



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO SUCKOW DA
FONSECA - CEFET/RJ
CURSO DE SISTEMAS DE INFORMAÇÃO

MÉTODOS ALTERNATIVOS PARA COMUNICAÇÃO ENTRE DISPOSITIVOS DE SISTEMAS MULTIAGENTES EMBARCADOS

ANTONIO HENRIQUE GOMES FOURNIER LAURIA

Orientador: Prof. Me. Nilson Mori Lazarin
CEFET/RJ Campus Nova Friburgo

Coorientador: Prof^ª. Dr^ª. Helga Dolorico Balbi
CEFET/RJ Campus Nova Friburgo

NOVA FRIBURGO
AGOSTO DE 2025

ANTONIO HENRIQUE GOMES FOURNIER LAURIA

**MÉTODOS ALTERNATIVOS PARA COMUNICAÇÃO
ENTRE DISPOSITIVOS DE SISTEMAS MULTIAGENTES
EMBARCADOS**

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) apresentado ao Curso de Sistemas de Informação do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Sistemas de Informação.

Orientador: Prof. Me. Nilson Mori Lazarin
CEFET/RJ Campus Nova Friburgo

Coorientador: Prof^a. Dr^a. Helga Dolorico Balbi
CEFET/RJ Campus Nova Friburgo


CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO SUCKOW DA
FONSECA - CEFET/RJ
CURSO DE SISTEMAS DE INFORMAÇÃO
NOVA FRIBURGO
AGOSTO DE 2025

MÉTODOS ALTERNATIVOS PARA COMUNICAÇÃO ENTRE DISPOSITIVOS DE
SISTEMAS MULTIAGENTE EMBARCADOS

Monografia apresentada ao Curso de Sistemas de Informação do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel.

ANTONIO HENRIQUE GOMES FOURNIER LAURIA

Banca Examinadora:


Documento assinado digitalmente
 **NILSON MORI LAZARIN**
Data: 02/09/2025 10:35:59-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Presidente, Prof. Me. Nilson Mori Lazarin (CEFET/RJ) (Orientador(a))

HELGA DOLORICO
BALBI:09599358783

Assinado de forma digital por HELGA
DOLORICO BALBI:09599358783
Dados: 2025.08.28 17:15:24 -03'00'

Prof^ª. Dr^ª. Helga Dolorico Balbi (CEFET/RJ) (Co-orientadora)



Prof. Dr. André Chaves Mendes (Politécnico de Portalegre)



Assinado por: André Chaves
Mendes
Identificação: 8118033265
Data: 2025-08-28 às 19:59:35

Assinado por: Carlos Eduardo Pantoja
Num. de Identificação: BI33441112
Data: 01-09-2025 10:45:34 -03:00



Prof. Dr. Carlos Eduardo Pantoja (CEFET/RJ)

PAULO HENRIQUE WERLY
GUALBERTO:01912873770

Assinado de forma digital por PAULO
HENRIQUE WERLY GUALBERTO:01912873770
Dados: 2025.08.28 16:08:31 -03'00'

Prof. Me. Paulo Henrique Werly Gualberto (CEFET/RJ)

NOVA FRIBURGO
AGOSTO 2025

L384m Lauria, Antonio Henrique Gomes Fournier.
Métodos alternativos para comunicação entre dispositivos de
Sistemas Multiagentes Embarcados. / Antonio Henrique Gomes
Fournier Lauria. – Nova Friburgo, RJ : 2025.
xiii, 63f.: il. (color.) : em PDF.

Trabalho de Conclusão de Curso (Curso e Sistemas de
Informação) - Centro Federal de Educação Tecnológica Celso
Suckow da Fonseca, 2025.
Bibliografia: f. 57-63.
Orientador: Nilson Mori Lazzarin.
Coorientador: Helga Dolorico Balbi

1. Sistemas de Informação. 2. Benchmark. 3. Sistemas
Multiagentes Embarcados. 4. Radiofrequência. I. Lazzarin, Nilson
Mori (Orientador). II. Balbi, Helga Dolorico (Coorientador). III.
Título.

CDD 658.4038

Dedico este trabalho a Deus, Nossa Senhora e todos aqueles que estiveram do meu lado, me dando forças e ajudando nesta jornada de aprendizado.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus e também Sua Mãe, Nossa Senhora, por me abençoarem com os aprendizados e experiência que obtive em toda esta jornada de conclusão de curso. Fui agraciado também com um pai e um irmão que me apoiaram e incentivaram sempre. Apenas com a ajuda deles fui capaz de realizar testes em distâncias que não conseguiria sozinho. Minha mãe e as pessoas queridas a minha volta também se mostraram sempre otimistas, demonstrando confiança nas minhas capacidades que eu mesmo não tenho. Agradeço também ao meu orientador e coorientadora por me ajudarem a concretizar o conceito e obter os materiais necessários para a realização do trabalho.

Resumo

Muitos avanços têm sido realizados na área da Internet das Coisas (IoT), com o objetivo de otimizar processos industriais e ampliar a capacidade de processamento de dados. Nesse contexto, os Sistemas Multiagentes Embarcados (SMA) destacam-se como agentes capazes de atuar de forma autônoma, baseados em crenças, desejos e intenções, interagindo com o ambiente físico enquanto mantêm capacidade de análise e tomada de decisão. Embora existam protocolos e propostas que viabilizam a formação de redes *ad hoc* mais complexas, a maioria das aplicações ainda se limita ao uso de uma única tecnologia de comunicação sem fio, especificamente o módulo RF RX/TX. Com o intuito de ampliar as opções de comunicação entre os SMA embarcados, este trabalho apresenta um *benchmark* de desempenho de diferentes tecnologias de comunicação sem fio, utilizando métricas simples de transmissão ponto a ponto e *round-trip-time* (RTT). O objetivo é fornecer um guia abrangente sobre as vantagens e limitações de cada tecnologia analisada, considerando requisitos como velocidade de transmissão, alcance, taxa de perda de pacotes, desvio padrão, consumo energético e segurança. O estudo consolida os resultados obtidos em testes realizados com diferentes distâncias e tamanhos de *payload*. As melhores latências foram obtidas pelo nRF24L01 e BLE, e as piores foram observadas no LoRa. A taxa de sucesso de transmissão foi de 100% para nRF24L01, LoRa, BLE e HC-05 (com apenas uma perda de pacote), enquanto RF e, principalmente, o XBee apresentaram instabilidades e perdas de pacotes. Os módulos LoRa, nRF24L01 e BLE apresentaram menor *jitter*, enquanto HC-05, RF e XBee apresentaram maior *jitter* (com desvios de até 5 segundos para o XBee). As distâncias máximas de transmissão foram de 20 m para BLE, 64 m para o HC-05, 124 m para o nRF24L01, 256 m para RF e XBee, e 2600 m para o LoRa.

Palavras-chave: benchmark; sistemas multiagentes embarcados; radiofrequência; LoRa; HC-05; nRF24L01; XBee

Abstract

Many advances have been made in the field of the Internet of Things (IoT), aiming to optimize industrial processes and expand data processing capacity. In this context, Embedded Multi-Agent Systems (MAS) stand out as autonomous agents capable of acting based on beliefs, desires, and intentions, interacting with the physical environment while maintaining analysis and decision-making capabilities. Although there are protocols and proposals that enable the formation of more complex *ad hoc* networks, most applications are still limited to using a single wireless communication technology, specifically the RF RX/TX module. In order to broaden the communication options among embedded MAS, this work presents a performance *benchmark* of different wireless communication technologies, using simple point-to-point transmission and round-trip time (RTT) metrics. The objective is to provide a comprehensive guide to the advantages and limitations of each analyzed technology, considering requirements such as transmission speed, range, packet loss rate, standard deviation, energy consumption, and security. The study consolidates the results obtained from tests carried out with different distances and *payload* sizes. The best latencies were achieved by the nRF24L01 and BLE, while the worst were observed with LoRa. The transmission success rate was 100% for nRF24L01, LoRa, BLE, and HC-05 (with only one lost packet), while RF and especially XBee showed instability and packet losses. The LoRa, nRF24L01, and BLE modules showed lower *jitter*, while HC-05, RF, and XBee presented higher *jitter* (with deviations of up to 5 seconds for the XBee). The maximum transmission distances were 20 m for BLE, 64 m for HC-05, 124 m for nRF24L01, 256 m for RF and XBee, and 2600 m for LoRa.

Keywords: benchmark; embedded multi-agent systems; radio frequency; LoRa; HC-05; nRF24L01; XBee

Lista de Figuras

Figura 1 – Figura demonstrando a arquitetura de um SMA embarcado em camadas no contexto do protocolo proposto (JESUS <i>et al.</i> , 2023).	15
Figura 2 – Diagrama de representação da unidade de interfaceamento entre USB e os diferentes módulos de transmissão.	18
Figura 3 – Diagrama da sequência de comunicação.	19
Figura 4 – Exemplo de protótipo implementando a lógica exposta na Figura 2, com interfaceamento USB/Transceptor de um LoRa E32-433T20D (interface UART) integrado a um Arduino Mega e encapsulado em container plástico (caixa de sorvete).	20
Figura 5 – Imagens do Local A para testes de 8 a 32 metros com linha de visão e sem interferência de tráfego.	22
Figura 6 – Imagens de satélite do Local B para testes de aproximadamente 64 e 128 metros com linha de visão e sem interferência de tráfego.	23
Figura 7 – Imagens de satélite do Local C para testes de aproximadamente 256 metros com linha de visão e sem interferência de tráfego.	23
Figura 8 – Imagens de satélite do Local D para testes de aproximadamente 1300 metros com linha de visão.	24
Figura 9 – Imagens de satélite do Local E para testes de aproximadamente 2600 metros com linha de visão.	24
Figura 10 – Gráficos de demonstração para facilitar interpretação dos dados.	30
Figura 11 – Gráficos dos resultados obtidos do RF.	32
Figura 12 – Protótipo do RF.	33
Figura 13 – Protótipo do BLE.	34
Figura 14 – Gráficos dos resultados obtidos do BLE.	35
Figura 15 – Protótipo do XBee.	36
Figura 16 – Gráficos dos resultados obtidos do XBee.	38
Figura 17 – Protótipo do Bluetooth.	39
Figura 18 – Gráficos dos resultados obtidos do Bluetooth.	40
Figura 19 – Protótipo do nRF24L01.	42
Figura 20 – Gráficos dos resultados obtidos do nRF24L01.	43
Figura 21 – Protótipo do LoRa.	44
Figura 22 – Gráficos dos resultados obtidos do LoRa.	46

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Configuração do módulo multiagente de gerenciamento de rede.	13
Tabela 2 – Configuração do emulador de dispositivos ChirpStack.	13
Tabela 3 – Ambientes utilizados de acordo com as distâncias testadas.	22
Tabela 4 – Interfaces de comunicação utilizadas por módulo.	29
Tabela 5 – Resultados do segundo teste com o módulo RF.	31
Tabela 6 – Resultados dos testes com o módulo BLE.	34
Tabela 7 – Resultados dos testes com o módulo XBee.	37
Tabela 8 – Resultados dos testes com o módulo Bluetooth.	41
Tabela 9 – Níveis de potência em dBm (decibel-milliwatt) de transmissão configuráveis para diferentes módulos nRF24L01.	41
Tabela 10 – Resultados dos testes com o módulo nRF24L01.	42
Tabela 11 – Resultados dos testes com o módulo LoRa.	45
Tabela 12 – Resumo comparativo dos resultados dos testes conforme as métricas estabelecidas e a maior marca de distância que cada tecnologia foi capaz de comunicar.	49
Tabela 13 – Resumo comparativo das tecnologias pela bibliografia <i>online</i>	49
Tabela 14 – Tecnologias mais adequadas por cenário, segundo os requisitos e resultados.	50

Lista de Abreviaturas e Siglas

ACIDNet	<i>Autonomous Cognitive Industrial Decentralized Network</i> (Rede Industrial Cognitiva Autônoma Descentralizada)
AFD	Autômato Finito Determinístico
AIoT	<i>Artificial Intelligence of Things</i> (Inteligência Artificial das Coisas)
ASK	<i>Amplitude Shift Keying</i>
ATT	<i>Attribute Protocol</i> (Protocolo de Atributo)
BDI	<i>Belief-Desire-Intention</i> (Crença-Desejo-Intenção)
BLE	<i>Bluetooth Low Energy</i>
BW	<i>Bandwidth</i> (Largura de Banda)
CCA	<i>Clear Channel Assessment</i> (Avaliação de Canal Livre)
CPS	<i>Cyber-Physical System</i> (Sistema Ciberfísico)
CR	<i>Coding Rate</i> (Taxa de Codificação)
CSMA-CA	<i>Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance</i> (Acesso Múltiplo por Detecção de Portadora com Prevenção de Colisão)
DSSS	<i>Direct Sequence Spread Spectrum</i> (Espalhamento Espectral por Sequência Direta)
GATT	<i>Generic Attribute Profile</i> (Protocolo de Atributo Genérico)
IA	Inteligência Artificial
IIoT	<i>Industrial Internet of Things</i> (Internet das Coisas Industrial)
IoS	<i>Internet of Services</i> (Internet dos Serviços)
IoT	<i>Internet of Things</i> (Internet das Coisas)
IWSAN	<i>Industrial Wireless Sensor and Actuator Networks</i> (Redes Wireless de Sensores e Atuadores Industriais)
LNA	<i>Low-Noise Amplifier</i> (Amplificador de Baixo Ruído)
LoRa	<i>Long Range</i> (Longo Alcance)

MAC	<i>Media Access Control</i> (Controle de Acesso ao Meio)
MCU	<i>Microcontroller Unit</i> (Unidade Microcontroladora)
OOK	<i>On-Off Keying</i>
PA	<i>Power Amplifier</i> (Amplificador de Potência)
PDU	<i>Protocol Data Unit</i> (Unidade de Dados de Protocolo)
RF	Radiofrequência
RSSI	<i>Received Signal Strength Indicator</i> (Indicador de Intensidade do Sinal Recebido)
RTT	<i>Round-Trip-Time</i> (Tempo de Ida e Volta)
SF	<i>Spreading Factor</i> (Fator de Espalhamento)
SMA	Sistema Multiagente
SNR	<i>Signal-to-Noise Ratio</i> (Razão Sinal-Ruído)
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i> (Interface Periférica Serial)
TDMA	<i>Time Division Multiple Access</i> (Acesso Múltiplo por Divisão de Tempo)
UART	<i>Universal Asynchronous Receiver-Transmitter</i> (Receptor-Transmissor Assíncrono Universal)
Wi-Fi	<i>Wireless Fidelity</i> (Fidelidade Sem Fio)

Sumário

1 – Introdução	1
1.1 Problema	3
1.2 Objetivos	4
1.2.1 Cenários Hipotéticos	5
1.3 Organização do Trabalho	6
2 – Fundamentação Teórica	7
2.1 IIoT: a Indústria 4.0	7
2.2 SMAs e o Modelo BDI	9
2.3 <i>Firmware e Hardware</i>	10
3 – Trabalhos Relacionados	11
3.1 Alocação Eficiente de Recursos <i>Online</i> em Redes LoRaWAN de Larga Escala	12
3.2 Trabalhos Complementares	14
3.2.1 Um Protocolo para Comunicação entre SMAs Embarcados	14
3.2.1.1 Integração com Agentes BDI e Arquitetura ARGO	16
3.2.1.2 Considerações	16
3.2.2 Middleware para comunicação em Embedded MAS com falta de conectividade	16
4 – Metodologia	18
4.1 Realização dos Testes	19
4.2 Parâmetros dos Pacotes de Teste	20
4.3 Distâncias Avaliadas	21
4.3.1 Ambientes de Teste	21
4.4 Critérios de Avaliação	25
4.5 Tecnologias Utilizadas	25
4.5.1 LoRa 433 MHz e 915 MHz	26
4.6 Interfaces de Transmissão	27
4.6.1 Interface UART	28
4.6.1.1 Implementação na MCU	28
4.6.2 Interface SPI (nRF24L01)	28
4.6.3 Interface dos Módulos RF 433 MHz	28
4.6.4 Resumo das Interfaces	29
5 – Análise dos Resultados	30

5.1	Radiofrequência (RF)	31
5.2	BLE	33
5.3	XBee	36
5.4	Bluetooth	39
5.5	nRF24L01	41
5.6	LoRa	44
5.7	Comparativo Geral	46
5.7.1	Desempenho Médio de Latência	47
5.7.2	Variação Temporal (Desvio Padrão)	47
5.7.3	Taxa de Sucesso de Transmissão	47
5.7.4	Consumo de Energia	48
5.7.5	Segurança e Recursos de Rede	48
5.7.6	Resumo Comparativo Geral	48
5.8	Análise dos cenários propostos	49
5.8.1	Adequação por tipo de aplicação	49
5.8.2	Resumo de compatibilidade entre cenários e tecnologias	50
5.8.3	Considerações finais sobre as análises	50
5.9	Reprodutibilidade	51
6	– Conclusão	52
6.1	Desafios Enfrentados	53
6.1.1	Desafios com o nRF24L01	53
6.1.2	Desafios regulatórios com LoRa em 433 MHz vs 915 MHz	54
6.2	Trabalhos Futuros	54
	Referências	57

1 Introdução

A Internet das Coisas (IoT) é um novo paradigma da tecnologia, no qual a Internet passa a abarcar objetos do dia-a-dia (MAGRANI, 2018). Com ela, processos tradicionalmente estáticos ganham dinamismo: decisões que antes se baseavam em medições esporádicas passam a ser fundamentadas em análises contínuas, permitindo ajustes automáticos e precisos nos sistemas, tudo isso sem a intervenção direta e constante do ser humano (HERMANN; PENTEK; OTTO, 2016; ASHTON *et al.*, 2009). Entretanto, sistemas distribuídos que dependem de infraestruturas centralizadas podem gerar um grande número de dados. Neste contexto, surgem conceitos como *Edge Computing/Fog Computing*, que busca levar o processamento de dados para a mais próximo dos dispositivos geradores de dados (IWANICKI, 2018).

A Indústria 4.0 surge como o efeito da aplicação da Internet das Coisas Industriais (IIoT) no contexto industrial, visando a melhoria dos processos por meio de monitoramento, previsão de manutenção, supervisão e controle (CALVO *et al.*, 2021). Uma forma de utilização destes dispositivos é através de Redes Wireless de Sensores e Atuadores Industriais (IWSAN). A vantagem das IWSANs está na mobilidade, baixa manutenção e praticidade de planejamento da instalação, e já são usadas com sucesso em aplicações de monitoramento e funcionalidades não críticas, aonde pequenas imprecisões são toleradas (BRANZ *et al.*, 2020; SEFERAGIĆ *et al.*, 2020).

A Inteligência Artificial (IA) ultrapassa as limitações de dispositivos programados para seguir apenas um conjunto rígido de regras. Sistemas tradicionais operam de forma simples, dependendo de infraestruturas centrais para processamento e controle. A IA permite que máquinas aprendam com dados, adaptem seu comportamento a novos contextos e tomem decisões com base em padrões complexos e mutáveis (LEMOS; CARVALHO; SANTOS, 2023; NAGATY, 2023).

O termo AIoT (*Artificial Intelligence of Things*) surge ao conjugar as IAs com dispositivos IoT. Sua pertinência vem de encontro com problemas como o excesso de dados brutos, a necessidade de processamento em tempo real e centralização de decisões. Algoritmos de aprendizado de máquina podem, por exemplo, identificar anomalias em linhas de produção antes que um defeito ocorra, prever demandas de energia com base em comportamentos históricos e climáticos, ou até mesmo sugerir rotas mais eficientes de distribuição de mercadorias. Essa sinergia entre IoT e IA amplifica a capacidade de resposta dos sistemas, aumentam a escalabilidade, segurança e reduzem o *downtime* em caso de falhas (ZHANG; TAO, 2021; NAGATY, 2023).

Sistemas Multiagente (SMAs), que são uma subárea da IA, consistem em um con-

junto de agentes físicos ou virtuais que são pró-ativos, reativos, sociais, capazes de se organizar e adaptar. Agentes são definidos não como meros observadores ou recipientes passivos de ações tomadas por outra entidade (WOOLDRIDGE, 2009). Entretanto, esta arquitetura apresenta problemas em um contexto altamente mutável. O problema do planejamento surge em gerar sequências de planos para múltiplos agentes com possíveis contradições e interações complexas em um ambiente mutável (EVERTSZ *et al.*, 2004).

O conceito de BDI (*Belief-Desire-Intention*) é introduzido para proporcionar a esses agentes crenças e motivações (*Belief*), desejos e necessidades (*Desire*), intenções e expectativas (*Intention*). A vantagem destes sistemas é a adaptabilidade do agente ao ambiente. Isso é alcançado através da capacidade de alterar o seu curso de ação em tempo real sem interrupção do *software* (GEORGEFF *et al.*, 1999; EVERTSZ *et al.*, 2004; VELLEMAN, 1991).

Estes agentes são considerados embarcados quando se encontram integrados a um dispositivo ou produto para realizar uma função específica dedicada e otimizada, geralmente operando como parte de um sistema maior. Para estes SMAs com BDI embarcados desempenharem suas funções, é ideal que haja uma forma de comunicação entre agentes. Para que os agentes embarcados cooperem de forma eficiente, a comunicação entre eles é um requisito importante. Soluções da área de SMAs embarcados propõem um protocolo de comunicação via radiofrequência (RF), como a faixa de 433 MHz, para comunicação independente de infraestrutura (JESUS *et al.*, 2023). Embora sirva primariamente o propósito de proporcionar comunicação em casos de emergência, pode também ser usados para IWSANs.

Na IIoT, SMAs com BDI embarcados permitem que dispositivos e sistemas se comportem como entidades autônomas colaborativas, otimizando o uso de recursos e melhorando a resposta a eventos em tempo real. Estes sistemas oferecem resiliência, flexibilidade e inteligência distribuída, tornando-os ideais para a automação industrial avançada. Novos equipamentos instalados em linha de produção, por exemplo, podem rapidamente se adequar às regras e configurações através da comunicação com outros equipamentos no ambiente. Uma linha de montagem pode reagir de forma dinâmica a fatores externos como a disponibilidade de materiais em estoque, substituir um equipamento defeituoso ou trabalhar em torno de sua ausência (FURIO; BRITO; MORATELLI, 2024; EVERTSZ *et al.*, 2004).

Para SMAs de larga escala, não basta apenas programar como os agentes cumprirão os seus objetivos. De acordo com Mascardi *et al.*, é necessário definir como o ambiente, os agentes e sua organização vão interagir para otimizar seu comportamento global (MASCARDI *et al.*, 2020). No entanto, diferentes aplicações impõem diferentes requisitos de topologia para as redes de comunicação, como latência aceitável, confiabilidade, cobertura e segurança (CALVO *et al.*, 2021; IWANICKI, 2018; SEFERAGIĆ *et al.*, 2020). Diante disso,

este trabalho propõe investigar e comparar tecnologias sem fio aplicáveis à comunicação entre agentes em SMAs embarcados. O objetivo é oferecer alternativas viáveis para diversos cenários, ampliando as possibilidades de implementação de sistemas inteligentes distribuídos em dispositivos IoT.

1.1 Problema

Na prática, seguir o ideal de inteligência urbana (*smart cities*) (SILVA; KHAN; HAN, 2018), industrial (*smart industries*) (PREUVENEERS; ILIE-ZUDOR, 2017; SHAHZAD *et al.*, 2020) e residencial (*smart homes*) (EL-AZAB, 2021) apresenta diversos desafios. Em se tratando de redes dispositivos IoT sociáveis, a eficiência e confiabilidade da comunicação é de grande significância (IWANICKI, 2018). Caso os dispositivos desempenhem papel de lidar com emergências, é necessária segurança e garantia de funcionamento em caso de falha da infraestrutura durante emergências ou catástrofes (LAZARIN; PANTOJA; JESUS, 2021).

O trabalho de (KLEIN *et al.*, 2024) apresenta uma proposta de SMA embarcado para monitoramento de deslizamentos. Neste cenário, os SMAs que atuam percebendo o ambiente físico (*edge computing*) se comunicam sem fio com um outro dispositivo conectado à internet para então enviar os dados. Neste cenário, a rede se beneficia com um alcance maior de comunicação. A estrutura também é criticamente dependente do fornecimento de internet que pode ser afetada em caso de fortes chuvas ou catástrofe. Porém, as abordagens que utilizam redes Wi-Fi (*Wireless Fidelity*) infraestruturadas impõem limitações de alcance baseadas na área de alcance do *access-point* e disponibilidade da rede (GROSHEV *et al.*, 2023) – que não é uma garantia em emergências. As redes telefônicas (3G, 4G e 5G), por sua vez, dependem de infraestrutura existente e muitas regiões do Brasil carecem da presença de torres 5G. Um relatório global de confiabilidade realizado pela Opensignal colocou o Brasil em 29° de 38 países avaliados devido às interrupções de sinal ocasionais em larga escala e baixo desempenho das redes (BARBOSA, 2024). Há também o fator financeiro para ter acesso a planos que cobrem os dispositivos.

As VANETs (*Vehicular Ad hoc Networks*), por exemplo, são redes inter-veículo inteligentes voltadas para troca de informações entre nós V2V (*Vehicle-to-vehicle*) e V2I (*vehicle-to-infrastructure*) (CUNHA *et al.*, 2016). Neste cenário, a existência de uma rede de dispositivos independentes de infraestrutura central assumem características orgânicas de troca de informação, como em (LAZARIN; PANTOJA; JESUS, 2021). Os nós podem se comunicar para alerta de trânsito, informações sobre segurança e até mesmo lazer. Caso utilizem a rede móvel, estas redes gerarão um grande tráfego de dados, necessidade de servidores potentes e dependência da área de cobertura das empresas telefônicas (ZHANG; TAO, 2021).

A proposta de (KLEIN; LAZARIN, 2024) desenvolve um dispositivo de tecnologia vestível para monitoramento da saúde de idosos em instituições de longa permanência. Neste caso, embora não trate de SMAs embarcados, demonstra um exemplo em que sensores distribuídos são sensíveis a respostas rápidas. A velocidade de entrega é importante para a prestação de socorro, sendo mais importante do que um alcance de centenas de metros.

Em ambientes industriais, as questões são as mesmas. Infraestruturas cabeadas, uso de redes convencionais de WiFi e redes 5G impõem limitações, em especial nas realidades brasileiras, que possuem natureza heterogênea e variada no desenvolvimento tecnológico e acesso a recursos (CALVO *et al.*, 2021; PEREIRA; SIMONETTO, 2018; BARBOSA, 2024; TABOUN; BRENNAN, 2017).

Tendo em vista os exemplos acima, existem tecnologias de IoT que proporcionam alcance amplo – mesmo em regiões montanhosas ou urbanas – na banda de redes de baixa potência com ampla área (LPWAN - *Low Potency Wide Area Network*), porém com uma eficiência na transferência de grandes volumes de dados reduzida (IQBAL; ABDULLAH; SHABNAM, 2020). Outras tecnologias possuem alcance menor, mas permitem o tráfego de informação com mais velocidade (SCOTT, 2024). Entretanto, estas opções não foram documentadas para a área de AIoT e SMAs. Os métodos atuais de comunicação sem fio empregados para agentes embarcados, como o uso de RF (LAZARIN; PANTOJA; JESUS, 2021), apresentam limitações para determinadas aplicações que podem ser resolvidas com o emprego de uma tecnologia mais adequada para a implementação específica.

1.2 Objetivos

Tendo em vista o interesse das indústrias em IWSANs para diminuir os custos de infraestrutura e esforço de instalação (SEFERAGIĆ *et al.*, 2020; CALVO *et al.*, 2021), a capacidade dos agentes BDI embarcados de agir em ambientes mutáveis trazendo o processamento de dados e tomada de decisões para o próprio dispositivo (EVERTSZ *et al.*, 2004) e a disponibilidade de protocolos que permitam uma rede de comunicação entre estes agentes embarcados sem depender de infraestrutura centralizada (LAZARIN; PANTOJA; JESUS, 2021), soluções atuais para estes contextos exploram apenas uma tecnologia de comunicação sem fio: a RF.

A motivação desta proposta é explorar e encontrar alternativas para a comunicação baseada em RF, e para soluções centralizadas que dependem de infraestruturas caras, como a cabeada ou de 5G, apresentando dados concretos que auxiliam na escolha correta para cada caso. Por mais que a temática escolhida seja para ambientes industriais, que é a linha de elaboração teórica seguida, os estudos são úteis também para outros contextos. Os dados apresentados irão possibilitar uma maior adaptabilidade dos SMA com BDI em-

barcados para diferentes situações em termos de área de cobertura e volume de dados transferidos, relevantes para planejar topologias de rede, através do uso de soluções mais acessíveis e aplicáveis às diversas realidades brasileiras. O trabalho também apresenta tecnologias que possibilitem redes *ad hoc* independentes de grandes infraestruturas centralizadas (IWANICKI, 2018; LAZARIN; PANTOJA; JESUS, 2021; PEREIRA; SIMONETTO, 2018).

Para cada tecnologia de comunicação analisada, o trabalho irá demonstrar como estabelecer a comunicação entre Sistemas Multiagente (SMAs) e documentar seu desempenho por meio de testes experimentais (*benchmark*). Os dados serão coletados utilizando testes de tempo de ida e volta (RTT - *round-trip-time*) em milissegundos, nos quais se mede o tempo total de envio e recebimento de mensagens. Estes testes serão realizados para múltiplas distâncias e com tamanhos de *payload* variados. A partir dessas medições, serão obtidos o RTT, a taxa de perda de pacotes, o tempo médio, o desvio padrão (*jitter*), o melhor e o pior tempo registrados. Como consequência, será possível saber como estes resultados são afetados por distância e tamanho de *payload* para cada tecnologia, e o alcance máximo proporcionado por elas.

Adicionalmente, informações sobre segurança, consumo energético e suporte à formação de redes *ad hoc* serão analisadas com base nas documentações técnicas disponíveis. Os resultados obtidos servirão de base para justificar a escolha da tecnologia mais adequada à integração entre SMAs, promovendo a automação inteligente com foco em aplicações industriais, mas também aplicável a ambientes residenciais e cidades inteligentes.

Foram elaborados cinco cenários hipotéticos com requisitos de rede diferentes. O objetivo do trabalho será responder, com base nos dados obtidos por testes e informações online, a seguinte pergunta: **Quais tecnologias são adequadas para cada um dos cenários?**

1.2.1 Cenários Hipotéticos

Aqui serão apresentados cenários hipotéticos para serem analisados posteriormente na Seção 5.8. Estes cenários possuem três itens de exigências alinhados com os dados obtidos nos testes: alcance, latência e taxa de perda de pacotes.

Cenário 1: Linha de montagem com robôs colaborativos. Robôs e sensores coordenam operações de montagem fina, exigindo sincronização precisa. Os requisitos de rede são:

- Alcance de 10-30m;
- Latência muito baixa;
- Não deve haver perdas.

Cenário 2: Manutenção preditiva em motores industriais. Sensores monitoram

vibração, temperatura e corrente para prever falhas. Os requisitos de rede são:

- Alcance de 30–100 metros;
- Latência moderada;
- Tolera poucas perdas.

Cenário 3: Detecção de incêndio e gases tóxicos em planta química. Sensores espalhados monitoram temperatura e qualidade do ar. Os requisitos de rede são:

- Alcance de 100–300 metros;
- Latência baixa;
- Tolera poucas perdas.

Cenário 4: Monitoramento estrutural em galpões e silo. Dispositivos instalados em pontos fixos medem vibração, umidade e deformações.

- Alcance de 300 metros a 1 km;
- Tolerante a altas latências;
- Tolerância moderada a perdas.

Cenário 5: Coordenação de veículos autônomos em ambiente fabril. Veículos autônomos comunicam localização e intenção para evitar colisões e otimizar rotas.

- Alcance de 20-200 metros;
- Latência muito baixa;
- Tolerância mínima a perdas.

1.3 Organização do Trabalho

Para fins de estruturação deste presente estudo, o restante do documento encontra-se organizado da seguinte forma:

- Capítulo 2: apresenta a fundamentação teórica acerca dos temas que permeiam a pesquisa.
- Capítulo 3: apresenta os trabalhos relacionados
- Capítulo 4: apresenta a metodologia dos experimentos
- Capítulo 5: apresenta os resultados e considerações sobre cada tecnologia
- Capítulo 6: Conclusão e considerações finais

2 Fundamentação Teórica

Neste capítulo são explorados os principais conceitos necessários para compreender os fundamentos do estudo. São abordados temas relacionados à Indústria 4.0, programação de agentes inteligentes, protocolos de comunicação utilizados por esses agentes, a transmissão de dados via porta serial, bem como aspectos básicos do *firmware* e do *hardware* utilizados nos dispositivos embarcados.

Este trabalho apresenta um estudo voltado para uma área bem específica de SMAs com BDI embarcados para IWSANs. Portanto para a contextualização, será necessário partir de um ponto de mais comum entendimento, que é a IIoT, e ir construindo o embasamento para o benchmark à medida em que os conceitos chave são apresentados.

2.1 IIoT: a Indústria 4.0

O conceito de Indústria 4.0 representa uma nova etapa da evolução industrial, caracterizada pela integração de tecnologias digitais com os processos produtivos. Esta transformação é impulsionada pela convergência entre sistemas ciber-físicos (CPS), IoT, Internet de Serviços (IoS) e o conceito de fábricas inteligentes (*Smart Factories*). O desenvolvimento da Indústria 4.0 está alicerçado em princípios como interoperabilidade, virtualização, descentralização, capacidade de comunicação em tempo real, orientação a serviços e modularidade (HERMANN; PENTEK; OTTO, 2016).

Iwanicki (2018) discute os desafios e oportunidades que surgem ao adotar uma perspectiva de sistemas distribuídos para a implementação da IIoT. O autor destaca que as arquiteturas IIoT tradicionais, excessivamente centralizadas, não atendem às demandas de latência, escalabilidade e tolerância a falhas exigidas por ambientes industriais críticos. A solução proposta passa pela descentralização da inteligência, aproximando os dispositivos finais do processo decisório. Essa abordagem reduz a dependência de servidores centrais e permite uma maior autonomia operacional dos dispositivos de borda (*edge nodes*). Problemas clássicos de sistemas distribuídos, como consistência de estado, comunicação confiável e resiliência a falhas, são destacados como desafios centrais a serem superados (IWANICKI, 2018).

A proposta deste trabalho converge com as ideias defendidas por Iwanicki ao buscar a implementação de uma infraestrutura de comunicação que viabilize a cooperação direta entre agentes físicos embarcados, sem a necessidade de um ponto central de decisão. Ao analisar o desempenho de diferentes tecnologias de comunicação sem fio, o objetivo é justamente fornecer suporte técnico para o desenvolvimento de SMAs embarcados mais

resilientes, escaláveis e adequados a cenários industriais reais, alinhando-se assim aos princípios de sistemas distribuídos aplicados à IIoT.

Segundo Santos et al., a Indústria 4.0 proporciona oportunidades significativas, como o aumento da produtividade, maior eficiência no uso de recursos e a possibilidade de customização em massa. No entanto, a adoção dessa nova abordagem tecnológica traz também uma série de desafios, entre os quais se destacam a segurança cibernética, a padronização de interfaces e a capacitação de recursos humanos (SANTOS *et al.*, 2018).

No Brasil, a implantação da Indústria 4.0 encontra um cenário marcado por significativa heterogeneidade setorial. Como apontado por Pereira e Simonetto, as indústrias nacionais apresentam níveis bastante variados de maturidade tecnológica, com setores e empresas em diferentes estágios de preparação para a transição. Essa heterogeneidade demanda soluções customizadas para cada segmento industrial, não sendo viável uma abordagem única (PEREIRA; SIMONETTO, 2018).

Outro aspecto crítico destacado por Pereira e Simonetto é o risco de ampliação da desigualdade regional e setorial. Empresas de grande porte, com maior capacidade financeira e tecnológica, tendem a liderar a adoção das tecnologias da Indústria 4.0, enquanto pequenas e médias empresas enfrentam dificuldades estruturais, como a falta de infraestrutura adequada e de mão de obra qualificada. Esta realidade pode acentuar as disparidades já existentes no cenário industrial brasileiro, com reflexos diretos na competitividade e na inclusão digital de diferentes regiões e setores (PEREIRA; SIMONETTO, 2018).

Além dos aspectos estruturais, os desafios técnicos associados à integração de dispositivos heterogêneos e à escalabilidade dos sistemas industriais são pontos críticos a serem enfrentados (SEFERAGIĆ *et al.*, 2020; CALVO *et al.*, 2021). Iwanicki (IWANICKI, 2018) destaca que os Sistemas de IIoT devem ser concebidos como sistemas distribuídos de larga escala, com requisitos rigorosos de confiabilidade, disponibilidade e segurança. O autor ressalta que a coexistência entre infraestruturas legadas e novas soluções tecnológicas impõe uma complexidade adicional, exigindo arquiteturas capazes de lidar com a gestão distribuída e com a interoperabilidade entre diferentes domínios industriais.

No que se refere às tecnologias de comunicação sem fio, Calvo et al. (CALVO *et al.*, 2021) exemplificam a aplicação de soluções baseadas em módulos XBee 900 MHz para ambientes industriais. Os autores enfatizam que, apesar da reconhecida resistência do setor industrial em adotar tecnologias sem fio em aplicações críticas, soluções como o protocolo de Acesso Múltiplo por Divisão de Tempo (TDMA) implementado em seus sistemas demonstram ser capazes de atender requisitos de desempenho, mitigando preocupações relacionadas à confiabilidade e à qualidade de serviço. O TDMA é uma técnica de comunicação digital que permite que vários nós compartilhem um mesmo canal de comunicação dividindo-o em intervalos de tempo distintos, chamados de slots. Tal abordagem reforça o potencial dessas tecnologias em cenários industriais com restrições de mobilidade ou de

infraestrutura física para cabeamento.

2.2 SMAs e o Modelo BDI

O campo de SMA estuda as dinâmicas sociais entre agentes autônomos voltadas para a resolução de problemas distribuídos. A cooperação entre agentes permite que cenários complexos ou impossíveis de serem resolvidos de forma isolada sejam solucionados por meio de ações coordenadas (SICHMAN; HÜBNER, 2022).

Agentes dirigidos por um modelo BDI (Beliefs, Desires, Intentions) são entidades computacionais que possuem crenças sobre o ambiente, objetivos a serem alcançados e intenções que guiam suas ações. Em um SMA, diversos agentes interagem, colaboram e negociam papéis para alcançar metas comuns. Quando esses sistemas são integrados com sensores e atuadores em ambientes físicos, intitulam-se SMAs em BDI embarcados, os quais são altamente relevantes em aplicações de IIoT, cidades inteligentes, sistemas de monitoramento e controle distribuído (TABOUN; BRENNAN, 2017; KARADUMAN; TEZEL; CHALLENGER, 2023; GEORGEFF *et al.*, 1999).

Boissier *et al.* (2013) apresentam o *JaCaMo*, um *framework* que integra três abordagens da Engenharia de SMA: a Programação Orientada a Agentes (*Jason*), a Programação Orientada a Organizações (*Moise*) e a Programação Orientada a Ambientes (*CARtAgO*) (BOISSIER *et al.*, 2013). O trabalho propõe o conceito de *Multi-Agent Oriented Programming* (MAOP), visando a construção de sistemas em que agentes inteligentes operam dentro de organizações definidas e interagem com o ambiente físico ou virtual por meio de artefatos.

O *JaCaMo* é um *framework* que possibilita a implementação de agentes, oferecendo o suporte necessário para a modelagem BDI (*Belief-Desire-Intention*). Este trabalho expande o escopo proposto por eles ao focar especificamente nos desafios de comunicação sem fio entre agentes físicos embarcados em dispositivos IoT, com ênfase em cenários industriais.

Lazarin e Pantoja (2015) propõem uma plataforma de agentes robóticos embarcados que integra o raciocínio BDI, por meio do *Jason*, com a execução de ações físicas, utilizando uma combinação de Raspberry Pi e placas Arduino (LAZARIN; PANTOJA, 2015). No modelo apresentado, o Raspberry Pi atua como o cérebro lógico do agente, executando os planos escritos em *Jason*, enquanto o Arduino opera como um controlador de baixo nível para sensores e atuadores. A comunicação entre ambos é realizada exclusivamente via comunicação serial ponto a ponto utilizando a biblioteca Javino.

A biblioteca tem como objetivo realizar a ponte entre agentes BDI implementados em *Jason* e dispositivos de *hardware* como microcontroladores. Ela permite a comunicação bidirecional entre o raciocínio do agente e o mundo físico, viabilizando ações e percepções através da porta serial. Javino oferece suporte a comandos estruturados que trafegam

entre o agente e o microcontrolador, encapsulando os dados em um formato que pode ser interpretado tanto pela linguagem de programação dos agentes quanto pelo *firmware* embarcado.

É possível estabelecer comunicação serial através do Javino por código em python através da biblioteca *javino2python* (LAZARIN; PANTOJA, 2024). Este passo não é necessário para estabelecer comunicação serial entre dois códigos python, mas possui um mecanismo de verificação de erro do Javino que evita o problema de delimitação de *payloads*, que ocorre quando a porta serial não sabe quantos bytes esperar e permanece aguardando pela recepção de dados até o *timeout*. Além disso, o Javino é utilizado para comunicação serial entre agente e *hardware* (LAZARIN; PANTOJA, 2015).

2.3 *Firmware e Hardware*

O *firmware* é o *software* embarcado executado nos microcontroladores que atuam como interface entre o mundo físico e os agentes. Ele é responsável por interpretar os comandos recebidos via porta serial, realizar ações nos dispositivos (como ativar atuadores ou ler sensores) e retornar percepções ou confirmações para o agente (LAZARIN; PANTOJA, 2015; JESUS *et al.*, 2023).

O *hardware* utilizado neste estudo consiste em plataformas de prototipagem como Arduino Uno e Arduino Mega para módulos transceptores que não possuem interface serial USB. Também foi utilizado um ESP32 com suporte a BLE e os módulos de comunicação sem fio das respectivas tecnologias avaliadas.

3 Trabalhos Relacionados

A presente pesquisa se situa na interseção entre os campos da IoT, Inteligência Artificial distribuída e SMA com BDI, com aplicação voltada principalmente ao contexto da Indústria 4.0. O foco está na comunicação entre agentes embarcados distribuídos, com o objetivo de viabilizar a implementação de sistemas industriais inteligentes mais resilientes, escaláveis e adaptáveis.

A motivação para a realização deste trabalho surgiu diretamente a partir do estudo desenvolvido por Jesus et al. (LAZARIN; PANTOJA; JESUS, 2021), que propôs um protocolo específico para comunicação descentralizada entre SMAs com BDI embarcados utilizando módulos de radiofrequência (RF) com interfaces RX/TX. Apesar da contribuição importante na definição de uma arquitetura de comunicação funcional, aquele estudo apresentou limitações em termos de diversidade tecnológica e de análise quantitativa de desempenho, o que inspirou o desenvolvimento desta pesquisa com uma abordagem mais abrangente e comparativa.

Os trabalhos relacionados que servirão de contextualização para o presente estudo serão analisados com base em um mapeamento sistemático da literatura. A plataforma *Google Scholar* será usada para pesquisar a *string* base ("*Benchmark*") AND ("*IWSAN*" OR ("*Industrial Wireless Network*") OR "*BLE*" OR "*LORA*" OR "*XBEE*" OR "*ZigBee*" OR "*radio-frequency*") AND ("*Multi-agent*"). Foi realizada uma filtragem para trabalhos realizados a partir de 2015, para evitar artigos obsoletos. No momento em que a pesquisa foi realizada, foram retornados 9460 resultados. Serão adotados os seguintes critérios de eliminação: 1) O trabalho não pode ser um livro; 2) O trabalho deve ser em Inglês ou Português; 3) O trabalho deve ser acessível de forma gratuita, através da rede do CEFET/RJ ou pelo Portal de Periódicos da CAPES; 4) O trabalho deve ser de alguma forma pertinente à temática do presente estudo, abordando desempenho de redes distribuídas de SMAs ou tecnologias de transmissão sem fio específicas.

Para avaliar de forma qualitativa os trabalhos obtidos, foram elaboradas perguntas:

1. O trabalho avalia redes *ad hoc* ou descentralizadas?
2. O trabalho avalia alguma métrica de desempenho de redes sem fio?
3. O trabalho apresenta um objetivo bem definido?
4. O trabalho possui resultados claros?
5. O trabalho possui reprodutibilidade?
6. O trabalho explora mais de uma alternativa para comunicação sem fio?

Durante o mapeamento sistemático da literatura, foi possível constatar uma lacuna significativa na produção científica voltada especificamente à análise comparativa

de tecnologias de comunicação sem fio em redes industriais compostas por agentes BDI embarcados distribuídos, com foco em arquiteturas verdadeiramente descentralizadas. A busca foi estruturada para abranger termos amplos e específicos (*benchmark, multi-agent, IWSAN, BLE, LoRa, ZigBee, XBee, radiofrequency*), e aplicada sobre um universo de 9460 resultados retornados. Após a aplicação dos critérios de filtragem e elegibilidade, restou apenas um trabalho diretamente pertinente ao recorte temático definido.

Tal resultado não indica uma limitação do processo de busca, mas sim a inexistência de pesquisas consolidadas dentro do nicho específico proposto, o que reforça o ineditismo do presente estudo. Apesar da ampla existência de trabalhos sobre SMAs, redes industriais e protocolos sem fio, a combinação destes elementos — particularmente com foco em arquiteturas descentralizadas, com agentes BDI embarcados, avaliando desempenho quantitativo de tecnologias de transmissão — é raramente explorada. Os estudos encontrados usualmente tratam de redes centralizadas ou simuladas, com abstrações de comunicação que não dialogam diretamente com o contexto prático-industrial considerado nesta pesquisa.

Diante desse cenário, e a fim de oferecer uma base contextual mais sólida, optou-se por complementar a revisão com uma seção de trabalhos complementares. Nela, são incluídos artigos que, embora não tratem exatamente do mesmo recorte, abordam elementos que sustentam conceitualmente esta pesquisa, como o uso de SMA em ambientes industriais, estratégias descentralizadas em redes de sensores, ou aspectos de tolerância a falhas e comunicação emergencial.

3.1 Alocação Eficiente de Recursos *Online* em Redes LoRaWAN de Larga Escala

O trabalho de Garrido-Hidalgo et al. (2023) (GARRIDO-HIDALGO *et al.*, 2023) apresenta um módulo de gerenciamento de rede multiagente para redes LoRaWAN baseadas em TDMA. O sistema foi implementado como uma camada de abstração de gerenciamento de rede, composta por agentes autônomos que negociam a alocação de dispositivos com base em informações sobre a rede e as características dos dispositivos.

O objetivo central do trabalho é aumentar a escalabilidade de redes LoRaWAN ao realizar um *escalonamento online*, ou seja, executar a definição de períodos de sincronização e estruturas de slots de forma dinâmica, à medida que novos dispositivos ingressam na rede. Esse escalonamento *online* evita a necessidade de configurar manualmente a duração de slots e os tempos de guarda (*guard times*) antes do início da operação, reduzindo sobrecarga e adaptando-se ao estado real da rede.

Para tanto, o sistema utiliza agentes responsáveis por funções como registro de novos dispositivos, decodificação de pacotes, descarte de taxas de dados inviáveis (com

base em métricas de qualidade de sinal como RSSI e SNR), cálculo de tempo no ar (*time-on-air*), e finalmente a alocação de recursos. Cada agente se comunica via sockets TCP, com armazenamento de dados em bancos PostgreSQL, mantendo a modularidade e a independência de cada componente, o que facilita a implantação em microserviços.

Os resultados foram obtidos usando um emulador de dispositivos LoRaWAN (ChirpStack Simulator), em experimentos que compararam a abordagem multiagente com o escalonamento estático convencional. Foram testadas diferentes estratégias de alocação de dispositivos aos *Spreading Factors* (SFs) — parâmetros de modulação do LoRa que influenciam alcance e taxa de transmissão — de forma a balancear o uso do canal de subida (uplink) e descida (downlink), maximizando a quantidade de dispositivos suportados sem violar restrições de *duty cycle*. O *duty cycle* é um ciclo que indica a fração de tempo em que um recurso está sendo utilizado. Em alguns países existem regulamentações de *duty cycle* para LoRa, mas no Brasil não há regulamentações desta natureza para a faixa de 915 MHz (Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL), 2017).

O trabalho também detalha a forma de configurar os experimentos, conforme ilustrado nas Tabelas 1 e 2, que apresentamos a seguir para referência.

Tabela 1 – Configuração do módulo multiagente de gerenciamento de rede.

Parâmetro	Valor
Período de sincronização de referência	120 min
Desvio de clock teórico de referência	20 ppm
Limiar para ativar escalonamento	100 dispositivos
Limiar para desativar alocação de SF	80%
Ciclo máximo de <i>duty cycle</i> de downlink	0,05%

Tabela 2 – Configuração do emulador de dispositivos ChirpStack.

Parâmetro	Valor
Tempo de emulação	8000 s
Nº de dispositivos	2500 dispositivos
Probabilidade SF7-12 urbana	[0.3, 0.2, 0.2, 0.1, 0.1, 0.1]
Probabilidade SF7-12 rural	[0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1]
Distribuição de desvio de clock	[5, 75] ppm
Distribuição de período de transmissão	[5, 30] min
Tamanho do <i>payload</i> de dados	3 bytes
<i>Payload</i> físico (PHY)	16 bytes

A abordagem multiagente proposta por (GARRIDO-HIDALGO *et al.*, 2023) demonstra melhorias claras de escalabilidade, alcançando incrementos de até 66,7% na quantidade de dispositivos suportados, dependendo da distribuição geográfica e da estratégia de alocação de SF adotada. Além disso, ressalta-se a importância de balancear a ocupação do canal de

subida e descida, especialmente em redes com restrições de *duty cycle* e diversidade de distâncias entre nós e *gateways*.

3.2 Trabalhos Complementares

O mapeamento sistemático da literatura demonstrou que não há trabalhos explorando a comparação entre tecnologias de comunicação sem fio no contexto explorado neste estudo. Muitos artigos apresentam propostas para uso de agentes para Controle de Acesso ao Meio (MAC) inteligente tomar decisões de compartilhamento de recursos (KIM, 2023; ARZO, 2021), mas a área de IWSAN descentralizadas com agentes BDI embarcados continua relativamente inexplorada.

Ao comparar as abordagens dos trabalhos encontrados com a proposta deste estudo, nota-se que nenhum deles realiza uma análise empírica comparativa entre múltiplas tecnologias de transmissão em cenários reais, integrando SMAs BDI embarcados com foco na aplicabilidade em ambientes industriais descentralizados.

Diante dessa lacuna, será utilizado o termo ACIDNet (*Autonomous Cognitive Industrial Decentralized Network*) – em português, Rede Industrial Cognitiva Autônoma Descentralizada – como uma designação para redes industriais compostas por agentes BDI embarcados com capacidade cognitiva, organizados de forma distribuída sobre infraestruturas IWSAN descentralizada. Tal conceito enfatiza a autonomia operacional local em redes industriais, características pouco abordadas na literatura vigente.

Em vista do critério de eliminação de número 4 ("4) O trabalho deve ser de alguma forma pertinente à temática do presente estudo, abordando desempenho de redes distribuídas de SMAs ou tecnologias de transmissão sem fio específicas;"), apenas um trabalho relacionado pertinente foi encontrado. Para complementar a contextualização, foram selecionados mais dois trabalhos diretamente relacionados com a proposta, focados em redes descentralizadas em casos de emergência, mas aplicáveis ao cenário industrial.

3.2.1 Um Protocolo para Comunicação entre SMAs Embarcados

O trabalho de Jesus et al. (2021) propõe um protocolo de comunicação entre SMAs com foco em ambientes desprovidos de infraestrutura de rede convencional, como Wi-Fi, TCP/IP ou redes celulares (LAZARIN; PANTOJA; JESUS, 2021). O objetivo é permitir que os agentes embarcados comuniquem-se por meio de transmissores e receptores de radiofrequência (RF), de forma descentralizada e adaptada a ambientes hostis ou com restrições de conectividade. A Figura 1 mostra de forma geral a arquitetura de um SMA embarcado, suas camadas e modos de comunicação.

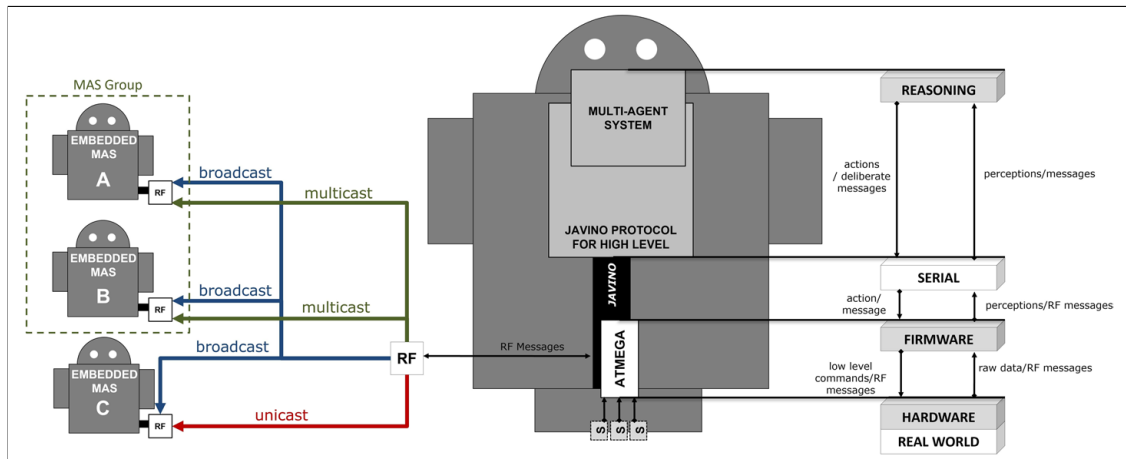


Figura 1 – Figura demonstrando a arquitetura de um SMA embarcado em camadas no contexto do protocolo proposto (JESUS *et al.*, 2023).

A comunicação parte da deliberação interna de um agente do SMA emissor. Após decidir pelo envio de uma mensagem, o agente transmite a informação para o *hardware* responsável pelo controle do módulo RF, que realiza a difusão da mensagem na rede. O protocolo proposto permite três modos distintos de envio de mensagens:

- *Unicast*: Comunicação entre um agente e um único destinatário específico dentro do alcance de RF.
- *Multicast*: Comunicação com um subconjunto de dispositivos, definido por grupos.
- *Broadcast*: Comunicação com todos os dispositivos no alcance de transmissão.

Para garantir que apenas as mensagens relevantes sejam processadas, cada dispositivo que receber uma transmissão analisa o cabeçalho da mensagem. Apenas mensagens válidas (com estrutura reconhecida pelo protocolo), cujo endereço de destino esteja associado ao dispositivo (por *unicast*, *multicast* ou *broadcast*), e que tenham tamanho coerente com o especificado no campo de controle, são aceitas e armazenadas em um buffer de recepção.

O protocolo implementa um esquema de endereçamento de 24 bits, dividido em dois campos: os 12 bits mais significativos representam o grupo (Multicast Group ID) e os 12 bits menos significativos representam o identificador do membro (Member ID). Os endereços são codificados utilizando o Alfabeto Base 64 (JOSEFSSON, 2006), o que permite representar endereços com caracteres alfanuméricos (maiúsculas e minúsculas), além de "+" e "/".

Com essa estrutura, o protocolo é capaz de endereçar até 16.252.928 dispositivos, organizados em 3.968 grupos com até 4.096 membros cada. Esse formato permite uma padronização compacta e eficiente para transmissão via RF, otimizando o uso de largura de banda e simplificando o processamento das mensagens recebidas. A arquitetura do sistema adota uma separação em quatro camadas lógicas:

1. *Reasoning* – onde o SMA realiza a cognição, interpreta percepções e toma decisões.

2. *Serial* – responsável por intermediar a comunicação entre o agente e o *hardware* via porta serial.
3. *Firmware* – programa no microcontrolador que coleta percepções dos sensores e executa ações nos atuadores.
4. *Hardware* – os próprios sensores, atuadores e módulo RF.

3.2.1.1 Integração com Agentes BDI e Arquitetura ARGO

O trabalho propõe a integração entre o protocolo de comunicação em baixo nível e agentes BDI embarcados, utilizando uma arquitetura estendida chamada ARGO. A arquitetura ARGO é composta por quatro camadas: *Reasoning*, *Serial*, *Firmware* e *Hardware*, sendo o raciocínio do agente implementado em plataformas como JaCaMo e a interação com sensores e atuadores realizada por microcontroladores via porta serial.

Para viabilizar a recepção de mensagens RF por agentes BDI, foi introduzido um novo tipo de agente chamado Difusor, que é uma extensão dos agentes ARGO com a capacidade de receber e decodificar mensagens RF armazenadas em um buffer local. O agente Difusor é responsável por chamar uma ação interna denominada *diffuse*, que codifica a mensagem em um formato específico e a envia pelo *Javino*, que por sua vez constrói o pacote final com endereço de destino e tamanho total da mensagem.

3.2.1.2 Considerações

O presente trabalho foi diretamente inspirado pelas limitações e oportunidades identificadas no estudo de Jesus et al. Embora o protocolo proposto por eles tenha demonstrado viabilidade prática, seu escopo ficou restrito à utilização de RF tradicional com interfaces RX/TX simples. Diante disso, o objetivo desta pesquisa é expandir o trabalho de Jesus et al., conduzindo um estudo comparativo entre múltiplas tecnologias de comunicação sem fio aplicáveis a SMAs embarcados. Além de avaliar o desempenho técnico, a proposta também considera critérios adicionais relevantes ao contexto das ACIDNet, como consumo energético, confiabilidade e suporte a redes dinâmicas. Esta evolução metodológica visa fornecer subsídios concretos para a escolha de tecnologias de comunicação mais adequadas ao uso de agentes embarcados em aplicações industriais inteligentes.

3.2.2 Middleware para comunicação em Embedded MAS com falta de conectividade

O trabalho de Jesus et al. 2023 (JESUS *et al.*, 2023) é uma expansão de Jesus et al. 2021, concebido para dotar sistemas multiagente embarcados de capacidade de comunicabilidade mesmo na ausência de infraestrutura centralizada. Os autores introduzem uma classificação refinada dos sistemas MAS baseando-se não apenas na mobilidade dos

agentes (aberto vs. fechado), mas também em sua capacidade de comunicação, definindo estados transitórios: *Limited Open* e *Totally Closed*. Esses estados refletem situações práticas onde falhas em *hardware* ou infraestrutura impõem restrições de mobilidade ou comunicação, influenciando diretamente a cooperação entre agentes. Classificação estendida de MAS:

1. *Open MAS*: mobilidade e comunicação habilitadas.
2. *Closed MAS*: não permite mobilidade, mas comunica.
3. *Limited Open MAS*: permite mobilidade, sem comunicação.
4. *Totally Closed MAS*: sem mobilidade nem comunicação.

O *middleware* adota comunicação *ad hoc* por rádio frequência, permitindo aos agentes enviar mensagens em três modos – *unicast*, *multicast* e *broadcast* – diretamente a outros sistemas embarcados nas proximidades. Para preservar a integridade e privacidade das mensagens nesse meio aberto, é incorporado um protocolo estendido com criptografia *end-to-end* individual e grupal. Os tipos de mensagem propostos são:

- *Broadcast*: envia mensagem descryptografada para todos os dispositivos.
- *Unicast*: envia mensagem criptografada para um dispositivo específico.
- *Multicast*: envia mensagem criptografada para um subconjunto de dispositivos.

Arquiteticamente, o sistema é composto por uma camada física composta por microcontroladores, sensores, atuadores, transceptor RF e um computador hospedeiro rodando agentes BDI (via JaCaMo). A comunicação entre os agentes de alto nível e o *hardware* é feita por meio de comunicação serial fundamentada no *middleware* Javino. Esse *middleware* atua como ponte, convertendo percepções do ambiente em crenças/desejos/intencionalidades nos agentes e retransmitindo as decisões dos agentes para o mundo físico e para outros dispositivos embarcados via RF.

O modelo também formaliza um Autômato Finito Determinístico (AFD) que descreve as transições dos estados de mobilidade e comunicabilidade dos Embedded MAS em função de eventos como perda ou restauração de capacidade de comunicação e mobilidade. Este AFD é um modelo matemático que serve como guia para projetistas preverem mudanças de estado e garantirem continuidade operacional.

Em síntese, o artigo propõe uma solução *middleware* que capacita Embedded MAS a manterem comunicação e cooperação mesmo em ambientes adversos, integrando comunicação *ad hoc* segura, suporte a mobilidade de agentes, e uma arquitetura modular que une *hardware* físico e agentes BDI em uma plataforma coesa, abrindo margem para o desenvolvimento de ACIDNets mais seguras e dinâmicas.

4 Metodologia

Neste capítulo, são descritos os procedimentos utilizados para a realização dos testes de comunicação entre módulos sem fio. São apresentados os métodos de coleta de dados, a lógica de operação dos códigos utilizados e as técnicas empregadas para a conexão entre os módulos.

Este trabalho visa preencher uma lacuna muito específica no contexto da área de AIoT e IIoT e promover um guia compreensivo sobre oportunidades de implementações de topologia de rede, latência, segurança e resiliência a falha de redes descentralizadas (LAZARIN; PANTOJA; JESUS, 2021; IWANICKI, 2018).

Dentre as muitas tecnologias e variações existentes no mercado, foram selecionados exemplares que representem de forma única as características as quais se propõem a cumprir, como baixo consumo energético para o BLE (SCOTT, 2024) ou longo alcance para o LoRa (IQBAL; ABDULLAH; SHABNAM, 2020). Os módulos transmissores e plataformas microcontroladas foram escolhidas visando a acessibilidade, recursos limitados e familiaridade do autor. Por isso, optou-se pelo uso de placas de prototipagem Arduino Uno, Arduino Mega e ESP32 já disponíveis para uso nos testes.

Seguindo a abstração conforme o interfaceamento diagramado na Figura 2 e uma métrica simples de ida e volta *round-trip-time* (RTT), conforme mostrado na Figura 3, será feita uma análise da latência para diferentes distâncias predefinidas e usar os dados para aferir a capacidade das diferentes tecnologias para diferentes estruturas topológicas (IWANICKI, 2018).

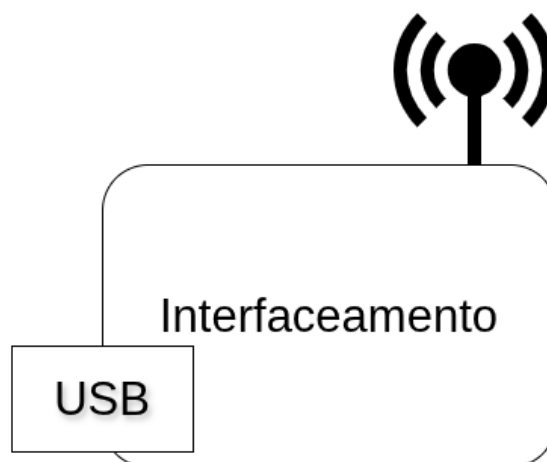


Figura 2 – Diagrama de representação da unidade de interfaceamento entre USB e os diferentes módulos de transmissão.

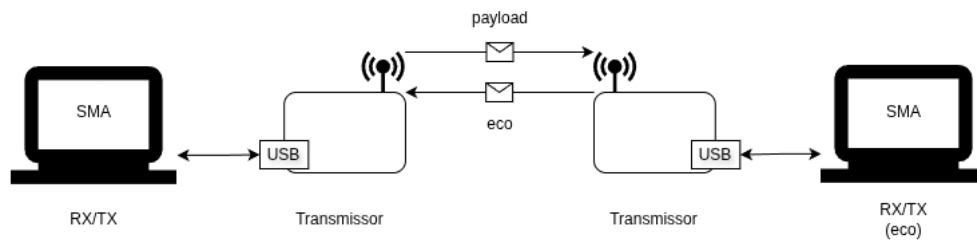


Figura 3 – Diagrama da sequência de comunicação.

Também serão fornecidas informações coletadas *online*, em manuais e fontes acadêmicas sobre consumo de energia, segurança e possibilidade de criação de redes *ad hoc*. A Figura 2 mostra a abstração realizada para interfacear a porta serial USB, que é usada pela camada lógica para interagir com o seu ambiente (JESUS *et al.*, 2023; LAZARIN; PANTOJA, 2015), com o *hardware* de transmissão. Alguns módulos possibilitam conexão direta via USB, mas outros possuem interfaces que exigem o intermédio de plataformas microcontroladas, como UART e SPI.

Esta metodologia serve para fornecer uma visão geral das tecnologias. Estudos mais detalhados focados em aspectos mais específicos como interferência de equipamentos industriais, coexistência espectral, diferentes famílias de módulos de transmissão e impacto de mecanismos de segurança no alcance e latência não farão parte do escopo desta análise, mas serão deixados como sugestões para trabalhos futuros na Seção 6.2.

4.1 Realização dos Testes

Os testes foram conduzidos com o objetivo de avaliar o desempenho da comunicação entre dois módulos de transmissão sem fio, utilizando o protocolo Javino para transmissão serial de dados via porta USB. A Figura 2 mostra uma abstração do interfaceamento entre USB e módulo, enquanto a Figura 4 mostra um exemplo de implementação. O experimento simula uma troca de *payloads* bidirecional, com envio e recebimento de pacotes de dados de tamanhos variados, a diferentes distâncias.

Dois computadores (*notebooks*) foram utilizados na bancada de testes, ambos conectados via porta serial a microcontroladores com módulos de comunicação sem fio. O primeiro computador executa um *script* Python que atua como transmissor principal. Este código envia pacotes contendo uma carga útil predefinida (*payload*) e aguarda uma resposta (*eco*) para medir o RTT em milissegundos. A biblioteca *Javino* é utilizada para gerenciar a comunicação com o microcontrolador, realizando a codificação e transmissão dos pacotes via porta serial.

O segundo computador executa outro *script* Python, conectado a um segundo microcontrolador com sua respectiva interface de comunicação sem fio. Ele atua como



Figura 4 – Exemplo de protótipo implementando a lógica exposta na Figura 2, com interfaceamento USB/Transceptor de um LoRa E32-433T20D (interface UART) integrado a um Arduino Mega e encapsulado em container plástico (caixa de sorvete).

ecoador, sendo responsável por reenviar imediatamente qualquer pacote que receba via transmissão sem fio, funcionando como um reflexo (eco). Assim como no transmissor, a biblioteca *Javino* também é utilizada neste segundo computador para decodificar e reenviar os pacotes recebidos, via porta serial, através do microcontrolador.

Essa arquitetura representada na Figura 3 permite que todo o controle e monitoramento da comunicação ocorra em alto nível, diretamente em Python, mantendo os microcontroladores apenas como interfaces entre a comunicação sem fio e os *scripts*.

4.2 Parâmetros dos Pacotes de Teste

Os pacotes de dados foram definidos com tamanhos variáveis, a fim de analisar o impacto do volume de dados no desempenho da transmissão. Os tamanhos utilizados nos testes foram: 8, 16, 32, 64, 128 e 255 bytes — sendo este último o limite máximo suportado pelo protocolo *Javino*.

Será feita uma distinção entre testes de baixa distância (até 128 m) e de longa (a

partir de 256 m). Para os testes de curta distância, cada rodada de testes consistiu no envio de 10 pacotes de cada tamanho com um intervalo fixo de 1 segundo entre os envios. Para cada envio, foi adotado um tempo limite de resposta (*timeout*) de 15 segundos. O intervalo foi escolhido com base nos RTTs obtidos em testes preliminares de 255B com LoRa, que foram de cerca de 12 segundos. Pacotes que não obtiveram resposta dentro deste intervalo foram considerados como perdidos. A mesma lógica será usada para os testes de longa distância, porém com envio de 30 pacotes por cada tamanho e um *timeout* de 20 segundos.

4.3 Distâncias Avaliadas

As distâncias utilizadas nos testes foram de 8, 16, 32, 64, 128 e 256 metros em ambiente externo. A escolha de distâncias como potências de 2 foi feita para apresentar uma progressão geométrica uniforme. No entanto, outras distâncias serão testadas a título de análise de casos específicos. Por questões práticas e logísticas, as distâncias de 8 a 32 metros foram avaliadas em um mesmo ambiente físico mais acessível, o que garantiu uniformidade de condições para esses testes. Neles, as distâncias foram medidas com uma fita métrica de 30m + outra fita métrica de 5m para precisão.

Para testes de 64 m em diante, as distâncias foram medidas por satélite através do serviço *Google Maps*.

4.3.1 Ambientes de Teste

Durante os testes de *benchmark*, foi necessário considerar a logística e limitações físicas dos espaços utilizados para as medições. Assim, as distâncias de 8, 16 e 32 metros foram avaliadas em um mesmo ambiente controlado, garantindo uniformidade de fatores como interferência, barreiras físicas e disposição dos dispositivos. Não foi possível encontrar ambientes industriais para realização dos testes, então os ambientes foram selecionados com base no critério de acessibilidade e segurança do pessoal e equipamento envolvidos.

Para as distâncias de mais de 64 metros, foi necessário realizar os testes em outros ambientes, mais adequados ao espaço exigido. Os ambientes precisavam proporcionar linha de visão e pouca ou nenhuma interferência de tráfego. Apesar disso, para manter a integridade metodológica, todos os módulos sem fio foram testados no mesmo ambiente correspondente a cada distância, assegurando isonomia entre os experimentos.

A Tabela 3 apresenta a distribuição dos ambientes de teste das Figuras 5 - 9 conforme a distância avaliada:

Tabela 3 – Ambientes utilizados de acordo com as distâncias testadas.

Distância (m)	Ambiente de Teste
1 (BLE)	Local A (Figura 5)
4 (BLE)	Local A (Figura 5)
8	Local A (Figura 5)
16	Local A (Figura 5)
20 (BLE)	Local A (Figura 5)
32	Local A (Figura 5)
64	Local B (Figura 6)
128	Local B (Figura 6)
256	Local C (Figura 7)
1300 (LoRa)	Local D (Figura 8)
2600 (LoRa)	Local E (Figura 9)



Figura 5 – Imagens do Local A para testes de 8 a 32 metros com linha de visão e sem interferência de tráfego.



Figura 6 – Imagens de satélite do Local B para testes de aproximadamente 64 e 128 metros com linha de visão e sem interferência de tráfego.

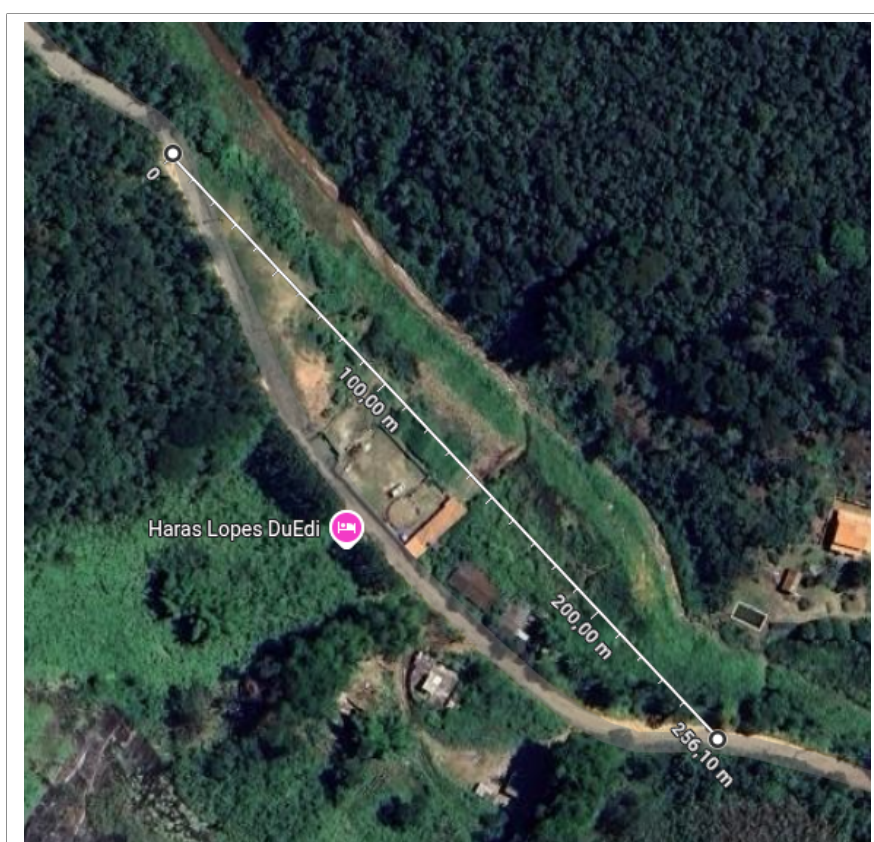


Figura 7 – Imagens de satélite do Local C para testes de aproximadamente 256 metros com linha de visão e sem interferência de tráfego.



Figura 8 – Imagens de satélite do Local D para testes de aproximadamente 1300 metros com linha de visão.



Figura 9 – Imagens de satélite do Local E para testes de aproximadamente 2600 metros com linha de visão.

4.4 Critérios de Avaliação

Para cada combinação de distância e tamanho de pacote, foram coletadas as seguintes métricas:

- **Taxa de sucesso:** percentual de pacotes que receberam resposta válida dentro do tempo limite.
- **Latência média:** tempo médio de ida e volta (em milissegundos) para os pacotes respondidos.
- **Varição de latência:** desvio padrão dos tempos de resposta.

Essas métricas permitem avaliar as capacidades da comunicação sem fio em diferentes condições operacionais, com foco na perda de pacotes e estabilidade temporal. As demais métricas de consumo de energia, segurança e possibilidade de criação de redes *ad hoc* não serão obtidas através de testes, mas sim das informações online. Estas informações extras foram obtidas através das especificações informadas pelos vendedores de cada módulo e o *datasheet* (documento que contém informações técnicas de um produto) disponíveis online.

4.5 Tecnologias Utilizadas

Nesta seção, são descritas as tecnologias empregadas para a transmissão de dados entre microcontroladores durante os testes de *benchmark*. Cada tecnologia apresenta características distintas quanto ao alcance, taxa de transferência, consumo energético e resistência da comunicação contra ruídos. Os módulos foram escolhidos seguindo critérios de facilidade de acesso e familiaridade do autor.

- **Módulos RF 433 MHz:** Utilizam modulação por amplitude ou frequência para comunicação ponto a ponto. Apesar de menos seguros e sujeitos a interferência, são extremamente acessíveis, simples de configurar e funcionam bem em curtas a médias distâncias. O módulo vem com uma pequena antena embutida, mas é possível expandir o alcance com a adição de um fio de cobre de 17,3 cm.
- **Módulos LoRa E32-433T20D:** Operam na faixa de 433 MHz com técnica de modulação LoRa, permitindo comunicação de longo alcance (até 3 km em campo aberto). No Brasil, o espectro de 433 MHz é livre para uso local. Para soluções comerciais de IoT, a faixa designada é a de 915MHz, que não possui regulamentação de *duty cycle* (MENEZES; MENEZES, 2024; Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL), 2017). A Antena usada foi a TX433-XPL-100, que possui conector SMA-K compatível com o módulo escolhido.
- **Módulos nRF24L01 PA+LNA:** Operam em 2.4 GHz com modulação GFSK. Suportam até 2 Mbps e possuem capacidade de comunicação bidirecional com endereçamento

de pacotes. Com antenas externas (versão PA+LNA), podem atingir até 1 km de alcance (NEDELKOVSKI, 2023).

- **Bluetooth Clássico (HC-05):** Opera na frequência de 2.4 GHz e permite comunicação sem fio simples em curtas distâncias (até 10 metros). Pode ser configurado tanto como *master* quanto como *slave*, facilitando integração com dispositivos móveis.
- **Módulos XBee S2C (Zigbee):** Baseados no padrão IEEE 802.15.4, operam nas faixas de 2.4 GHz. São altamente confiáveis para redes ponto a ponto ou em malha (*mesh*), com alcance que pode variar de algumas dezenas de metros até quilômetros, dependendo da antena e do ambiente. O módulo *shield* XBee Explorer HW-186 permite conexão via USB e UART com o transceptor.
- **Bluetooth Low Energy (BLE) com ESP32:** Tecnologia integrada ao microcontrolador ESP32. Opera em 2.4 GHz com foco em baixo consumo e comunicação eficiente com dispositivos móveis. Permite integração com *smartphones* e aplicações em tempo real, sendo ideal para dispositivos IoT portáteis e sensores distribuídos.

As tecnologias acima foram selecionadas por sua diversidade em características de transmissão, abrangendo protocolos de curto, médio e longo alcance, bem como diferentes requisitos de energia e complexidade de integração para fornecer uma visão abrangente do desempenho de cada módulo em condições reais de operação.

4.5.1 LoRa 433 MHz e 915 MHz

No contexto de comunicação sem fio para IoT no Brasil, a ANATEL designou a faixa de 915 MHz como apropriada para uso comercial e de larga escala. A faixa de 433 MHz é reservada apenas para redes locais e de baixa potência com até 10 mW. No caso do módulo LoRa E32-433T20D, a nomenclatura indica (MENEZES; MENEZES, 2024):

- E32: série do módulo fabricado pela *Ebyte*;
- 433: Faixa de frequência em que o módulo trabalha (em MHz);
- T: Possui função de Transceptor (recebe e transmite);
- 20: Potência do módulo (em dBm);
- D: Tipo de antena com conector SMA-K;

O módulo E32-433T20D possui uma potência de 20 dBm, que equivale a 100 mW, 10 vezes maior do que o estipulado pela ANATEL para a faixa de 433 MHz. A faixa homologada pela ANATEL para uso de LoRa/LoRaWAN em larga escala é a de 915 MHz, com potência e largura de banda definidas na certificação (Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL), 2017; MENEZES; MENEZES, 2024). Por isso, módulos que operem na faixa de 915MHz (como o E32-900T20D) são indicados para aplicações industriais de larga escala ou soluções comerciais.

Vale ressaltar, entretanto, que ambos E32-433T20D e E32-900T20D possuem a

mesma pilha de protocolos. O *data rate*, não é influenciado pela frequência central de operação, mas sim por outros fatores. O parâmetro mais importante na modulação LoRa para definir a velocidade de transmissão é o *bandwidth* (BW), porque, de acordo com as informações em (SEMTECH, 2015; AUGUSTIN *et al.*, 2016):

$$R_b = SF \cdot \frac{BW}{2^{SF}} \cdot CR \quad (1)$$

R_b – Taxa de bits (bitrate) em bits por segundo (bps), dependendo somente de SF, BW e CR, sem influência da frequência portadora.

SF – *Spreading Factor*. Fator de espalhamento, definido como o \log_2 do número de chirps por símbolo (2^{SF} chips por símbolo). Controla quantos bits são transmitidos por símbolo e dobra o tempo do símbolo a cada incremento de SF, aumentando alcance e sensibilidade à custa de maior tempo de transmissão.

BW – Largura de banda em Hz, que define o intervalo de frequências atravessado por cada chirp. O *chirp rate* é igual à BW, ou seja, transmite um chirp por segundo para cada Hz de largura de banda.

CR – *Coding Rate* representada como fração. Introduce redundância para correção de erros; valores maiores de CR oferecem mais resistência a interferências, mas aumentam o tempo de transmissão.

Portanto, de acordo com a Equação 1, a frequência central – que pode ser 433 MHz, 868 MHz, 915 MHz etc. – não altera a taxa de dados da modulação. Ela apenas define o espectro de rádio ao qual a BW se encontra, mas não muda o bitrate, desde que BW, SF e CR permaneçam fixos.

Durante a realização dos testes com o módulo E32-433T20D, não foi constatado nenhum impacto derivado de interferências na faixa de 433 MHz, que apresentou o mesmo desempenho independente da distância e ambiente testado. O módulo também foi implementado segundo o modelo de fábrica, sem alteração de parâmetros (BW, SF e CR). Frente a estas informações, e o fato de os testes terem sido realizados com linha de visão, sem interferência de obstáculos físicos, é razoável afirmar que os dados obtidos com o E32-433T20D são válidos também para a faixa de 915 MHz, e ainda cumprem o propósito deste trabalho de apresentar métricas simples de desempenho com latência, perda de pacotes e desvio padrão.

4.6 Interfaces de Transmissão

Os módulos de comunicação utilizados neste estudo apresentam diferentes formas de interfaceamento com a camada lógica. Alguns permitem conexão serial direta via USB com o sistema operacional, enquanto outros requerem a mediação de uma Unidade Microcontroladora (MCU). Para este trabalho, os módulos que necessitam de MCU para esta

intermediação serão integrados via Arduino UNO ou MEGA. Esta escolha se deu com base na disponibilidade de recursos e no objetivo de manter os custos reduzidos. Foram utilizados no total 6 Arduinos UNO e 2 Arduinos MEGA (para LoRa).

Para programar o *firmware* das MCUs (Arduino UNO, MEGA e ESP32), foi utilizada a plataforma *Arduino IDE*.

4.6.1 Interface UART

A interface UART (*Universal Asynchronous Receiver-Transmitter*) é a mais simples para integração com uma MCU. Ela utiliza os pinos de alimentação (VCC), terra (GND), transmissão de dados (TX) e recepção de dados (RX) (PEÑA; LEGASPI, 2020). O Arduino Uno possui uma porta UART nativa acessada pela classe `Serial`. Já o Arduino Mega disponibiliza múltiplas portas seriais (`Serial1`, `Serial2`, `Serial3`), o que o torna mais adequado para aplicações que necessitam de múltiplas conexões simultâneas.

Além disso, a biblioteca `SoftwareSerial` pode ser utilizada para emular portas seriais adicionais em qualquer par de pinos digitais, permitindo maior flexibilidade. A comunicação é feita por meio dos métodos `Serial.read()` para leitura e `Serial.print()` para envio de dados.

4.6.1.1 Implementação na MCU

O código implementado atua como um repetidor UART simples, transferindo dados entre a porta serial nativa do Arduino (`Serial`) e uma porta serial adicional criada com a biblioteca `SoftwareSerial`. Essa porta adicional, denominada `IOPort`, utiliza os pinos digitais 11 (RX) e 10 (TX) e opera na mesma taxa de transmissão de 9600 bps. No `loop()`, o microcontrolador verifica continuamente se há dados disponíveis em uma das interfaces e os repassa diretamente para a outra.

4.6.2 Interface SPI (nRF24L01)

O módulo nRF24L01 utiliza a interface SPI (*Serial Peripheral Interface*), que é síncrona e requer múltiplas conexões: MISO (*Master In Slave Out*), MOSI (*Master Out Slave In*), SCK (*Serial Clock*), CE (*Chip Enable*) e CSN (*Chip Select Not*), além dos pinos de alimentação (VCC e GND). No Arduino, a interface SPI é suportada nativamente através da biblioteca `SPI.h`, que facilita a comunicação entre o MCU (mestre) e o módulo (escravo).

4.6.3 Interface dos Módulos RF 433 MHz

Os módulos RF de 433 MHz utilizados neste trabalho consistem em dois componentes distintos: um transmissor e um receptor. A conexão do transmissor é realizada por meio dos pinos VCC, GND, DATA (linha de dados) e ANTENA (fio ou trilha dedicada). No

receptor, a ligação é semelhante, podendo haver um pino adicional redundante para dados, dependendo do modelo.

Esses módulos operam por modulação digital simples do tipo *Amplitude Shift Keying* (ASK) ou *On-Off Keying* (OOK), o que implica uma comunicação unidirecional e sensível a ruídos. Em ambientes com interferência eletromagnética, a recepção pode ser comprometida, exigindo técnicas de codificação ou detecção de delimitadores para reconstrução correta das mensagens.

4.6.4 Resumo das Interfaces

A Tabela 4 resume as interfaces de comunicação utilizadas pelos módulos avaliados:

Tabela 4 – Interfaces de comunicação utilizadas por módulo.

Módulo	Interface
RF 433 MHz	UART (DATA), alimentação simples
nRF24L01	SPI (MISO, MOSI, SCK, CSN, CE)
LoRa E32	UART (TX, RX)
Bluetooth HC-05	UART (TX, RX)
XBee	USB (Com HW-186)
ESP32 BLE	USB

5 Análise dos Resultados

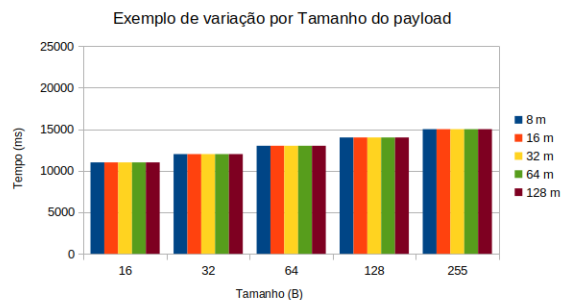
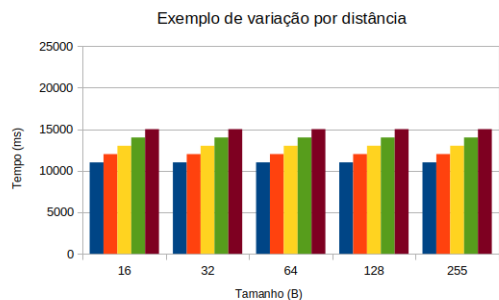
Este capítulo apresenta os resultados obtidos a partir dos testes descritos anteriormente, bem como uma análise crítica para cada tecnologia avaliada. Os dados coletados serão discutidos à luz dos critérios definidos na metodologia, permitindo uma comparação entre os diferentes módulos quanto ao desempenho, confiabilidade e aplicabilidade.

Cada módulo de comunicação será tratado em uma seção específica, onde serão apresentados os resultados experimentais (em forma de tabela), seguidos da respectiva análise técnica. Serão discutidas também as particularidades do *firmware* empregado, as bibliotecas utilizadas no Arduino, alternativas viáveis de implementação, custo estimado, consumo energético e demais aspectos relevantes.

Nos casos em que foi necessário alterar os parâmetros de teste (como a distância), essas decisões serão devidamente justificadas, visando garantir a transparência e a reprodutibilidade dos resultados.

Durante a medição, os testes foram agrupados por distância. Ou seja, para cada ponto de distância foram realizados os testes de cada tamanho. Esta ordem foi escolhida para minimizar a quantidade de vezes em que o equipamento precisava ser fisicamente movido. Esta ordem de realização foi refletida nas tabelas, que agrupam os resultados por tamanho.

Entretanto, devido à forma como o gráfico apresenta as informações da tabela, a lógica se inverte nos gráficos. Como demonstrado na Figura 10, cada barra representa o dado respectivo do gráfico – seja ele o RTT, taxa de sucesso ou desvio padrão – para uma Distância e um Tamanho de *Payload*. Nos gráficos, as barras se encontram agrupadas por tamanho. Para facilitar a interpretação dos gráficos, foram elaborados dois gráficos de exemplo. A Figura 10a demonstra como a influência da distância se manifesta através



(a) Gráfico demonstrando de forma visual uma variação de dados por distância.

(b) Gráfico demonstrando de forma visual uma variação de dados por tamanho de *payload*.

Figura 10 – Gráficos de demonstração para facilitar interpretação dos dados.

de variações dentro dos grupamentos de barra, enquanto a Figura 10b demonstra que a influência do tamanho do payload se manifesta pelo aumento geral do grupo de barras.

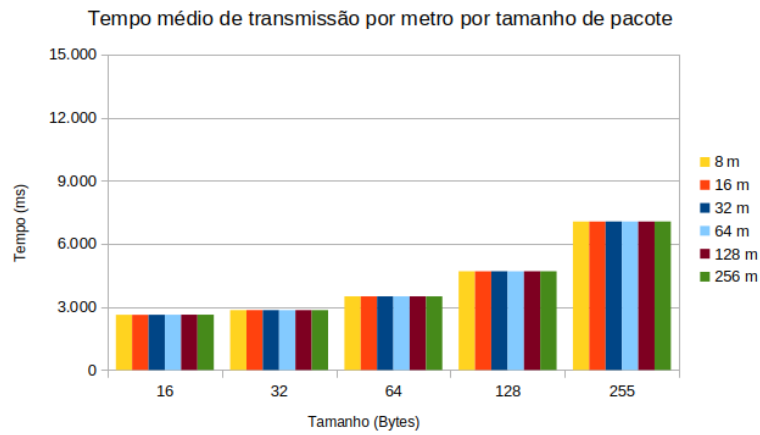
5.1 Radiofrequência (RF)

Os módulos de RF utilizados operam em 433 MHz e apresentam uma arquitetura bastante simplificada. Diferente de outras tecnologias avaliadas, esses módulos não implementam camadas adicionais de *firmware* para controle de fluxo, endereçamento ou correção de erros. Toda a responsabilidade pela integridade da comunicação recai sobre o *firmware* do microcontrolador e o protocolo de nível superior desenvolvido para o projeto.

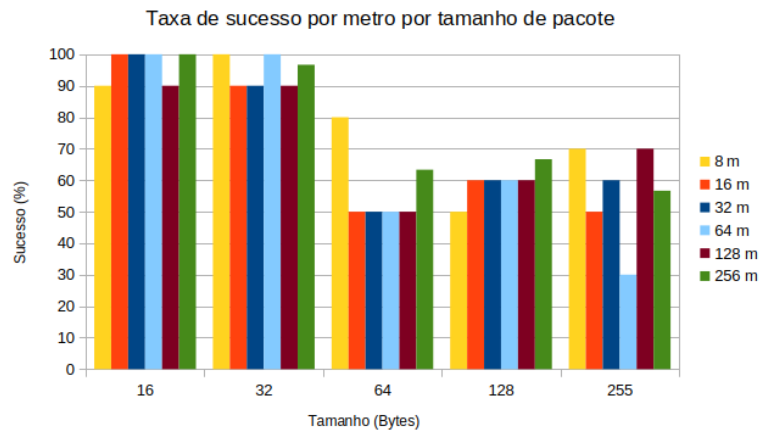
Segundo o guia (MURTA, 2018), foram utilizadas inicialmente antenas de 17,28 cm (1/4 do comprimento de onda, que é de aproximadamente 69 cm), mas depois decidiu-se por antenas de 34,56 cm (1/2 do comprimento) reaproveitadas de (JESUS *et al.*, 2023). Estas antenas de 34,56 cm encontravam-se enroladas em forma de mola, mas obtiveram resultados melhores estando mais expandidas, como visto na Figura 12. Todos os resultados expostos neste trabalho foram obtidos usando esta versão com antenas expandidas. O guia também aponta para um consumo energético de 20 a 28 mA (dependendo da tensão de alimentação), com tensão de alimentação: 3 a 12 V. A alimentação usada foi a porta de 5V da MCU. Na Tabela 5 representada pelos gráficos da Figura 11, é possível ver que

Tabela 5 – Resultados do segundo teste com o módulo RF.

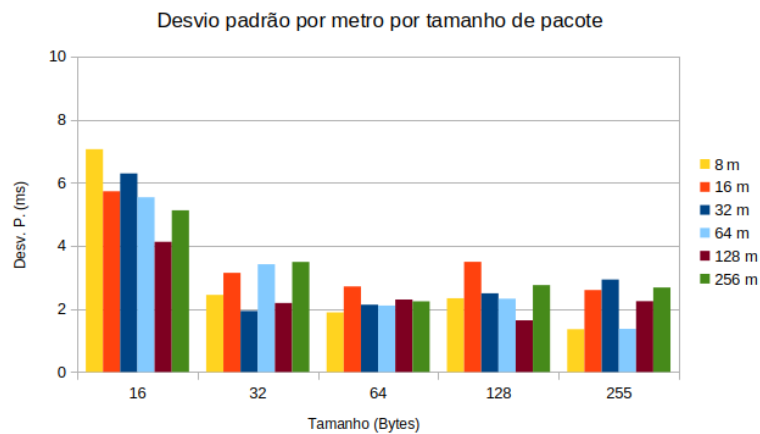
Metros	Bytes	T. Médio (ms)	Maior T. (ms)	Menor T. (ms)	Sucesso (%)	DP (ms)
8	16	2.624,03	2.632,06	2.614,55	90	7,060
	32	2.844,60	2.849,97	2.841,84	100	2,442
	64	3.499,34	3.501,78	3.496,46	80	1,887
	128	4.690,53	4.694,65	4.689,05	50	2,336
	255	7.055,16	7.056,94	7.053,57	70	1,355
16	16	2.620,36	2.631,17	2.613,66	100	5,727
	32	2.845,43	2.852,59	2.841,67	90	3,140
	64	3.499,81	3.502,12	3.495,43	50	2,710
	128	4.688,32	4.694,56	4.685,18	60	3,490
	255	7.055,22	7.058,38	7.052,00	50	2,595
32	16	2.622,35	2.633,40	2.614,11	100	6,292
	32	2.844,53	2.846,92	2.841,34	90	1,932
	64	3.500,18	3.502,78	3.498,15	50	2,132
	128	4.689,71	4.693,02	4.686,17	60	2,492
	255	7.055,67	7.059,64	7.050,65	60	2,928
64	16	2.625,81	2.633,00	2.618,24	100	5,536
	32	2.842,35	2.848,01	2.838,57	100	3,414
	64	3.499,93	3.502,92	3.497,15	50	2,103
	128	4.688,12	4.690,69	4.685,16	60	2,321
	255	7.056,03	7.056,82	7.054,46	30	1,365
128	16	2.626,92	2.632,77	2.619,74	90	4,124
	32	2.843,25	2.845,96	2.839,91	90	2,186
	64	3.498,72	3.502,52	3.496,90	50	2,295
	128	4.689,85	4.691,91	4.687,20	60	1,636
	255	7.054,31	7.057,48	7.051,23	70	2,242
256	16	2.627,44	2.634,18	2.614,01	100	5,124
	32	2.844,84	2.851,19	2.839,85	96,7	3,486
	64	3.499,11	3.502,90	3.494,90	63,3	2,238
	128	4.691,22	4.697,02	4.685,92	66,7	2,752
	255	7.055,64	7.059,71	7.051,38	56,7	2,676



(a) Gráfico mostrando as médias de tempo por distância por tamanho de pacote.



(b) Gráfico mostrando a taxa de sucesso por distância por tamanho de pacote.



(c) Gráfico mostrando o desvio por distância por tamanho de pacote.

Figura 11 – Gráficos dos resultados obtidos do RF.

os resultados são consistentes, sendo mais afetados pelo tamanho do *payload* do que pela distância. A Figura 11a mostra que a diferença na latência através das distâncias é

negligível. Na Figura 11b, entretando, é possível notar o impacto da distância na perda de pacotes. A Figura 11c mostra um desvio padrão entre 4 e 8 ms para payloads de 16 bytes e entre 1 e 4 ms para os outros tamanhos.



Figura 12 – Protótipo do RF.

5.2 BLE

O BLE no ESP32 não precisou de montagem de protótipo (ver Figura 13), mas apresentou a maior complexidade no desenvolvimento do *firmware*. O código precisou implementar a funcionalidade de procura de dispositivos e pareamento, e os comportamentos de envio entre *master* e *slave* são diferentes. Devido a limitação da tecnologia usada, foi adicionada uma marca de distância extra representando o alcance máximo de pareamento, que é 20 m, e outra de 1 m.

Fontes não acadêmicas sugerem um gasto médio de energia de 0.001 mA com picos de consumo durante transmissão que não passam de 15 mA (EMBEDDED, 2016). Fontes acadêmicas atestam que a implementação de redes *mesh* com BLE possui muitos desafios, mas com avanços significativos (DARROUDI; GOMEZ, 2017; VILLA *et al.*, 2022). A tecnologia possui criptografia AES de 128 bits, autenticação e assinatura de dados (ALECRIM; MARQUES, 2023).

Os dados da Tabela 6, demonstrados nos gráficos da Figura 14, demonstram uma extrema confiabilidade na entrega de pacotes, com 100% de sucesso em todos os testes

Tabela 6 – Resultados dos testes com o módulo BLE.

Metros	Bytes	T. Médio (ms)	Maior T. (ms)	Menor T. (ms)	Sucesso (%)	DP (ms)
1	16	2.373,34	3.678,57	2.192,53	100	458,968
	32	2.324,68	2.335,75	2.295,52	100	12,231
	64	2.489,86	2.525,76	2.466,00	100	20,020
	128	2.905,03	2.938,84	2.878,74	100	17,580
	255	3.685,59	3.754,65	3.653,51	100	28,790
4	16	2.210,75	2.233,46	2.190,70	100	13,754
	32	2.289,39	2.312,64	2.277,65	100	10,813
	64	2.452,12	2.478,33	2.433,34	100	13,865
	128	2.835,90	2.847,06	2.820,96	100	8,958
	255	3.574,67	3.593,23	3.563,11	100	7,764
8	16	2.221,52	2.247,74	2.191,26	100	17,296
	32	2.297,86	2.346,18	2.282,28	100	18,417
	64	2.471,36	2.511,28	2.433,48	100	26,843
	128	2.973,45	3.127,24	2.840,96	100	89,264
	255	3.671,95	3.866,10	3.592,24	100	80,833
16	16	2.303,03	2.376,45	2.231,91	100	47,044
	32	2.365,07	2.470,07	2.315,85	100	46,775
	64	2.533,73	2.585,83	2.476,35	100	29,678
	128	2.930,26	3.023,57	2.841,00	100	63,795
	255	3.676,67	3.745,90	3.639,44	100	38,101
20	16	2.700,02	2.883,41	2.395,40	100	152,724
	32	3.008,77	3.145,17	2.738,26	100	129,871
	64	3.338,94	3.822,34	2.887,64	100	315,584
	128	4.547,72	5.186,61	3.552,27	100	522,388
	255	7.277,32	8.760,48	5.928,68	100	761,549

de tamanho e distância. Entretanto, ao se tratar de desvio padrão, o BLE é o segundo mais irregular, com valores de até 0,5 s de desvio padrão (para *payloads* de 128 bytes em 20 m).

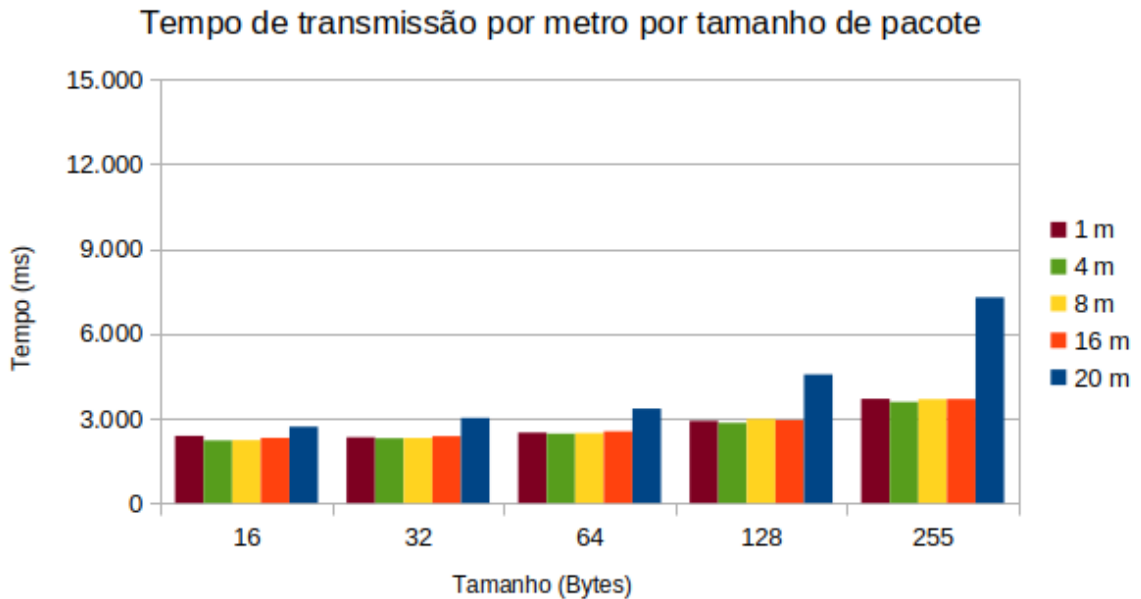
Pelo gráfico da Figura 14b é possível ver que a variação de desvio padrão é mais influenciada por tamanho de *payload*, mas não apresentam padrão concreto. Em (PEÑA; LEGASPI; REYES, 2024), é possível entender as várias camadas de protocolo presentes no BLE. O *Attribute Protocol* (ATT) define 6 tipos diferentes de *Protocol Data Unit* (PDU) para comunicação entre Servidor e Cliente. O *Generic Attribute Profile* (GATT) define em nível de aplicação a forma como os dados são formatados e trocados entre dispositivos.



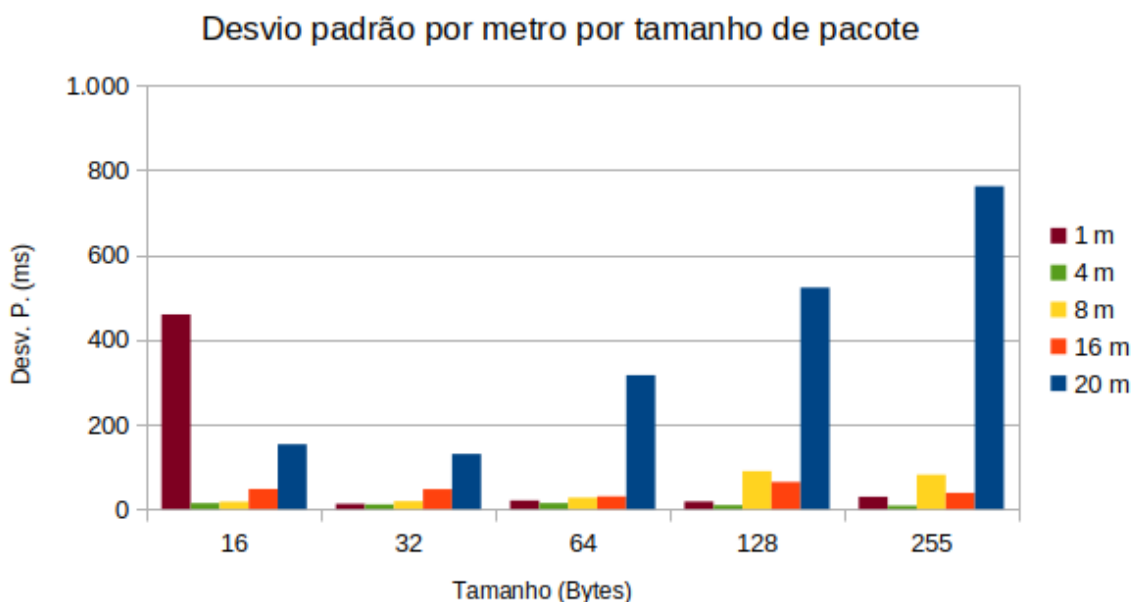
Figura 13 – Protótipo do BLE.

Todos esses processos podem ser responsáveis pelo alto desvio padrão observado.

A latência observada é consistente, se mantendo entre 2 e 4 segundos. Entre 1 e 16 metros os resultados se mantêm similares, sendo pouco afetados por distância e mais por tamanho de *payload*. Na marca de 20 metros, entretanto, conforme o tamanho do *payload* aumenta, a latência e desvio padrão acompanham. Ver Figura 14a e Figura 14b.



(a) Gráfico mostrando as médias de tempo por distância por tamanho de pacote.



(b) Gráfico mostrando o desvio padrão por distância por tamanho de pacote.

Figura 14 – Gráficos dos resultados obtidos do BLE.

5.3 XBee

O XBee acoplado à placa XBee Explorer precisou primeiro ser configurado por um programa proprietário chamado XCTU. Nele foram estabelecidos os parâmetros básicos para se estabelecer uma comunicação, como canal utilizado, nome da rede e definição dos papéis de Roteador e Coordenador. Após configurar o *firmware* do módulo, é possível estabelecer comunicação através da conexão USB.

O protótipo final foi posicionado com a antena inbutida para fora, conforme demonstrado na Figura 15. De acordo com a *Datasheet* do módulo, o consumo de energia do XBee em *power down* é de 0.001mA, para transmissão pode chegar a 33-45mA e 28-31mA para recepção. O XBee também possui suporte para redes *mesh* e segurança com Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS).



Figura 15 – Protótipo do XBee.

Os dados da Tabela 7, demonstrados nos gráficos da Figura 16, demonstram uma capacidade de comunicação a até 256 m, com RTT tipicamente abaixo de 3 s, conforme o gráfico na Figura 16a.

Nenhuma das rodadas de teste obteve 100% de sucesso na entrega dos *payloads*, mas se mantiveram entre 50% e 90% para mensagens de 16 a 128 bytes. Também não houveram casos de 0% de entrega, sendo o menor de 3,33% para *payloads* de 255 bytes a 256 m. Na Figura 16b é possível ver que a taxa de sucesso é mais afetada pelo tamanho do *payload*. Os dados revelam também que a influência da distância na taxa de sucesso é pequena, com perdas menores entre 16 e 64 m. Entretanto, os *payloads* de 255 bytes apresentaram um comportamento inverso, com a taxa de sucesso variando significativamente com a distância, tendo a maior perda na marca de 32 m e maior sucesso na marca de 128 m.

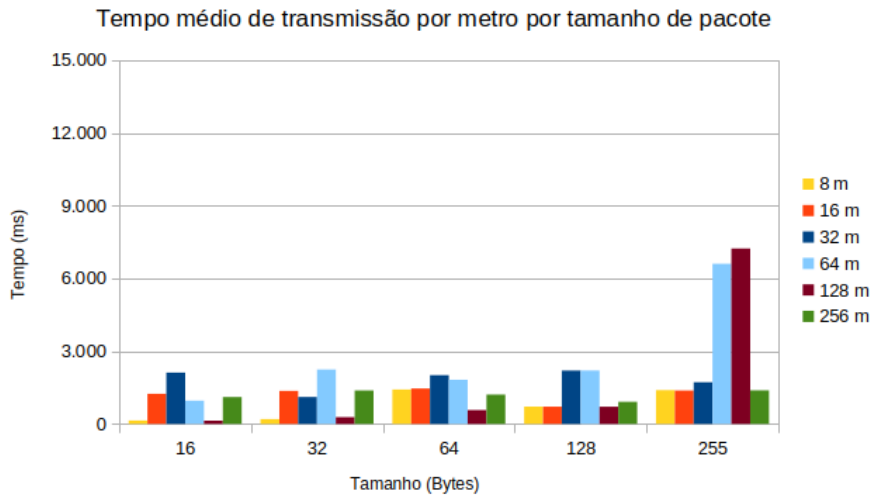
Como exibido na Figura 16c XBee foi o módulo que apresentou os maiores desvios

padrões entre todos os dispositivos testados. A relação entre tamanho de *payload*, distância e desvio padrão não se mostrou linear ou facilmente previsível. Durante a condução dos experimentos, observou-se que muitos pacotes ficavam retidos por longos períodos antes de serem entregues em sequência, resultando em altas taxas de perda por *timeout* e desvios padrões elevados.

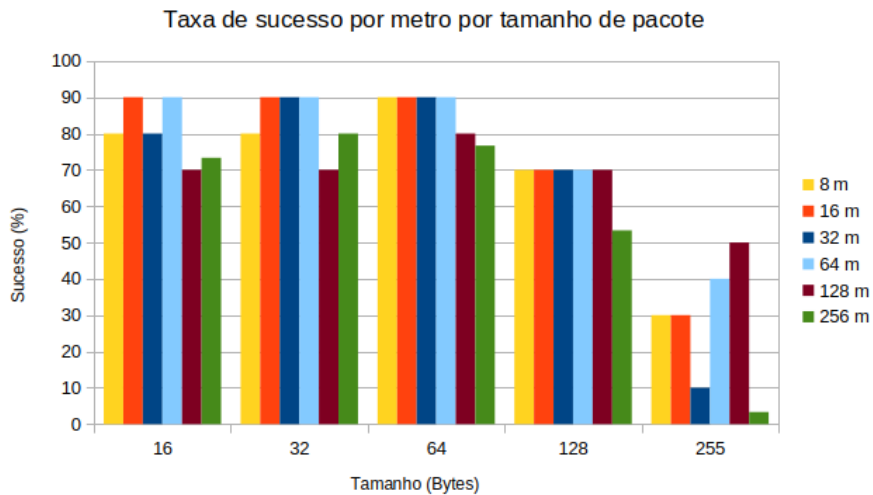
O alto desvio padrão (0–5 s) no RTT do XBee, especialmente com grandes *payloads*, pode ser explicado pelo atraso acumulado na camada de acesso ao meio (*Media Access Control* – MAC), responsável por controlar o acesso ao canal de comunicação. Essa camada implementa mecanismos como o *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance* (CSMA-CA), o *Clear Channel Assessment* (CCA), além de algoritmos de *backoff*, fragmentação de pacotes e múltiplas tentativas de retransmissão. Também contribui para a variabilidade a oscilação da qualidade do canal, evidenciada pela flutuação na força do sinal recebido (RSSI). Estudos acadêmicos semelhantes (WANG *et al.*, 2020; NAZABAL *et al.*, 2012; LÓPEZ-VILOS *et al.*, 2021) reforçam que tais fatores podem levar a latências elevadas e jitter significativo, inclusive em distâncias relativamente curtas.

Tabela 7 – Resultados dos testes com o módulo XBee.

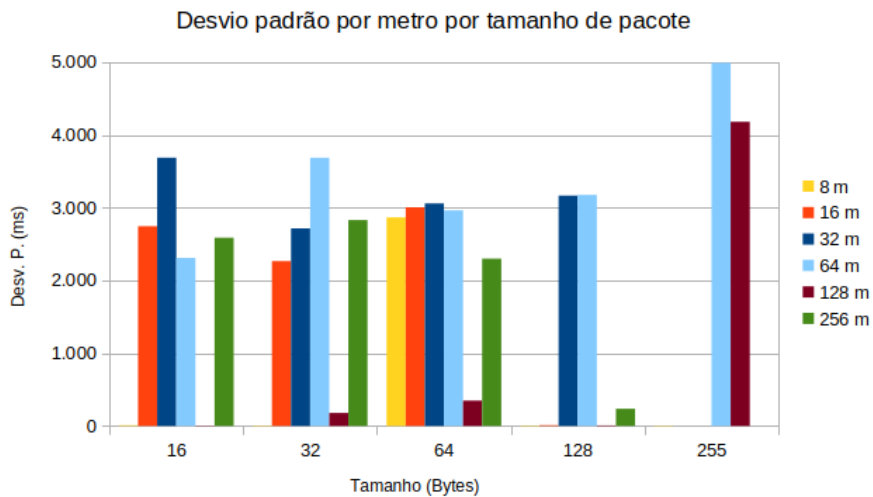
Metros	Bytes	T. Médio (ms)	Maior T. (ms)	Menor T. (ms)	Sucesso (%)	DP (ms)
8	16	141,05	151,31	128,93	80	9,846
	32	200,56	211,88	194,69	80	6,212
	64	1.417,77	9.037,31	339,74	90	2.865,357
	128	713,84	724,08	705,98	70	7,295
	255	1.392,89	1.397,19	1.386,62	30	5,552
16	16	1.240,76	8.497,45	128,92	90	2.744,547
	32	1.361,60	7.104,52	204,66	90	2.263,885
	64	1.459,65	9.424,69	335,94	90	3.004,380
	128	711,12	723,53	692,70	70	10,712
	255	1.377,14	1.377,99	1.376,69	30	0,738
32	16	2.115,79	8.741,72	132,35	80	3.685,549
	32	1.109,25	8.347,55	195,13	90	2.714,377
	64	2.010,25	7.702,04	332,86	90	3.057,684
	128	2.200,47	9.186,12	705,47	70	3.164,656
	255	1.717,91	1.717,91	1.717,91	10	
64	16	959,08	7.101,80	130,39	90	2.308,241
	32	2.242,40	9.039,76	194,96	90	3.684,408
	64	1.818,06	7.706,86	324,30	90	2.962,622
	128	2.203,54	9.212,31	696,21	70	3.174,343
	255	6.600,43	12.546,07	1.861,06	40	4.989,700
128	16	133,90	139,94	129,87	70	3,689
	32	278,41	680,92	205,37	70	177,553
	64	570,65	1.266,80	336,92	80	347,994
	128	707,65	717,71	695,73	70	7,941
	255	7.231,62	13.199,86	3.780,98	50	4.179,170



(a) Gráfico mostrando as médias de tempo por distância por tamanho de pacote.



(b) Gráfico mostrando a taxa de sucesso por distância por tamanho de pacote.



(c) Gráfico mostrando o desvio padrão por distância por tamanho de pacote.

Figura 16 – Gráficos dos resultados obtidos do XBee.

5.4 Bluetooth

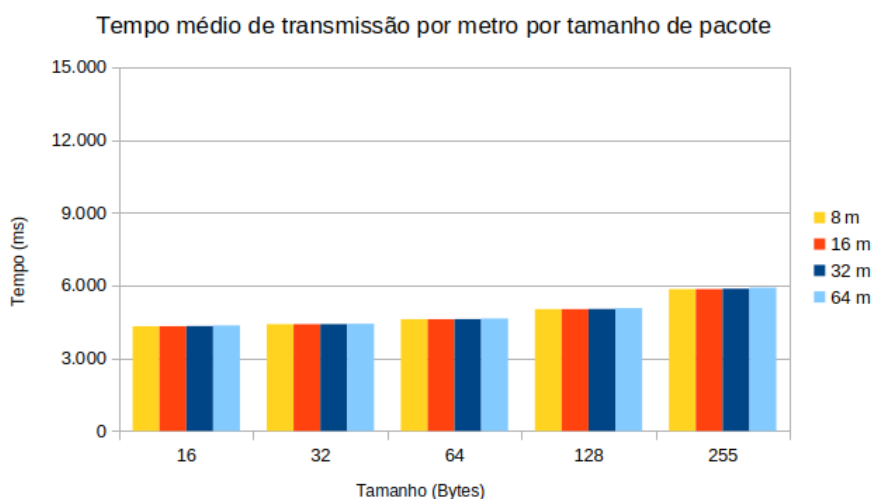
O Módulo Bluetooth HC-05 utiliza a interface serial UART, e precisa ser configurado em modo AT de modo serial com a opção *Both NL & CN*. Neste modo, são configuradas a senha e o papel como *master* ou *slave*. A Figura 17 mostra o protótipo usado neste trabalho.

Para haver pareamento, ambos devem possuir a mesma senha, sendo um *master* e outro *slave*. Foi necessário implementar um divisor de tensão na entrada RX (EWALD, 2020). Neste trabalho, foi usado um divisor com duas resistências de 1kOhm. Após as configurações, os HC-05 só parearam até 64 m. O módulo HC-05 possui um consumo de 8mA em *idle mode*, mas pareado pode alcançar consumo de 30-40mA. Sua conexão é ponto-a-ponto e possui segurança através do uso de senha para pareamento.

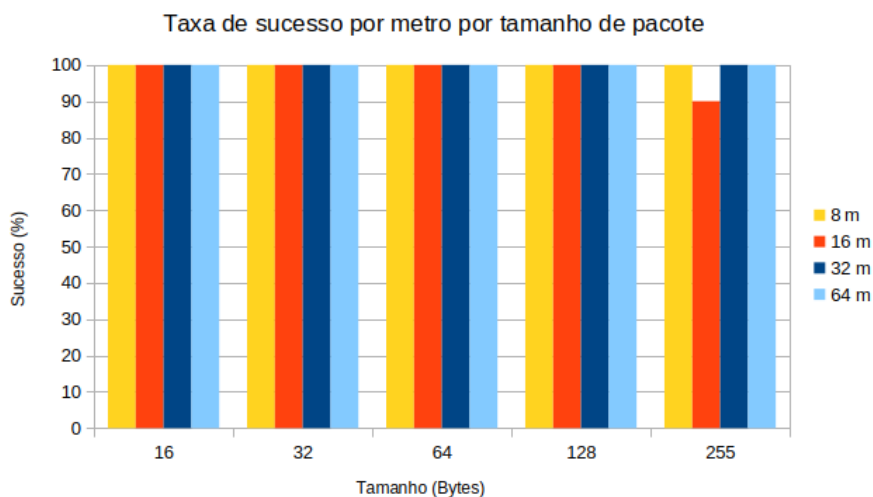
Os dados da Tabela 8, apresentados nos gráficos da Figura 18, mostram que o tamanho do *payload* tem mais impacto na latência e desvio padrão de forma proporcional, conforme mostrado nas Figuras 18a e 18c. A taxa de sucesso (Figura 18b) se mantém 100% para todos os testes do HC-05, com exceção do *payload* de 255 bytes na marca de 16 m, que perdeu um *payload* por *timeout*.



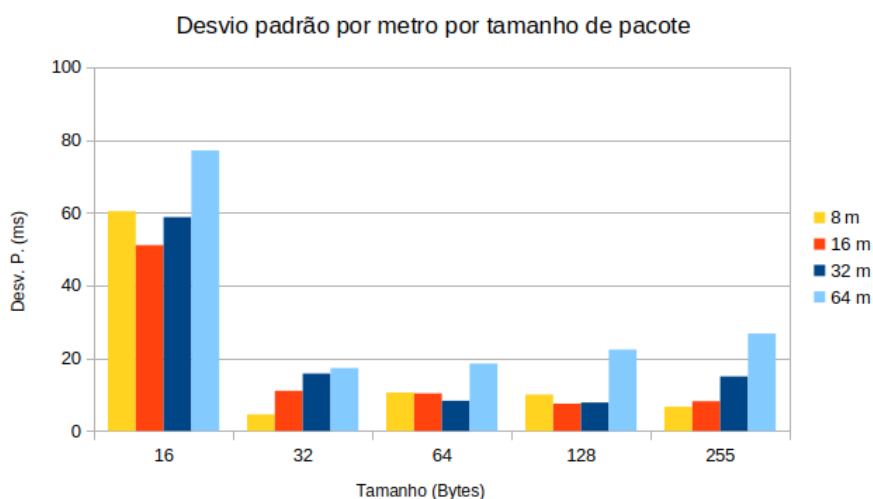
Figura 17 – Protótipo do Bluetooth.



(a) Gráfico mostrando as médias de tempo por distância por tamanho de pacote.



(b) Gráfico mostrando a taxa de sucesso por distância por tamanho de pacote.



(c) Gráfico mostrando o desvio padrão por distância por tamanho de pacote.

Figura 18 – Gráficos dos resultados obtidos do Bluetooth.

Tabela 8 – Resultados dos testes com o módulo Bluetooth.

Metros	Bytes	T. Médio (ms)	Maior T. (ms)	Menor T. (ms)	Sucesso (%)	DP (ms)
8	16	4.315,41	4.484,12	4.277,51	100	60,385
	32	4.399,30	4.410,78	4.394,70	100	4,528
	64	4.606,98	4.622,12	4.589,39	100	10,550
	128	5.020,82	5.038,48	5.008,04	100	10,000
	255	5.844,83	5.853,88	5.837,29	100	6,648
16	16	4.316,63	4.453,82	4.271,81	100	51,040
	32	4.400,43	4.426,38	4.386,83	100	11,016
	64	4.605,50	4.621,88	4.589,69	100	10,322
	128	5.020,14	5.034,83	5.010,58	100	7,494
	255	5.844,37	5.864,31	5.836,29	90	8,157
32	16	4.323,42	4.487,60	4.284,09	100	58,739
	32	4.402,40	4.430,73	4.378,72	100	15,761
	64	4.608,69	4.626,72	4.599,49	100	8,285
	128	5.026,98	5.038,91	5.013,23	100	7,811
	255	5.861,59	5.884,53	5.840,27	100	14,975
64	16	4.349,28	4.564,40	4.311,69	100	77,078
	32	4.416,23	4.444,80	4.395,06	100	17,301
	64	4.633,67	4.670,44	4.603,22	100	18,508
	128	5.059,98	5.097,20	5.026,30	100	22,349
	255	5.909,00	5.963,59	5.864,33	100	26,767

5.5 nRF24L01

O módulo nRF24L01 foi conectado diretamente à MCU através de *jumpers*, sem uso de conversores de potência. Os motivos serão discutidos mais adiante na Seção 6.1. Ao invés disso, o módulo foi alimentado diretamente pela porta de 3.3V da MCU. Devido às limitações de alimentação da MCU utilizada, foi decidido pela menor potência RF24_PA_MIN (0).

A Tabela 9 mostra as opções de potência disponíveis para o transmissor. O arduino consegue fornecer até 50mA (SAHA *et al.*, 2017), enquanto o consumo do nRF24L01 é de 12mA, podendo alcançar picos de 115mA para transmissão (FIRDAUS *et al.*, 2022; CUI *et al.*, 2018). A documentação *online* da biblioteca *RF24.h* não implementa criptografia de dados.

Tabela 9 – Níveis de potência em dBm (decibel-milliwatt) de transmissão configuráveis para diferentes módulos nRF24L01.

Nível de Potência	nRF24L01
RF24_PA_MIN (0)	-18 dBm
RF24_PA_LOW (1)	-12 dBm
RF24_PA_HIGH (2)	-6 dBm
RF24_PA_MAX (3)	0 dBm

Os resultados da Tabela 10, apresentados nos gráficos da Figura 20, foram consistentes apenas até a marca de 128 m, com 100% de sucesso. Na marca de 256 m, o transmissor falhou em entregar pacotes. O gráfico na Figura 20a aponta que a latência é afetada levemente pelo tamanho do *payload*.

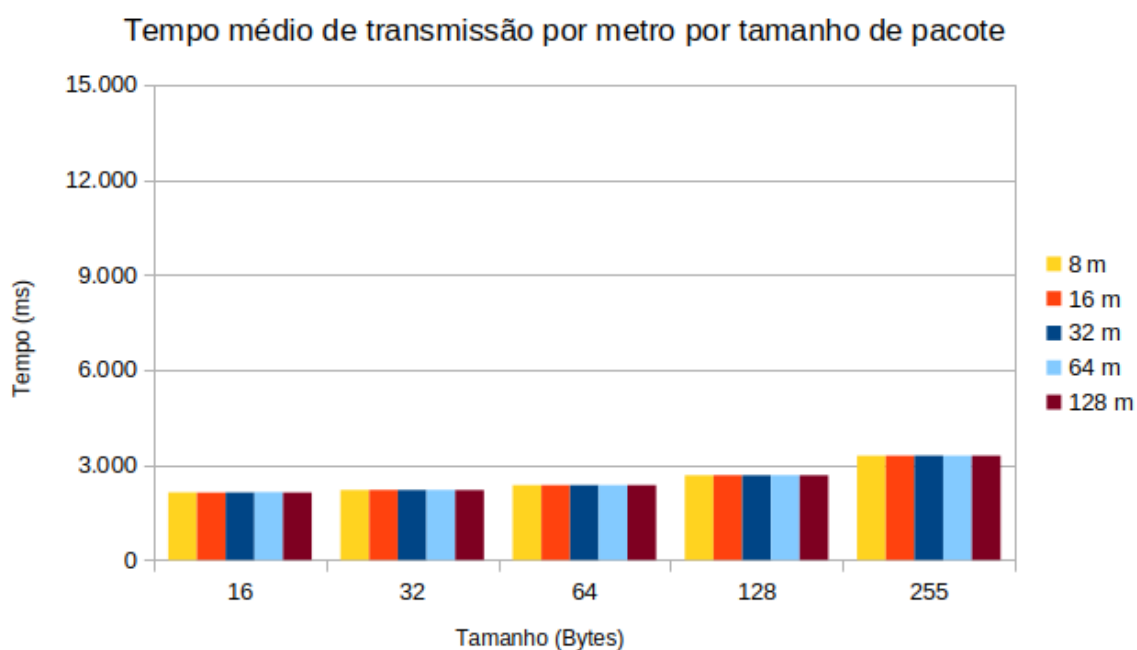
Tabela 10 – Resultados dos testes com o módulo nRF24L01.

Metros	Bytes	T. Médio (ms)	Maior T. (ms)	Menor T. (ms)	Sucesso (%)	DP (ms)
8	16	2.130,23	2.139,91	2.112,94	100	10,93
	32	2.204,97	2.214,22	2.198,77	100	5,443
	64	2.357,07	2.360,22	2.352,72	100	2,408
	128	2.669,94	2.672,27	2.668,00	100	1,124
	255	3.288,52	3.292,22	3.285,78	100	1,988
16	16	2.123,55	2.135,89	2.111,85	100	8,56
	32	2.206,61	2.216,55	2.200,00	100	6,359
	64	2.358,10	2.360,60	2.352,39	100	2,545
	128	2.670,79	2.675,26	2.666,97	100	2,672
	255	3.288,93	3.295,26	3.284,23	100	3,323
32	16	2.127,87	2.140,39	2.117,57	100	7,959
	32	2.204,07	2.208,77	2.198,87	100	3,813
	64	2.358,89	2.362,27	2.354,44	100	2,253
	128	2.669,52	2.671,64	2.666,96	100	1,381
	255	3.291,75	3.297,29	3.285,27	100	3,782
64	16	2.137,94	2.144,99	2.122,19	100	6,201
	32	2.205,76	2.212,68	2.200,25	100	3,902
	64	2.358,77	2.360,61	2.357,23	100	1,455
	128	2.670,40	2.674,19	2.666,88	100	2,383
	255	3.289,44	3.295,10	3.285,13	100	2,96
128	16	2.126,90	2.138,54	2.113,72	100	9,412
	32	2.202,62	2.207,34	2.198,48	100	2,728
	64	2.358,18	2.362,47	2.354,43	100	2,867
	128	2.669,69	2.673,60	2.666,92	100	1,875
	255	3.289,56	3.293,50	3.286,94	100	2,266

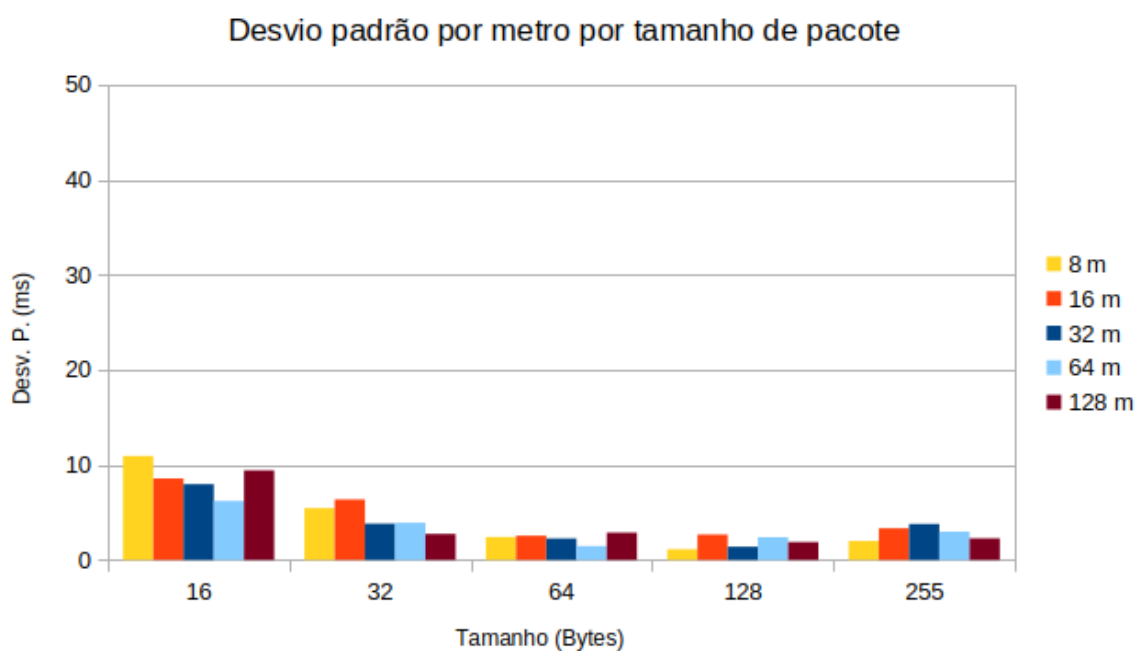
Outro aspecto afetado pelo tamanho de *payload* é o desvio padrão, sendo maior para mensagens menores, conforme mostrado na Figura 20b. A influência da distância na latência é praticamente inexistente.



Figura 19 – Protótipo do nRF24L01.



(a) Gráfico mostrando as médias de tempo por distância por tamanho de pacote.



(b) Gráfico mostrando o desvio padrão por distância por tamanho de pacote.

Figura 20 – Gráficos dos resultados obtidos do nRF24L01.

5.6 LoRa

De todas as tecnologias avaliadas, a LoRa é a que possui maior alcance teórico. Por este motivo, optou-se pela adição de duas marcas de distância novas: 1024m e 2600m (medido de forma aproximada via satélite). Com interface UART e uma antena de 18,5 cm com cabo de extensão de 1 m (conforme mostrado na Figura 21), este módulo de maior custo foi também o mais fácil de se implementar. O seu consumo de energia em *sleep mode* é de cerca de 0.004mA, mas pode chegar a 110mA para transmissão e 14mA para recebimento. De acordo com o manual do módulo SX1278 E32 Series, o módulo possui suporte a criptografia. Existem protocolos que possibilitam formações topológicas em mesh (SOLÉ *et al.*, 2022; LUNDELL *et al.*, 2018).



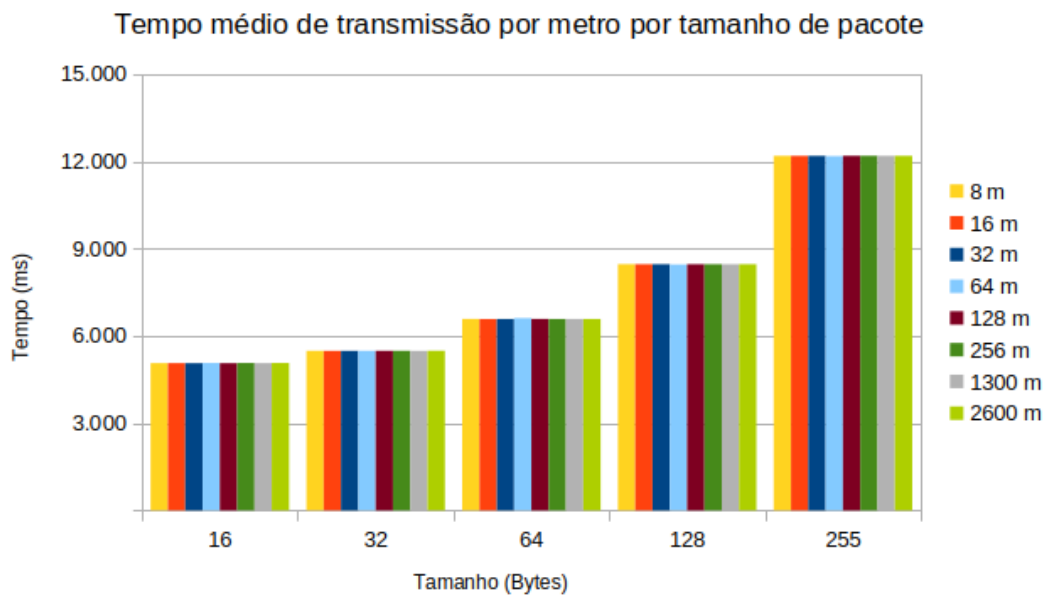
Figura 21 – Protótipo do LoRa.

Os dados obtidos na Tabela 11, exibidos nos gráficos da Figura 22, mostram que este módulo é capaz de transmitir a longas distâncias com 100% de sucesso para todos os testes. Foi observado um desvio padrão menor do que 10 ms para a grande maioria dos casos. A Figura 22b mostra que apenas 2 séries de testes passaram de 10 ms na marca de 64 m.

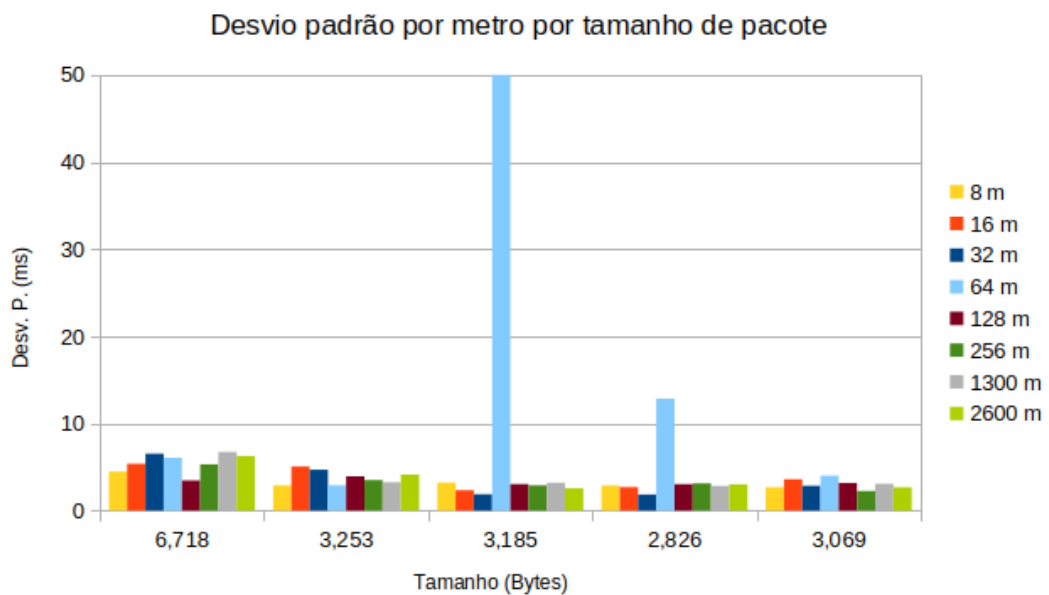
Pode-se observar que a latência é mais afetada por tamanho de *payload*. Entretanto, é possível ver na Figura 22a uma latência relativamente grande, e grande tendência de aumento por tamanho de *payload*.

Tabela 11 – Resultados dos testes com o módulo LoRa.

Metros	Bytes	T. Médio (ms)	Maior T. (ms)	Menor T. (ms)	Sucesso (%)	DP (ms)
8	16	5.061,07	5.068,04	5.054,04	100	4,483
	32	5.482,76	5.488,42	5.478,32	100	2,887
	64	6.578,88	6.583,26	6.573,54	100	3,207
	128	8.464,05	8.468,97	8.460,13	100	2,877
	255	12.187,28	12.192,06	12.183,65	100	2,677
16	16	5.061,41	5.070,56	5.054,21	100	5,371
	32	5.482,49	5.490,49	5.477,32	100	5,057
	64	6.575,57	6.579,80	6.571,95	100	2,333
	128	8.463,04	8.466,75	8.459,65	100	2,688
	255	12.187,48	12.192,03	12.180,80	100	3,586
32	16	5.059,01	5.072,83	5.050,56	100	6,521
	32	5.482,09	5.490,21	5.476,47	100	4,682
	64	6.575,96	6.579,82	6.573,71	100	1,866
	128	8.461,82	8.465,15	8.459,26	100	1,833
	255	12.185,42	12.189,58	12.181,67	100	2,844
64	16	5.064,33	5.070,23	5.051,33	100	6,058
	32	5.483,37	5.488,84	5.480,04	100	2,893
	64	6.606,40	6.706,72	6.566,78	100	51,184
	128	8.452,72	8.466,59	8.430,61	100	12,840
	255	12.176,45	12.181,31	12.166,95	100	4,005
128	16	5.058,91	5.063,87	5.053,01	100	3,448
	32	5.483,23	5.489,57	5.479,02	100	3,934
	64	6.578,37	6.585,46	6.574,90	100	3,037
	128	8.461,90	8.467,29	8.457,73	100	3,028
	255	12.188,05	12.192,24	12.184,62	100	3,166
256	16	5.064,57	5.075,59	5.052,44	100	5,305
	32	5.483,12	5.490,88	5.474,78	100	3,491
	64	6.577,36	6.582,81	6.572,36	100	2,897
	128	8.463,24	8.470,06	8.457,78	100	3,122
	255	12.187,99	12.192,77	12.183,94	100	2,245
1300	16	5.059,96	5.080,23	5.050,90	100	6,718
	32	5.482,44	5.489,50	5.474,69	100	3,253
	64	6.576,47	6.582,01	6.569,19	100	3,185
	128	8.461,47	8.465,52	8.456,17	100	2,826
	255	12.186,79	12.194,27	12.178,13	100	3,069
2600	16	5.064,69	5.074,16	5.053,64	100	6,255
	32	5.484,93	5.493,51	5.478,80	100	4,119
	64	6.577,53	6.581,86	6.573,06	100	2,549
	128	8.463,60	8.469,14	8.457,06	100	3,002
	255	12.187,06	12.192,41	12.182,17	100	2,669



(a) Gráfico mostrando as médias de tempo por distância por tamanho de pacote.



(b) Gráfico mostrando o desvio padrão por distância por tamanho de pacote. Os testes de 64 B a 64 m passam do topo do gráfico por apenas 1,184 ms.

Figura 22 – Gráficos dos resultados obtidos do LoRa.

5.7 Comparativo Geral

Nesta seção são discutidos, de forma comparativa, os resultados dos testes experimentais realizados com as diferentes tecnologias de comunicação sem fio avaliadas. São analisados os seguintes aspectos: desempenho em latência, variação temporal (desvio padrão), taxa de sucesso de transmissão, consumo de energia, recursos de segurança e capacidade de formação de redes distribuídas (*mesh* ou *ad hoc*).

5.7.1 Desempenho Médio de Latência

Ao comparar os tempos médios de envio, o módulo nRF24L01 destacou-se por apresentar as menores latências médias entre as tecnologias testadas, com valores típicos entre 2,1 s e 3,3 s, mesmo em distâncias maiores (até 128 metros). O BLE apresentou latências entre 2,2 s e 7,2 s, demonstrando boa estabilidade conforme a distância e o tamanho do *payload* aumentaram.

O HC-05 apresentou latências mais elevadas, iniciando em 4,3 s para pacotes de 16 bytes e alcançando cerca de 5,9 s para pacotes de 255 bytes. A tecnologia LoRa, apesar de sua vocação para longas distâncias, foi a que apresentou as maiores latências médias, variando de aproximadamente 5 s até mais de 12 s.

O XBee mostrou um comportamento inconsistente: teve bons resultados de latência para mensagens pequenas em curtas distâncias, mas apresentou picos extremos (superiores a 9 segundos) para pacotes maiores, evidenciando instabilidades.

5.7.2 Variação Temporal (Desvio Padrão)

O desvio padrão das medições reforçou as observações anteriores. O nRF24L01 demonstrou excelente previsibilidade, com baixíssima variação temporal. O BLE manteve um desvio padrão moderado, com aumentos graduais proporcionalmente à distância e ao tamanho da mensagem.

Por outro lado, o XBee, o HC-05 e os módulos RF 433 MHz apresentaram variações consideráveis. Em especial, o XBee registrou desvios de até 5 segundos em cenários com pacotes grandes. O RF também demonstrou elevada dispersão temporal.

Apesar de sua alta latência média, o LoRa destacou-se pela estabilidade, com desvios padrão tipicamente inferiores a 6 ms, o que é um indicativo positivo para aplicações que toleram maior atraso, mas demandam consistência temporal.

5.7.3 Taxa de Sucesso de Transmissão

Em relação à taxa de sucesso, o nRF24L01, o BLE e o LoRa atingiram 100% de entregas bem-sucedidas em todas as condições testadas, incluindo grandes distâncias e diferentes tamanhos de *payload*.

O XBee apresentou forte queda de desempenho em cenários mais exigentes: em distâncias superiores a 32 metros e com pacotes acima de 128 bytes, a taxa de sucesso caiu para até 10%. O RF 433 MHz também registrou perdas significativas, com sucessos variando entre 30% e 50% nas distâncias mais longas e com *payloads* maiores. O HC-05 manteve taxas superiores a 90%, com pequenas perdas observadas apenas nos cenários mais desafiadores.

5.7.4 Consumo de Energia

O consumo de energia das tecnologias testadas apresenta grande variação. O BLE destaca-se pelo baixo consumo, com média de 0,001 mA em repouso e picos de até 15 mA durante a transmissão (EMBEDDED, 2016). O nRF24L01, com consumo de cerca de 12 mA em operação e picos de até 115 mA, mostra-se eficiente considerando seu desempenho (FIRDAUS *et al.*, 2022; CUI *et al.*, 2018).

O XBee, por sua vez, apresenta consumo mais elevado, atingindo até 45 mA em transmissão. O HC-05 opera entre 8 mA (em *idle*) e até 40 mA durante o pareamento. O RF 433 MHz tem consumo de 20 a 28 mA, dependendo da tensão de alimentação. O LoRa, apesar de seu alcance, mostra-se relativamente eficiente, com apenas 0,004 mA em *sleep mode*, 14 mA em recepção e até 110 mA em transmissão.

5.7.5 Segurança e Recursos de Rede

Em relação à segurança, o BLE oferece criptografia AES de 128 bits, autenticação e assinatura de dados (ALECRIM; MARQUES, 2023). O LoRa também possui suporte a criptografia, segundo a documentação do módulo SX1278. O XBee implementa segurança baseada em *Direct Sequence Spread Spectrum* (DSSS), além de autenticação via configuração de rede. O HC-05 oferece proteção básica por senha de pareamento, enquanto o nRF24L01, na implementação utilizada, não possui criptografia nativa. Os módulos RF 433 MHz, por sua vez, são totalmente dependentes de implementações no nível de aplicação para qualquer camada de segurança.

No que diz respeito à capacidade de rede, o XBee foi o único módulo testado com suporte nativo a redes *mesh*, viabilizado por sua configuração via XCTU. O BLE também apresenta, em implementações avançadas, suporte experimental a redes *mesh*, embora com desafios reconhecidos na literatura (DARROUDI; GOMEZ, 2017; VILLA *et al.*, 2022). Os módulos nRF24L01, LoRa e RF não possuem suporte nativo a redes *mesh*, mas podem ser configurados para formá-las através de bibliotecas. O módulo HC-05 é o único que não possui esta capacidade por se tratar de conexão exclusiva de ponto-a-ponto.

5.7.6 Resumo Comparativo Geral

Esta análise integrada permite aos desenvolvedores escolher a tecnologia mais adequada conforme os requisitos específicos de suas aplicações, considerando não apenas métricas de desempenho, mas também fatores críticos como segurança, consumo energético e topologia de rede. A Tabela 12 exibe as conclusões tiradas com base nos dados obtidos nos testes conforme as métricas de avaliação. Na Tabela 13, são mostradas informações obtidas *online* através de manuais e *product datasheets*, referentes ao consumo

de energia geral (*idle*, *recieve* e *transmit*), mecanismos de segurança e possibilidade de formação de arquiteturas complexas de redes distribuídas, como a rede em *mesh*.

Tabela 12 – Resumo comparativo dos resultados dos testes conforme as métricas estabelecidas e a maior marca de distância que cada tecnologia foi capaz de comunicar.

Tecnologia	Latência Média	Desvio Padrão	Taxa de Sucesso	Maior Marca
BLE	Baixa	Moderado	100%	20 m
HC-05	Alta	Baixo	≥ 90%	64 m
XBee	Variável	Muito Alto	30%-90%	256 m
RF 433 MHz	Alta	Alto	50%-100%	256 m
nRF24L01	Muito Baixa	Muito Baixo	100%	128 m
LoRa	Muito Alta	Muito Baixo	100%	2,6 Km

Tabela 13 – Resumo comparativo das tecnologias pela bibliografia *online*.

Tecnologia	Consumo de Energia	Segurança	Rede Distribuída
BLE	Muito Baixo	AES 128 bits	Sim
HC-05	Médio	Senha de pareamento	Não
XBee	Alto	DSSS / Autenticação	Sim
RF 433 MHz	Médio	Nenhuma nativa	Sim
nRF24L01	Médio	Nenhuma nativa	Sim
LoRa	Alto	Criptografia interna	Sim

5.8 Análise dos cenários propostos

A partir da comparação entre os requisitos dos cenários hipotéticos definidos na Seção 1.2.1 e os resultados experimentais resumidos na Tabela 12, é possível tirar diversas conclusões relevantes sobre a adequação das tecnologias sem fio para diferentes aplicações industriais.

5.8.1 Adequação por tipo de aplicação

Cada cenário apresenta requisitos específicos quanto ao alcance, à latência e à taxa de perda de pacotes. Os dados obtidos evidenciam que nenhuma tecnologia atende simultaneamente a todos os critérios de todos os cenários, sendo ideal realizar uma escolha baseada no equilíbrio entre os requisitos de cada aplicação.

Aplicações com requisitos críticos de tempo e confiabilidade, como nos Cenários 1 (linha de montagem com robôs colaborativos) e 5 (coordenação de veículos autônomos), exigem latência muito baixa e perdas mínimas. Nesses casos, destacam-se o nRF24L01, com latência muito baixa, 100% de taxa de sucesso e alcance de 128 m, e o BLE, que também apresenta latência baixa e confiabilidade total, mas alcance mais limitado (20 m). Assim, o BLE é adequado apenas a ambientes mais compactos, como o Cenário 1.

Cenários com maior tolerância a latência e perdas, como os Cenários 3 (detecção de incêndio e gases tóxicos) e 4 (monitoramento estrutural), requerem tecnologias com grande alcance. Nesse aspecto, o LoRa é a única tecnologia testada que oferece cobertura acima de 1 km, com 100% de taxa de sucesso e tolerância a latência muito alta, sendo ideal para o Cenário 4 e viável no Cenário 3, desde que os atrasos de comunicação não comprometam a detecção oportuna de riscos.

Aplicações intermediárias, como o Cenário 2 (manutenção preditiva), demandam latência moderada e baixa taxa de perdas, com alcance entre 30 m e 100 m. Tanto o HC-05, com 90% de taxa de sucesso e latência alta porém estável, quanto o nRF24L01 são candidatos adequados, a depender das condições ambientais. O BLE também pode ser considerado em ambientes pequenos.

Tecnologias instáveis, como o XBee e o RF 433 MHz, apresentaram grande variabilidade na taxa de sucesso e latência, sendo indicadas apenas para aplicações menos críticas ou após calibração cuidadosa e controle de interferências.

5.8.2 Resumo de compatibilidade entre cenários e tecnologias

A Tabela 14 reúne abaixo, de forma resumida, as conclusões obtidas pela análise para responder à pergunta feita na Seção 1.2 de Objetivos: Quais tecnologias são adequadas para cada um dos cenários?

Tabela 14 – Tecnologias mais adequadas por cenário, segundo os requisitos e resultados.

Cenário	Tecnologias Recomendadas
1. Robôs colaborativos	nRF24L01, BLE (curto alcance)
2. Manutenção preditiva	nRF24L01, HC-05, BLE (se em ambiente pequeno)
3. Detecção de incêndio/gases	LoRa (latência tolerável), RF 433 MHz (com reservas)
4. Monitoramento estrutural	LoRa
5. Veículos autônomos	nRF24L01, BLE (curto alcance)

5.8.3 Considerações finais sobre as análises

A escolha da tecnologia de comunicação sem fio em contextos industriais deve ser feita com base em critérios técnicos alinhados às exigências específicas da aplicação. Tecnologias como o nRF24L01 e o LoRa se destacam por cobrirem, respectivamente, os extremos dos requisitos de latência e de alcance. Por outro lado, tecnologias como XBee e RF 433 MHz requerem cautela adicional devido à sua variabilidade de desempenho, especialmente em ambientes industriais complexos.

5.9 Reprodutibilidade

A título de reprodutibilidade, todos os códigos usados em python e no *firmware* foram disponibilizados *online* no repositório *git*, junto com uma breve explicação da pinagem e instruções de configuração para cada tecnologia avaliada. Estes conteúdos podem ser acessados em <https://github.com/LabRedesCefetRJ/comunicacao_wireless_arduino>.

6 Conclusão

O presente trabalho realizou uma análise comparativa de desempenho entre diferentes tecnologias de comunicação sem fio, com foco em métricas como latência, variação temporal, taxa de sucesso, consumo de energia, segurança e capacidade de formação de redes distribuídas. Foram testadas seis tecnologias amplamente utilizadas no contexto de redes de sensores sem fio e aplicações de Internet das Coisas (IoT): nRF24L01, BLE, XBee, HC-05, RF 433 MHz e LoRa.

Do ponto de vista da latência, o módulo nRF24L01 destacou-se por apresentar os menores tempos de resposta, aliado a uma estabilidade temporal notável. O BLE também apresentou bom desempenho em latência e consumo energético, sendo adequado para aplicações que demandam baixo consumo com tempos razoáveis de resposta. O LoRa, por outro lado, apresentou as maiores latências, mas com excelente estabilidade e alcance, tornando-se uma opção atrativa para cenários onde o tempo de resposta pode ser mais tolerante.

A taxa de sucesso foi um critério determinante: BLE, nRF24L01 e LoRa atingiram 100% de sucesso nas condições de teste. O XBee e o RF 433 MHz apresentaram quedas significativas nas condições mais adversas, o que limita seu uso em aplicações que demandam alta confiabilidade.

Em relação ao consumo energético, as diferenças foram expressivas. O BLE mostrou-se a tecnologia mais eficiente nesse aspecto, enquanto o XBee e o LoRa apresentaram consumos significativamente mais altos durante a transmissão. Esse fator torna o BLE especialmente atrativo para dispositivos alimentados por bateria.

No quesito segurança, o BLE e o LoRa ofereceram os melhores recursos nativos, com criptografia embutida. O XBee também apresentou soluções de segurança a nível de enlace, enquanto o HC-05 e o nRF24L01 exigem implementação de mecanismos adicionais por *software* para garantir a confidencialidade e integridade dos dados transmitidos.

Quanto à capacidade de formação de redes distribuídas, apenas o XBee demonstrou suporte nativo e maduro a redes *mesh*. O BLE, embora ofereça suporte experimental a este tipo de topologia, ainda enfrenta desafios técnicos para sua implementação em cenários complexos. As demais tecnologias operam nativamente em topologias ponto-a-ponto, exigindo desenvolvimento adicional para suportar arquiteturas mais sofisticadas de comunicação. O HC-05 é o único que não suporta redes mesh.

A partir dos resultados obtidos, pode-se afirmar que a escolha da tecnologia ideal depende diretamente do cenário de aplicação. Projetos que demandam baixa latência e

alta taxa de sucesso em curtas e médias distâncias podem se beneficiar do nRF24L01. Aplicações de longa distância com tolerância a maiores latências podem optar pelo LoRa. Sistemas que exigem baixo consumo energético, segurança avançada e integração com dispositivos móveis podem favorecer o BLE.

Por fim, destaca-se a importância de considerar, além das métricas de desempenho, fatores como custo, facilidade de implementação, disponibilidade de bibliotecas e qualidade de fabricação dos módulos, especialmente em projetos que envolvem redes embarcadas de Sistemas Multiagentes (SMAs).

6.1 Desafios Enfrentados

Durante as diferentes fases do trabalho, muitos desafios foram encontrados. Este capítulo descreve sobre estes desafios e as lições aprendidas, com o propósito de informar e alertar sobre as devidas atenções que devem ser tomadas ao se lidar com componentes eletrônicos, vendas online e comunicação sem fio.

6.1.1 Desafios com o nRF24L01

Durante os testes de comunicação com os módulos nRF24L01 PA/LNA, observou-se um desempenho estável até a distância de 128 metros, com transmissão de pacotes de dados sem perdas significativas. No entanto, ao ampliar a distância para cerca de 256 metros, foram verificadas falhas recorrentes na transmissão, indicando os limites operacionais da configuração empregada. Nesse contexto, destaca-se que a configuração de potência utilizada no código foi `RF24_PA_MIN`, correspondente a aproximadamente -18 dBm para o módulo nRF24L01+ original e -6 dBm em módulos baseados no Si24R1 com amplificação PA/LNA, conforme documentado na biblioteca RF24 (SAHA *et al.*, 2017).

Além das limitações de alcance, problemas relacionados à alimentação dos módulos foram identificados. Durante a utilização de adaptadores comerciais do tipo YL-105, constatou-se que uma das unidades adquiridas apresentava falha específica: conseguia apenas receber pacotes, sem a capacidade de transmissão. Através de uma análise sistemática, incluindo a troca de jumpers, antenas e placas Arduino, foi possível isolar a origem do problema para os próprios adaptadores. Para confirmar essa hipótese, foram realizados testes de substituição com diferentes componentes de *hardware*, como os cabos de conexão e os microcontroladores, além da verificação do funcionamento de diferentes códigos de exemplo.

Posteriormente, foram adquiridos dois adaptadores do modelo HW-200, que apresentaram o mesmo comportamento de recepção sem transmissão. Na tentativa de mitigar o problema, mais seis unidades do adaptador YL-105 foram adquiridas, todas igualmente

incapazes de transmitir dados. Tais resultados sugerem a existência de inconsistências na qualidade de fabricação desses adaptadores de baixo custo.

Diante dessas dificuldades, a solução adotada foi realizar a alimentação dos módulos diretamente pela saída de 3,3 V fornecida pelo próprio Arduino Uno, ainda que essa prática contrarie recomendações técnicas devido às limitações de corrente do regulador interno da placa, que fornece no máximo entre 50 mA e 100 mA (SEMICONDUCTOR, 2007). Essa solução permitiu restaurar a capacidade de transmissão, mas com potenciais riscos de instabilidade elétrica e possíveis danos ao regulador da placa.

6.1.2 Desafios regulatórios com LoRa em 433 MHz vs 915 MHz

Outro ponto importante que emergiu durante o trabalho foram os desafios regulatórios ao se utilizar LoRa em diferentes faixas de frequência. No Brasil, a ANATEL autoriza o uso de LoRa/LoRaWAN na faixa de 902 MHz – 928 MHz, com regulamentação e certificação adequadas. Já a faixa de 433 MHz é limitada a equipamentos de *radiação restrita* com potência máxima de 10 mW EIRP, conforme o Ato nº 14448/2017, seção 4.1.5 (Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL), 2017). Isso significa que módulos como o *E32-433T20D* (20 dBm equivalem a 100 mW) operam fora dos limites estipulados, pois excedem o limite de 10 mW. O *E32-433T20D* foi escolhido no início do projeto por trabalhar na mesma frequência do RF, mas descobriu-se ao decorrer da elaboração teórica que este módulo não é indicado para aplicações industriais de larga escala ou soluções comerciais. Já módulos homologados em 915 MHz, como o mesmo *Ebyte E32-900T20D*, cumprem os requisitos da faixa ISM autorizada pela ANATEL, e podem ser utilizados legalmente em ambientes comerciais e industriais.

Além das limitações técnicas, há um risco crescente associado à comercialização de módulos não homologados em marketplaces e lojas online. A ANATEL tem intensificado ações para coibir a oferta de equipamentos sem certificação, podendo aplicar sanções como multas e bloqueio de anúncios ou de sites (Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL), 2021; Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL), 2024; BITENCOURT; BRAUN, 2025). Em maio de 2025, foi autorizada liminar para suspensão de plataformas que ignoram recorrentes penalidades, como ocorre em casos similares com celulares não homologados (BITENCOURT; BRAUN, 2025).

6.2 Trabalhos Futuros

O presente trabalho teve caráter exploratório e buscou realizar uma análise comparativa ampla entre diferentes tecnologias de comunicação sem fio. No entanto, algumas limitações metodológicas e oportunidades de aprofundamento foram identificadas ao longo do processo e merecem ser abordadas em estudos futuros.

Primeiramente, destaca-se que os testes realizados concentraram-se em cenários ponto-a-ponto, não explorando de forma prática as capacidades de formação de redes distribuídas, como topologias em estrela, em árvore ou *mesh*. Apesar de a capacidade de formação de redes *ad hoc* ter sido mencionada nas discussões, futuras pesquisas poderão focar especificamente no desempenho, escalabilidade e confiabilidade de redes com múltiplos nós para cada tecnologia avaliada.

Outro aspecto que merece atenção é a integração de múltiplas tecnologias dentro de um mesmo ambiente de rede. A realização de experimentos que combinem, por exemplo, módulos nRF24L01 com e sem PA/LNA operando conjuntamente com XBee ou LoRa em uma rede híbrida, poderia fornecer informações relevantes sobre a interoperabilidade e os desafios de sincronização e roteamento entre tecnologias heterogêneas.

Além disso, cada uma das tecnologias analisadas possui diversas variantes de *hardware* e versões de *firmware*. Neste estudo, foi utilizado apenas um modelo representativo para cada tecnologia. Pesquisas futuras pode explorar o desempenho de diferentes versões de módulos LoRa, como o E32-900T20D, BLE, ou variantes de nRF24L01 (com e sem PA/LNA), a fim de fornecer métricas mais detalhadas sobre alcance, latência e consumo energético em diferentes configurações de *hardware*. Testes específicos do LoRa podem ser feitos com variações nos parâmetros de BW, CR e SF.

Em adição á variedade de hardwares e firmwares, o estudo presente não mediu o impacto que os mecanismos de segurança e criptografia possuem na latência e alcance. Frente à esta grande variedade, testes mais aprofundados para cada tecnologia podem fornecer informações úteis sobre como mecanismos de segurança mais sofisticados impactam na topologia de rede.

Outra limitação refere-se à ausência de medições de consumo energético em tempo real durante os testes. A implementação de um sistema de monitoramento de corrente e tensão, utilizando, por exemplo, sensores de corrente acoplados aos módulos durante os ciclos de transmissão e recepção, poderia gerar dados mais precisos e permitir a comparação detalhada do consumo energético em diferentes cenários de carga de rede.

Testes futuros podem ser realizados levando em conta também a diferença de interferências em cada ambiente, indicando o impacto causado pela presença de obstáculos como árvores, paredes, pessoas, veículos e maquinário de metal. Estas métricas serão de grande importância para fornecer um melhor panorama sobre topologia de rede.

Por fim, o estudo não abordou aspectos relacionados à coexistência espectral e à imunidade a interferências. Em ambientes urbanos ou industriais, a presença de outras fontes de RF pode impactar significativamente o desempenho das tecnologias testadas. Trabalhos futuros podem investigar as capacidades das tecnologias em cenários com múltiplos transmissores ativos, simulando interferências reais de Wi-Fi, outros dispositivos

Bluetooth ou sistemas de comunicação industrial.

A realização desses trabalhos complementares permitirá uma compreensão mais profunda das potencialidades e limitações de cada tecnologia, contribuindo para a escolha mais assertiva de soluções de comunicação para redes embarcadas em SMAs, IoT e aplicações de computação distribuída.

Referências

Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL). **Ato nº 14448, de 04 de dezembro de 2017: Aprova os Requisitos Técnicos para a Avaliação da Conformidade de Equipamentos de Radiocomunicação de Radiação Restrita**. 2017. Diário Oficial da União (DOU). Acessado em: 3 de Julho de 2025. Disponível em: <<https://informacoes.anatel.gov.br/legislacao/atos-de-certificacao-de-produtos/2017/1139-ato-14448>>.

Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL). **Marketplaces adotam medidas para coibir venda de produtos não homologados**. 2021. Anatel – Notícias. Acessado em: 5 de Julho de 2025. Disponível em: <<https://www.gov.br/anatel/pt-br/assuntos/noticias/marketplaces-adotam-medidas-para-coibir-venda-de-produtos-nao-homologados>>.

Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL). **Anatel adota medidas contra venda de celulares não homologados em plataformas de comércio eletrônico**. 2024. Anatel – Notícias. Acessado em: 5 de Julho de 2025. Disponível em: <<https://www.gov.br/anatel/pt-br/assuntos/noticias/anatel-adota-medidas-contra-venda-de-celulares-nao-homologados-em-plataformas-de-comercio-eletronico>>.

ALECRIM, E.; MARQUES, A. **O que é Bluetooth Low Energy (BLE) e quais as vantagens desse tipo de conexão?** 2023. Tecnoblog. Acessado em: 23 de Junho de 2025. Disponível em: <<https://tecnoblog.net/responde/o-que-e-bluetooth-low-energy-ble/#:~:text=Seguran%C3%A7a:%20o%20BLE%20suporta%20criptografia,dados%20e%20outras%20a%C3%A7%C3%B5es%20maliciosas.>>

ARZO, S. T. **Towards Network Automation: A Multi-Agent Based Intelligent Networking System**. Tese (Doutorado) — Università degli studi di Trento, 2021. Disponível em: <<https://tesidottorato.depositolegale.it/handle/20.500.14242/179537>>.

ASHTON, K. *et al.* That ‘internet of things’ thing. **RFID journal**, Hauppauge, New York, v. 22, n. 7, p. 97–114, 2009. Disponível em: <<https://www.itrco.jp/libraries/RFIDjournal-That%20Internet%20of%20Things%20Thing.pdf>>.

AUGUSTIN, A.; YI, J.; CLAUSEN, T.; TOWNSLEY, W. M. A study of lora: Long range & low power networks for the internet of things. **Sensors**, v. 16, n. 9, 2016. ISSN 1424-8220. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1424-8220/16/9/1466>>.

BARBOSA, F. Brasil é 29º em resiliência de redes móveis, aponta opensignal. **Teletime**, 2024. Acessado em: 21 de Junho de 2025. Disponível em: <<https://teletime.com.br/16/02/2024/brasil-e-29a-em-resiliencia-de-redes-moveis-aponta-opensignal/>>.

BITENCOURT, R.; BRAUN, D. Telecoms regulator seeks court order to block big e-commerce platforms. **Valor International**, 2025. Acessado em: 5 de Julho de 2025. Disponível em: <<https://valorinternational.globo.com/business/news/2025/05/22/telecoms-regulator-seeks-court-order-to-block-big-e-commerce-platforms.ghtml>>.

BOISSIER, O.; BORDINI, R. H.; HÜBNER, J. F.; RICCI, A.; SANTI, A. Multi-agent oriented programming with jacamo. **Science of Computer Programming**, Elsevier, v. 78, n. 6, p. 747–761, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scico.2011.10.004>>.

BRANZ, F.; ANTONELLO, R.; SCHENATO, L.; TRAMARIN, F.; VITTURI, S. Time-critical wireless networked embedded systems: Feasibility and experimental assessment. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, v. 16, n. 12, p. 7732–7742, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/TII.2020.2992990>>.

CALVO, I.; GIL-GARCÍA, J.; VILLAR, E.; FERNÁNDEZ, A.; VELASCO, J.; NAPOLE, C.; FERNÁNDEZ-BUSTAMANTE, P. Design and performance of a xbee 900 mhz acquisition system aimed at industrial applications. **Applied Sciences**, v. 11, p. 8174, 09 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/app11178174>>.

CUI, L.; QIU, M.; FAN, H.; WANG, L.; ZHAO, S.; DU, J. Design and research of water quality monitoring system based on nrf24l01 wireless communication. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, IOP Publishing, v. 208, n. 1, p. 012074, dec 2018. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/208/1/012074>>.

CUNHA, F.; VILLAS, L.; BOUKERCHE, A.; MAIA, G.; VIANA, A.; MINI, R. A. F.; LOUREIRO, A. A. F. Data communication in vanets: Protocols, applications and challenges. **Ad Hoc Networks**, v. 44, p. 90–103, 2016. ISSN 1570-8705. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1570870516300580>>.

DARROUDI, S. M.; GOMEZ, C. Bluetooth low energy mesh networks: A survey. **Sensors**, v. 17, n. 7, 2017. ISSN 1424-8220. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1424-8220/17/7/1467>>.

EL-AZAB, R. Smart homes: potentials and challenges. **Clean Energy**, v. 5, n. 2, p. 302–315, 06 2021. ISSN 2515-4230. Disponível em: <<https://doi.org/10.1093/ce/zkab010>>.

EMBEDDED, S. **Bluetooth low energy (BLE) fundamentals**. 2016. Acessado em 22 de Junho de 2025. Disponível em: <<https://www.embedded.com/bluetooth-low-energy-ble-fundamentals/>>.

EVERTSZ, R.; FLETCHER, M.; JONES, R.; JARVIS, J.; BRUSEY, J.; DANCE, S. Implementing industrial multi-agent systems using jacktm. In: DASTANI, M. M.; DIX, J.; FALLAH-SEGHRUCHNI, A. E. (Ed.). **Programming Multi-Agent Systems**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2004. p. 18–48. ISBN 978-3-540-25936-7. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-540-25936-7_2>.

EWALD, W. **HC-05 and HC-06 Bluetooth modules**. 2020. Acessado em: 22 de Junho de 2025. Disponível em: <<https://wolles-elektronikkiste.de/en/hc-05-and-hc-06-bluetooth-modules>>.

FIRDAUS, A. N.; KUSMADI; LESTARI, N.; SUSANTO, B.; RISNANTO, S.; GARNIA, E. Wireless interface communication system on water level monitoring device using nrf24l01+ pa lna transceiver module. In: **2022 16th International Conference on Telecommunication Systems, Services, and Applications (TSSA)**. [s.n.], 2022. p. 1–6. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/TSSA56819.2022.10063875>>.

FURIO, V.; BRITO, M.; MORATELLI, C. Comunicação entre agentes no framework embedded-bdi. In: **Anais do XVIII Workshop-Escola de Sistemas de Agentes, seus Ambientes e Aplicações**. Porto Alegre, RS, Brasil: SBC, 2024. p. 126–131. ISSN 2326-5434. Disponível em: <<https://sol.sbc.org.br/index.php/wesaac/article/view/33462>>.

GARRIDO-HIDALGO, C.; RODA-SANCHEZ, L.; RAMÍREZ, F. J.; FERNÁNDEZ-CABALLERO, A.; OLIVARES, T. Efficient online resource allocation in large-scale lo-ran networks: A multi-agent approach. **Computer Networks**, v. 221, p. 109525, 2023. ISSN 1389-1286. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S138912862200559X>>.

GEORGEFF, M.; PELL, B.; POLLACK, M.; TAMBE, M.; WOOLDRIDGE, M. The belief-desire-intention model of agency. In: MÜLLER, J. P.; RAO, A. S.; SINGH, M. P. (Ed.). **Intelligent Agents V: Agents Theories, Architectures, and Languages**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1999. p. 1–10. ISBN 978-3-540-49057-9. Disponível em: <https://link.springer.com/chapter/10.1007/3-540-49057-4_1>.

GROSHEV, M.; BALDONI, G.; COMINARDI, L.; OLIVA, A. de la; GAZDA, R. Edge robotics: are we ready? an experimental evaluation of current vision and future directions. **Digital Communications and Networks**, v. 9, n. 1, p. 166–174, 2023. ISSN 2352-8648. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352864822000888>>.

HERMANN, M.; PENTEK, T.; OTTO, B. Design principles for industrie 4.0 scenarios. In: **2016 49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS)**. [s.n.], 2016. p. 3928–3937. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/HICSS.2016.488>>.

IQBAL, M.; ABDULLAH, A. Y. M.; SHABNAM, F. An application based comparative study of lpwan technologies for iot environment. In: **2020 IEEE Region 10 Symposium (TENSYP)**. [s.n.], 2020. p. 1857–1860. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/TENSYP50017.2020.9230597>>.

IWANICKI, K. A distributed systems perspective on industrial iot. In: **2018 IEEE 38th International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS)**. [s.n.], 2018. p. 1164–1170. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/ICDCS.2018.00116>>.

JESUS, V. S. d.; LAZARIN, N. M.; PANTOJA, C. E.; MANOEL, F. C. P. B.; ALVES, G. V.; VITERBO, J. A middleware for providing communicability to embedded mas based on the lack of connectivity. **Artificial Intelligence Review**, Springer, v. 56, n. Suppl 3, p. 2971–3001, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10462-023-10596-z>>.

JOSEFSSON, S. **The Base16, Base32, and Base64 Data Encodings**. RFC Editor, 2006. RFC 4648. (Request for Comments, 4648). Disponível em: <<https://www.rfc-editor.org/info/rfc4648>>.

KARADUMAN, B.; TEZEL, B. T.; CHALLENGER, M. Rational software agents with the bdi reasoning model for cyber–physical systems. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, v. 123, p. 106478, 2023. ISSN 0952-1976. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0952197623006620>>.

KIM, S. Multi-agent learning and bargaining scheme for cooperative spectrum sharing process. **IEEE Access**, v. 11, p. 47863–47872, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3268754>>.

KLEIN, E.; LAZARIN, N. Computação vestível para o cuidado em saúde nas instituições de longa permanência para idosos: Uma proposta. In: **Anais da IX Escola Regional de Computação Aplicada à Saúde**. Porto Alegre, RS, Brasil: SBC, 2024. p. 37–40. ISSN 0000-0000. Disponível em: <<https://doi.org/10.5753/ercas.2024.238694>>.

KLEIN, G.; SILVA, M.; PEDRO, W.; LAZARIN, N. Aplicando sistemas multi-agentes embarcados no monitoramento de deslizamentos. In: **Anais do XVIII Workshop-Escola de Sistemas de Agentes, seus Ambientes e Aplicações**. Porto Alegre, RS, Brasil: SBC, 2024. p. 132–137. ISSN 2326-5434. Disponível em: <<https://doi.org/10.5753/wesaac.2024.33463>>.

LAZARIN, N.; PANTOJA, C. A robotic-agent platform for embedding software agents using raspberry pi and arduino boards. In: **Anais do IX Workshop-Escola de Sistemas de Agentes, seus Ambientes e Aplicações**. Porto Alegre, RS, Brasil: SBC, 2015. p. 13–20. ISSN 2326-5434. Disponível em: <<https://doi.org/10.5753/wesaac.2015.33308>>.

LAZARIN, N.; PANTOJA, C.; JESUS, V. Um protocolo para comunicação entre sistemas multi-agentes embarcados. In: **Anais do XV Workshop-Escola de Sistemas de Agentes, seus Ambientes e Aplicações**. Porto Alegre, RS, Brasil: SBC, 2021. p. 157–168. ISSN 2326-5434. Disponível em: <<https://doi.org/10.5753/wesaac.2021.33416>>.

LAZARIN, N. M.; PANTOJA, C. E. **Javino: serial message error-check protocol for Java agents**. 2024. GitHub repository. Acessado em: 21 de Junho de 2025. Disponível em: <<https://github.com/chon-group/Javino>>.

LEMOS, G. d. M.; CARVALHO, G. A.; SANTOS, J. V. C. Inteligência artificial: riscos, benefícios e uso responsável. **Apoena**, v. 6, p. 517–527, fev. 2023. Disponível em: <<https://publicacoes.unijorge.com.br/apoena/article/view/405>>.

LUNDELL, D.; HEDBERG, A.; NYBERG, C.; FITZGERALD, E. A routing protocol for lora mesh networks. In: **2018 IEEE 19th International Symposium on "A World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks"(WoWMoM)**. [s.n.], 2018. p. 14–19. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/WoWMoM.2018.8449743>>.

LÓPEZ-VILOS, N.; VALENCIA-CORDERO, C.; AZURDIA-MEZA, C.; MONTEJO-SÁNCHEZ, S.; MAFRA, S. B. Performance analysis of the ieee 802.15.4 protocol for smart environments under jamming attacks. **Sensors**, v. 21, n. 12, 2021. ISSN 1424-8220. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1424-8220/21/12/4079>>.

MAGRANI, E. **INTERNET DAS COISAS, A ED. 1**. Editora FGV, 2018. 11 p. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=qYtIDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA1&dq=INTERNET+DAS+COISAS,+A+ED.+1&ots=rhTsyBle63&sig=yH-hv7IEw8JNaowf2805MrxAlak#v=onepage&q=INTERNET%20DAS%20COISAS%2C%20A%20ED.%201&f=false>>.

MASCARDI, V.; WEYNS, D.; RICCI, A.; EARLE, C. B.; CASALS, A.; CHALLENGER, M.; CHOPRA, A.; CIORTEA, A.; DENNIS, L. A.; DÍAZ, A. F.; FALLAH-SEGHRUCHNI, A. E.; FERRANDO, A.; FREDLUND, L.-r.; GIUNCHIGLIA, E.; GUESSOUM, Z.; GÜNAY, A.; HINDRIKS, K.; IGLESIAS, C. A.; LOGAN, B.; KAMPIK, T.; KARDAS, G.; KOEMAN, V. J.; LARSEN, J. B.; MAYER, S.; MÉNDEZ, T.; NIEVES, J. C.; SEIDITA, V.; TEZE, B. T.; VARGA, L. Z.; WINIKOFF, M. Engineering multi-agent systems: State of affairs and the road ahead. **SIGSOFT Softw. Eng. Notes**, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, v. 44, n. 1, p. 18–28, out. 2020. ISSN 0163-5948. Disponível em: <<https://doi.org/10.1145/3310013.3322175>>.

MENEZES, A. d. A.; MENEZES, D. d. O. **Rede LoRa Integrada com Web Server**. 2024. Acessado em: 3 de Julho de 2025. Disponível em: <<https://blog.eletrogate.com/rede-lora-integrada-com-web-server/>>.

- MURTA, J. G. A. **Guia Básico dos Módulos TX / RX – RF 433 MHz**. 2018. Acessado em: 21 de Junho de 2025. Disponível em: <<https://blog.eletrogate.com/guia-basico-dos-modulos-tx-rx-rf-433mhz/>>.
- NAGATY, K. A. lot commercial and industrial applications and ai-powered iot. In: IRANMANESH, A. (Ed.). **Frontiers of Quality Electronic Design (QED): AI, IoT and Hardware Security**. Cham: Springer International Publishing, 2023. p. 465–500. ISBN 978-3-031-16344-9. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-031-16344-9_12>.
- NAZABAL, J. A.; ITURRI, P. L.; AZPILICUETA, L.; FALCONE, F.; FERNÁNDEZ-VALDIVIELSO, C. Performance analysis of ieee 802.15.4 compliant wireless devices for heterogeneous indoor home automation environments. **International Journal of Antennas and Propagation**, v. 2012, n. 1, p. 176383, 2012. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1155/2012/176383>>.
- NEDELKOVSKI, D. **nRF24L01–How It Works, Arduino Interface, Circuits, Codes**. 2023. Acessado em: 21 de Junho de 2025. Disponível em: <<https://howtomechatronics.com/tutorials/arduino/arduino-wireless-communication-nrf24l01-tutorial/>>.
- PEÑA, E.; LEGASPI, M. G. Uart: A hardware communication protocol understanding universal asynchronous receiver/transmitter. **Visit Analog**, v. 54, n. 4, p. 1–5, 2020. Disponível em: <<https://fgcoca.github.io/Autocaravana-inteligente/datasheet/uart-a-hardware-communication-protocol.pdf>>.
- PEREIRA, A.; SIMONETTO, E. de O. Indústria 4.0: conceitos e perspectivas para o brasil. **Revista da Universidade Vale do Rio Verde**, v. 16, n. 1, 2018. Disponível em: <https://scholar.google.com.br/scholar?hl=pt-BR&as_sdt=0%2C5&q=Ind%3%BAstria+4.0%3A+conceitos+e+perspectivas+para+o+brasil.&btnG=>>.
- PEÑA, E.; LEGASPI, M.; REYES, E. **Understanding the Architecture of the Bluetooth Low Energy Stack**. 2024. Acessado em: 21 de Junho de 2025. Disponível em: <<https://www.embedded.com/understanding-the-architecture-of-the-bluetooth-low-energy-stack/>>.
- PREUVENEERS, D.; ILIE-ZUDOR, E. The intelligent industry of the future: A survey on emerging trends, research challenges and opportunities in industry 4.0. **Journal of Ambient Intelligence and Smart Environments**, v. 9, n. 3, p. 287–298, 2017. Disponível em: <<https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.3233/AIS-170432>>.
- SAHA, H.; MANDAL, S.; MITRA, S.; BANERJEE, S.; SAHA, U. Comparative performance analysis between nrf24l01+ and xbee zb module based wireless ad-hoc networks. **International Journal of Computer Network and Information Security**, Modern Education and Computer Science Press, v. 9, n. 7, p. 36, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.5815/ijcnis.2017.07.05>>.
- SANTOS, B. P.; ALBERTO, A.; LIMA, T. D. F. M.; CHARRUA-SANTOS, F. M. B. Indústria 4.0: desafios e oportunidades. **Revista Produção e Desenvolvimento**, v. 4, n. 1, p. 111–124, 2018. Disponível em: <<https://revistas.cefet-rj.br/index.php/producaoedesenvolvimento/article/view/e316>>.
- SCOTT. **Benchmarking latency across common wireless links for microcontrollers**. 2024. Acessado em: 21 de Junho de 2025. Disponível em: <<https://electricui.com/blog/latency-comparison>>.

SEFERAGIĆ, A.; FAMAHEY, J.; POORTER, E. D.; HOEBEKE, J. Survey on wireless technology trade-offs for the industrial internet of things. **Sensors**, v. 20, n. 2, 2020. ISSN 1424-8220. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1424-8220/20/2/488>>.

SEMICONDUCTOR, N. nrf24l01+ product specification v1. 0. **vol**, v. 21, p. 21–22, 2007. Disponível em: <https://docs.nordicsemi.com/bundle/nRF24L01P_PS_v1.0/resource/nRF24L01P_PS_v1.0.pdf>.

SEMTECH, A. Lora modulation basics. **Semtech Corporation, Tech. Rep.**, 2015. Acessado em: 3 de Julho de 2025. Disponível em: <<https://www.frugalprototype.com/wp-content/uploads/2016/08/an1200.22.pdf>>.

SHAHZAD, Y.; JAVED, H.; FARMAN, H.; AHMAD, J.; JAN, B.; ZUBAIR, M. Internet of energy: Opportunities, applications, architectures and challenges in smart industries. **Computers & Electrical Engineering**, v. 86, p. 106739, 2020. ISSN 0045-7906. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045790620305942>>.

SICHMAN, J.; HÜBNER, J. Organização de sistemas multiagentes. **ResearchGate**, 06 2022. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/361537610_Organizacao_de_sistemas_multiagentes>.

SILVA, B. N.; KHAN, M.; HAN, K. Towards sustainable smart cities: A review of trends, architectures, components, and open challenges in smart cities. **Sustainable Cities and Society**, v. 38, p. 697–713, 2018. ISSN 2210-6707. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210670717311125>>.

SOLÉ, J. M.; CENTELLES, R. P.; FREITAG, F.; MESEGUER, R. Implementation of a lora mesh library. **IEEE Access**, v. 10, p. 113158–113171, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3217215>>.

TABOUN, M. S.; BRENNAN, R. W. An embedded multi-agent systems based industrial wireless sensor network. **Sensors**, v. 17, n. 9, 2017. ISSN 1424-8220. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1424-8220/17/9/2112>>.

VELLEMAN, J. D. Intention, plans, and practical reason, harvard un. **The Philosophical Review**, [Duke University Press, Philosophical Review], v. 100, n. 2, p. 277–284, 1991. ISSN 00318108, 15581470. Disponível em: <<http://www.jstor.org/stable/2185304>>.

VILLA, D.; LIN, C.-K.; KUENZI, A.; LANG, M. **Bluetooth Low Energy mesh network for power-limited, robust and reliable IoT services**. 2022. Disponível em: <<https://arxiv.org/abs/2208.04050>>.

WANG, Y.; YANG, W.; HAN, R.; WU, T.; ZHAO, H. Modeling and parameter analysis of ieee 802.15.4-based networks and the metering application. **International Journal of Distributed Sensor Networks**, v. 16, n. 12, p. 1550147720978330, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1177/1550147720978330>>.

WOOLDRIDGE, M. **An introduction to multiagent systems**. John wiley & sons, 2009. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=X3ZQ7yeDn2IC&oi=fnd&pg=PR13&dq=An+introduction+to+multiagent+systems&ots=WlMkot4x95&sig=5nROSK1Vv49ieleJvjd060ptXY0#v=onepage&q=An%20introduction%20to%20multiagent%20systems&f=false>>.

ZHANG, J.; TAO, D. Empowering things with intelligence: A survey of the progress, challenges, and opportunities in artificial intelligence of things. **IEEE Internet of Things Journal**, v. 8, n. 10, p. 7789–7817, May 2021. ISSN 2327-4662. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.3039359>>.