



UNIVERSIDADE  
ESTADUAL DE LONDRINA

---

GUILHERME HENRIQUE GONÇALVES SILVA

**ESTUDO DE PADRÕES DE COMUNICAÇÃO EM WBANS:  
UMA ANÁLISE COMPARATIVA DAS TÉCNICAS DE  
ESCALONAMENTO DE FILAS EM DISPOSITIVOS  
BLUETOOTH LOW ENERGY**

---

LONDRINA

2023

GUILHERME HENRIQUE GONÇALVES SILVA

**ESTUDO DE PADRÕES DE COMUNICAÇÃO EM WBANS:  
UMA ANÁLISE COMPARATIVA DAS TÉCNICAS DE  
ESCALONAMENTO DE FILAS EM DISPOSITIVOS  
BLUETOOTH LOW ENERGY**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Bacharelado em Ciência da Computação da Universidade Estadual de Londrina para obtenção do título de Bacharel em Ciência da Computação.

Orientador: Prof. Dr. Elieser Botelho Manhas Jr

LONDRINA  
2023

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

Silva, Guilherme Henrique Gonçalves.

Estudo de padrões de comunicação em WBANs: uma análise comparativa das técnicas de escalonamento de filas em dispositivos Bluetooth Low Energy / Guilherme Henrique Gonçalves Silva. - Londrina, 2023.  
74 f. : il.

Orientador: Elieser Botelho Manhas Jr.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciência da Computação) - Universidade Estadual de Londrina, Centro de Ciências Exatas, Graduação em Ciência da Computação, 2023.

Inclui bibliografia.

1. Redes sem fio de área corporal - TCC. 2. Bluetooth Low Energy - TCC. 3. Escalonamento de filas - TCC. 4. Perda de pacotes - TCC. I. Botelho Manhas Jr, Elieser. II. Universidade Estadual de Londrina. Centro de Ciências Exatas. Graduação em Ciência da Computação. III. Título.

CDU 519

GUILHERME HENRIQUE GONÇALVES SILVA

**ESTUDO DE PADRÕES DE COMUNICAÇÃO EM WBANS:  
UMA ANÁLISE COMPARATIVA DAS TÉCNICAS DE  
ESCALONAMENTO DE FILAS EM DISPOSITIVOS  
BLUETOOTH LOW ENERGY**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Bacharelado em Ciência da Computação da Universidade Estadual de Londrina para obtenção do título de Bacharel em Ciência da Computação.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Orientador: Prof. Dr. Elieser Botelho  
Manhas Jr  
Universidade Estadual de Londrina

---

Prof. Dr. Mario Lemes Proença Jr  
Universidade Estadual de Londrina

---

Ms. Daniel Matheus Brandão Lent  
Universidade Estadual de Londrina

Londrina, 21 de junho de 2023.

*Eu dedico esta obra a todas as pessoas que  
me forneceram encorajamento e apoio,  
estimulando-me a perseverar  
incansavelmente em busca da realização  
desta conquista.*

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha sincera gratidão ao meu orientador, Professor Doutor Elieser Botelho Manhas Jr, por ter me permitido adentrar no vasto mundo das redes sem fio, além de ter disponibilizado seu incrível conhecimento e experiência para me orientar na melhor direção durante o desenvolvimento deste trabalho.

Também sou grato aos excelentes professores do departamento de computação da Universidade Estadual de Londrina, que forneceram a base necessária para minha formação acadêmica e me ajudaram a chegar até aqui. Agradeço também à universidade, que proporcionou um ambiente acadêmico estimulante e contribuiu significativamente para o meu desenvolvimento pessoal e profissional.

Além disso, gostaria de expressar minha gratidão aos meus amigos Claudio Neto, Felipe Barusso, Gabriel Sabaudó e Vinícius Cesar por sempre me apoiarem, especialmente nos momentos mais desafiadores, proporcionando o alívio necessário para prosseguir em minha trajetória.

Por fim, não posso deixar de expressar minha gratidão à minha família, que sempre me apoiou e tornou tudo possível.

*“Aprenda com ontem, viva para hoje, tenha  
esperança para amanhã.”  
(Albert Einstein)*

SILVA, G. H. G.. **Estudo de padrões de comunicação em WBANs: uma análise comparativa das técnicas de escalonamento de filas em dispositivos Bluetooth Low Energy**. 2023. 74f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Ciência da Computação) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2023.

## RESUMO

O interesse em *Wireless Body Area Networks* (WBANs) tem apresentado um aumento significativo nas últimas décadas, motivado pela popularização de tecnologias que utilizam transmissão de dados sem fio e pela consequente implementação da rede de área corporal sem fio em pesquisas e indústrias. Diante disso, este estudo tem como objetivo aprofundar os padrões de comunicação utilizados em redes de sensores corporais, tais como IEEE 802.15.4, IEEE 802.15.6 e *Bluetooth Low Energy*, através da análise de suas características técnicas, aplicações, vantagens e desafios. Ademais, o estudo compara diferentes técnicas de escalonamento de filas em dispositivos WBAN que adotam *Bluetooth Low Energy* como padrão de comunicação, por meio de simulações com um simulador de redes de computadores, utilizando a perda de pacotes como métrica de desempenho.

**Palavras-chave:** *Bluetooth Low Energy*. Escalonamento de filas. IEEE 802.15.4. IEEE 802.15.6. Perda de pacotes. Simuladores.



SILVA, G. H. G.. **Study of communication patterns in WBANs: a comparative analysis of queue scheduling techniques in Bluetooth Low Energy devices.** 2023. 74p. Final Project (Bachelor of Science in Computer Science) – State University of Londrina, Londrina, 2023.

## ABSTRACT

The interest in Wireless Body Area Networks (WBANs) has significantly increased in recent decades, driven by the popularization of wireless data transmission technologies and the consequent implementation of wireless body area networks in research and industry. In light of this, this study aims to deepen the understanding of the communication standards used in body sensor networks, such as IEEE 802.15.4, IEEE 802.15.6, and Bluetooth Low Energy, by analyzing their technical characteristics, applications, advantages, and challenges. Furthermore, the study compares different queue scheduling techniques in WBAN devices that use Bluetooth Low Energy as the communication standard, through simulations using a computer network simulator, with packet loss being the performance metric analyzed.

**Keywords:** Bluetooth Low Energy. IEEE 802.15.4. IEEE 802.15.6. Packet loss. Queue scheduling. Simulation.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Camadas de comunicação das Wbans. . . . .	20
Figura 2 – Bandas disponíveis para WBAN baseadas em tecnologia RF. . . . .	21
Figura 3 – Taxonomia de WBAN. . . . .	24
Figura 4 – Topologia em estrela. . . . .	29
Figura 5 – Topologia em <i>peer-to-peer</i> . . . . .	30
Figura 6 – Topologia das WBANs. . . . .	34
Figura 7 – Formato do pacote MAC. . . . .	36
Figura 8 – Arquitetura BLE. . . . .	40
Figura 9 – Canais BLE. . . . .	42
Figura 10 – Máquina de estados da camada de enlace. . . . .	44
Figura 11 – Pacote de dados BLE. . . . .	45

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Frequências ISM 2,4 GHz nos principais países. . . . .	22
Tabela 2 – Perda de pacotes utilizando o escalonamento de filas <i>First In First Out</i> (FIFO). . . . .	61
Tabela 3 – Perda de pacotes utilizando o escalonamento de filas <i>Fair Queuing</i> (FQ). . . . .	62
Tabela 4 – Perda de pacotes utilizando o escalonamento de filas <i>Deficit Round Robin</i> (DRR). . . . .	64
Tabela 5 – Análise geral da perda de pacotes ao empregar diferentes métodos de escalonamento de filas. . . . .	65

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AES	<i>Advanced Encryption Standard</i>
ALOHA	<i>ALOHA Advocates of Linux Open-source Hawaii Association</i>
ATT	<i>Attribute Protocol</i>
BER	<i>Bit Error Rate</i>
BLE	<i>Bluetooth Low Energy</i>
Bluetooth BR/EDR	<i>Bluetooth Basic Rate/Enhanced Data Rate</i>
Bluetooth SIG	<i>Bluetooth Special Interest Group</i>
CAP	<i>Contention Access Period</i>
CBC-MAC	<i>Cipher Block Chaining Message Authentication Code</i>
CDMA	<i>Code Division Multiple Access</i>
CPU	<i>Central Processing Unit</i>
CRC	<i>Cyclic Redundancy Check</i>
CS	<i>Compressed Sensing</i>
CSMA/CA	<i>Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance</i>
CSRK	<i>Connection Signature Resolving Key</i>
DRR	<i>Deficit Round Robin</i>
EAP	<i>Exclusive Access Phase</i>
ECDH	<i>Elliptic Curve Diffie-Hellman</i>
EFC	<i>Electric Field Communication</i>
FAT	<i>Fair Arrival Time</i>
FCC	<i>Federal Communications Commission</i>
FCS	<i>Frame Check Sequence</i>
FDMA	<i>Frequency Division Multiple Access</i>
FFD	<i>Full Feature Device</i>

FIFO	<i>First In First Out</i>
FM-UWB	<i>Frequency Modulated Ultra Wideband</i>
FQ	<i>Fair Queuing</i>
GAP	<i>Generic Access Profile</i>
GATT	<i>Generic Attribute Profile</i>
HBC	<i>Human Body Communication</i>
HCI	<i>Host Controller Interface</i>
ICNIRP	<i>International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
IR-UWB	<i>Impulse Radio Ultra Wideband</i>
ISM	<i>Industrial, Scientific e Medical</i>
L2CAP	<i>Logical Link Control and Adaptation Layer Protocol</i>
LR-WPAN	<i>Low Rate Wireless Personal Area Network</i>
LTK	<i>Long Term Keys</i>
MAC	<i>Media Access Control</i>
MAP	<i>Managed Access Period</i>
MBAM	<i>Medical Body Area Network</i>
MIC	<i>Message Integrity Code</i>
MICS	<i>Medical Implant Communications Servic</i>
NB	<i>Narrowband</i>
OMS	<i>Organização Mundial da Saúde</i>
PAN	<i>Personal Area Network</i>
PC	<i>Personal Computer</i>
PDU	<i>Protocol Data Unit</i>
PHY	<i>Physical Layer</i>
PPDU	<i>PHY Protocol Data Unit</i>

QoS	<i>Quality of Services</i>
RAM	<i>Random Access Memory</i>
RAP	<i>Random Access Phase</i>
RF	<i>Radio Frequency</i>
RFD	<i>Reduce Feature Device</i>
RWP	<i>Random Waypoint</i>
SAR	<i>Specific Absorption Rate</i>
SM	<i>Security Manager</i>
SMP	<i>Security Manager Protocol</i>
STK	<i>Short Term Key</i>
TDMA	<i>Time Division Multiple Access</i>
UUID	<i>Universally Unique Identifier</i>
UWB	<i>Ultra WideBand</i>
WBAN	<i>Wireless Body Area Network</i>
Wi-Fi	<i>Wireless Fidelity</i>
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i>
WMTS	<i>Wireless Medical Telemetry System</i>
WPANs	<i>Wireless Personal Area Networks</i>
WSN	<i>Wireless Sensor Network</i>

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>16</b>
<b>2</b>	<b>REDES CORPORAIS SEM FIO</b>	<b>19</b>
<b>2.1</b>	<b>Taxonomia de redes corporais sem fio</b>	<b>19</b>
<b>2.2</b>	<b>Requisitos de comunicação</b>	<b>23</b>
<b>2.3</b>	<b>Comunicação em WBANs</b>	<b>27</b>
2.3.1	Padrão IEEE 802.15.4	28
2.3.1.1	Topologias de rede	28
2.3.1.2	Camada física (PHY)	30
2.3.1.3	Camada de acesso ao meio (MAC)	31
2.3.1.4	Segurança	32
2.3.2	Padrão IEEE 802.15.6	33
2.3.2.1	Topologias de rede	33
2.3.2.2	Camada física (PHY)	34
2.3.2.3	Camada de acesso ao meio (MAC)	35
2.3.2.4	Segurança	36
2.3.3	<i>Bluetooth Low Energy</i>	37
2.3.3.1	Topologias de rede	39
2.3.3.2	Arquitetura do BLE	39
2.3.3.3	Pacotes de dados	45
2.3.3.4	Segurança	46
2.3.3.5	Perda de pacotes	48
<b>3</b>	<b>PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS</b>	<b>50</b>
<b>3.1</b>	<b>Escalonamento de filas</b>	<b>50</b>
3.1.1	Escalonamento de filas <i>First In First Out</i> (FIFO)	51
3.1.2	Escalonamento de filas <i>Fair Queuing</i> (FQ)	51
3.1.3	Escalonamento de filas <i>Deficit Round Robin</i> (DRR)	53
<b>3.2</b>	<b>Simulação BLE</b>	<b>54</b>
3.2.1	Simulação de BLE utilizando o NS-3	55
<b>3.3</b>	<b>Modelo simulado</b>	<b>56</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E ANÁLISE DAS SIMULAÇÕES</b>	<b>60</b>
<b>4.1</b>	<b>Escalonamento de filas <i>First In First Out</i> (FIFO)</b>	<b>60</b>
<b>4.2</b>	<b>Escalonamento de filas <i>Fair Queuing</i> (FQ)</b>	<b>61</b>
<b>4.3</b>	<b>Escalonamento de filas <i>Deficit Round Robin</i> (DRR)</b>	<b>63</b>

4.4	Análise dos resultados . . . . .	64
5	CONCLUSÃO . . . . .	68
	REFERÊNCIAS . . . . .	70



# 1 INTRODUÇÃO

As Redes Corporais Sem Fio (*Wireless Body Area Networks*), também conhecidas como WBANs, são redes que abrangem a utilização de uma série de dispositivos de pequeno porte com características distintas, tais como baixo consumo de energia, dimensões reduzidas e capacidade de comunicação sem fio em proximidade do corpo humano. Esses dispositivos podem ser colocados em diferentes locais do corpo humano, incluindo internamente, externamente ou em suas proximidades. Geralmente, esses dispositivos são compostos por sensores e atuadores que possibilitam o monitoramento de funções corporais e características do ambiente circundante [1].

As WBANs foram desenvolvidas com a finalidade de atender às demandas do setor de saúde, proporcionando aplicações inovadoras que possam monitorar o estado fisiológico dos pacientes de maneira eficiente e econômica. Com o envelhecimento da população mundial e o aumento dos gastos com saúde, surge a necessidade de abordar questões médicas de forma preventiva, e a tecnologia WBAN pode ser uma solução para esse desafio. A possibilidade de monitorar frequência cardíaca, pressão arterial e eletrocardiogramas do corpo humano por meio de dispositivos com baixo custo torna essa tecnologia altamente atraente para o setor da saúde. No entanto, as WBANs também podem ser aplicadas em outras áreas, como entretenimento, esportes, jogos, aplicações militares e música, ampliando o potencial de uso dessa tecnologia em diversos setores da sociedade [1].

Os avanços tecnológicos nas redes de computadores e na criação de *software* têm permitido a construção de sensores com diversas funcionalidades, que operam em rede. Entre esses dispositivos, alguns podem ser vestíveis, como relógios, sapatos ou sensores corporais, enquanto outros podem ser implantáveis, comumente utilizados para fins médicos. Esses dispositivos inteligentes são capazes de se conectar ao corpo humano e fornecer informações úteis para monitorar diversas funções corporais [2].

Na área empresarial, o monitoramento remoto por meio de dispositivos embarcados é capaz de aumentar a eficiência, economizando tempo e, conseqüentemente, reduzindo gastos. Por meio dessa tecnologia, é possível dispensar a necessidade de um profissional dedicado exclusivamente à vigilância em tempo integral. Entre suas funcionalidades, destaca-se a capacidade de emitir alertas a qualquer hora do dia, contendo informações relevantes, como alertas de intrusão ou desligamento de equipamentos críticos [3].

As aplicações emergentes, tais como as redes corporais sem fio, enfrentam desafios técnicos significativos. A construção de um sistema flexível que possa ser adaptado às demandas da aplicação em termos de atraso, vazão, tempo de vida da rede e consumo de energia é uma dessas dificuldades. Além dos desafios técnicos, existem preocupações sociais

que precisam ser consideradas. A facilidade de uso, segurança e privacidade dos dados, interoperabilidade, custo, segurança física e bem-estar são algumas dessas preocupações importantes [1].

Existem diversos padrões de comunicação utilizados como referência para a implementação de WBANs, tais como o IEEE 802.15.4, o IEEE 802.15.6 e o *Bluetooth Low Energy*. Esses padrões são responsáveis por definir as especificações técnicas necessárias para garantir o funcionamento adequado das redes, como a largura de banda, o alcance, a segurança e a eficiência energética dos dispositivos [4].

Algumas das principais considerações envolvidas na criação de uma WBAN são relacionadas ao impacto do dispositivo sem fio no corpo humano, a duração da bateria do dispositivo e a coexistência com outras tecnologias sem fio. A presença do corpo humano pode afetar a propagação do sinal, gerando um canal de comunicação específico que deve ser levado em conta no desenvolvimento dos protocolos de comunicação. Como a maioria das WBANs é implantada na banda ISM (*Industrial, Scientific and Medical*) de 2,4 GHz, é necessário considerar também o uso simultâneo do canal por outras tecnologias de comunicação sem fio, a fim de evitar falhas decorrentes de colisões e ruídos [1].

Com o avanço tecnológico, o protocolo de comunicação *Bluetooth Low Energy*, também conhecido como BLE, tem sido amplamente empregado em dispositivos WBAN [5]. Contudo, o gerenciamento eficiente desses dispositivos é um desafio significativo, dado que possuem recursos limitados e a comunicação sem fio apresenta variáveis que podem afetar o desempenho da rede. Nesse sentido, técnicas de escalonamento de filas podem ser utilizadas para otimizar o desempenho dessas redes e garantir a qualidade de serviço necessária.

O objetivo principal deste trabalho é realizar um estudo aprofundado sobre os padrões de comunicação utilizados como referência para a implementação de WBANs, incluindo o IEEE 802.15.4, o IEEE 802.15.6 e o *Bluetooth Low Energy*. Serão abordadas as características técnicas de cada padrão, bem como suas aplicações, vantagens e desafios para a comunicação em redes de sensores corporais.

Além disso, outro propósito desta pesquisa é comparar o desempenho de diversas técnicas de escalonamento de filas em dispositivos WBAN que empregam a tecnologia *Bluetooth Low Energy* como padrão de comunicação. Foram conduzidas simulações das técnicas de escalonamento de filas distintas em um ambiente controlado, empregando um simulador de redes de computadores. As técnicas de escalonamento de filas avaliadas foram as seguintes: *First In First Out* (FIFO), *Fair Queuing* (FQ) e *Deficit Round Robin* (DRR). A perda de pacotes foi a métrica de desempenho analisada.

O restante deste trabalho está organizado da seguinte maneira: o Capítulo 2 aborda os aspectos relativos às redes corporais sem fio, destacando as WBANs, os padrões IEEE

802.15.4, IEEE 802.15.6 e BLE, bem como apresenta questões de segurança, topologias de rede, camadas física e de acesso e perda de pacotes. O Capítulo 3, por sua vez, apresenta os procedimentos metodológicos adotados, os quais se encontram subdivididos em seções que enfocam aspectos específicos, como o escalonamento de filas, o uso de simuladores e a construção do ambiente de simulação. O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos por meio da utilização de diferentes técnicas de escalonamento de filas em dispositivos WBAN que empregam os padrões de comunicação BLE, além da análise dos dados alcançados. Já o Capítulo 5 é dedicado à conclusão do trabalho, englobando a síntese dos principais pontos e conclusões, bem como sugestões para trabalhos futuros.

## 2 REDES CORPORAIS SEM FIO

Na sociedade contemporânea, a comunicação sem fio é amplamente empregada para o intercâmbio de informações em qualquer lugar e a qualquer hora. As redes sem fio, tais como WLAN (*Wireless Local Area Network*) ou Wi-Fi (*Wireless Fidelity*), são utilizadas em diversas áreas, incluindo a educação, saúde e setor industrial. Com o progresso tecnológico, aumentam as exigências dos usuários por redes abrangentes e onipresentes. A WBAN possibilita a mobilidade do usuário sem a limitação de cabos para o compartilhamento de informações.

As WBANs são compostas por diversos dispositivos heterogêneos que se comunicam por meio de uma rede sem fio nas proximidades do corpo humano. Esses dispositivos apresentam potencial para se comunicar com aplicativos em sistemas vestíveis para monitoramento da saúde humana [6]. Os tipos de dispositivos WBAN são [1]:

- (a) Os nós sensores sem fio são dispositivos que respondem a estímulos físicos, coletam dados, processam e reportam essas informações utilizando comunicação sem fio;
- (b) Os nós atuadores sem fio são dispositivos que executam ações com base nos dados recebidos de nós controladores, que podem ser comandos externos ou interações do usuário;
- (c) Os nós controladores são responsáveis por agregar as informações coletadas pelos nós sensores e enviar comandos aos nós atuadores. Eles desempenham um papel importante na coordenação das operações da rede e no gerenciamento dos recursos de comunicação sem fio.

### 2.1 Taxonomia de redes corporais sem fio

A comunicação das WBANs pode ser classificada em três classes diferentes [1]:

- (a) A classe 1 de comunicação das WBANs refere-se à comunicação intra-WBAN, ou seja, a comunicação entre os dispositivos que compõem a rede;
- (b) A classe 2 de comunicação entre WBANs refere-se à comunicação entre dispositivos de diferentes WBANs através de seus respectivos dispositivos pessoais;
- (c) A classe 3 refere-se à comunicação entre dispositivos pessoais e redes externas, como Wi-Fi e celular, que vão além da WBAN.

A representação gráfica apresentada na figura 1 exemplifica as diferentes categorias de comunicação presentes em um sistema fundamentado em componentes. Os dispositivos, por sua vez, encontram-se distribuídos ao longo de todo o organismo humano, compondo uma topologia de rede centralizada. Convém ressaltar que a localização precisa de cada dispositivo é determinada conforme o aplicativo em questão [7].

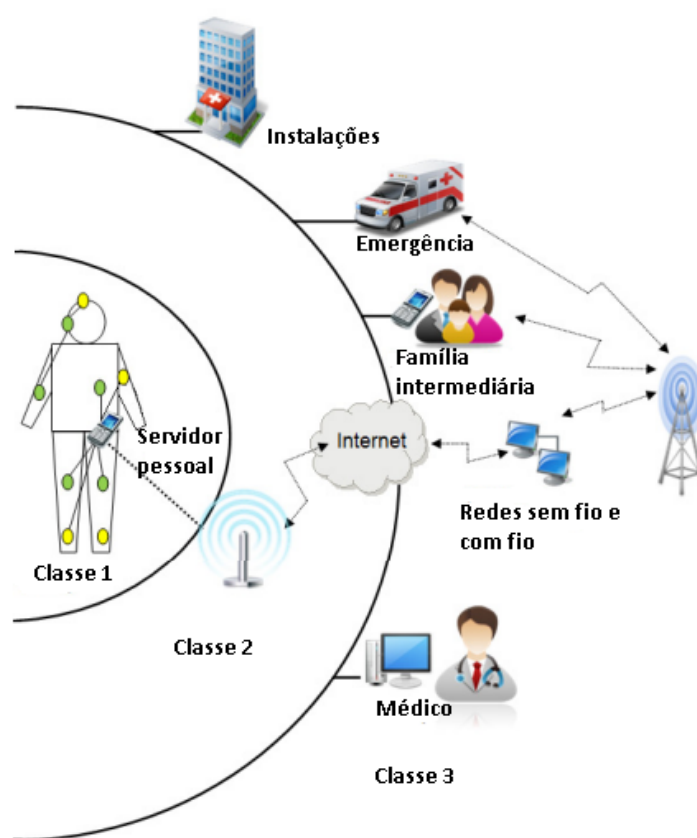


Figura 1 – Camadas de comunicação das Wbans. Fonte: adaptada de [7].

Além da classificação tripartite das comunicações em WBANs, há uma possibilidade de categorização com base na tecnologia de comunicação sem fio utilizada. A literatura especializada evidencia que a maioria das WBANs emprega técnicas RF (*Radio Frequency*), entretanto, outras tecnologias como HBC (*Human Body Communication*), comunicações moleculares e ondas ultrassônicas também são utilizadas.

A vasta maioria das pesquisas disponíveis na literatura aborda as WBANs que se fundamentam em técnicas de RF, podendo ser agrupadas conforme a faixa de frequência na qual operam.

Os órgãos reguladores de comunicações em âmbito global são responsáveis pela gestão do espectro de frequências, contudo, para o projetista de uma WBAN, a tarefa de selecionar a banda mais adequada para a aplicação em questão pode ser desafiadora. Com o objetivo de auxiliar nesse processo, o IEEE 802.15 *Task Group 6* emitiu um relatório

que apresenta uma síntese dos regulamentos de frequência para aplicações médicas em diversas localidades ao redor do mundo [8]. A figura 2 esquematiza as diferentes bandas de frequência.

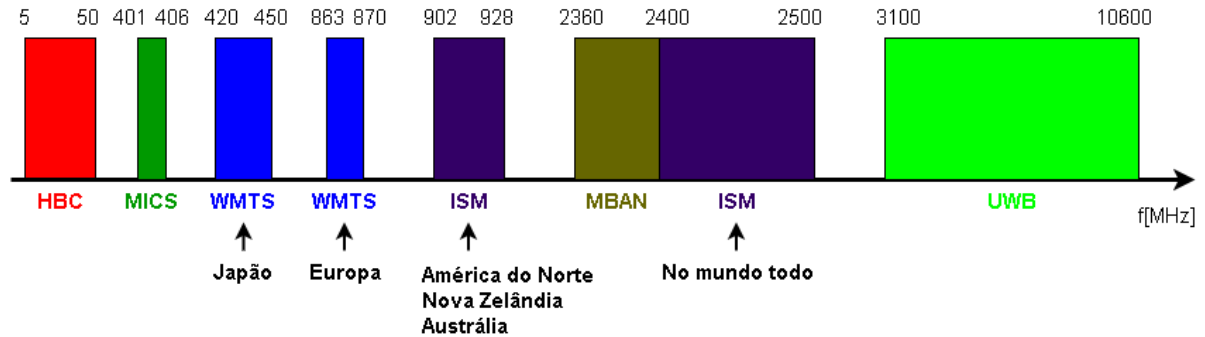


Figura 2 – Bandas disponíveis para WBAN baseadas em tecnologia RF. Fonte: adaptada de [4].

A maioria das tecnologias empregadas em WBANs operam dentro da banda denominada Industrial, Científica e Médica (ISM - *Industrial Scientific and Medical*) [9]. As faixas de frequência dentro da banda ISM são de uso não licenciado, o que permite o desenvolvimento de tecnologias sem a necessidade de solicitação de permissão de uso. Ademais, a regulamentação dessa banda prevê a adoção de normas para limitação de potência de transmissão e técnicas de modulação, visando garantir a convivência harmônica entre diferentes dispositivos que utilizam essas frequências.

Os serviços de radiocomunicação que utilizam as faixas de frequência dentro da banda ISM devem estar preparados para aceitar a interferência que possa ser gerada por outros dispositivos que operem na mesma faixa. A confiabilidade das comunicações de dados nessas circunstâncias não pode ser garantida através de técnicas simples, uma vez que não há restrições quanto ao número de transmissores, nem protocolos definidos para coexistência harmoniosa entre diferentes dispositivos. Na banda ISM, os dispositivos devem compartilhar o espaço com outros serviços, e a presença de outras fontes potenciais de interferência pode ser inevitável.

O espectro de frequência de 2,4 GHz é de grande importância para as telecomunicações, pois nele operam diversas tecnologias de comunicação empregadas em diversos dispositivos utilizados no cotidiano, como por exemplo, *Bluetooth* e Wi-Fi. As bandas ISM dentro dessa faixa podem ser utilizadas sem a necessidade de licenciamento e estão sujeitas a um conjunto de regras de operação relativamente simplificadas. As únicas restrições para o uso dessas frequências estão relacionadas à potência máxima de transmissão e, naturalmente, com a largura de banda, que deve ser mantida dentro de determinados limites estabelecidos.

A faixa de frequência entre 2,4 e 2,5 GHz é frequentemente preferida entre as

outras devido à sua disponibilidade mundial. Entretanto, em outros países, há variações quanto às frequências utilizadas, conforme apresentado na tabela 1 para a utilização da faixa de 2,4 GHz nos principais países.

Tabela 1 – Frequências ISM 2,4 GHz nos principais países. Fonte: de [9].

<b>TERRITÓRIO</b>	<b>FREQUÊNCIA (GHz)</b>	<b>BW (MHz)</b>
Espanha	2,445 - 2,475	30
França	2,4465 - 2,4835	37
Resto da Europa	2,400 - 2483.5	83,5
Japão	2,471 - 2,497	26
EUA	2,400 - 2,4835	83,5
Canadá	2,400 - 2,4835	83,5
Brasil	2,400 - 2,4835	83,5

A fim de evitar problemas de interferência ocasionados pela coexistência com outras redes sem fio, a *Federal Communications Commission* (FCC), um órgão regulador norte-americano da área de telecomunicações e radiodifusão, designou uma faixa de 40 MHz alocada em uma faixa de 2,36 GHz a 2,4 GHz exclusivamente para aplicações médicas, denominada Rede de Área Corporal Médica (MBAN - *Medical Body Area Network*) [10]. Esta foi uma maneira eficaz de mitigar a interferência experimentada por dispositivos que trabalham na banda não licenciada ISM adjacente.

Existem outras tecnologias de RFs alocadas para aplicativos WBAN. O Serviço de Comunicações de Implantes Médicos, conhecido como MICS (*Medical Implant Communications Service*), e o Sistema de Telemetria Médica Sem Fio (WMTS - *Wireless Medical Telemetry System*), foram especialmente designados para uso médico dentro do corpo e implantados para aplicações que requerem comunicação simples ponto a ponto. Estes foram introduzidos para superar as limitações de alcance, taxa de transmissão de dados e confiabilidade impostas pela tecnologia de acoplamento magnético, a qual foi utilizada no início da medicina de dispositivos sem fio.

No âmbito da faixa de frequência MICS, é possível atingir uma taxa de transmissão de dados de até 400 kbps e um alcance de comunicação de aproximadamente 2 metros para atender aos requisitos de aplicações como marcapassos cardíacos, desfibriladores implantados e neuroestimuladores [11].

Aplicações como a cápsula endoscópica, que é ingerida pelo paciente, podem demandar uma taxa de transmissão de dados da ordem de 1 Mbps, a qual pode ser alcançada na faixa de frequência WMTS.

A Banda Ultralarga, também conhecida como UWB (*Ultra WideBand*), é um padrão de rede de área pessoal sem fio (WPANs - *Wireless Personal Area Networks*), que oferece uma taxa de dados de alta velocidade e uma largura de banda de 500 MHz, juntamente com restrições de densidade espectral de até 41,25 dBm/MHz. Esse valor é

aproximadamente 30 dB abaixo do limite máximo permitido para um sinal na banda ISM de 2,4-2,5 GHz. Ademais, os receptores convencionais possuem uma sensibilidade 30 dB maior do que os receptores UWB, o que oferece proteção adicional contra interferência de outros dispositivos WBAN convencionais. Os receptores UWB não teriam sensibilidade suficiente para reconhecer os sinais emitidos por outros sensores. A baixa suscetibilidade a interferência de múltiplos caminhos também torna a tecnologia UWB uma excelente escolha para comunicação WBAN [12]. Outra característica que faz da tecnologia UWB uma boa candidata para comunicação WBAN é a sua capacidade de proporcionar comunicação intrinsecamente segura. Isso é possível graças à baixa energia e densidade espectral da tecnologia, que estão abaixo do nível de ruído dos receptores convencionais, bem como à simplicidade da arquitetura do transceptor.

Uma nova tecnologia, conhecida como Comunicação do Corpo Humano (HBC - *Human Body Communication*), tem como característica o uso do corpo humano como meio de comunicação. Essa tecnologia é viável devido à propagação do sinal através do acoplamento capacitivo do corpo humano com o ambiente circundante, bem como do acoplamento galvânico obtido quando uma corrente alternada percorre o corpo humano [13].

A tecnologia HBC apresenta vantagens quando comparada à tecnologia UWB, uma vez que consome menor quantidade de energia e oferece uma taxa de *bits* de 10 Mbps. Além disso, a coexistência de redes HBC é facilmente alcançável, uma vez que o sinal é limitado ao corpo humano. Um benefício significativo que a tecnologia HBC pode trazer para uma WBAN é a segurança intrínseca. Isso ocorre porque os sinais estão confinados à proximidade das pessoas e o recebimento de dados requer contato corporal [13].

No que diz respeito às WBANs implantáveis, também conhecidas como *in-body*, as comunicações moleculares e ultrassônicas são consideradas alternativas promissoras às soluções de RF. A primeira refere-se ao uso de moléculas como mensagens transmitidas entre um transmissor e um receptor usando nanotecnologia, enquanto a segunda é baseada no uso de ultrassom, ou seja, ondas acústicas em frequências não audíveis. No entanto, dado que o foco deste trabalho é principalmente em WBANs de RF, não serão abordados muitos detalhes relacionados às WBANs *in-body*.

A classificação de WBANs de acordo com a tecnologia de comunicação encontra-se resumida na figura 3.

## 2.2 Requisitos de comunicação

O desenvolvimento de uma WBAN é uma tarefa desafiadora devido à ampla gama de requisitos impostos pelas aplicações. Os principais requisitos são recomendados pelo IEEE TG6 [14], como mostrado a seguir.



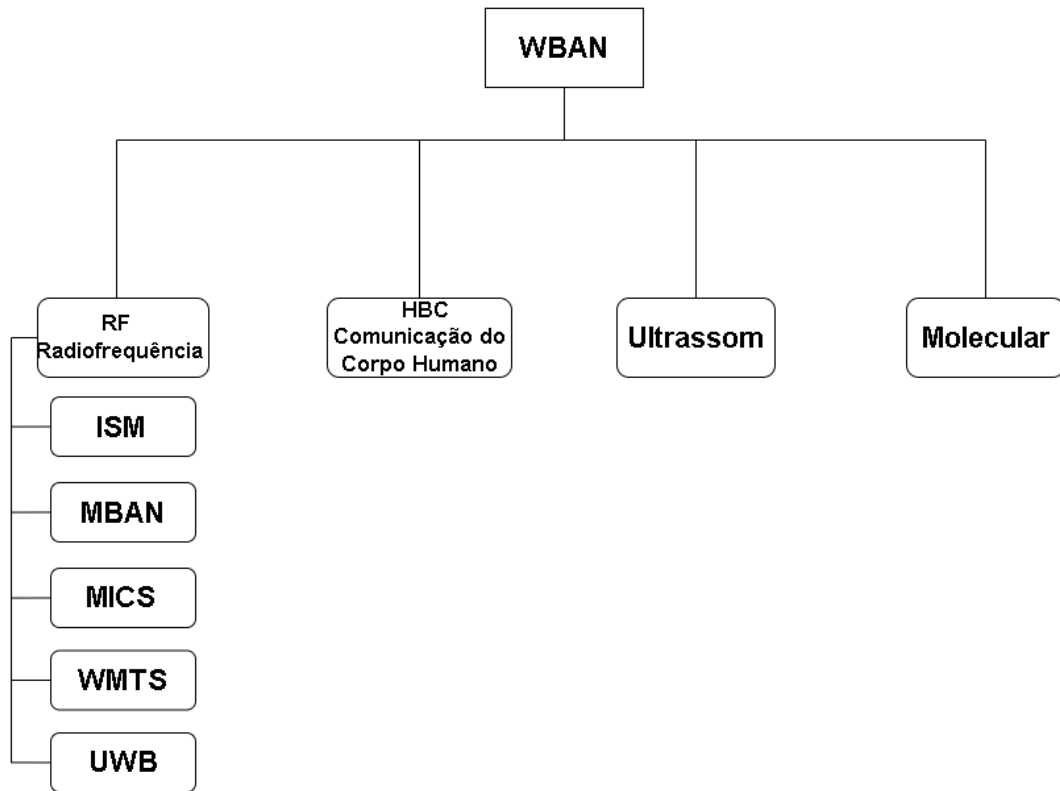


Figura 3 – Taxonomia de WBAN. Fonte: adaptada de [4].

- (a) Taxa de *bits* e qualidade de serviço: o requisito de taxa de *bits* varia em uma ampla faixa, dependendo da aplicação e do tipo de dados a serem transmitidos, indo de menos de 1 kbps (por exemplo, monitoramento de temperatura) a 10 Mbps (por exemplo, transmissão de vídeo). A taxa de *bits* pode conter um único *link* ou vários *links*, quando vários dispositivos transmitem/recebem informações de/para um coordenador ao mesmo tempo, por exemplo, eletrocardiograma de múltiplas derivações [4]. No caso de vários dispositivos, mecanismos para Qualidade de Serviço (QoS - *Quality of Service*) devem garantir a priorização do tráfego. As camadas física e de acesso ao meio oferecem métodos para correção de erros e prevenção de interferência, a fim de reduzir a Taxa de Erros de Bit (BER - *Bit Error Rate*). Outros parâmetros de transmissão importantes são a latência e o *jitter*. Também é esperado que a WBAN forneça uma resposta rápida e confiável em situações de emergência [1];
- (b) Alcance e topologia: A distância ótima entre os dispositivos WBAN é influenciada por vários fatores, incluindo o tipo de dispositivo, a tecnologia de comunicação utilizada, o ambiente de implantação e outras condições relevantes. Em termos gerais, uma distância média de aproximadamente 6 metros é considerada aceitável entre

os dispositivos de uma WBAN. Além disso, a topologia em estrela simples é a configuração de topologia mais comum para as WBANs. Devido ao fato de o corpo humano representar um obstáculo natural à propagação de RF, especialmente no caso de sensores implantados, é necessário o estabelecimento de uma comunicação *multi-hop* e a implementação de uma técnica de transmissão que possa explorar a diversidade espacial do nó. Cada WBAN contém vários sensores, que podem variar, por exemplo, de 2 a 10 nós e podem mudar em tempo de execução [4]. Portanto, é essencial que a WBAN implemente procedimentos confiáveis de associação e dissociação, permitindo que um novo nó seja adicionado ou removido de um grupo de nós preexistente, conforme exigido pelo usuário [1];

- (c) **Segurança:** a garantia da segurança dos dados é um requisito fundamental para as WBANs empregadas em aplicações médicas e militares. A segurança é abordada em termos de privacidade, confidencialidade, métodos de autorização e integridade de dados [1]. Contudo, os mecanismos convencionais de criptografia de dados ou a autenticação não são completamente adequados para este tipo de redes devido às restrições de recursos, como limitações de poder de processamento, memória e energia dos nós WBAN. Conseqüentemente, novos métodos leves e eficientes em termos de recursos estão sendo desenvolvidos. Uma solução promissora neste contexto é o uso de mecanismos baseados em identificação biométrica. Antes que qualquer comunicação seja estabelecida entre os dispositivos, é possível realizar a autenticação dos usuários por meio de suas características biométricas. Tal procedimento assegura que apenas usuários autorizados tenham acesso aos dados e recursos da rede [4];
- (d) **Antena e canal de rádio:** as diminutas dimensões dos nós WBAN implicam em um projeto de antena altamente eficiente [1]. Além disso, a presença do corpo humano não pode ser negligenciada, uma vez que afeta a radiação da antena e suas características de polarização, dependendo da posição específica do dispositivo no corpo. Portanto, é essencial realizar uma caracterização adequada do canal de rádio para projetar uma antena que seja capaz de fornecer as propriedades de radiação necessárias [4];
- (e) **Consumo de energia:** os dispositivos WBAN são alimentados por bateria e seu consumo de energia varia dependendo da aplicação. É desejável que a vida útil da bateria seja prolongada, especialmente para dispositivos implantados. Para alcançar esse objetivo, são utilizados transceptores de RF de baixa potência e os dispositivos WBAN são colocados no modo de espera sempre que não estiverem em uso [1]. Além disso, existem estudos que investigam o uso de calor [15] e movimento corporal [16] como fonte de suprimento de energia;
- (f) **Coexistência:** a maioria das redes de dispositivos WBAN é projetada para operar

na banda ISM, que é comumente utilizada por dispositivos sem fio. Os principais padrões de transmissão sem fio que operam nessa faixa de frequência incluem o IEEE 802.11 (Wi-Fi) [17], IEEE 802.15.1 (*Bluetooth*) e IEEE 802.15.4 (*ZigBee*). No entanto, quando várias redes sem fio operam na mesma faixa de frequência, a interferência entre elas pode aumentar a perda de pacotes e diminuir o desempenho das WBANs. Em muitos aplicativos WBAN, como aplicações médicas, a confiabilidade é extremamente importante, especialmente em situações de emergência ou tráfego de alarme, e, portanto, técnicas para evitar ou reduzir a interferência devem ser estudadas e implementadas [4]. Algumas soluções são tratadas na camada física para mitigar efeitos prejudiciais [18];

- (g) Projeto do *hardware*: há importantes limitações de tamanho para dispositivos WBAN, cuja característica crítica é incorporar, de forma eficiente, tanto a antena quanto a bateria em um dispositivo minúsculo. Especialmente para dispositivos implantáveis, é crucial oferecer radiação de antena adequada e uma vida útil prolongada da bateria. Alguns nós WBAN são projetados para serem acoplados a uma peça de roupa flexível e confortável para o usuário, especialmente durante atividades esportivas ou campanhas militares. [1];
- (h) Processamento de sinais: o consumo de energia pode representar o requisito mais restritivo para dispositivos WBAN. No entanto, técnicas de processamento de sinal eficientes em termos energéticos podem auxiliar o projetista a controlar o consumo de energia associado à aquisição e análise dos sinais biológicos [1]. Uma técnica conhecida como Sensoriamento Comprimido (CS - *Compressed Sensing*) permite a amostragem de sinais a uma taxa *sub-Nyquist*, economizando energia sem perda de informação [19]. Essa técnica é utilizada em diversos cenários de WBANs, como por exemplo eletroencefalograma, eletrocardiograma e eletromiograma [20];
- (i) Segurança para o corpo humano: a emissão e deslocamento de energia na forma de partículas ou ondas eletromagnéticas caracteriza a radiação. A radiação eletromagnética engloba desde ondas de rádio até ondas gama. A radiação ionizante, que possui uma frequência mais alta do que a radiação não ionizante, pode representar uma ameaça à saúde humana, podendo causar queimaduras, câncer e danos genéticos, dependendo dos níveis de exposição [1]. A maior parte das radiações não ionizantes, como a energia de rádio e micro-ondas, é considerada prejudicial à saúde humana somente quando associada a uma determinada quantidade de energia térmica. A energia das partículas de radiação não ionizante é baixa e, ao invés de produzir íons alterados ao passar pela matéria, é suficiente apenas para alterar a configuração de valência vibracional ou eletrônica de moléculas e átomos, produzindo efeitos térmicos [1]. Órgãos governamentais e não governamentais estabelecem limites à exposição a radiofrequência ou campos eletromagnéticos em geral. A Comissão Internacional de

Proteção contra Radiação Não-Ionizante (ICNIRP) recomenda algumas restrições de tempo de exposição do corpo humano a campos eletromagnéticos não ionizantes [4]. As limitações referentes à exposição humana aos campos eletromagnéticos são comumente estabelecidas em relação à Taxa de Absorção Específica, conhecida como SAR (*Specific Absorption Rate*), que representa a quantidade de energia eletromagnética absorvida por um tecido corporal específico. Embora a SAR estimada para o corpo humano como um todo pelos dispositivos WBAN seja insignificante, é necessário prestar atenção à SAR local, ou seja, a SAR medida em uma parte específica do corpo humano exposta aos campos eletromagnéticos. A SAR local é influenciada pela condutividade elétrica e densidade do tecido exposto [21]. Portanto, é importante que os dispositivos WBAN minimizem a SAR local e cumpram as normas e regulamentos internacionais e regionais, como os limites de exposição estabelecidos pela Comissão Internacional de Proteção contra Radiação Não-Ionizante (ICNIRP), que são seguidos pela Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL). A Organização Mundial da Saúde (OMS) é responsável por definir tais limites de exposição [1].

## 2.3 Comunicação em WBANs

A comunicação interna ou próxima ao corpo humano representa um desafio significativo no desenvolvimento de protocolos para WBANs que sejam adaptáveis, dinâmicos e flexíveis. Consequentemente, a alta confiabilidade, baixo atraso, baixo consumo de energia, baixa interferência eletromagnética no corpo humano e comunicação efetiva tornam-se requisitos de extrema importância para o sucesso das WBANs [22].

Os objetivos mais comuns em uma WBAN, normalmente abordados por meio de um protocolo da camada Controle de Acesso ao Meio (MAC - *Media Access Control*), consistem em maximizar a taxa de transferência, definida como a quantidade de *bits* que podem ser transmitidos pela rede em um determinado período de tempo, minimizar o atraso, que é o tempo necessário para um pacote atravessar a rede desde a origem até o destino, passando pelos roteadores e *links* intermediários, e maximizar o tempo de vida da rede, controlando as principais fontes de desperdício de energia, como a colisão de pacotes, através da escuta inativa do canal (*overhearing*) e redução da sobrecarga de controle (*overhead*) [23]. Esta seção apresenta uma visão geral de alguns dos principais protocolos propostos para o cenário das WBANs. Consequentemente, a seleção desses três padrões proporcionará uma análise abrangente e diversificada das múltiplas considerações técnicas e de design essenciais para a implementação efetiva de WBANs. Essas considerações abrangem áreas como consumo de energia, alcance, segurança e outros tópicos relevantes.

### 2.3.1 Padrão IEEE 802.15.4

O padrão IEEE 802.15.4 tem sido objeto de extensas pesquisas nos últimos anos. A tecnologia sem fio IEEE 802.15.4 é um sistema de comunicação de curto alcance, de até 100 metros, que se destina a permitir a implementação de aplicações com requisitos específicos de taxa de transferência e latência em redes pessoais sem fio (WPANs). Esses requisitos variam de acordo com a aplicação, mas podem incluir baixo consumo de energia, baixa latência de comunicação, segurança robusta e confiabilidade de transmissão de dados. Entre as principais razões para selecionar o IEEE 802.15.4 para uma WBAN estão sua baixa complexidade, baixo custo, baixo consumo de energia e transmissões de baixa taxa de *bits*, que podem ser suportadas por dispositivos móveis ou fixos de baixo custo [4]. No entanto, como o IEEE 802.15.4 opera em uma banda não licenciada, problemas de conectividade em tempo real e corrupção de dados são inevitáveis. Além disso, o protocolo não apresenta um mecanismo de qualidade de serviço (QoS), que é um recurso fundamental em um cenário WBAN. As topologias de rede suportadas pelo padrão são estrela e *peer-to-peer* [1].

De acordo com o padrão IEEE 802.15.4, existem dois tipos distintos de dispositivos que podem ser utilizados em uma rede sem fio, a saber, o Dispositivo de Função Completa (FFD - *Full Feature Device*) e o Dispositivo de Função Reduzida (RFD - *Reduce Feature Device*) [24].

O dispositivo FFD é capaz de atuar como um coordenador de Rede de Área Pessoal (PAN - *Personal Area Network*) ou um coordenador roteador, possibilitando o acesso a todos os dispositivos dentro do seu alcance de transmissão. Por outro lado, um dispositivo RFD não possui essa capacidade e é destinado a aplicações simples, como um interruptor de luz ou um sensor de infravermelho passivo, que não requerem o envio de grandes quantidades de dados e se associa a apenas um único FFD por vez. Como resultado, o RFD pode ser implementado com recursos e capacidade de memória mínimos [24].

A principal área de aplicação da tecnologia é a implementação de Redes de Sensores Sem Fio (WSN - *Wireless Sensor Network*). O padrão IEEE 802.15.4 define todas as especificações de comunicação da Camada Física (PHY - *Physical Layer*) e da camada de Controle de Acesso ao Meio (MAC - *Media Access Control*) para redes de comunicação sem fio que operam com baixas taxas de transmissão de dados, também conhecidas como Redes de Área Pessoal Sem Fio de Baixa Taxa (LR-WPAN - *Low Rate Wireless Personal Area Network*) [24].

#### 2.3.1.1 Topologias de rede

A configuração da topologia de rede da norma IEEE 802.15.4 requer a presença de três tipos de dispositivos: o PAN Coordenador, o Coordenador e o *End Device*. O PAN

Coordenador é responsável pela criação da rede sem fio, enquanto o Coordenador roteia as informações e os *End Devices* executam tarefas simples e reduzidas [24].

De acordo com as necessidades dos aplicativos, uma rede IEEE 802.15.4 LR-WPAN pode operar em duas topologias distintas: a topologia em estrela ou a topologia *peer-to-peer* [24].

Na topologia em estrela, a comunicação ocorre entre dispositivos e um único controlador central, conhecido como coordenador PAN. Cada dispositivo geralmente possui uma aplicação associada e atua como ponto de início ou fim das comunicações da rede. O coordenador PAN, por sua vez, pode ter uma aplicação específica, mas é utilizado para iniciar, finalizar ou rotear as comunicações pela rede. O coordenador PAN é o controlador principal da rede PAN e todos os dispositivos que operam nessa topologia possuem endereços exclusivos, denominados endereços estendidos, utilizados para a comunicação direta dentro da PAN [24]. A topologia em estrela é caracterizada por um nó central que se conecta a todos os dispositivos, conforme ilustrado na figura 4.

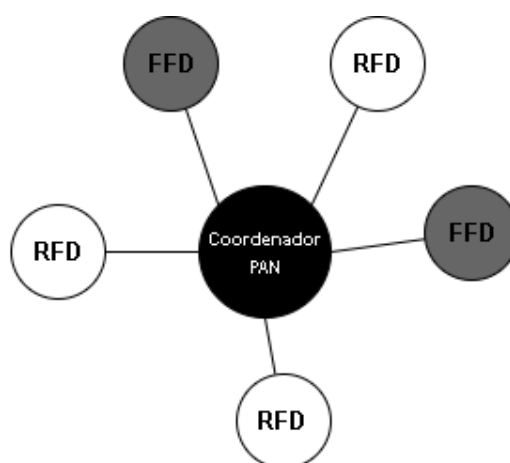


Figura 4 – Topologia em estrela. Fonte: adaptada de [24].

O Coordenador PAN será alimentado, com frequência, por meio da rede elétrica, ao passo que os dispositivos a ele vinculados, provavelmente, serão alimentados por baterias. Dentre as aplicações que se beneficiam de uma topologia em estrela, destacam-se a automação residencial, os periféricos de Computadores Pessoais (PC - *Personal Computer*), os jogos eletrônicos e os cuidados de saúde pessoais [24].

A topologia *peer-to-peer* também dispõe de um coordenador PAN, entretanto, diverge da topologia em estrela, pois qualquer dispositivo pode se comunicar com qualquer outro dispositivo, desde que estejam dentro do alcance um do outro e cumpram as funções designadas a cada dispositivo, conforme indicado na figura 5. A topologia *peer-to-peer* possibilita a criação de redes mais complexas, tais como a topologia de rede de malha [24].

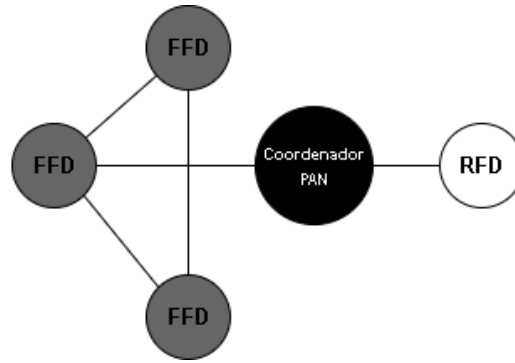


Figura 5 – Topologia *peer-to-peer*. Fonte: adaptada de [24].

A topologia de rede em questão é benéfica para aplicações como controle e monitoramento industrial, redes de sensores sem fio, rastreamento de ativos e inventário, agricultura inteligente e segurança [24].

### 2.3.1.2 Camada física (PHY)

A camada física (PHY) tem como objetivo realizar a transmissão e recepção de dados, também conhecidos como PPDU (*Physical Protocol Data Unit*) do meio externo e prepará-los para serem enviados à camada MAC. Em uma rede, a Unidade de Dados de Protocolo (PDU - *Protocol Data Unit*) é a unidade básica de intercâmbio entre entidades que se comunicam por meio de um protocolo de rede definido. Na camada física, são empregadas técnicas de modulação de sinal para transmitir e modular o canal. O PHY é capaz de operar em três bandas de frequências não licenciadas, definidas nas bandas ISM [24].

Dentre as principais características desta camada, destacam-se [24]:

- (a) Transmissão e recepção de dados digitais;
- (b) Seleção do canal a ser utilizado;
- (c) Possibilidade de endereçamento automático dos dispositivos;
- (d) Ativação e desativação do transceptor de rádio.

Com relação às bandas de frequências, o padrão IEEE 802.15.4 especifica três bandas de frequências que se encontram subdivididas em 27 canais *half-duplex*. O modo de transmissão *half-duplex* envolve a transmissão em sentido duplo, porém não simultânea. Assim, com este tipo de ligação, cada extremidade da ligação emite por sua vez [4].

Dos 27 canais mencionados, a distribuição desses canais está subdividida da seguinte forma [24]:

- (a) A banda de 868 MHz, com apenas um canal para a banda de frequência da Europa, com taxa de *bits* de 20 kbps;
- (b) A banda de 915 MHz, onde estão disponíveis dez canais para a banda de frequência dos Estados Unidos/Américas, com taxa de *bits* de 40 kbps;
- (c) A banda de 2,45 GHz, com dezesseis canais para a banda de frequência da maioria dos países, incluindo Brasil, com taxa de *bits* igual a 250 kbps.

É importante ressaltar a disponibilidade da banda de frequência de 2,4 GHz para a utilização em redes sem fio. Essa banda é amplamente empregada devido à sua disponibilidade global para uso sem licença, baixa latência, alta taxa de dados e disponibilidade de mais canais. No entanto, as outras duas bandas (868 e 915 MHz) oferecem menor índice de interferência e menor quantidade de usuários, o que resulta em maior cobertura [24].

### 2.3.1.3 Camada de acesso ao meio (MAC)

A camada MAC tem como principal função controlar o acesso à camada física para a transmissão e recepção de dados. Além disso, essa camada é responsável por estabelecer a conexão entre a camada física e as camadas superiores do protocolo LR-WPAN, bem como gerar e sincronizar *beacons*. Os *beacons* são pacotes de controle que delimitam pacotes utilizados pelo coordenador para sincronizar com os demais dispositivos da rede [24].

Na camada MAC, o IEEE 802.15.4 estabelece dois modos operacionais distintos: o modo ativado por *beacon* (*beacon-enabled*) e o modo não ativado por *beacon* (*non beacon-enabled*), que se referem a dois mecanismos diferentes de acesso ao canal [4].

O modo *beacon-enabled* é um mecanismo de acesso ao canal utilizado na camada MAC que emprega uma estrutura de dados especial denominada de *superframe* para sincronizar as transmissões de dados. É utilizado em redes que necessitam de largura de banda dedicada e baixas latências. O coordenador da PAN transmite *beacons* regularmente. No entanto, a transmissão e recepção desses *beacons* aumenta a demanda de potência nos dispositivos da rede, o que pode sobrecarregar suas baterias e diminuir sua vida útil [4].

No modo *non beacon-enabled*, os *beacons* são desabilitados. Nesse modo, os dispositivos se comunicam de forma assíncrona, permanecendo continuamente em modo de recebimento (*receive mode*), aguardando transmissões de outros nós. Em uma rede *non beacon-enabled*, os *beacons* não são transmitidos regularmente pelo coordenador, embora ainda sejam necessários para associar um dispositivo a um coordenador. Em vez disso, as comunicações são assíncronas, um dispositivo se comunica com o coordenador somente quando necessário, o que pode ser relativamente pouco frequente. Isso permite uma maior conservação de energia do dispositivo [4].



No contexto das transmissões, os nós em uma rede competem pelo canal utilizando o protocolo CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*). A sigla CSMA/CA se refere ao Múltiplo Acesso por Detecção de Portadora, sendo que o mecanismo CA é responsável por evitar a ocorrência de colisões de pacotes, impedindo que todos os nós iniciem a transmissão simultaneamente. O protocolo funciona da seguinte maneira: quando um nó deseja realizar uma transmissão, ele envia um sinal de aviso por tempo suficiente para que todos os componentes da rede possam recebê-lo. Somente após esse sinal de aviso, os dados são transmitidos. Se durante uma transmissão for detectado um sinal de aviso, o emissor interrompe o envio da mensagem e reinicia a tentativa de transmissão após um período aleatório [24].

O objetivo do padrão é estabelecer um formato de base que permita a adição de outros protocolos e recursos por meio das camadas superiores. Diversos protocolos utilizam a camada MAC do padrão 802.15.4, sendo o *ZigBee* o mais conhecido dentre eles, embora haja muitos outros [25].

#### 2.3.1.4 Segurança

Os dispositivos que utilizam o protocolo IEEE 802.15.4 apresentam limitações em termos de capacidade de computação, armazenamento e disponibilidade de energia, além de terem baixo custo. Não é seguro assumir que esses dispositivos possuem uma base de computação confiável. As comunicações também não podem depender da disponibilidade de uma infraestrutura fixa e podem envolver relações de curto prazo entre dispositivos que nunca se comunicaram antes. Essas limitações impõem restrições significativas na escolha de algoritmos e protocolos criptográficos, bem como na arquitetura de segurança dos dispositivos. O estabelecimento e a manutenção de relações de confiança entre dispositivos devem ser abordados com cuidado. Além disso, as restrições de duração da bateria e de custo impõem limitações na sobrecarga de segurança que essas redes podem tolerar, algo que é menos preocupante em redes de maior largura de banda. Tais limitações devem ser levadas em consideração no projeto de sistemas que utilizam esses dispositivos, para garantir que a segurança não seja comprometida [25].

O mecanismo criptográfico presente neste padrão é baseado na utilização de criptografia de chave simétrica, onde as chaves são fornecidas por processos de camada superior. O estabelecimento e a manutenção dessas chaves não estão incluídos no escopo deste padrão. É assumido que a implementação das operações criptográficas seja segura, bem como o armazenamento seguro e autêntico do material de chaveamento [25].

O mecanismo criptográfico disponibiliza combinações específicas dos seguintes serviços de segurança [25]:

- (a) Confidencialidade dos dados: garante que as informações transmitidas só sejam di-

vulgadas para as partes a quem se destinam;

- (b) Autenticidade dos dados: garante a fonte das informações transmitidas (e, por conseguinte, que as informações não foram modificadas durante a transmissão);
- (c) Proteção de repetição: verifica se as informações duplicadas são detectadas.

### 2.3.2 Padrão IEEE 802.15.6

O padrão IEEE 802.15.6 foi criado para permitir a comunicação sem fio de curto alcance, incluindo dentro do corpo humano (embora não se limite apenas a seres humanos). O alcance da transmissão é limitado a 3 metros para aplicações *in-body* e deve ser de pelo menos 3 metros para aplicações *body-to-body* [4]. Para isso, esta norma utiliza bandas de radiofrequência científicas, industriais e médicas (ISM), bem como faixas de frequência aprovadas por associações médicas e autoridades regulatórias locais [26].

O padrão requer suporte para qualidade de serviço (QoS), transmissão de baixa potência, taxas de transmissão de dados de até 10 Mbps e conformidade com as diretrizes de não interferência [1].

#### 2.3.2.1 Topologias de rede

A rede é constituída por nós e concentradores (*hubs*) organizados em conjuntos lógicos conhecidos como WBAN. Os nós são coordenados pelos seus respectivos *hubs* para acesso ao meio e gestão de energia. Em uma WBAN, há um *hub* e vários nós, compreendendo uma topologia em estrela de um salto [1], como ilustrado na figura 6a.

Um nó que possui a funcionalidade de retransmissão pode ser empregado com o intuito de ampliar a topologia de uma rede em estrela para uma topologia de dois saltos, conforme exemplificado na figura 6b. No contexto dessa ampliação, é essencial que a troca de pacotes se processe de forma direta entre os nós e o *hub* da WBAN, ou, eventualmente, mediante utilização do referido nó dotado de capacidade de retransmissão.

Todos os nós e *hubs* adotam o modelo de referência IEEE 802, que tem por objetivo prover as especificações requeridas para uma camada física (PHY) e para uma subcamada de controle de acesso ao meio (MAC).

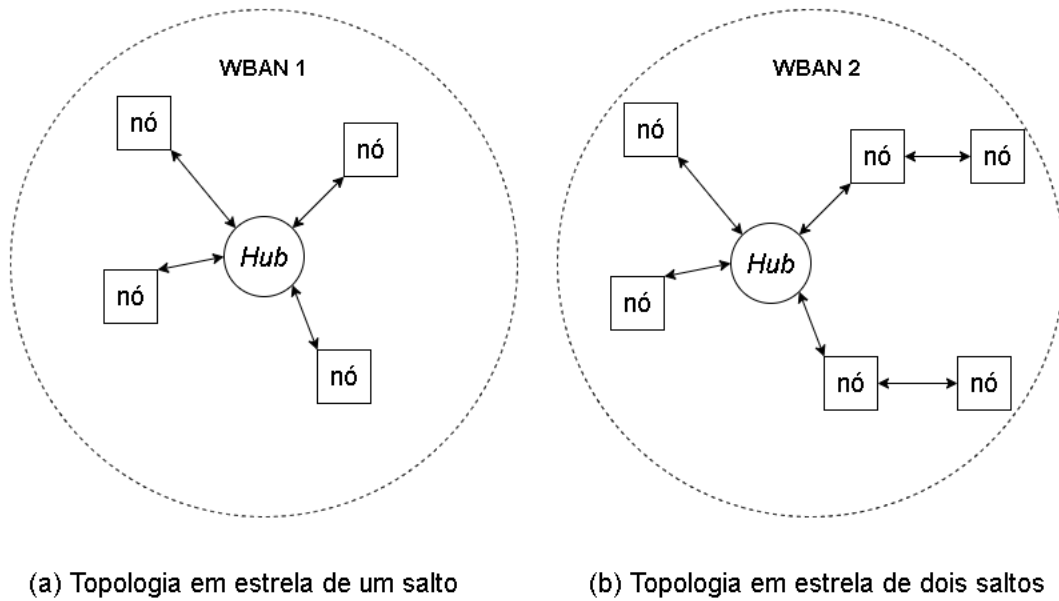


Figura 6 – Topologia das WBANs. Fonte: adaptado de [26].

### 2.3.2.2 Camada física (PHY)

Em virtude da vasta variedade de aplicações potenciais, IEEE 802.15.6 especificou três camadas físicas distintas: Banda Estreita (NB - *Narrowband*), Banda Ultralarga (UWB - *Ultra WideBand*) e Comunicação do Corpo Humano (HBC - *Human Body Communication*).

- (a) PHY de banda estreita (NB): para que um dispositivo seja considerado compatível, é necessário que esteja apto a realizar transmissões e recepções em, pelo menos, uma das faixas de frequência opcionais definidas pelo padrão IEEE 802.15.6. Tais faixas são: 402-405 MHz, 420-450 MHz, 863-870 MHz, 902-928 MHz, 950-958 MHz, 2360-2400 MHz e 2400-2483,5 MHz [4]. Destaca-se que a última faixa mencionada opera na banda de espectro ISM e é de grande interesse devido à sua disponibilidade mundial. Entretanto, é importante ressaltar que pode haver problemas de coexistência com outros padrões que também trabalhem na mesma banda, como é o caso dos padrões IEEE 802.15.4 e IEEE 802.11 (Wi-Fi) [4];
- (b) PHY de banda ultralarga (UWB): o sistema de comunicação PHY de banda ultralarga (UWB) é uma tecnologia que oferece alta largura de banda, dividida em banda baixa (3,25-4,75 GHz) e banda alta (6,6-10,25 GHz), cada uma subdividida em canais operacionais de largura de banda de 500 MHz. Essa tecnologia foi projetada especificamente para oferecer desempenho robusto para as Redes de Área Corporal (BANs) e fornecer uma ampla gama de oportunidades de implementação de alto

desempenho, robustez, baixa complexidade, operação em baixa potência e energia ultra baixa. O UWB é atraente por oferecer níveis seguros de energia para o corpo humano, com os níveis de potência do sinal na ordem daqueles usados na banda do Serviço de Comunicação de Implante Médico (MICS). Além disso, a baixa interferência em outros dispositivos também torna essa tecnologia bastante interessante [1]. O padrão UWB utiliza duas tecnologias: Banda Ultralarga de Rádio de Impulso (IR-UWB - *Impulse Radio Ultra-Wideband*) e Banda Ultralarga de Modulação de Frequência (FM-UWB - *Frequency Modulated Ultra-Wideband*) [4];

- (c) PHY de comunicação no corpo humano (HBC): utiliza a tecnologia de Comunicação de Campo Elétrico (EFC - *Electric Field Communication*), que faz uso do corpo humano como meio de comunicação. A banda de operação é centrada em 21 MHz, com uma largura de banda de 5,25 MHz [4]. Espera-se que essa tecnologia tenha uma ampla gama de aplicações, tais como controle de entrada de salas, segurança de escritório, assistência médica, logística, serviços pessoais avançados e entretenimento. No âmbito da segurança de escritório, por exemplo, um usuário poderia especificar o documento que deseja imprimir simplesmente tocando nele. Essa tecnologia possui grande potencial para melhorar a eficiência e a praticidade das atividades diárias e oferece um meio de comunicação seguro e confiável [1].

### 2.3.2.3 Camada de acesso ao meio (MAC)

Foi estabelecido no âmbito do padrão IEEE 802.15.6 um protocolo MAC especializado para WBANs, cuja finalidade é operar tanto no corpo humano como ao seu redor. O referido protocolo é detalhado na sequência.

Conforme o estabelecido no padrão IEEE 802.15.16, um pacote MAC é composto por um cabeçalho MAC de tamanho fixo, um corpo de pacote MAC de comprimento variável e um campo de Sequência de Verificação de Quadro (FCS - *Frame Check Sequence*) de comprimento fixo, como pode ser visualizado na figura 7. O cabeçalho MAC contém informações de controle do pacote, tais como a versão do protocolo, política de reconhecimento, nível de segurança e retransmissão, além de informar os endereços MAC do remetente e do destinatário, bem como o identificador da rede de área corporal (BAN). O corpo do pacote MAC é constituído por dois campos opcionais para fins de segurança, a saber: o número de sequência de segurança de baixa ordem e o Código de Integridade de Mensagem (MIC - *Message Integrity Code*), juntamente com a carga útil. Por fim, o campo FCS utiliza um algoritmo de cálculo de Verificação Cíclica de Redundância (CRC - *Cyclic Redundancy Check*) de 16 bits, visando a detecção de erro [26].

Com o objetivo de viabilizar distintas aplicações e modalidades de fluxos de dados, quais sejam, contínuos, periódicos, não periódicos e em rajada, cada qual com requisitos de desempenho particulares, o protocolo MAC deve ser o mais flexível possível, combinando

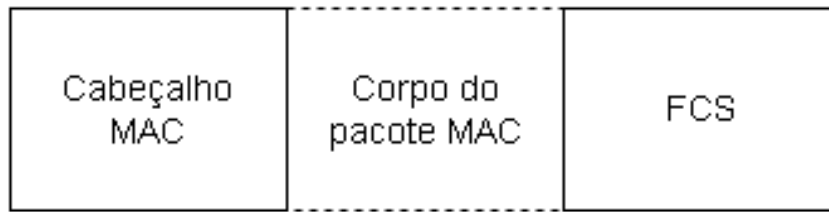


Figura 7 – Formato do pacote MAC. Fonte: adaptado de [26].

tanto técnicas de acesso baseado em contenção quanto aquelas que são livres de contenção [27].

Há três modos de operação distintos em relação a diferentes estratégias de acesso, os quais um coordenador BAN pode selecionar a fim de operar, são eles: o modo *beacon* com períodos de *beacon* (*superframes*), o modo sem *beacon* com *superframes* e o modo sem *beacon* sem *superframes* [4].

Modo *beacon* com períodos de *beacon* (*superframes*): um coordenador estabelece uma base de tempo comum, mediante o envio de pacotes *beacon* que definem o início de um período *beacon* ativo. Ademais, o coordenador deve dividir cada *superframe* ativo nas fases de acesso aplicáveis, quais sejam: Fase de Acesso Exclusivo (EAP - *Exclusive Access Phase*), a qual é usada apenas para a transmissão de dados de emergência, Fase de Acesso Aleatório (RAP - *Random Access Phase*), Fase de Acesso de Contenção (CAP - *Contention Access Period*) e Fase de Acesso Gerenciado (MAP - *Managed Access Period*). No decorrer dos intervalos de alocação de EAP, RAP e CAP, um nó tem a capacidade de obter e dar início a transações de pacotes, usando o acesso aleatório baseado nos protocolos ALOHA ou CSMA/CA. No MAP, por sua vez, o coordenador deve organizar os intervalos de alocação e agendar as transmissões.

Modo sem *beacon* com *superframes*: um coordenador pode ter apenas um período de acesso MAP em qualquer *superframe*, e pode organizar o acesso ao meio como explicado para a fase MAP no modo *beacon* com períodos de *beacon* (*superframes*).

Modo sem *beacon* sem *superframes*: um coordenador pode disponibilizar intervalo de alocação não programado. Quando o próximo intercâmbio de pacotes ocorrer em modo sem *beacon* sem *superframes*, um nó deve tratar qualquer intervalo de tempo como uma porção de EAP1 ou RAP1 e empregam acesso aleatório baseado em CSMA/CA para obter uma alocação com contenção.

#### 2.3.2.4 Segurança

A ampla variedade de técnicas de acesso ao canal apresentadas no padrão proporciona grande flexibilidade ao protocolo, entretanto, a seleção das melhores opções e a

identificação da solução ideal a ser implementada não são tarefas simples para o projetista da rede. Além disso, a norma também aborda aspectos de segurança, permitindo que os nós selecionem entre três diferentes níveis de segurança [4]:

- (a) Nível 0: refere-se a comunicações não seguras e não oferece medidas para autenticidade de mensagens, validação de integridade, confidencialidade e proteção da privacidade;
- (b) Nível 1: inclui autenticação, mas não criptografia. As mensagens são transmitidas com autenticação segura, mas não são criptografadas, fornecendo medidas para autenticação e validação de integridade, mas não confidencialidade e proteção da privacidade;
- (c) Nível 2: oferece autenticação e criptografia, resultando na transmissão mais segura possível conforme definido pela norma.

### 2.3.3 *Bluetooth Low Energy*

O Bluetooth surgiu em 1994, desenvolvido pela empresa sueca Ericsson [28]. A tecnologia sem fio *Bluetooth* é uma rede de área pessoal (PAN) projetada para substituir cabos de conexão entre dispositivos eletrônicos portáteis ou fixos. Essa comunicação de curto alcance é caracterizada por recursos como robustez, baixo consumo de energia e baixo custo [4].

Existem duas configurações primárias de sistemas de tecnologia *Bluetooth*, a saber, o *Bluetooth Clássico (Bluetooth Classic)*, também referido como *Bluetooth BR/EDR (Basic Rate/Enhanced Data Rate)* e o *Bluetooth de Baixa Energia (BLE - Bluetooth Low Energy)*. Ambas as tecnologias são gerenciadas pelo *Bluetooth Special Interest Group (SIG)*. O *Bluetooth SIG* é uma organização responsável pela definição dos padrões *Bluetooth*, bem como pelo licenciamento das tecnologias e marcas registradas *Bluetooth* aos fabricantes [4].

O *Bluetooth Classic* é uma tecnologia de rádio de baixa potência que transmite dados por meio de 79 canais na banda de frequência industrial, científica e médica (ISM) não licenciada de 2,4 GHz, com cada canal espaçado em 1 MHz. Essa tecnologia suporta a comunicação ponto a ponto entre dispositivos e é utilizada principalmente para possibilitar o *streaming* de áudio sem fio. Como resultado, tornou-se o protocolo de rádio padrão para dispositivos como alto-falantes sem fio, fones de ouvido e sistemas de entretenimento automotivo. Além disso, o *Bluetooth Classic* também permite aplicações de transferência de dados [29].

Em 2010, foi lançada a versão *Bluetooth 4.0* com a finalidade de fornecer uma conexão de baixa energia entre dispositivos, tornando-a ideal para dispositivos portáteis.

Além disso, ela é retrocompatível com versões anteriores do *Bluetooth*, o que possibilita que dispositivos mais antigos se conectem com dispositivos *Bluetooth* 4.0. A introdução do BLE permitiu que os fabricantes incluíssem a tecnologia em pequenos dispositivos que operam com bateria, trazendo benefícios tanto para desenvolvedores quanto para consumidores de dispositivos portáteis. Com isso, tornou-se possível o uso eficiente do *Bluetooth* em dispositivos com longa duração de bateria, como sensores e dispositivos vestíveis. Desde a sua primeira versão em 1994, o padrão de tecnologia *Bluetooth* tem evoluído progressivamente ao longo dos anos, transitando pelas versões 1.0, 1.0B, 1.1, 1.2, 2.0+EDR, 2.1+EDR, 3.0+HS, 4.0, 4.1, 4.2, 5.0, 5.1, 5.2, 5.3 e, finalmente, alcançando a mais recente iteração, a versão 5.4, que incorpora melhorias substanciais em termos de alcance, velocidade, segurança, privacidade, bem como recursos avançados de Internet das Coisas (IoT - Internet of Things) e localização [30].

O BLE foi desenvolvido para operar com um consumo de energia muito baixo. Ele transmite dados em mais de 40 canais, com cada canal tendo uma largura de 2 MHz, na banda de frequência ISM não licenciada de 2,4 GHz [4]. O BLE oferece aos desenvolvedores uma grande flexibilidade para criar produtos que atendam aos requisitos exclusivos de conectividade de seu mercado. Ele suporta várias topologias de comunicação, começando do ponto a ponto até a transmissão e, mais recentemente, a malha, permitindo que a tecnologia *Bluetooth* suporte a criação de redes de dispositivos confiáveis e de grande escala. Embora inicialmente conhecido por seus recursos de comunicação de dispositivos, o BLE tem sido amplamente utilizado como uma tecnologia de posicionamento de dispositivos para atender à crescente demanda por serviços de localização interna de alta precisão. O BLE inclui recursos que permitem que um dispositivo determine a presença, distância e direção de outro dispositivo [29].

O BLE inclui recursos projetados para o desenvolvimento de produtos caracterizados por menor consumo de energia, alcance de transmissão de até 30 metros, menor complexidade e custo menor em comparação com o *Bluetooth* BR/EDR, mantendo um alcance de comunicação semelhante ao do *Bluetooth* BR/EDR. É importante destacar que o BLE apresenta uma abordagem diferente daquela do *Bluetooth Classic* e, portanto, não tem a intenção de substituir seu antecessor, mas sim oferecer novas soluções e ampliar sua utilização [31].

A tecnologia BLE é especialmente projetada para dispositivos pequenos e econômicos, que são alimentados por baterias do tipo botão. Esta tecnologia é utilizada em diversos tipos de aplicações, como esportes e *fitness*, cuidados de saúde e tratamento de doenças, automação residencial e entretenimento, bem como no setor automotivo. Entre os dispositivos que podem ser conectados através do BLE, destacam-se os sensores sem fio utilizados em equipamentos esportivos e dispositivos de monitoramento, como velocímetros e medidores de frequência cardíaca. Além disso, o BLE também é utilizado em

balanças de peso, monitores de pressão arterial e medidores de glicose, por exemplo, para o monitoramento da saúde. Na área de automação residencial e entretenimento, o BLE pode ser empregado em controles remotos, sensores e interruptores. Já no setor automotivo, essa tecnologia pode ser utilizada para monitorar a pressão dos pneus, auxiliar no estacionamento e permitir a entrada sem chave. Finalmente, em relógios e outros dispositivos de pulso, o BLE pode ser usado para reproduzir música e controlar telefones celulares, bem como para detectar a proximidade de outros dispositivos [4].

### 2.3.3.1 Topologias de rede

Desde conexões ponto a ponto para a transmissão de áudio entre *smartphones* e alto-falantes, até conexões de transmissão que permitem serviços de orientação em aeroportos e conexões de malha que suportam automação predial em grande escala, o *Bluetooth* oferece suporte a diversas opções de topologia para atender às necessidades únicas de conectividade sem fio de uma população diversificada de desenvolvedores globais [32].

A topologia de rede de ponto a ponto (*point-to-point*) é amplamente utilizada para estabelecer comunicações de dispositivo um para um. No contexto do *Bluetooth*, a topologia ponto a ponto disponível no modo *Basic Rate/Enhanced Data Rate* (BR/EDR) é otimizada para *streaming* de áudio e é altamente indicada para dispositivos sem fio, tais como alto-falantes, fones de ouvido e kits de viva-voz para carros. Por outro lado, a topologia ponto a ponto disponível no modo BLE é otimizada para transferência de dados e é adequada para produtos de dispositivos conectados, como rastreadores de condicionamento físico, monitores de saúde, periféricos e acessórios de PC [32].

A topologia de rede de transmissão do tipo *broadcast* é amplamente utilizada para estabelecer comunicações de dispositivo um para muitos. No contexto do BLE, a topologia de *broadcast* é otimizada para compartilhamento de informações localizadas e é altamente indicada para serviços de localização, como informações de ponto de interesse de varejo, navegação interna e orientação, bem como rastreamento de itens e ativos [32].

A topologia de rede de malha (*mesh*) é amplamente utilizada para estabelecer comunicações de dispositivos muitos para muitos. No contexto do BLE, a topologia de malha permite a criação de redes de dispositivos em grande escala, sendo altamente indicada para sistemas de controle, monitoramento e automação em que dezenas, centenas ou até mesmo milhares de dispositivos precisam se comunicar de maneira confiável e segura entre si [32].

### 2.3.3.2 Arquitetura do BLE

A arquitetura do BLE é frequentemente referida como a pilha de protocolos BLE. Ela descreve as diferentes partes do sistema BLE, seus componentes e como eles interagem para produzir os resultados esperados. A arquitetura do BLE é estruturada em camadas,



conforme ilustrado na figura 8. Essas camadas são compostas pela camada de aplicação, camada do *host* e a camada do controlador. A camada de aplicação constitui a primeira camada na hierarquia da pilha de protocolos. A camada do *host*, por sua vez, ocupa a posição imediatamente inferior à camada de aplicação, enquanto a camada de controlador encontra-se na posição mais baixa da pilha de protocolos [31].

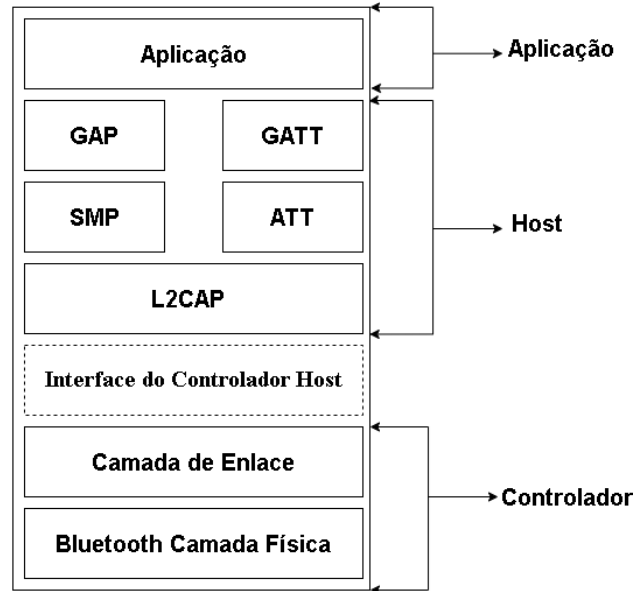


Figura 8 – Arquitetura BLE. Fonte: adaptado de [31].

A camada de aplicação da arquitetura de pilha do BLE é a parte responsável por interagir diretamente com o usuário. Ela contém a interface do usuário, a lógica do aplicativo e a arquitetura geral do aplicativo [33].

A camada do *host* é composta por várias estruturas, descritas a seguir [33]:

- (a) Perfil de Acesso Genérico (GAP - *Generic Access Profile*): é uma das partes fundamentais da arquitetura BLE. Ele descreve como os dispositivos BLE se comunicam entre si, abrangendo tanto dispositivos periféricos ou transmissores quanto pacotes de informações de anúncio e varredura de dispositivo central para dispositivos prontos para conexão;
- (b) Perfil de Atributo Genérico (GATT - *Generic Attribute Profile*): sua função é semelhante à do GAP, descrevendo como os atributos são formatados, empacotados e transferidos entre dispositivos conectados seguindo um conjunto de regras predefinidas. Na comunicação *Bluetooth*, os dispositivos podem operar como cliente ou servidor. O cliente pode enviar requisições ao servidor GATT, que armazena os atributos e os disponibiliza sob solicitação. O cliente pode ler, escrever ou executar ambas as funções no atributo (dados) conforme permitido pelo servidor;

- (c) Protocolo de Atributo (ATT - *Attribute Protocol*): é um conjunto de regras que estabelece a base para o funcionamento do perfil GATT. Ele descreve como os dados são acessados e define as regras cliente-servidor do protocolo GATT, especificando que um dispositivo pode ser cliente, servidor ou ambos. O ATT também define a disposição de dados na forma de atributos, cada um com um identificador de atributo de 16 *bits*, um Identificador Exclusivo Universal (UUID - *Universally Unique Identifier*), um valor e um conjunto de permissões. Além disso, ele define as operações de leitura e escrita que podem ser executadas no atributo armazenado no servidor;
- (d) Protocolo do Gerenciador de Segurança (SMP - *Security Manager Protocol*): é um protocolo crucial na arquitetura BLE que assegura a segurança da comunicação entre dois ou mais dispositivos. Sua principal função é autenticar e verificar o processo de emparelhamento entre dispositivos. Ademais, o SMP tem a capacidade de ocultar o endereço *Bluetooth* de um dispositivo, impedindo rastreamentos prejudiciais. A sua inclusão na arquitetura da pilha de protocolos BLE é fundamental para a segurança e confidencialidade das informações trocadas entre dispositivos;
- (e) Controlador de Enlace Lógico e Protocolo de Adaptação (L2CAP - *Logical Link Control and Adaptation Layer Protocol*): desempenha um papel fundamental na arquitetura BLE. Esse protocolo age como um multiplexador, que permite a conversão de vários protocolos em pacotes BLE padronizados. Além disso, o L2CAP é capaz de fragmentar e reagrupar grandes pacotes de dados, garantindo a entrega eficiente e confiável dos dados entre dispositivos BLE.

Existe um padrão de comunicação de protocolos entre o *host* e o controlador chamado de Interface do Controlador Host (HCI - *Host Controller Interface*), o qual possibilita a interoperabilidade entre *host* e controladores produzidos por distintas empresas. A integração dessas camadas pode ser realizada por meio de um único circuito integrado ou *chip*, ou ainda por meio de múltiplos circuitos integrados interconectados por uma camada de comunicação [31].

A parte física do componente de *hardware* da arquitetura BLE é denominada controlador. Essa parte contém o circuito que decodifica os sinais. O espectro de frequência de 2,4 GHz, utilizado pelo BLE, é composto por um intervalo que vai de 2402 MHz a 2480 MHz, dividido em 40 canais numerados de 0 a 39, cada um com uma largura de banda de 2 MHz [33].

O BLE utiliza dois tipos de canais para comunicação: canais de anúncio (*advertising channels*) e canais de dados (*data channels*). Os canais de anúncio ocupam apenas 3 dos 40 canais disponíveis, permitindo a descoberta de outros dispositivos, estabelecimento de conexão e transmissão de *broadcast*. Os canais de dados são usados para comunicação

bidirecional entre os dispositivos conectados. É importante notar que, diferentemente do *Bluetooth* clássico, que utiliza 32 canais para anúncio, o BLE utiliza apenas 3 canais de anúncio, o que resulta em um tempo de busca mais curto e em menor consumo de energia [34].

Os canais 37, 38 e 39 são exclusivamente designados para a transmissão de pacotes de anúncio, enquanto os demais canais são reservados para a troca de dados durante uma conexão BLE. Durante a fase de anúncio, um dispositivo periférico BLE transmite o mesmo pacote nos três canais de anúncio sequencialmente. Um dispositivo central que esteja realizando a varredura em busca de dispositivos ou *beacons* irá escutar esses canais em busca de pacotes de anúncio, o que permitirá que ele descubra dispositivos próximos [34].

Os canais 37, 38 e 39 (conforme ilustrado em roxo na figura 9) são propositadamente distribuídos ao longo do espectro de 2,4 GHz. Os canais 37 e 39 são os primeiros e últimos da banda, respectivamente, enquanto o canal 38 está localizado no meio. A distribuição estratégica dos canais ajuda a garantir que, caso um único canal de anúncio seja bloqueado, os outros canais ainda estarão disponíveis para transmissão, já que eles possuem uma largura de banda de alguns MHz de separação entre si [34].

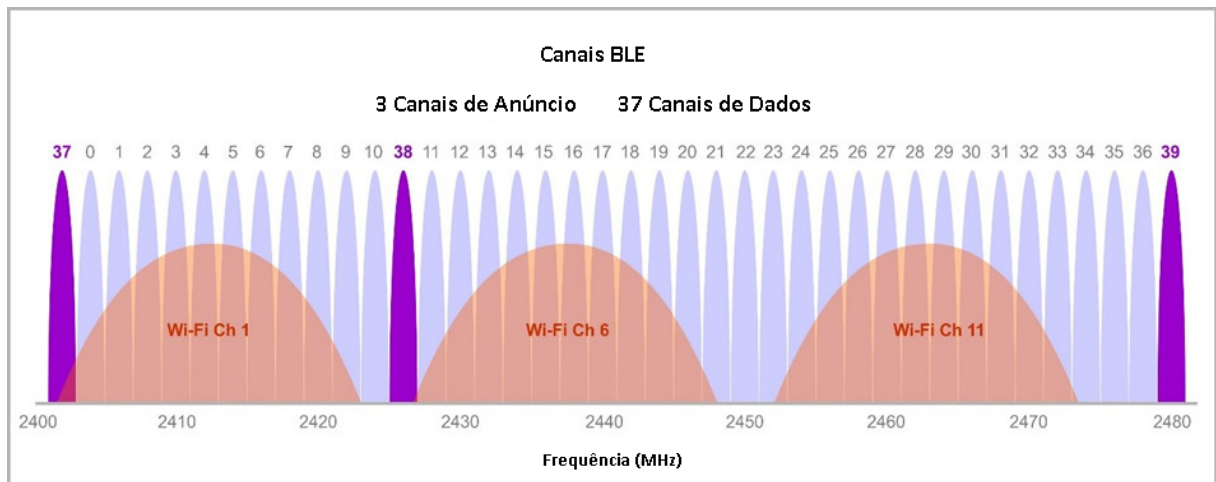


Figura 9 – Canais BLE. Fonte: adaptado de [35].

A maioria dos dispositivos que causam interferência no BLE operam em banda estreita. O canal 38, por sua vez, foi deliberadamente posicionado entre os canais Wi-Fi 1 e 6 para minimizar a interferência do sinal Wi-Fi. A ampla separação dos canais de anúncio contribui para uma melhor gestão da interferência de Wi-Fi, *Bluetooth* clássico, microondas e babás eletrônicas pelo BLE, assegurando assim a eficácia da transmissão dos pacotes de anúncio [34].

O controlador do dispositivo BLE compreende a camada física previamente men-

cionada e a camada de enlace. Esta última camada é encarregada de gerenciar o estado de conexão do dispositivo, o que é realizado por meio de cinco estados distintos [36]:

- (a) Modo de espera (*standby*): nesse estado, o dispositivo não envia nem recebe pacotes, e pode ser acessado a partir de qualquer outro estado;
- (b) Anúncio (*advertising*): nesse estado, o dispositivo se comporta como um anunciante, enviando pacotes através de cada canal de anúncio e respondendo a solicitações de outros dispositivos;
- (c) Varredura (*scanning*): nesse estado, o dispositivo atua como um *scanner*, ouvindo transmissões de pacotes de anúncio e podendo solicitar informações adicionais de outros dispositivos;
- (d) Iniciação (*initiating*): nesse estado, o dispositivo age como um iniciador, com o objetivo de se conectar a um anunciante. Ao encontrar um anunciante, o dispositivo responde solicitando o início de uma conexão;
- (e) Conexão (*connection*): quando a conexão é estabelecida entre o iniciador e o anunciante, ambos entram nesse estado e se comunicam através dos canais de dados.

O modelo de máquina de estados da camada de enlace do BLE é um recurso essencial que descreve as transições possíveis de estados que um dispositivo BLE pode realizar durante a comunicação com outro dispositivo. A existência dessa máquina de estados é de grande importância para o funcionamento adequado do BLE, já que ela possibilita que os dispositivos se comuniquem de maneira eficiente e gerenciem os recursos disponíveis de forma adequada [37].

O conhecimento do modelo de máquina de estados da camada de enlace do BLE é um fator crucial a ser levado em conta durante o processo de projeto de aplicativos e dispositivos que utilizam essa tecnologia. A compreensão desses estados e suas possíveis transições pode contribuir para a otimização do desempenho e para a economia de energia do dispositivo BLE [37]. A máquina de estados da camada de enlace do BLE pode ser visualizada na figura 10.

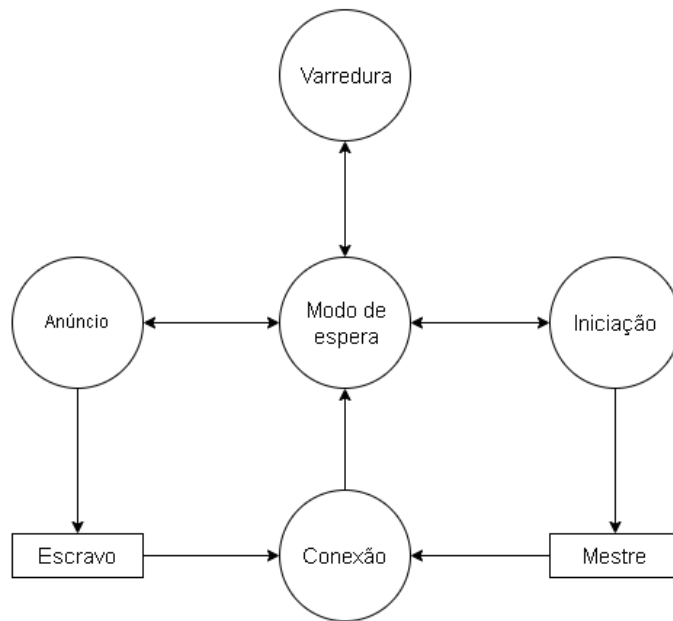


Figura 10 – Máquina de estados da camada de enlace. Fonte: adaptado de [38].

Após a estabelecimento de uma conexão na rede BLE, os dispositivos passam a desempenhar papéis específicos, sendo eles o de mestre (iniciador) ou escravo (anunciante). A arquitetura da rede *Bluetooth* segue o modelo *piconet*, que consiste em uma rede sem fio formada por dispositivos que se comunicam entre si através da tecnologia *Bluetooth* [39].

Dentro do modelo *piconet*, o dispositivo mestre desempenha o papel de iniciar a conexão com os dispositivos escravos, controlando a comunicação entre os dispositivos e gerenciando múltiplas conexões, possibilidade essa viabilizada pelo aumento do tamanho do endereçamento de 3 *bits* no *Bluetooth* clássico para 48 *bits* no BLE, o que permite bilhões de conexões. Em contrapartida, o dispositivo escravo pode se conectar apenas a um dispositivo mestre e permanece sempre pronto para receber dados deste último [40].

Durante a comunicação entre dispositivos BLE, a troca de dados é realizada por meio de pacotes transmitidos entre o dispositivo mestre e o dispositivo escravo. Tais pacotes carregam informações como leituras de sensores ou comandos do usuário entre os dispositivos. Com o intuito de economizar energia, o dispositivo escravo entra em modo de suspensão (*sleep*) por padrão, característica presente em muitos dispositivos e que tem como finalidade reduzir o consumo de energia e o uso de dados [39].

Na rede BLE, o dispositivo mestre é responsável por enviar pacotes utilizando o esquema de Acesso Múltiplo por Divisão de Tempo (TDMA - *Time Division Multiple Access*), que consiste em enviar pacotes em intervalos de tempo predefinidos. Além disso, é responsável por acordar o dispositivo escravo para realizar as transmissões. Esse método

de acesso ao canal compartilhado é utilizado para garantir a integridade da comunicação entre os dispositivos, uma vez que cada dispositivo tem um intervalo de tempo definido para a transmissão de dados, minimizando assim a ocorrência de colisões [40].

Em síntese, a camada de enlace de dados do BLE é responsável por estabelecer e gerenciar as conexões entre os dispositivos, possibilitando a comunicação segura e eficiente entre eles por meio da divisão em mestre e escravo [40].

### 2.3.3.3 Pacotes de dados

O BLE utiliza uma arquitetura de comunicação baseada em pacotes de dados. Cada pacote de dados BLE é composto de uma sequência de *bits* que inclui campos específicos para transmissão de informações. A figura 11 ilustra os principais componentes da construção de um pacote de dados BLE: o Preâmbulo (*Preamble*), o Endereço de Acesso (*Access Address*), a Carga Útil (*Payload*) e o Código de Redundância Cíclica ou CRC (*Cyclic Redundancy Check*) [41] [42].

<b>Preâmbulo</b> 1 Byte	<b>Endereço de Acesso</b> 4 Bytes	<b>Carga Útil</b> 255 Bytes	<b>CRC</b> 3 Bytes
----------------------------	--------------------------------------	--------------------------------	-----------------------

Figura 11 – Pacote de dados BLE. Fonte: adaptado de [43].

O Preâmbulo é uma sequência de *bits* que é transmitida antes dos pacotes de dados no BLE, com a finalidade de sincronizar os dispositivos antes da transmissão e garantir que eles estejam operando na mesma frequência e com o mesmo formato de pacote. Além disso, o Preâmbulo contribui para aumentar a eficiência da transmissão de dados, permitindo que os dispositivos ajustem seus receptores de acordo com o tamanho do pacote que será transmitido. O tamanho do Preâmbulo no BLE é fixo e composto por 1 *byte* (8 *bits*). Ele é formado por uma sequência alternada de *bits* 0 e 1.

O Endereço de Acesso é um endereço de 32 *bits* que segue o Preâmbulo na estrutura do pacote de dados BLE e tem como principal função identificar a conexão entre os dispositivos que estão se comunicando e para garantir que a comunicação ocorra entre os dispositivos corretos, mesmo em ambientes com múltiplos dispositivos BLE transmitindo simultaneamente. O Endereço de Acesso é exclusivo para cada conexão BLE e é gerado aleatoriamente para garantir a segurança da comunicação entre os dispositivos.

A Carga Útil é a seção do pacote de dados BLE que contém as informações transmitidas entre os dispositivos. Sua função principal é permitir a troca de informações relevantes, como dados de sensor, informações de controle ou mensagens de aplicativos. O tamanho da Carga Útil no BLE varia conforme a necessidade da aplicação e pode variar de 0 a 255 *bytes*. Essa limitação é uma característica do protocolo BLE e foi projetada

para garantir a eficiência da transmissão e o consumo mínimo de energia. O tamanho é determinado levando em consideração fatores como a quantidade de dados a serem transmitidos, a frequência de transmissão e a duração da conexão.

Algumas aplicações podem exigir uma Carga Útil maior para transmitir dados mais complexos, como imagens, arquivos de áudio ou vídeo. Outras aplicações, como sensores de temperatura ou umidade, podem exigir uma Carga Útil menor para transmitir apenas um valor numérico simples.

É importante destacar que o tamanho da Carga Útil influencia diretamente na latência e no consumo de energia da comunicação BLE. Quanto maior o tamanho, maior o tempo necessário para transmitir os dados e maior será o consumo de energia. Por outro lado, uma Carga Útil menor pode reduzir a latência e o consumo de energia da comunicação BLE. A carga útil pode ser fragmentada em vários pacotes menores usando o recurso de fragmentação de pacotes BLE para transmitir grandes quantidades de dados em uma rede BLE. No entanto, isso pode afetar o tempo de resposta da rede e o consumo de energia, e é fundamental considerar esses fatores ao utilizar a fragmentação de pacotes.

O CRC (*Cyclic Redundancy Check*) é um campo crucial na estrutura do pacote de dados BLE, responsável pela verificação de integridade dos dados transmitidos. Sua função principal é detectar possíveis erros que possam ter ocorrido durante a transmissão do pacote de dados.

Para calcular o CRC, os dados no cabeçalho do pacote, Endereço de Acesso, a Carga Útil e um valor pré-determinado são combinados. Ao receber um pacote de dados, o dispositivo de destino realiza um cálculo de CRC para verificar se o pacote foi transmitido com sucesso. Se o valor do CRC calculado pelo dispositivo de destino não corresponder ao valor do CRC no pacote recebido, é provável que tenha ocorrido um erro durante a transmissão e o pacote será descartado. O tamanho do campo CRC no BLE é de 24 *bits*.

É importante destacar que o tamanho desse campo é relevante para aumentar a capacidade de detecção de possíveis erros ocorridos durante a transmissão do pacote de dados. Dessa forma, um tamanho maior do campo CRC pode contribuir para uma transmissão mais segura e confiável dos dados entre os dispositivos BLE.

#### 2.3.3.4 Segurança

Uma conexão BLE é reconhecida por operar em um modo de segurança que apresenta diferentes níveis de segurança disponíveis. É importante notar que o modo/nível de segurança requerido por uma conexão pode ser modificado em momentos distintos, demandando procedimentos específicos para elevação desse nível. Ademais, destaca-se que toda conexão inicia sua trajetória no modo de segurança 1, nível 1 [44].

Quando dois dispositivos, que não possuem inicialmente um nível de segurança

adequado, almejam realizar uma operação que requeira uma maior segurança, é necessário que tais dispositivos passem pelo processo de emparelhamento. Essa etapa é iniciada por um dispositivo central, como por exemplo um *smartphone*, que busca acessar um valor de dados, como uma característica, em um dispositivo periférico que demanda um acesso autenticado. O emparelhamento é responsável por autenticar a identidade dos dois dispositivos envolvidos, criptografar o *link* através do uso de uma Chave de Curto Prazo (STK - *Short Term Key*) e distribuir as Chaves de Longo Prazo (LTK - *Long Term Keys*) utilizadas na criptografia. Vale ressaltar que a LTK é armazenada para possibilitar uma reconexão mais rápida no futuro, caracterizando o processo como um *Bonding* [44].

O nível aprimorado de segurança na conexão em questão é fundamentado no método de emparelhamento executado e sua seleção é baseada nas capacidades de entrada/saída de cada dispositivo envolvido. Importante destacar que, para quaisquer reconexões futuras, o nível de segurança será estabelecido a partir do nível alcançado durante o emparelhamento inicial [44].

A atribuição de função específica para cada dispositivo é determinada pela parte Gerenciador de Segurança, conhecida como SM (*Security Manager*), que compõe a pilha BLE. Os papéis envolvidos são o iniciador, responsável por estabelecer a conexão central, e o respondente, que atua como periférico nesse processo [44].

A criptografia utilizada no BLE fundamenta-se no Padrão de Criptografia Avançada de 128 *bits*, empregando o Código de Autenticação de Mensagens de Encadeamento de Blocos Cifrados, conhecido como CBC-MAC (*Cipher Block Chaining Message Authentication Code*). O algoritmo mencionado requer a utilização da Chave de Longo Prazo (LTK), a qual, por sua vez, é empregada para gerar uma chave de “segredo compartilhado” com extensão de 128 *bits* [4].

A garantia de autenticidade na tecnologia BLE é estabelecida por meio da assinatura digital dos dados, sendo a Chave de Resolução de Assinatura de Conexão, também conhecida como CSRK (*Connection Signature Resolving Key*), o recurso empregado para tal finalidade [4].

A grande parte dos serviços de segurança disponíveis na tecnologia BLE é categorizada em dois modos de segurança distintos e mutuamente exclusivos, denominados como Modo de Segurança BLE 1 e Modo de Segurança BLE 2 [4].

O Modo de Segurança 1 é utilizado para fortalecer a segurança na conexão BLE, empregando criptografia e estabelecendo quatro níveis de segurança distintos [44]:

- (a) Nível de segurança 1: sem segurança (sem autenticação e criptografia);
- (b) Nível de segurança 2: emparelhamento não autenticado com criptografia;



- (c) Nível de segurança 3: emparelhamento autenticado com Padrão de Criptografia Avançada (AES - *Advanced Encryption Standard*) empregando um modo de operação para cifras de bloco criptográfico;
- (d) Nível de segurança 4: conexões seguras BLE autenticadas emparelhadas com criptografia. O nível 4 utiliza Curva Elíptica *Diffie-Hellman* P-256 (ECDH - *Elliptic Curve Diffie-Hellman*) e a criptografia (AES).

O Modo de Segurança 2 é utilizado para reforçar a segurança na conexão BLE por meio da assinatura de dados, apresentando dois níveis de segurança [44]:

- (a) Nível de segurança 1: emparelhamento não autenticado com assinatura de dados;
- (b) Nível de segurança 2: emparelhamento autenticado com assinatura de dados.

O Modo de Segurança Misto ocorre quando um dispositivo precisa oferecer suporte tanto ao modo de segurança 1 quanto ao modo de segurança 2, ou seja, é necessário que ele seja capaz de lidar tanto com dados assinados quanto com dados não assinados. Por outro lado, o Modo Somente Conexão Segura é um modo de segurança 1, com nível de segurança 4, onde todo o tráfego de entrada e saída em um dispositivo BLE é realizado somente por meio de conexões autenticadas e criptografadas [44].

Cada conexão BLE começa em sua fase inicial de segurança, no modo de segurança 1, nível 1, e pode ser atualizada posteriormente para qualquer nível de segurança através de um processo de autenticação. Durante o emparelhamento, o método ou algoritmo selecionado determina se a autenticação é forte ou não. Emparelhamentos não autenticados são utilizados em situações em que o dispositivo não pode ser autenticado, por exemplo, quando não dispõe de recursos de entrada/saída [44].

### 2.3.3.5 Perda de pacotes

A perda de pacotes em dispositivos BLE é uma preocupação significativa, pois pode ter efeitos negativos na qualidade da comunicação entre dispositivos. Quando um pacote é perdido durante a transmissão, o receptor não recebe todas as informações enviadas pelo transmissor, resultando em uma comunicação incompleta que pode impactar a funcionalidade do sistema [45].

Essa perda de pacotes pode ser especialmente problemática em dispositivos que dependem de comunicação precisa, como sensores de saúde. Por exemplo, se um sensor de temperatura estiver enviando dados para um dispositivo de monitoramento de saúde usando BLE e houver perda de pacotes, as informações recebidas pelo dispositivo de monitoramento podem ser incompletas ou imprecisas. Isso pode levar a conclusões equivocadas sobre o estado de saúde do usuário [46].

Além disso, quando ocorre perda de pacotes em dispositivos BLE, o protocolo de comunicação pode precisar retransmitir os pacotes perdidos. Esse processo pode aumentar o tempo de latência e consumir mais energia, o que pode ser problemático em dispositivos de baixa potência que dependem de uma longa vida útil da bateria [46].

Esses problemas podem prejudicar a confiabilidade, a precisão e a eficiência da comunicação entre dispositivos BLE, afetando negativamente a experiência do usuário. Portanto, é importante minimizar a perda de pacotes em dispositivos BLE para garantir uma comunicação confiável e eficiente [45].

A perda de pacotes durante a transmissão é uma preocupação significativa em dispositivos BLE. Existem várias razões pelas quais os dispositivos BLE podem perder pacotes durante a comunicação. Alguns desses motivos incluem interferência de outros dispositivos sem fio, distância entre dispositivos, obstáculos físicos, condições ambientais e erros de *software* [47].

A interferência de outros dispositivos sem fio pode resultar na perda de pacotes durante a comunicação BLE. Isso pode ocorrer quando vários dispositivos sem fio operam na mesma área, o que pode causar interferência entre eles. Além disso, a distância entre dispositivos pode ser um fator crítico na perda de pacotes em BLE, já que a tecnologia tem um alcance limitado em comparação com outras tecnologias sem fio [47].

Obstáculos físicos, como paredes, portas e móveis, também podem interferir na comunicação entre dispositivos BLE, resultando na perda de pacotes. Condições ambientais, como um ambiente com alta umidade, também podem ser uma fonte de interferência na comunicação sem fio [47].

Erros de *software* também podem levar à perda de pacotes. Esses erros podem ser causados por erros no *software* do dispositivo ou por problemas na implementação do protocolo BLE [45] [47].

Para minimizar a perda de pacotes em dispositivos BLE, é importante adotar medidas que minimizem a interferência de outros dispositivos sem fio, como selecionar um canal com menor interferência. Também é importante manter os dispositivos próximos um do outro para reduzir a perda de pacotes causada pela distância. Remover obstáculos físicos entre os dispositivos pode melhorar a comunicação, bem como manter as condições ambientais ideais. Por fim, é importante garantir que o *software* esteja bem implementado e livre de erros, o que pode ajudar a minimizar a perda de pacotes [47].

## 3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Neste Capítulo, são apresentados os procedimentos metodológicos adotados para estudar o escalonamento de filas e a simulação BLE, duas técnicas relevantes no contexto dos sistemas de comunicação. Inicialmente, é abordado o tema do escalonamento de filas, uma técnica crucial para o gerenciamento eficiente do fluxo de dados nesses sistemas e descritas três técnicas de escalonamento de filas, com uma explicação abrangente de seu funcionamento e principais características. Em seguida, é apresentado o simulador utilizado para simular a comunicação BLE, é fornecida uma descrição do seu funcionamento, principais características e limitações.

Por fim, o modelo simulado utilizado é descrito, juntamente com as métricas de desempenho utilizadas, a fim de proporcionar uma avaliação abrangente e consistente do comportamento dos diferentes escalonamentos de filas em dispositivos BLE.

### 3.1 Escalonamento de filas

As redes BLE podem ser afetadas por diversos fatores que prejudicam a transmissão e recepção de dados, como o congestionamento do canal de comunicação. Quando vários dispositivos estão conectados na rede, a utilização do canal compartilhado pode ser complicada, podendo resultar em atrasos e erros de transmissão [47].

Nesse contexto, as técnicas de escalonamento de filas surgem como uma solução eficiente para gerenciar o congestionamento da rede e reduzir a perda de pacotes em redes BLE. Ao determinar a ordem em que os dispositivos podem transmitir e receber dados, o escalonamento garante um acesso justo e eficiente ao canal de comunicação, minimizando os atrasos e maximizando a utilização do canal [48].

A importância das técnicas de escalonamento de filas em dispositivos BLE está relacionada à comunicação em rede de estrela, na qual um dispositivo central atua como mestre e os dispositivos periféricos atuam como escravos. O mestre é responsável por coordenar as comunicações entre os dispositivos periféricos, o que pode levar a congestionamento da rede e atrasos na transmissão de dados. O escalonamento permite que os dispositivos periféricos acessem o canal de comunicação de forma justa e eficiente, reduzindo os atrasos e maximizando a utilização do canal [48] [49].

As técnicas de escalonamento de filas são uma solução eficiente para gerenciar o congestionamento da rede e reduzir a perda de pacotes em redes BLE com vários dispositivos conectados. Com a crescente demanda por dispositivos BLE em várias aplicações, as técnicas de escalonamento de filas são uma solução importante para garantir uma

comunicação confiável e eficiente [48] [49].

Nesta seção, serão apresentadas três técnicas distintas de escalonamento de filas no contexto do BLE, cada uma com um nível de complexidade e popularidade de implementação em dispositivos BLE diferentes.

### 3.1.1 Escalonamento de filas *First In First Out* (FIFO)

A técnica de escalonamento de filas FIFO (*First in First Out*) é amplamente utilizada em sistemas de comunicação, incluindo a tecnologia BLE, para gerenciar a ordem de transmissão de pacotes de dados [48].

Em um sistema de fila FIFO, os pacotes são transmitidos de acordo com a ordem de chegada, o que significa que o pacote mais antigo na fila é transmitido primeiro. Essa abordagem garante que os pacotes sejam tratados na ordem de chegada e ajuda a evitar atrasos excessivos na transmissão.

No contexto do BLE, os dispositivos geralmente usam uma fila FIFO para gerenciar pacotes de dados que precisam ser transmitidos ou recebidos. Quando um pacote é recebido, ele é adicionado ao final da fila, e quando um pacote é transmitido com sucesso, ele é removido do início da fila.

Além disso, a técnica FIFO é amplamente utilizada em dispositivos e sistemas devido à sua facilidade de implementação e suporte. No entanto, é importante destacar que a sua utilização pode acarretar um problema conhecido como “*starvation*”. Esse problema ocorre quando pacotes mais recentes na fila ficam retidos por um longo período devido à grande quantidade de pacotes antigos. Em um sistema FIFO, os pacotes mais antigos são sempre transmitidos primeiro, independentemente de sua importância ou prioridade. Como resultado, os pacotes mais recentes podem sofrer atrasos significativos antes de serem transmitidos, levando à perda de dados importantes. Portanto, embora a técnica FIFO seja fácil de implementar e suportada por muitos sistemas, é importante estar ciente do possível problema de “*starvation*” associado à sua utilização [50].

A ampla gama de dispositivos WBAN pode se beneficiar do uso da técnica de escalonamento de filas FIFO. Dentre os dispositivos que podem se beneficiar dessa técnica, podem ser mencionados sensores de movimento, monitores de frequência cardíaca e dispositivos de monitoramento de saúde em geral [51].

### 3.1.2 Escalonamento de filas *Fair Queuing* (FQ)

A implementação do escalonamento de filas *Fair Queuing* (FQ) consiste em segmentar a banda disponível em várias filas, cada uma destinada a um fluxo de tráfego específico. Na rede BLE, essas filas podem ser alocadas para diferentes tipos de tráfego, tais como pacotes de anúncio, pacotes de conexão e pacotes de dados. O tamanho máximo

de cada fila é determinado com base na largura de banda disponível e nas configurações do sistema [48] [52].

O escalonamento de filas *Fair Queuing* é uma técnica que tem como objetivo garantir que todos os fluxos de tráfego em uma rede de comunicação tenham acesso justo à largura de banda disponível. Esse método é baseado no cálculo do tempo de chegada justo, também conhecido como *Fair Arrival Time* (FAT), para cada pacote presente na fila. O FAT é utilizado para determinar a ordem de transmissão dos pacotes, assegurando que todos os fluxos de tráfego tenham a mesma oportunidade de transmitir seus pacotes, independentemente do tipo ou tamanho dos pacotes. No contexto de uma simulação de BLE, o cálculo do FAT pode ser realizado a partir de diferentes parâmetros, tais como o tipo de pacote, o tamanho do pacote e o intervalo de transmissão. Essa abordagem tem como objetivo maximizar o desempenho da rede e minimizar a ocorrência de atrasos ou congestionamentos de tráfego [48] [38].

Uma vez que o FAT de cada pacote é calculado, o escalonador de filas FQ classifica os pacotes em ordem crescente de valor de FAT e transmite o pacote que possui o menor valor de FAT primeiro. Esse procedimento é implementado com o objetivo de garantir que todos os fluxos de tráfego presentes na rede tenham acesso justo à largura de banda disponível. Desse modo, é possível garantir que cada fluxo de tráfego tenha a mesma chance de transmitir seus pacotes, independentemente do tipo ou tamanho do pacote. O escalonamento com base no FAT assegura que os pacotes sejam transmitidos de forma justa, garantindo o equilíbrio no uso da largura de banda [48] [38].

Após a transmissão de um pacote, o escalonador FQ atualiza o FAT de todos os pacotes restantes na fila de espera. Esse ajuste é feito com base na largura de banda utilizada pelo pacote recém-transmitido e no tempo de chegada do próximo pacote na fila. Esse processo garante que o escalonamento de filas continue a ser justo mesmo em situações de tráfego variável, uma vez que os valores de FAT são atualizados dinamicamente para refletir as condições em tempo real da rede [48] [38].

O processo de escalonamento de filas FQ é executado de forma contínua para cada pacote que chega à fila, garantindo que todos os fluxos de tráfego na rede tenham um acesso equitativo à largura de banda disponível, independentemente do nível de carga de tráfego presente na rede. Como resultado, a técnica FQ é uma solução eficiente e justa para o gerenciamento de tráfego em redes com múltiplos fluxos [48] [52].

A técnica de escalonamento de filas FQ é frequentemente utilizada em dispositivos WBAN para gerenciar fluxos de tráfego de prioridade média. Isso inclui dispositivos de monitoramento de saúde em um ambiente hospitalar, onde vários dispositivos podem estar competindo pelo mesmo canal de comunicação sem fio. A técnica de escalonamento de filas FQ apresenta um nível de complexidade superior ao do escalonamento de filas FIFO. Entretanto, é importante destacar que, em relação a outras técnicas de escalonamento

de filas mais elaboradas, o FQ ainda é considerado relativamente simples em termos de implementação.

### 3.1.3 Escalonamento de filas *Deficit Round Robin* (DRR)

O DRR é uma técnica de escalonamento baseada em créditos, que distribui a largura de banda disponível entre diferentes fluxos de tráfego na rede. Cada fluxo de tráfego é associado a uma fila, e o escalonador atende as filas de acordo com o número de créditos que cada fila tem disponível [48].

Inicialmente, a cada fila é atribuído um número de créditos, que representa a quantidade de largura de banda disponível que a fila pode utilizar. Quando um pacote é transmitido, o número de créditos da fila correspondente é reduzido pelo tamanho do pacote transmitido. Se uma fila fica sem créditos, ela é colocada no final da fila de espera [48].

O DRR utiliza um mecanismo de déficit para tratar o problema de filas que requerem mais largura de banda do que foi originalmente atribuída. Quando uma fila esgota seus créditos, ela entra em um estado de déficit, o que significa que ela não possui mais créditos disponíveis [48] [53].

O estado de déficit é uma característica do DRR, em que uma fila que esgotou todos os seus créditos entra em um estado de déficit. Nesse estado, a fila não possui mais créditos disponíveis para a transmissão de pacotes, o que significa que ela não pode transmitir mais pacotes até que receba novos créditos [48] [53].

Quando uma fila entra em um estado de déficit, ela é colocada em uma fila de espera para que outras filas com créditos possam transmitir pacotes. Quando a fila em déficit é atendida novamente, ela é autorizada a transmitir pacotes até que seu déficit seja eliminado. Quando o déficit é eliminado, a fila recebe uma nova atribuição de créditos e o processo continua [48] [53].

O estado de déficit é uma forma de tratar o problema de filas que requerem mais largura de banda do que foi originalmente atribuída, garantindo que cada fila receba uma parcela justa da largura de banda disponível. Essa característica do DRR é particularmente útil em ambientes com múltiplos fluxos de tráfego com diferentes requisitos de largura de banda, onde é necessário garantir um nível mínimo de largura de banda para cada fluxo de tráfego [48] [53].

A técnica de escalonamento de filas DRR é caracterizada por sua complexidade e exige um conhecimento mais detalhado das características da rede e dos requisitos de largura de banda de cada fluxo de tráfego, tornando-a menos adequada para ser utilizada em dispositivos WBAN que empregam o padrão de comunicação BLE.

## 3.2 Simulação BLE

Simuladores e emuladores permitem realizar experimentos em ambientes definidos por *software*, o que garante que os testes sejam realizados de forma mais ágil do que se fosse necessário configurar um dispositivo de *hardware*, economizando assim tempo e dinheiro [54]. Embora as duas ferramentas sejam usadas para testar o desempenho e comportamento de redes de computadores, é importante destacar que simuladores e emuladores de redes são distintos entre si [55].

Um simulador de rede é uma ferramenta que cria um modelo matemático da estrutura e comportamento de uma rede de computadores. Esse modelo é baseado em regras e parâmetros definidos pelo usuário e, com isso, é possível prever como a rede irá se comportar em diferentes condições, como ao adicionar novos usuários ou equipamentos. É importante destacar que os simuladores não têm o objetivo de emular o *hardware* que manterá o aplicativo em uso, mas sim criar um ambiente de *software* que simule o comportamento da rede. Por esse motivo, eles podem ser implementados usando linguagens de programação de alto nível [55] [54].

Um emulador de rede é uma ferramenta que replica o comportamento de uma rede real por meio da utilização de *hardware* e *software* específicos. Com essa ferramenta, torna-se possível testar o desempenho e a segurança de redes sem a necessidade de interromper o funcionamento da rede real [55].

Resumidamente, enquanto simuladores criam um modelo matemático para simular o comportamento da rede, emuladores replicam o comportamento real de uma rede por meio de equipamentos físicos e/ou *software*. Ambas as ferramentas têm sua utilidade no teste e no desenvolvimento de redes de computadores, sendo a escolha entre elas dependente do cenário de uso e dos objetivos de teste [55].

Os produtos de simulação fornecem um ambiente para pesquisa e estudo das principais funcionalidades de uma determinada tecnologia, utilizando recursos baseados em padrões existentes. Isso permite que os simuladores sejam amplamente utilizados no estudo de novas soluções teóricas para melhorar a tecnologia em questão. A capacidade simplificada de trabalhar com a interface fornecida, bem como a capacidade de fazer modificações em soluções de código aberto, tornam os simuladores uma ferramenta atraente e com ampla aplicação na área de educação [54].

Com base em estatísticas e projeções de vendas de dispositivos BLE, observa-se um aumento de cerca de meio bilhão de unidades vendidas anualmente. Esses dados indicam claramente que essa tecnologia está se tornando cada vez mais popular e amplamente utilizada [56].

Com a enorme utilização da tecnologia BLE, torna-se imprescindível oferecer e pesquisar soluções que possam aprimorar seu desempenho. Nesse sentido, os simuladores se

apresentam como uma ferramenta adequada para pesquisar melhorias teóricas no padrão, permitindo um estudo preliminar das soluções propostas antes de investir recursos e tempo na compra, estudo e configuração de dispositivos de *hardware*, bem como nos esforços para implementar novas especificações.[54].

Nesta seção, é apresentada uma visão geral do simulador NS-3, acompanhada de uma análise das suas vantagens e desvantagens.

### 3.2.1 Simulação de BLE utilizando o NS-3

O NS-3 (*Network Simulator 3*) é um simulador de redes de código aberto amplamente utilizado na pesquisa em redes. O simulador é desenvolvido em C++. É considerado o simulador de rede mais popular devido à sua capacidade de resolver problemas do mundo real. Sendo de código aberto, o NS-3 permite o *download* e uso gratuito do código-fonte, o que possibilita que a comunidade de pesquisa contribua para o seu desenvolvimento contínuo e use como base para realizar pesquisas em rede [57].

O NS-3 oferece suporte a uma ampla variedade de protocolos de rede, incluindo os sem fio e de roteamento, além de modelos de tráfego e mobilidade de nós, possibilitando a simulação realista de redes. Além disso, possui ferramentas avançadas de análise de desempenho que coletam métricas em tempo real e visualizam os resultados em gráficos e tabelas, permitindo que os usuários avaliem o desempenho de diferentes protocolos de rede em diferentes cenários [57] [58].

Com uma grande comunidade de desenvolvedores e usuários, o NS-3 é atualizado regularmente com novos recursos e correções de erros. Também é fácil de usar, com documentação detalhada e uma ampla variedade de exemplos de código disponíveis, permitindo que os usuários aprendam rapidamente e comecem a simular redes imediatamente. Portanto, o NS-3 é uma ferramenta poderosa e confiável para pesquisa em redes [57] [58] [59].

Existem algumas limitações que os usuários precisam estar cientes. Uma dessas limitações é que o NS-3 pode consumir muitos recursos do sistema, como CPU (*Central Processing Unit*) e memória RAM (*Random Access Memory*), especialmente quando se simula redes grandes e complexas. Isso pode limitar a capacidade dos usuários de executar várias simulações simultaneamente ou de simular redes com muitos nós [60].

Outra limitação do NS-3 é que pode haver uma curva de aprendizado íngreme para usuários iniciantes, pois requer conhecimentos avançados de programação em C++ e habilidades em simulação de redes. Além disso, os usuários precisam estar familiarizados com a documentação e com a estrutura do simulador para utilizá-lo de maneira eficiente [59] [60].

O NS-3 também pode ter limitações nos modelos de propagação de sinal, que po-



dem não representar completamente as características reais do ambiente de comunicação sem fio. Isso pode afetar a precisão dos resultados da simulação em algumas situações. Além disso, o tempo de simulação no NS-3 pode ser bastante longo para redes grandes e complexas, o que pode afetar a eficiência e a produtividade dos usuários [58] [59].

Por fim, a interpretação dos resultados da simulação pode ser complexa e requer habilidades de análise de dados e conhecimentos avançados de redes. É importante estar ciente dessas limitações ao utilizar o NS-3 para garantir que os resultados da simulação sejam precisos e confiáveis [60].

### 3.3 Modelo simulado

Com o objetivo de comparar o desempenho de diversas técnicas de escalonamento de filas em dispositivos WBAN que empregam a tecnologia BLE, foi escolhido o simulador NS-3, em função dos seguintes motivos:

- (a) NS-3 é um simulador de código aberto amplamente utilizado na comunidade de pesquisa em redes [61] [62] [63]. Ele é reconhecido pela sua vasta gama de recursos, que se encontram disponíveis para auxiliar os pesquisadores em suas atividades e na resolução de problemas;
- (b) NS-3 possui módulos específicos para a simulação de dispositivos BLE e interação com outros dispositivos, o que é fundamental para a simulação de dispositivos WBAN com BLE;
- (c) NS-3 permite a personalização de filas e escalonamento de pacotes, possibilitando a realização de testes com diferentes configurações de escalonamento de filas em dispositivos WBAN com BLE;
- (d) NS-3 é altamente extensível, permitindo que os pesquisadores adicionem novos modelos, algoritmos e protocolos conforme necessário, o que é essencial para uma área em constante evolução como a escola de dispositivos WBAN com BLE.

Para utilizar o NS-3 em sua simulação de redes, é necessário baixar e instalar a plataforma seguindo as instruções contidas na documentação oficial. Antes de prosseguir com a simulação, é importante ter um conhecimento básico da plataforma, sua estrutura e funcionamento. A documentação oficial oferece tutoriais e exemplos que podem ajudar na familiarização com o NS-3.

O módulo BLE costumava ser parte integrante da distribuição oficial do NS-3, mas acabou sendo removido a partir da versão 3.32 devido a problemas de manutenção e compatibilidade. No entanto, é possível encontrar versões mais antigas do NS-3 que

ainda contêm o módulo BLE. Além disso, ainda existe uma opção para obter e utilizar o módulo BLE como uma extensão de terceiros, desenvolvida e mantida pela comunidade de usuários do NS-3.

Uma vez instalado o simulador, é possível configurar a simulação de acordo com as especificações desejadas, incluindo a escolha das técnicas de escalonamento de filas a serem utilizadas. O NS-3 oferece diversas opções de técnicas de escalonamento de filas, como *First in First out* (FIFO), *Deficit Round Robin* (DRR) e *Fair Queuing* (FQ), entre outras.

Para prosseguir com a simulação, é necessário desenvolver um modelo de rede que descreva o comportamento dos dispositivos BLE na simulação, bem como a aplicação das técnicas de escalonamento de filas escolhidas. O modelo de rede pode ser desenvolvido utilizando-se código C++ ou *scripts Python*.

O modelo de simulação proposto engloba dois dispositivos BLE, sendo um deles o mestre e o outro o escravo, ambos representados por instâncias da classe “*BleDevice*”. Para identificar o dispositivo mestre e o dispositivo escravo, é imprescindível acompanhar a sequência de eventos que ocorrem durante o processo de conexão.

Na rede BLE, o processo de conexão tem início com a busca por dispositivos disponíveis, geralmente iniciada pelo dispositivo mestre. Após localizar um dispositivo disponível, o dispositivo mestre envia uma solicitação de conexão para o dispositivo escravo. Uma vez estabelecida a conexão, o dispositivo mestre assume a responsabilidade de gerenciar a comunicação com o dispositivo escravo, o que implica no controle das transmissões de dados e da frequência das mesmas. Além disso, os dispositivos são dotados de identificadores exclusivos.

O modelo de simulação emprega um modelo de mobilidade denominado Ponto de Destino Aleatório (RWP - *Random Waypoint*), com velocidade constante para os dispositivos BLE, representado pela classe “*RandomWaypointMobilityModel*”. Nesse modelo, os dispositivos BLE movem-se de forma aleatória em uma área bidimensional delimitada, a qual pode ser definida por um retângulo ou círculo, e os dispositivos podem mudar aleatoriamente sua direção. Ao alcançar a posição definida, o dispositivo aguarda por um período determinado antes de se mover novamente.

Tal modelo é amplamente utilizado em simulações de redes móveis, pois permite a simulação do movimento dos dispositivos de maneira mais realista, levando em consideração que estes tendem a mudar de direção durante a movimentação.

Em uma rede BLE, a comunicação entre dispositivos sem fio é realizada por meio de ondas de rádio. No entanto, a propagação dessas ondas pode ser afetada por vários fatores, como a distância entre os dispositivos, a interferência de outros dispositivos ou fontes de ruído e a atenuação do sinal. Para modelar esses efeitos de perda de propagação do sinal

na simulação, um modelo de canal de comunicação é comumente utilizado. Entretanto, no modelo de simulação implementado, optou-se por não utilizar um modelo de canal de comunicação para a simulação de dispositivos BLE. Tal escolha foi motivada pela simplificação do modelo de simulação, objetivando a análise de outras características dos dispositivos, tais como a perda de pacotes utilizando diferentes escalonamentos de filas.

No contexto de uma simulação de rede, o gerador de tráfego desempenha um papel essencial, uma vez que é responsável por gerar o tráfego que será transmitido pelos dispositivos na rede. No modelo de simulação implementado, foi criado um método na classe “*BleDevice*” que permite o envio de pacotes com tamanhos variados, o qual pode ser chamado no momento adequado durante a simulação, utilizando a função “*Send()*” da classe “*BleDevice*”. Com o objetivo de avaliar o impacto de diferentes tamanhos de pacotes na comunicação entre os dispositivos BLE, foram considerados seis tamanhos de pacotes distintos nas simulações realizadas, sendo eles: 8, 16, 32, 64, 128 e 255 *bytes*. Essa escolha foi feita levando em consideração a arquitetura de pacotes BLE, na qual a carga útil, ou seja, a seção do pacote de dados BLE que contém as informações transmitidas entre os dispositivos, não pode ultrapassar 255 *bytes*. Dessa forma, os tamanhos de pacotes selecionados foram pensados para imitar um ambiente de simulação realista.

Existem diversas técnicas de escalonamento de filas que podem ser empregadas pela camada de enlace de dados, como, por exemplo, a técnica *First In First Out* (FIFO). A camada de enlace de dados desempenha um papel fundamental na simulação, pois permite avaliar a eficiência do protocolo BLE em manter uma comunicação confiável entre os dispositivos. A escolha das estratégias de escalonamento de filas e outras técnicas utilizadas pela camada de enlace de dados pode ter um impacto significativo no desempenho do protocolo BLE na simulação. A implementação da técnica FIFO garante que os pacotes sejam tratados em ordem de chegada, o que é crucial para manter a ordem correta das informações trocadas entre os dispositivos. É possível utilizar outras técnicas de escalonamento de filas, como *Deficit Round Robin* (DRR) e *Fair Queuing* (FQ), para garantir uma distribuição justa dos recursos da rede entre os dispositivos. As técnicas FQ e DRR, descritas nas seções 3.1.2 e 3.1.3, respectivamente, apresentam um potencial de aplicação em diversos cenários em que há a necessidade de priorização de alguns pacotes em relação a outros. No entanto, o uso de uma técnica específica dependerá das necessidades da aplicação em questão e das características da rede. É importante ressaltar que, dependendo do escalonador selecionado, os pacotes podem ser perdidos se a fila estiver cheia ou se não houver recursos suficientes para atender à demanda.

A capacidade da fila é um fator crucial que pode levar à perda de pacotes em dispositivos BLE. Em geral, em dispositivos BLE, a fila de saída é utilizada para armazenar pacotes antes de serem transmitidos ao dispositivo receptor. Caso a fila de saída fique cheia, os pacotes subsequentes serão descartados, o que resultará na perda de dados

importantes [47].

Para implementar o rastreamento de pacotes perdidos em uma simulação de dispositivos BLE no simulador NS-3, é necessário desenvolver uma função que monitore o número de pacotes enviados e recebidos com sucesso e compare os valores obtidos para determinar quantos pacotes foram perdidos durante a transmissão.

A responsabilidade de contabilizar a perda de pacotes na simulação BLE recai sobre a classe “*BleChannelLossModel*”. Esta classe é encarregada de simular a perda de pacotes por meio da modelagem da atenuação do sinal de rádio em um ambiente específico. Ao enviar um pacote, o modelo de perda de canal realiza cálculos para determinar a probabilidade de atenuação ou perda do sinal, devido a fatores como a distância entre os dispositivos, obstáculos físicos e interferência de outros dispositivos.

Propõe-se que, na simulação BLE, o ambiente seja configurado de forma que somente o tipo de escalonamento de filas seja o fator determinante na perda de pacotes. Isso pode ser realizado por meio da ajustagem dos parâmetros do modelo de perda de canal com o intuito de minimizar a influência de outros fatores que possam ocasionar perda de pacotes, como a interferência de outros dispositivos. Desse modo, é possível isolar o efeito do tipo de escalonamento de filas na perda de pacotes e analisar de maneira específica como o tipo de escalonamento de filas afeta a perda de pacotes, mantendo as demais variáveis controladas.

Para registrar a perda de pacotes na simulação de rede BLE, a classe “*BleChannelLossModel*” pode utilizar uma função de retorno de chamada (*callback*), a qual é acionada sempre que um pacote é perdido durante a transmissão. As funções de *callback* são aquelas que são passadas como argumentos para outras funções e executadas quando um determinado evento ocorre. No modelo de simulação em questão, a função de *callback* é empregada para capturar e contabilizar os pacotes perdidos na rede BLE.

Ao término da simulação, o modelo coleta informações referentes ao número de pacotes transmitidos e perdidos durante a transmissão na rede BLE. Com base nesses dados, é possível calcular a taxa de pacotes perdidos, a qual consiste na relação entre o número de pacotes perdidos e o número total de pacotes transmitidos.

A taxa de pacotes perdidos representa um importante indicador da qualidade da rede BLE simulada, uma vez que reflete a eficiência da transmissão de pacotes sem perda. Essa métrica é relevante para a avaliação de diferentes tipos de escalonamento de filas.

## 4 RESULTADOS E ANÁLISE DAS SIMULAÇÕES

A análise dos resultados obtidos na simulação BLE, utilizando o simulador NS-3, levou em consideração métricas de QoS, as quais são medidas utilizadas para avaliar o desempenho de uma rede de comunicação em relação a um conjunto predefinido de requisitos. Essas métricas são cruciais para assegurar que a rede atenda às expectativas dos usuários e seja capaz de fornecer serviços com qualidade adequada.

A perda de pacotes foi investigada mediante a aplicação de diferentes técnicas de escalonamento de filas, o que indica que a análise foi realizada com rigor, considerando diversos tamanhos de pacotes e técnicas de escalonamento de filas e seu impacto sobre a perda de pacotes em dispositivos WBAN. Isso resultou em uma avaliação mais abrangente e precisa do desempenho da simulação BLE em relação à perda de pacotes.

### 4.1 Escalonamento de filas *First In First Out* (FIFO)

A implementação do escalonamento de filas FIFO é relativamente fácil, visto que se trata de uma estratégia simples de gerenciamento de fila que segue a ordem de chegada dos pacotes. Dessa forma, não é necessário um processamento adicional para determinar qual pacote deve ser transmitido primeiro.

Ademais, o FIFO demanda um baixo poder de processamento, uma vez que não envolve cálculos complexos ou decisões de roteamento. Para implementar o FIFO, é necessário apenas armazenar os pacotes em sua ordem de chegada e transmiti-los nessa mesma ordem. Por conseguinte, dispositivos com recursos limitados, tais como baixa capacidade de processamento, são capazes de implementar o FIFO com eficácia. Tais aspectos são responsáveis pela popularidade do FIFO na gestão de filas em dispositivos BLE. Tal vantagem é especialmente significativa em dispositivos com recursos restritos, como sensores e dispositivos vestíveis. Dispositivos vestíveis e sensores podem ser considerados como dispositivos WBAN devido às suas características de comunicação sem fio em proximidade com o corpo humano.

Outrossim, o FIFO não descarta nenhum pacote durante a transmissão, eliminando, assim, a necessidade de processamento adicional para selecionar quais pacotes devem ser descartados. No FIFO, a perda ou eliminação de um pacote ocorre unicamente quando o limite da fila é alcançado e um novo pacote é recebido para inserção. Nessa circunstância, o novo pacote é descartado quando o tamanho da fila está completo. É importante destacar que essa remoção ocorre de maneira indiscriminada, podendo ser qualquer pacote que esteja no início da fila, independentemente de sua importância ou urgência para a transmissão. Por conseguinte, é de suma importância que o tamanho da

fila seja dimensionado de forma adequada, a fim de evitar perda de pacotes e garantir a eficiência da transmissão na rede.

Com base no modelo de simulação previamente descrito no capítulo anterior deste trabalho, foi realizado um estudo que apresentou resultados referentes à perda de pacotes, os quais podem ser visualizados na tabela 2. Para tanto, utilizou-se a técnica de escalonamento FIFO.

Tabela 2 – Perda de pacotes utilizando o escalonamento de filas *First In First Out* (FIFO).  
Fonte: autoria própria.

Tamanho do pacote	Pacotes enviados	Pacotes recebidos	Pacotes perdidos
<i>8 bytes</i>	1500	1413 (94,20%)	87 (5,80%)
<i>16 bytes</i>	1500	1405 (93,67%)	95 (6,33%)
<i>32 bytes</i>	1500	1406 (93,73%)	94 (6,27%)
<i>64 bytes</i>	1500	1389 (92,60%)	111 (7,40%)
<i>128 bytes</i>	1500	1384 (92,27%)	116 (7,73%)
<i>255 bytes</i>	1500	1381 (92,07%)	119 (7,93%)
Total	9000	8378 (93,09%)	622 (6,91%)

Foi definido um tamanho de fila de 100 pacotes, conforme a configuração padrão do NS-3. Quando esse limite é excedido, os pacotes são prontamente descartados. Convém ressaltar que o tamanho da fila pode impactar o desempenho da rede, haja vista que uma fila muito pequena pode ocasionar perda de pacotes, enquanto uma fila excessivamente grande pode resultar em um aumento do tempo de espera para a transmissão dos pacotes. Essa prolongação do período de espera é conhecida como aumento na latência.

À medida que a fila se torna mais extensa, ocorre o acúmulo de um maior número de pacotes, resultando em um aumento correspondente da latência experimentada por eles. Tal fenômeno ocorre em virtude da necessidade de cada pacote aguardar a transmissão dos pacotes anteriores na fila, antes de poder ser encaminhado.

Foi constatado que, à medida que aumenta a quantidade de pacotes de maior tamanho presentes na fila, os tempos de processamento e permanência nessa mesma fila também aumentam. Em virtude desse fato, a taxa de descarte de pacotes foi proporcional ao fluxo de chegada dos mesmos à fila.

## 4.2 Escalonamento de filas *Fair Queuing* (FQ)

Ao receber um pacote, o FQ examina o fluxo de tráfego correspondente e o inclui na fila apropriada, assegurando que cada fluxo de tráfego seja tratado de forma justa e que não haja monopolização da largura de banda por qualquer fluxo. No entanto, em situações de congestionamento ou sobrecarga na rede, pode ocorrer perda de pacotes. Quando a quantidade de pacotes que chegam à fila excede a capacidade de transmissão da rede, o FQ deve descartar alguns pacotes para prevenir agravamento da situação.

A perda de pacotes ocorre quando a fila do sistema atinge sua capacidade máxima, e o algoritmo FQ inicia o descarte de pacotes. Nesse caso, é provável que os pacotes mais antigos sejam descartados primeiramente, a fim de manter a justiça entre os fluxos de dados. Esse fenômeno é explicado pelo fato de que os pacotes mais antigos possuem um valor de FAT mais elevado do que os pacotes mais recentes.

Em outras palavras, os pacotes mais antigos possuem uma prioridade relativamente baixa em relação aos pacotes mais recentes, em termos de tempo de transmissão. Dessa forma, durante o congestionamento da fila, o algoritmo FQ prioriza a transmissão dos pacotes mais recentes, podendo, assim, descartar pacotes mais antigos, a fim de preservar a justiça entre os fluxos de dados.

O tamanho do pacote possui uma relação direta com o valor do tempo de chegada do fluxo (FAT) na técnica de FQ. Esse fato decorre do fato de que, em geral, pacotes de maior tamanho requerem mais tempo para serem transmitidos e, conseqüentemente, apresentam um valor de FAT mais elevado.

Caso ocorra congestionamento da fila e a técnica de FQ necessite descartar pacotes a fim de preservar a justiça entre os fluxos de dados, é provável que os pacotes com valores de FAT mais elevados ou seja, os pacotes maiores sejam descartados em primeiro lugar. Essa medida justifica-se pelo fato de que os pacotes de maior tamanho costumam apresentar maiores tempos de transmissão, podendo gerar atrasos significativos para os demais pacotes na fila.

Com base no modelo de simulação descrito no capítulo anterior deste trabalho, foi possível observar que pacotes com tamanhos maiores apresentaram uma quantidade de perda proporcionalmente maior do que os pacotes de tamanhos menores. Para tanto, foi realizado um estudo utilizando a técnica de escalonamento FQ e os resultados obtidos podem ser visualizados na tabela 3.

Tabela 3 – Perda de pacotes utilizando o escalonamento de filas *Fair Queuing* (FQ).  
Fonte: autoria própria.

<b>Tamanho do pacote</b>	<b>Pacotes enviados</b>	<b>Pacotes recebidos</b>	<b>Pacotes perdidos</b>
<i>8 bytes</i>	1500	1453 (96,87%)	47 (3,13%)
<i>16 bytes</i>	1500	1439 (95,93%)	61 (4,07%)
<i>32 bytes</i>	1500	1410 (94,00%)	90 (6,00%)
<i>64 bytes</i>	1500	1421 (94,73%)	79 (5,27%)
<i>128 bytes</i>	1500	1379 (91,93%)	121 (8,07%)
<i>255 bytes</i>	1500	1331 (88,73%)	169 (11,27%)
Total	9000	8433 (93,70%)	567 (6,30%)

Em linhas gerais, a perda de pacotes pode culminar na redução de desempenho da rede, causando atrasos e retransmissões de pacotes, com efeitos negativos sobre a qualidade do serviço e a experiência do usuário. Vários dispositivos WBAN empregam aplicações

BLE que podem se beneficiar do escalonamento de filas FQ. Dispositivos WBAN usados em ambientes hospitalares compartilham um canal de comunicação sem fio para transmitir dados de vários dispositivos. O uso do escalonamento de filas FQ pode melhorar a eficiência da transmissão e evitar competições. O FQ é benéfico para dispositivos WBAN que usam aplicações BLE, como em sistemas de monitoramento de saúde, pois confere acesso equitativo à largura de banda, reduz o congestionamento na rede e diminui o tempo de espera dos pacotes na fila e aprimorando a coleta de dados.

### 4.3 Escalonamento de filas *Deficit Round Robin* (DRR)

O algoritmo de escalonamento de filas DRR é uma metodologia amplamente empregada em redes de computadores. Entretanto, deve-se ressaltar que sua aplicabilidade não é direta em dispositivos WBAN que operam por meio da tecnologia BLE.

Além disso, Dispositivos WBAN fazem uso de uma rede sem fio de baixo consumo de energia desenvolvida para dispositivos de baixo custo, baixa potência e curto alcance, como sensores corporais e dispositivos de monitoramento de saúde. Por conseguinte, a administração de filas e a alocação de recursos de rede em dispositivos WBAN são, em geral, mais simplificadas do que em redes de computadores convencionais, devido às limitações de energia, custo e tamanho desses dispositivos.

Não obstante, em teoria, é factível a utilização do algoritmo de escalonamento de filas DRR em uma simulação com o intuito de avaliar seus resultados em dispositivos WBAN que utilizam a técnica BLE.

A técnica de escalonamento de filas DRR é utilizada para gerenciar a transmissão de pacotes entre dispositivos de forma eficiente e equitativa. Essa técnica é empregada quando um dispositivo emissor transmite pacotes a uma taxa mais elevada do que a largura de banda alocada para ele. Nesse contexto, a largura de banda alocada é inferior à taxa de transmissão de pacotes, o que pode ocasionar o acúmulo de pacotes na fila de espera.

A ocorrência de perda de pacotes pode ser ocasionada pela transmissão excessiva de pacotes de um dispositivo, que excede a largura de banda alocada para ele. Como resultado, a fila de espera do dispositivo pode crescer continuamente, o que pode levar ao descarte de alguns pacotes para evitar um acúmulo excessivo na fila.

A ocorrência e a magnitude da perda de pacotes estão diretamente relacionadas à taxa de transmissão de pacotes e à largura de banda alocada a cada dispositivo. Caso a largura de banda alocada seja menor que a taxa de transmissão de pacotes, a perda de pacotes será mais frequente e mais significativa. Por outro lado, se a largura de banda alocada for maior que a taxa de transmissão de pacotes, a perda de pacotes será menos comum.



Alguns algoritmos de escalonamento de fila, como o DRR, podem priorizar a transmissão de pacotes menores, resultando em menos perda de pacotes nesses pacotes. Essa priorização ocorre porque o DRR seleciona e elimina pacotes quando a fila está cheia e sua política de seleção consiste em eliminar pelo menos 5% do tamanho da fila em *bytes*, escolhendo o menor número de pacotes possível. Isso significa que os pacotes maiores serão descartados primeiro para atingir a janela de 5% rapidamente.

Com base no modelo de simulação descrito no capítulo anterior deste trabalho, foi possível observar a priorização na transmissão de pacotes menores. De fato, constatou-se que pacotes de 8 *bytes* e 16 *bytes* não apresentaram perda de pacote durante o experimento. Para avaliar essa priorização, foi realizado um estudo empregando a técnica de escalonamento DRR, e os resultados obtidos podem ser visualizados na tabela 4.

Tabela 4 – Perda de pacotes utilizando o escalonamento de filas *Deficit Round Robin* (DRR). Fonte: autoria própria.

<b>Tamanho do pacote</b>	<b>Pacotes enviados</b>	<b>Pacotes recebidos</b>	<b>Pacotes perdidos</b>
<i>8 bytes</i>	1500	1500 (100,00%)	0 (0,00%)
<i>16 bytes</i>	1500	1500 (100,00%)	0 (0,00%)
<i>32 bytes</i>	1500	1474 (98,27%)	26 (1,73%)
<i>64 bytes</i>	1500	1429 (95,27%)	71 (4,73%)
<i>128 bytes</i>	1500	1392 (92,80%)	108 (7,20%)
<i>255 bytes</i>	1500	1340 (89,33%)	160 (10,67%)
Total	9000	8635 (95,94%)	365 (4,06%)

Quando um dispositivo envia pacotes com tamanhos maiores, pode ser necessário alocar uma largura de banda maior para esse dispositivo para evitar a perda de pacotes. Isso ocorre porque pacotes maiores requerem mais tempo para serem transmitidos, aumentando a probabilidade de congestionamento na fila de transmissão.

Assim sendo, a incorporação de algoritmos de escalonamento de filas mais elaborados pode intensificar a complexidade e o custo desses dispositivos, além de requerer maiores recursos de processamento e energia, o que pode não ser desejável em diversas aplicações de WBAN. Nesse sentido, é crucial estabelecer um equilíbrio entre a complexidade do algoritmo de escalonamento e as demandas específicas da aplicação, considerando as limitações dos dispositivos WBAN e as especificidades da rede BLE. Em muitos casos, algoritmos de escalonamento mais simples podem ser suficientes para atender às necessidades das aplicações de WBAN, sem acrescentar consideravelmente o custo ou o consumo de energia desses dispositivos.

#### 4.4 Análise dos resultados

Com base nos resultados do experimento, é possível afirmar que tanto a técnica de escalonamento FIFO quanto a FQ apresentaram valores semelhantes em relação à perda

de pacotes, independentemente do tamanho dos pacotes. Contudo, ambas as técnicas apresentaram uma taxa de perda superior a 6% dos pacotes transmitidos, conforme pode ser observado na tabela 5.

Tabela 5 – Análise geral da perda de pacotes ao empregar diferentes métodos de escalonamento de filas. Fonte: autoria própria.

Escalonamento de filas	Pacotes enviados	Pacotes recebidos	Pacotes perdidos
FIFO	9000	8378 (93,09%)	622 (6,91%)
FQ	9000	8433 (93,70%)	567 (6,30%)
DRR	9000	8635 (95,94%)	365 (4,06%)

Ao comparar as técnicas FQ e FIFO em relação à perda de pacotes em situações em que os pacotes têm tamanhos diferentes, é perceptível a existência de discrepâncias significativas nos resultados, quando se trata da taxa de perda de pacotes em função do tamanho desses pacotes. Enquanto o FQ apresenta uma correlação direta entre o tamanho do pacote e a taxa de perda de pacotes, com pacotes maiores tendo uma taxa de perda maior do que os pacotes menores, o FIFO é uma técnica mais simples e não apresenta essa correlação direta. No entanto, o FIFO pode ter taxas de perda de pacotes mais elevadas durante momentos de congestionamento na rede, pois não possui uma política de seleção para determinar quais pacotes devem ser excluídos ou não durante uma transmissão. Isso pode resultar em perdas desnecessárias de pacotes em momentos de alto tráfego na rede.

De fato, pode-se constatar que, ao empregar o escalonamento da fila FIFO, há uma porcentagem constante de perda de pacotes, independentemente do tamanho deles. No entanto, ao analisar a tabela 2, é possível observar que tanto pacotes de tamanho reduzido, como aqueles de 8 bytes, quanto pacotes de grande porte, como os de 255 bytes, apresentaram uma taxa de perda semelhante, sugerindo uma ausência de correlação entre o tamanho do pacote e a taxa de perda. Por outro lado, ao utilizar o escalonamento FQ, a tabela 3 evidencia uma diferença significativa na taxa de perda de pacotes entre aqueles de pequeno e grande porte, sendo que estes últimos foram perdidos em uma proporção quase quatro vezes maior que os pacotes menores.

Tal fenômeno ocorre porque o escalonamento FQ tende a perder pacotes de maior tamanho, em detrimento dos de menor tamanho, com o intuito de evitar a sobrecarga na rede. Essa situação decorre do fato de que o FQ divide a largura de banda do canal de comunicação em diferentes fluxos de dados, o que pode gerar atrasos ou perdas de pacotes em alguns desses fluxos. No caso dos pacotes maiores, que requerem maior largura de banda para sua transmissão, pode ocorrer de o fluxo de dados correspondente não receber a parcela adequada de largura de banda, resultando em perda de pacotes ou atrasos na transmissão. Por outro lado, pacotes menores podem ser transmitidos com maior facilidade, visto que demandam menor largura de banda.

A partir das comparações entre as técnicas abordadas, pode-se inferir que o es-

calonamento de filas FIFO é a opção recomendada para aplicações que demandam a transmissão dos pacotes em ordem de chegada, tendo em vista que essa técnica garante a manutenção dessa ordem. Esse aspecto é especialmente relevante em aplicações que requerem um controle rigoroso de tempo e sincronização precisa, como por exemplo, no monitoramento de sinais vitais em dispositivos WBAN.

Ademais, é importante ressaltar que o escalonamento FIFO dispensa a necessidade de se dividir a largura de banda do canal de comunicação entre fluxos de dados distintos, o que pode ser vantajoso em redes que possuem largura de banda limitada ou que apresentam pouca variação na quantidade de dados transmitidos pelos dispositivos WBAN. No entanto, é preciso salientar que o escalonamento FIFO pode gerar congestionamento e atrasos de transmissão, caso a fila de pacotes a serem transmitidos se torne muito extensa. Nessas circunstâncias, outras técnicas de gerenciamento de filas, como o escalonamento de filas FQ, podem ser mais apropriadas para assegurar um desempenho adequado da rede.

Caso a aplicação envolva diferentes tipos de pacotes ou níveis distintos de prioridade, o escalonamento de filas FQ pode ser mais adequado do que o escalonamento FIFO. Em uma rede WBAN que transmita dados variados, como dados de sensores e dados de controle, pode ser necessário priorizar os pacotes de controle para garantir a execução ágil e precisa das ações de controle. Por exemplo, um dispositivo de monitoramento de pressão arterial pode coletar dados de pressão arterial e ajustar automaticamente a dosagem de medicamentos para controlar a pressão arterial. Esses dispositivos geralmente contam com pacotes de controle de alta prioridade para garantir a transmissão imediata e contínua das informações de dosagem de medicamentos, a fim de preservar a saúde e a segurança do paciente.

No entanto, é importante observar que a implementação do escalonamento FQ pode ser mais complexa do que a do escalonamento FIFO, exigindo mais recursos e tempo de processamento para o gerenciamento das filas e divisão da largura de banda. Por essa razão, a escolha entre essas técnicas dependerá das necessidades específicas da aplicação, como o tipo de pacotes transmitidos e a importância da ordem de chegada dos pacotes.

A técnica DRR demonstrou um desempenho superior à perda de pacotes em comparação às técnicas FIFO e FQ, como evidenciado na tabela 5, em que a taxa de pacotes perdidos se manteve em torno de 4%.

Outro aspecto relevante a ser destacado é que essa técnica foi a única capaz de transmitir todos os pacotes de grupos de determinados tamanhos, como, por exemplo, os pacotes de 8 *bytes* e 16 *bytes*, em que a taxa de perda de pacotes foi de 0% e uma taxa de apenas 1,73% para perda de pacotes de tamanho de 32 *bytes* conforme demonstrado na tabela 4.

Esta particularidade do escalonamento de filas DRR decorre da priorização da transmissão de pacotes de menor tamanho, o que resulta em uma menor taxa de perda nesses casos. Além disso, a alocação de largura de banda para esses grupos de pacotes com tamanho reduzido foi bem planejada para garantir a ausência de perda de pacotes.

É pertinente destacar que ambas as técnicas de escalonamento de filas FQ e DRR apresentaram taxas de perda de pacotes semelhantes para pacotes de tamanho maiores, que foram os casos em que os maiores percentuais de perda foram observados tanto na tabela 3 quanto na tabela 4. Essa tendência pode ser justificada pelo fato de que pacotes maiores geralmente requerem mais tempo para serem transmitidos, resultando em maior acúmulo na fila e, conseqüentemente, maior probabilidade de perda de pacotes.

Além disso, é fundamental ressaltar que no escalonamento de filas FQ, o tamanho dos pacotes guarda uma relação direta com o valor do tempo médio de chegada à fila (FAT), já que pacotes maiores geralmente exigem mais tempo para serem transmitidos, resultando em um valor de FAT mais elevado. Porém, a priorização dos pacotes com menor valor de FAT no escalonamento de filas FQ pode ocasionar a perda de pacotes maiores se estes apresentarem um valor de FAT superior aos demais na fila. Por outro lado, o escalonamento de filas DRR utiliza um tamanho de déficit fixo, que pode não ser adequado para todos os tamanhos de pacotes, o que pode levar a uma alocação inadequada de largura de banda para pacotes maiores. Esse comportamento pode resultar em um aumento contínuo na fila de espera do dispositivo e, conseqüentemente, no descarte de alguns pacotes para evitar a sobrecarga da fila, o que pode aumentar a taxa de perda de pacotes.

Embora o escalonamento de filas DRR tenha sido eficaz na redução da perda de pacotes, sua aplicação em dispositivos de WBAN pode ser limitada devido a diversas restrições. É importante destacar que a implementação do escalonamento de filas DRR pode resultar em alto consumo de recursos computacionais, o que pode sobrecarregar o processador e esgotar a bateria, impactando a vida útil do dispositivo.

Além disso, a implementação do escalonamento de filas DRR pode ser uma tarefa complexa e requerer habilidades avançadas de programação, o que pode ser um desafio para dispositivos WBAN que são projetados para serem simples e intuitivos. Dispositivos WBAN são concebidos para serem compactos e leves, com recursos limitados de memória e largura de banda. A implementação do escalonamento de filas DRR pode exigir recursos adicionais, como espaço de memória e largura de banda, que podem não estar prontamente disponíveis em dispositivos WBAN. Em síntese, a aplicação do escalonamento de filas DRR pode ser desafiadora e não ser adequada para todos os aplicativos de WBANs, especialmente aqueles que têm recursos limitados ou requisitos específicos de QoS.

## 5 CONCLUSÃO

O presente estudo examinou os padrões de comunicação utilizados em Redes de Área Corporal sem Fio (WBANs), com destaque para as especificações IEEE 802.15.4, IEEE 802.15.6 e BLE. As características técnicas de cada protocolo foram apresentadas, bem como suas aplicações, vantagens e desafios associados à comunicação em redes de sensores corporais. Adicionalmente, foram discutidos quatro simuladores distintos empregados para simular a comunicação via BLE, destacando suas principais características e limitações.

Por fim, foram realizadas simulações com o intuito de comparar diferentes técnicas de escalonamento de filas em dispositivos WBAN, utilizando a tecnologia BLE como padrão de comunicação e tendo como métrica de desempenho a perda de pacotes. A seleção da técnica de gerenciamento de fila mais adequada em um ambiente de rede WBAN é um desafio complexo, em virtude das limitações inerentes aos dispositivos, tais como recursos de processamento, energia e largura de banda. Nesse sentido, a utilização de várias técnicas de escalonamento de filas em cenários simulados pode ser uma abordagem efetiva para avaliar o desempenho e comparar diferentes abordagens de gerenciamento de fila sob condições controladas. Esse método pode fornecer informações valiosas para determinar a técnica de gerenciamento de fila mais apropriada para um cenário específico de rede WBAN, bem como identificar possíveis problemas de desempenho que possam surgir.

O estudo objetivou comparar a eficácia de três técnicas de escalonamento de filas na transmissão de pacotes em uma rede WBAN. Os resultados mostraram que as técnicas FIFO e FQ apresentaram uma taxa de perda de pacotes superior a 6%. Entretanto, a técnica FQ demonstrou ter uma correlação direta entre o tamanho do pacote e a taxa de perda de pacotes, enquanto o FIFO não apresentou tal correlação. Sendo assim, a utilização do FIFO é recomendada para aplicações que exigem a transmissão dos pacotes em ordem de chegada, enquanto o FQ é mais indicado para situações que envolvem diferentes tipos de pacotes ou níveis distintos de prioridade.

De maneira geral, ambas as técnicas de escalonamento apresentam vantagens e desvantagens, dependendo do cenário de uso. No entanto, em relação à técnica DRR, os resultados indicaram um melhor desempenho na redução da perda de pacotes, especialmente para pacotes de menor tamanho, com uma taxa de perda de 0% para grupos de determinados tamanhos de pacotes. Contudo, a implementação da técnica de escalonamento de filas DRR pode ser limitada em dispositivos WBAN, devido ao alto consumo de recursos computacionais e à complexidade da programação, o que pode não ser adequado para todos os aplicativos de WBANs, especialmente aqueles com recursos limitados ou

requisitos específicos de QoS.

Com o objetivo de contribuir para futuros estudos acadêmicos, é altamente recomendável investigar outras técnicas de gerenciamento de fila em dispositivos WBAN que empregam o protocolo BLE, além das técnicas FIFO, FQ e DRR. O foco desta pesquisa é identificar a técnica mais adequada para diferentes cenários de uso, utilizando critérios de avaliação variados, tais como eficiência energética, escalabilidade, capacidade de gerenciamento de tráfego e adaptabilidade a diferentes requisitos de largura de banda, dentre outros. É importante destacar que a avaliação das técnicas de gerenciamento de fila não pode se restringir apenas à perda de pacotes, mas deve considerar outros fatores relevantes para a otimização do desempenho da rede WBAN. Portanto, esta pesquisa pode contribuir significativamente para o avanço do desenvolvimento de WBANs baseadas em BLE e para aprimorar a qualidade dos serviços oferecidos.

Com esse intuito, uma sugestão de trabalho futuro seria um estudo que objetiva melhorar o gerenciamento de filas em dispositivos WBAN que utilizam os protocolos IEEE 802.15.4 e IEEE 802.15.6. A pesquisa poderá investigar diferentes abordagens de escalonamento de filas, a fim de determinar as técnicas adequadas às características específicas de cada aplicação. Para tanto, podem ser simulados vários cenários de rede, empregando métricas de desempenho relevantes, tais como perda de pacotes, eficiência energética e atraso de transmissão, entre outras. As técnicas investigadas podem ser comparadas com aquelas utilizadas em dispositivos WBAN que empregam a tecnologia BLE.

## REFERÊNCIAS

- [1] FERREIRA, V. C. et al. Redes corporais sem fio e suas aplicações em saúde. *Sociedade Brasileira de Computação*, 2018.
- [2] RODRIGUES, J. J. et al. Enabling technologies for the internet of health things. *Ieee Access*, IEEE, v. 6, p. 13129–13141, 2018.
- [3] MEDEIROS, A. F. T. et al. Solução de tecnologia móvel, para o monitoramento de crianças e idosos, com base em uma rede de sensores sem fio (wban). Universidade Estadual da Paraíba, 2018.
- [4] CAVALLARI, R. et al. A survey on wireless body area networks: Technologies and design challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, IEEE, v. 16, n. 3, p. 1635–1657, 2014.
- [5] GIOVANELLI, D.; MILOSEVIC, B.; FARELLA, E. Bluetooth low energy for data streaming: Application-level analysis and recommendation. In: IEEE. *2015 6th International Workshop on Advances in Sensors and Interfaces (IWASI)*. [S.l.], 2015. p. 216–221.
- [6] RODGERS, M. M.; PAI, V. M.; CONROY, R. S. Recent advances in wearable sensors for health monitoring. *IEEE Sensors Journal*, IEEE, v. 15, n. 6, p. 3119–3126, 2014.
- [7] MOVASSAGHI, S. et al. Wireless body area networks: A survey. *IEEE Communications surveys & tutorials*, IEEE, v. 16, n. 3, p. 1658–1686, 2014.
- [8] LI, H.-B. IEEE 802.15. 6 regulation subcommittee report. *IEEE802-15-08-0034-05-0006*, 2008.
- [9] BEZERRA, A. W. L. Redes wi-fi i: medidor de potência de antenas planares na faixa ism (2, 4ghz). *Medidor de Potência de Antenas Planares na Faixa ISM (2, 4GHz)*, 2017.
- [10] LATRÉ, B. et al. A survey on wireless body area networks. *Wireless networks*, Springer, v. 17, n. 1, p. 1–18, 2011.
- [11] BRADLEY, P. D. Implantable ultralow-power radio chip facilitates in-body communications. *RF DESIGN*, CARDIFF PUBLISHING COMPANY INC, v. 30, n. 6, p. 20, 2007.
- [12] ALLEN, B. et al. Ultra wideband: Applications, technology and future perspectives. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON CONVERGENT TECHNOLOGIES (IWCT). [S.l.], 2005.
- [13] BAE, J. et al. The signal transmission mechanism on the surface of human body for body channel communication. *IEEE Transactions on microwave theory and techniques*, IEEE, v. 60, n. 3, p. 582–593, 2012.

- [14] ZHEN, B. et al. Tg6 technical requirements document (trd) ieee p802. 15-08-0644-09-0006. *Tech. Rep.*, 2008.
- [15] HOANG, D. C. et al. Thermal energy harvesting from human warmth for wireless body area network in medical healthcare system. In: IEEE. *2009 International conference on power electronics and drive systems (PEDS)*. [S.l.], 2009. p. 1277–1282.
- [16] BUREN, T. V. et al. Optimization of inertial micropower generators for human walking motion. *IEEE Sensors journal*, IEEE, v. 6, n. 1, p. 28–38, 2006.
- [17] BIANCHI, G. Performance analysis of the ieee 802.11 distributed coordination function. *IEEE Journal on selected areas in communications*, IEEE, v. 18, n. 3, p. 535–547, 2000.
- [18] HAYAJNEH, T. et al. A survey of wireless technologies coexistence in wban: analysis and open research issues. *Wireless Networks*, Springer, v. 20, n. 8, p. 2165–2199, 2014.
- [19] DONOHO, D. L. Compressed sensing. *IEEE Transactions on information theory*, IEEE, v. 52, n. 4, p. 1289–1306, 2006.
- [20] DIXON, A. M. et al. Compressed sensing system considerations for ecg and emg wireless biosensors. *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, IEEE, v. 6, n. 2, p. 156–166, 2012.
- [21] PROTECTION, I. C. on N.-I. R. et al. Icnirp statement on the “guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 ghz)”. *Health physics*, LWW, v. 97, n. 3, p. 257–258, 2009.
- [22] BHANDARI, S.; MOH, S. A priority-based adaptive mac protocol for wireless body area networks. *Sensors*, MDPI, v. 16, n. 3, p. 401, 2016.
- [23] ULLAH, S. et al. A study of mac protocols for wbans. *Sensors*, Molecular Diversity Preservation International (MDPI), v. 10, n. 1, p. 128–145, 2009.
- [24] MELO, P. Padrão ieee 802.15. 4-a base para as especificações zigbee, wirelesshart e miwi. *O Embarcados*, 2017.
- [25] ARAUJO, E. *Redes IEEE 802.15.4*. 2017. Disponível em: <[https://www.gta.ufrj.br/ensino/eel879/trabalhos\\_vf\\_2017\\_2/802154/index.html](https://www.gta.ufrj.br/ensino/eel879/trabalhos_vf_2017_2/802154/index.html)>. Acesso em: 23 de dez de 2022.
- [26] ASTRIN, A. Ieee standard for local and metropolitan area networks part 15.6: Wireless body area networks. *Standard, Institute of Electrical and Electronic Engineers, New York, USA. IEEE Std 802.15. 6*, 2012.
- [27] ASTRIN, A. W.; LI, H.-B.; KOHNO, R. Standardization for body area networks. *IEICE transactions on communications*, The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers, v. 92, n. 2, p. 366–372, 2009.
- [28] TRIGGS, C. W. R. *A little history of Bluetooth*. 2023. Disponível em: <<https://www.androidauthority.com/history-bluetooth-explained-846345/>>. Acesso em: 02 de maio de 2023.



- [29] BLUETOOTH Wireless Technology. Bluetooth SIG, 2022. Disponível em: <<https://www.bluetooth.com/learn-about-bluetooth/tech-overview/1>>. Acesso em: 10 de jan de 2023.
- [30] Bluetooth SIG. *Bluetooth Version Specifications and Documents*. 2023. Disponível em: <<https://www.bluetooth.com/specifications/specs/?types=specs-docs&keyword=Bluetooth&filter=>>>. Acesso em: 02 de maio de 2023.
- [31] PESSOA, L. *Introdução ao Bluetooth Smart (BLE)*. 2016. Disponível em: <<https://embarcados.com.br/bluetooth-smart-ble/>>. Acesso em: 15 de jan de 2023.
- [32] DEVICES need multiple ways to connect. Bluetooth SIG, 2023. Disponível em: <<https://www.bluetooth.com/learn-about-bluetooth/topology-options/>>. Acesso em: 15 de jan de 2023.
- [33] CHIRADEEP, B. *What Is Bluetooth LE? Meaning, Working, Architecture, Uses, and Benefits*. 2022. Disponível em: <<https://www.spiceworks.com/tech/iot/articles/what-is-bluetooth-le/>>. Acesso em: 15 de jan de 2023.
- [34] BLE ADVERTISING PRIMER. 2020. Disponível em: <<https://www.argenox.com/library/bluetooth-low-energy/ble-advertising-primer/>>. Acesso em: 19 de março de 2023.
- [35] BLE Beacons and Location Based Services. 2022. Disponível em: <<https://www.accton.com/Technology-Brief/ble-beacons-and-location-based-services/>>. Acesso em: 19 de março de 2023.
- [36] WOOLLEY, M. The bluetooth low energy primer. *Retrieved September*, v. 15, p. 2022, 2022.
- [37] CORE Specification 5.1. 2023. Disponível em: <<https://www.bluetooth.com/specifications/specs/core-specification-5-1/>>. Acesso em: 21 de março de 2023.
- [38] DECUIR, J. et al. Bluetooth 4.0: low energy. *Cambridge, UK: Cambridge Silicon Radio SR plc*, v. 16, p. 180, 2010.
- [39] MAIO, A. J. d. F. Bluetooth low energy para monitorização da postura no ciclismo. 2014.
- [40] PESSOA, L. *Visão Técnica do Bluetooth Smart*. 2023. Disponível em: <<https://embarcados.com.br/bluetooth-smart-visao-tecnica/>>. Acesso em: 22 de março de 2023.
- [41] INSTRUMENTS, T. *Bluetooth low energy: A technical overview*. 2017. Disponível em: <<https://www.ti.com/lit/an/swra475a/swra475a.pdf?ts=1680986166417>>. Acesso em: 09 de abril de 2023.
- [42] SIG, B. *Master Table of Contents & Compliance Requirements*. 2019. Disponível em: <<https://www.bluetooth.com/specifications/specs/core-specification-5-1/>>. Acesso em: 09 de abril de 2023.
- [43] SIG, B. *Data Package*. 2023. Disponível em: <<https://www.bluetooth.com/blog/bluetooth-low-energy-it-starts-with-advertising/>>. Acesso em: 24 de abril de 2023.

- [44] DUQUE, A. *Deep Dive into Bluetooth LE Security*. 2018. Disponível em: <<https://medium.com/rtone-iot-security/deep-dive-into-bluetooth-le-security-d2301d640bfc>>. Acesso em: 20 de jan de 2023.
- [45] GILLIS, A. S. *packet loss*. 2023. Disponível em: <<https://www.techtarget.com/searchnetworking/definition/packet-loss>>. Acesso em: 11 de abril de 2023.
- [46] TIPPARAJU, V. V. et al. Mitigation of data packet loss in bluetooth low energy-based wearable healthcare ecosystem. *Biosensors*, MDPI, v. 11, n. 10, p. 350, 2021.
- [47] BHARGAVA, M. *IoT Projects with Bluetooth Low Energy*. [S.l.]: Packt Publishing Ltd, 2017.
- [48] HORSTMANN, G. N. et al. Avaliação de mecanismos para gerenciamento da fila da interface do host controller bluetooth. Florianópolis, SC, 2002.
- [49] PARK, K. I. *QoS in packet networks*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2004. v. 779.
- [50] PAYER, H. et al. Scalability versus semantics of concurrent fifo queues. In: *Proceedings of the 30th annual ACM SIGACT-SIGOPS symposium on Principles of distributed computing*. [S.l.: s.n.], 2011. p. 331–332.
- [51] BU, G.; POTOP-BUTUCARU, M. Fifo order reliable convergecast in wban. *Computer Networks*, Elsevier, v. 146, p. 200–216, 2018.
- [52] ANDRADE, T. M. d. *Mapeamento sistemático sobre disciplinas de escalonamento em redes de computadores*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Pernambuco, 2017.
- [53] SO-IN, C.; JAIN, R.; TAMIMI, A.-K. A. Deficit round robin with fragmentation scheduling to achieve generalized weighted fairness for resource allocation in ieee 802.16 e mobile wimax networks. *Future Internet*, MDPI, v. 2, n. 4, p. 446–468, 2010.
- [54] YORDANOV, Y.; HAKA, A. Bluetooth low energy technology simulators. *The Journal of CIEES*, v. 2, n. 1, p. 7–11, 2022.
- [55] PETERSON, L.; DAVIE, B. *Computer Networks, Fifth Edition: A Systems Approach*. [S.l.]: Morgan Kaufmann Publishers Inc. 340 Pine Street, Sixth Floor San Francisco CA United States, 2011. Fifth Edition.
- [56] BLUETOOTH Market Update 2021. 2021. Disponível em: <<https://www.bluetooth.com/bluetooth-resources/2021-bmu/>>. Acesso em: 12 de março de 2023.
- [57] SIMULATION, N. *NS3 Projects*. 2020. Disponível em: <<https://networksimulationtools.com/ns3-projects/>>. Acesso em: 07 de abril de 2023.
- [58] OBAIDAT, M. S.; ZARAI, F.; NICOPOLITIDIS, P. *Modeling and simulation of computer networks and systems: Methodologies and applications*. [S.l.]: Morgan Kaufmann, 2015.

- [59] SIMULATOR), N.-. N. *ns-3.0.1: Pre-Alpha Design Review*. 2007. Disponível em: <<https://www.nsnam.org/docs/ns-3.0.1-documentation.pdf>>. Acesso em: 07 de abril de 2023.
- [60] RAMPFL, S. Network simulation and its limitations. In: CITESEER. *Proceeding zum seminar future internet (FI), Innovative Internet Technologien und Mobilkommunikation (IITM) und autonomous communication networks (ACN)*. [S.l.], 2013. v. 57.
- [61] MOSAIF, A.; RAKRAK, S. A li-fi based wireless system for surveillance in hospitals. *Biomedical Spectroscopy and Imaging*, IOS Press, v. 8, n. 3-4, p. 81–92, 2019.
- [62] SOUSA, J. J. F. *Autoria e simulação de cenários de redes em ns-3*. Tese (Doutorado) — Universidade da Madeira (Portugal), 2011.
- [63] MARQUES, J. P.; MORAES, R. M. de. Protocolo mac multicanal m2mmac melhorado para comunicação muitos-para-muitos em redes sem fio ad hoc. 2021.