



Universidade Federal do Piauí
Centro de Ciências da Natureza
Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação

LoRaWAN Expandido com a Implementação da Topologia Cluster-Tree Escalonada e do Mecanismo de Acesso ao Meio CSMA/CA para RSSFs de Larga Escala

Vitor Meneses de Vasconcelos

Número de Ordem PPGCC: M001

Teresina-PI, Agosto de 2022

Vitor Meneses de Vasconcelos

**LoRaWAN Expandido com a Implementação da Topologia
Cluster-Tree Escalonada e do Mecanismo de Acesso ao
Meio CSMA/CA para RSSFs de Larga Escala**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação da UFPI (área de concentração: Sistemas de Computação), como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de Mestre em Ciência da Computação.

Universidade Federal do Piauí – UFPI

Centro de Ciências da Natureza

Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação

Orientador: Erico Meneses Leão

Teresina-PI

Agosto de 2022

FICHA CATALOGRÁFICA
Universidade Federal do Piauí
Sistema de Bibliotecas da UFPI – SIBi/UFPI
Biblioteca Setorial do CCN

V331L Vasconcelos, Vitor Meneses de.
LoRaWAN expandido com a implementação da topologia
Cluster-tree escalonada e do mecanismo de acesso ao meio
CSMA/CA para RSSFs de larga escala / Vitor Meneses de
Vasconcelos. – 2022.
48 f.: il.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Piauí,
Centro de Ciências da Natureza, Pós-Graduação em Ciência
da Computação, Teresina, 2022.

“Orientador: Prof. Dr. Erico Meneses Leão”.

1. Redes de sensores sem fio. 2. *Cluster-tree*. 3. LoRa. 4.
Internet of things. I. Leão, Erico Meneses. II. Título.

CDD 004.6


Bibliotecária: Caryne Maria da Silva Gomes. CRB/3-1461

“LoRaWAN Expandido com a Implementação da Topologia Cluster-Tree Escalonada e do Mecanismo de Acesso ao Meio CSMA/CA para RSSFs de Larga Escala”

VITOR MENESES DE VASCONCELOS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação do Centro de Ciências da Natureza da Universidade Federal do Piauí, como parte integrante dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Ciência da Computação.

Aprovada por:


Documento assinado digitalmente
 ERICO MENESES LEAO
Data: 02/09/2022 09:30:10-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>




Prof. Erico Meneses Leão
(Presidente da banca examinadora)

Documento assinado digitalmente
Ricardo Alexandre Reinaldo de Moraes
Data: 01/09/2022 22:29:13-0300
CPF: 844.812.939-34
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof. Ricardo Alexandre Reinaldo de Moraes
(Examinador externo à instituição)

Documento assinado digitalmente
 ANDRE CASTELO BRANCO SOARES
Data: 05/09/2022 09:56:51-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof. André Castelo Branco Soares
(Examinador interno)

Documento assinado digitalmente
 JOSE VALDEMIR DOS REIS JUNIOR
Data: 05/09/2022 14:16:31-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof. José Valdemir dos Reis Júnior
(Examinador interno)

Teresina, 31 de agosto de 2022.

*Aos meus pais, irmãos e família,
que sempre foram o sentido da minha vida.*

Agradecimentos

Agradeço a Deus, o grande arquiteto do universo, por tornar tudo isso possível.

Agradeço aos meus pais, Arthur e Shirley, por priorizarem a minha educação acima de tudo, por me apoiarem e por me aconselharem nas mais importantes decisões.

Aos meus irmãos, Ingrid e Vinícius, por tornarem mais lúdicos os momentos difíceis.

À Greta e família, onde eu encontrei amor e um porto seguro durante a longa jornada deste Mestrado.

Aos meus amigos Bernardo, Fernando e Miguel, por serem modelos de profissionalismo e excelência em minha vida.

Agradeço ao meu orientador, Erico, por todos os conselhos, paciência e ajuda.

Aos professores do Departamento de Computação da UFPI, por solidificarem a base de minha formação acadêmica.

À CAPES, pelo apoio financeiro para realização deste trabalho de pesquisa, além do auxílio em eventos de publicação.

“A melhor maneira de prever o futuro é criá-lo.”

Peter F. Drucker

Resumo

Redes baseadas na tecnologia *Long-Range* (LoRa) usualmente implementam o protocolo LoRaWAN como a camada de acesso ao meio (MAC - *Medium Access Layer*), apesar deste protocolo possuir certas limitações, como por exemplo, o suporte apenas à topologia de rede estrela. Nesta topologia, o alcance das transmissões está restrito a um único salto e, portanto, os dispositivos não contam com retransmissões ao longo da rede para tentar alavancar sua área de cobertura e, também, contornar atenuações de sinal com a distância, presença de obstáculos ou com interferências de outras fontes de rádio. Diante destas circunstâncias e para buscar expandir o alcance das transmissões em uma topologia estrela, rádios LoRa contêm os parâmetros *bandwidth* (BW), *spreading factor* (SF) e *coding rate* (CR), que podem ser configurados para esta expansão, apesar de estes ajustes por si só, ocorrerem às custas de um maior consumo energético e de uma maior probabilidade de colisão de pacotes, devido ao aumento no tempo em que os rádios dos dispositivos necessitam permanecer ligados para concluir uma transmissão nestas novas configurações de rádio. Outra limitação em redes LoRaWAN que afeta sua performance, consumo energético, bem como a adequabilidade para o uso em Redes de Sensores sem Fio (RSSFs) de larga escala, é a existência do protocolo de acesso ao meio ALOHA, que não provê controles, verificação do canal ou sincronismo para transmissões. Em redes com muitos dispositivos, este protocolo tende a maiores probabilidades de colisão de pacotes e, conseqüentemente, gera retransmissões e gastos energéticos que poderiam ser evitados caso fosse adotado um mecanismo de acesso ao meio mais adequado para RSSF de larga-escala. Diante das limitações expostas e, para que o protocolo LoRaWAN possa ser melhor utilizado em RSSFs de larga escala, este trabalho de mestrado propõe a implementação de uma topologia que possa ampliar a cobertura de rede, bem como utilizar um mecanismo de acesso ao meio que melhor atenda aos recursos limitados de dispositivos LoRaWAN. Assim, este trabalho propõe o desenvolvimento de uma RSSF de larga escala LoRaWAN multi-saltos, baseada na topologia *cluster-tree*, que visa expandir a cobertura espacial, sincronizar *clusters* e dispositivos, permitir a escalabilidade da rede, bem como buscar evitar colisões, melhorando métricas de comunicação e reduzindo o consumo energético com a utilização do novo mecanismo de acesso ao meio CSMA/CA. Uma avaliação de desempenho por simulação, aplicada a diferentes cenários de RSSFs de larga escala, foi realizada a fim de avaliar os mecanismos propostos neste trabalho. Os resultados apresentados mostram que a RSSF LoRaWAN *cluster-tree* escalonada e associada ao mecanismo CSMA/CA apresenta melhores resultados, quando comparada com propostas que não utilizam os mecanismos propostos, em relação à taxa de entrega de pacote, uso energético e escalabilidade da rede.

Palavras-chaves: Rede de Sensores sem Fio. Larga Escala. Internet das Coisas. LoRa. LoRaWAN. LPWAN. Cluster-Tree. CSMA/CA.

Abstract

Networks based on Long-Range radio modulation (LoRa), usually implement the LoRaWAN protocol as the medium access layer (MAC), although this protocol has certain limitations, such as, supporting only the star network topology. In this topology, the range of transmissions is restricted to a single hop and, therefore, the devices do not rely on retransmissions along the network to try to leverage their coverage area and, also, to circumvent signal attenuations with distance, presence of obstacles or with interference from other radio sources. Given these circumstances and in order to expand the range of transmissions in a star topology, LoRa radios rely on the parameters bandwidth (BW), spreading factor (SF) and coding rate (CR), that can be configured for this range expansion, although these adjustments by themselves, occur at the expense of greater energy consumption and a greater probability of packet collision, due to the increase in the time in which the radios of the devices need to stay turned on to complete a transmission in these new settings. Another limitation in LoRaWAN networks that affects their performance, energy consumption, as well as suitability for use in large-scale wireless sensor networks (WSNs), is the existence of the ALOHA-type medium access protocol, which does not provide controls, channel verification or timing for transmissions. In networks with many devices, this protocol tends to have higher probabilities of packet collision and, consequently, generates retransmissions and energy expenditures that could be avoided if a more suitable medium access mechanism for large-scale WSN were adopted. Given the limitations exposed and, so that the LoRaWAN protocol can be better used in large-scale WSNs, this master's work proposes the implementation of a topology that can expand the network coverage, as well as use a mechanism for accessing the medium that best meet the limited features of LoRaWAN devices. Thus, this work proposes the development of a multi-hop LoRaWAN large-scale WSN, based on the cluster-tree topology, which aims to expand the spatial coverage, synchronize clusters and devices, allow the scalability of the network, as well as seeking to avoid collisions, improve communication metrics and reduce energy consumption, using the new CSMA/CA access mechanism. A performance evaluation by simulation, applied to different scenarios of large-scale WSNs, was carried out in order to evaluate the mechanisms proposed in this work. The results presented show that the scaled WSN LoRaWAN cluster-tree associated with the CSMA/CA mechanism, presents better results, when compared to proposals that do not use the proposed mechanisms, in relation to the packet delivery rate, energy use and network scalability.

Keywords: Wireless Sensor Network. Large-Scale. Internet of Things. LoRa. LoRaWAN. LPWAN. Cluster-Tree. CSMA/CA.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Largura de banda <i>versus</i> alcance.	7
Figura 2 – Arquitetura LoRaWAN.	10
Figura 3 – Classes de dispositivos LoRaWAN.	11
Figura 4 – Pilha arquitetural LoRa PHY e LoRaWAN MAC.	12
Figura 5 – Topologia <i>cluster-tree</i>	13
Figura 6 – A estrutura do <i>superframe</i>	13
Figura 7 – Fluxograma do mecanismo CSMA/CA <i>unslotted</i>	15
Figura 8 – Comparação topológica de uma rede estrela vs. uma rede <i>cluster-tree</i>	17
Figura 9 – Campos da mensagem CTCM.	26
Figura 10 – Inicialização da WAN e associação dos <i>cluster-heads</i>	27
Figura 11 – Formação dos <i>clusters</i>	28
Figura 12 – Escalonamento dos <i>clusters</i>	30
Figura 13 – Campos da mensagem CTDP.	31
Figura 14 – Encaminhamento do tráfego de monitoramento.	31
Figura 15 – Linha do tempo do procedimento CAD implementado.	33
Figura 16 – Porcentagem de colisão de pacotes e o número de nós.	37
Figura 17 – Porcentagem de entrega de pacotes de dados coletados e o número de nós.	38
Figura 18 – Energia gasta e o número de nós.	39
Figura 19 – <i>Cluster-Tree</i> em ambiente de larga escala 1.000 x 1.000 metros.	41

Lista de tabelas

Tabela 1 – Relacionamentos entre os diferentes valores de BW, SF, TOA.	8
Tabela 2 – Comparação de características entre estrela e <i>cluster-tree</i>	16
Tabela 3 – Trabalhos relacionados mais relevantes.	23
Tabela 4 – Principais parâmetros das simulações.	36
Tabela 5 – Principais parâmetros da simulação.	40

Lista de abreviaturas e siglas

ACK	<i>Acknowledgement</i>
ADR	<i>Adaptative Data Rate</i>
APP	<i>Application Layer</i>
BE	<i>Backoff Exponent</i>
BI	<i>Beacon Interval</i>
BO	<i>Beacon Order</i>
BW	<i>Bandwidth</i>
CAD	<i>Channel Activity Detection</i>
CAP	<i>Contention Access Period</i>
CCA	<i>Clear Channel Assessment</i>
CFP	<i>Contention Free Period</i>
CH	<i>Cluster-Head</i>
CR	<i>Code Rate</i>
CSMA/CA	<i>Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance</i>
CT	<i>Concurrent Transmission</i>
CTCM	<i>Cluster-Tree Control Message</i>
CTDP	<i>Cluster-Tree Data Packet</i>
CTE	<i>Consumo Total de Energia</i>
CW	<i>Contention Window</i>
DPL	<i>Data Payload</i>
ETSI	<i>European Telecommunications Standards Institute</i>
FEC	<i>Forward Error Correction</i>
GHz	<i>Giga-Hertz</i>

GTS	<i>Guaranteed Time Slots</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
ISM	<i>Industrial Scientific Medical</i>
LID	<i>Layer ID</i>
LoRa	<i>Long-Range</i>
kbps	<i>Kilobits por segundo</i>
kHz	<i>Kilohertz</i>
LPWAN	<i>Low-Power Wide Area Network</i>
MAC	<i>Medium Access Control</i>
MHz	<i>Megahertz</i>
MID	<i>Message ID</i>
ms	<i>milisegundos</i>
NB	<i>Number of Backoffs</i>
PAN	<i>Personal Area Network</i>
PHY	<i>Physical Layer</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
RID	<i>Recipient ID</i>
RF	<i>Rádio Frequência</i>
RFD	<i>Reduced Function Device</i>
RPL	<i>IPv6 Routing Protocol for Low Power and Lossy Networks</i>
RSSI	<i>Radio Signal Strength Indicator</i>
RSSF	<i>Redes de Sensores Sem Fio</i>
RTE	<i>Razão Total de Envios</i>
s	<i>segundos</i>

SD	<i>Superframe Duration</i>
SF	<i>Spreading Factor</i>
SID	<i>Sender ID</i>
SD	<i>Superframe Duration</i>
SO	<i>Superframe Order</i>
TEP	<i>Taxa de Entrega de Pacotes</i>
TOA	<i>Time On Air</i>
TP	<i>Transmission Power</i>
WSN	<i>Wireless Sensor Network</i>

Lista de símbolos

α	Letra grega <i>alpha</i>
Σ	Letra grega <i>sigma</i>
\lfloor	Símbolo de abertura para função piso
\rfloor	Símbolo de fechamento para função piso
\lceil	Símbolo de abertura para função teto
\rceil	Símbolo de fechamento para função teto
\leq	Menor ou igual
\geq	Maior ou igual
$<$	Símbolo de menor que
$>$	Símbolo de maior que
\approx	Símbolo de aproximação

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Motivação e Objetivos	3
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	7
2.1	A Tecnologia LoRa	7
2.2	Protocolo LoRaWAN	8
2.2.1	Arquitetura LoRaWAN	9
2.2.2	Classes de Dispositivos	10
2.2.3	Mecanismo de Acesso ao Meio ALOHA	11
2.3	Redes Cluster-Tree	12
2.4	Mecanismo CSMA/CA	14
2.5	Limitações do Protocolo LoRaWAN para RRSFs de Larga Escala	15
2.5.1	Topologia Estrela vs. Cluster-Tree	16
2.5.2	ALOHA vs. CSMA/CA	18
3	TRABALHOS RELACIONADOS	19
3.1	Topologia Cluster-Tree para Redes LoRa/LoRaWAN	19
3.2	Mecanismo CSMA/CA para Redes LoRa/LoRaWAN	21
3.3	Considerações do Capítulo	22
4	PROPOSTA: RSSFS LORAWAN BASEADAS NA TOPOLOGIA CLUSTER-TREE E NO MECANISMO DE ACESSO AO MEIO CSMA/CA IEEE 802.15.4	25
4.1	Etapa 1: Processo de Formação da Rede Cluster-Tree	25
4.1.1	Inicialização do WAN e Associação com Cluster-Heads	26
4.1.2	Formação dos Clusters	28
4.1.3	Escalonamento dos Clusters	29
4.1.4	Tráfego de Monitoramento	30
4.2	Etapa 2: Implementação do Mecanismo MAC CSMA/CA	31
5	AValiação de Desempenho	35
5.1	Resultados e Discussão	37
5.2	RSSF Cluster-Tree em um ambiente de Larga Escala	40
	REFERÊNCIAS	45

1 Introdução

A Internet das Coisas (IoT) é o resultado do relacionamento de pessoas, de objetos do cotidiano e de aplicações que, conectados à infraestrutura existente da rede mundial de computadores, trocam informações e agregam valor ao ambiente nos quais estão presentes. Por meio da IoT, é criada a interconexão entre os mundos físico e virtual, onde atualmente uma série de protocolos, sensores e atuadores estão sendo desenvolvidos e direcionados para atender a demanda crescente por informações cada vez mais detalhadas, dado o surgimento de novas aplicações e de serviços aprimorados pela IoT (DRATH; HORCH, 2014). Atualmente, a IoT se faz presente e vem transformando modelos de negócio de vários setores e serviços na economia, na academia e na indústria, em âmbito mundial, sendo utilizada principalmente em aplicações de monitoramento e de gerenciamento inteligente para propósitos diversos. De acordo com Edwards (2018), estima-se que, a partir de 2021, cerca de 22,5 bilhões de dispositivos já encontram-se destinados à IoT (comparado ao número de 6,6 bilhões em 2016).

Com o advento da Internet das Coisas e da Quarta Revolução Industrial, as Redes de Sensores sem Fio (RSSFs) têm se tornado uma área explorada por sua adaptabilidade em aplicações para ambientes de larga escala. As RSSFs são um tipo especial de *Low Power Wide Area Networks* (LPWANs), que possuem como peculiaridades seus dispositivos de baixa potência, baixo custo e baixas taxas de transmissão, capazes de sensoriar, processar e de enviar informações de variáveis relacionadas ao ambiente nos quais são implantadas (STANKOVIC; WOOD; HE, 2011). Tais características tornam esse tipo de rede uma opção atraente para empregar uma variedade de aplicações IoT para ambientes de larga escala, tais como: monitoramento florestal, animal e industrial, agricultura de precisão, sistemas veiculares (RASHID BUSHRA E REHMANI, 2016), entre outros, que poderiam ser hostis e inadequados para humanos ou sistemas com fios (AKYILDIZ et al., 2002).

O paradigma IoT, juntamente com as RSSFs, é impulsionado por tecnologias móveis e protocolos como o SigFox (SIGFOX, 2010), IEEE 802.15.4 (IEEE, 2003), ZigBee (ZIGBEE, 2012), Bluetooth (BLUETOOTH, 1999), WiFi (WIFI, 1998) e *Long-Range* (LORA, 2009); nas quais questões como o consumo energético, área de cobertura e vida útil da bateria, são desafios e temas atuais de pesquisa das LPWANs. A escolha por redes LPWANs se dá por suas características como o suporte a comunicação entre dispositivos de longo alcance, sem que estes abram mão do baixo consumo energético de baterias e da operação remota por vários anos sem intervenção humana (CANDELL et al., 2018). Tais características viabilizam sua utilização em aplicações *Smart Cities*, como para estacionamentos inteligentes, gerenciamento e rastreamento de objetos, monitoramento ambiental, medições de eletricidade, água e gás (GLUHAK et al., 2011).

Dentre as tecnologias LPWANs, encontra-se a *Long-Range* (LoRa), que foi desenvolvida pela startup francesa *Cycleo* e, posteriormente, adquirida em 2012 pela empresa *Semtech* que, para padronizar e estender a tecnologia, implementou um protocolo de código aberto adicionado à camada de acesso ao meio físico chamado de LoRaWAN (LORAWAN, 2015). Apoiado e mantido pela *LoRa Alliance* (LORA-ALLIANCE, 2015), este protocolo LoRaWAN é, então, a combinação da camada física LoRa com a camada de acesso ao meio e que, juntas, também oferecem uma série de mecanismos e funcionalidades para redes sem fio, como por exemplo, a otimização *Adaptive Data Rate* (ADR), *Quality of Service* (QoS), criptografia e segurança. O protocolo LoRaWAN é a solução de rede LPWAN que atualmente está ganhando mais força para oferecer suporte a aplicações e serviços IoT (CENTENARO et al., 2016; HAXHIBEQIRI et al., 2018).

Dentro do contexto do protocolo LoRaWAN padrão, a única topologia de rede suportada é o tipo estrela. Nesta topologia, por padrão, há um dispositivo central chamado de *gateway*, que gerencia a rede, coleta pacotes, processa dados e encaminha as informações oriundas dos demais dispositivos no ambiente, que trocam informações por da tecnologia LoRa. O protocolo provê suporte para apenas um único salto nestas redes, cuja a comunicação pode se dar de forma bidirecional, apesar de o tráfego *upstream*, dos dispositivos finais em direção ao *gateway*, ser o caso de uso predominante da rede.

Quanto ao mecanismo de acesso ao meio suportado pelo protocolo, tem-se a utilização de um tipo baseado em ALOHA, onde não há qualquer tipo de sincronização entre os dispositivos ou a verificação da disponibilidade do canal antes de iniciarem suas transmissões. Tal modelo visa priorizar uma maior eficiência energética em detrimento de performance de comunicação, visto que nele não se requer processamentos ou custos computacionais para o gerenciamento das transmissões, visando evitar colisões de pacotes no ar entre os dispositivos. Um dispositivo em uma rede LoRaWAN inicia suas transmissões assim que um pacote com dados coletados pelos sensores é gerado, sujeitando-o assim à colisões com outros pacotes enviados por outros dispositivos nas mesmas janelas de tempo.

Apesar do protocolo LoRaWAN ser ideal para dar suporte à uma série de aplicações e cenários de monitoramento em RSSFs, o mesmo não se aplica para certas RSSFs mais robustas, classificadas como redes de larga escala (FAROOQ; PESCH, 2018b; FAROOQ; PESCH, 2018a; BOR et al., 2016). Esta não adequabilidade se dá por conta da topologia de rede estrela de um único salto, associada ao limitado mecanismo de acesso ao meio ALOHA do protocolo LoRaWAN, em sua forma padrão. RSSFs de larga escala são redes que possuem uma grande quantidade de dispositivos, podendo agrupar centenas a milhares de dispositivos, e que são elaboradas para cobrirem, com granularidade de dados, amplas áreas geográficas, até a ordem de dezenas de quilômetros quadrados (SEVEGNANI et al., 2018). São aplicações comuns de larga escala: monitoramento florestal, animal, industrial, aeroportuário, *smart campus*, *smart cities*, entre outros (DJEDOUBOUM et al., 2018).

Em suma, tem-se por consequências da topologia de rede estrela de um único salto, associada ao mecanismo de acesso ao meio ALOHA do protocolo LoRaWAN em sua forma padrão: a área de cobertura de rede limitada a um único salto, o não suporte à retransmissão de pacotes, a baixa escalabilidade de dispositivos na rede, performance de métricas de comunicação limitadas, bem como a menor vida útil dos dispositivos devido a gastos energéticos com retransmissões de pacotes que colidem por não haver a checagem de canal disponível antes das transmissões. Tais problemas já identificados pela literatura sobre o protocolo tornam-se importantes objetos de pesquisa, os quais propõe-se superar.

1.1 Motivação e Objetivos

O protocolo LoRaWAN é um dos mais utilizados para implementar RSSFs LPWANs, permitindo a comunicação entre dispositivos a quilômetros de distâncias, mantendo a simplicidade, baixo custo do *hardware* e economia energética (LORA-ALLIANCE, 2015). Entretanto, este protocolo ainda apresenta limitações quanto à sua utilização em RSSFs de larga escala em ambientes urbanos, ou em aplicações que requerem garantias de entrega de pacotes, ou alta densidade de dispositivos sensores para promover alto detalhamento de informações coletadas com uma rede escalável (FAROOQ; PESCH, 2018b; FAROOQ, 2020; BOR; VIDLER; ROEDIG, 2016; BOR et al., 2016). Tais limitações se dão devido à topologia de rede do tipo estrela utilizada de um único salto, bem como ao limitado mecanismo de acesso ao meio do tipo ALOHA adotado, o que motivam o desenvolvimento de mecanismos mais adequados para lidar com essas questões e desafios de pesquisa.

O IEEE 802.15.4 (IEEE, 2003) tornou-se um padrão de comunicação relevante para RSSFs devido às suas características de baixo custo e baixo consumo de energia. No entanto, apesar de permitir o monitoramento de grandes áreas através de topologias multi-saltos, esse padrão sofre com o problema de alcance de rádio. Mesmo usando bandas externas (sub-GHz) e tendo visão direta entre nós, o alcance de seus rádios dificilmente pode ultrapassar algumas centenas de metros, diferentemente dos quilômetros previstos pela tecnologia LoRa. Uma outra limitação da pilha IEEE 802.15.4/ZigBee é que, a área externa monitorada dificilmente terá uma topologia completamente plana e pode ter obstáculos entre os nós, diferentemente do LoRaWAN, que prevê a comunicação para ambientes urbanos densos e com obstáculos, e até para áreas *indoor*. Por esta razão, considerando o IEEE 802.15.4/ZigBee, o problema de formar topologias para evitar nós órfãos (ou seja, nós sem conexão com outros nós) tem sido intensamente estudado na literatura. No entanto, esses problemas ainda não foram superados. Além disso, a questão do monitoramento de vastas áreas externas – assumidas neste trabalho como áreas de quilômetros quadrados e denominadas RSSFs de larga escala – continua sendo um problema em aberto. Apesar de não ser uma rede criada explicitamente para RSSFs, o LoRaWAN (LORAWAN, 2015) preenche essa lacuna.

Também em função deste alcance limitado da pilha IEEE 802.15.4/ZigBee, uma maior quantidade de dispositivos se faz necessária para cobrir as mesmas dimensões espaciais, que uma rede com dispositivos LoRa conseguiria utilizando menos dispositivos. Por exemplo, para cobrir 1.000 metros em linha reta utilizando retransmissões, seriam necessários 10 dispositivos 802.15.4/ZigBee, contra apenas 2 dispositivos LoRa, considerando um alcance de 100 metros para dispositivos 802.15.4/ZigBee, e de 500 metros para dispositivos LoRa. Os autores [Jurcik et al. \(2010\)](#) demonstram, através de uma metodologia baseada em *Network Calculus*, uma limitação na escalabilidade de redes IEEE 802.15.4/ZigBee com relação à sua capacidade máxima de dispositivos. Dependendo da quantidade de dispositivos e das condições em uma rede, esta não consegue fluir com eficiência devido ao grande número de colisões de pacotes e congestionamentos em filas de *buffers*.

Diante deste contexto, vislumbra-se atender a estes requisitos de transmissões de longo alcance e de escalabilidade para RSSFs de larga escala, utilizando dispositivos com rádio LoRa e com extensões para protocolo LoRaWAN. Estas extensões são a implementação da topologia de rede *cluster-tree* com o escalonamento/sincronismo de *clusters*, e o mecanismo de acesso ao meio CSMA/CA. Com a topologia *cluster-tree* é possível expandir a cobertura de uma rede, dada a possibilidade do encaminhamento de mensagens multi-saltos, em relação à topologia estrela LoRaWAN padrão de um único salto, sem ajustar parâmetros de rádio LoRa de largura de banda (BW), taxa de codificação (CR) e fator de espalhamento (SF). Estes ajustes por si só ocorrem às custas de um maior consumo energético e de uma maior probabilidade de colisão de pacotes, devido ao aumento no tempo em que os rádios dos dispositivos necessitam permanecer ligados para concluírem transmissões mais longas nestas novas configurações. Tal comportamento aumenta a probabilidade de colisão de pacotes, pois aumenta a exposição de pacotes no ar e, conseqüentemente, as chances de se encontrarem e colidirem com pacotes de outros dispositivos transmitindo nas mesmas janelas de tempo.

Ademais, a ideia subjacente do escalonamento proposto nesta dissertação, é de implementar um mecanismo básico de sincronização de tempo para escalonar os períodos ativos de comunicação dos *clusters* visando a redução no número de colisões de pacotes. O mecanismo proposto organiza os períodos de comunicação dos *clusters* em diferentes janelas de tempo, de modo que menos dispositivos compartilhem o meio em um determinado momento, reduzindo a probabilidade de colisões, permitindo maior escalabilidade da rede, melhorando as métricas de comunicação e consumo de energia. Dentro deste contexto, o principal objetivo deste trabalho de Mestrado é a extensão do protocolo LoRaWAN, para a sua utilização em RSSF de larga escala, por meio da implementação e adoção da topologia de rede *cluster-tree* escalonada, bem como pelo emprego do mecanismo de acesso ao meio CSMA/CA, utilizado em diversos tipos de redes sem fio. A topologia *cluster-tree* é um tipo especial de rede *peer-to-peer*, que é apontada pela literatura como uma das topologias mais adequadas para implementar RSSFs de larga escala ([LI et al., 2011](#)).

Dessa forma, os objetivos específicos deste trabalho são endereçados como segue:

1. A formulação e implementação, em diferentes etapas, de uma RSSF LoRaWAN com a topologia de rede *cluster-tree* e com o mecanismo de acesso ao meio CSMA/CA, que envolvem desde o processo de formação, configuração e escalonamento dos períodos ativos de comunicação dos *clusters* e do mecanismo CSMA/CA na rede, até a implementação da comunicação bidirecional (*upstream/downstream*) entre dispositivos, a fim de garantir a disseminação de informações de controle oriundas do *gateway* até os dispositivos finais, quanto a entrega de mensagens de controle geradas nos dispositivos sensores até o *gateway* da rede.
2. Um estudo de simulação, a fim de atestar as implementações propostas sob diferentes condições de rede e avaliar os resultados considerando métricas de comunicação.

Questões de Pesquisa

Este trabalho de Mestrado foca na seguinte questão de pesquisa:

Como aperfeiçoar uma RSSF LoRaWAN com a topologia de rede *cluster-tree* e com o mecanismo de acesso ao meio CSMA/CA, sem que sua utilização não gere um consumo energético excessivo nos dispositivos e, possa de maneira geral, expandir a área de cobertura da rede, fornecer QoS, melhorar métricas de comunicação e aumentar a vida útil da rede?

Para esta questão, a hipótese definida é que, considerando: i) um mecanismo de formação e configuração inicial de rede utilizando mensagens de controle do coordenador da rede para os dispositivos finais, ii) implementação de uma comunicação bidirecional, e iii) um mecanismo de acesso ao meio eficiente; é possível definir um rede LoRaWAN de topologia *cluster-tree* que utilize sincronismo nas transmissões, mantendo assim a qualidade na entrega, o uso eficiente de energia, escalabilidade e atrasos de comunicação fim-a-fim aceitáveis para o típico tráfego de monitoramento gerado pelos nós sensores.

Contribuições deste Trabalho

As principais contribuições e benefícios do trabalho são listadas a seguir:

1. Para o nosso melhor conhecimento, não há nenhum outro trabalho na literatura que propôs, implementou e avaliou a topologia *cluster-tree* em conjunto com o mecanismo de acesso ao meio CSMA/CA, para estender o protocolo LoRaWAN e viabilizar sua adoção em RSSF de larga escala.

2. Os simuladores de redes LoRa/LoRaWAN não possuem implementados a topologia *cluster-tree*, nem o mecanismo CSMA/CA, bem como os trabalhos na literatura que os implementaram separadamente, não disponibilizaram seus códigos para o público geral. Portanto, tem-se como relevante a implementação da topologia *cluster-tree* e do CSMA/CA para redes LoRa/LoRaWAN em simulador, por abrir espaço para que este grupo de trabalho da UFPI possa estender o protocolo com trabalhos já validadas destas implementações em RSSF IEEE 802.15.4/ZigBee de larga escala.

Organização do Documento

O restante deste trabalho de Mestrado está organizado como segue: Capítulo 2 apresenta os conceitos e abordagens mais importantes para o entendimento desta pesquisa proposta: os protocolos abordados e os principais componentes de redes *cluster-tree*, bem como funcionamento e fluxograma do algoritmo do mecanismo de acesso ao meio CSMA/CA da norma IEEE 802.15.4.

Em seguida, o Capítulo 3 sumariza os principais trabalhos dentro do contexto desta proposta, esboçando as ideias mais relevantes voltados para as diferentes propostas de aprimoramento do protocolo LoRaWAN.

Capítulo 4 apresenta a agregação da camada PHY LoRa com a topologia de rede *cluster-tree* proposta e com a nova camada MAC para utilização do mecanismo de acesso ao meio CSMA/CA baseado conjunto de normas IEEE 802.15.4.

O Capítulo 5 apresenta os resultados de performance de uma RSSF LoRaWAN implementada com o mecanismo de acesso ao meio CSMA/CA e a topologia de rede *cluster-tree*, e a compara com o desempenho de uma rede LoRaWAN padrão de topologia estrela e de algoritmo ALOHA. São avaliadas as métricas gerais de comunicação e o consumo energético dos dispositivos. Por fim, é apresentada uma simulação que demonstra a conectividade e boa performance de comunicação de uma rede *cluster-tree* com CSMA/CA para um ambiente de larga escala.

2 Fundamentação Teórica

Neste capítulo são apresentadas as principais características da modulação de rádio LoRa e do protocolo LoRaWAN. Em seguida, são explorados os conceitos e peculiaridades específicas de redes *cluster-tree* e do mecanismo de acesso ao meio CSMA/CA, comparando as vantagens de suas utilizações contra as limitações presentes da topologia de rede estrela do LoRaWAN, bem como do mecanismo de acesso ao meio ALOHA.

2.1 A Tecnologia LoRa

LoRa é uma técnica de modulação de rádio da camada Física (PHY - *PHYsical Layer*) baseada na tecnologia *Chirp Spread Spectrum* (CSS), que codifica informações em ondas de rádio usando pulsos CSS. Transmissões LoRa são bastante robustas contra ruídos e podem ser recebidas à grandes distâncias. As propagações ocorrem nas bandas de frequência *Industrial Scientific and Medical* (ISM) não licenciadas, como por exemplo, 915 MHz, 868 MHz e 433 MHz; o que facilita e barateia os custos de sua utilização. Ela também pode ser operada em 2,4 GHz para atingir taxas de dados mais altas em comparação com bandas *sub-gigahertz*, ao custo do alcance (SEMTECHLORAWAN, 2021).

LoRa foi inicialmente concebida para aplicações que transmitem pequenas quantidades de dados à baixas taxas de transferência, que necessitem obter um alcance bem maior em comparação com tecnologias como WiFi, Bluetooth ou ZigBee. A Figura 1 apresenta um comparativo entre as principais tecnologias de transmissão de dados sem fio e o alcance das transmissões *versus* largura de banda esperado de cada uma delas.

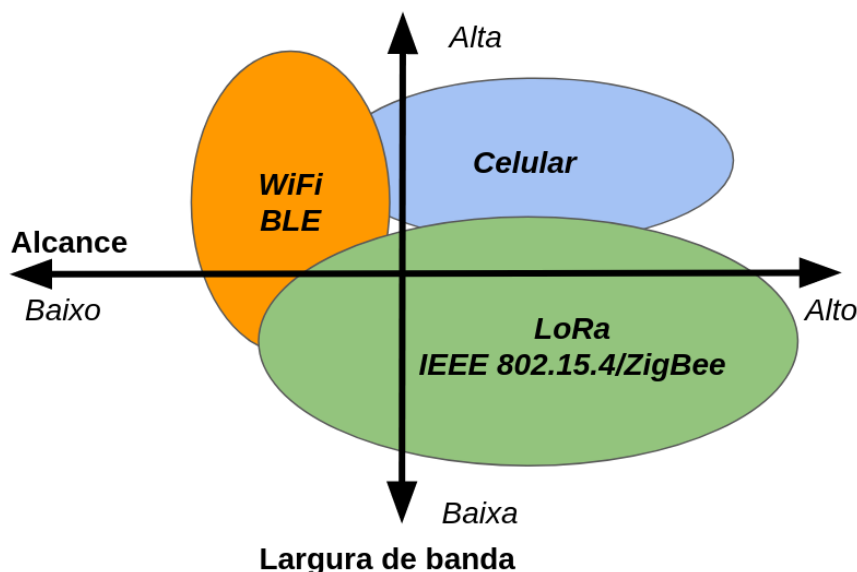


Figura 1 – Largura de banda *versus* alcance.

Estas características tornam a LoRa bastante adequada para sensores e atuadores que são alimentados por baterias e que possuem restrições energéticas em suas operações. Em resumo, graças à esta modulação, transmissões LoRa se propagam por longas distâncias, em pequenas taxas de transferência, mas mantendo o baixo consumo energético.

Os principais atributos da LoRa incluem o longo alcance, a robustez das transmissões e o baixo consumo energético. Dentre estes atributos, também existem parâmetros de rádio LoRa da camada física PHY que podem ser ajustados através do procedimento *Adaptive Data Rate* (ADR) para se obter diferentes ganhos de performance, como por exemplo, nível de potência do rádio (TP - *Transmit Power*), fator de espalhamento (SF - *Spreading Factor*), largura de banda (BW - *Bandwidth*) e taxa de codificação (CR - *Coding Rate*).

Mais especificamente, rádios LoRa podem alternar seu TP entre -4 e $+20$ dBm, o SF em um intervalo de 7 valores $\in [6..12]$ e o BW entre 125 , 250 ou 500 kHz. Para as taxas de codificação CR, são quatro opções: $\frac{4}{5}$, $\frac{4}{6}$, $\frac{4}{7}$, $\frac{4}{8}$ (SEMTECHLORAWAN, 2021). Tais ajustes via ADR dependem da aplicação e implicam em diferentes ganhos ou perdas em relação ao consumo de energia, alcance, duração da transmissão, facilidade de decodificação e resistência à interferências (JESUS et al., 2021). A Tabela 1, adaptada de Pham (2018), apresenta exemplos de combinações de valores e o relacionamento entre estes parâmetros.

Tabela 1 – Relacionamentos entre os diferentes valores de BW, SF, TOA.

BW (kHz)	SF	Bitrate (bps)	TOA		
			Payload (55 bytes)	Payload (155 bytes)	Payload (255 bytes)
125	SF 12	223 bps	2,59 ms	5,87 ms	9,15 ms
250	SF 12	520 bps	1,21 ms	2,52 ms	3,91 ms
125	SF 10	876 bps	0,69 ms	1,50 ms	2,32 ms
500	SF 12	1.041 bps	0,60 ms	1,26 ms	1,95 ms
250	SF 10	1.752 bps	0,34 ms	0,75 ms	1,16 ms
500	SF 11	1.921 bps	0,30 ms	0,69 ms	1,06 ms
250	SF 9	3.221 bps	0,18 ms	0,40 ms	0,63 ms
500	SF 9	6.442 bps	0,09 ms	0,20 ms	0,31 ms
500	SF 8	11.408 bps	0,05 ms	0,11 ms	0,17 ms
500	SF 7	20.212 bps	0,02 ms	0,06 ms	0,10 ms
CR = 4 / 5					

Graças ao mecanismo de ADR, é possível gerar compensação entre o alcance da transmissão e sua duração no meio “ar” que, quando otimizadas, podem maximizar a vida útil da bateria de cada dispositivo e, conseqüentemente, da rede como um todo.

2.2 Protocolo LoRaWAN

LoRaWAN é o protocolo de código aberto da Camada de Acesso ao Meio (MAC - *Medium Access Layer*) adicionado para padronizar e estender a camada física PHY de comunicação para a tecnologia de rádio LoRa. É essencialmente uma camada de *software* que define a forma como os dispositivos utilizam o *hardware* LoRa, especifica o formato das mensagens e controla quando estes devem transmitir. O protocolo foi inicialmente

desenvolvido em 2015 e é mantido pela *LoRa Alliance* ([LORA-ALLIANCE, 2015](#)), sendo projetado para prover comunicações de pequenas quantidades de dados, como dados de sensores ou comandos para atuadores, à longas distâncias durante algumas vezes ao dia.

Tais características conferem aos dispositivos sensores finais LoRaWAN a capacidade de operarem em modo econômico e de poderem durar até 10 anos com uma única bateria-moeda de 3 *volts*, além de serem capazes de transmitir e de receber sinais a mais de 10 quilômetros em áreas rurais e a mais de 3 quilômetros em áreas urbanas ([SEMTECHLORAWAN, 2021](#)), visto que dispositivos LoRaWAN são capazes de prover cobertura *indoor* para mais de um andar de prédios. Quanto à segurança, essas comunicações também se dão de forma encriptada, uma vez que o LoRaWAN garante a troca de mensagens entre um dispositivo final e um servidor de aplicação utilizando o algoritmo criptográfico *AES-128* ([SEMTECHLORAWAN, 2021](#)).

2.2.1 Arquitetura LoRaWAN

Existem dois dispositivos especificados pelo protocolo LoRaWAN, os dispositivos finais/nós e os *gateways*, que exercem desde funções mais básicas às mais completas, respectivamente. Os chamados dispositivos finais são sensores ou atuadores, geralmente alimentados por baterias, que são responsáveis por atividades básicas na rede, como por exemplo, pela coleta de informações sobre o ambiente monitorado e pelo encaminhamento via tecnologia de rádio LoRa destes dados para o *gateway* da rede, o que os caracterizam, portanto, como dispositivos finais geradores de tráfego de monitoramento. No protocolo LoRaWAN, estes dispositivos finais estão associados com o dispositivo principal *gateway* central por meio de uma topologia de rede do tipo estrela simplificada de apenas um único salto, sendo o ALOHA o protocolo MAC.

Por sua vez, o *gateway* é responsável por coletar os pacotes dos demais nós da rede que trafegam no meio pela tecnologia LoRa. Além disso, possui também a função de encaminhar os dados coletados para servidores em redes externas por meio de tráfego com endereços IP ([SEMTECHLORAWAN, 2021](#)), visto que existem duas interfaces de rede no *gateway*, uma LoRa, e outra IP, que pode ser associada à Ethernet, fibra ótica, WiFi, ou por alguma outra tecnologia celular móvel. A Figura 2 ilustra a organização da topologia estrela, identifica os dispositivos finais, o *gateway*, o servidor de rede e o servidor de aplicação. Estes dois últimos, também descritos pelo LoRaWAN, estão fora do escopo deste trabalho, dado que suas comunicações não utilizam a tecnologia de rádio LoRa nem o MAC LoRaWAN. O tráfego padrão nessa rede é o de monitoramento, com as informações coletadas pelos nós sensores finais da rede sendo encaminhadas unidirecionalmente para o *gateway* da rede em apenas um único salto, o máximo suportado pelo protocolo LoRaWAN. A vantagem da topologia estrela é conseguir oferecer um balanceamento entre o alcance das comunicações, o número de dispositivos e o consumo energético da bateria dos dispositivos.

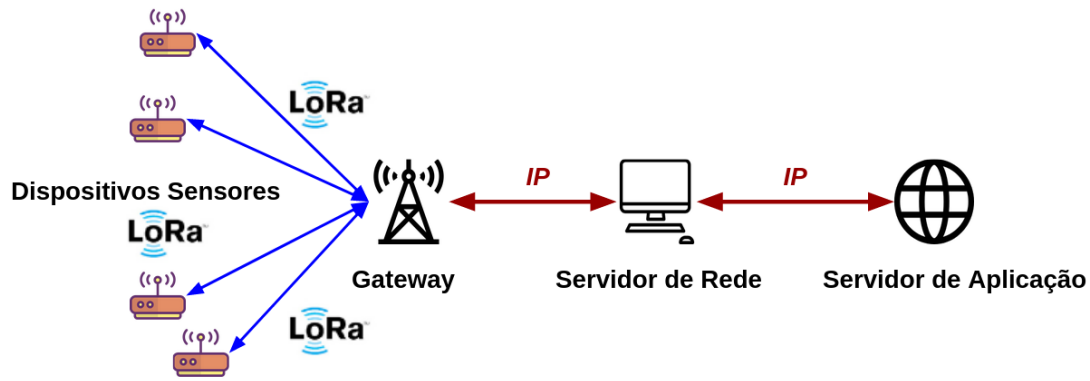


Figura 2 – Arquitetura LoRaWAN.

2.2.2 Classes de Dispositivos

Existem diferentes perfis de comunicação para as três classes de dispositivos LoRaWAN. Cada classe melhor atende à uma aplicação de acordo com seus requisitos específicos. São elas as classes *A*, *B* e *C*, que essencialmente variam na forma de utilização do rádio, e por consequência no total de energia despendido de seu uso. Todas as três classes utilizam o mecanismo ALOHA como a forma de acesso ao meio no envio de mensagens para o *gateway*. A diferenciação se dá apenas na forma de escalonamento da recepção para o tráfego *downlink*. A Figura 3 ilustra as características de cada classe.

- Classe *A*: Este perfil de comunicação é o mais utilizado em redes LoRaWAN por se destacar no quesito economia energética, pois utiliza o ALOHA como forma de acesso ao meio, onde todos os dispositivos pertencentes à rede transmitem sem qualquer tipo de sincronização entre eles, em detrimento de garantias de entrega e de baixa latência. Nele, os dispositivos acessam o meio quando desejam transferir seus pacotes. Por não haver sincronização neste perfil entre os dispositivos, ocorrem altas taxas de colisão de pacotes no ar, o que prejudica as taxas de entrega, bem como aumenta o gasto energético da rede por haver a necessidade de constantes retransmissões, principalmente em redes densamente povoadas. São aplicações comuns de nós da classe *A*: monitoramento ambiental, rastreamento de animais, de bens e de ativos, detecção de incêndios, de vazamentos de água e de terremotos.
- Classe *B*: Neste perfil de comunicação os dispositivos pertencentes à rede tem seus tempos de comunicação sincronizados por *beacons* emitidos pelo dispositivo coordenador/*gateway*, como no protocolo IEEE 802.15.4/ZigBee. Por esta razão, é possível promover garantias de entrega, bem como baixas latências, ainda preservando energias das baterias dos dispositivos. A classe *B* de comunicação ainda encontra-se em caráter experimental pela *LoRa Alliance*, sendo atualmente implementada com a combinação das classes *A* e *C*. São aplicações comuns de nós da classe *B*: *smart metering*, medição de temperatura.

- Classe *C*: Neste perfil de comunicação os dispositivos têm seus rádios ligados continuamente escutando o meio. Isso permite a comunicação de baixa latência, mas consome muito mais energia do que os dispositivos classe *A*. Dispositivos nesta configuração possuem as mais baixas latências para *downlink* e não possuem restrições quanto ao uso de energia, visto que este perfil é adotado por dispositivos conectados à rede elétrica. São aplicações comuns de nós da classe *C*: medidores de água e de eletricidade residenciais, e de postes de luz.

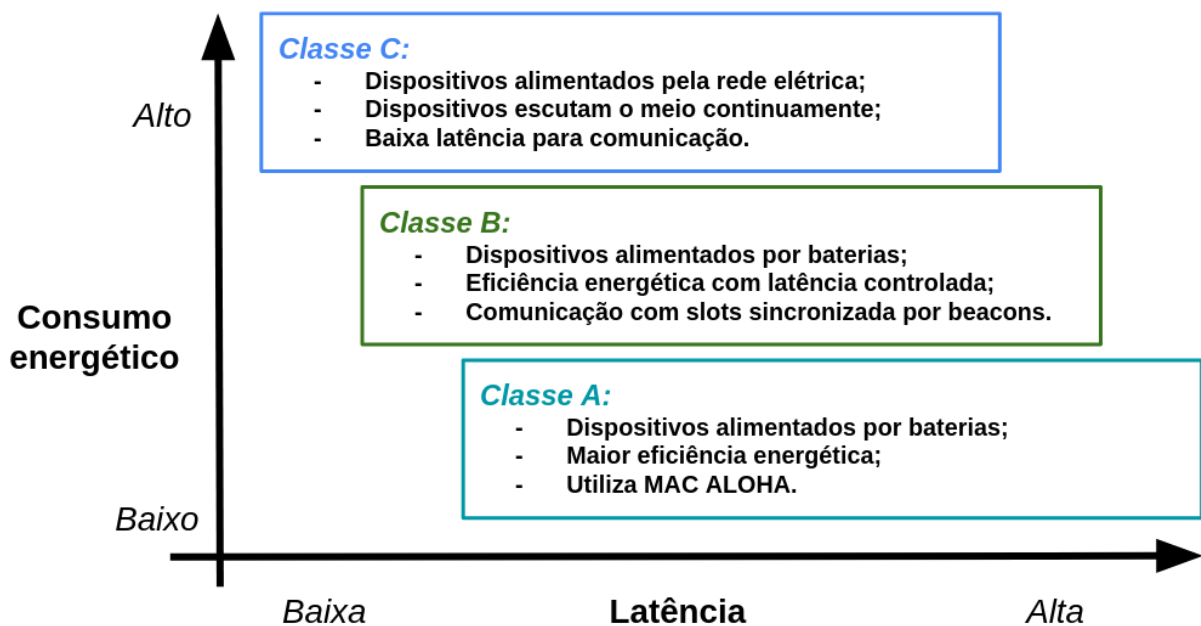


Figura 3 – Classes de dispositivos LoRaWAN.

2.2.3 Mecanismo de Acesso ao Meio ALOHA

O ALOHA é utilizado pelas três classes de comunicação do LoRaWAN, entretanto apenas a classe *A* utiliza o ALOHA puro, ou seja, os dispositivos não obedecem a nenhum tipo de sincronização, não verificam a disponibilidade do canal, nem esperam determinados intervalos de tempo para acessarem o meio e transmitirem seus pacotes. O envio é feito assim que as mensagens de dados são geradas pelos sensores e, após o envio, estes voltam a ficar inativos. Entretanto, apesar da simplicidade do algoritmo, este se torna uma solução não escalável, visto que nós transmitindo ao mesmo tempo, com a mesmas configurações de rádio e com a mesma distribuição espacial, colidem, sendo estas ocorrências bem frequentes em redes com alta densidade de dispositivos (AUGUSTIN et al., 2016).

A Figura 4 ilustra a pilha da arquitetura formada pela tecnologia de rádio LoRa, da camada física (PHY), para qual são apresentadas as frequências em MHz de cada região/país; e pelo protocolo LoRaWAN, da camada de controle de acesso ao meio (MAC), para qual são apresentadas as opções de classes de comunicação dos dispositivos especificados pelo protocolo LoRaWAN.

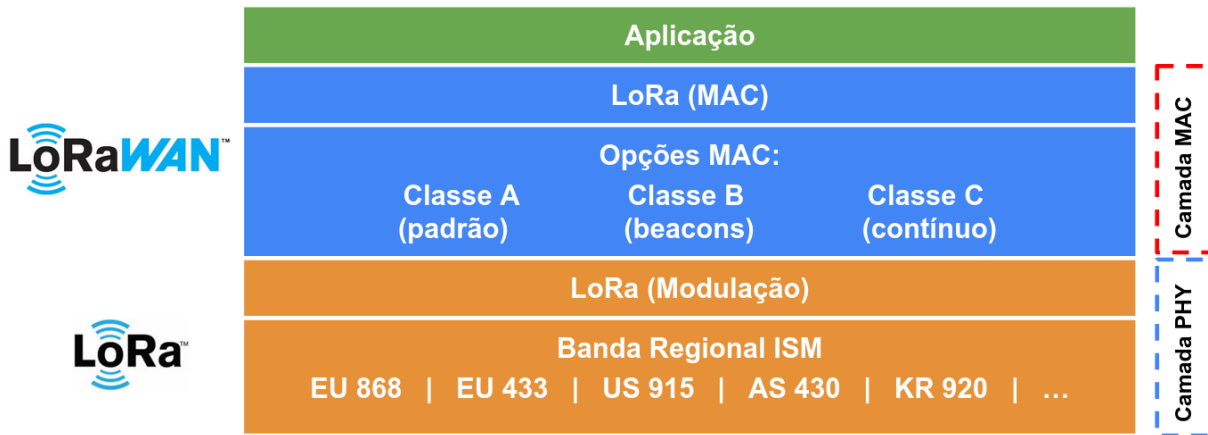


Figura 4 – Pilha arquitetural LoRa PHY e LoRaWAN MAC.

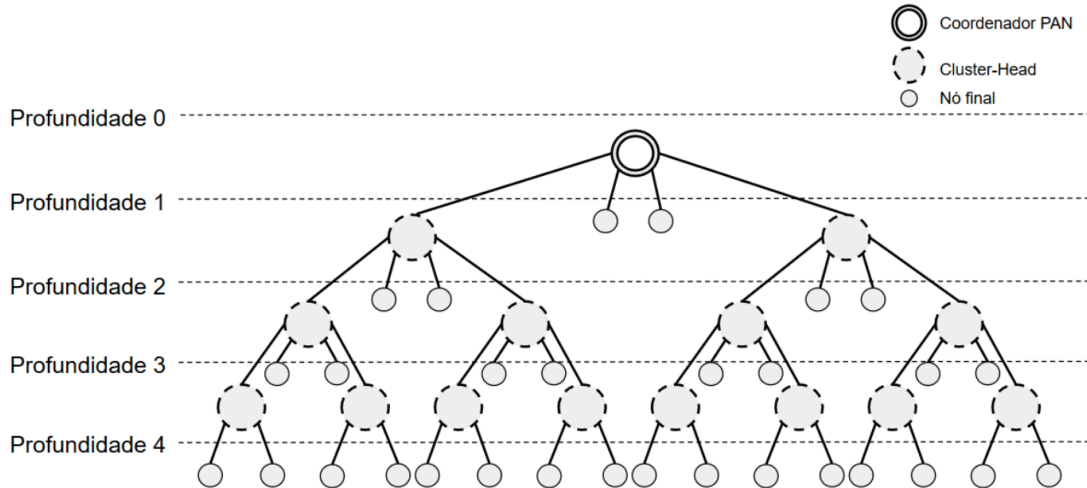
2.3 Redes Cluster-Tree

Dentro do contexto de aplicações de monitoramento de larga escala, a topologia *cluster-tree* é apontada na literatura como a mais adequada para este propósito (LEAO et al., 2017; LI et al., 2011). Uma rede *cluster-tree* é construída através de uma malha de múltiplos *clusters* que cobrem uma ampla área espacial e podem implementar ciclos de trabalho reduzidos, permitindo uma economia de energia dos nós e a extensão da vida útil da rede como um todo.

Na topologia *cluster-tree*, os nós sensores são agrupados e coordenados por um nó centralizador exclusivo denominado *cluster-head* (o *gateway* é um caso específico de um *cluster-head*). Os *Cluster-Heads* (CH) são responsáveis pela associação, sincronização e comunicação de seus nós filhos. Para fornecer escalabilidade, os *clusters* são interconectados por meio de seus coordenadores construindo uma estrutura de rede hierárquica. Toda a comunicação dentro dos *clusters* é centralizada sob o controle do CH. Em suma, o CH é responsável por construir seu próprio *cluster*, gerenciar a associação de nós e fornecer mecanismos de sincronização e de comunicação *intra-cluster*.

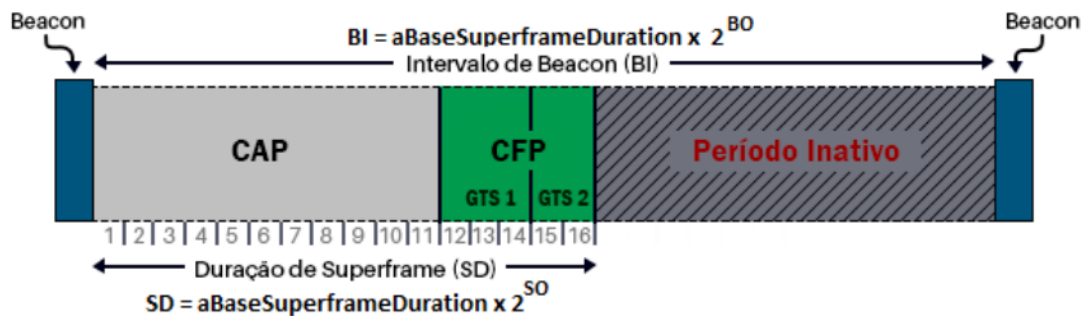
O primeiro *cluster* da rede é construído pelo coordenador geral, chamado de coordenador PAN (*gateway*). O coordenador PAN pode ser considerado como uma poderosa unidade central de processamento, sendo responsável por todas as atividades de gerenciamento da rede. Também geralmente é o nó de destino final (*sink*) dos pacotes com as informações dos sensores coletados nos nós finais. A Figura 5 ilustra a topologia *cluster-tree*.

Numa topologia *cluster-tree*, a rede opera no modo de comunicação com balizas (*beacons*). Nesse modo, as trocas de mensagens estão organizadas de acordo com uma estrutura chamada de *superframe*. Um *superframe* é limitado por quadros de *beacons*, que são periodicamente transmitidos pelos *cluster-heads*. Esses *beacons* sincronizam os nós de cada *cluster*, identificam o PAN e descrevem a estrutura do *superframe*. Basicamente, o *superframe* é formado por dois períodos: o período ativo e o período inativo.

Figura 5 – Topologia *cluster-tree*.

Durante o período inativo, os nós podem entrar em modo de baixo consumo a fim de economizar energia. A parte ativa do *superframe* é composta por dois períodos: Período de Acesso com Contenção (CAP - *Contention Access Period*) e o Período Livre de Contenção (CFP - *Contention-Free Period*). Durante o CAP, os nós que desejam se comunicar competem com os outros dispositivos utilizando o mecanismo de acesso ao meio CSMA/CA. O período CFP é utilizado por aplicações que requerem uma baixa latência ou uma largura de banda garantida para comunicações sem disputa ao meio.

A estrutura do *superframe* é descrita por dois parâmetros: *macBeaconOrder* (BO) e *macSuperFrameOrder* (SO). Esses parâmetros definem o Intervalo de *beacon* (BI) e a Duração do *superframe* (SD), respectivamente. O BI determina o intervalo no qual o coordenador deve transmitir periodicamente seus quadros de *beacons*. O SD, por sua vez, determina o tamanho da porção ativa do *superframe*. A Figura 6 ilustra a estrutura do *superframe* e descreve os valores de SD e BI.

Figura 6 – A estrutura do *superframe*.

Do ponto de vista do modo de comunicação, após a formação da rede, os pacotes de dados podem trafegar de forma *downstream* ou *upstream* nessa topologia de árvore. O tráfego *upstream* é o padrão de tráfego mais comum em RSSFs e corresponde ao tráfego de monitoramento típico gerado por nós sensores e encaminhado em direção a um nó PAN.

No caminho inverso, existe o tráfego *downstream*, que corresponde ao tráfego gerado pelo coordenador PAN e que é encaminhado para os nós abaixo. Os dados que o PAN transmite podem conter informações como instruções de reorganização da rede, bem como simplesmente promover a ação de atuadores no ambiente executadas por nós finais.

2.4 Mecanismo CSMA/CA

O mecanismo de acesso ao meio CSMA/CA é amplamente utilizado em redes sem fio e em RSSF baseadas no padrão IEEE 802.15.4/ZigBee. Ele define como os nós disputam o acesso ao meio, devendo analisar o estado do meio/canal e verificar que ele esteja livre antes de realizarem transmissões. Se o meio estiver ocioso, o algoritmo continua com uma série de outras checagens e espera um tempo aleatório, para somente assim, iniciar uma transmissão. Uma colisão ocorrerá sempre que dois (ou mais) nós detectarem que o meio está livre e decidirem transmitir simultaneamente. Se o meio estiver ocupado, um nó adiará sua transmissão para um tempo randômico posterior.

O CSMA/CA em uma rede com *beacons* utiliza *slots* de tempo definidos. As decisões do mecanismo CSMA/CA dependem da contagem do número de períodos de recuo (*backoffs*). No modo CSMA/CA com *beacons*, o período de *backoff* é alinhado com os limites dos *slots* de tempo do *superframe* de forma bem definida, como na Figura 6. O mecanismo CSMA/CA, implementado nos dispositivos IEEE 802.15.4, utiliza três variáveis para agendar o acesso ao meio e iniciar uma transmissão:

- *Backoff Exponent (BE)*. Define o tempo aleatório dentro no intervalo $[0, 2^{BE} - 1]$, chamado de *backoff*, durante o qual o dispositivo deve esperar antes de checar a disponibilidade do canal com o procedimento *Clear Channel Assessment (CCA)*.
- *Contention Window (CW)*. Define o número de *backoff periods* no qual o canal deve ser classificado como disponível pelo CCA, antes de se iniciar qualquer transmissão. Este parâmetro é utilizado apenas em implementações CSMA/CA (*slotted*), onde $CW = 2$ é o valor padrão de inicialização.
- *Number of Backoffs (NB)*. Define o número de tentativas falhas de acesso ao meio feitas pelo mecanismo CSMA/CA. Tal ocorrência se caracteriza em um *backoff*. Caso $NB > macMaxCSMABackoffs$, a mensagem é reportada como falha. $NB = 0$ é o valor padrão de inicialização desse parâmetro antes de cada transmissão.

A Figura 7, adaptada de [Constante et al. \(2017\)](#), apresenta o fluxo operacional do mecanismo CSMA/CA *unslotted*, utilizado em RSSF IEEE 805.15.4/ZigBee que não são sincronizadas por *beacons*.

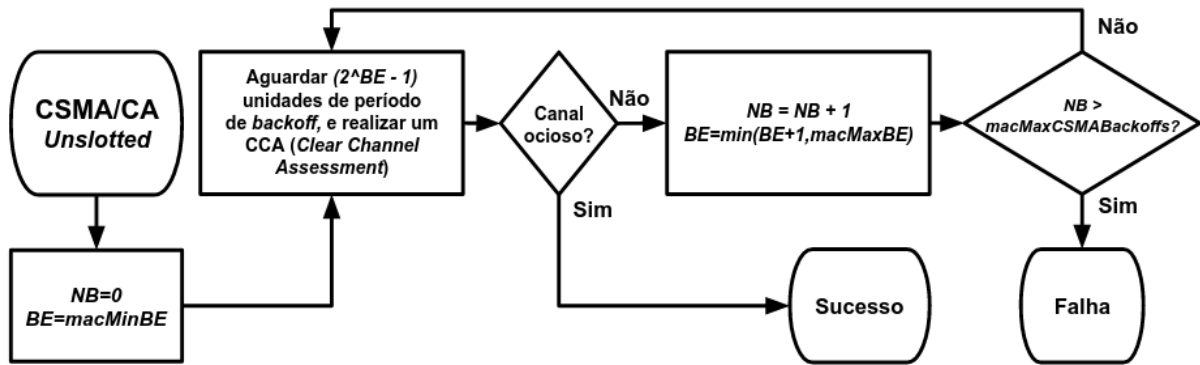


Figura 7 – Fluxograma do mecanismo CSMA/CA *unslotted*.

Este mecanismo inicializa as variáveis NB e BE , seguida de uma tentativa de evitar colisões, esperando por um período de tempo (*backoff*) aleatório definido pelo intervalo: $[0, 2^{BE} - 1] * aUnitBackoffPeriods$. Este parâmetro, resumidamente, é uma constante de tempo em milissegundos. Após a conclusão do período de *backoff*, é realizado o procedimento *Clear Channel Assessment* (CCA), para verificar se o canal/meio está ocupado ou não por outro dispositivo em uma transmissão.

Se o canal estiver ocupado, os valores de NB e BE são atualizados. NB é incrementado em uma unidade, e BE recebe o que for menor entre $(BE + 1)$ e $macMaxBE$. No entanto, NB não pode exceder o valor de $macMaxCSMABackoffs$. Se o valor de NB exceder o número máximo de *backoffs* programado para o mecanismo ($macMaxCSMABackoffs$), o algoritmo termina com um erro de acesso ao canal e o dispositivo não transmite o dado pacote. Caso contrário, o algoritmo volta a esperar por um novo período de tempo aleatório para mais uma tentativa de transmissão. Se o canal estiver ocioso, o nó pode acessar o meio para realizar uma transmissão.

2.5 Limitações do Protocolo LoRaWAN para RRSFs de Larga Escala

O protocolo LoRaWAN não é ideal para a adoção por RSSF em aplicações de larga escala e industriais, pois não atende a requisitos, como por exemplo, o uso eficiente de baterias, a cobertura com granularidade (detalhamento de informações) de uma ampla área geográfica, fornecimento de garantias de entrega em tempo real, bem como ter baixas taxas de perdas de pacote e de retransmissões na rede (LEE; KE, 2018; PHAM, 2018). Tais limitações estão ligados diretamente à topologia estrela padrão utilizada pelo protocolo e à forma de acesso ao meio não sincronizada do ALOHA (BOR et al., 2016; FAROOQ; PESCH, 2018a; FAROOQ; PESCH, 2018b).

Nas subseções a seguir, abordamos os impactos e desvantagens da utilização da topologia estrela, e as melhorias esperadas com a sua substituição pela topologia de rede *cluster-tree*. Além disso, apresentamos os prejuízos da adoção do ALOHA como forma de acesso ao meio e os ganhos trazidos pela utilização do CSMA/CA.

2.5.1 Topologia Estrela vs. Cluster-Tree

A utilização da topologia estrela é um fator limitante para redes de larga escala ou de requisitos industriais, porque a área total de cobertura geográfica da rede é limitada pelo raios de transmissão individual de cada dispositivo participante que, no LoRaWAN, podem se encontrar a no máximo um único salto do dispositivo coordenador da rede. Propostas como a adição de mais dispositivos na rede para expandir sua cobertura não resolveriam o problema, visto que área de cobertura ainda continua limitada a um único salto de distância do coordenador geral da rede, e apenas elevaria a probabilidade colisão de pacotes nas transmissões, com mais dispositivos tentando enviar pacotes e congestionando o meio (BOR et al., 2016; FAROOQ; PESCH, 2018a; FAROOQ; PESCH, 2018b).

Além disso, as propostas que visam aumentar a granularidade dos dados coletados com a adição de mais dispositivos implantados monitorando uma mesma área espacial, aumentando assim, o número de nós na topologia estrela, também não são ideais, uma vez que esta topologia não é escalável, principalmente quando associada a mecanismo de acesso ao meio ALOHA. Estas tentativas de cobrir amplas áreas utilizando a topologia estrela e recursos inerentes à modulação de rádio LoRa são ineficientes, pois utilizam uma menor largura de banda (BW) e um maior fator de espalhamento (SF).

De acordo com a Tabela 1, uma menor largura de banda (BW) e um maior fator de espalhamento para expandir o alcance das transmissões, resulta em um maior tempo que o rádio permanece ligado para conseguir transmitir um pacote nestas configurações, o que, conseqüentemente, leva a maiores probabilidades de colisão de pacotes com outros dispositivos transmitindo ao mesmo tempo, acarretando em retransmissões, maior consumo energético e menor tempo de vida útil da rede.

Tabela 2 – Comparação de características entre estrela e *cluster-tree*.

Características	Topologia	
	Estrela	Cluster-Tree
Escalabilidade	Não	Sim
Eficiência energética	Sim	Sim
Sincronização de rede	Sim	Sim
Caminhos redundantes	Não	Não
Roteamento determinístico	Sim	Sim
Multi-saltos	Não	Sim
Cobertura limitada	Sim	Não
Acesso ao meio sem contenção	Sim	Sim

A proposta de substituição da topologia padrão estrela pela *cluster-tree* apresenta algumas vantagens, como por exemplo, a capacidade de expandir a cobertura de área da rede, uma vez que esta nova topologia é escalável com a utilização de *clusters* multi-saltos, como visto na Figura 8, que apresenta a comparação topológica entre uma rede estrela de um único salto e uma rede *cluster-tree* multi-saltos.

Com isso, pode-se aumentar também o detalhamento e qualidade dos dados coletados pelos dispositivos em um ambiente monitorado, a partir da implantação de uma maior quantidade de nós por área quadrada. Além disso, há um melhor uso energético associado à esta topologia, bem como aumento da vazão da rede, uma vez que cada *cluster* pode ser configurado para utilizar diferentes configurações de rádio e conseguirem realizar transmissões simultâneas sem haver sobreposição nas transmissões e, portanto, sem haver colisões de pacotes. A Tabela 2 apresenta um comparativo entre estas topologias.

Outra grande vantagem trazida pela implementação de uma *cluster-tree* é a possibilidade de implementar mecanismos otimizados de sincronização de rede, bem como de priorização de tráfego baseados nas características de cada *cluster*. Em uma *cluster-tree* também é possível reduzir o volume de pacotes trafegados na rede por meio de filtragem, compactação ou agregação de dados similares, coletados por nós sensores que, posteriormente, podem ser fundidos pelo CH de cada *cluster*. Trabalhos como (LEAO et al., 2017; LINO et al., 2020) validam tais propostas em redes *cluster-tree* no âmbito do IEEE 802.15.4/Zigbee (IEEE, 2003; ZIGBEE, 2012).

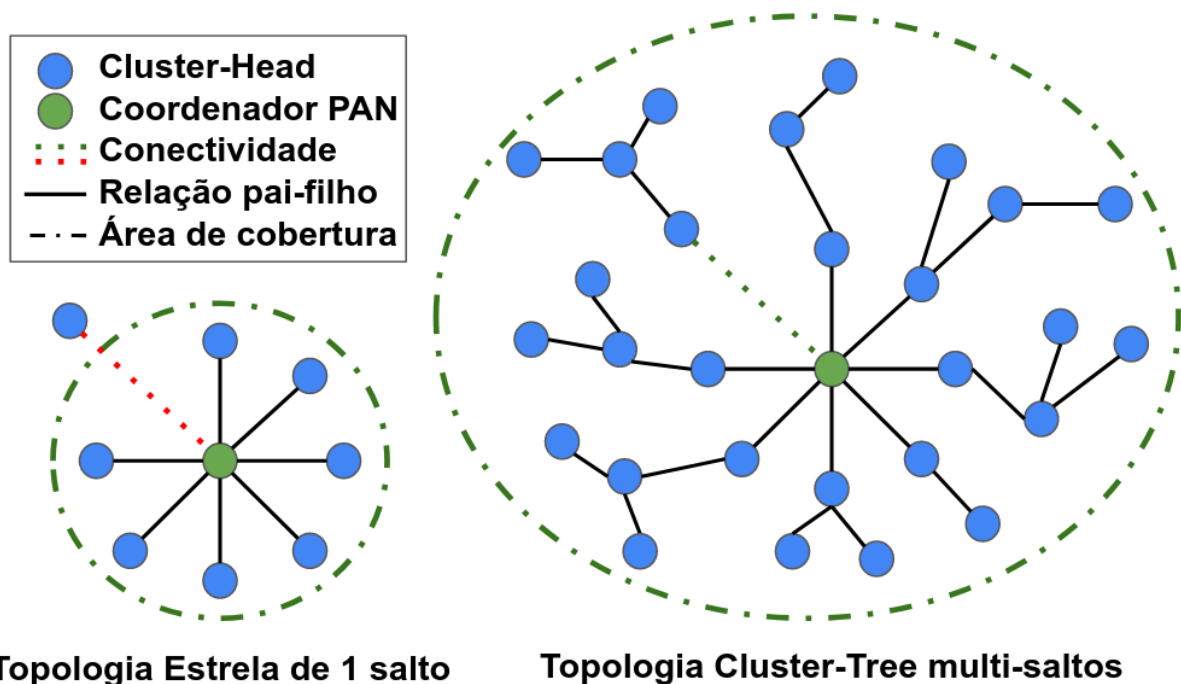


Figura 8 – Comparação topológica de uma rede estrela vs. uma rede *cluster-tree*.

A Figura 8 apresenta uma comparação topológica entre uma rede estrela, cuja área de cobertura é limitada a um único salto, e uma rede *cluster-tree*, cuja área de cobertura é expandida por meio dos multi-saltos e do encaminhamento de mensagens entre os *cluster-heads*. Também é ilustrada a escalabilidade, em termos de associação de um maior número de dispositivos à rede, da topologia *cluster-tree* em relação à estrela.

2.5.2 ALOHA vs. CSMA/CA

O protocolo ALOHA é amplamente conhecido na literatura por sua simplicidade, bem como por suas limitações. Assim que um dispositivo possui um pacote de dados para transmitir, ele o fará sem ao menos sensoriar o canal de comunicação. Tal comportamento deixa as transmissões da rede suscetíveis à alta probabilidade de colisões de pacotes entre os dispositivos e, portanto, faz com que necessitem retransmitir os seus dados. A escalabilidade em redes LoRaWAN para cobrir aplicações de larga escala fica comprometida, porque a adição de mais nós na rede aumenta exponencialmente as probabilidades de colisões de pacotes com outros dispositivos transmitindo ao mesmo tempo em uma rede congestionada (BOR et al., 2016; FAROOQ; PESCH, 2018a; FAROOQ; PESCH, 2018b).

Por outro lado, a substituição do ALOHA pelo CSMA/CA traz melhorias para a rede, como por exemplo, a característica de escalabilidade, pois com os controles nas transmissões, as probabilidades de colisões reduzem, bem como a adição de mais dispositivos à rede não representa aumento degradante destas probabilidades quanto no ALOHA. Com menos colisões ocorrendo, é possível alcançar melhores taxas de utilização da rede, bem como otimizar a utilização energética da rede, uma vez que o número de retransmissões que ocorrem com a utilização do mecanismo CSMA/CA em relação ao ALOHA são menores.

3 Trabalhos Relacionados

Apesar de serem tecnologias emergentes que atraem atenção da comunidade científica, a maioria dos trabalhos relacionados à tecnologia LoRa tem focado em analisar o protocolo LoRaWAN e otimizar os parâmetros de rádio BW, CR, SF e TP, para contornar problemas causados por atenuação de sinal e colisões em redes de alta densidade. Ainda são escassos os trabalhos que propõem a extensão geográfica do protocolo LoRaWAN com a adoção de novas topologias de rede ou novos mecanismos de acesso ao meio.

Este capítulo apresenta os principais trabalhos voltados à propostas de extensão de redes baseadas em LoRa e no protocolo LoRaWAN, por meio da implementação da topologia de rede *cluster-tree* e do mecanismo de acesso ao meio CSMA/CA. A Tabela 3.3, ao final deste capítulo, compila os trabalhos relacionados mais relevantes à proposta desta dissertação de mestrado. Primeiramente, na Seção 3.1, são abordados os trabalhos que propõem a utilização da topologia *cluster-tree*, destacando os principais desafios encontrados pelos autores na implementação, bem como uma análise sobre os ganhos relativos às taxas de entrega de pacotes, vazão, escalabilidade e utilização energética dos nós, elencando também as relevantes diferenças em comparação ao mecanismo proposto por este trabalho. Na Seção 3.2, são apresentadas as propostas estado-da-arte para a adoção do mecanismo de acesso CSMA/CA, em substituição do ALOHA, detalhando as principais métricas da rede que indicam ganhos de performance e a otimização dos recursos energéticos e o tempo de vida da rede.

3.1 Topologia Cluster-Tree para Redes LoRa/LoRaWAN

Em relação à implementação de outras topologias de rede, os autores de [Alenezi et al. \(2019\)](#) investigaram o uso da tecnologia LoRa para aplicações em redes de alta densidade de dispositivos, propondo uma técnica adequada de escalonamento e priorização. Os *clusters* são formados com base em um algoritmo de aprendizado de máquina não supervisionado de clusterização *K-Means*. Esta proposta aborda o particionamento de dispositivos em diferentes *clusters*, agrupados de acordo com as características das informações coletadas pelos sensores de monitoramento, e a priorização da transmissão de mensagens de determinados *clusters* em detrimento de outros. Os resultados mostraram uma redução nas taxas de colisão de 56%, o que levou a uma melhoria geral do *throughput* da rede e a uma minimização dos atrasos totais de transmissão em aplicações de alta densidade com até 1.000 dispositivos. No entanto, este trabalho não apresenta um protocolo para inicialização e organização autônoma de *clusters* entre os próprios dispositivos, utilizando apenas a topologia estática criada pelo algoritmo de clusterização *K-Means*.

Em uma abordagem semelhante, [Zhu et al. \(2019\)](#) propôs uma metodologia para melhorar a área de cobertura das redes LoRa com o uso de uma rede em *cluster* multi-saltos totalmente conectada e particionada em várias sub-redes. Essa proposta também garante transmissões simultâneas por meio da configuração de diferentes SFs nos dispositivos, e fornece o roteamento desses nós para o *gateway*. Além disso, um algoritmo de balanceamento de carga de tráfego é apresentado para evitar que gargalos sejam gerados em cada sub-rede. O lado negativo desta proposta é a alta sobrecarga de processamento nos dispositivos e a falta de análises quanto ao impacto da rede em termos de consumo de energia.

Da mesma forma, [Farooq \(2020\)](#) propõe uma abordagem de clusterização permitindo a comunicação *uplink* multi-saltos em redes LoRa. Neste trabalho, é possível estender a área de cobertura da rede através da comunicação multi-saltos da topologia *cluster-tree*. Os resultados mostram que o esquema proposto supera o LoRaWAN e demonstrou uma taxa de entrega de pacotes quase 20 vezes maior e aproximadamente 60% de economia de energia nos dispositivos. No entanto, a rede *cluster-tree* proposta suporta apenas o tráfego de comunicação *uplink* e, portanto, não é capaz de transmitir o tráfego de controle *downlink*. Além disso, não fornece escalonamento dos períodos ativos dos *clusters*.

Em relação às redes multicluster, [Lee e Ke \(2018\)](#) apresentou uma abordagem de rede malha baseada em LoRa para aumentar o alcance da comunicação e a taxa de entrega de pacotes sem a necessidade de instalar *gateways* adicionais. O protocolo de rede cria caminhos de encaminhamento de dados usando as contagens de saltos de rede mais curtas e as métricas de intensidade do sinal. Em [Liao et al. \(2017\)](#), foi demonstrada a viabilidade de redes multi-saltos LoRa usando o protocolo de transmissão simultânea (CT) proposto, que adiciona atrasos aleatórios antes da transmissão de pacotes para permitir transmissões simultâneas e melhorar o desempenho geral da comunicação.

Em [Sartori et al. \(2017\)](#), a comunicação multi-saltos em redes LoRa é realizada através de um novo protocolo de roteamento MAC para *Low-Power and Lossy Network* (RPL), que é usado para selecionar um SF adequado para cada vizinho disponível e, posteriormente, uma função objetivo proposta para selecionar o caminho de roteamento que minimiza o tempo de antena das transmissões. Ao selecionar o caminho com o menor tempo no ar, o consumo de energia pode ser reduzido, aumentando a vida útil da rede.

No entanto, apesar da disponibilidade de trabalhos indicando a viabilidade de mecanismos de *clusters* para redes LoRa/LoRaWAN, as abordagens propostas não abordam certas questões, tais como: i) em alguns desses trabalhos o consumo de energia não é avaliado; ii) em outros apenas a comunicação *uplink* é avaliada; ou iii) os protocolos propostos utilizam um grande número de mensagens de controle no processo de formação de rotas, tornando-se inadequados para atender as demandas de RSSFs de larga escala.

3.2 Mecanismo CSMA/CA para Redes LoRa/LoRaWAN

Dentre os poucos trabalhos publicados que utilizam o CSMA como uma alternativa de mecanismo de acesso ao meio para redes LoRa, [To e Duda \(2018\)](#) demonstraram que usando o CSMA/CA, a taxa de entrega de pacotes foi melhorada em 7 vezes em uma rede com 10.000 nós, comparada a uma rede utilizando ALOHA como MAC. Além disso, foi mostrado que o aumento do consumo de energia dos nós está também associado às perdas em colisões de pacotes por suas retransmissões.

[Kouvelas, Rao e Prasad \(2018\)](#) implementaram em simulador um componente do mecanismo CSMA puro (p-CSMA), e realizaram um estudo comparativo com o ALOHA padrão de redes LoRaWAN. Igualmente concluíram que a utilização do CSMA melhora métricas de comunicação da rede, visto que o simples fato de existir o sensoriamento do canal evita majoritariamente colisões. Os autores também realizaram testes utilizando três SFs dinamicamente, ao invés de um só, e reportaram melhores taxas de entrega de pacotes.

[Pham \(2018\)](#) conduziu seu trabalho baseado em um *test-bed* de longo alcance para avaliar o mecanismo CSMA implementado em uma rede LoRa de cenário real, onde o procedimento *Channel Activity Detection* (CAD) foi utilizado para realizar a checagem de um canal inoperante. Os resultados indicam a viabilidade do CSMA em cenários reais em termos de consumo energético e de diminuição das taxas de colisão de pacotes.

[El-Aasser et al. \(2019\)](#) realizaram estudos comparativos analíticos sobre o CSMA em redes LoRa, focando na questão de nós ocultos, que é uma característica real existente em cenários de aplicações de longo alcance, onde dispositivos estão espalhados dentro de áreas internas de prédios ou posicionados a baixas alturas em uma *smart city*, o que dificulta a sua comunicação e percepção do restante da rede. Os resultados indicaram a viabilidade do CSMA em cenários simulados de uma aplicação de sinalização viária e de segurança residencial, em termos de consumo energético e de diminuição das taxas de colisão de pacotes na rede.

[Beltramelli et al. \(2020\)](#), usando resultados sobre os efeitos de captura de tempo e potência de LoRa, desenvolveram um modelo matemático para comparar o ALOHA com *slot* e o CSMA. O modelo inclui os parâmetros de projeto necessários para esses mecanismos, como tempo de *backoff* e precisão de sincronização para o ALOHA com *slot*, e limiar de detecção de uso de canal para o CSMA. O modelo, em termos de probabilidade de cobertura, rendimento do canal e eficiência energética, é validado com simulações probabilísticas *Monte-Carlo* ([MONTECARLO, 2020](#)). A análise mostra que o ALOHA com *slot* tem maior confiabilidade do que o ALOHA puro, ao custo de menor eficiência de energia para baixas densidades de dispositivo. Também conclui-se que o CSMA supera o ALOHA com *slots* em SFs menores em termos de confiabilidade e eficiência de energia, com seu desempenho degradando para ALOHA puro em SFs mais altos.

Farooq e Pesch (2018b) realizaram um estudo comparativo de adequabilidade para redes LoRa entre os principais protocolos de controle de acesso ao meio disponíveis, como o ALOHA puro, *delay before transmit*, *random frequency hopping* e o CSMA. Os experimentos utilizaram modelos de geração de tráfego de dados tanto periódicos, quanto baseado em eventos, para as aplicações IoT. Os resultados concluíram que o CSMA e o *frequency channel hopping* obtiveram um desempenho significativamente melhor para ambos os tipos de modelo de geração de tráfego de dados (*smart metering*, *smart parking*), tendo o CSMA apresentado características de escalabilidade em termos de número de nós em uma rede, confiabilidade e melhor consumo de energia.

3.3 Considerações do Capítulo

Este capítulo apresentou diversos trabalhos que abordam a substituição da topologia de rede estrela simplificada padrão de um único salto do protocolo LoRaWAN, pela topologia multi-saltos *cluster-tree*, bem como trabalhos que propõem a substituição do mecanismo de acesso ao meio básico ALOHA, por mecanismos de acesso ao meio mais eficientes como o CSMA. Dentro deste contexto, este trabalho de Mestrado propõe a implementação de uma rede que agrega ambas as propostas de substituição, *cluster-tree* e CSMA, para usufruir simultaneamente dos benefícios que cada uma destas tecnologias trazem à rede como um todo. São estes benefícios a escalabilidade da rede, sincronismo/escalonamento de *clusters*, área de cobertura expandida, maior vazão, melhores métricas de comunicação e economia energética.

Para isto, propõe-se um esquema que abrange a formação orientada da rede, na qual poucos nós são necessários na participação do processo de inicialização e preparação das estruturas de comunicação da topologia de rede *cluster-tree*. Os dispositivos participantes utilizam um conjunto de mensagens de controle desenvolvido para a formação da rede, que estende e é compatível com os campos das mensagens existentes do protocolo LoRaWAN. As comunicações na rede LoRaWAN *cluster-tree* são bi-direcionais e multi-saltos, permitindo a existência tanto de mensagens de monitoramento, quanto de mensagens de controle para eventuais reconfigurações da rede e dos nós. Após o processo de formação da rede, os dispositivos passarão a utilizar o mecanismo de acesso ao meio CSMA/CA adaptado do protocolo IEEE 802.15.4/ZigBee.

Tabela 3 – Trabalhos relacionados mais relevantes.

Autor	Proposta(s)	Comentários
Alenezi et al. (2019)	Escalonamento e priorização de <i>clusters</i> com K-Means	Redução das taxas de colisão em 56%; Melhoramento da vazão da rede; Minimização de atrasos em redes com até 1.000 dispositivos. Rede de apenas 1 salto (<i>hop</i>); Não apresenta um protocolo para inicialização da rede.
Zhu et al. (2019)	Rede clusterizada multi-saltos particionada em sub-redes; Transmissões concomitantes com uso de diferentes SFs.	Roteamento dos nós até o <i>gateway</i> da rede; Balanceamento de carga de tráfego; Alto <i>overhead</i> de processamento nos dispositivos; Faltam análises do consumo energético da rede.
Farooq (2020)	Topologia <i>Cluster-Tree</i> para LoRa	Taxa de entrega quase 20 vezes superior ao LoRaWAN; Economia de quase 60% de energia nos dispositivos; Suporta apenas tráfego unidirecional <i>upstream</i> ; Não provê sincronização ou escalonamento de <i>clusters</i> .
To e Duda (2018)	LoRaWAN + CSMA/CA	Taxa de entrega melhorada em 7 vezes em rede de 10.000 nós; Aumento do consumo de energia dos nós associado às perdas em colisões de pacotes e por suas retransmissões;
Kouvelas, Rao e Prasad (2018)	LoRaWAN + CSMA/CA	Utilizar o CSMA melhora métricas de comunicação da rede; Utilizar SFs dinâmicos melhora taxas de entrega de pacotes.
Pham (2018)	LoRaWAN + CSMA/CA em cenário real de monitoramento animal	Indicam a viabilidade do CSMA/CA em cenários reais em termos de consumo energético e de diminuição das taxas de colisão de pacotes na rede.
Farooq e Pesch (2018)	LoRaWAN + CSMA/CA	CSMA/CA, em relação ao ALOHA do LoRaWAN, obteve melhor desempenho para dados de <i>smart metering</i> e <i>smart parking</i> ; O CSMA apresentou características de escalabilidade em número de nós em uma rede, confiabilidade e melhor consumo de energia.

4 Proposta: RSSFs LoRaWAN Baseadas na Topologia Cluster-Tree e no mecanismo de acesso ao meio CSMA/CA IEEE 802.15.4

Este trabalho de Mestrado propõe a extensão do protocolo LoRaWAN para possibilitar a sua utilização em RSSF de larga escala, através da implementação de uma topologia de rede *cluster-tree* escalonada, em substituição da topologia estrela simplificada de um único salto, e através da utilização do mecanismo de acesso ao meio CSMA/CA IEEE 802.15.4 *unslotted*, em substituição ao MAC ALOHA LoRaWAN. A ideia subjacente é fornecer mecanismos que permitam aumentar a escalabilidade da rede, expandir a área de cobertura, dar maior vazão, melhorar métricas de comunicação, reduzir o consumo energético da rede e permitir a sincronização dos períodos ativos de comunicação entre os *clusters* de dispositivos. Este trabalho define uma série de mensagens de controle, descritas nas próximas subseções, para auxiliar o processo de inicialização, construção e escalonamento dos períodos ativos de comunicação dos *clusters* da topologia *cluster-tree*, que são trocadas entre o dispositivo coordenador geral de rede WAN (WAN - *Wide Area Network*) – aqui denominado de coordenador WAN – e os coordenadores de cada *cluster* (CHs). Além disso, também é implementado na camada MAC o mecanismo de acesso ao meio CSMA/CA baseado no padrão IEEE 802.15.4 *unslotted*, utilizado por todos os dispositivos pertencentes à rede LoRa/LoRaWAN. Dividimos em duas etapas o desenvolvimento deste trabalho:

- Etapa 1: Implementação das mensagens de controle para dar suporte ao processo de inicialização da rede, associação entre dispositivos e a formação da *cluster-tree* com os períodos de comunicação de cada *cluster* escalonados.
- Etapa 2: Implementação do mecanismo de acesso ao meio CSMA/CA baseado no padrão IEEE 802.15.4 *unslotted*.

Nas subseções seguintes, serão detalhadas estas etapas de implementação.

4.1 Etapa 1: Processo de Formação da Rede Cluster-Tree

A primeira etapa das implementações propostas neste trabalho considera que, após a implantação dos nós sensores no ambiente, é iniciado o processo de formação topológica baseado na associação de nós sensores e nas definições de *cluster-heads* (CH) e do dispositivo

coordenador geral da rede. Este processo é coordenado por um protocolo compatível com o LoRaWAN, visto que utiliza a própria estrutura de quadros MAC LoRaWAN; e é dividido em quatro etapas: (i) inicialização do coordenador WAN e associação com *cluster-heads*, (ii) estruturação dos *clusters*, (iii) escalonamento dos *clusters* e (iv) encaminhamento de mensagens de monitoramento. Cada etapa será detalhada nas próximas subseções.

4.1.1 Inicialização do WAN e Associação com Cluster-Heads

O processo de formação da rede começa a partir do *gateway* (WAN) e segue em direção aos nós em níveis mais profundos da topologia em árvore. Cada nível da árvore corresponde a um salto de comunicação entre *gateway* da rede e os CHs, ou entre os próprios CHs, conforme mostra a Figura 10. Para dar suporte ao processo de formação da topologia *cluster-tree*, foi utilizado um conjunto de mensagens próprias do LoRaWAN. Nos cabeçalhos dos quadros da camada MAC, há o campo *MessageType*, que é utilizado para identificar o tipo e a estrutura da mensagem dentro do corpo do quadro MAC LoRaWAN, que pode ser de 8 tipos. Este trabalho utiliza o tipo *Proprietary* para codificar as mensagens de controle, como proposto por Farooq (2020), visando auxiliar na formação e inicialização da topologia de rede *cluster-tree*.

A formação da topologia *cluster-tree* aqui proposta segue a abordagem IEEE 802.15.4/ZigBee e a de Farooq (2020), porém, apresenta melhorias quando comparadas pois, a presente abordagem, utiliza menos mensagens de controle para acelerar o processo de associação de nós, visto que os dispositivos filhos não precisam confirmar uma mensagem de descoberta de seu pai para poderem iniciar a transmissão das mensagens de monitoramento geradas pelos nós sensores.

Entre as mensagens de controle implementadas para auxiliar no processo da formação da rede, há a *Cluster Tree Control Message* (CTCM). Como mostrado na Figura 9, o tamanho da mensagem CTCM é de 10 *bytes* e seus campos são descritos como segue: *Message ID* (MID) 1 *byte*, *Layer ID* (LID) 1 *byte*, *Sender ID* (SID) 4 *bytes* e *Recipient ID* (RID) 4 *bytes*. O campo MID possui o valores *0x00* para mensagens enviadas pelo WAN e, *0x01* para as mensagens de resposta enviadas pelos *cluster-heads*. Uma das vantagens deste protocolo é que apenas os *cluster-heads* estão envolvidos na construção das rotas, que quantitativamente são inferiores quando comparados ao número de dispositivos sensores finais. Além disso, todas as transmissões de mensagens de controle são encapsuladas e seguem enviadas utilizando a tecnologia LoRa.

CTCM Message 10 bytes			
Message ID 1 byte	Layer ID 1 byte	Sender ID 4 bytes	Recipient ID 4 bytes

Figura 9 – Campos da mensagem CTCM.

O processo de inicialização da *cluster-tree* se dá a partir do WAN da rede, com a transmissão de mensagens CTCM contendo o valor $0x00$ nos campos MID e LID. Quando um *cluster-head* recebe uma CTCM, ele armazena o endereço do WAN e atribui para si o valor $LID + 1$. O WAN da rede associará ao seu *cluster* os dispositivos *cluster-heads* e enviarão pacotes de dados – mensagens CTDP, descritas a seguir na subseção 4.1.4 –, contendo no campo RID o endereço identificador do WAN.

Os *cluster-heads* que receberam a CTCM do WAN passam a transmitir suas próprias CTCMs, atualizando os campos da mensagem adequadamente para se associarem a outros *cluster-heads* em níveis inferiores da árvore fora do alcance do WAN. Um *cluster-head* terá como destino do tráfego *upstream* apenas um único endereço, que corresponde ao do *cluster-head* de quem ele recebeu a CTCM MID $0x00$, o qual possui valor $LID - 1$.

Já como destino de tráfego *downstream*, terá um ou mais endereços que correspondem ao dos *cluster-heads* de quem ele recebe pacotes de dados de monitoramento (CTDP), contendo no campo RID, o seu endereço identificador, o qual possuem valor $LID + 1$. Assim, um *cluster-head* no nível n , quando recebe um pacote de *cluster-heads* filhos no nível $n + 1$, gravará os endereços destes filhos como destinos de tráfego *downstream*. Caso um *cluster-head* receba uma CTCM do tipo $0x00$ de mais de um dispositivo, este escolherá responder o que tiver o maior valor de indicador de força de sinal de rádio (RSSI - *Received Signal Strength Indication*). O processo de formação de topológico continua até que se associem todos os *cluster-heads* da rede. A Figura 10 ilustra o processo de inicialização da WAN e a associação hierárquica multi-saltos dos *cluster-heads*.

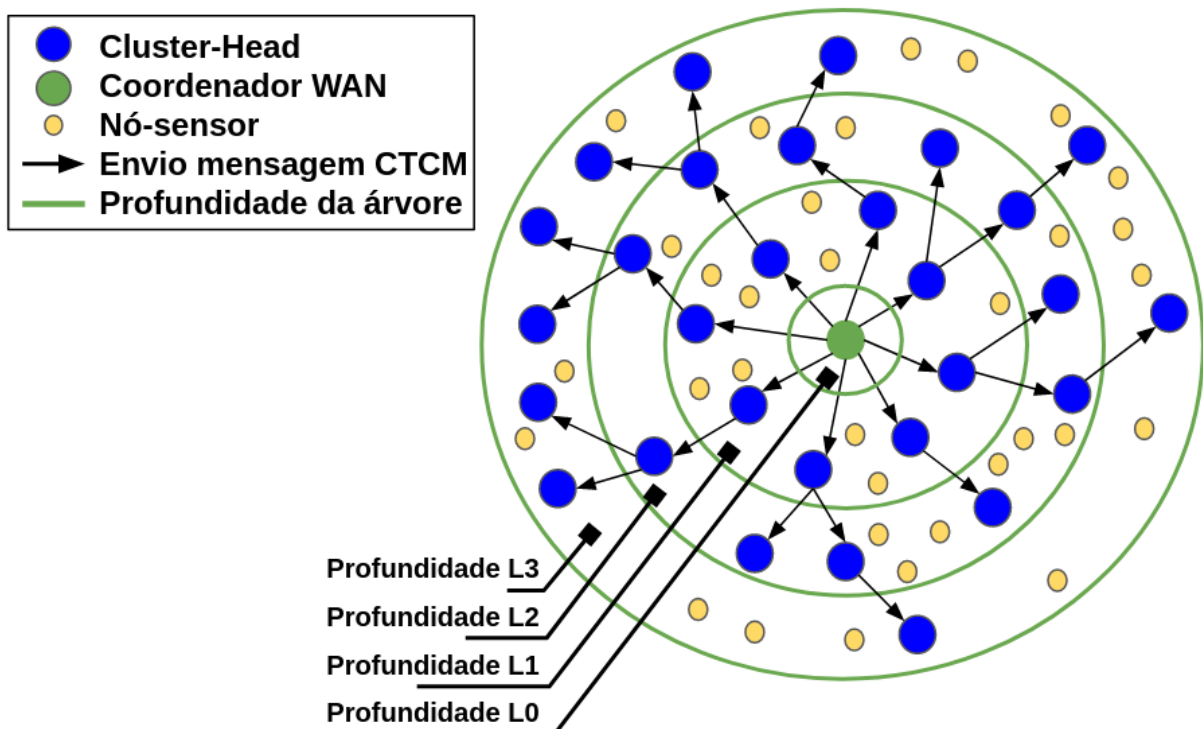


Figura 10 – Inicialização da WAN e associação dos *cluster-heads*.

4.1.2 Formação dos Clusters

A formação de um *cluster* visa associar a um *cluster-head* os dispositivos sensores finais em suas proximidades, tendo este a função de *gateway* responsável por encaminhar todas as mensagens dos integrantes deste *cluster* para o WAN da rede. Para auxiliar nessa formação, também utiliza-se uma mensagem de controle CTCM, contendo o valor *0x01* no campo MID. Um *cluster-head* transmite esta mensagem para dispositivos finais em suas proximidades, anunciando que está preparado para receber pacotes com dados de monitoramento do ambiente (CTDP) e poder encaminhá-las para o coordenador WAN/*gateway* da rede via encaminhamento hierárquico multi-saltos entre *cluster-heads* em níveis superiores na árvore.

Nós finais que receberam este anúncio terão, como destino do tráfego *upstream*, apenas um único endereço, que correspondente ao do *cluster-head* de quem ele recebeu a CTCM MID *0x01*. O *cluster-head* que enviou uma CTCM MID *0x01* terá, como destino de tráfego *downstream*, um ou mais endereços, que correspondem ao dos *end-nodes* de quem ele recebeu uma CTDP, contendo no campo RID, o seu endereço identificador. É possível que um nó final esteja dentro da área de transmissão de mais de um *cluster-head* e, em tal cenário, o nó deve escolher o *cluster-head* com melhor RSSI. A Figura 11 ilustra o processo de formação dos *clusters*, com a associação hierárquica entre *cluster-heads* e dispositivos sensores finais (*end-nodes*).

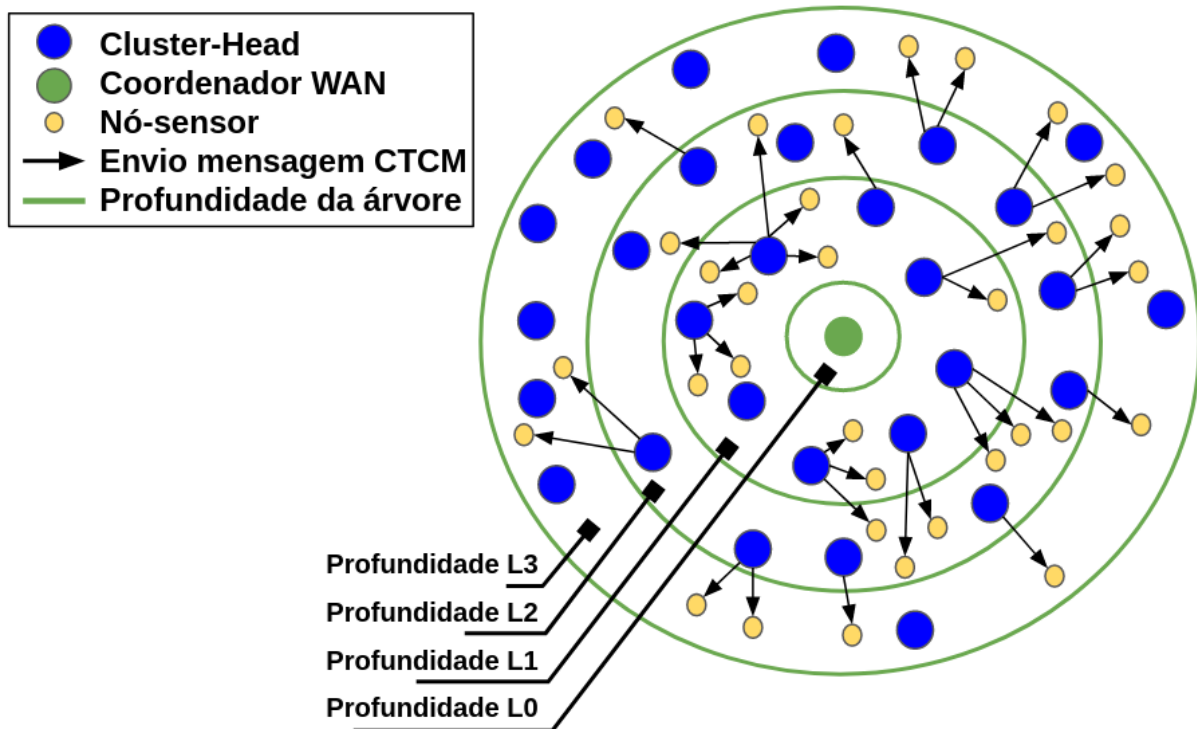


Figura 11 – Formação dos *clusters*.

4.1.3 Escalonamento dos Clusters

A ideia subjacente do mecanismo de sincronização proposto neste trabalho é atribuir períodos de comunicação dos *clusters* durante diferentes janelas de tempo, de modo que menos dispositivos compartilhem o meio em um determinado momento, reduzindo a probabilidade de colisões de pacotes.

O mecanismo de escalonamento de *clusters* proposto é baseado no estágio inicial do algoritmo de ordenação de *bucket sort*, no qual a janela de tempo em que os dispositivos pertencentes a um *clusters* podem transmitir, é baseada no *Least Significant Digit* (LSD) do endereço de rede de seus pais. Um nó final tem um CH como pai e um CH tem outro CH ou o coordenador de WAN como pai. Dois parâmetros essenciais do escalonamento são a duração do período do *cluster* ($nTime$) e o número de grupos de *clusters* na rede ($nClusters$), ambos configurados antes da implantação da rede.

O mecanismo de escalonamento é iniciado quando um dispositivo recebe sua mensagem de descoberta correspondente. O dispositivo salva o dígito menos significativo do endereço de rede do remetente e atribui sua janela de transmissão *Cluster Period Time-Slot* (CP_{TS}) com base na seguinte equação:

$$CP_{TS} = \text{EnderecoDoPai}_{LSD} \bmod nClusters \quad (4.1)$$

A lógica da Equação 4.1 é distribuir os intervalos de tempo CP_{TS} dos períodos de *cluster* dos dispositivos em grupos $nClusters$. Para verificar se um dispositivo pode transmitir, ele verifica se o intervalo de tempo atual CT_{TS} corresponde ao intervalo de tempo do período de *cluster* CP_{TS} ao qual o dispositivo pertence, usando a Equação 4.2.

$$CT_{TS} = ((Time_{ms} \bmod nTime) \bmod nCluster) \quad (4.2)$$

De acordo com a Equação 4.2, se o CT_{TS} corresponder ao CP_{TS} do dispositivo, então o momento atual corresponde à janela de intervalo de tempo de transmissão do período do *cluster* ao qual o dispositivo pertence. Assim, o dispositivo pode transmitir. Caso contrário, o dispositivo deve esperar para transmitir. Além disso, para mitigar colisões *intra-cluster*, um atraso aleatório de até 50% do tempo do *cluster*, foi adicionado às transmissões de cada dispositivo, conforme proposto por (LIAO et al., 2017).

Os parâmetros $nTime$ e $nClusters$ impactam diretamente nas probabilidades de colisão de pacotes e no desempenho da rede. Assim, pode ser finamente otimizado para melhorar métricas de comunicação. No entanto, essa otimização está fora do escopo deste trabalho, que se concentra em demonstrar a viabilidade do uso de mecanismos de escalonamento para redes *cluster-tree* para melhorar as métricas de comunicação sobre abordagens de *cluster-trees* não escalonadas.

Além disso, a sincronização do relógio só ocorre antes da fase de implantação dos dispositivos, embora seja possível realizá-la em tempo de execução da rede utilizando mensagens de controle enviadas a partir do coordenador WAN da rede.

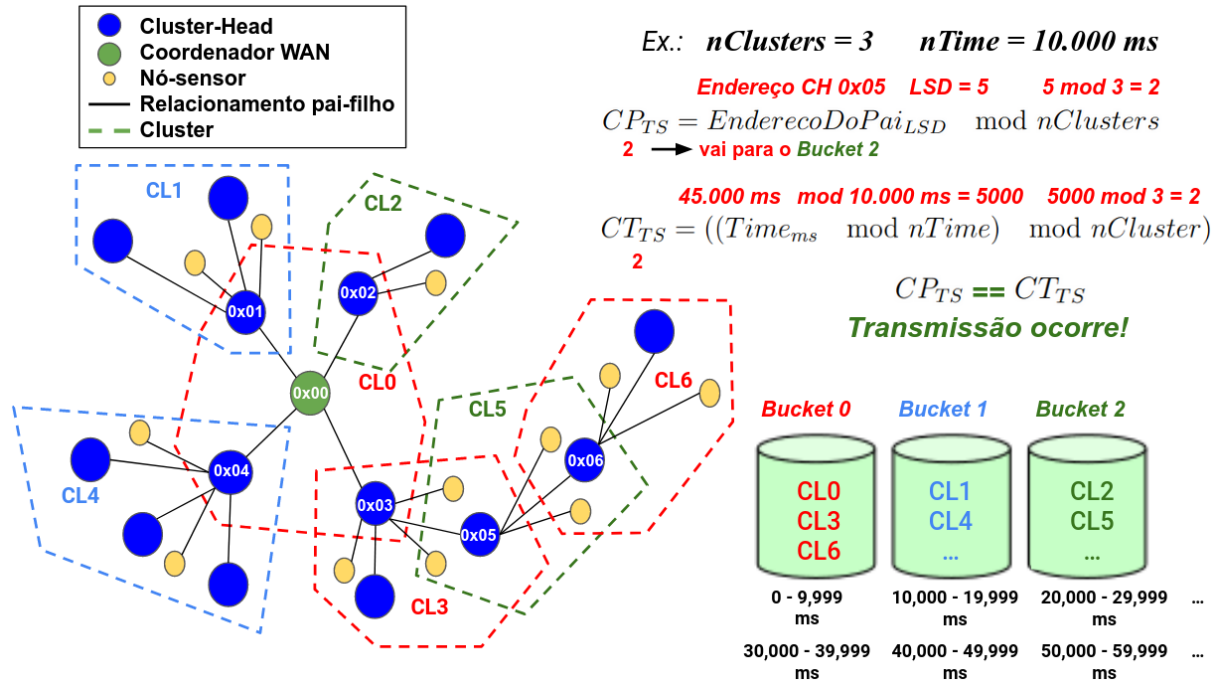


Figura 12 – Escalonamento dos clusters.

A Figura 12 apresenta um exemplo para a atribuição de tempo/período ativo de comunicação para um dispositivo cujo endereço de seu cluster-head pai é 0x05.

4.1.4 Tráfego de Monitoramento

O tráfego de Monitoramento em uma RSSF LoRaWAN é correspondente ao encaminhamento multi-saltos dos dados coletados por sensores dos dispositivos finais, seguindo em direção ao WAN da rede. Para permitir tal comunicação, definiu-se também a mensagem *Cluster-Tree Data Packet* (CTDP), representada na Figura 13, que possui os campos descritos como segue: *Message ID* (MID) 1 byte, *Data Payload* (DPL) 45 a 217 bytes, *Sender ID* (SID) 4 bytes e *Recepient ID* (RID) 4 bytes. O campo MID da mensagem CTDP contém o valor 0x04. O campo DPL contém dados da aplicação. A carga máxima que pode ser enviado em um quadro LoRaWAN varia de 51 bytes a 222 bytes, dependendo das configuração da camada PHY em uso. Como o cabeçalho da mensagem CTDP é de 9 bytes, então o máximo de dados da aplicação varia de 42 bytes a 213 bytes.

Quando um nó possui pacote de dados para transmitir, ele seta o campo MID do cabeçalho CTDP para 0x03, e o campo RID para o endereço de seu pai cluster-head gateway. Quando o cluster-head recebe uma mensagem CTDP, ele verifica o campo RID da mensagem. Se este campo tiver seu endereço identificador na rede, o cluster-head então encaminha o pacote para um dos cluster-heads em um nível acima, ajustando os campos

RID e SID adequadamente. Quando o *cluster-head* acima recebe o pacote, ele realiza a mesma verificação, para saber se pode encaminhar o pacote para o *cluster-head* acima ou não. Se puder, ele substitui o valor do campo SID do cabeçalho CTDP com o seu próprio endereço e transmite o pacote para um dos *cluster-head* em níveis acima. O processo continua até o pacote ser entregue ao WAN raiz da *cluster-tree*.

CTDP Message 9 a 226 bytes			
Message ID 1 byte	Data Payload 45 a 217 bytes	Sender ID 4 bytes	Recipient ID 4 bytes

Figura 13 – Campos da mensagem CTDP.

A Figura 14 ilustra o encaminhamento multi-saltos de dados de monitoramento dos nós sensores via *cluster-heads* até o dispositivo WAN *gateway* da rede.

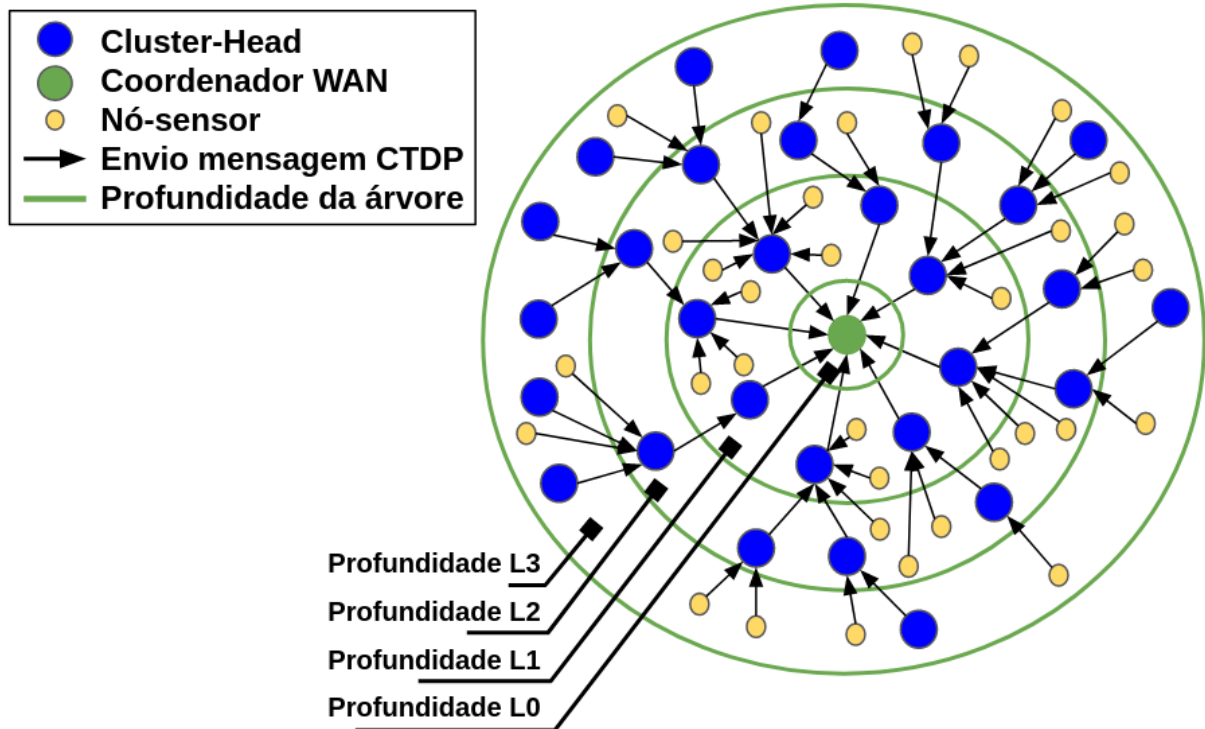


Figura 14 – Encaminhamento do tráfego de monitoramento.

4.2 Etapa 2: Implementação do Mecanismo MAC CSMA/CA

Quanto à implementação do mecanismo de acesso ao meio CSMA/CA para rede LoRa/LoRaWAN, não há um consenso na literatura sobre qual versão seria a mais adequada utilizar. Vários autores trazem para o LoRaWAN o mecanismo CSMA/CA do padrão IEEE 802.11 ou do padrão IEEE 802.15.4, ou até mesmo propõem customizações destas versões com algumas melhorias, como por exemplo, verificar todas as frequências de rádio para transmissão disponíveis antes de realizar um *backoff*.

Neste contexto, [Pham \(2018\)](#) explica que comparado ao CSMA/CA IEEE 802.11, o IEEE 802.15.4 sempre implementa um tempo de espera (*backoff*) antes de qualquer transmissão, aumentando este tempo de recuo cada vez que o canal está ocupado para o mesmo pacote, sem verificar constantemente o canal para verificar se este deixou de estar ocupado. A vantagem disso, ao invés de verificar constantemente o canal e determinar o fim de uma transmissão, é que é um procedimento que consome menos energia, especialmente se a transmissão de um pacote demorar muito, o que depende das taxas de transmissão, sendo estas geralmente 250 Kbps no 802.15.4 e 11 Mbps ou acima no 802.11, além de que a densidade de tráfego numa rede 802.15.4 é menor em comparação à uma rede 802.11.

[Pham \(2018\)](#) também apresenta outro aspecto adicional para que o CSMA do 802.15.4 seja diferente do CSMA do 802.11: este primeiro funciona em uma topologia de malha/*cluster-tree* com baixas potências de transmissão, portanto, o espaço à reutilização é maior, contribuindo novamente para diminuir a densidade do tráfego em qualquer ponto da rede que utiliza esse mecanismo.

Neste trabalho, utilizaremos a versão *unslotted* do CSMA/CA já amplamente validado no conjunto IEEE 802.15.4/ZigBee para RSSF de larga escala e de alta densidade de dispositivos. Entendemos que o mecanismo CSMA/CA baseado padrão 802.11 ([WIFI, 1998](#)) é mais adequado para redes de topologia estrela, onde também não há restrições quanto ao consumo energético.

Com relação aos parâmetros configuráveis do mecanismo CSMA/CA *unslotted* implementado, tem-se os valores 3 e 5 para *macMinBE* e *macMaxBE*, respectivamente. Para *macMaxCSMABackoffs*, o valor atribuído é 3, ou seja, um pacote de dados é descartado se o número de tentativas de enviá-lo (*NB*) for maior que 3. A escolha para a definição dos valores para os parâmetros do mecanismo CSMA/CA adotados foi baseada em [Constante et al. \(2017\)](#). Tais definições, entretanto, estão fora do escopo deste trabalho, pois tratam-se de aspectos avançadas de otimização do mecanismo CSMA/CA.

Para a atribuição do intervalo em milissegundos referente ao procedimento de *backoff* na topologia estrela, utilizou-se 2446 ms, que é o tempo necessário para envio de um *frame* de 51 *bytes*, correspondendo à carga máxima da aplicação que pode ser levada quando os nós estão utilizando a configuração *default* do protocolo LoRaWAN ([LORAWAN, 2015](#)) ($BW = 125$ KHz, $SF = 12$, $CR = 4/5$). Esta configuração de rádio tem por objetivo apresentar um balanceamento entre taxas de transferência, TOA e alcance.

Já para a atribuição do intervalo em milissegundos referente ao procedimento de *backoff* na topologia *cluster-tree*, utilizou-se 13 ms, que corresponde ao ToA da taxa de dados mais rápida do LoRa, $BW = 500$ KHz, $SF = 6$, $CR = 4/5$ – tempo necessário para o envio de um *frame* de 51 *bytes*.

Channel Activity Detection (CAD)

O procedimento *Channel Activity Detection* (CAD) é o mecanismo recomendado disposto por um módulo LoRa para realizar o procedimento CCA do CSMA/CA, visto que avaliações de *Received Signal Strength Indicator* (RSSI), energia RF total que um nó recebe em sua antena, independentemente de ser um sinal LoRa ou não, não são conclusivas porque um módulo LoRa é capaz de demodular as transmissões que ficam abaixo do nível de ruído de RF devido ao seu ganho de processamento inerente (SEMTECHSX1272, 2021).

O CAD é projetado para detectar sinais de preâmbulo LoRa (*chirp*) abaixo do nível de ruído. Este mecanismo é ativado colocando o módulo de rádio em um modo CAD específico no qual ele captura amostras de rádio por cerca de um período de símbolo do canal selecionado. O módulo então as processa e procura uma correlação entre as amostras capturadas e a forma de onda *chirp* ideal para o fator de dispersão (SF) selecionado. A duração total desta operação é de cerca de 2 períodos de símbolo e, durante este tempo, o receptor não é capaz de receber pacotes normalmente. O tempo em milissegundos de um período de símbolo LoRa é dado pela razão $2^{SF}/BW$.

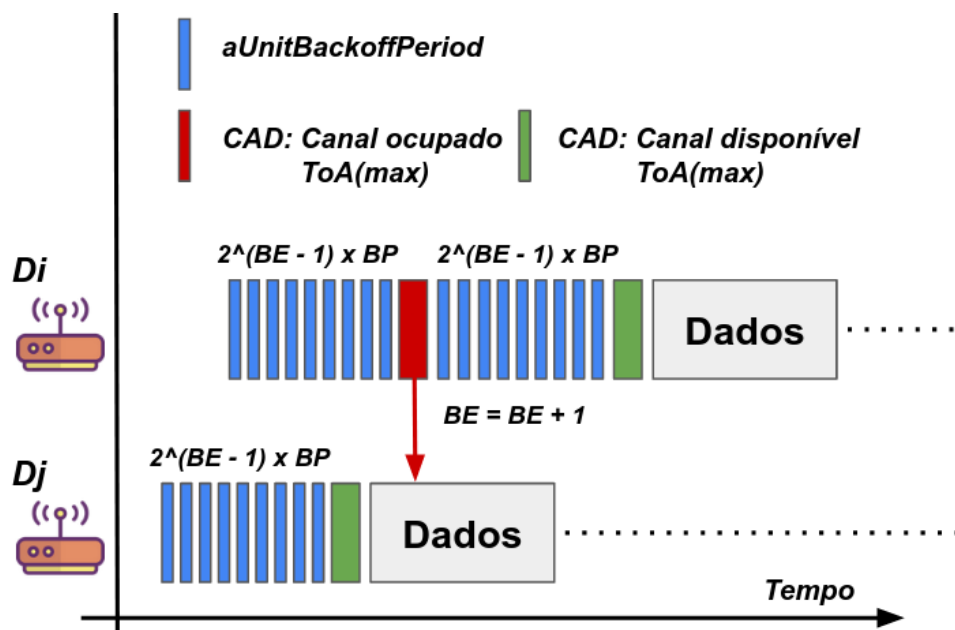


Figura 15 – Linha do tempo do procedimento CAD implementado.

A Figura 15, adaptada de Pham (2018), ilustra a linha do tempo do procedimento CAD implementado dentro do contexto do mecanismo de acesso ao meio CSMA/CA IEEE 802.15.4 *unslotted*. Como proposto em Pham (2018), verificações de disponibilidade de canal igual ao ToA máximo dos pacotes em uma dada configuração de rádio LoRa, aumentam as chances de detecção de canal ocupado, o que diminuem as chances de colisões de pacotes e, conseqüentemente, aumentam suas taxas de entregas.

5 Avaliação de Desempenho

A RSSF *cluster-tree* escalonada e com CSMA/CA proposta foi avaliada por meio de análises de simulações, considerando diferentes métricas, como: taxa de entrega de pacotes, número de colisões e consumo de energia da rede. O objetivo deste estudo através da simulação é analisar o comportamento da rede ao aplicar a topologia *cluster-tree* LoRaWAN escalonada com o mecanismo CSMA/CA implementado, comparando-a com: (i) uma rede estrela de salto único LoRaWAN padrão com ALOHA, (ii) uma rede estrela de salto único LoRaWAN padrão com CSMA/CA, (iii) uma rede *cluster-tree* não escalonada com ALOHA, (iv) uma rede *cluster-tree* não escalonada com CSMA/CA, e (v) com uma rede *cluster-tree* escalonada com ALOHA. Os resultados de desempenho obtidos com a comparação da topologia *cluster-tree* escalonada versus a topologia estrela ALOHA LoRaWAN de um único salto, foram apresentados no artigo “*A Scheduled Cluster-Tree Topology to Enable Wide-Scale LoRaWAN Networks*”, aceito para publicação na *20th IEEE International Conference on Industrial Informatics* (INDIN 2022), de Qualis CAPES A2.

As análises de performance foram executadas no LoRaSim (LORASIM, 2017), um simulador de eventos discretos desenvolvido usando o pacote SimPy (SIMPY, 2007) da linguagem de programação Python (PYTHON, 1991). O LoRaSim implementa um conhecido modelo de propagação de rádio *log-distance path loss* (RAPPAPORT, 1996), que é comumente usado para modelar *deployments* em áreas com construções e densamente povoadas, nas quais aplicações *smart cities* são especialmente encontradas. Em seus experimentos, Bor, Vidler e Roedig (2016) chegaram a um alcance de apenas 100 metros para ambientes com construções, significativamente menor do que outros alcances relatados pela literatura para ambientes afastados de centros urbanos. Entretanto, os autores associam este alcance reduzido a *deployments* indoor e aos *hardwares* e antenas abaixo do ideal, o que representam cenários de pior caso.

O LoRaSim infere a colisão de dois pacotes a partir dos parâmetros *reception overlap*, *carrier frequency*, *spreading factor*, *transmit power*, *timing* (LORASIM, 2017). O simulador considera que pacotes colidiram se apresentarem algum destes parâmetros similares durante a recepção pelo *gateway*. O LoRaSim gera pacotes de dados usando o modelo probabilístico de *Poisson* (THOMPSON, 2001) e simula o LoRaWAN com qualquer configuração de rádio especificada no protocolo. Para este estudo de simulação, a topologia original de salto único LoRaWAN utiliza os valores padrões do protocolo, $BW = 125$ KHz, $SF = 12$, $CR = 4/5$, que visam equilibrar as taxas de transferência, ToA e faixa de transmissão. Usando esta configuração, é possível obter um tamanho máximo de carga de aplicação de 51 *bytes*, com um ToA de 2466 ms e um alcance de transmissão aproximado de 90 metros no *log-distance path loss* mencionado anteriormente.

Por outro lado, as redes com a topologia *cluster-tree* são definidas com a taxa de dados mais rápida do LoRa, $BW = 500$ KHz, $SF = 6$, $CR = 4/5$. Considerando esta configuração de valores de parâmetros de rádio, é possível obter um ToA de 13 ms, o que implica um alcance de transmissão reduzido de aproximadamente 30 metros no *log-distance path loss* adotado. Este alcance de transmissão reduzido não é um problema para cobrir toda a dimensão do ambiente simulado, pois a topologia *cluster-tree* pode formar *clusters* de multi-saltos para expandir sua cobertura.

Para todas as simulações foi definido um ambiente com dimensões de 200 m \times 200 m, variando os cenários de acordo com o número de dispositivos: 20, 40, 60, 80 e 100 (mais 1 coordenador WAN). Para todos os cenários, o coordenador WAN está localizado na posição central (100 m \times 100 m), enquanto outros dispositivos foram distribuídos aleatoriamente pelo ambiente. Além disso, os valores dos parâmetros *nTime* e *nClusters* foram definidos empiricamente para 10.000 e 3, respectivamente. Cada cenário foi simulado 10 vezes, com nível de confiança de 95% e os valores médios das métricas de avaliação foram plotados em gráficos. Tabela 4 sumariza as principais configurações da simulação.

Tabela 4 – Principais parâmetros das simulações.

Descrição	Valor
Área do ambiente	200 m x 200 m
Número de nós sensores	20, 40, 60, 80, 100
Mensagens de monitoramento (por nó)	100
Taxa de mensagens de monitoramento	1 pacote a cada 60 s
Número de simulações (por cenário)	10 execuções
Intervalo de Confiança dos resultados	95%
Modelo de Rádio	Semtech SX1272
Potência de transmissão do rádio	14 dBm

Quanto ao modelo de geração de pacotes de dados da aplicação, foi selecionado um período de 1 minuto, simulando uma aplicação de medição inteligente de água (SEMTECH; APANA, 2021), para a qual LoRaSim gera pacotes de dados usando o modelo probabilístico de *Poisson* (THOMPSON, 2001). Uma simulação é finalizada quando cada dispositivo envia 100 pacotes com dados coletados do ambiente monitorado. O modelo de energia utilizado (BOR et al., 2016) considera o consumo de energia da rede como a soma da energia gasta pelos transceptores de todos os dispositivos durante a transmissão, recepção e varredura do canal, exceto o *gateway* WAN.

Para todas as simulações, o consumo de transmissão é de 34 mA e de 10 mA para recepção. O tempo gasto no modo receptor por um CH em cada período de *cluster* é de 10 segundos. Observa-se que o cálculo *Trx.Prx* em Bor et al. (2016), referente ao consumo de energia das recepções, é medido apenas para as topologias *cluster-tree*, pois

não há procedimentos de varredura ou recepção nos dispositivos finais em uma topologia estrela LoRaWAN. Já para os cenários que utilizam o CSMA/CA, a energia consumida no escaneamento do canal via CAD implementado é de 10 mA , cujo o tempo gasto para este escaneamento é o ToA(max) de aproximadamente 2466 ms para os valores padrões do protocolo, BW = 125 KHz, SF = 12, CR = 4/5; e de aproximadamente 13 ms para a taxa de dados mais rápida do LoRa, BW = 500 KHz, SF = 6, CR = 4/5 (PHAM, 2018).

5.1 Resultados e Discussão

A Figura 16 ilustra a porcentagem de pacotes colididos para os 6 diferentes tipos de redes simuladas. A rede estrela padrão LoRaWAN ALOHA apresentou o maior percentual de colisões de pacotes para todos os cenários, com este valor chegando próximo a 100% no cenário de rede com 100 dispositivos, o que demonstra a sua não escalabilidade, dada a presença de altas taxas de colisões. Isso se deve principalmente ao comportamento do ALOHA, onde não há controle das transmissões, bem como devido ao maior ToA dos pacotes, o que aumenta a probabilidade de colisões. Por sua vez, a rede estrela LoRaWAN com CSMA/CA obteve, em todos os cenários simulados, um menor percentual de colisões em relação à rede que usou ALOHA. Isso se deve à verificação da disponibilidade do canal pelo CSMA/CA antes das transmissões. Portanto, a rede com CSMA/CA mostra-se consideravelmente mais tolerante ao aumento no número de dispositivos da rede.

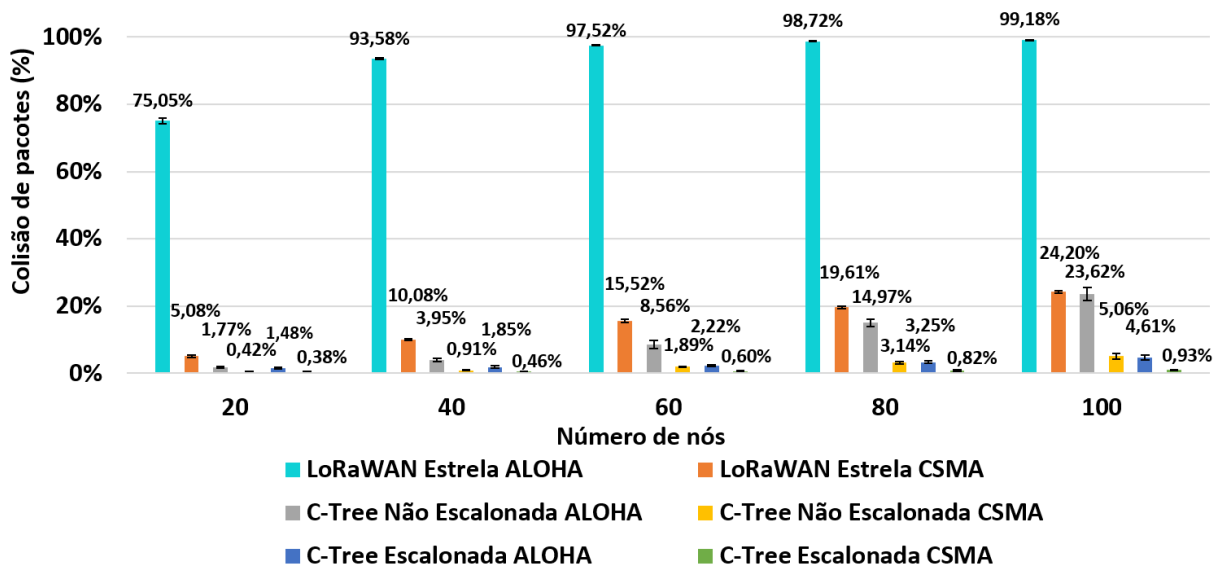


Figura 16 – Porcentagem de colisão de pacotes e o número de nós.

Para as implementações de *Cluster-Tree* (C-Tree) do tipo ALOHA escalonadas e não escalonadas, os resultados apresentam um menor percentual de colisão de pacotes quando comparadas às redes de topologia estrela LoRaWAN, devido ao menor ToA de pacotes em sua configuração de rádio LoRa. A rede *Cluster-Tree* ALOHA escalonada tem

uma menor porcentagem de colisão de pacotes (em comparação com a rede *Cluster-Tree* ALOHA não escalonada em todos os cenários simulados), porque também usa o mecanismo de escalonamento/sincronização para os períodos ativos de comunicação dos *clusters* para diminuir o número de dispositivos transmitindo em uma determinada janela de tempo, bem como por conta do pequeno atraso aleatório adicionado antes das transmissões de cada dispositivo para mitigar as colisões dentro do *cluster*.

Ainda na Figura 16, observa-se, que nos cenários onde houve a utilização do CSMA/CA aliado às redes *Cluster-Tree* escalonadas e não escalonadas, foi possível obter as menores taxas de colisão de pacotes na rede. Dentre elas, destaca-se a rede *Cluster-Tree* escalonada CSMA/CA, que obteve a menor taxa de colisão de pacotes, a qual foi capaz de manter abaixo dos 1% a porcentagem de pacotes colididos em uma rede com 100 dispositivos. Isso se deve a 3 fatores: (i) ao menor ToA para transmissão de pacotes proporcionado pela *Cluster-Tree*, o que reduz a probabilidade de colisão de pacotes, (ii) ao escalonamento/sincronização dos períodos ativos de comunicação dos *clusters*, para diminuir o número de dispositivos transmitindo em uma mesma janela de tempo, e (iii) ao CSMA/CA que verifica a disponibilidade do canal antes das transmissões, para evitar colisão de pacotes.

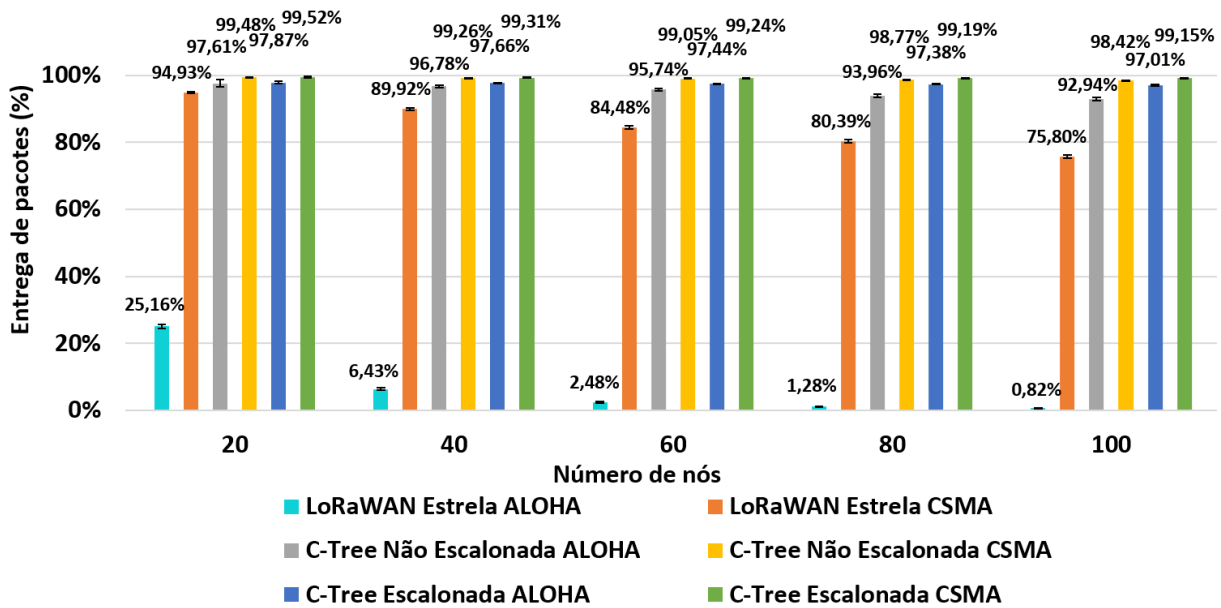


Figura 17 – Porcentagem de entrega de pacotes de dados coletados e o número de nós.

A Figura 17 mostra a porcentagem de recepção de pacotes dos dados do ambiente coletados pelos dispositivos. Como a rede estrela LoRaWAN ALOHA apresenta uma porcentagem maior de colisão de pacotes (como mostrado na Figura 16), muitos de seus pacotes de dados colidiram em toda a rede. As implementações de *Cluster-Tree* ALOHA escalonadas e não escalonadas apresentaram porcentagens semelhantes, recebendo mais de 90% dos pacotes de dados do ambiente em todos os cenários, apesar das implementações com escalonamento apresentarem melhores resultados, com cerca de 4% diferença no

cenário com 100 dispositivos. Já as implementações de rede *Cluster-Tree* CSMA/CA escalonadas e não escalonadas foram as que obtiveram os melhores resultados em todos os cenários, no quais destaca-se a rede *Cluster-Tree* escalonada CSMA/CA, que obteve a maior taxa de entrega de pacotes de dados, a qual foi capaz de manter acima dos 99% a porcentagem de pacotes entregues em uma rede com 100 dispositivos.

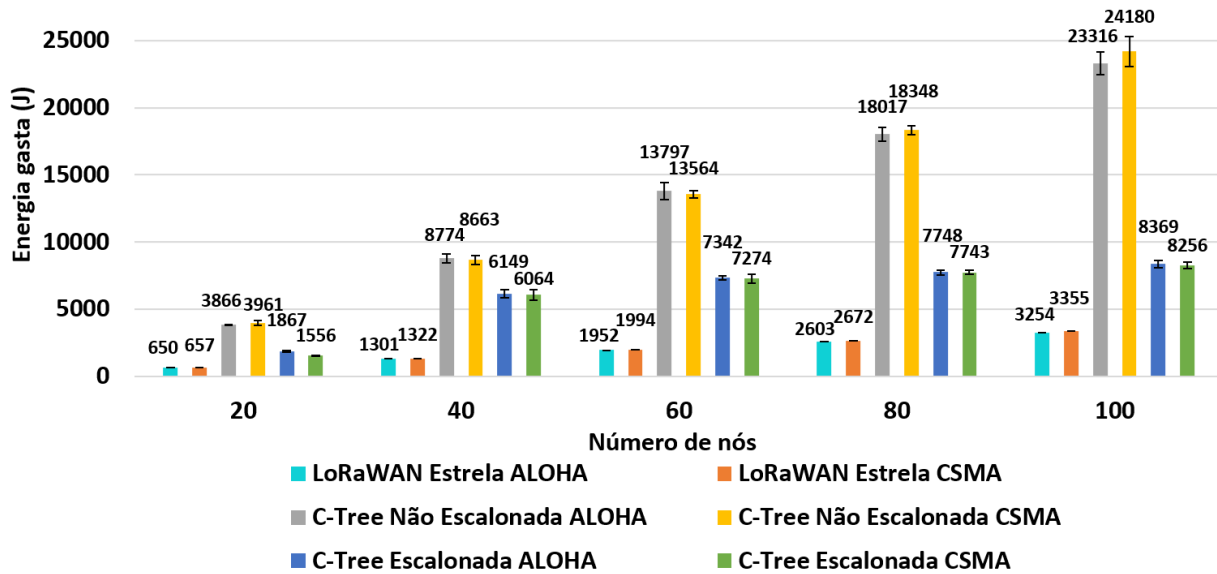


Figura 18 – Energia gasta e o número de nós.

A Figura 18 ilustra o consumo de energia das operações de transmissão e recepção. O LoRaWAN tem o menor consumo de energia, pois não recebe nenhuma mensagem de controle nem recebe ou encaminha dados de dispositivo final ou *cluster-head*. As *Cluster-Trees* não escalonadas apresentam o maior consumo de energia entre eles, devido ao fato dos rádios CHs estarem constantemente ligados, seja recebendo ou transmitindo. Já nas implementações das *Cluster-Trees* escalonadas, os rádios dos CHs ficam no modo receptor apenas durante seu próprio período ativo, economizando energia nos demais momentos enquanto aguardam os próximos períodos ativos de comunicação do *cluster* ao qual pertencem na rede.

Além disso, apesar de redes com ALOHA por si só consumirem apenas energia referente às transmissões, ao contrário do CSMA/CA, que também consome energia durante o escaneamento do canal, verificou-se que, para redes com 100 nós, as redes com CSMA/CA possuem valores similares de energia despendida em comparação ao ALOHA. As redes com CSMA/CA apresentaram recursos de escalabilidade em termos de consumo de energia, visto que o aumento do número de nós implica em um baixo aumento de energia consumida em relação ao ALOHA, além de trazer uma melhor entrega de pacotes e de possuir menores taxas de colisão de pacotes na rede.

5.2 RSSF Cluster-Tree em um ambiente de Larga Escala

Os resultados apresentados na subseção 5.1 tem como objetivo comparar o trabalho proposto com outras abordagens que não utilizam a *cluster-tree* e o mecanismo CSMA/CA implementados (ou implementados individualmente). Por este motivo, o cenário utilizado foi proporcional a todos os mecanismos propostos, visto que a utilização de cenários de maior escala geográfica não seriam justos com relação às abordagens de menor escala (topologia estrela). Para demonstrar de forma mais ilustrativa a formação de uma RSSF *Cluster-Tree* CSMA/CA escalonada e a sua capacidade em cobrir um ambiente de larga escala, simulou-se um ambiente com área de 1 000 000 m² (1.000 m x 1.000 m), em alusão à uma aplicação *smart campus* para a coleta de dados de temperatura ambiental distribuídos em uma área aproximada a do Campus Ministro Petrônio Portella da Universidade Federal do Piauí. Nesta simulação, 500 dispositivos foram distribuídos de maneira aleatória, configurados com os valores padrões de rádio LoRaWAN (BW = 125 KHz, SF = 12, CR = 4/5), o que os permitem ter um alcance de aproximadamente 90 metros em suas transmissões, considerando o *log-distance path loss model* utilizado na seção anterior.

Tabela 5 – Principais parâmetros da simulação.

Descrição	Valor
Área do ambiente	1.000 m x 1.000 m
Número de nós sensores	500
Mensagens de monitoramento (por nó)	10
Taxa de mensagens de monitoramento	1 pacote a cada 60 s
Modelo de Rádio	Semtech SX1272
Potência de transmissão do rádio	14 dBm

A RSSF *Cluster-Tree* CSMA/CA escalonada teve uma porcentagem de entrega de pacotes de 94,2% e uma taxa de colisão de apenas 5,57%. De acordo com as simulações, nota-se que a RSSF *Cluster-Tree* CSMA/CA escalonada foi capaz de monitorar um ambiente de larga escala, mantendo uma taxa de entrega de pacotes que ultrapassa os 90%, ao passo que uma rede estrela LoRaWAN ALOHA não seria possível nem ao menos obter um raio de cobertura acima de 100 metros com a mesma quantidade de dispositivos e entregando o desempenho de comunicação de uma RSSF *Cluster-Tree* CSMA/CA escalonada.

A Figura 19 apresenta o desenho topológico da rede, onde é possível observar que todos os dispositivos presentes no ambiente de larga escala foram capazes de se conectarem com o dispositivo central WAN através do encaminhamento de mensagens por múltiplos saltos via *cluster-heads*. Cada dispositivo enviou 10 pacotes com dados coletados, após a associação com o seu respectivo *cluster-head* pai.

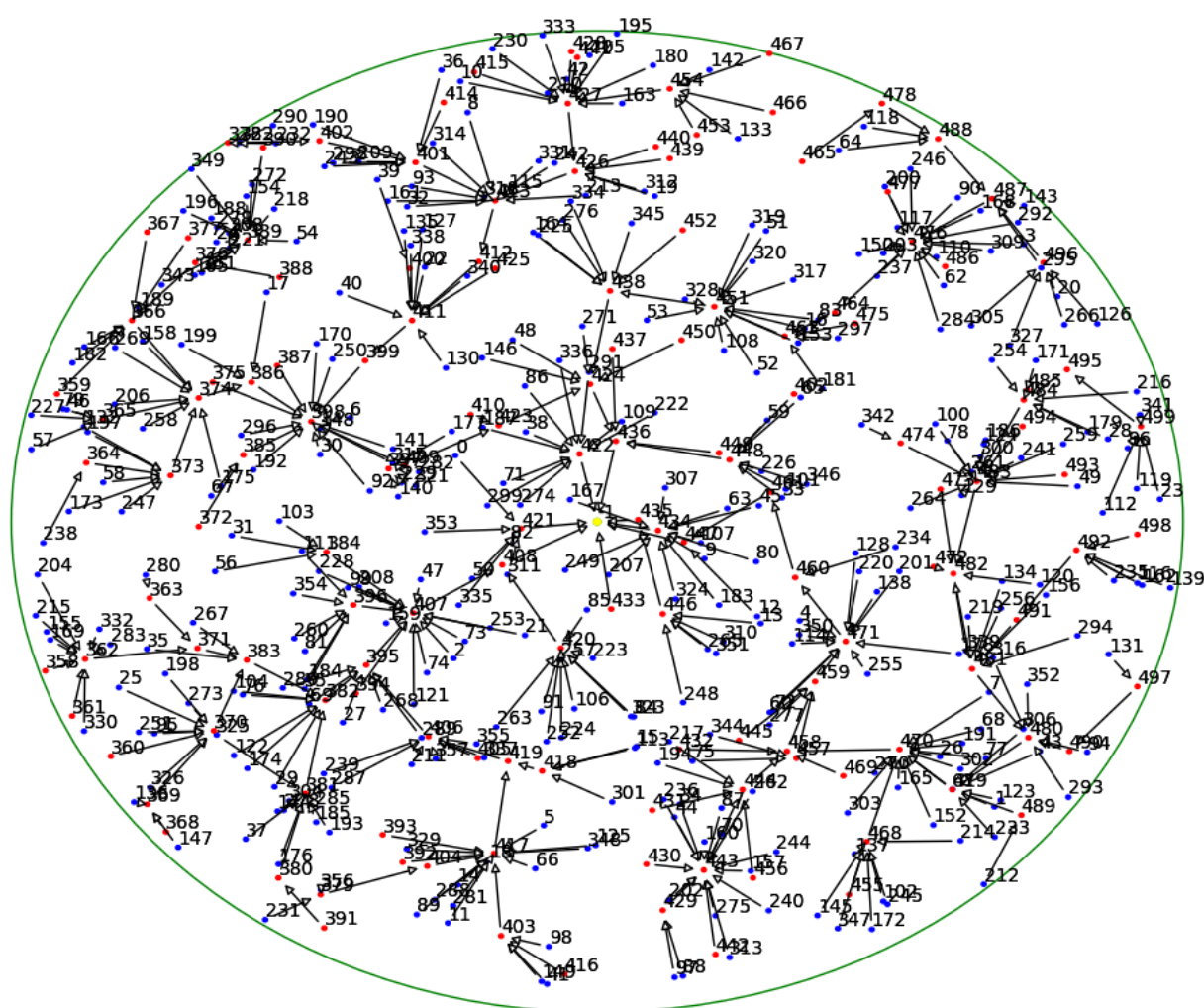


Figura 19 – *Cluster-Tree* em ambiente de larga escala 1.000 x 1.000 metros.

Conclusão e Trabalhos Futuros

Conclusão

Neste trabalho foi implementada uma rede na topologia *cluster-tree* aliada ao mecanismo de acesso ao meio CSMA/CA, que visa estender o uso do protocolo LoRaWAN para aplicações de monitoramento IoT em RSSFs de larga escala.

Esta rede *cluster-tree* multi-saltos substitui a topologia estrela de salto único, escalona os períodos ativos de comunicação dos *clusters* da rede e controla o acesso ao meio a fim de diminuir o número de dispositivos transmitindo em uma mesma janela de tempo. Tais propostas visam o aumento da área de cobertura, a sua escalabilidade, além de melhorar métricas de comunicação e de consumo energético.

Os resultados das simulações demonstram que a topologia de *cluster-tree* CSMA/CA escalonada pode reduzir significativamente as colisões de pacotes para o tráfego de monitoramento *upstream*, devido ao número reduzido de dispositivos que são capazes de transmitir dentro das mesmas janelas de tempo de duração dos períodos de comunicação dos *clusters*, aumentando assim a escalabilidade da rede. Além disso, a topologia *cluster-tree* também foi capaz de cobrir uma ampla área espacial com performance satisfatória, quando comparada à topologia estrela de salto único padrão do protocolo LoRaWAN.

Trabalhos Futuros

Como trabalhos futuros, pretende-se realizar estudos matemáticos para avaliar o percentual de contribuição de cada um dos recursos CSMA/CA, topologia *cluster-tree* e da sincronização de *clusters*, no ganho nas métricas de comunicação da rede. Além disso, pretende-se reduzir o número de pacotes transmitidos na rede, com o uso de algoritmos de compactação e de fusão para os dados gerados pelos nós sensores. Ademais, idealiza-se a criação de uma rede com dispositivos reais implantada na Universidade Federal do Piauí, com a finalidade de validar, em um cenário real, os mecanismos propostos neste trabalho, considerando-se agregar redes IEEE 802.15.4/ZigBee com o LoRaWAN expandido, para a criação de uma rede constelação onde o LoRaWAN dará suporte Long-Range como *backbone* para redes ZigBee.

Referências

- AKYILDIZ, I. et al. Wireless sensor networks: A survey. *Computer Networks*, v. 38, p. 393–422, 03 2002. Citado na página 1.
- ALENEZI, M. et al. Use of unsupervised learning clustering algorithm to reduce collisions and delay within lora system for dense applications. In: *2019 International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob)*. USA: IEEE, 2019. p. 1–5. Citado na página 19.
- AUGUSTIN, A. et al. A study of lora: Long range and low power networks for the internet of things. *Sensors*, v. 16, n. 9, 2016. Citado na página 11.
- BELTRAMELLI, L. et al. Lora beyond ALOHA: an investigation of alternative random access protocols. *CoRR*, abs/2002.10732, 2020. Citado na página 21.
- BLUETOOTH. *Bluetooth Specification*. 1999. <https://standards.ieee.org/standard/802_15_1-2002.html>. Accessed: 2021-08-23. Citado na página 1.
- BOR, M.; VIDLER, J.; ROEDIG, U. Lora for the internet of things. In: *Proceedings of the 2016 International Conference on Embedded Wireless Systems and Networks*. USA: Junction Publishing, 2016. (EWSN '16), p. 361–366. Citado 2 vezes nas páginas 3 e 35.
- BOR, M. C. et al. Do lora low-power wide-area networks scale? In: *Proceedings of the 19th ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems*. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2016. (MSWiM '16), p. 59–67. Citado 6 vezes nas páginas 2, 3, 15, 16, 18 e 36.
- CANDELL, R. et al. Industrial wireless systems guidelines: Practical considerations and deployment life cycle. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, v. 12, n. 4, p. 6–17, 2018. Citado na página 1.
- CENTENARO, M. et al. Long-range communications in unlicensed bands: the rising stars in the iot and smart city scenarios. *IEEE Wireless Communications*, v. 23, n. 5, p. 60–67, 2016. Citado na página 2.
- CONSTANTE, L. et al. Enhanced association mechanism for ieee 802.15.4 networks. In: *2017 22nd IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*. USA: IEEE, 2017. p. 1–8. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 32.
- DJEDOUBOUM, A. C. et al. Big data collection in large-scale wireless sensor networks. *Sensors*, v. 18, n. 12, 2018. Citado na página 2.
- DRATH, R.; HORCH, A. Industrie 4.0: Hit or hype? [industry forum]. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, v. 8, n. 2, p. 56–58, 2014. Citado na página 1.
- EDWARDS, J. Signal processing opens the internet of things to a new world of possibilities: Research leads to new internet of things technologies and applications [special reports]. *IEEE Signal Processing Magazine*, v. 35, n. 5, p. 9–12, 2018. Citado na página 1.

EL-AASSER, M. et al. Examining carrier sense multiple access to enhance lora iot network performance for smart city applications. In: *2019 IEEE 9th International Conference on Consumer Electronics (ICCE-Berlin)*. USA: IEEE, 2019. p. 168–173. Citado na página 21.

FAROOQ, M. O. Clustering-based layering approach for uplink multi-hop communication in lora networks. *IEEE Networking Letters*, v. 2, n. 3, p. 132–135, 2020. Citado 3 vezes nas páginas 3, 20 e 26.

FAROOQ, M. O.; PESCH, D. Analyzing lora: A use case perspective. In: *2018 IEEE 4th World Forum on Internet of Things (WF-IoT)*. USA: IEEE, 2018. p. 355–360. Citado 4 vezes nas páginas 2, 15, 16 e 18.

FAROOQ, M. O.; PESCH, D. A search into a suitable channel access control protocol for lora-based networks. In: *2018 IEEE 43rd Conference on Local Computer Networks (LCN)*. USA: IEEE, 2018. p. 283–286. Citado 6 vezes nas páginas 2, 3, 15, 16, 18 e 22.

GLUHAK, A. et al. A survey on facilities for experimental internet of things research. *IEEE Communications Magazine*, v. 49, n. 11, p. 58–67, 2011. Citado na página 1.

HAXHIBEQIRI, J. et al. A survey of lorawan for iot: From technology to application. *Sensors*, v. 18, p. 3995, 11 2018. Citado na página 2.

IEEE. *IEEE 802.15.4 Specification*. 2003. <https://standards.ieee.org/standard/802_15_4-2020.html>. Accessed: 2021-08-23. Citado 3 vezes nas páginas 1, 3 e 17.

JESUS, G. G. M. de et al. LoRaWAN adaptive data rate with flexible link margin. *IEEE Internet of Things Journal*, v. 8, n. 7, p. 6053–6061, 2021. Citado na página 8.

JURCIK, P. et al. Dimensioning and worst-case analysis of cluster-tree sensor networks. *ACM Trans. Sen. Netw.*, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, v. 7, n. 2, sep 2010. Citado na página 4.

KOUVELAS, N.; RAO, V. S.; PRASAD, R. V. Employing p-csma on a lora network simulator. *CoRR*, abs/1805.12263, 2018. Citado na página 21.

LEAO, E. et al. Superframe duration allocation schemes to improve the throughput of cluster-tree wireless sensor networks. *Sensors*, v. 17, n. 2, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 12 e 17.

LEE, H.-C.; KE, K.-H. Monitoring of large-area iot sensors using a lora wireless mesh network system: Design and evaluation. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v. 67, n. 9, p. 2177–2187, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 20.

LI, C. et al. A survey on routing protocols for large-scale wireless sensor networks. *Sensors*, v. 11, n. 4, p. 3498–3526, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 4 e 12.

LIAO, C.-H. et al. Multi-hop lora networks enabled by concurrent transmission. *IEEE Access*, v. 5, p. 21430–21446, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 29.

LINO, M. et al. Dynamic reconfiguration of cluster-tree wireless sensor networks to handle communication overloads in disaster-related situations. *Sensors*, v. 20, n. 17, 2020. Citado na página 17.

- LORA. *LoRa Specification*. 2009. <<https://www.lora-alliance.org/what-is-lora/technology>>. Accessed: 2021-08-23. Citado na página 1.
- LORA-ALLIANCE. *LoRa Alliance*. 2015. <<https://lora-alliance.org/>>. Accessed: 2021-08-23. Citado 3 vezes nas páginas 2, 3 e 9.
- LORASIM. *LoRaSim*. 2017. <<https://www.lancaster.ac.uk/scc/sites/lora/lorasim.html>>. Accessed: 2021-08-23. Citado na página 35.
- LORAWAN. *LoRaWAN Specification*. 2015. <<https://lora-alliance.org/about-lorawan/>>. Accessed: 2021-08-23. Citado 3 vezes nas páginas 2, 3 e 32.
- MONTECARLO. *MonteCarlo*. 2020. <<https://www.ibm.com/cloud/learn/monte-carlo-simulation>>. Accessed: 2021-08-23. Citado na página 21.
- PHAM, C. Investigating and experimenting csma channel access mechanisms for lora iot networks. In: *2018 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*. USA: IEEE, 2018. p. 1–6. Citado 6 vezes nas páginas 8, 15, 21, 32, 33 e 37.
- PYTHON. *Python*. 1991. <<https://www.python.org/>>. Accessed: 2021-08-23. Citado na página 35.
- RAPPAPORT, T. *Wireless communications: Principles and practice*. USA: Prentice Hall, 1996. ISBN 0133755363. Citado na página 35.
- RASHID BUSHRA E REHMANI, M. H. Applications of wireless sensor networks for urban areas. *J. Netw. Comput. Appl.*, Academic Press Ltd., London, UK, UK, v. 60, n. C, p. 192–219, jan. 2016. Citado na página 1.
- SARTORI, B. et al. Enabling rpl multihop communications based on lora. In: *2017 IEEE 13th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob)*. USA: IEEE, 2017. p. 1–8. Citado na página 20.
- SEMTECH; APANA. *LoRa Technology: Eliminating Water Waste and Leakage*. 2021. <<https://www.semtech.com/uploads/technology/LoRa/app-briefs/Semtech-UseCase-Apana-FINAL-web.pdf>>. Accessed: 2022-05-10. Citado na página 36.
- SEMTECHLORAWAN. *SemtechLoRaWAN*. 2021. <<https://lora-developers.semtech.com/documentation/tech-papers-and-guides/lora-and-lorawan/>>. Accessed: 2021-08-23. Citado 3 vezes nas páginas 7, 8 e 9.
- SEMTECHSX1272. *SemtechSX1272*. 2021. <<https://www.semtech.com/products/wireless-rf/lora-core/sx1272>>. Accessed: 2021-08-23. Citado na página 33.
- SEVEGNANI, M. et al. Modelling and verification of large-scale sensor network infrastructures. In: *2018 23rd International Conference on Engineering of Complex Computer Systems (ICECCS)*. USA: IEEE, 2018. p. 71–81. Citado na página 2.
- SIGFOX. *Sigfox Specification*. 2010. <<https://www.sigfox.com/>>. Accessed: 2021-08-23. Citado na página 1.
- SIMPY. *SimPy*. 2007. <<https://www.sympy.org/en/index.html>>. Accessed: 2021-08-23. Citado na página 35.

STANKOVIC, J. A.; WOOD, A. D.; HE, T. Realistic Applications for Wireless Sensor Networks. *Theoretical Aspects of Distributed Computing in Sensor Networks*, n. Chapter 25, p. 835–863, 2011. Citado na página 1.

THOMPSON, W. Poisson distributions. *Computing in Science Engineering*, v. 3, n. 3, p. 78–82, 2001. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 36.

TO, T.-H.; DUDA, A. Simulation of lora in ns-3: Improving lora performance with csma. In: *2018 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. USA: IEEE, 2018. p. 1–7. Citado na página 21.

WIFI. *Wifi Specification*. 1998. <https://standards.ieee.org/standard/802_11-2016.html>. Accessed: 2021-08-23. Citado 2 vezes nas páginas 1 e 32.

ZHU, G. et al. Improving the capacity of a mesh lora network by spreading-factor-based network clustering. *IEEE Access*, v. 7, p. 21584–21596, 2019. Citado na página 20.

ZIGBEE. *ZigBee Specification*. 2012. <<https://zigbeealliance.org/solution/zigbee/>>. Accessed: 2021-08-23. Citado 2 vezes nas páginas 1 e 17.