizam pacotes de *Advertising* através dos canais 37, 38 e 39. Para aumentar a confiabilidade da rede pode-se configurar um tempo aleatório na função de *Advertising*, isso diminui a probabilidade de colisão dos pacotes em todos os canais, aumentando também a probabilidade do pacote ser propagado na rede (ERICSSON, 2020).

2.3 Redes de Sensores sem Fio no Transporte Público

O transporte público pode ser definido como um serviço prestado por empresas públicas ou privadas o qual está disponível a qualquer pessoa (VUCHIC, 2002). Também é uma representação de um espaço público único onde indivíduos de diferentes faixas socio-econômicas compartilham o mesmo meio com regular frequência e por considerados períodos (HILDÉN; OJALA; VÄÄNÄNEN, 2016). O transporte público desempenha um papel fundamental na sociedade, permitindo a locomoção de pessoas nas mais diversas situações e necessidades. É composto por diversos modais de transporte como, por exemplo, ônibus, metrô, trem, entre outros.

Os ônibus representam o meio de transporte público mais utilizado no mundo (VUCHIC, 2002). Milhões de pessoas utilizam esse meio de transporte diariamente, o qual está presente na maioria das cidades. Este modal pode ter algumas variações na cadeia de transporte, a fim de se adaptar às necessidades de determinada região. Por exem-

plo, existem ônibus chamados de BRT (*Bus Rapid Transport*), que são mais comuns em grandes centros urbanos, os quais geralmente possuem uma via dedicada para sua circulação, como também possuem o maior tamanho da categoria, permitindo transportar uma maior quantidade de pessoas. Existem também os micro-ônibus, que são responsáveis por transportar as pessoas para locais onde um ônibus maior não conseguiria, por exemplo, em bairros, mais conhecidos como fim da linha. Em outra categoria estão os ônibus rodoviários responsáveis pelo transporte de pessoas em maiores distâncias, ou seja, intermunicipais ou até interestaduais.

A mobilidade urbana é considerada um dos mais significantes desafios da sociedade para o futuro, conforme a demanda por transporte aumenta, resultando em mais emissões (HILDÉN; OJALA; VÄÄNÄNEN, 2016), congestionamentos e demandas para uma melhor infraestrutura. No Brasil, por exemplo, o serviço de transporte público nem sempre é de qualidade. Uma pesquisa reportada pelo WRI Brasil, indicou que o índice de satisfação geral para o transporte coletivo de Porto Alegre foi de 5,9/10 em 2022 (QUALIÔNIBUS, 2023). Neste âmbito, muitas pessoas preferem utilizar seus carros próprios ao invés do ônibus, com receio de encontrar um serviço de má qualidade.

Para existir uma mudança do uso de carros privados para o transporte público, diminuindo a quantidade de carros nas vias, como também melhorar o índice de satisfação geral da população quanto à qualidade do serviço, estratégias devem ser traçadas focando a melhoria de fatores importantes para o usuário. Neste contexto, vários operadores do transporte público vem implementando tecnologias para melhorar a qualidade do transporte, como, por exemplo, a localização em tempo real para estimar o tempo de chegada do ônibus, sistemas de contadores automáticos de passageiros, telemetria, entre outros (CARDOSO, 2019) (AZPILICUETA *et al.*, 2015).

A implementação destes sistemas de transporte inteligente (STI) geralmente requer uma ou mais comunicações sem fio para a comunicação de dados, seja em um ponto (*proxy*) para o envio de dados ao mundo externo, seja internamente para a coleta de informações de sensores e atuadores. Para viabilizar a implementação dos STI as redes de sensores sem fio oferecem um grande potencial para melhorar a eficiência dos sistemas de transporte público (KARPIS, 2013).

Recentemente, o Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN), publicou no *Diário Oficial da União* uma resolução que dispõe sobre a obrigatoriedade da instalação de dispositivo de aviso de não afivelamento dos cintos de segurança (CONTRAN, 2022). Essa resolução se aplica, entre outros tipos de veículos, também para ônibus do transporte coletivo. Na prática, todos os assentos de passageiros devem possuir um dispositivo de detecção do não afivelamento do cinto de segurança, e então o sistema deve informar ao motorista quais assentos não possuem o cinto afivelado. Para exemplo, um ônibus articulado possui em torno de 60 assentos. Então, cada um dos 60 assentos deve possuir um sistema de monitoramento do cinto afivelado e então transmitir a informação para o

motorista. Neste caso, o sistema deve informar qual assento está com cinto desafivelado ao motorista. Portanto, cada assento necessita o envio da informação do seu *status*. Devido ao fato de um sistema cabeado resultar em excessivos metros de cabo no ônibus para esta aplicação, a implementação de uma RSSF pode ser uma solução adequada, trazendo diversos benefícios ao sistema.

3 TRABALHOS RELACIONADOS

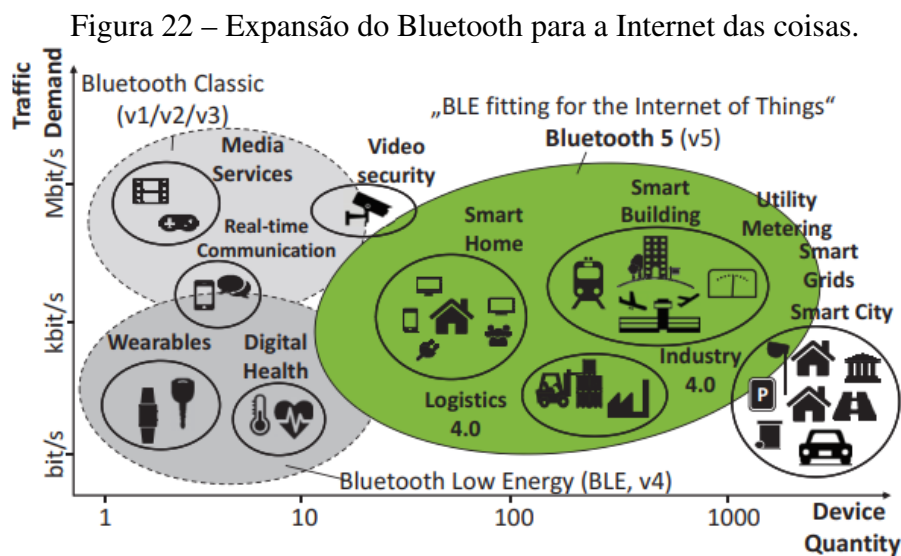
Neste capítulo é apresentada uma análise dos trabalhos relacionados da comunidade científica considerados de maior relevância para o tema desta pesquisa. A pesquisa foi realizada majoritariamente através do Google Scholar, selecionando trabalhos mais recentes e que pudessem contribuir para o experimento realizado. É possível destacar alguns critérios para a busca, como, por exemplo, trabalhos publicados desde 2015, utilizando expressões tais como: *wireless sensor networks in buses*, *wireless sensor networks in public transportation*, *IVWSN*, *automotive Bluetooth*, *Bluetooth mesh automotive*, *Bluetooth 5*. Foram centenas de artigos avaliados, sendo então filtrados com alguns critérios, como, por exemplo, os que apresentassem resultados experimentais. Trabalhos com rede mesh foram prioritários, já que corroboram para o tema. Artigos mais recentes também foram prioritários, embora em alguns assuntos foram necessárias referências mais antigas, já que forneciam informações importantes para a pesquisa. Artigos do tipo *survey* também foram utilizados para a conceituação do tema, já que este tipo de trabalho acaba se aprofundando bastante na teoria sobre a nova tecnologia e também com comparativos pertinentes. Referências do comitê SIG e do fabricante Silicon Labs foram extensivamente utilizadas.

3.1 Bluetooth 5 e Bluetooth *mesh*

Em (YIN *et al.*, 2019) os autores focam o estudo nas diferenças entre o novo Bluetooth 5 e sua versão anterior, o Bluetooth 4, explorando profundamente os novos avanços como maior velocidade, alcance e robustez. A investigação é direcionada para a Internet das coisas, visando aplicações em automação residencial e também industrial, visto que o Bluetooth tem avançado bastante neste último setor. Em seguida, eles expõem a funcionalidade *mesh* e comparam com a de outras tecnologias como ZigBee e z-wave. As redes de sensores sem fio estão disponíveis no perímetro de alcance do sinal para qualquer entidade que possa de alguma forma invadir a rede, portanto os autores também discutem a segurança da rede contra ataques externos. Ao final, um estudo experimental desta tecnologia é realizado na topologia em estrela e em ambiente interno. Os resultados sugerem

que o Bluetooth 5 não só consolida sua superioridade para aplicações comerciais como também expande possibilidades para o meio acadêmico. Porém, o artigo não avalia essa análise para cenários automotivos e também não realiza testes com a topologia *mesh*.

Um importante experimento foi conduzido em (BÖCKER; ARENDT; WIETFELD, 2017) para verificar a influência da quantidade de outras redes sem fio na qualidade do serviço do BLE5 (Bluetooth 5). Uma máxima métrica permitida de PER foi definida pelos autores em 1% para garantir a confiabilidade da comunicação. As redes foram divididas em quatro grupos pelo número de mensagens enviadas diariamente, sendo o mínimo de 1 mensagem por dia e o máximo de 1000 mensagens diárias, acima disto foi considerada comunicação de áudio. O artigo apresenta um gráfico onde são mostradas as demandas de taxa de dados das aplicações pela quantidade de dispositivos da rede conforme mostra a Figura 22, que mostra também diversas aplicações para o Bluetooth. Piconets de Bluetooth foram simulados concomitantes com o BLE5 e o resultados mostraram que quanto maior o número de mensagens transmitidas, maior foi o PER. Para 1000 mensagens diárias, cerca de 25 piconets concomitantes foram suficientes para alcançar um PER de 1%, enquanto para até 10 mensagens diárias eram permitidos até 500 piconets concomitantes.



Fonte: (BÖCKER; ARENDT; WIETFELD, 2017)

Diferentes trabalhos em diversas aplicações enfatizam o uso do Bluetooth e Bluetooth *mesh*. O *Software-defined Networking* (SDN) em redes sem fio e sistemas IoT é extremamente desafiador e complexo. O SDN é uma abordagem que utiliza controladores baseados em software para comunicar com o hardware diretamente, executando funções da rede. Esse método pretende abstrair o hardware, tornando a rede uma espécie de rede virtual. Para contribuir neste contexto, os autores (MURILLO *et al.*, 2020) introduzem o BLE *mesh* como uma tecnologia adequada para redes sem fio baseadas em SDN. O trabalho destaca o BLE *mesh* como uma tecnologia sem fio adequada para SDN, de modo que ele consegue resolver questões de redes sem fio SDN tais como isolamento de controle,

confiabilidade e escalabilidade. O estudo realizado em (NAHAS *et al.*, 2021) avalia a viabilidade de transmissões concorrentes (TC) no Bluetooth mediante experimentos controlados e, em seguida, elabora um protocolo de disseminação de dados em toda a rede, baseado em TC para redes BLE *multi-hop*. O objetivo do trabalho é baseado na TC para prover baixo consumo, baixa latência e uma disseminação de dados confiável em redes Bluetooth *mesh* operadas por baterias. O estudo desenvolvido em (LI *et al.*, 2021) apresenta o BloothAir, que é um sistema de nodos *relays multi-hop* seguros baseado no Bluetooth Low Energy conectando drones autônomos. Os experimentos mostram que o sistema BloothAir alcança uma significativa baixa taxa de incompatibilidade da chave secreta, protegendo a rede BLE de ataques de espionagem. O trabalho apresentado em (SHEN; YANG; JIANG, 2021) estuda, através de simulações e experimentos, o BLE *multichannel neighbor discovery* para dois modos de *advertising* especificados pelo SIG: *periodic deterministic advertising* (PDA) e *pseudo-random delay advertising* (RDA). O principal desafio discutido pelos autores é como projetar protocolos ou algoritmos para conseguir tanto um baixo consumo de energia quanto baixa latência de pareamento.

No estudo realizado em (RONDÓN; GIDLUND; LANDERNÄS, 2017) os autores exploram o Bluetooth Low Energy como solução de redes de sensores sem fio industriais, focando em aplicações com criticidade de tempo, como, por exemplo, a automação de processos. Para avaliar o BLE nestes cenários são explorados os efeitos de adaptações nas retransmissões do protocolo e sua responsividade, buscando definir o determinismo da comunicação. Para isso é analisado quantitativamente o PER e o delay da transmissão. Como proposta são definidos 3 esquemas de retransmissão de mensagens e após são extensivamente simulados. O esquema denominado A teve uma taxa de perda de pacotes de $2,8 \times 10^{-2}$, considerado o pior desempenho dos esquemas avaliados e não cumpre os requisitos das aplicações industriais. Já os esquemas B e C atingiram tais requisitos, tendo uma taxa de $2,22 \times 10^{-5}$ e $2,14 \times 10^{-5}$ respectivamente. Com relação ao delay avaliado, o pior caso encontrado no esquema C foi de 45,6 ms, enquanto que a média ficou em apenas 5,6ms. Ao final, os autores concluem que, implementando melhorias no esquema de retransmissão e de tempos do BLE, ele se torna um candidato para aplicações de automação de processos industriais, atendendo aos seus requisitos de funcionabilidade.

Em (RONDÓN *et al.*, 2019) os autores exploram o Bluetooth *mesh* nos aspectos de confiabilidade, latência e escalabilidade através de extensas simulações computacionais. Os autores concluem que o Bluetooth *mesh* proporciona um baixo consumo, sendo uma opção para aplicações com limitações de energia, como também se mostrou capaz de alcançar os requisitos de QoS (*quality-of-service*) para aplicações industriais de tempo real de um salto (*single-hop*) somente. Também definiram que o Bluetooth é pouco afetado por outras redes Bluetooth concomitantes, porém bastante afetado por outras redes WiFi. Mudanças em alguns parâmetros de configurações como, por exemplo, a aleatoriedade de tempo e duração de *Advertising* conseguem melhorar a confiabilidade da rede devido ao

mecanismo de *flooding*.

3.2 Bluetooth em RSSFV

Diversas pesquisas foram realizadas sobre o tema de IVWSN. A maioria dos estudos são focados em soluções baseadas em 2,4 GHz para veículos. Um exemplo que mostra essa situação é apresentado em (LIN; TALTY; TONGUZ, 2013), onde um estudo empírico foi realizado para avaliar as tecnologias Bluetooth Low Energy (BLE) e ZigBee, ambas operando em 2,4 GHz, sob a influência de redes WiFi e Bluetooth. Para conduzir este experimento, um conjunto de rádios de comunicação sem fio foram instalados em um carro no compartimento do motor e da cabine, ambos comunicando entre si. Após, uma rede WiFi foi habilitada para gerar interferência na rede veicular e então foi verificado se todos os pacotes enviados pelo transmissor foram recebidos pelo receptor. O mesmo experimento foi replicado com uma rede Bluetooth gerando interferência. Após os testes, a IVWSN baseada na tecnologia BLE se mostrou mais robusta que a rede ZigBee, apresentando uma taxa de perda de pacotes (PER) de 2% para o BLE, uma taxa considerável, porém ainda melhor que a solução ZigBee. Em (LIN; TALTY; TONGUZ, 2015) os mesmos autores comparam o BLE com ZigBee em um carro implementando um sistema passivo de abertura de portas sem chave baseado em BLE. Os resultados obtidos indicam que o BLE pode ser uma solução para IVWSN, tendo um desempenho superior que o ZigBee.

3.3 Redes de Sensores sem Fio Intra Veiculares

Um estudo geral sobre promissoras tecnologias de comunicação sem fio sugere que o popular padrão 802.11 não é adequado para o domínio automotivo. Em (MOURAD; HEIGL; HOEHER, 2016) os autores enfatizam que o número de carros equipados com WLAN irá aumentar rapidamente devido às demandas dos usuários. O trabalho apresenta um estudo sobre a influência de sinais sem fio próximos sobre o 802.11 interno do carro, observando que eles afetam fortemente a taxa de transferência de dados dentro do veículo. Por fim, os autores concluem que o padrão 802.11 não é adequado para a área automotiva devido ao veículo não operar em um lugar estático. Por exemplo, próximo à estação principal de trem a taxa de transferência de dados caiu 80%. De forma semelhante, o estudo apresentado em (MOURAD *et al.*, 2017) avalia a interferência de sistemas Bluetooth nas redes WLAN em aplicações de infoentretenimento em veículos. A performance é avaliada usando medições experimentais em cenários reais. Os resultados mostram que uma rede WLAN embarcada é fortemente afetada pelas redes sem fio próximas. No entanto, o trabalho carece de um estudo em diferentes veículos e também de diferentes dispositivos.

Em (NORDSTRÖM; KUNERT, 2019) os autores destacam problemas relacionados a

redes de sensores automotivos considerando questões de confiabilidade de tecnologias de comunicação sem fio. O padrão IEEE 802.15.4 TSCH oferece diferentes abordagens de encontro às demandas de aplicações de diferentes áreas, incluindo para *in-vehicle networks* (IVNs). Devido a isso, a análise de interferência entre RSSF tem instigado recentes pesquisas sobre o assunto. O principal objetivo deste artigo é apresentar possíveis métodos e futuras pesquisas necessárias para atingir um eficiente gerenciamento da interferência entre redes sem fio não estacionárias. O estudo carece de uma análise em cenários reais e especialmente considerando cenários automotivos como o transporte público.

Outro importante trabalho é apresentado em (SASSI; NASEEF; HERVÉ, 2019), discutindo problemas relacionados à coexistência de múltiplas redes em veículos modernos. Dispositivos elétricos e eletrônicos emitem interferências eletromagnéticas que afetam diretamente os sistemas de comunicação. O trabalho propõe um método para estimar a *signal interference ratio* (SIR) de medidas de compatibilidade eletromagnética. A abordagem permite a estimativa do PER, usado no processo de avaliação de risco em aplicações veiculares.

Uma análise sobre o padrão IEEE 802.15.4 foi realizada em (AZPILICUETA *et al.*, 2015), avaliando a rede em um ônibus. O artigo visa estudar a caracterização do impacto de diferentes canais wireless em RSSF no transporte público. O estudo é conduzido mediante 7 nodos comunicando na topologia estrela em diferentes partes do ônibus, representando diferentes ambientes e monitorando o RSSI e PER. Os resultados mostraram uma significativa influência na atenuação do sinal sem fio quando haviam pessoas dentro do veículo, como também uma taxa de sucesso na troca de mensagens de 98.21% para um ônibus articulado.

A Tabela 4 resume os principais trabalhos relacionados encontrados na literatura, como também mostra as lacunas que cada um não aprofunda com relação ao presente trabalho. De acordo com a análise dos trabalhos relacionados, diferentes pesquisas estão explorando tecnologias para IVWSN, discutindo novas topologias, algoritmos e a análise da comunicação de rede para aplicações veiculares. Neste contexto, a literatura carece de uma análise focada na interferência que pode afetar a performance em veículos utilizados no transporte público.

Tabela 4 – Síntese dos trabalhos relacionados

Referência	Abordagem principal	Lacuna
(LIN; TALTY; TONGUZ, 2013),(LIN; TALTY; TONGUZ, 2015)	Estudo empírico para avaliar as tecnologias Bluetooth Low Energy e ZigBee	A análise não considera o transporte público
(MOURAD; HEIGL; HOEHER, 2016)	Crescente uso do WLAN nos carros modernos	O trabalho destaca a degradação causada por interferências
(YIN <i>et al.</i> , 2019)	Investigação profunda nas melhorias do Bluetooth 5 e testes práticos	Carece de uma avaliação no ambiente automotivo e também da topologia <i>mesh</i>
(MOURAD <i>et al.</i> , 2017)	Coexistência entre WLAN e Bluetooth em aplicações automotivas	Não avalia a degradação em diferentes tipos de veículos e dispositivos
(CARHACIOGLU; ZAND; NABI, 2018)	Solução para a coexistência redes BLE com TSCH	Não analisa o domínio automotivo e de transporte público
(NORDSTRÖM; KURNERT, 2019)	Análise de interferências entre WSNs	Não avalia cenários automotivos
(SASSI; NASEEF; HERVÉ, 2019)	Estimativa do signal interference ratio (SIR) de medidas de compatibilidade eletromagnética	Carece de uma análise considerando diferentes dispositivos no ônibus
(SODHRO <i>et al.</i> , 2020)	Otimização da confiabilidade, conectividade e estabilidade de redes vehicle-to-anything (V2X)	Apesar dos resultados promissores não considera redes internas de veículos
(DIEZ <i>et al.</i> , 2020)	Estudo experimental na confiabilidade do IEEE 802.15.4 PHY em RSSF industriais	Não apresenta uma análise no ambiente automotivo com a rede <i>mesh</i>
(AZPILICUETA <i>et al.</i> , 2015)	Caracterização do impacto de diferentes canais wireless utilizando o padrão IEEE 802.15.4 no transporte público	Avalia outra solução para IVWSN no transporte público, porém não realiza experimentos em condições reais (ônibus em operação)
(BÖCKER; ARENDT; WIETFELD, 2017)	Performance do BLE sob a influência outras redes sem fio	Não avalia o ambiente automotivo
(BURMAN <i>et al.</i> , 2022)	Projeto e desenvolvimento de uma RSSF para monitorar a temperatura do rio	Embora seja um artigo recente, carece de uma avaliação do BLE versão 5, que possui uma melhora na área de cobertura
(NATGUNANATHAN <i>et al.</i> , 2023)	Extensa análise sobre o Bluetooth <i>mesh</i> e comparativos com outras tecnologias wireless tais como Z-Wave, Zigbee e LoRaWAN	Não considera o domínio automotivo
(RONDÓN; GIDLUND; LANDERNÄS, 2017)	Avaliação do Bluetooth Low Energy e mais tarde do Bluetooth <i>mesh</i> quanto a confiabilidade, latência e escalabilidade	Realizado através de simulações computacionais e não considera o ambiente automotivo
(RONDÓN <i>et al.</i> , 2019)		
(MURILLO <i>et al.</i> , 2020) (NAHAS <i>et al.</i> , 2021) (LI <i>et al.</i> , 2021) (SHEN; YANG; JIANG, 2021) (ERAS; DOMÍNGUEZ; MARTINEZ, 2022)	Aplicações BLE e Ble <i>mesh</i> em RSSF em aplicações IoT	Apresenta a importância do BLE em recentes pesquisas, mas carece de uma análise experimental no domínio automotivo
[Este trabalho]	Desenvolvimento de um estudo experimental baseado no Bluetooth 5 na topologia <i>mesh</i> para IVWSN em um ônibus do transporte público	(Diferencial) Análise prática experimental e testes no real cenário do transporte público considerando a rede <i>mesh</i> .

4 DECLARAÇÃO DO PROBLEMA

Conforme discutido no capítulo 3, a maioria dos estudos foca na investigação do Bluetooth operando ou em uma topologia em estrela ou em carros de passeio comuns. Existe uma lacuna na literatura relacionada a experimentos de performance utilizando tecnologias de comunicação sem fio aplicadas ao transporte público, especialmente considerando redes *mesh*.

Com relação ao local onde uma WSN pode ser aplicada, trabalhos na área de IVWSN avaliam, na sua grande maioria, carros comuns, propondo soluções para essa aplicação que possui características como pequeno comprimento do veículo, visão direta com poucos obstáculos e poucas pessoas a bordo. Carros de passeio são pequenos, não medindo mais que 5 metros de comprimento. Essa pequena distância é um aspecto positivo para a configuração de uma WSN e sua operabilidade, pois a potência de transmissão exigida do rádio é menor e a complexidade da tecnologia empregada na transmissão de dados pode ser mais simples. A topologia da rede pode ser voltada para uma topologia em estrela, visto que o nodo central pode manter a comunicação com todos os nodos.

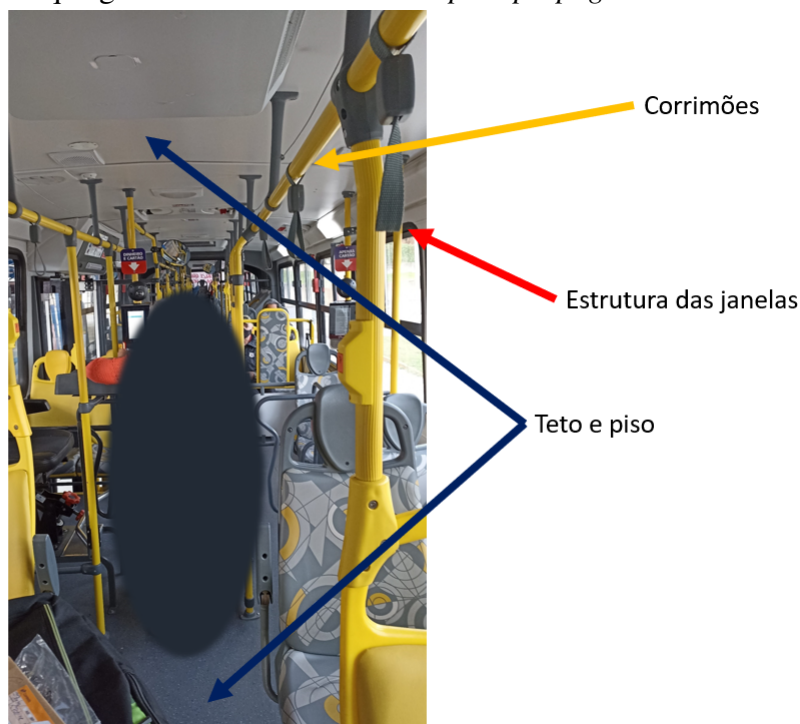
Outro ponto importante que pode afetar de forma considerável a performance de uma IVWSN é a coexistência com outras redes operando na mesma frequência base. Um carro de passeio possui uma quantidade reduzida de pessoas a bordo, em geral, no máximo 7 pessoas, com isso o número de dispositivos sem fio que compartilham o meio também é reduzido. Por outro lado, os ônibus podem transportar até 270 passageiros ao mesmo tempo. Supondo que cada passageiro possa ter consigo diferentes dispositivos como *smartphones*, *smartwatches*, *tablets*, fone de ouvido sem fio, entre outros, é factível que centenas de dispositivos possam estar operando ao mesmo tempo no ônibus.

Um aspecto que distingue uma rede de comunicação instalada em um carro de passeio de uma instalada em um ônibus é a escala. Enquanto uma IVWSN em um carro pode ter algumas dezenas de nodos, em um ônibus esse número pode alcançar uma centena de nodos. Os nodos podem estar posicionados próximos um do outro, como sensores de cinto de segurança dos passageiros, ou localizados distantes como sensores de porta aberta ou contadores de passageiros.

A estrutura interna do ônibus também pode degradar a comunicação sem fio. Por

exemplo, os corrimões usados pelos passageiros, que são instalados ao longo de todo o comprimento do veículo, podem refletir as ondas eletromagnéticas do sinal sem fio e causar interferência, conforme apresentado na Figura 23. Este fenômeno é conhecido como *multipath propagation*, onde o sinal pode chegar no receptor por dois ou mais caminhos. Esse ponto é discutido em (ANDERSSON; PERSSON, 2020) avaliando o Bluetooth 5 em sistemas de geoposicionamento. A massa metálica do ônibus também pode afetar negativamente a qualidade da comunicação.

Figura 23 – Componentes que geram o fenômeno de *multipath propagation* no ônibus



Fonte: do autor

Portanto, os ônibus apresentam várias características físicas que os diferem dos carros de passeio, representando um ambiente mais complexo e problemático para uma IVWSN. Observando as diferentes características apresentadas, as soluções aplicadas de redes sem fio que funcionam nos carros de passeio podem não funcionar corretamente quando aplicadas no transporte público. Conforme discutido na literatura (LIN; TALTY; TONGUZ, 2013)(LIN; TALTY; TONGUZ, 2015), algumas soluções de comunicação sem fio apresentaram pontos críticos na sua integridade e funcionalidade, até mesmo para carros de passeio.

Com isso, algumas questões são levantadas: quais são as preocupações relacionadas com aplicação de IVWSN no transporte público? Como o Bluetooth 5 pode ser aplicado neste cenário? Ele pode ser considerado uma IVWSN confiável? Diante destas questões, esse trabalho propõe uma análise experimental de uma IVWSN, baseada no Bluetooth 5 em topologia *mesh*, aplicada em um ônibus urbano, apresentando uma avaliação desta

nova tecnologia que não foi investigada até então neste cenário.

Resumindo os pontos deste capítulo, a Tabela 5 sintetiza as principais diferenças físicas entre carros de passeio e ônibus, considerando pontos que podem afetar na operabilidade de uma IVWSN.

Tabela 5 – Diferenças entre ônibus e carros com relação à implementação de uma IVWSN

Carros	Ônibus
Até 5 metros de comprimento	Até 28 metros de comprimento
Poucos obstáculos	Muitos obstáculos
Até 7 pessoas embarcadas	Pode chegar a 270 passageiros ao mesmo tempo
Poucos nodos sem fio a bordo	Grande quantidade de nodos sem fio a bordo
Poucos <i>gadgets</i> a bordo	Pode chegar a centenas de <i>gadgets</i> a bordo
Interferência fraca na propagação do sinal	Forte interferência na propagação do sinal

5 SOLUÇÃO PROPOSTA

As novas melhorias do Bluetooth 5 exploradas no subcapítulo 2.2 indicam ser soluções promissoras para preencher as lacunas identificadas na literatura com relação às WSNs aplicadas ao transporte público. A cobertura de rede quatro vezes maior com a capacidade de trabalhar na topologia *mesh* apresentam características essenciais para preencher as lacunas e merecem uma análise dedicada.

5.1 Metodologia

O principal objetivo deste trabalho é avaliar a performance do Bluetooth 5 em topologia *mesh* a bordo de um ônibus urbano em pleno seu trabalho diário, considerando as maiores distâncias possíveis entre nodos, obstáculos, influência das pessoas e interferências de outras redes na comunicação. Os mesmos experimentos também são aplicados na topologia em estrela a mérito de comparação. As análises da qualidade da rede são baseadas em métricas de performance da rede tais como PER e RSSI conforme descrito no subcapítulo 6.1. A métrica de *jitter* também é mensurada para identificar a variação de delay entre cada pacote recebido. O sistema em rede proposto também é submetido a um teste específico para determinar a latência de cada salto (*hop*) com o objetivo de determinar o impacto de cada nodo na rede como um todo e, finalmente, a métrica RTT para verificar o tempo total gasto pela mensagem desde o transmissor até o receptor.

Com isso, os procedimentos metodológicos para o estudo experimental proposto são baseados em 4 abordagens principais, sendo a primeira relativa à simulação computacional e as restantes ao teste prático:

- Simulação computacional: Com o intuito de aproveitar os recursos atualmente disponíveis, essa parte do trabalho visa simular uma rede Bluetooth *mesh* em sistema computacional afim de obter métricas importantes para o estudo, como também ser possível um comparativo com os experimentos práticos.
- Ambiente Controlado com Interferência: Nesta etapa o propósito é avaliar a rede em um ambiente onde determinadas variáveis são controladas para verificar como as interferências podem afetar a performance da rede. Os experimentos são realizados

adicionando outras redes Bluetooth e WiFi, coexistindo com a rede sob teste (RST) no mesmo ambiente. Essas análises são feitas tanto com a topologia *mesh* quanto em estrela.

- Ambiente Controlado sem Interferência para Análise de Latência de Salto (*hop latency*): Quantificar a latência de salto intrínseca de cada nodo e o RTT total considerando o número máximos de 8 nodos disponíveis neste trabalho. Esse experimento é realizado em uma estrada de interior para evitar interferências de outras redes sem fio, como também que a mensagem de um nodo chegue em mais de um ao mesmo tempo.
- A bordo de um ônibus: Esse teste representa o principal experimento deste trabalho, pois é realizado a bordo de um ônibus se movimentando pela cidade em um dia normal de trabalho, permitindo que todo o tipo de interferências não controladas afetem a rede. Por exemplo, cada passageiro pode possuir seu próprio *gadget* como um fone de ouvido sem fio, relógio inteligente, smartphone ou qualquer outro equipamento que possa afetar a RST. Realizando o experimento com o ônibus se movimentando pela cidade é possível adicionar fontes de ruído externas também, como, por exemplo, redes wireless de prédios próximos ou qualquer outro sinal operando em frequências próximas capazes de interferir na RST. Essas análises são feitas tanto com a topologia *mesh* quanto em estrela.

5.2 Materiais e métodos

Este subcapítulo apresenta os materiais e métodos utilizados para o desenvolvimento deste trabalho ¹.

5.2.1 Simulação computacional

Inicialmente, adotou-se o software OMNeT++ versão 6.0.1 como ferramenta para as simulações, juntamente com o *framework* INET 4.5.2, visto que esse software é bastante utilizado em simulações de RSSF. Entretanto, ao tentar implementar a camada de rede do BLE *mesh* percebeu-se que o *framework* INET não possui um suporte oficial a essa tecnologia. Trabalhos relacionados se propuseram a implementar um modelo similar ao BLE *mesh* conforme apresentado em (JV; DE SOUZA; ENDLER, 2021), se baseando no padrão IEEE802.15.4 do OMNeT++ e configurando a rede com características similares ao BLE. Em (KAJDOCSI; DÖRÖMBÖZI; KOVÁCS, 2019) os autores apresentam uma abordagem semelhante, apesar de destacarem uma limitação do OMNeT++ para mais de 30 nodos na rede.

¹Todo código usado nos experimentos pode ser acessado no repositório: <https://github.com/abieglmeyer/experimental-BLE-Mesh>

Levando esse fato em consideração, uma simulação do BLE *mesh* no OMNeT++ poderia não representar fielmente as características dessa nova tecnologia, então decidiu-se não mais utilizar esse software. Então buscaram-se opções de simuladores que suportassem a nova versão do Bluetooth *mesh* e basicamente uma única foi encontrada. O Matlab, a partir da versão R2022a, possui suporte ao Bluetooth *mesh*, então adotou-se esse software para a realização das simulações.

A versão utilizada foi o Matlab R2023a (MATLAB, 2023). Para ser possível a simulação de uma rede *mesh* do Bluetooth também é necessária a instalação de pacotes adicionais ao Matlab nativo, tais como o *Bluetooth Toolbox* e o *Communications Toolbox Wireless Network Simulation Library*.

As simulações no Matlab são embasadas nas seguintes abordagens:

- Representação da rede *mesh* prática: Possuindo a mesma quantidade de nodos da rede prática, essa simulação tem por objetivo comparar os resultados e avaliar os dados obtidos da simulação.
- Quantidade de nodos aumentada: Aproveitando o fato de ser uma rede simulada, o intuito desta simulação é explorar uma quantidade maior de nodos na rede *mesh*, avaliando o comportamento da rede e extraindo informações que não seriam possíveis no experimento prático.

A Tabela 6 apresenta as configurações utilizadas na rede Bluetooth *mesh* do Matlab. A potência de transmissão foi configurada em -10 dBm, pois em análise experimental determinou-se essa potência como a mínima alcançada para um funcionamento contínuo da rede. Uma potência muito maior seria uma quantidade de energia desperdiçada, pois não elevaria muito os resultados de métricas da rede, como da mesma forma diminuindo a potência a rede passava a não funcionar corretamente. Um período de 200 ms foi entre envio de mensagens foi estipulado avaliando trabalhos relacionados, que chegavam a utilizar 1 segundo entre mensagens. Um *Scan Interval* de 30 ms é geralmente o padrão utilizado em comunicações Bluetooth *mesh*.

5.2.2 Experimentação prática

O experimento realizado utiliza como componente principal o *system-on-chip* (SoC) multi-protocolo wireless EFR32MG13 do fabricante Silicon Labs. Esse microcontrolador 32 bits de extremo baixo consumo possui um rádio de 2,4 GHz e outro sub-GHz no mesmo componente e suporta toda a pilha de protocolo do Bluetooth 5. Ele é baseado no ARM Cortex-M4 operando até 40 MHz de clock, com 512 kB de memória flash e 64 kB de memória RAM. Baseados neste componente, foram utilizadas 2 *demoboards* BRD4158A conectadas ao kit SLWSTK6005A e mais 6 *demoboards* BRD4166A, totalizando 8 nodos. A Figura 24 apresenta as placas utilizadas no desenvolvimento do trabalho. Cada placa

Tabela 6 – Parâmetros utilizados na rede Bluetooth *mesh* no Matlab

Parâmetro da simulação	Configuração
Potência de transmissão	-10 dBm
Sensibilidade no recebimento	-95 dBm
Período de transmissão da mensagem	200 ms
<i>Payload</i>	8 bytes (unsegmented)
<i>Relay</i>	Todos os nodos são <i>relay</i> (exceto TX e RX)
<i>Friend and low power node</i>	Funções desabilitadas
Mensagens transmitidas por experimento	16650
<i>Message acknowledge</i>	Não
<i>Random advertising event</i>	Não
TTL	7
<i>Scan interval</i>	30 ms

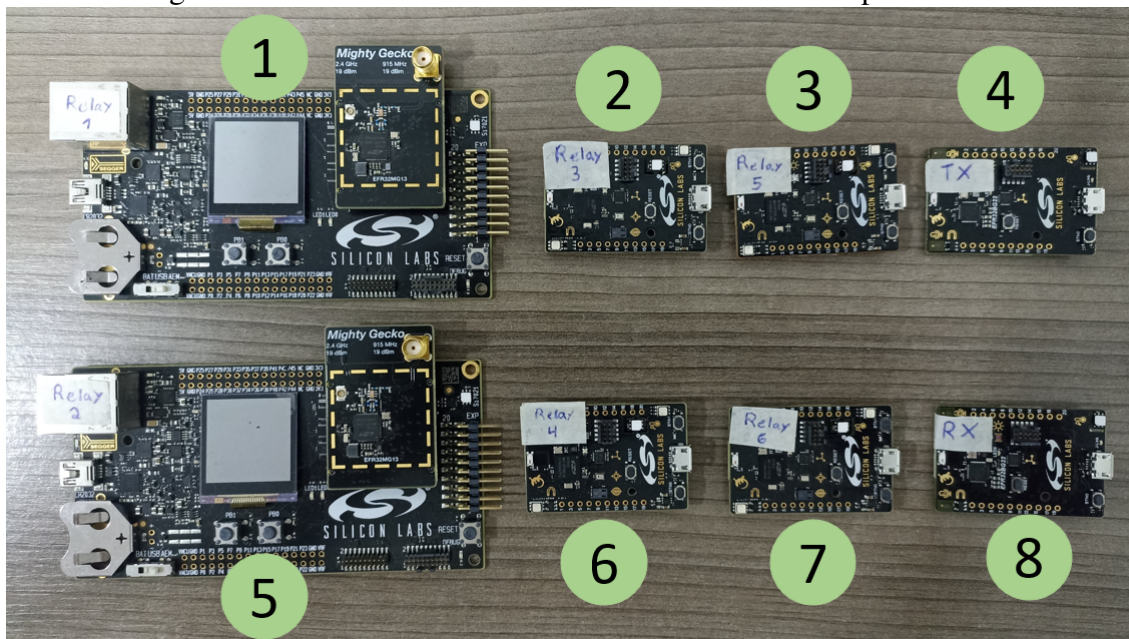
possui uma marcação informando o seu papel na rede *mesh*. A placa número 4 atua como transmissor, a número 8 como receptor, e todas as outras 6 placas atuam como nodos *relays* quando o BLE *mesh* está habilitado.

Para cada placa de desenvolvimento foi criado um *firmware* utilizando a pilha do Bluetooth 5. A placa número 8, denominada RX, possui uma função que escreve na porta USB (barramento serial universal) todo pacote de dados recebido pelo Bluetooth. A RX está conectada a uma porta USB de um computador portátil para fazer o log de todos os dados recebidos. A placa número 4, denominada TX, está configurada para enviar a cada 200 ms o pacote de dados pré-definido. Todos os nodos operam por bateria, sendo os nodos 1 e 5 alimentados por um *powerbank* USB e o restante dos nodos por uma bateria CR2032, conforme imagens 25 e 26.

É importante ressaltar o tipo de antena utilizado por cada placa de desenvolvimento. A BRD4166A utiliza uma antena SMD (*surface mount technology*), conforme ilustra a Figura 28a. Já a placa BRD4158A possui uma antena desenhada na própria placa de circuito impresso do tipo F invertida. A Figura 28b ilustra tal antena. Não se utiliza neste trabalho antenas do tipo *offboard*, que poderiam fornecer um ganho de sinal ainda maior.

Visando obter as métricas de performance da rede foi necessário definir um *frame* de dados contendo as informações necessárias para isso. A mensagem, por sua vez, possui um contador sequencial incrementado pelo TX a cada envio. Esse contador permite que o receptor avalie se alguma mensagem foi perdida. A Figura 28 mostra o pacote

Figura 24 – Placas de desenvolvimento utilizadas nos experimentos



Fonte: do autor

Figura 25 – Demoboard BRD4166A com alimentação por bateria CR2032



Fonte: do autor

encapsulado no formato do BLE.

A mensagem possui um preciso *timestamp* de cada mensagem preenchido no exato momento em que o pacote é enviado na rede. O clock para o *timestamp* é fornecido pelo periférico RTC (*real-time clock*) presente no EFR32MG13. Quando a mensagem chega no receptor, outro *timestamp* é registrado, fornecido pelo RTC do receptor, possibilitando a determinação da latência e *jitter* de cada mensagem. O número total de bytes transmitidos em cada mensagem BLE é de 18 bytes, 8 bytes relativos ao *payload* e outros 10 bytes relativos ao cabeçalho de informações do protocolo BLE. Para mensagens que possuam mais de 12 bytes de *payload*, a camada de transporte mais baixa do Bluetooth segmenta e junta novamente as mensagens, resultando em um tempo maior para se enviar mensagens

Figura 26 – Demoboard SLWSTK6005A com alimentação por powerbank USB



Fonte: do autor

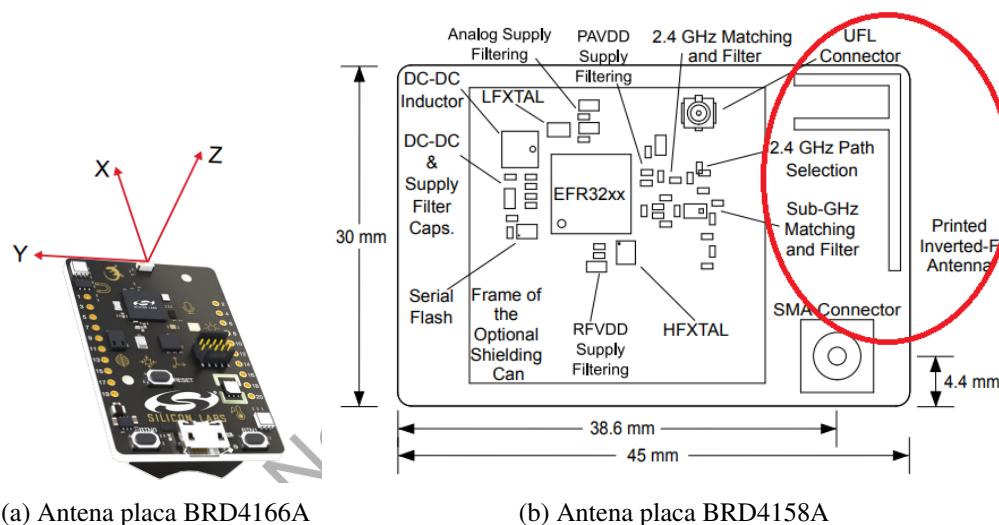
maiores que 12 bytes, impactando na performance. Neste trabalho se teve o cuidado para as mensagens serem menores de 12 bytes visando aplicações de sensoriamento veicular, onde a demanda de dados por mensagem é baixa.

É importante destacar que os artifícios do Bluetooth 5 para melhorar a confiabilidade da rede como retransmitir o PDU em casos de mensagens sem confirmação de recebimento (*unacknowledged messages*) e a implementação de aleatoriedade nos parâmetros de tempo (RONDÓN *et al.*, 2019) estão desabilitadas neste trabalho a fim de atingir resultados mais próximos do pior caso e com situações reais. A potência do rádio transmissor de todos os dispositivos foi configurada em -10 dBm. Embora seja possível aumentar a potência de saída para até +20 dBm, este trabalho limita a potência em -10 dBm porque no contexto de RSSF existe uma alta probabilidade que os dispositivos operem a partir de baterias, comprometendo a vida útil se uma maior potência de saída é utilizada. Aumentar a potência de saída permite um *link budget* melhor, porém drena a bateria de forma mais rápida.

5.2.2.1 Firmware

O *firmware* desenvolvido para cada placa de demonstração é baseado no *software development kit* (SDK) fornecido pelo próprio fabricante Silicon Labs de revisão 4.0.1. O *Integrated Development Environment* (IDE) utilizado para elaborar todo o *firmware* e realizar sua compilação é o Simplicity Studio, que é uma IDE baseada em *Eclipse* e utiliza como compilador o GCC (*GNU Compiler Collection*), um compilador multiplataforma sob a licença GNU GPL (FREE SOFTWARE FOUNDATION, 2023).

Figura 27 – Tipos de antenas utilizadas nos experimentos

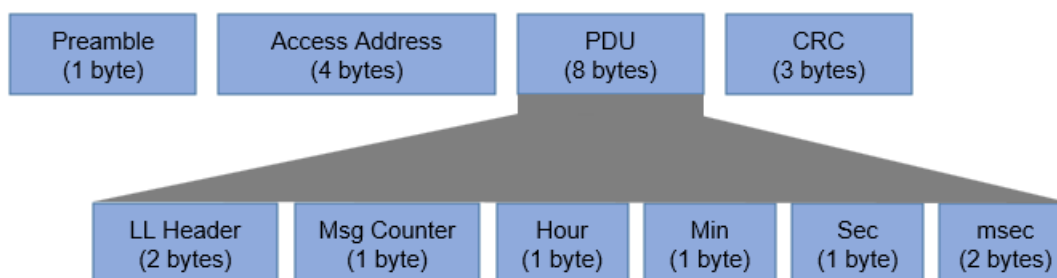


(a) Antena placa BRD4166A

(b) Antena placa BRD4158A

Fonte: (SILABS, 2019b)

Figura 28 – Pacote de dados do usuário baseado no formato de pacote do protocolo BLE

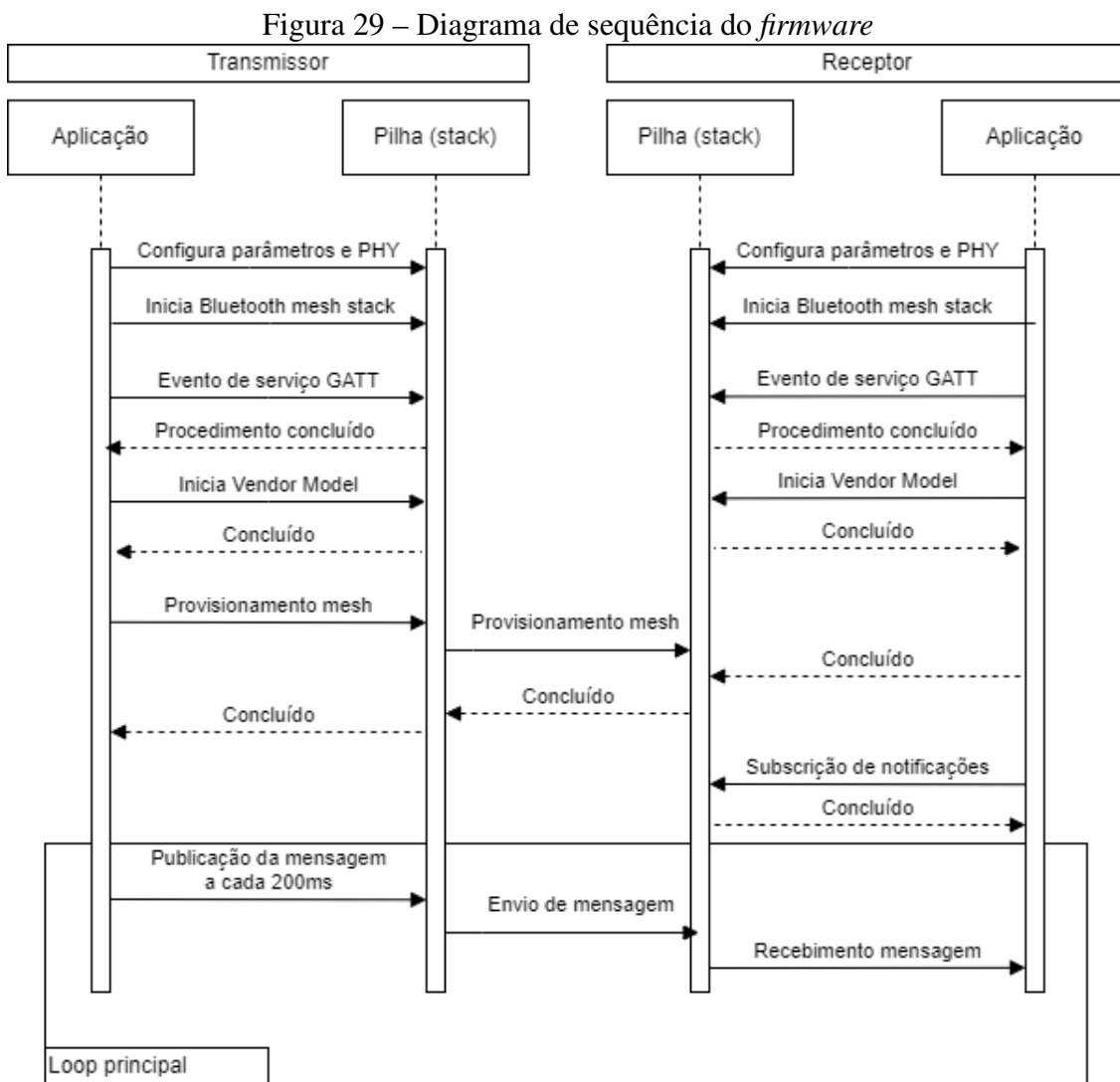


Fonte: do autor

Embora, conforme já apresentado no subcapítulo 2.2, o Bluetooth 5 topologia *mesh* foi lançado em 2017, sua utilização e disponibilidade por parte dos fabricantes é recente. Com isso, o SDK visando aplicações *mesh* não fornece o provisionamento através de aplicativo para a utilização do *vendor model*, que é a parte do protocolo definido pelo SIG para aplicações proprietárias. Portanto, este foi um dos grandes desafios na parte do *firmware*, conseguir implementar de forma autônoma o provisionamento das 8 placas na rede *mesh*. A técnica de roteamento utilizado pelo Bluetooth mesh é o *flooding*.

A Figura 29 apresenta um diagrama de sequência para as tarefas macros desenvolvidas no *firmware*. Inicialmente são iniciados os periféricos, tais como RTC e timer, e do PHY do Bluetooth. Então é iniciada a pilha do Bluetooth 5 através do protocolo GATT, responsável por gerenciar pequenas quantidades de dados na comunicação. Após é iniciado o *vendor model*, que é a parte definida do protocolo para aplicações proprietárias. O SIG define uma extensa formatação de dados para o Bluetooth, por exemplo, protocolo de *heart beat* (batimentos do coração), pressão sanguínea, entre outros. Aplicações

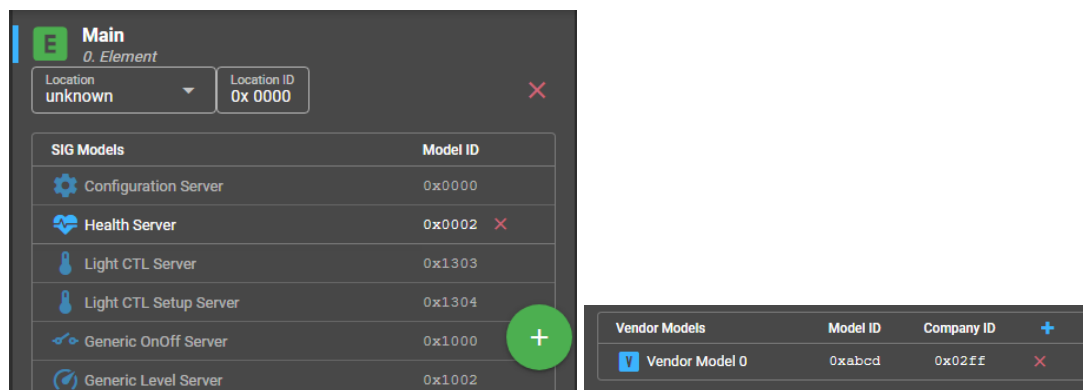
proprietárias onde se deseja transferir dados não previstos devem utilizar o *vendor model*. A Figura 31a mostra algumas pré-definições de dados pelo SIG e a Figura 31b a configuração do *vendor model* para o envio de dados deste trabalho.



Fonte: do autor

A Figura 31 mostra o ambiente de trabalho para o desenvolvimento da aplicação. Foram necessárias seis baterias CR2032 e dois *powerbank* USB para prover energia aos nodos. Um segundo computador portátil foi utilizado para facilitar os experimentos e principalmente a depuração dos nós. Conforme já explicado, um dos grandes desafios foi desenvolver a comunicação *mesh* entre os nodos, com isso a ferramenta de depuração (*debug*) foi bastante utilizada, exigindo dois computadores que pudessem ser separados.

Figura 30 – Definições do protocolo pelo SIG



(a) Pré-definições de protocolo

(b) Definição do vendor model utilizado

Fonte: do autor

Figura 31 – Ambiente de trabalho para o desenvolvimento e experimentos controlados



Fonte: do autor

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta cada simulação e experimento prático realizado neste trabalho, diferenciando cada condição de teste e apresentando seus resultados.

6.1 Métricas de Performance da Rede

As métricas de performance são formas qualitativas e quantitativas de observar e determinar o comportamento da rede e podem fornecer um entendimento mais profundo da operação e confiabilidade dos serviços (SOLARWINDS, 2023). Da mesma forma, um monitoramento em tempo real das métricas de performance juntamente com um gerenciamento ativo destes dados, permite atuar em parâmetros da rede prevendo falhas e compensando mudanças do ambiente, tornando a comunicação mais confiável (RAMESH *et al.*, 2020). Existem diversas métricas que podem ser utilizadas na avaliação de performance de uma rede. Este trabalho utilizará as seguintes métricas nos experimentos a serem realizados:

- *Packet Error Rate (PER)*: O *Packet Error Rate* é usado para descrever o quão sustentável um sistema sem fio pode ser em determinados ambientes (YANG, 2014). Em outras palavras, ele representa a taxa de pacotes perdidos na comunicação, quanto maior a taxa de pacotes perdidos em determinada transferência de dados, maior o tempo necessário para enviar com sucesso a mesma quantidade total de dados. Uma das consequências causadas por interferências em RSSF é o aumento do PER. É a métrica mais importante de uma rede e representa também a imunidade da rede a interferências (YANG, 2014). O PER é definido pela relação entre a quantidade de pacotes perdidos e pacotes enviados, conforme a Equação 2.

$$PER(\%) = \frac{\text{Número de pacotes perdidos}}{\text{Número de pacotes enviados}} * 100 \quad (2)$$

- *Received Signal Strength Indicator (RSSI)*: Representa uma medida da intensidade de potência do sinal sem fio que chega no receptor e é expressa em número negativo de decibéis por miliwatt (-dBm). Quanto maior a intensidade do sinal, mais

próximo de zero é o valor lido.

- **Latência:** Latência ou delay é uma métrica de performance da rede que mensura a quantidade de tempo para transferência de um dado entre o nodo transmissor e o nodo receptor (SOLARWINDS, 2023). Diversos fatores podem contribuir para o aumento da latência, tais como processamento, maior tráfego de dados, congestionamento de outras tecnologias de comunicação sem fio utilizando o mesmo canal. Para redes *mesh* a latência é relativa ao tempo gasto por cada salto.
- **Round trip time (RTT):** O *Round trip time* é definido pelo tempo, em milisegundos, que um pacote de dados leva para ir do transmissor ao receptor. O RTT é uma métrica importante para a rede, pois informa a integridade e a previsibilidade no tempo de entrega de pacotes. Para uma rede *mesh* o RTT representa o tempo total gasto pelo pacote até chegar ao nodo receptor, portanto é a soma de tempo de todos os saltos contabilizados.
- **Jitter:** O *Jitter* é uma importante métrica de performance da rede e representa a quantidade de variação na latência ao longo de diversas trocas de dados (SOLARWINDS, 2023)(PORETSKY *et al.*, 2006). É calculado obtendo a diferença na latência entre cada mensagem subsequente, e então feita a média de todos os valores obtidos. Quanto menor o valor do *jitter*, mais estável será a rede. A Equação 3 mostra como calcular o valor de *jitter*.

$$Jitter = \frac{1}{n} \sum_{n=1}^n |D(n) - D(n-1)| \quad (3)$$

Onde:

n = Número de pacotes recebidos

D = Latência de cada pacote em milisegundos

Pode ocorrer de pacotes recebidos possuírem erros de bit em uma comunicação, isso pode representar outra métrica de rede. Em virtude de não se ter contabilizado um número relevante nos experimentos deste tipo de erro, essa métrica foi considerada fora de escopo do trabalho, como também não foi adicionada na métrica PER.

6.2 Definição do número de amostras

Para fazer a análise das métricas selecionadas para o experimento é necessário definir o tamanho das amostras de cada teste. A amostra é um subconjunto representativo de uma

população, e tem as mesmas características da população onde foi retirada (LAPPONI, 2004), garantindo assim sua representatividade. Para que tal amostra seja mais fidedigna possível à sua população, é necessário levantar parâmetros admissíveis para a análise e então calcular o tamanho da amostra requerida. A Equação 4 define o cálculo do número mínimo de amostras considerando o tamanho da população.

$$\text{Número de Amostras} = \frac{\frac{z^2 * p(1 - p)}{e^2}}{1 + \frac{z^2 * p(1 - p)}{e^2 * N}} \quad (4)$$

Onde:

z = Intervalo de confiança

p = Desvio padrão

e = Margem de erro

N = Tamanho da população

Este trabalho utilizará um intervalo de confiança de 99%, o que representa um valor *z-score* de 2,576 conforme Tabela z (SULLIVAN, 2001). Quanto mais heterogênea é uma população, maior será o número de amostras necessárias para alcançar um erro de amostra aceitável (COCHRAN, 1977). Muitos autores, em análises estatísticas onde não se tem conhecimento prévio do resultado, definem o desvio padrão considerando o pior caso, ou seja, que os resultados terão uma grande variação. Portanto, será considerado um desvio padrão de 0,5, que representa o pior caso. A margem de erro aceitável na análise estatística deste trabalho é definida em 1 ponto percentual.

Considerando uma população extremamente grande, que algumas literaturas chamam de população infinita, o valor de N da Equação 4 tende ao infinito, com isso o denominador tende a 1. Devido a isso, a amostra mínima não é proporcional ao crescimento da população e, em determinado ponto, ela tende a estabilizar. A Figura 32 mostra tal comportamento para os valores até então definidos neste trabalho.

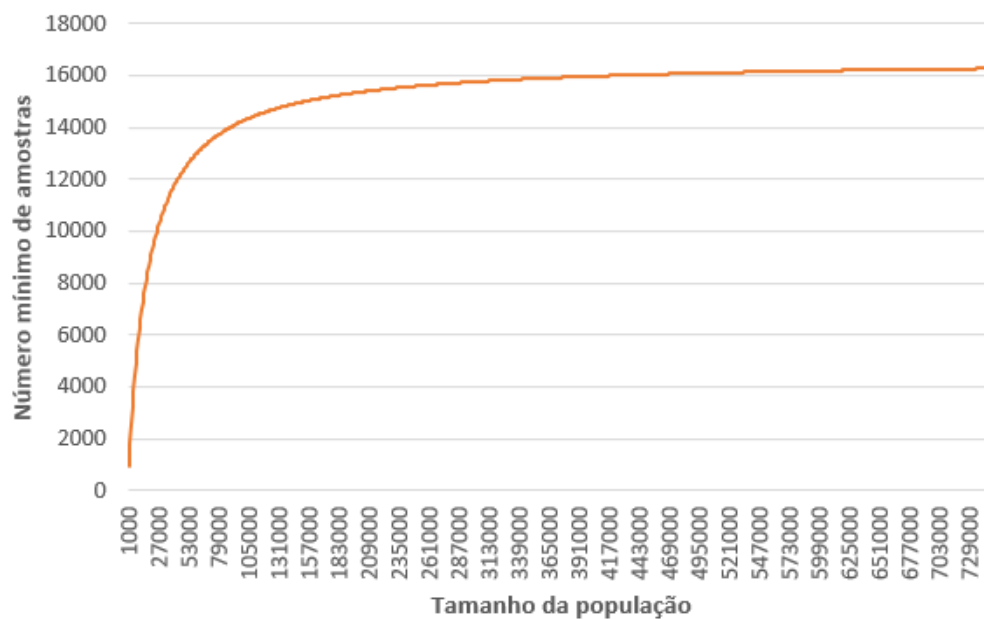
Portanto, considerando uma população infinita, a Equação 4 pode ser simplificada para a Equação 5. Então, o valor mínimo de amostras para satisfazer os requisitos deste trabalho é de **16641 amostras**.

$$\text{Número de Amostras} = \frac{z^2 * p(1 - p)}{e^2} \quad (5)$$

$$\text{Número de Amostras} = \frac{2,58^2 * 0,5(1 - 0,5)}{0,01^2}$$

$$\text{Número de Amostras} = 16641$$

Figura 32 – Simulação do número mínimo de amostras em função do tamanho da população.



Fonte: do autor

Onde:

$$z = 2,576$$

$$p = 0,5$$

$$e = 1\%$$

$$N = \rightarrow \infty$$

6.3 Simulação computacional

Este subcapítulo apresenta os resultados das simulações realizadas no software Matlab. Aproveitando o recurso computacional de simulação, algumas situações foram idealizadas de modo a obter métricas e comparativos importantes para o estudo e que também não seriam possíveis com os recursos disponíveis.

6.3.1 Comparação do *bit error rate* com diferentes PHYs

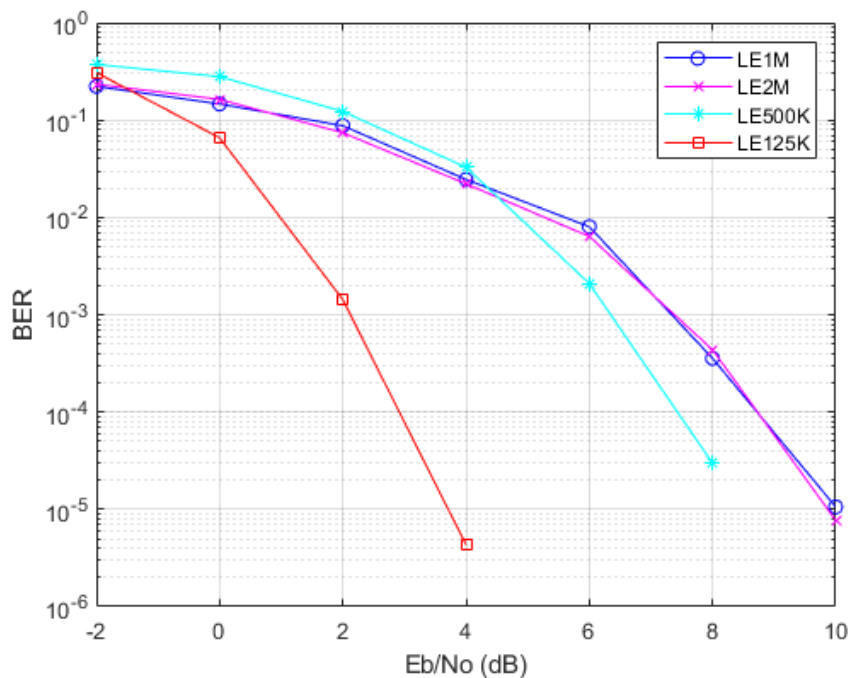
O pacote adicional do *Bluetooth Toolbox* do Matlab permite simular a taxa de erros de bit para cada um dos 4 modos de comunicação do BLE com relação à camada física, sendo eles:

- *Uncoded PHY* com taxa de dados de 1 Mbps (*LE1M*).

- *Uncoded PHY com taxa de dados de 2 Mbps (LE2M).*
- *Coded PHY com taxa de dados de 500 Kbps (LE500K).*
- *Coded PHY com taxa de dados de 125 Kbps (LE125K).*

A simulação foi realizada adicionando um ruído Gaussiano branco (AWGN) e a taxa de erros é apresentada pela taxa de energia do bit pela densidade espectral de ruído (E_b/N_0). O E_b/N_0 representa basicamente a intensidade do sinal no receptor e é geralmente utilizada para comparar diferentes tipos de modulações. O gráfico da Figura 33 apresenta o resultado.

Figura 33 – BER aplicado ao BLE com canal AWGN



Fonte: do autor

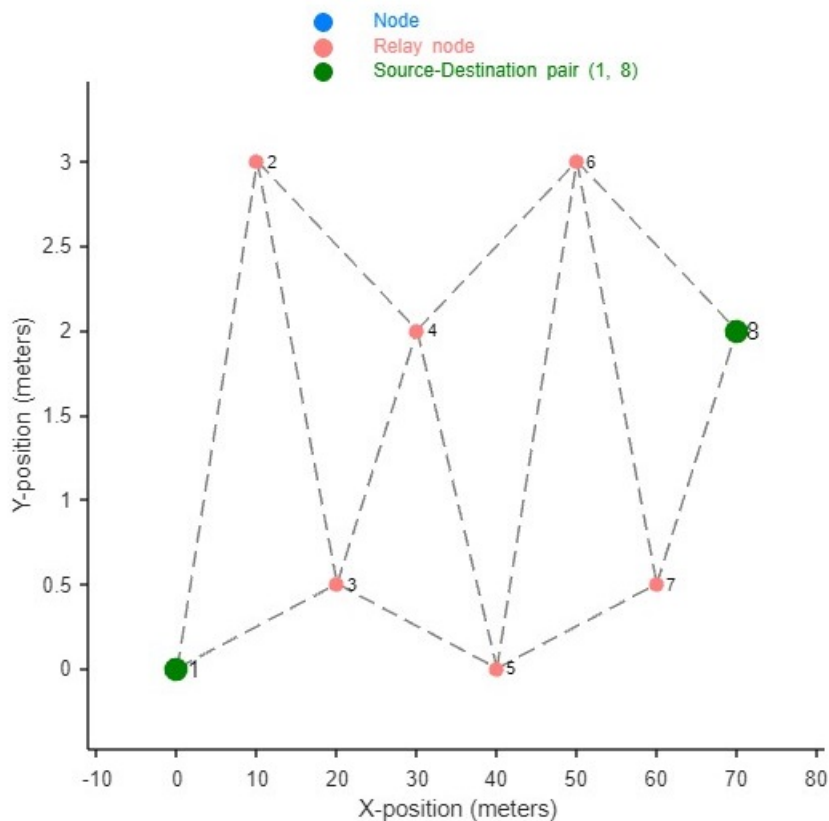
É possível observar que para as taxas de 1 e 2 Mbps, que utilizam o PHY até então disponível no BLE, o BER se comporta de forma semelhante. Agora, ao aplicar um PHY com a codificação implementada no Bluetooth 5, conforme detalhado no subcapítulo 2.2.6, o BER diminui, e para o LE125K a melhora é bastante considerável. Para um E_b/N_0 de 4 dB o BER alcança uma taxa de erros de aproximadamente 10^{-5} , ou seja, o PHY LE1M deve ter 6 dB a mais para possuir uma mesma taxa de erros.

6.3.2 Simulação com 8 nodos

Nesta simulação o objetivo foi replicar a rede criada com os nodos físicos da Silicon Labs, para isso a simulação contou com 8 nodos dispostos em uma área de 70 x 3 metros,

representando um tamanho ligeiramente aumentado de um ônibus. A Figura 34 mostra a disposição dos nodos e suas distâncias.

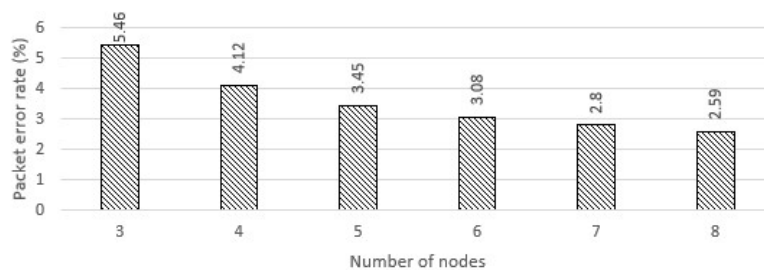
Figura 34 – Disposição dos 8 nodos na rede simulada no Matlab



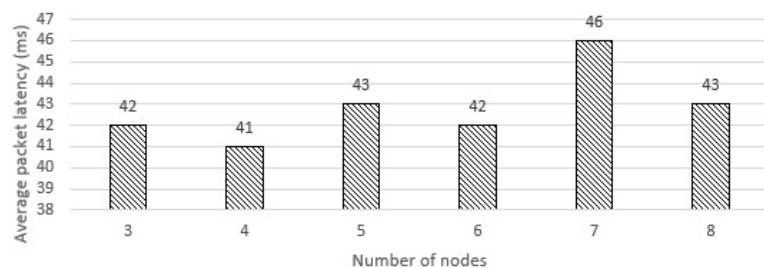
Fonte: do autor

A simulação foi configurada com parâmetros similares ao experimento prático, preservando o mesmo número de pacotes transmitidos e também das características de configuração da rede conforme Tabela 6. Os resultados são apresentados na Figura 35. Cada simulação foi realizada alterando também a quantidade de nodos na rede *mesh*, com objetivo de se verificar o comportamento da rede com o aumento do número de nodos.

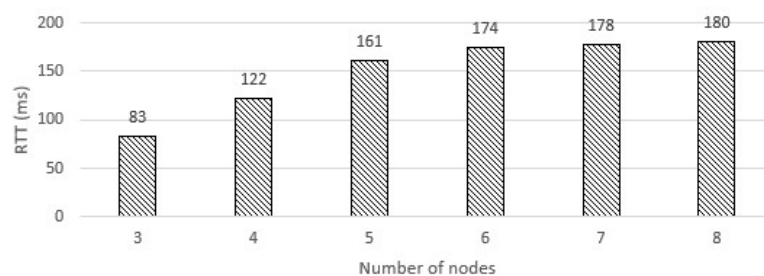
Figura 35 – Resultados simulação no Matlab para 8 nodos



(a) Resultados do PER



(b) Resultados da latência média de pacote



(c) Resultados do RTT

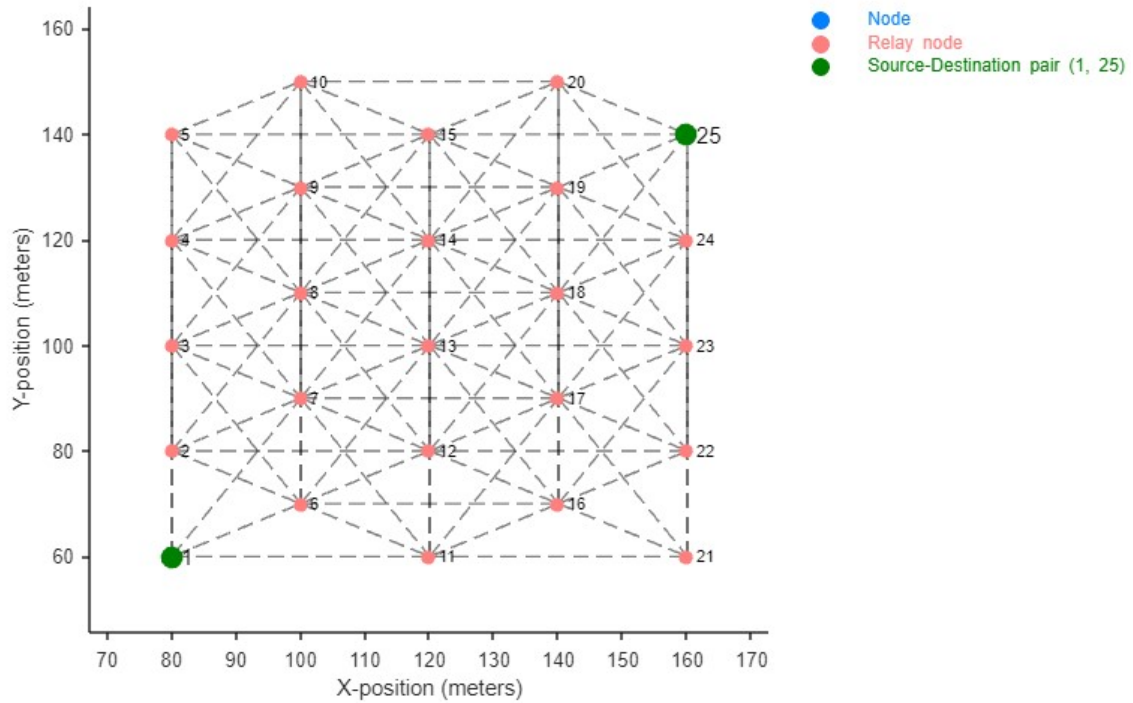
Fonte: do autor

6.3.3 Simulação para experimento de escala

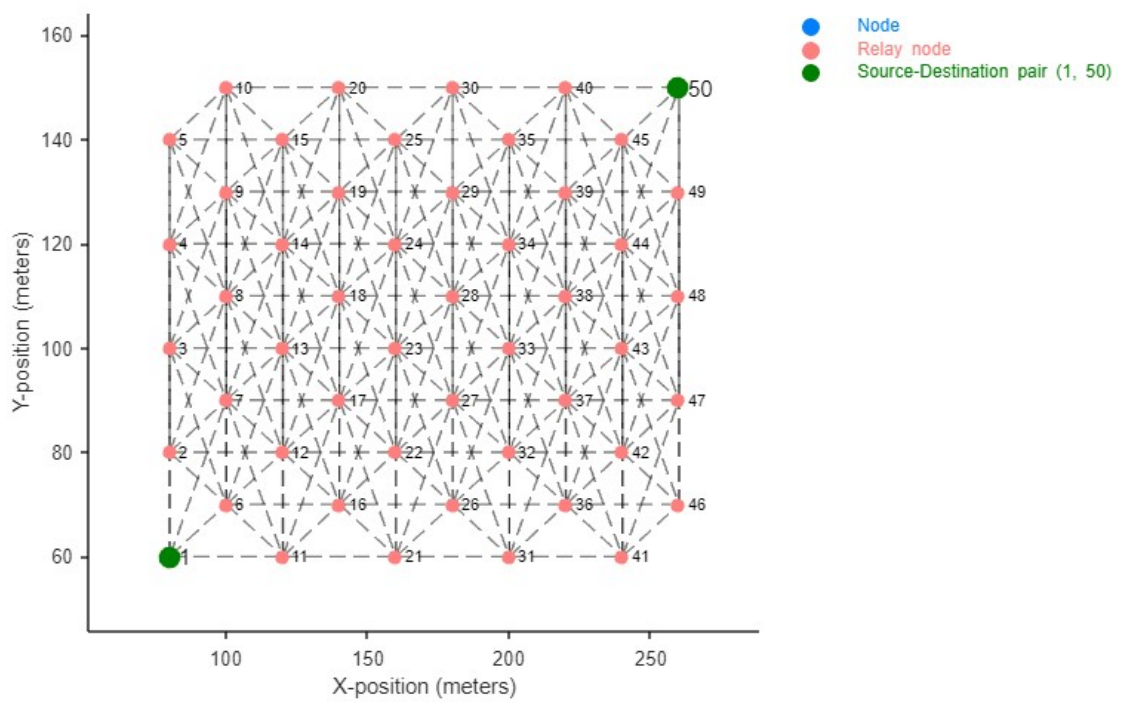
Conforme estipulado, outra proposta da simulação é de explorar uma rede com número crescente de nodos para experimento de escala, aproveitando do recurso computacional. Para isso foi criada uma configuração de rede *mesh* no software Matlab. A quantidade de nodos estipulada foi embasada visando aplicação em ônibus, onde conforme já apresentado pode chegar a uma centena de nodos. Então se padronizou a simulação com a quantidade de 25, 50, 75 e 100 nodos. A Figura 36 apresenta a disposição dos nodos para a simulação de 25 e 50 nodos.

Na simulação com o Matlab, também é possível avaliar o caminho realizado por cada pacote entre o nodo de início e o destino. São diversos caminhos que podem ser percorridos pela mensagem, dependendo da disponibilidade do nodo, como, por exemplo, o parâmetro *ScanInterval* pode afetar as rotas drasticamente. A Figura 37 apresenta um exemplo de caminho realizado por um pacote desde o nodo 1 até o 75.

Figura 36 – Disposição dos nodos - 25 e 50



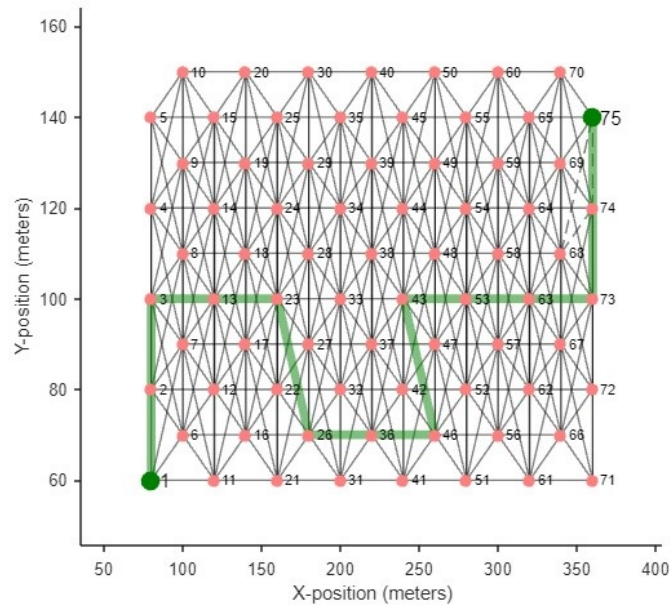
(a) Disposição da rede com 25 nodos



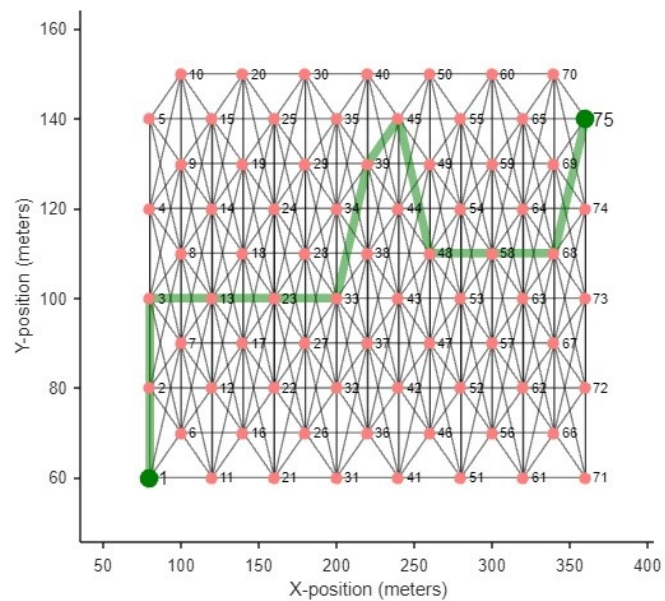
(b) Disposição da rede com 50 nodos

Fonte: do autor

Figura 37 – Comparativo do caminho percorrido pelo pacote



(a) Caminho pacote 1



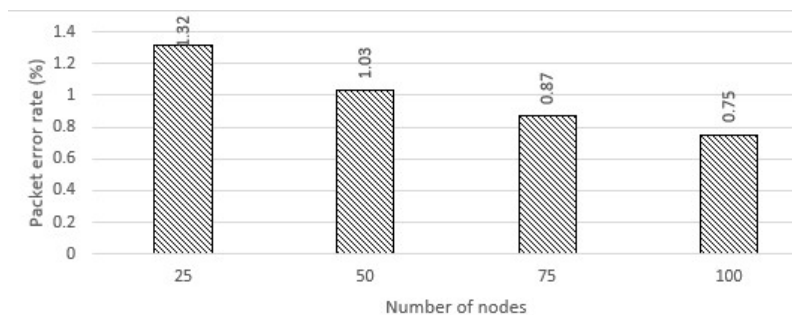
(b) Caminho pacote 2

Fonte: do autor

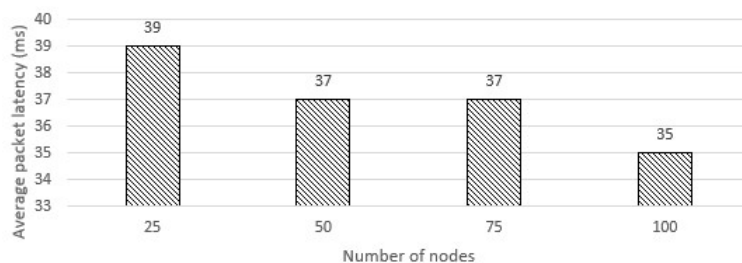
Os gráficos da Figura 38 mostram as métricas de rede da simulação com número de nós elevado. É possível observar que conforme aumenta o número de nós o PER diminui. Em contrapartida, ao aumentar o número de nós e tendo o pacote sendo enviado entre as extremidades da rede, a mensagem demora mais para chegar ao seu destino. Por exemplo, para uma mensagem com a rota 1-25 o RTT foi de 204 ms, já para uma rota entre os nós 1-100 o pacote demora 632 ms para chegar ao seu destino, percorrendo uma maior quantidade total de nós. A latência média de cada pacote diminuiu com o

aumento do número de nodos, fato este que será melhor explicado no subcapítulo 6.4.

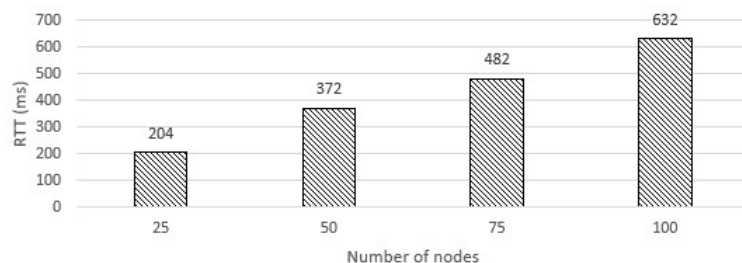
Figura 38 – Resultados simulação no Matlab para até 100 nodos



(a) Resultados do PER



(b) Resultados da latência média de pacote



(c) Resultados do RTT

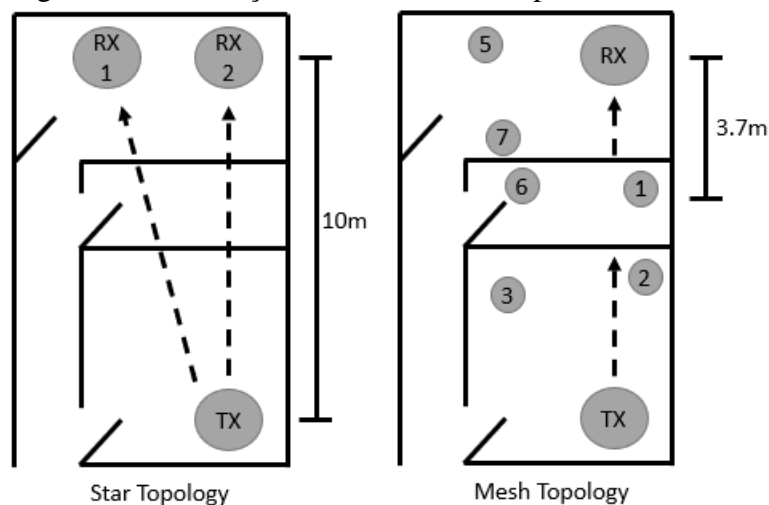
Fonte: do autor

6.4 Primeiros experimentos em laboratório

Neste subcapítulo são apresentados os experimentos realizados em laboratório e denominados de *ambiente controlado*, onde o layout do ambiente e as fontes de ruído são conhecidas. O ambiente escolhido é definido por 3 quartos consecutivos internos de uma casa, separados por duas paredes de alvenaria de aproximadamente 23 cm, conforme exemplificado na Figura 39. Ambas as topologias *mesh* e estrela são avaliadas neste experimento. A Figura 39 também mostra o posicionamento de cada nodo nos ambientes. O ambiente escolhido, apesar de não possuir uma área total grande, tendo em vista que aplicações de RSSF podem possuir áreas de cobertura na ordem de quilômetros de distância, permite avaliar o comportamento da rede *mesh* e sua quantidade de nodos, como

também a influência das paredes de alvenaria.

Figura 39 – Descrição do ambiente de experimentos interno



Fonte: do autor

Um conjunto de fontes de ruído foi estabelecido para coexistir no quarto onde está posicionado o receptor, adicionando mais sinais RF na mesma frequência de operação do Bluetooth. Foram 4 condições específicas de ruídos definidos conforme descrito na Tabela 7.

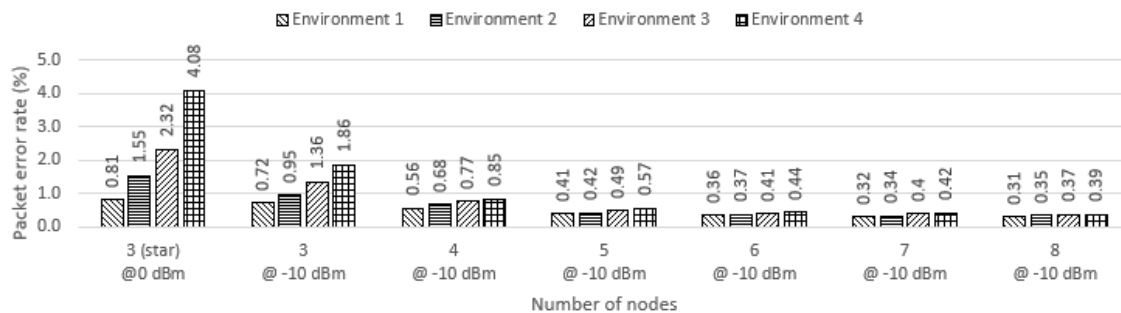
Tabela 7 – Definições de ruídos para o ambiente controlado

Condição	Ambiente
1	Wifi transmitindo um video 4K
2	Wifi transmitindo um video 4K e 1 dispositivo Bluetooth 4.0 reproduzindo música
3	Wifi transmitindo um video 4K e 2 dispositivos Bluetooth 4.0 reproduzindo música
4	Wifi transmitindo um video 4K e 3 dispositivos Bluetooth 4.0 reproduzindo música

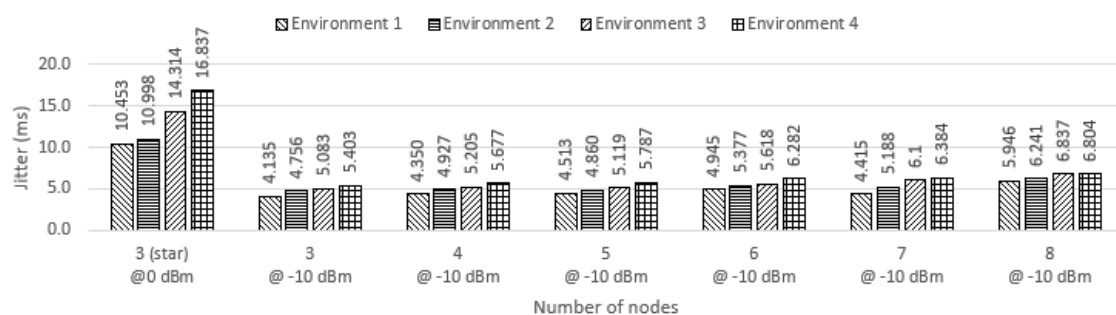
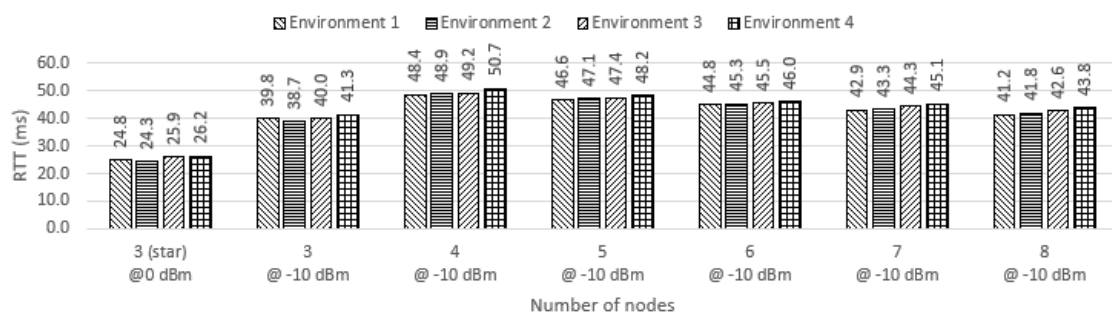
A topologia *mesh* foi avaliada inicialmente com 3 nodos (TX, 1, RX) e então foi se adicionando os outros nodos conforme o mapeamento da Figura 39. A Figura 40 apresenta os resultados dos experimentos para as métricas de PER, *jitter* e RTT. A primeira coluna à esquerda do gráfico representa os resultados obtidos para a topologia estrela, enquanto que as colunas seguintes mostram os resultados para a topologia *mesh* com a adição de nodo por nodo.

Vale salientar que existe uma diferença nas configurações de rádio com respeito à potência de saída do rádio na topologia em estrela. Ao realizar experimentos com a potência inicialmente definida de -10 dBm, a topologia em estrela apresentou resultados

Figura 40 – Resultados dos experimentos em ambiente controlado



(a) Resultados do PER para ambiente interno

(b) Resultados do *jitter* para ambiente interno

(c) Resultados do RTT para ambiente interno

Fonte: do autor

bastante discrepantes, por exemplo, com o PER alcançando os 70%. Esse fato, após certa investigação, evidenciou-se estar relacionado à potência de transmissão do rádio frente as duas paredes de alvenaria do ambiente. Para deixar a rede com uma taxa aceitável de PER, a potência de transmissão, somente para a topologia em estrela, foi aumentada para 0 dBm. Portanto, para o ambiente definido no escopo do trabalho, a rede em estrela não consegue operar de forma satisfatória com -10 dBm, sendo necessário ajustar para 0 dBm.

Baseado nos resultados dos experimentos é possível afirmar que quanto maior a quantidade de fontes de ruído, maior será o PER e o *jitter*. Essa conclusão afeta tanto a topologia em estrela quanto a *mesh*, porém a primeira com muito mais intensidade. Em geral, quanto mais nodos presente na rede, menor será a diferença de PER entre as condições 1 e 4, que são as condições com maior e menor fontes de ruído deste experimento. Já o

jitter para a topologia *mesh* aumenta conforme a adição de nodos, porém muito pouco em uma análise quantitativa.

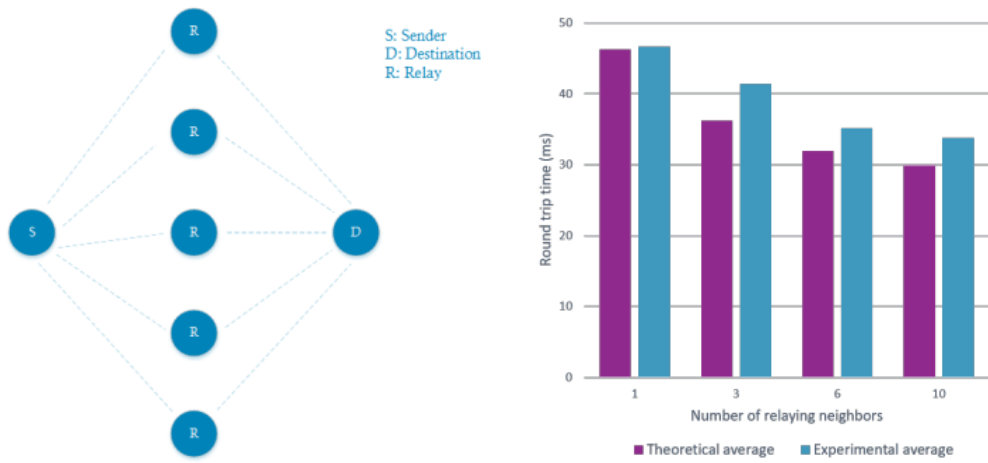
A topologia em estrela teve um considerável aumento nas métricas PER e *jitter* comparado ao *mesh*, mesmo com uma potência de 10 dBm a mais. Por exemplo, o pior caso exposto na Figura 41a é na condição 4 onde o PER foi de 4.08% e o *jitter* de 16,837ms, mostrando que paredes de alvenaria afetam fortemente a qualidade de sinal da rede. Por outro lado, quando o BLE *mesh* é aplicado na mesma condição, o pior caso encontrado é com 3 nodos na condição 4, onde o PER é reduzido para 1,86% e o *jitter* 5,403ms. A medida que o número de nodos aumenta na topologia *mesh*, o PER diminui, porém, com 7 e 8 nodos o PER não muda substancialmente nesta configuração de ambiente. Este fato é muito importante em um projeto de uma RSSF baseado em Bluetooth 5, pois mostra que se o intuito é melhorar a confiabilidade da rede com o aumento de nodos, se tem um limite que, acima deste valor, não trará benefícios no funcionamento da rede. Esse comportamento corrobora a hipótese 4 levantada.

O *round trip time* para a topologia *mesh*, apresentado na Figura 41c, teve um aumento considerável com a adição de 3 para 4 nodos na rede, saindo de um patamar de 39,8 ms (condição 1) para 48,4 ms, mostrando que os pacotes enviados utilizaram bastante o nodo adicionado. Ao adicionar um número maior que 4 nodos, o RTT começa a diminuir suavemente. Este fato chamou a atenção nos resultados e incitou uma busca na literatura. Em redes *mesh* reais, cada nodo geralmente pode alcançar mais de um nodo vizinho em uma transmissão, isso pode levar a uma diminuição do RTT, pois existe uma alta probabilidade de se ter um tempo menor na aquisição do pacote, visto que mais nodos estão escutando e quem antes estiver disponível recebe o pacote (BAERT *et al.*, 2018). Os autores, neste mesmo estudo, aplicam um incremento de nodos vizinhos *relays* entre o transmissor e o receptor visando verificar o comportamento do RTT. A Figura 42a mostra o posicionamento dos nodos *relays* com relação ao transmissor e o receptor, enquanto que a Figura 42b apresenta os tempos de RTT conforme se incrementa a quantidade de nodos. É possível concluir que quanto maior o número de nodos vizinhos, menor será o RTT.

6.5 Latência de salto

Em uma rede *mesh*, todo salto demanda uma quantidade de tempo a mais para que a mensagem chegue ao seu destino. Em redes muito grandes com centenas de nodos este comportamento deve ser levado em consideração, pois pode representar um atraso considerável entre o transmissor e o receptor. Para quantificar a latência de salto na topologia *mesh* do Bluetooth 5 foi realizado um experimento com 8 nodos. Para garantir que a mensagem não pule o nodo intermediário, todos os nodos foram posicionados em uma certa distância onde a área de cobertura do nodo 1 não alcance a do nodo 3, exigindo que o nodo 2 atue como *relay*. O experimento foi realizado em uma estrada de interior para facilitar

Figura 41 – Experimento com nodos vizinhos



(a) Topologia de nodos vizinhos

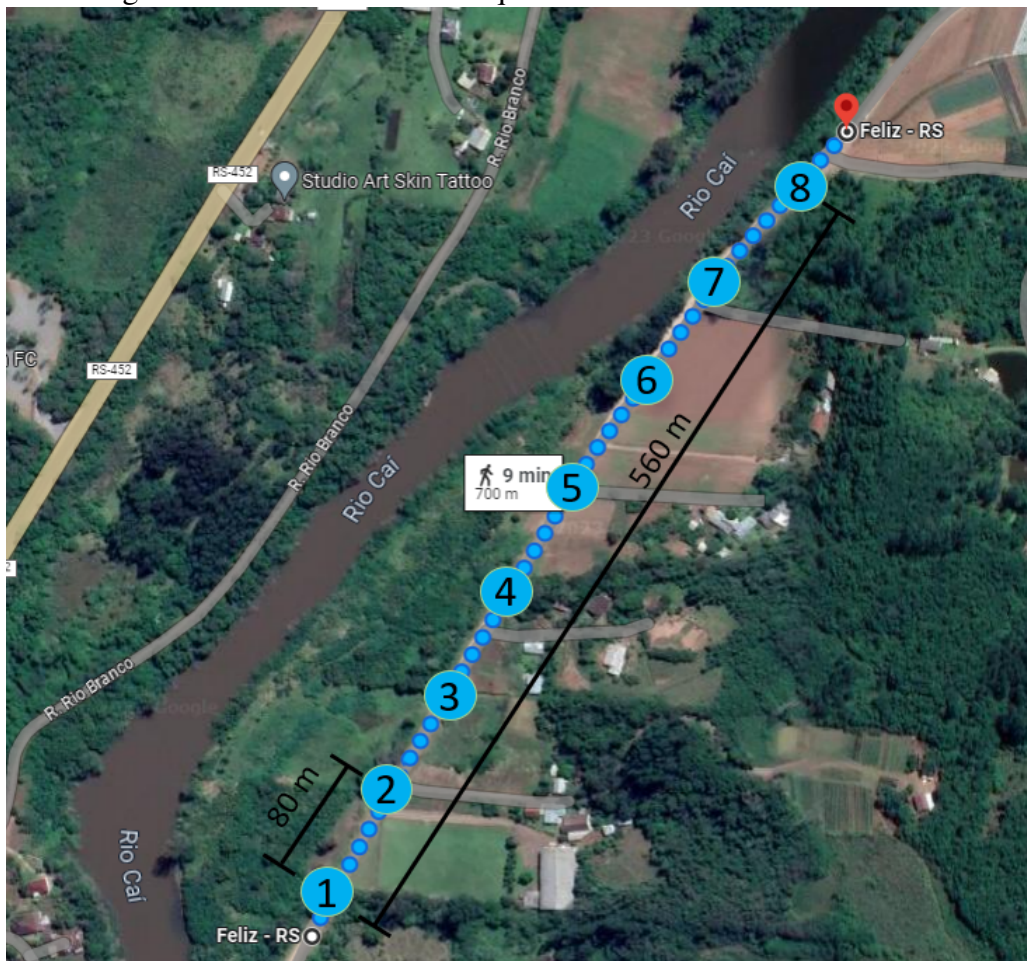
(b) RTT em uma comunicação de 2 saltos variando o número de nodos vizinhos

Fonte: (BAERT *et al.*, 2018)

o posicionamento e segurança dos nodos, com cada um espaçado em aproximadamente 80 metros, como mostra a Figura 42.

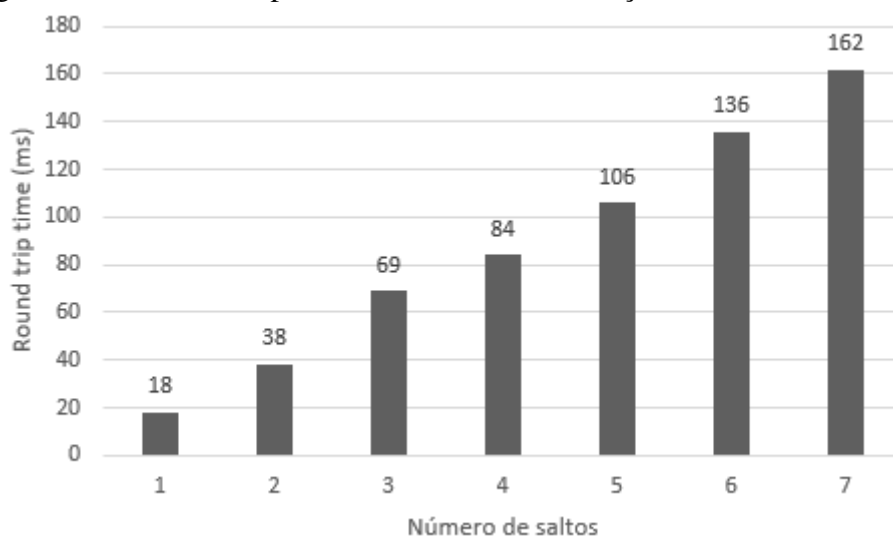
A Figura 43 apresenta o RTT em comparação com o número de saltos. Vale ressaltar que esses valores de tempo estão relacionados com os dispositivos da Silicon Labs utilizados e sua pilha BLE, portanto pode variar entre outros fabricantes. É possível observar um constante incremento no *round trip time* conforme aumenta o número de saltos. É importante destacar a diferença do RTT neste experimento com o experimento da Figura 41, pois são situações diferentes. Enquanto neste está sendo avaliado o salto com nenhum nodo vizinho, os incrementos são somados no RTT final. Já no experimento da Figura 41 são adicionados nodos vizinhos, ao passo que a quantidade de saltos não incrementa, permanecendo em dois saltos.

Figura 42 – Posicionamento sequencial dos nodos em estrada rural



Fonte: do autor

Figura 43 – Medidas experimentais do RTT em função do número de saltos



Fonte: do autor

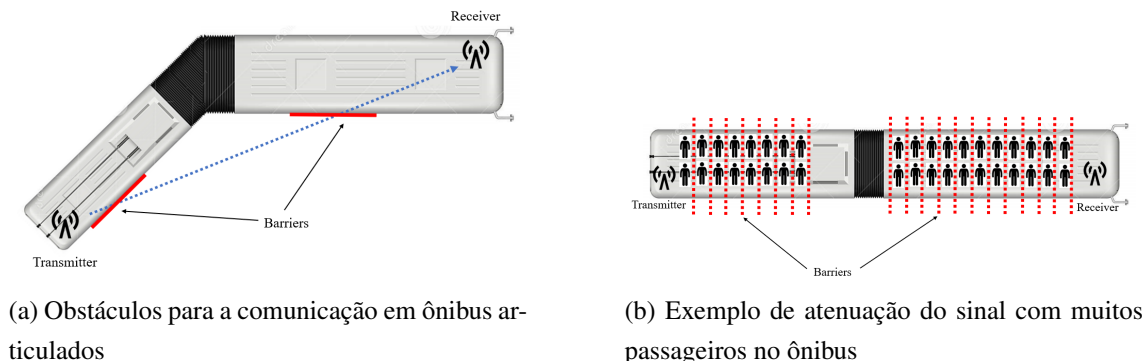
6.6 A bordo de um ônibus articulado

Com o intuito de verificar o principal objetivo deste trabalho, este subcapítulo explora a aplicação de uma RSSF a bordo de um ônibus urbano.

6.6.1 Experimento geral com os nodos de comunicação

O ônibus escolhido é um Viale BRT articulado do fabricante Marcopolo conforme Figura 46c. O veículo foi escolhido com base em alguns critérios como seu longo comprimento de 23 metros, o que é maior que a maioria dos ônibus urbanos, e também seu chassi articulado, que acrescenta uma variável que poderá acarretar em modificações no comportamento da RSSF alterando constantemente o ambiente ao qual a rede está inserida. Por exemplo, quando o ônibus faz a curva em uma esquina, a articulação pode alcançar quase 90° , e se o transmissor e receptor estão em linha de visão direta com o veículo não articulado, quando ele articula são introduzidos alguns obstáculos entre os dispositivos, como, por exemplo, as laterais do ônibus que são feitas de material metálico. Nessa situação de chassi articulado, pelo menos duas laterais de metais ficam entre os dispositivos, afetando a comunicação conforme mostrado na Figura 45a.

Figura 44 – Possibilidades de atenuação do sinal RF em um ônibus



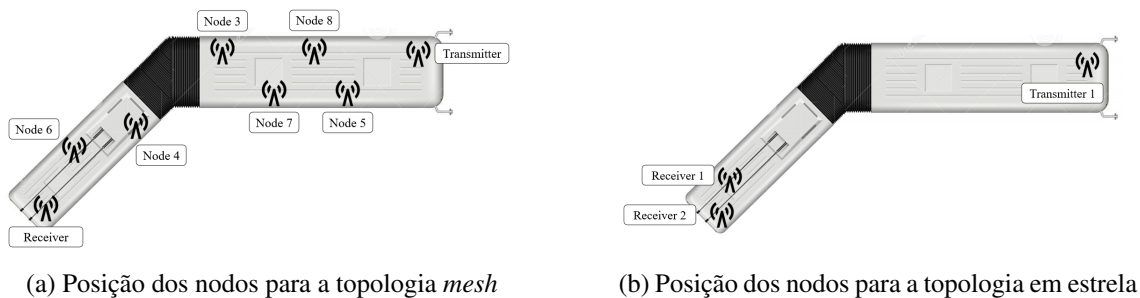
Fonte: do autor

Outro fator que influencia na comunicação são os passageiros a bordo. A Figura 45b ilustra um ônibus com a ocupação total pelos passageiros e a posição do transmissor e receptor, considerando a maior distância possível no ônibus.

O receptor foi posicionado na última fileira de assentos, no fundo do ônibus, e atrás do assento a sua frente para não ficar em uma condição de visada direta com os outros nodos. O dispositivo transmissor foi posicionado em frente ao motorista acima do painel de instrumentação. Os outros nodos foram distribuídos ao longo do ônibus conforme apresentado nas figuras 46a e 46b. Entre o transmissor e o receptor existiam vários obstáculos tais como assentos, pessoas, estruturas de metal, um chassi articulado, caracterizando a condição de experimento dinâmica do ambiente de ônibus proposto. A topologia em estrela foi avaliada com dois nodos receptores e um transmissor, considerando a maior

distância possível entre eles, conforme apresentado na Figura 46b. O experimento da topologia *mesh* começou com 3 nodos e, após, foram adicionados nodo por nodo conforme o número apresentado na Figura 46a.

Figura 45 – Posição dos nodos e visão do ônibus articulado utilizado



(a) Posição dos nodos para a topologia *mesh*

(b) Posição dos nodos para a topologia em estrela



(c) Ônibus utilizado nos experimentos

Fonte: do autor

O experimento foi realizado com os nodos instalados no veículo e em um dia normal de trabalho. A trajetória realizada foi em uma linha no centro da cidade de Caxias do Sul. Um dos critérios para a escolha da linha era que o ônibus percorresse o centro da cidade e áreas mais no seu entorno, para ser possível uma comparação no sinal RF. É importante salientar que os experimentos foram realizados com pelo menos um fone sem fio Bluetooth reproduzindo música. Essa variável foi adicionada no experimento em ônibus para se ter pelo menos um dispositivo coexistindo com a RSSF, além dos dispositivos carregados pelos passageiros, os quais são considerados uma variável fora de controle. A Tabela 8 mostra as principais características do experimento e algumas configurações da IVWSN.

A Figura 46 apresenta a estrutura interna do ônibus articulado utilizado no experimento.

De modo a atender ao mínimo número de amostras de 16641 calculado em 4 e também de realizar os experimentos sempre na mesma rota para se ter comparações justas, cada topologia teve de ser testada 3 vezes, pois a rota escolhida dura menos tempo que o tempo

Tabela 8 – Informações e configurações do experimento

Parâmetro do experimento	Configuração
Potência de transmissão	-10 dBm
Período de transmissão da mensagem	200 ms
<i>Payload</i>	8 bytes (unsegmented)
Tipo de nodo	Todos os nodos são <i>relay</i> (Exceto TX e RX)
Mensagens transmitidas por experimento	16650
<i>Message acknowledge</i>	Não
<i>Random advertising event</i>	Não
TTL	7

Figura 46 – Ambiente interno do ônibus articulado utilizado nos experimentos



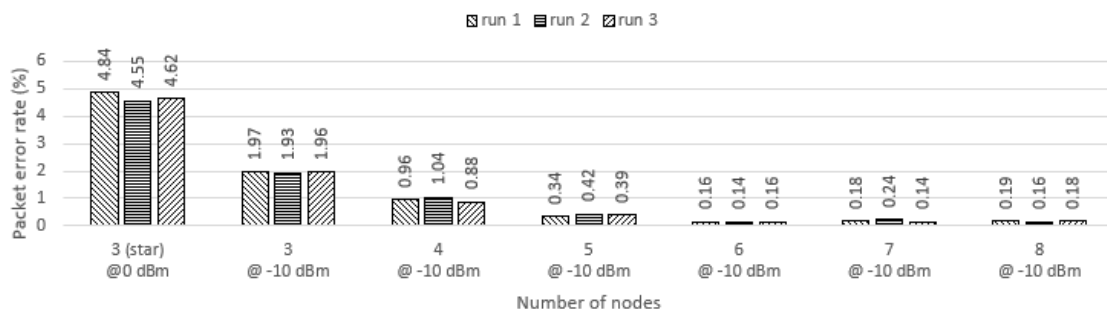
Fonte: do autor

exigido para enviar as 16641 mensagens. Portanto, o gráfico mostra 3 experimentos para cada topologia que ao final, quando somados, resultam no número mínimo de amostras. A Figura 47 mostra os resultados dos experimentos. No mesmo formato apresentado para os experimentos em ambiente controlado Figura 40, as colunas na esquerda são relativas à topologia em estrela, enquanto as seguintes são para a topologia *mesh* com o incremento de nodos.

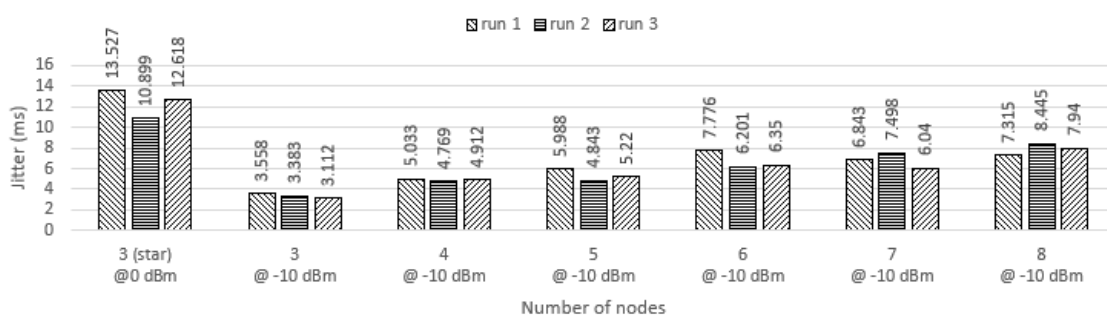
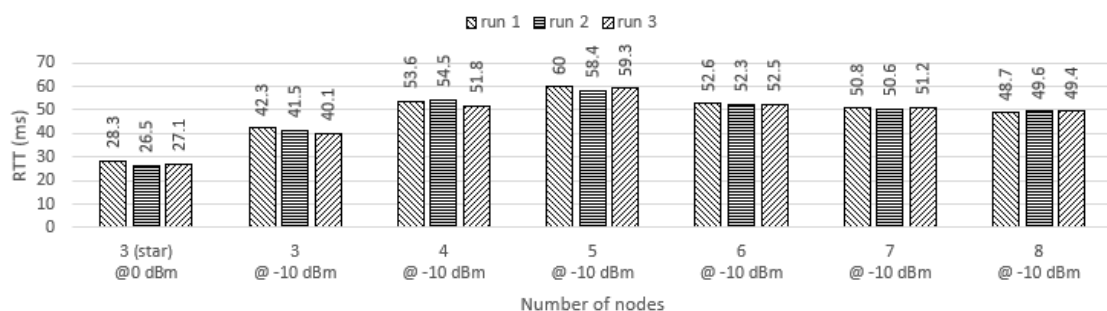
Os experimentos mostram uma diferença considerável entre as duas topologias exploradas neste trabalho. A topologia em estrela apresentou cerca de 2,5 vezes mais pacotes perdidos em comparação à topologia *mesh*, como também um maior *jitter*. Aqui a potência de saída teve a mesma abordagem que os experimentos em ambiente controlado, onde para a topologia em estrela a potência foi aumentada em 10 dBm para manter métricas aceitáveis. Esse comportamento já era esperado visto que nodos em uma rede *mesh* tem suas distâncias reduzidas.

Para a topologia *mesh* o máximo PER encontrado foi de 1,97% na configuração de 3 nodos. Conforme o número de nodos aumenta o PER diminui. Para uma quantidade de 7 e 8 nodos, nas distâncias estipuladas, o PER praticamente não diminui, se tornando

Figura 47 – Resultados dos experimentos a bordo de um ônibus articulado



(a) Resultados do PER a bordo de um ônibus articulado

(b) Resultados do *jitter* a bordo de um ônibus articulado

(c) Resultados do RTT a bordo de um ônibus articulado

Fonte: do autor

estável com a adição de mais nodos. Esse comportamento está relacionado ao ambiente em teste e suas características como, por exemplo, a presença de pessoas, dispositivos, estruturas do ônibus e seu comprimento.

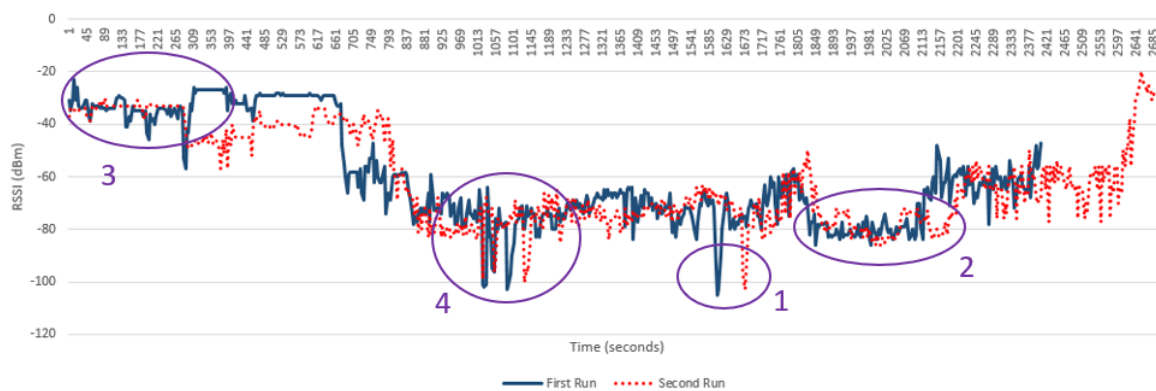
O maior *jitter* encontrado foi nos experimentos da topologia em estrela, onde o valor alcançou 13,527 ms no primeiro experimento. Na topologia *mesh*, o *jitter* aumenta conforme se aumentam o número de nodos, mas parece estabilizar acima de 6 nodos. Em uma aproximação grosseira, a topologia *mesh* apresentou cerca de metade do *jitter* quando comparado à topologia em estrela. O RTT teve um comportamento similar aos experimentos em ambiente controlado.

6.6.2 Análise do RSSI

Em algumas partes do experimento, quando o ônibus estava parado na estação e uma grande quantidade de pessoas estava em pé aguardando a abertura das portas, este foi o pior caso para o RSSI, pois ele baixou consideravelmente. Frente a isso, foi adicionado aos experimentos no ônibus uma análise do RSSI para verificar quais tipos de atenuação do sinal são mais influentes na qualidade do sinal.

Para esse experimento, uma topologia foi preparada com 3 nodos em *mesh*. A potência de saída foi aumentada para +3 dBm, pois o objetivo aqui é avaliar o RSSI e não as métricas já verificadas, portanto um sinal mais forte permite uma melhor análise em momentos onde o sinal pode ser fortemente atenuado. Então, o RSSI foi registrado ao longo do percurso do ônibus a fim de verificar a influência de variáveis externas na RSSI. O gráfico da Figura 48 mostra dois experimentos realizados nesta configuração e algumas interessantes situações são destacadas.

Figura 48 – RSSI registrado ao longo da trajetória



Fonte: do autor

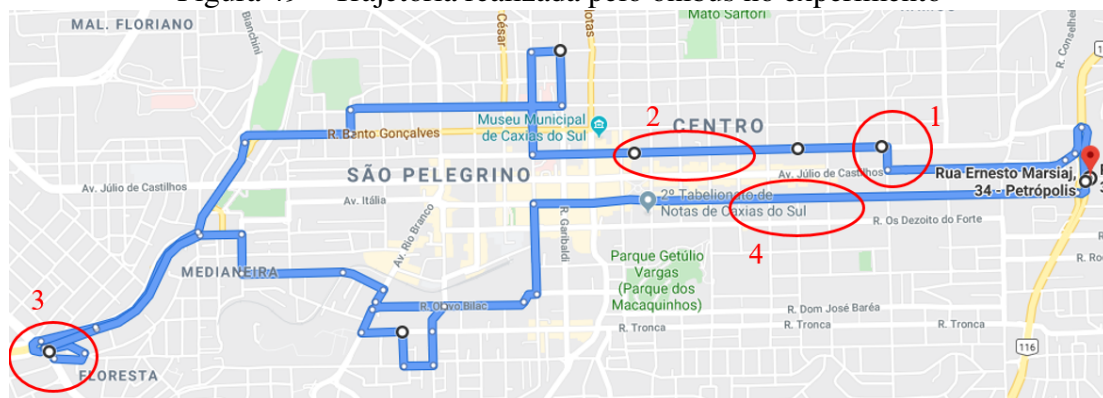
A seguir, são discutidas algumas situações encontradas no experimento e estão destacadas no gráfico da Figura 48.

- **Chassis articulado:** Destacado como número 1 na Figura 48 o ponto do gráfico corresponde ao momento em que o ônibus está fazendo a conversão em uma rua com um ângulo de aproximadamente 70° na articulação do chassi. Neste momento o RSSI diminuiu para -103 dBm, suportando a hipótese de que as paredes de metal do ônibus atuam como barreiras, conforme exposto na Figura 45a. A Figura 49 mostra a trajetória completa realizada pelo ônibus no experimento, como também o ponto desta análise destacado pelo número 1. Esta característica reforça a hipótese 2, que está relacionada aos obstáculos internos e estruturais do ambiente.
- **Área central:** Os dados coletados aqui correspondem ao momento que o ônibus percorreu a área central da cidade. Nessa localidade, existe um grande número de pessoas nas ruas, muitos prédios comerciais, antenas instaladas acima deles, e

uma concentração de todo o tipo de comunicação que uma cidade moderna pode ter. Nesta parte do experimento, o RSSI caiu para -85 dBm na média. Essa área é destacada na Figura 49 (número 2). Essa etapa do experimento corrobora com a hipótese 3, que sugere que outras redes sem fio podem interferir na comunicação alvo.

- **Condições estáticas:** A marcação número 3 na Figura 48 mostra o momento em que o ônibus está estacionado na estação central aguardando a entrada de passageiros, portanto não se tem passageiros a bordo e o ônibus não está se locomovendo. Apesar desta condição ser a menos desafiadora para a IVWSN, algumas variações no RSSI podem ser observadas. Quando os passageiros iniciam o embarque no ônibus, existe um vale no gráfico alcançando os -60 dBm. Na Figura 49, destacado como região 3, está localizada a estação de ônibus onde os passageiros estavam aguardando o embarque.
- **Influência das pessoas:** Destacado como região 4 nas figuras 48 e 49, os pontos mostram a situação onde se teve o maior número de pessoas neste experimento específico do RSSI, sendo 71 passageiros no primeiro experimento e 65 no segundo. Nesta situação era esperado que o RSSI reduzisse conforme apresentado na Figura 45b. Entretanto, este experimento mostrou que a comunicação, com essa quantidade de pessoas, não foi afetada. O nível de sinal ficou mais instável, variando bastante, porém nenhum pacote foi perdido neste momento. Esse comportamento reforça a hipótese 1 levantada, que uma maior quantidade de pessoas pode atenuar o sinal. Neste caso o sinal ficou bastante instável, apresentando um dos valores mais baixos na intensidade do sinal.

Figura 49 – Trajetória realizada pelo ônibus no experimento



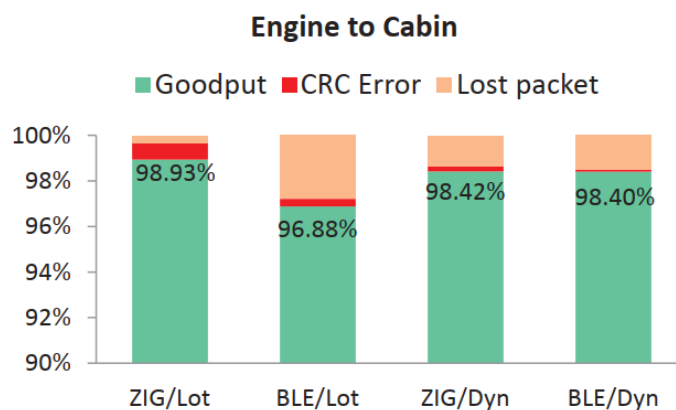
Fonte: do autor

Unindo o experimento da situação 3 com 4 é possível sugerir que o BLE consegue se adaptar ao ambiente ao qual está inserido. Mudanças do ambiente alteram métricas de performance, mas após estáticas elas tendem a se estabilizar.

6.7 Comparativo com trabalhos relacionados

O experimento realizado em (LIN; TALTY; TONGUZ, 2013) e (LIN; TALTY; TONGUZ, 2015) com o Bluetooth Low Energy mostra que pequenas interferências como WiFi ou Bluetooth de áudio são suficientes para a perda de pacotes. A comunicação no experimento funcionou com uma considerável quantidade de pacotes perdidos, conforme mostra a Figura 50, onde o BLE apresentou um PER de 3,12% considerando a comunicação do motor para a cabine. A principal diferença frente ao trabalho aqui proposto são as distâncias envolvidas, que não excedem os 4 metros de comprimento em carros comuns. Por outro lado, a distância dentro do ônibus entre o transmissor e o receptor é de 21 metros. Neste comparativo, o Bluetooth 5 parece ser mais robusto e confiável, se adequando melhor ao ambiente veicular para aplicação de RSSF considerando todas possíveis aplicações.

Figura 50 – PER na comunicação motor para cabine do BLE



Fonte: (LIN; TALTY; TONGUZ, 2013)

Podendo ser uma métrica comparativa, é válido mencionar que a comunicação CAN (*Controller Area Network*), a qual é um padrão de comunicação automotivo mundialmente utilizado, também possui taxa de perda de pacotes. Em um estudo realizado em (HEGDE, 2014) os autores realizam uma simulação para estimar a probabilidade de perda de pacotes em sistemas de comunicação CAN. Para 4985 mensagens geradas, 6 mensagens foram perdidas, representando um PER de 0,12%. A comunicação CAN é um robusto padrão de comunicação adotado para sistemas automotivos, que opera por cabos, não sendo uma comunicação sem fio.

Embora a proposta do presente trabalho não contemple uma análise sobre a criticidade de tempo na comunicação do Bluetooth, é interessante destacar um comparativo dando suporte à tecnologia. O estudo realizado em (RONDÓN; GIDLUND; LANDERNÄS, 2017) avalia o *Bluetooth Low Energy* em aplicações industriais críticas de tempo. A Figura 51 destaca alguns dos requisitos específicos comumente encontrados para RSSFI no quesito de automação de processos, monitoramento e diagnóstico.

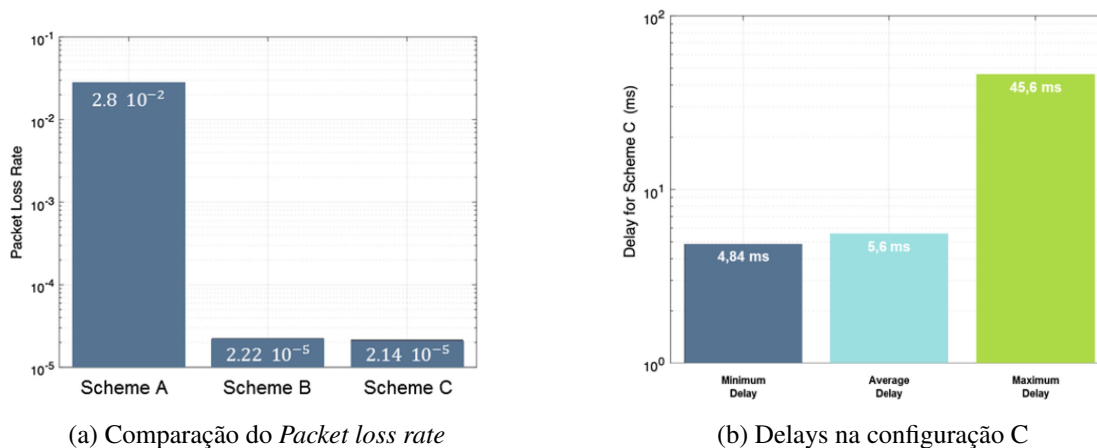
Figura 51 – Requisitos para RSSFI

Application	Max. transmission delay (ms)	Update time (ms)	Packet loss rate	Number of nodes/10 m ²
Open-loop/closed-loop control	50–100	100–5000	10 ⁻⁴	1–20
Monitoring and diagnostics	>100	>10,000	10 ⁻⁴	1–20

Fonte: (RONDÓN; GIDLUND; LANDERNÄS, 2017)

Os resultados obtidos pelos autores sugerem que o BLE é um potencial candidato para comunicações sem fio industriais, pois ele atende aos requisitos da maioria das aplicações, especialmente em processos automatizados. Os autores chegaram a um delay máximo de 46ms na transferência de pacotes, sendo que o delay médio foi de 5,6ms, e um *packet loss rate* na ordem de 10⁻⁵, como mostram as figuras 53a e 53b.

Figura 52 – Resultados de PER e delay para comparação



Fonte: (RONDÓN; GIDLUND; LANDERNÄS, 2017)

O experimento realizado em (BÖCKER; ARENDT; WIETFELD, 2017) apresenta uma relação direta entre o PER e o número de mensagens transmitidas por dia sob a influência de redes BLE concomitantes, o qual teve um incremento do PER quando mais mensagens eram transmitidas. Os autores estipularam como o máximo de 1000 mensagens diárias, enquanto que o trabalho aqui proposto envia mais de 300 mensagens por minuto, sendo uma condição muito pior para a métrica PER.

Na mesma direção, o estudo reportado em (SASSI; NASEEF; HERVÉ, 2019) discute o nível de sensibilidade de referência mantendo um certo grau de qualidade na comunicação. Alguns requisitos foram colocados como, por exemplo, que dispositivo em teste consiga uma taxa de dados suficiente para a aplicação e um PER abaixo de 10%, sendo esse valor o pior caso.

Os resultados obtidos em (AZPILICUETA *et al.*, 2015) utilizando uma rede 802.15.4, quando comparado com o trabalho aqui proposto, sugerem que o Bluetooth 5 apresentou melhor confiabilidade na comunicação. Enquanto o trabalho relacionado mostra um PER

de 1,79% em um ônibus articulado, os resultados obtidos neste trabalho mostram um PER de 0,19%.

Vale ressaltar que o trabalho aqui apresentado se limitou a uma avaliação da comunicação do Bluetooth *mesh* sem retransmissão de pacotes, justamente com o intuito de verificar a confiabilidade da comunicação no seu formato mais orgânico possível. Também não se implementou a melhoria já apresentada da aleatoriedade na transmissão de pacotes. Um estudo realizado pela Ericsson (ERICSSON, 2020), em uma rede Bluetooth *mesh* transmitindo a cada 300ms, mostrou dois resultados, um sem as melhorias propostas e outro com elas implementadas. Na situação sem as melhorias, a taxa de sucesso na entrega de pacotes com uma rede esparsa foi de 84,3%, enquanto que aplicando as melhorias a taxa de sucesso alcançou 99,9%. Portanto, os resultados experimentais reportados neste trabalho cumprem de forma superior alguns níveis estipulados em outros trabalhos, visto que não foi encontrada uma definição exata de PER aceitável para uma comunicação veicular.

7 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho apresentou um estudo e um experimento visando avaliar se o Bluetooth *mesh* pode ser uma confiável e robusta opção de comunicação para instrumentar uma rede de sensores sem fio veicular aplicada no transporte público. Suas características trazem funções essenciais para operar no transporte público, que representa desafios adicionais em comparação à sua adoção em carros de passeio. Os experimentos realizados foram baseados na topologia em estrela e *mesh*, com uma maior ênfase na topologia *mesh*, em um ambiente controlado e também a bordo de um ônibus. O ônibus escolhido é uma versão com articulação, capaz de transportar até 270 passageiros, possuindo 23 metros de comprimento e com o experimento sendo realizado na sua operação normal, ou seja, em um dia normal de trabalho. Com isso, baseado em uma lacuna identificada na literatura sobre a aplicação do Bluetooth 5 em rede *mesh* no transporte público, as principais contribuições deste trabalho são:

1. As simulações computacionais proporcionam uma análise relativamente próxima dos resultados práticos, podendo ser utilizada como base para levantamento de requisitos em projetos de RSSF;
2. Os resultados indicam que o Bluetooth 5 possui uma maior cobertura comparado à sua versão anterior;
3. Nos experimentos em ambiente controlado, quanto maior a quantidade de ruídos inseridos, maior será o PER e *jitter*. Para a topologia *mesh*, a quantidade de fontes de ruído interfere menos que na topologia em estrela. O tempo de salto em cada nodo é de aproximadamente 18 ms;
4. Os experimentos a bordo do ônibus, na topologia *mesh*, mostraram que o PER e *jitter* diminuíram substancialmente comparado à topologia em estrela, tornando a IVWSN mais robusta e confiável, utilizando menos energia de transmissão;
5. Ao longo dos experimentos no ônibus com a topologia *mesh*, o pior caso para o PER foi de 0,16%, uma métrica de performance da rede promissora quando comparada com resultados encontrados na literatura;

6. A abordagem apresentada mostra uma aplicação promissora de IVWSN para coleta de dados em veículos do transporte público, provendo recursos para sistemas inteligentes de análise de dados;

Comparativos com trabalhos relacionados na literatura indicam uma superioridade tanto em relação aos requisitos dos experimentos, como também aos resultados encontrados frente a outras soluções de RSSF. Por exemplo, a métrica PER do presente trabalho ficou bastante próxima aos valores encontrados para uma comunicação cabeada CAN, tendo ainda um número muito maior de amostras conforme previamente estabelecido. Outro trabalho se limitou a uma quantidade de 1000 mensagens diárias, já que foi encontrada uma relação que quanto maior a quantidade de mensagens, maior será o PER. O presente trabalho utilizou 300 mensagens por minuto. Um experimento realizado também em ônibus apresentou um PER de 1,79% para uma rede 802.15.4, enquanto que este trabalho encontrou um valor de 0,19%.

O Bluetooth 5, conforme discutido nos experimentos, é um potencial candidato para preencher a lacuna identificada na literatura desta área, a qual explora, em sua grande maioria, aplicações em carros de passeio. Os benefícios discutidos e efetivamente avaliados na prática oferecem uma solução alternativa para IVWSN no transporte público. Conforme as configurações e resultados dos experimentos, essa tecnologia pode também ser aplicada a outros modais de transporte, não se limitando a apenas ônibus.

Futuros trabalhos podem explorar essa tecnologia habilitando ainda mais nodos na topologia *mesh*, como também ativar os artifícios do BLE para melhorar confiabilidade da rede, como, por exemplo, a aleatoriedade dos parâmetros de tempo e a retransmissão de mensagem em caso de falha, tornando a rede ainda mais robusta. Outro importante ponto a ser avaliado é a solução de outros fabricantes que podem ter características diferentes que implicam no funcionamento final da aplicação.

REFERÊNCIAS

- ANDERSSON, P.; PERSSON, L. **Evaluation of bluetooth 5.1 as an indoor positioning system**. 2020. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — KTH Royal Institute of Technology, 2020.
- AZPILICUETA, L. *et al.* Characterization of wireless channel impact on wireless sensor network performance in public transportation buses. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, [S.l.], v. 16, n. 6, p. 3280–3293, 2015.
- BAERT, M. *et al.* The Bluetooth mesh standard: an overview and experimental evaluation. **Sensors**, [S.l.], v. 18, n. 8, p. 2409, 2018.
- BÖCKER, S.; ARENDT, C.; WIETFELD, C. On the suitability of Bluetooth 5 for the Internet of Things: performance and scalability analysis. *In: IEEE 28TH ANNUAL INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PERSONAL, INDOOR, AND MOBILE RADIO COMMUNICATIONS (PIMRC)*, 2017., 2017. **Proceedings [...]** [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–7.
- BURMAN, S. G. *et al.* TempMesh—A Flexible Wireless Sensor Network for Monitoring River Temperatures. **ACM Transactions on Sensor Networks**, [S.l.], v. 19, n. 1, p. 1–28, 2022.
- CARDOSO, D. T. **Study on the efficiency of UHF RFID technology for passengers' recognition in intelligent public transportation systems**. 2019. Dissertação (Mestrado em engenharia) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.
- CARHACIOGLU, O.; ZAND, P.; NABI, M. Cooperative Coexistence of BLE and Time Slotted Channel Hopping Networks. *In: IEEE 29TH ANNUAL INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PERSONAL, INDOOR AND MOBILE RADIO COMMUNICATIONS (PIMRC)*, 2018., 2018. **Proceedings [...]** [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–7.
- COCHRAN, W. G. **Sampling techniques**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1977.

- COLLOTTA, M. *et al.* Bluetooth 5: a concrete step forward toward the iot. **IEEE Communications Magazine**, [S.l.], v. 56, n. 7, p. 125–131, 2018.
- CONTRAN. **RESOLUÇÃO CONTRAN Nº 936, DE 28 DE MARÇO DE 2022.** [S.l.: s.n.], 2022. Disponível em:<<https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/assuntos/transito/conteudo-contran/resolucoes/Resolucao9362022.pdf>>. Acesso em: 22 abr. 2023.
- COSTA, C. A. *et al.* Characterization of damper-to-damper wireless channel in small cars. *In: IEEE MTT-S INTERNATIONAL WIRELESS SYMPOSIUM (IWS)*, 2018., 2018. **Proceedings [...]** [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–3.
- DARGIE, W.; POELLABAUER, C. **Fundamentals of wireless sensor networks: theory and practice.** [S.l.]: John Wiley & Sons, 2010.
- DARROUDI, S. M.; GOMEZ, C. Experimental evaluation of 6blemesh: ipv6-based ble mesh networks. **Sensors**, [S.l.], v. 20, n. 16, p. 4623, 2020.
- DIEZ, V. *et al.* Reliability evaluation of point-to-point links based on IEEE 802.15.4 physical layer for IWSAN applications. **AEU-International Journal of Electronics and Communications**, [S.l.], v. 113, p. 152967, 2020.
- DUMKA, A. *et al.* **A Complete Guide to Wireless Sensor Networks: from inception to current trends.** [S.l.]: CRC Press, 2019.
- ERAS, L.; DOMÍNGUEZ, F.; MARTINEZ, C. Viability characterization of a proof-of-concept Bluetooth mesh smart building application. **International Journal of Distributed Sensor Networks**, [S.l.], v. 18, n. 5, p. 15501329221097819, 2022.
- EREN, H. **Wireless sensors and instruments: networks, design, and applications.** [S.l.]: CRC Press, 2018.
- ERICSSON. **Bluetooth Mesh Networking.** Disponível em:<<https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/white-papers/bluetooth-mesh-networking>>. Acesso em: 22 fev. 2023.
- EVERYTHINGRF. **What is GFSK Modulation?** Disponível em:<<https://www.everythingrf.com/community/what-is-gfsk-modulation>>. Acesso em: 14 jun. 2023.
- FREE SOFTWARE FOUNDATION, I. **GCC, the GNU Compiler Collection.** Disponível em:<<https://gcc.gnu.org/>>. Acesso em: 20 jul. 2023.

GHEORGHIU, R. A.; IORDACHE, V.; MINEA, M. Assessment of ZigBee communications efficiency for truck platooning applications. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRONICS, COMPUTERS AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE (ECAI), 2019., 2019. Proceedings [...]* [S.l.: s.n.], 2019. p. 1–4.

HEGDE, B. **Modeling of Vehicle Controller Area Network for Control Systems Simulation.** 2014. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — The Ohio State University, 2014.

HILDÉN, E.; OJALA, J.; VÄÄNÄNEN, K. User needs and expectations for future traveling services in buses. *In: NORDIC CONFERENCE ON HUMAN-COMPUTER INTERACTION, 9., 2016. Proceedings [...]* [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–6.

JV, M. P.; DE SOUZA, B. J. O.; ENDLER, M. Opportunistic routing towards mobile sink nodes in bluetooth mesh networks. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WIRELESS NETWORKS AND MOBILE SYSTEMS-WINSYS,, INSTICC, SCITEPRESS, 18., 2021. Proceedings [...]* [S.l.: s.n.], 2021. p. 67–75.

KAJDOCSI, L.; DÖRÖMBÖZI, A.; KOVÁCS, J. Development of bluetooth mesh core stack using omnet++. *In: IEEE 17TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INTELLIGENT SYSTEMS AND INFORMATICS (SISY), 2019., 2019. Proceedings [...]* [S.l.: s.n.], 2019. p. 23–28.

KARPIS, O. Wireless sensor networks in intelligent transportation systems. **International Journal of Modern Engineering Research (IJMER)**, [S.l.], v. 3, n. 2, 2013.

LAPPONI, J. C. **Estatística usando excel.** [S.l.]: Elsevier Brasil, 2004.

LI, K. *et al.* Bloothair: a secure aerial relay system using bluetooth connected autonomous drones. **ACM Transactions on Cyber-Physical Systems**, [S.l.], v. 5, n. 3, p. 1–22, 2021.

LIN, J.-R.; TALTY, T.; TONGUZ, O. K. An empirical performance study of intra-vehicular wireless sensor networks under WiFi and Bluetooth interference. *In: IEEE GLOBAL COMMUNICATIONS CONFERENCE (GLOBECOM), 2013., 2013. Proceedings [...]* [S.l.: s.n.], 2013. p. 581–586.

LIN, J.-R.; TALTY, T.; TONGUZ, O. K. On the potential of bluetooth low energy technology for vehicular applications. **IEEE Communications Magazine**, [S.l.], v. 53, n. 1, p. 267–275, 2015.

MATHWORKS. **Bluetooth Packet Structure**. Disponível

em:<<https://www.mathworks.com/help/bluetooth/ug/bluetooth-packet-structure.html>>. Acesso em: 14 abr. 2023.

MATLAB. **Matlab for students**. Disponível

em:<<https://www.mathworks.com/products/matlab/student.html>>. Acesso em: 07 set. 2023.

MOURAD, A.; HEIGL, F.; HOEHER, P. A. Performance evaluation of concurrent IEEE 802.11 systems in the automotive domain. *In: IEEE 41ST CONFERENCE ON LOCAL COMPUTER NETWORKS (LCN), 2016., 2016. Proceedings [...]* [S.l.: s.n.], 2016. p. 655–661.

MOURAD, A. *et al.* On the performance of WLAN and Bluetooth for in-car infotainment systems. **Vehicular Communications**, [S.l.], v. 10, p. 1–12, 2017.

MURILLO, Y. *et al.* An all-wireless SDN framework for BLE mesh. **ACM Transactions on Internet of Things**, [S.l.], v. 1, n. 4, p. 1–30, 2020.

NAHAS, B. A. *et al.* BlueFlood: concurrent transmissions for multi-hop bluetooth 5—modeling and evaluation. **ACM Transactions on Internet of Things**, [S.l.], v. 2, n. 4, p. 1–30, 2021.

NATGUNANATHAN, I. *et al.* Bluetooth Low Energy Mesh: applications, considerations and current state-of-the-art. **Sensors**, [S.l.], v. 23, n. 4, p. 1826, 2023.

NBR-15570. **Transport — Technical specification for vehicles of urban characteristics for public transport of passengers manufacturing**. [S.l.]: ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2020. (Standard).

NORDSTRÖM, T.; KUNERT, K. On the Interference Management Between Non-Stationary Wireless Networks. *In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON EMERGING TECHNOLOGIES AND FACTORY AUTOMATION (ETFA), 2019., 2019. Proceedings [...]* [S.l.: s.n.], 2019. p. 1764–1767.

NOVELBITS. **Bluetooth 5 speed: how to achieve maximum throughput for your ble application**. Disponível em:<<https://novelbits.io/bluetooth-5-speed-maximum-throughput/>>. Acesso em: 14 abr. 2023.

PEI, Z. *et al.* Application-oriented wireless sensor network communication protocols and hardware platforms: a survey. *In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRIAL TECHNOLOGY, 2008., 2008. Proceedings [...]* [S.l.: s.n.], 2008. p. 1–6.

PENG, H. *et al.* Vehicular communications: a network layer perspective. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, [S.l.], v. 68, n. 2, p. 1064–1078, 2019.

POLYTECHNIC. **Difference between FDMA and TDMA**. Disponível em:<<https://www.polytechnichub.com/difference-fdma-tdma/>>. Acesso em: 02 ago. 2023.

PORETSKY, S. *et al.* **Terminology for benchmarking network-layer traffic control mechanisms**. [S.l.: s.n.], 2006.

QUALIÔNIBUS. **Índice de satisfação com o transporte coletivo atinge meta de 2024**. Disponível em:<<https://prefeitura.poa.br/eptc/noticias/indice-de-satisfacao-com-o-transporte-coletivo-atinge-meta-de-2024>>. Acesso em: 21 abr. 2023.

RAMESH, R. *et al.* LoRaWAN for smart cities: experimental study in a campus deployment. In: **LPWAN Technologies for IoT and M2M Applications**. [S.l.]: Elsevier, 2020. p. 327–345.

RONDÓN, R.; GIDLUND, M.; LANDERNÄS, K. Evaluating bluetooth low energy suitability for time-critical industrial iot applications. **International Journal of Wireless Information Networks**, [S.l.], v. 24, p. 278–290, 2017.

RONDÓN, R. *et al.* Understanding the performance of bluetooth mesh: reliability, delay, and scalability analysis. **IEEE Internet of things journal**, [S.l.], v. 7, n. 3, p. 2089–2101, 2019.

SASSI, O.; NASEEF, M.; HERVÉ, P. Estimation approach for the packet error rate of an in-vehicle wireless communications system. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY-EMC EUROPE, 2019., 2019. **Proceedings [...]** [S.l.: s.n.], 2019. p. 736–741.

SHEN, Z.; YANG, Q.; JIANG, H. Multichannel neighbor discovery in bluetooth low energy networks: modeling and performance analysis. **IEEE Transactions on Mobile Computing**, [S.l.], 2021.

SIG, B. **How Bluetooth Mesh Puts the ‘Large’ in Large-Scale Wireless Device Networks**. Disponível em:<<https://www.bluetooth.com/blog/mesh-in-large-scale-networks/>>. Acesso em: 11 mar. 2023.

SIG, B. **Bluetooth Core Specification**. Disponível em:<<https://www.bluetooth.com/specifications/specs/core-specification-5-2/>>. Acesso em: 13 abr. 2023.

SIG, B. Bluetooth Core Specification Version 5.2 Feature Overview. Disponível em:<https://www.bluetooth.com/wp-content/uploads/2020/01/Bluetooth_5.2_Feature_Overview.pdf>. Acesso em: 03 mar. 2023.

SIG, B. How Bluetooth Technology Creates Reliability From Unreliable Foundations. Disponível em:<<https://www.bluetooth.com/blog/how-bluetooth-technology-creates-reliability-from-unreliable-foundations>>. Acesso em: 13 abr. 2023.

SIG, B. 2 Ways Bluetooth Technology Makes Wireless Connections Reliable. Disponível em:<https://www.bluetooth.com/blog/2-ways-bluetooth-technology-makes-wireless-connections-reliable/?utm_campaign=reliability&utm_source=internal&utm_medium=blog&utm_content=how-bluetooth-technology-uses-adaptive-frequency-hopping-to-overcome-pa>. Acesso em: 11 mar. 2023.

SIG, B. Bluetooth total shipments. Disponível em:<<https://www.bluetooth.com/2022-market-update/>>. Acesso em: 11 jun. 2023.

SIG, B. Bluetooth Mesh Intro. Disponível em:<https://www.bluetooth.com/blog/an-intro-to-bluetooth-mesh-part2/?utm_campaign=mesh&utm_source=internal&utm_medium=blog&utm_content=an-intro-to-bluetooth-mesh-part-1>. Acesso em: 16 fev. 2023.

SIG, B. Bluetooth overview. Disponível em:<<https://www.bluetooth.com/learn-about-bluetooth/tech-overview/>>. Acesso em: 14 fev 2023.

SIG, B. Bluetooth Mesh Profile v1.0. Disponível em:<https://www.bluetooth.org/docman/handlers/downloaddoc.ashx?doc_id=429633>. Acesso em: 16 fev 2023.

SILABS. Bluetooth 5, Refined for the IoT. Disponível em:<<https://www.silabs.com/documents/referenced/white-papers/bluetooth-5-refined-for-the-IoT.pdf>>. Acesso em: 04 mar. 2023.

SILABS. BRD4158A User Manual. Disponível em:<<https://www.silabs.com/documents/public/reference-manuals/brd4158a-rm.pdf>>. Acesso em: 18 nov. 2023.

SILABS. Adaptive Frequency Hopping. Disponível

em:<<https://docs.silabs.com/bluetooth/latest/general/system-and-performance/adaptive-frequency-hopping>>. Acesso em: 02 mar. 2023.

SILABS. Throughput with Bluetooth Low Energy Technology. Disponível

em:<<https://docs.silabs.com/bluetooth/latest/general/system-and-performance/throughput-with-bluetooth-low-energy-technology>>. Acesso em: 02 mar. 2023.

SODHRO, A. H. *et al.* Link Optimization in Software Defined IoV Driven Autonomous Transportation System. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, [S.l.], 2020.

SOLARWINDS. What are Network Performance Metrics? Disponível

em:<<https://www.solarwinds.com/resources/it-glossary/network-metrics>>. Acesso em: 20 abr. 2023.

STATISTA. Number of Internet of Things (IoT) connected devices worldwide from 2019 to 2021, with forecasts from 2022 to 2030. Disponível

em:<<https://www.statista.com/statistics/1183457/iot-connected-devices-worldwide/>>. Acesso em: 11 abr. 2023.

SULLIVAN, L. Confidence Intervals. Disponível em:<https://sphweb.bumc.bu.edu/otlt/mph-modules/bs/bs704_confidence_intervals/bs704_confidence_intervals_print.html>.

Acesso em: 18 abr. 2023.

VUCHIC, V. R. Urban public transportation systems. University of Pennsylvania, Philadelphia, PA, USA, [S.l.], v. 5, p. 2532–2558, 2002.

WU, W. et al. A Survey of Intrusion Detection for In-Vehicle Networks. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, [S.l.], 2019.

YANG, S.-H. Wireless Sensor Networks. 1. ed. Loughborough, UK: Springer London, 2014.

YIN, J. et al. A survey on Bluetooth 5.0 and mesh: new milestones of iot. ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN), [S.l.], v. 15, n. 3, p. 1–29, 2019.