

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**  
**"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"**  
**CAMPUS DE SÃO JOÃO DA BOA VISTA**

**WELERSON SANTOS SOUZA**

**ESTUDO DA COMUNICAÇÃO ENTRE MÁQUINAS EM CENÁRIOS DE BAIXA  
LATÊNCIA E ALTA CONFIABILIDADE**

**SÃO JOÃO DA BOA VISTA**

**2019**

**Welerson Santos Souza**

**ESTUDO DA COMUNICAÇÃO ENTRE MÁQUINAS EM CENÁRIOS DE BAIXA  
LATÊNCIA E ALTA CONFIABILIDADE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia de Telecomunicações do Campus de São João da Boa Vista, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma do título de Bacharel em Engenharia de Telecomunicações.

Orientador: Prof<sup>o</sup> Dr. Edgar Eduardo Benitez  
Olivo

SÃO JOÃO DA BOA VISTA  
2019

Souza, Welerson Santos

Estudo da comunicação entre máquinas em cenários de baixa latência e alta confiabilidade / Welerson Santos Souza. -- São João da Boa Vista, 2019.

43 p. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso – Câmpus Experimental de São João da Boa Vista – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”.

Orientador: Prof. Dr. Edgar Eduardo Benitez Olivo

Bibliografia

1. Internet 2. Sistemas de comunicação sem fio 3. Telecomunicações

CDD 23. ed. – 621.382

Ficha catalográfica elaborada pela [Biblioteca-BJB](#)

Bibliotecário responsável: João Pedro Alves Cardoso – CRB-8/9717

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**  
**“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”**  
**CÂMPUS EXPERIMENTAL DE SÃO JOÃO DA BOA VISTA**  
**GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE TELECOMUNICAÇÕES**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**ESTUDO DA COMUNICAÇÃO ENTRE MÁQUINAS EM CENÁRIOS DE BAIXA  
LATÊNCIA E ALTA CONFIABILIDADE**

Aluno: Welerson Santos Souza

Orientador: Prof. Dr. Edgar Eduardo Benitez Olivo

Banca Examinadora:

- Edgar Eduardo Benitez Olivo (Orientador)
- Ivan Aritz Aldaya Garde (Examinador)
- Rafael Abrantes Penchel (Examinador)

A ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no prontuário do aluno (Expediente nº 33/2018)

São João da Boa Vista, 24 de janeiro de 2019

Dedico este trabalho à minha irmã Giovanna, ao meu pai Emerson e à minha mãe Dacia.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais por sempre me apoiarem e não medirem esforços emocionais e financeiros para que eu possa alcançar meus objetivos, por compreenderem a distância e me encorajarem a enfrentar todos os desafios.

À minha irmã por ser a melhor parte de todos os aspectos da minha vida, por ser a pessoa que mais acredita em mim e que me fortalece diariamente. Por ser alguém que me trata como um espelho e principalmente, por ser o motivo de eu estar aqui.

Ao meu orientador de Iniciação Científica, Prof. Dr. Carlos Hércules Moraes de Lima por ter me guiado em toda a base necessária para a realização deste trabalho e por me propor novos desafios ao longo da graduação.

Ao orientador do presente trabalho, Prof. Dr. Edgar Eduardo Benitez Olivo, pelo empenho dedicado à elaboração deste trabalho e por me guiar na fase final da graduação.

Ao CNPQ e à FAPESP, pelas bolsas de iniciação científica oferecidas durante os anos da graduação. O fomento financeiro oferecido foi de suma importância para minha permanência na Universidade e por fim, desenvolvimento desse trabalho.

À servidora Mirian Paula dos Santos, por todo o apoio técnico fornecido ao longo da graduação e além disso, por sempre me apoiar, acreditar no meu potencial e acompanhar cada vitória conquistada durante os anos da graduação.

Ao bibliotecário João por todo apoio na Biblioteca Unesp São João da Boa Vista.

Aos meus amigos, por me apoiarem tanto em todos esses anos e estarem comigo nos momentos mais difíceis, sendo meu alicerce para continuar sempre. Por estarem comigo também em todas as vitórias e serem uma grande motivação para tudo que faço, sem eles eu não teria conseguido chegar até aqui. Agradeço em especial à Larissa Roberta, Letícia Fidanza, Letícia Vilela, Melissa Oliveira e Jéssica Oliveira, por serem responsáveis por grande parte da pessoa que sou e por me estimularem a ser o melhor de mim diariamente.

Aos docentes por me proporcionarem o conhecimento racional e participarem efetivamente do meu processo de formação profissional.

*“Cada sonho que você deixa para trás, é um pedaço do seu futuro que deixa de existir.”*  
*(Steve Jobs)*

## RESUMO

O advento da Internet das Coisas e o avanço das tecnologias de comunicação trarão um novo cenário para o que temos na sociedade atualmente. Prevê-se que cerca de 50 bilhões de dispositivos se comunicarão utilizando comunicação entre máquinas. Este tipo de comunicação depende criticamente da disponibilidade ininterrupta dos enlaces de rádio, mesmo que com qualidade mínima de comunicação. Assim, os novos sistemas operarão em regime de Comunicação de Baixa Latência Ultra Confiável (URLLC, *Ultra-Reliable and Low-Latency Communication*). Aplicações baseadas em URLLC incluem, por exemplo, automação industrial, proteção de smart grids e comunicação entre veículos. Essas aplicações emergentes transmitem informação crítica por pacotes curtos e exigem latência baixa e confiabilidade muito elevada. Neste trabalho, simulações computacionais utilizando o método de Monte Carlo são empregadas para obter as figuras de desempenho com relação à latência e eficiência energética do sistema. Nos cenários em estudo, o canal rádio-móvel incorpora efeitos degradantes do desvanecimento de grande escala, mais especificamente, perda de percurso e sombreamento. O sistema opera baseado em estratégias de acesso múltiplo com sensoriamento de portadora, utilizando dois mecanismos de *backoff*, um convencional e um que designa prioridades aos nós da rede a fim de diminuir a latência das transmissões. Além dos mecanismos de *backoff*, duas estratégias de clusterização de nós são utilizadas para aumentar a eficiência energética da rede. Os resultados numéricos mostram que a implementação do mecanismo de *backoff* com prioridade combinado à estratégia de clusterização *K-Means* diminui a latência e aumenta a eficiência energética das redes em estudo, garantindo assim a operação da rede em regime URLLC, propícia para a comunicação entre máquinas.

**PALAVRAS-CHAVE:** Comunicação de Baixa Latência e Ultra Confiável. Comunicação entre Máquinas. Eficiência Energética. Internet das Coisas.



## ABSTRACT

The advent of the Internet of Things and the advancement of communication technologies will bring a new scenario to what we have in society today. About 50 billion devices are expected to communicate by using machine type communication. This type of communication critically depends on the uninterrupted availability of radio links, even with a minimal communication quality. Thus, the new systems will operate under Ultra-Reliable and Low-Latency Communication (URLLC). URLLC-based applications include, for example, industrial automation, protection of smart grids, and vehicle-to-vehicle communications. These emerging applications convey critical information using short packets and require low latency and very high reliability. In this work, computational simulations using the Monte Carlo method are employed to obtain the performance figures regarding latency and energy efficiency of the system. In the scenarios under study, the radio-mobile channel incorporates degrading effects of large-scale fading, more specifically, path loss and shadowing. The system operates based on carrier sense multiple access strategies, using two backoff mechanisms, the conventional one and one that assigns priorities to the nodes of the network in order to decrease the latency of transmissions. In addition to the backoff mechanisms, two node clustering strategies are used to increase the energy efficiency of the network. The numerical results show that the implementation of the priority-based backoff mechanism in conjunction with the K-Means clustering strategy decreases the latency and increases the energy efficiency of the networks under study, thus guaranteeing the operation of the network in URLLC regime, suitable for machine type communications.

**KEYWORDS:** Energy efficiency. Internet of Things. M2M. Ultra-Reliable and Low-Latency Communication.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Estimativa de Monte Carlo para o valor de $\pi$ . . . . .	21
Figura 2	Estimativa de Monte Carlo para o histograma do lançamento de uma moeda. . .	22
Figura 3	Modelo de sistema básico de comunicação. . . . .	24
Figura 4	Efeito da perda de percurso na potência do sinal recebido. . . . .	26
Figura 5	Efeito do sombreamento combinado à perda de percurso na potência do sinal recebido. . . . .	27
Figura 6	Efeito Gaussiano do sombreamento. . . . .	27
Figura 7	Função distribuição acumulada do sombreamento. . . . .	28
Figura 8	Procedimento para o ALOHA puro. . . . .	29
Figura 9	Hierarquia de redes de comunicação entre máquinas com $n$ <i>clusters</i> . . . . .	31
Figura 10	Técnicas de clusterização. . . . .	32
Figura 11	Estratégias aplicadas na área de implantação da rede. . . . .	33
Figura 12	CDF da latência fim a fim dos cenários simulados. . . . .	37
Figura 13	CDF das potências recebidas pelos <i>cluster heads</i> dos cenários simulados. . . .	38
Figura 14	CDF da latência fim a fim do cenário simulado para diferentes números de <i>clusters</i> . .	39
Figura 15	CDF potências recebidas pelos <i>cluster heads</i> do cenário simulado para diferentes números de <i>clusters</i> . . . . .	40

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Expoentes de perda de percurso para diversos ambientes. . . . .	25
Tabela 2 – Parâmetros utilizados nas simulações. . . . .	36

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

5G	Fifth Generation
5GrEEEn	Toward Green 5G Mobile Networks
CDF	Cumulative Distribution Function
CSMA	Carrier Sense Multiple Access
DARPA	Defense Advanced Research Projects Agency
EXI	Efficient XML Interchange
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IoT	Internet of Things
IP	Internet Protocol
ISM	Industrial, Scientific and Medical
LANs	Local Area Networks
LoRaWan	Long Range Wide Area Network
LTE	Long Term Evolution
M2M	Machine-to-Machine
METIS	Mobile and wireless communications Enablers for the Twenty-twenty Information Society
MTC	Machine Type Communication
NFC	Near Field Communication
OWL	Web Ontology Language
RDF	Resource Description Framework
RFID	Radio-Frequency Identification
RPL	Routing Protocol for Low Power and Lossy Networks
SINR	Signal-to-interference-plus-Noise Ratio
URLLC	Ultra-Reliable and Low-Latency Communication
WSNs	Wireless Sensor Networks

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\Pr(A)$	Probabilidade de ocorrência do evento A
$N_A$	Número de ocorrências do evento A em um dado experimento
$N$	Número de realizações de um dado experimento
$\hat{\pi}$	Estimativa do valor de $\pi$
$N_{setor}$	Número de experimentos dentro do setor circular
$N_{caixa}$	Número total de experimentos
$p_{rx}$	Potência recebida pelo receptor
$p_{tx}$	Potência transmitida por um nó de interesse
$d$	Distância entre o nó transmissor e o nó receptor
$\alpha$	Expoente de perda de percurso
$p_{rx,dBm}$	Potência recebida pelo receptor em dBm
$p_{tx,dBm}$	Potência transmitida por um nó de interesse em dBm
$x_\sigma$	Variável aleatória com distribuição gaussiana com média 0 e desvio padrão $\sigma$
$\sigma$	Desvio padrão do sombreamento
$\Delta$	Tempo de <i>backoff</i>
$i$	Número da tentativa de transmissão do pacote
$x$	Número aleatório entre 0 e 1 utilizado para o cálculo do tempo de <i>backoff</i>
$\delta$	Intervalo de tempo de <i>backoff</i>
$\Delta'$	Tempo de <i>backoff</i> calculado designando prioridade aos nós
$fp$	Fator de prioridade atribuído ao nó

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>13</b>
1.1	Conceitos básicos	14
<b>1.1.1</b>	<b><i>Internet of Things</i> - IoT</b>	<b>14</b>
<b>1.1.2</b>	<b><i>Massive Machine Type Communications</i> - mMTC</b>	<b>19</b>
<b>1.1.3</b>	<b><i>Ultra-Reliable and Low-Latency Communication</i> - URLLC</b>	<b>19</b>
<b>1.1.4</b>	<b>Redes <i>Ad Hoc</i></b>	<b>20</b>
<b>1.1.5</b>	<b>O método de Monte Carlo</b>	<b>20</b>
1.2	Trabalhos Relacionados	21
1.3	Contribuições	23
<b>2</b>	<b>MODELO DO SISTEMA</b>	<b>24</b>
2.1	Efeitos de grande escala do canal sem fio	24
<b>2.1.1</b>	<b>Perda de percurso</b>	<b>25</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Sombreamento</b>	<b>26</b>
2.2	Técnicas de Acesso Múltiplo	28
<b>2.2.1</b>	<b>ALOHA</b>	<b>28</b>
<b>2.2.2</b>	<b>CSMA</b>	<b>29</b>
2.2.2.1	Técnicas de <i>backoff</i>	30
2.3	Hierarquia de redes M2M	30
<b>2.3.1</b>	<b>Técnicas de Clusterização</b>	<b>31</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO</b>	<b>33</b>
3.1	Simulações Numéricas	33
3.2	Métricas de Desempenho	34
<b>3.2.1</b>	<b>Latência</b>	<b>34</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Eficiência Energética</b>	<b>35</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS NUMÉRICOS E DISCUSSÃO</b>	<b>36</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>41</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>42</b>

## 1 INTRODUÇÃO

As comunicações entre máquinas (M2M, *Machine-to-Machine*) estão cada vez mais presentes em nosso cotidiano e serviços essenciais como transações bancárias, educação, saúde e entretenimento tornam-se cada vez mais “móveis”. Além de aplicações essenciais como as descritas, a internet das coisas (IoT, *Internet of Things*) e a comunicação entre máquinas terão aplicações em dispositivos domésticos, sistemas de estacionamento, transporte público, segurança pública e sistemas industriais. Com o grande aumento do número de dispositivos conectados, a rede de comunicação móvel precisa passar por grandes mudanças [1].

É previsto que 50 bilhões de dispositivos estejam conectados em 2020, um número que é dez vezes maior que em 2010 [2]. Além disso, mais da metade da população estará sob a cobertura de sistemas móveis de quarta geração usando o padrão LTE (*Long Term Evolution*). Nessas condições, será necessário um aumento na capacidade de tráfego de até mil vezes com relação à capacidade atual.

Existem alguns projetos que estudam maneiras de atingir as necessidades futuras, um deles é o Projeto METIS (*Mobile and wireless communications Enablers for the Twenty-twenty Information Society*) que visa estabelecer “um consenso global com liderança europeia sobre questões fundamentais ligadas ao desenvolvimento dos futuros sistemas de comunicação móvel, e assim pavimentar o caminho para uma futura padronização” [3]. Outro projeto focado nisso é o 5GrEEen (*Toward Green 5G Mobile Networks*) que, por sua vez, tem como base “Redes Verdes (em inglês, *Green Networks*), uma solução limpa para as redes móveis futuras em uma sociedade conectada” [1]. Por meio desses projetos, as redes de Quinta Geração (5G, *Fifth Generation*) foram identificadas como capazes de habilitar a visão de uma Sociedade Conectada (em inglês, *Networked Society*) [4], onde todas as pessoas e todos dispositivos estão conectados e recebem informação a qualquer momento.

A ideia de ter uma Sociedade Conectada é muito útil, porém, para que se torne realidade, é imposto um desafio técnico muito grande. O grande desafio para termos uma vida onde tudo que usamos, desde eletrodomésticos até os nossos carros, esteja conectado é que isso requer uma capacidade de tráfego muito superior aos níveis atuais. Para obter esses resultados, plataformas de comunicação têm sido sugeridas e, além disso, diversos fatores limitadores foram identificados. Dentre essas plataformas, podem ser citados os sistemas baseados na tecnologia IEEE 802.11ah (padrão WiFi com baixo consumo), redes com baixo consumo de energia em espectro não licenciado, e comunicação entre máquinas em redes celulares. Dos exemplos citados, o mais atrativo é utilizar as redes celulares por já permitirem muitos dispositivos conectados e ter ampla cobertura. Um desafio ao se usar redes celulares é viabilizar a coexistência de sistemas de comunicação sem fio orientados a humanos e orientados a máquinas [5].

No cenário atual, os sistemas são na sua maior parte orientados a humanos e projetados para assegurar boa conectividade na maior parte do tempo, porém, em locais com pouca cobertura, alta interferência ou sobrecarga, a taxa de transferência pode ser quase nula. Já sistemas orientados a máquinas priorizam a confiabilidade e continuidade da comunicação, geralmente em taxas de transmissão moderadas.

Esses sistemas orientados a máquinas devem ser projetados para operar em regime de Comunicação de Baixa Latência e Ultra Confiável (URLLC, *Ultra-Reliable and Low-Latency Communication*). Dado que os sistemas de comunicação celulares atuais são orientados a humanos, os pacotes de informação são divididos em uma grande parte de dados úteis (em inglês, *payload*) e uma pequena parte de informações de controle (em inglês, *metadata*) [6]. Já a comunicação do tipo máquina (MTC, *Machine Type Communication*) tem pacotes curtos, nos quais o tamanho do *payload* e de *metadata* são equivalentes. Além disso, as aplicações que transmitem pacotes curtos geralmente carregam informações críticas que exigem latência baixa e confiabilidade muito alta, algo que os sistemas atuais não oferecem na maior parte do tempo. Por latência entende-se o intervalo de tempo requerido para transmitir um pacote desde a fonte até um dado destino, passando por possíveis nós intermediários (ou seja, o intervalo de tempo fim-a-fim de transmissão).

Um grande número de dispositivos ativos em um mesmo local aumenta o tempo de latência, pois todos esses dispositivos estão tentando transmitir simultaneamente, o que acarretará em colisões e períodos de contenção longos para acessar o canal. Para contornar este problema, o algoritmo de tempo de recuo (ou *backoff*) contempla intervalos de tempo de espera aleatórios entre os usuários de uma rede antes de começar a transmissão dos pacotes, com o objetivo de diminuir essas colisões. Os dispositivos que tentam transmitir um pacote recebem um tempo de espera ou recuo, que consiste de um número aleatório de intervalos de tempo (ou *time slots*), de acordo com a regra de tempo de *backoff* exponencial binário, devendo aguardar esse tempo para tentar transmitir novamente. No caso de colisão recorrente, os dispositivos recebem um novo tempo de *backoff* e assim sucessivamente até que o pacote seja transmitido ou se exceda o número de tentativas máximo, quando então o pacote é considerado como perdido [7].

Mesmo com o algoritmo do tempo de *backoff*, dispositivos que requerem baixa latência podem esperar muito tempo para realizar a transmissão. Para que esses dispositivos experimentem transmissão com um tempo de latência curto, uma regra de tempo de *backoff* que leva em consideração a prioridade entre dispositivos pode ser utilizada [7][8]. A prioridade de cada dispositivo pode ser designada de acordo com vários fatores como o grau de conectividade, o tamanho do pacote a ser transmitido e a relevância das informações dos pacotes. Dessa maneira, dispositivos com prioridade maior experimentam menor latência.

Igualmente importante, a eficiência energética de redes de comunicação entre máquinas é deteriorada uma vez que o número de dispositivos conectados é elevado. Devido a proximidade, o nível de interferência entre os dispositivos é elevado, o que deteriora a comunicação. Técnicas de clusterização dos nós de uma rede viabilizam o uso de adaptação de potência nos nós de interesse, diminuindo assim o consumo energético de cada nó e a interferência nos nós adjacentes.

## 1.1 CONCEITOS BÁSICOS

### 1.1.1 *Internet of Things* - IoT

Em junho de 2009, Kevin Ashton relatou que o termo Internet das Coisas (IoT, *Internet of Things*) foi cunhado em seu trabalho intitulado “*I made at Procter & Gamble*” em 1999 [9]. Na época, o



termo IoT era associado ao uso da tecnologia de IDentificação por Rádio-Frequência (RFID, *Radio-Frequency IDentification*). Contudo, o termo ainda não era foco de grande número de pesquisas. Por volta de 2005, um termo bastante procurado (tanto pela academia quanto pela indústria) e que apresenta relação com IoT foi Redes de Sensores Sem Fio (WSN, *Wireless Sensor Networks*). Estas redes trouxeram avanços na automação residencial e industrial [10], bem como técnicas para explorar as diferentes limitações dos dispositivos (tais como memória e energia), escalabilidade e robustez da rede[11]. Nos anos seguintes (entre 2008 e 2010), o termo IoT ganhou popularidade rapidamente. Isto se deve ao amadurecimento das WSNs e ao crescimento das expectativas sobre a IoT. A IoT foi especificada como uma tecnologia emergente em 2012 por especialistas da área [12].

Em 2012, foi previsto que a IoT levaria entre cinco e dez anos para ser adotada pelo mercado e, atualmente, é vivenciado o maior pico de expectativas sobre a tecnologia no âmbito acadêmico e industrial. Nota-se também o surgimento das primeiras plataformas de IoT que têm gerado uma grande expectativa de seu uso. Estes fatos certamente justificam o motivo do interesse da comunidade científica e da indústria na IoT.

A IoT emergiu dos avanços de várias áreas como sistemas embarcados, microeletrônica, comunicação e sensoriamento. De fato, a IoT tem recebido bastante atenção tanto da academia quanto da indústria, devido ao seu potencial de uso nas mais diversas áreas das atividades humanas. Em poucas palavras, IoT nada mais é que uma extensão da Internet atual, que proporciona aos objetos do dia-a-dia conexão à Internet, desde que tenham capacidade computacional e de comunicação. A conexão com a rede mundial de computadores viabilizará, primeiro, controlar remotamente os objetos e, segundo, permitir que os próprios objetos sejam acessados como provedores de serviços. Estas novas habilidades dos objetos comuns geram um grande número de oportunidades tanto no âmbito acadêmico quanto no industrial. Todavia, estas possibilidades apresentam riscos e acarretam amplos desafios técnicos e sociais.

Atualmente, não apenas computadores convencionais estão conectados à Internet, como também uma grande heterogeneidade de equipamentos tais como TVs, *laptops*, automóveis, *smartphones*, *consoles* de jogos, *webcams*. Usando os recursos desses objetos será possível controlá-lo, viabilizar troca de informações, acessar serviços da Internet e interagir com pessoas.

Ao conectar objetos com diferentes recursos a uma rede, potencializa-se o surgimento de novas aplicações. Neste sentido, conectar esses objetos à Internet significa criar a Internet das Coisas. Na IoT, os objetos podem prover comunicação entre usuários e dispositivos. Com isto emerge uma nova gama de aplicações, tais como coleta de dados de pacientes e monitoramento de idosos, sensoriamento de ambientes de difícil acesso e inóspitos, entre outras.

Neste cenário, a possibilidade de novas aplicações é crescente, contudo, surgem novos desafios para conectar à Internet objetos com restrições de processamento, memória, comunicação e energia [11]. Naturalmente, nesse caso os objetos são heterogêneos, isto é, divergem em implementação, recursos e qualidade. Algumas das questões tanto teóricas quanto práticas que surgem são, por exemplo, prover endereçamento aos dispositivos, encontrar rotas adequadas para o encaminhamento de pacotes e que usem economicamente os recursos limitados dos objetos. Deste modo, fica evidente a necessidade da adaptação dos protocolos existentes. Além disso, sabe-se que os paradigmas de comunicação

e roteamento nas redes de objetos inteligentes podem não seguir os mesmos padrões de uma rede como a Internet [13].

Os dados providos pelos objetos agora podem apresentar imperfeições (calibragem de sensores), inconsistências (fora de ordem, *outliers*) e serem de diferentes tipos (gerados por pessoas, sensores físicos). Assim, as aplicações e algoritmos devem ser capazes de lidar com esses desafios sobre os dados. Outro exemplo diz respeito ao nível de confiança sobre os dados obtidos dos dispositivos da IoT e à maneira como pode-se empregar esses dados em determinados cenários. Deste modo, os desafios impostos por essas novas aplicações devem ser explorados e soluções devem ser propostas para que a IoT satisfaça as expectativas em um futuro próximo.

Alguns autores apontam que a IoT será a nova revolução da tecnologia da informação [9] [14] [15]. Sendo assim, a IoT possivelmente não deve ser entendida como um fim, mas sim como o meio de alcançar algo maior como o conceito de computação ubíqua, que consiste na onipresença da informática no cotidiano das pessoas. A IoT pode ser vista como a combinação de diversas tecnologias, as quais são complementares no sentido de viabilizar a integração dos objetos no ambiente físico ao mundo virtual e pode ser compreendida ao ser dividida em blocos [16], sendo eles:

1. **Identificação:** Este bloco tem suma importância, visto que é primordial identificar os objetos unicamente para conectá-los à Internet. Tecnologias como RFID, NFC (*Near Field Communication*) e endereçamento IP (*Internet Protocol*) podem ser empregados para identificar os objetos.
2. **Sensores/atuadores:** Os sensores coletam informações sobre o ambiente onde os objetos se encontram e, em seguida, armazenam/encaminham esses dados para servidores ou centros de armazenamento. Atuadores podem manipular o ambiente ou reagir de acordo com os dados coletados.
3. **Comunicação:** Diz respeito às diversas técnicas usadas para conectar objetos inteligentes e pode ser dividido em paradigmas e tecnologias de comunicação.
  - a) **Paradigmas de comunicação:** A IoT é uma evolução e combinação de diversas tecnologias. Neste sentido, há interseção entre WSN e IoT no que tange aos paradigmas de comunicação. Tais paradigmas são classificados em quatro categorias, que diferem significativamente. Sendo assim, o modo de comunicação pode acarretar em maior ou menor impacto no uso dos recursos, em especial de memória, energia e na viabilidade de aplicações sobre a rede [16].
    - **Muitos-para-Um (*Many-to-One*)**, em que os objetos inteligentes reportam informações, as quais são coletadas por uma estação base. Este paradigma é conhecido como coleta de dados, sendo o mais comum dos paradigmas, visto que atende às demandas de comunicação de muitas aplicações. Para realizar a coleta de dados, cria-se uma árvore de roteamento, sendo a estação base a raiz. Em geral, este paradigma não acarreta em grande consumo de memória e energia. Entretanto, aplicações que necessitam de confirmação de entrega de dados são inviabilizadas, pois não existem rotas

reversas entre a raiz e os objetos na rede;

- **Um-para-Muitos (*One-to-Many*)**, conhecido como disseminação de dados, o qual tem a característica reversa do paradigma de coleta de dados (ou muitos-para-um). Na disseminação de dados, a estação base comumente envia comandos para um ou vários objetos da rede. O intuito, em geral, é reconfigurar ou modificar parâmetros dos dispositivos na rede. Para realizar a disseminação de dados pode-se, por exemplo, efetuar inundações na rede para alcançar os dispositivos alvos. Entretanto, não é possível confirmar se os dados enviados foram entregues. O custo em número de mensagens também pode ser alto, caso sejam realizadas diversas inundações na rede.
  - **Um-para-Muitos e vice-versa (*One-to-Many and Many-to-One*)**, é um paradigma que combina os dois paradigmas apresentados anteriormente. Nesta abordagem, os objetos podem se comunicar com a estação base e vice-versa. Isto amplia a gama de aplicações, tal como a implementação de protocolos de transporte confiáveis, ou seja, aqueles que possuem confirmação. Entretanto, o paradigma necessita de memória adicional para manter as rotas bidirecionais.
  - **Qualquer um-para-qualquer um (*Any-to-Any*)**, esse paradigma é o mais geral possível, pois permite que quaisquer dois objetos inteligentes da rede se comuniquem. Por ser mais abrangente, esta abordagem é a mais complexa e, geralmente, exige maior quantidade de recursos, principalmente de armazenamento, pois se faz necessário manter rotas para todos os dispositivos alcançáveis na rede. Por outro lado, esse paradigma não apresenta restrições significativas para as aplicações, exceto se os recursos computacionais dos dispositivos forem bastante limitados. O principal protocolo de roteamento de IoT reside nesta categoria. O protocolo RPL (*Routing Protocol for Low Power and Lossy Networks*) é flexível o suficiente para permitir rotas qualquer um-para-qualquer um, além de possibilitar que elementos de rede com diferentes capacidades sejam empregados para otimizar o armazenamento das rotas. Existe ainda um modo de operação do protocolo RPL sob o paradigma muitos-para-um, sendo, portanto, um protocolo flexível no que tange às opções de operação.
- b) **Tecnologias de comunicação:** Dentre estas, destacam-se:
- **Ethernet**, esse padrão, IEEE 802.3, foi oficializado em 1983 pelo IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) e está presente em grande parte das redes de área local (LANs, *Local Area Networks*) cabeadas existentes. Sua popularidade se deve à simplicidade, facilidade de adaptação, manutenção e custo. Atualmente, existem dois tipos de cabos: par trançado e fibra óptica. Os cabos de par trançado podem atingir taxas de até 1 Gbps (categoria 5), limitados a 100 m, e os cabos de fibra óptica podem alcançar taxas de até 10 Gbps, limitados a 2000 m. O uso do padrão Ethernet é sugerido para dispositivos fixos, ou seja, sem mobilidade.

- **Wi-Fi**, essa tecnologia é uma solução de comunicação sem fio bastante popular, pois está presente nos mais diversos lugares, fazendo parte do cotidiano de casas, escritórios, indústrias, lojas comerciais e até espaços públicos das cidades. O padrão IEEE 802.11 define um conjunto de técnicas de transmissão e codificação. Atualmente, a versão IEEE 802.11ac prevê taxas de comunicação de 600 Mbps ou 1300 Mbps. A tecnologia Wi-Fi possui algumas características satisfatórias, como alcance de transmissão e taxa de dados elevados. Por outro lado, a principal desvantagem da tecnologia Wi-Fi é o maior consumo de energia, quando comparado com outras tecnologias de comunicação sem fio.
- **ZigBee**, é uma tecnologia baseada na especificação do padrão IEEE 802.15.4 para a camada de enlace. Caracteriza-se principalmente por uma taxa de dados, consumo energético e custo reduzidos. A tecnologia ZigBee opera na faixa de frequência de 2.4 GHz (faixa ISM - *Industrial, Scientific and Medical*); contudo é capaz de operar também nas faixas de frequência de 868 MHz e 915 MHz. Essa tecnologia pode alcançar uma taxa de dados de 250 kbps, mas na prática tem-se taxas de dados inferiores. A tecnologia ZigBee também permite que os dispositivos entrem em modo ocioso (ou *sleep*) por longos intervalos de tempo para economizar energia, estendendo assim a vida útil do dispositivo. Sua utilização em IoT depende de um *gateway*, que é um dispositivo encarregado de estabelecer a comunicação entre duas redes, respeitando os protocolos de ambas e tomando determinadas decisões necessárias para o correto funcionamento da comunicação.
- **Bluetooth Low Energy (BLE)**, essa tecnologia possui atualmente três versões: 4.0, 4.1 e 4.2, apresentando como característica principal o baixo consumo de energia. As versões 4.0 e 4.1 possuem um máximo de 27 bytes de mensagem e apenas uma topologia do tipo estrela é utilizada, onde cada dispositivo atua apenas como mestre ou escravo. A partir da versão 4.2 cada dispositivo pode trabalhar como mestre ou escravo simultaneamente, ou seja, é utilizada uma topologia em malha. Uma diferença da versão 4.2 em relação as versões anteriores é o comprimento máximo de mensagem, sendo igual a 251 bytes.
- **3G/4G**, as tecnologias de telefonia celular 3G/4G são utilizadas em projetos que necessitam fornecer ampla área de cobertura, o que acarreta em um consumo de energia elevado comparado com as outras tecnologias. No Brasil as faixas de frequência utilizadas para o padrão 3G são 1900 MHz e 2100 MHz com uma taxa de dados de 1 Mbps. Já o padrão 4G utiliza as faixas de frequência de 400 MHz, 700 MHz e 2500 MHz e possui uma taxa de dados de 10 Mbps.
- **Long Range Wide Area Network (LoRaWan)**, essa tecnologia foi projetada para criar redes de longa distância formada por dispositivos com capacidade de comunicação sem fio. O seu padrão funciona sobre a topologia do tipo estrela e possui uma taxa de comunicação de 300 bps a 50 kbps. O seu consumo de energia é considerado reduzido, permitindo aos dispositivos se manterem ativos por longos períodos. As

frequências utilizadas são 109 MHz, 866 MHz e 915 MHz. O comprimento máximo dos pacotes usados nesta tecnologia é 256 bytes.

4. **Computação:** Inclui a unidade de processamento como, por exemplo, microcontroladores, processadores e FPGAs, responsáveis por executar algoritmos locais nos objetos inteligentes.
5. **Serviços:** A IoT pode prover diversas classes de serviços, dentre elas, destacam-se: Serviços de Identificação, responsáveis por mapear Entidades Físicas (EF) (de interesse do usuário) em Entidades Virtuais (EV) como, por exemplo, o mapeamento da temperatura de um dado local no valor, nas coordenadas geográficas do sensor e no instante da coleta correspondentes; Serviços de Agregação de Dados, que coletam e sumarizam dados homogêneos/heterogêneos obtidos dos objetos inteligentes; Serviços de Colaboração e Inteligência, que agem sobre os serviços de agregação de dados para tomar decisões e reagir de modo adequado a um determinado evento; e Serviços de Ubiquidade, que visam prover serviços de colaboração e inteligência a qualquer momento e em qualquer lugar.
6. **Semântica:** Refere-se à habilidade de extração de conhecimento dos objetos na IoT. Trata da descoberta de conhecimento e do uso eficiente dos recursos existentes na IoT, a partir dos dados existentes, com o objetivo de prover determinado serviço. Para tanto, diversas linguagens podem ser usadas, tais como *Resource Description Framework (RDF)*, *Web Ontology Language (OWL)* e *Efficient XML Interchange (EXI)*.

### 1.1.2 *Massive Machine Type Communications - mMTC*

A comunicação do tipo máquina sem intervenção humana de forma total ou parcial é uma consequência direta do avanço tecnológico e das necessidades atuais, que revolucionará a forma como a sociedade interage. Os dispositivos que hoje realizam a comunicação entre humanos não deixarão de existir; em contrapartida, a quantidade de dispositivos compatíveis com MTC, os quais transmitem informação para outros dispositivos, servidores e até humanos, vai ser proporcionalmente muito maior e isso dá origem ao termo *massive Machine Type Communications (mMTC)* [17]. A heterogeneidade de padrões de tráfego, tipos de dispositivos e requisitos de desempenho torna a alocação de recursos um fator desafiador para a área.

### 1.1.3 *Ultra-Reliable and Low-Latency Communication - URLLC*

Comunicação do tipo URLLC é um modo de operação que não existe nos sistemas de comunicação atuais e contempla a provisão de um certo nível de qualidade de serviço por quase 100% do tempo de conexão. Aplicações emergentes em regime URLLC incluem, por exemplo, automação industrial, computação em nuvem (em inglês, *Cloud Computing*) e comunicação entre veículos.

É importante observar que diferentemente da tendência de evolução até então apresentada pelos sistemas celulares atuais, as redes de comunicação sem fio 5G não serão simplesmente um 4G com taxa mais elevada [18]. Na realidade, as redes 5G constituirão uma série de novos serviços e aplicações com requerimentos de disponibilidade e qualidade muito exigentes [5]. Pode-se portanto, definir

alguns pilares da comunicação ultra confiável entre máquinas, são eles: comunicação praticamente ininterrupta, latência baixa, eficiência espectral e eficiência energética melhoradas.

#### 1.1.4 Redes Ad Hoc

As redes *ad hoc* se baseiam na ideia de redes formadas sem a necessidade de um nó gerenciador central. As primeiras redes com o conceito de redes *ad hoc* datam de 1973 [19], quando a DARPA (*Defense Advanced Research Projects Agency*) iniciou o projeto PRNET (*Packet Radio Network*), onde os nós retransmitiam os pacotes através de múltiplos saltos para atingir nós que estariam fora de alcance utilizando métodos convencionais de transmissão. No padrão IEEE 802.11a, substituiu-se o termo "*Packet Radio Network*" por redes *ad hoc*.

#### 1.1.5 O método de Monte Carlo

O método de Monte Carlo é uma técnica computacional muito utilizada para estimar valores estatísticos e realizar simulações computacionais. A estimativa de Monte Carlo é baseada na interpretação da frequência relativa de probabilidade, devendo especificar um experimento e um evento de interesse [20]. Experimento aleatório é aquele que não pode ser previsto exatamente, mas pode ser definido estatisticamente. Por outro lado, evento é um resultado ou um conjunto de resultados associado a um experimento aleatório.

A premissa das técnicas de Monte Carlo é determinar a probabilidade de ocorrência de um evento através da execução de um experimento aleatório um grande número de vezes,  $N$ . Utilizando a interpretação da frequência relativa, a probabilidade de um evento  $A$  é dada por

$$\Pr(A) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{N_A}{N}, \quad (1)$$

em que  $N_A$  é o número de ocorrências do evento de interesse  $A$ . Nas simulações de Monte Carlo,  $N \ll \infty$  e, portanto,  $N_A/N$  é uma estimativa de  $\Pr(A)$ . Quanto maior o valor de  $N$ , o resultado é mais preciso e a qualidade da simulação é melhor.

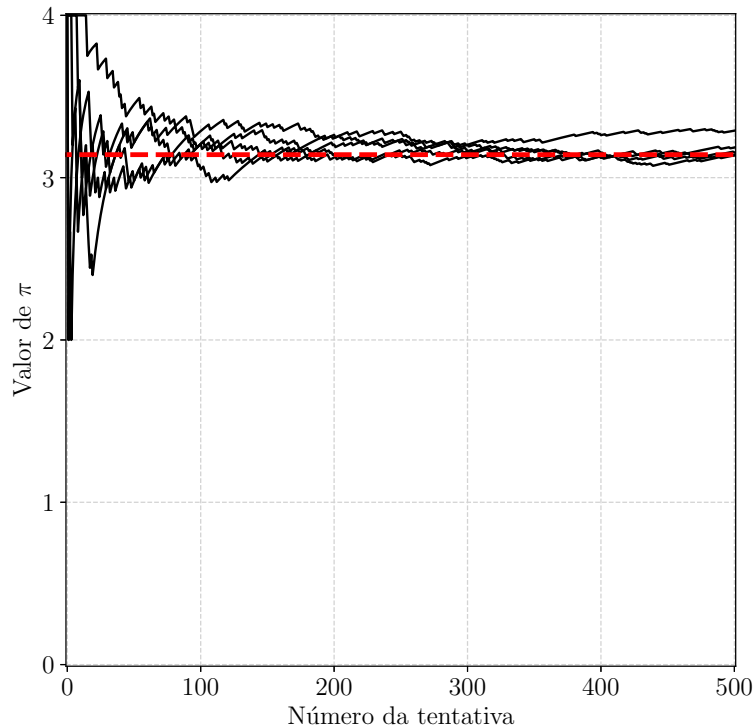
Para demonstrar a validade do método de Monte Carlo, dois exemplos são ilustrados a seguir. O primeiro exemplo é a estimativa do valor de  $\pi$ , onde dentro de uma área retangular de dimensões  $1 \times 1$ , definiu-se um quarto de círculo de raio unitário. Em cada experimento aleatório foi calculado se um valor jogado aleatoriamente nessa área estava dentro ou fora do setor circular correspondente e a partir disso a estimativa do valor de  $\pi$  foi obtida como

$$\hat{\pi} = \frac{4N_{setor}}{N_{caixa}}, \quad (2)$$

em que  $N_{setor}$  é o número de experimentos que caíram dentro do setor circular de interesse e  $N_{caixa}$  é o número total de experimentos. Foram realizados 5 experimentos com 500 tentativas e o resultado é mostrado na Figura 1.

Nota-se que quanto maior o número de tentativas, o experimento resulta em um valor mais próximo de  $\pi$ .

Figura 1 – Estimativa de Monte Carlo para o valor de  $\pi$ .



Fonte: Produção do próprio autor.

Para o segundo experimento, considerando que a transmissão binária pode ser modelada como um arremesso de moeda, outra simulação de Monte Carlo foi realizada para calcular o histograma do número de caras obtidas ao lançar uma moeda. O experimento foi realizado 5000 vezes e em cada experimento foram realizadas 500 jogadas. Foi considerado no experimento que a moeda é viciada e a probabilidade de que uma cara fosse obtida foi de 20%. A Figura 2 mostra o histograma obtido e uma comparação com a curva teórica.

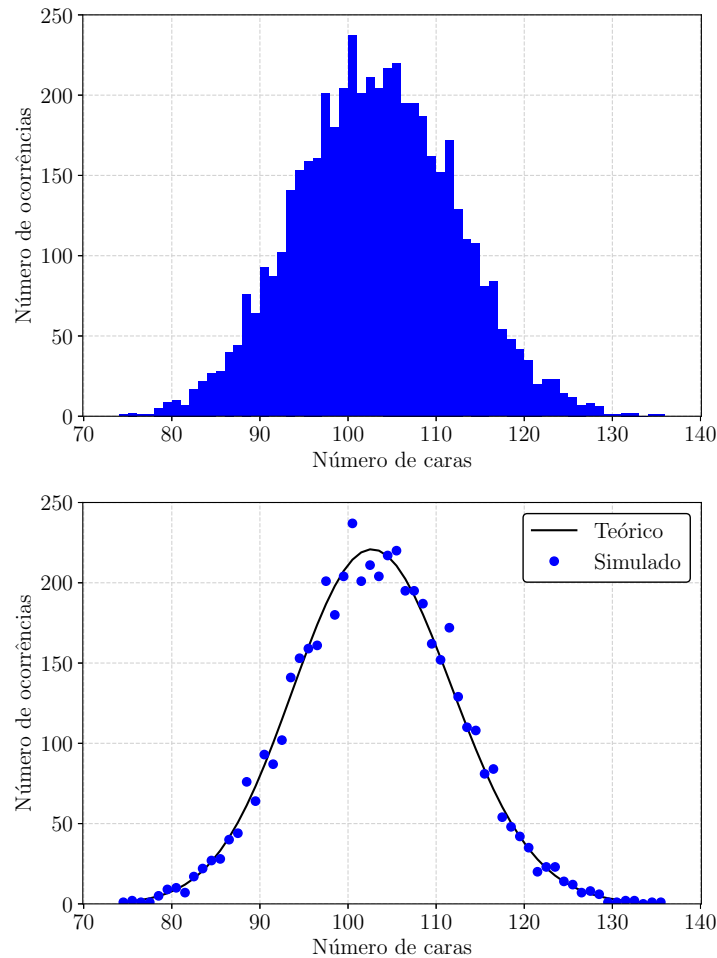
Da Figura 2, nota-se que o resultado obtido com a técnica de Monte Carlo é bem próximo ao valor teórico e quanto maior o número de experimentos, mais próxima a curva fica do valor teórico. Para a avaliação das métricas contempladas neste trabalho, as simulações computacionais serão baseadas no método de Monte Carlo.

## 1.2 TRABALHOS RELACIONADOS

Como discutido no início do capítulo, o advento da comunicação entre máquinas trará um aumento exorbitante no número de dispositivos conectados a Internet e para viabilizar isso, uma série de desafios técnicos são impostos, tais como aumento na capacidade de tráfego, garantia de latência baixa e ultra confiabilidade na comunicação. Pesquisadores da área estão em constante busca por maneiras de possibilitarem a ideia de uma sociedade conectada sem sobrecarregar as redes atuais [1] [2] [3]. As redes 5G têm sido apontadas como viabilizadoras dessa ideia [5] e maneiras de suportar um número massivo de dispositivos com baixo consumo de energia utilizando banda estreita são discutidos na literatura [21].

Redes de comunicação entre máquinas baseadas em redes *ad hoc* podem utilizar uma estrutura

Figura 2 – Estimativa de Monte Carlo para o histograma do lançamento de uma moeda.



Fonte: Produção do próprio autor.

hierarquizada para realizar a comunicação da rede. Mesmo não havendo um nó responsável por gerenciar a rede, pode existir um nó agregador (ou *sink node*) das informações e pacotes de todos os nós dessa rede. Na hierarquia de redes M2M citada, os nós da área da rede são clusterizados e hierarquizados de maneira que a comunicação de pacotes deve seguir o roteamento detalhado na Seção 2.3.

Redes hierárquicas de comunicação entre máquinas são estudadas em [7], onde uma técnica baseada no método de acesso ao meio CSMA (*Carrier Sense Multiple Access*), a regra de *backoff* que designa prioridade aos nós, é implementada a fim de diminuir a latência de transmissão nessas redes. O sistema é avaliado a partir da latência média e consumo de energia por nó, ambos com relação ao número de nós da rede. Nesse trabalho, a mesma estratégia de *backoff* utilizada em [7] será implementada.

Em [22] foi estudado um algoritmo de clusterização para roteamento geográfico em WSNs que se baseia em uma propriedade espectral dos nós e depende de informações de conectividade. Constatase por meio desse trabalho que o uso desse algoritmo melhora substancialmente a taxa de sucesso de entrega de pacotes e tem pouco impacto na latência média de entrega de pacotes, ou seja, a escolha do algoritmo de clusterização de nós utilizado em redes de comunicação entre máquinas tem influencia no desempenho da rede. Visto isso, uma técnica de clusterização baseada em Machine Learning é



implementada no presente trabalho a fim de aumentar a eficiência energética dos nós em estudo.

### 1.3 CONTRIBUIÇÕES

A proposta deste trabalho é avaliar cenários de redes hierárquicas de comunicação entre máquinas que devem operar em regime URLLC. Essas redes devem atender requerimentos de latência, eficiência energética e capacidade do canal. Será utilizada a técnica de *backoff* com distinção de prioridade entre nós, visando diminuir a latência da rede. Além disso, serão simulados cenários com o método convencional de acesso ao meio CSMA, isto é, sem distinção de prioridade entre nós, para fins de comparação. Nós com prioridade receberão tempos menores de *backoff* e o resultado será benéfico para a rede como um todo, como será apresentado posteriormente no Capítulo 4.

Uma estratégia de clusterização de nós baseada em *Machine Learning* será estudada em termos da latência e eficiência energética para analisar a viabilidade de implantação da mesma nos cenários considerados. Adicionalmente, uma técnica de divisão setorizada de *clusters* será avaliada para comparar os efeitos da clusterização nas métricas de desempenho estudadas.

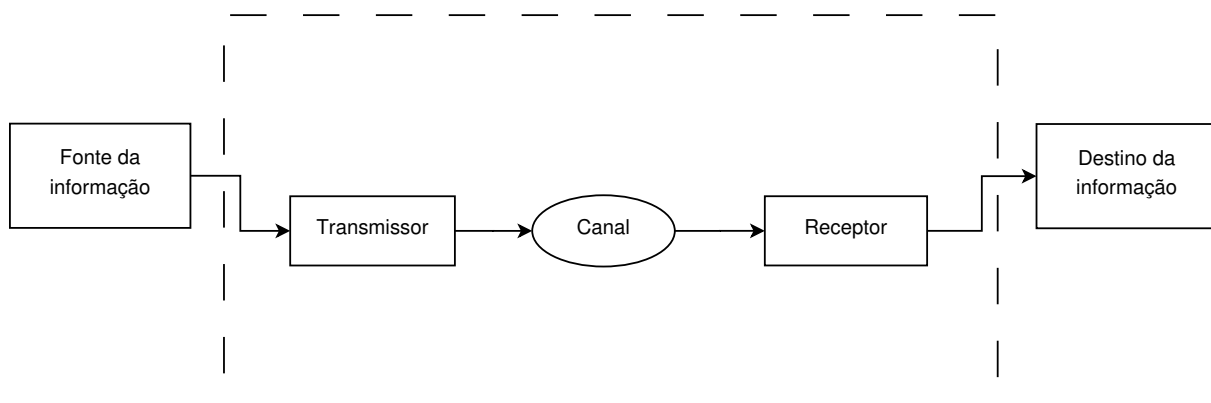
## 2 MODELO DO SISTEMA

O sistema de comunicação implementado utiliza um canal de comunicação sujeito aos efeitos de perda de percurso e sombreamento. Considera-se que os nós compartilham os recursos de comunicação da rede e que para acessá-los usam a técnica de acesso múltiplo CSMA. Além disso, os nós são clusterizados de maneira hierárquica, seguindo duas técnicas de clusterização. A seguir, o modelo e especificações do sistema são detalhados.

### 2.1 EFEITOS DE GRANDE ESCALA DO CANAL SEM FIO

Comunicação pode ser entendida como o ato de passar uma informação de um ponto ao outro e as telecomunicações tem papel de realizar esse compartilhamento de informações a grandes distâncias. Essas informações podem ser música, imagem, voz ou qualquer outro tipo. Os dados são transformados em sinais elétricos e codificados de maneira que possam ser transmitidos em um meio físico. Quando esses sinais chegam no receptor, são decodificados e apresentados ao usuário destino. Dessa maneira, é possível identificar três principais elementos da comunicação: o transmissor, o canal de comunicação e o receptor. A Figura 3 mostra um diagrama de blocos que representa a estrutura de um sistema básico de comunicação. O transmissor é responsável por deixar a informação apta a ser transmitida, esse sinal se propaga no canal e sofre atenuação, distorção e interferência. O papel do receptor é reconstruir a informação original com o menor erro possível.

Figura 3 – Modelo de sistema básico de comunicação.



Fonte: Produção do próprio autor.

É de grande importância conhecer o comportamento e os efeitos degradantes no canal rádio-móvel. Dois dos principais efeitos degradantes desse canal são a perda de percurso e o sombreamento. A perda de percurso atenua o sinal de acordo com a distância entre o transmissor e o receptor, e com as características do ambiente de propagação as quais são caracterizadas pelo coeficiente de perda de percurso. Já o sombreamento altera a potência do sinal recebido devido obstáculos de grande porte (com relação ao comprimento de onda) no percurso de propagação desse sinal.

### 2.1.1 Perda de percurso

Por efeito da perda de percurso [23], a potência recebida é menor que a potência transmitida devido à distância entre o transmissor e o receptor e às características do ambiente de propagação. Não é possível obter um único modelo que descreva a perda de percurso devido à complexidade da propagação de sinais e às condições do canal. Portanto, existem diversos modelos obtidos através de estudos analíticos e medidas empíricas. Em um modelo simplificado para a perda de percurso, a potência do sinal recebido é inversamente proporcional à distância entre o transmissor e o receptor segundo a expressão

$$p_{rx} = p_{tx} \left( \frac{d}{d_0} \right)^{-\alpha} \quad [\text{W}], \quad (3)$$

em que  $p_{rx}$  é a potência recebida em Watts,  $p_{tx}$  é a potência transmitida em Watts,  $\alpha$  é o expoente de perda de percurso,  $d$  é a distância entre o transmissor e o receptor e  $d_0$  é uma distância de referência, considerada nesse trabalho igual a 1m.

A potência recebida em dBm é dada por

$$p_{rx\text{dBm}} = p_{tx\text{dBm}} - 10\alpha \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right) \quad [\text{dBm}], \quad (4)$$

em que  $p_{rx\text{dBm}}$  é a potência recebida em dBm e  $p_{tx\text{dBm}}$  é a potência transmitida em dBm.

Em nosso modelo, o expoente de perda de percurso é uma constante e depende do ambiente de propagação. O expoente de perda de percurso é igual a 2 para o espaço livre e apresenta valor maior quando existem obstruções no meio de transmissão. A Tabela 1 mostra o valor do expoente de perda de percurso para diferentes ambientes de propagação.

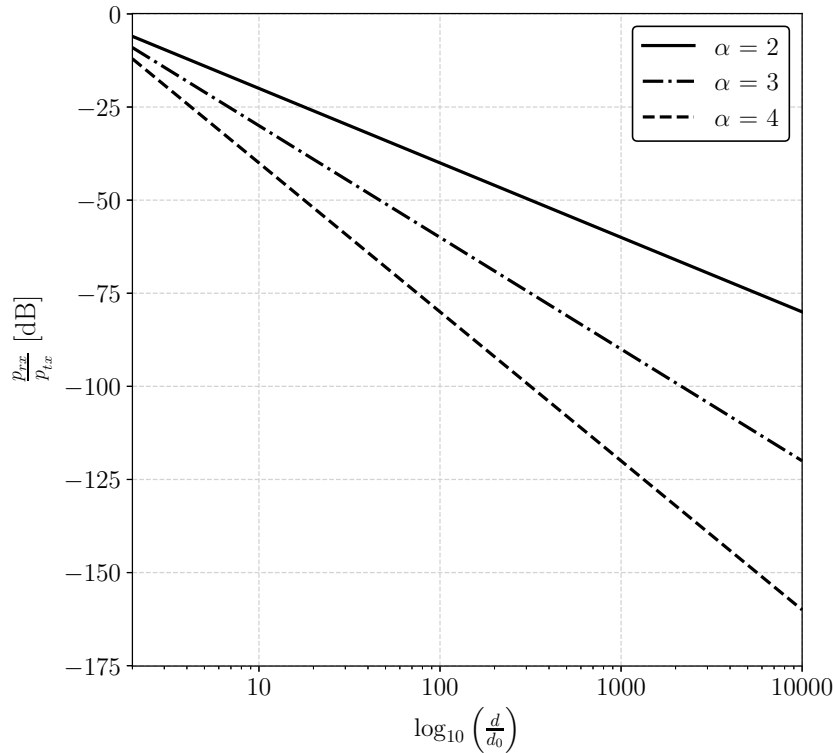
Tabela 1 – Expoentes de perda de percurso para diversos ambientes.

Ambiente	Expoente de perda de percurso, $\alpha$
Espaço livre	2
Rádio-celular em área urbana	2,7 a 3,5
Rádio-celular urbano sombreado	3 a 5
Na linha de visão do prédio	1,6 a 1,8
Obstruído no prédio	4 a 6
Obstruído em fábricas	2 a 3

Fonte: RAPPAPORT, 2009. [23]

A Figura 4 mostra o comportamento da perda de percurso de acordo com a distância entre o transmissor e o receptor para valores distintos de  $\alpha$ . Nota-se que a perda de percurso em dB tem comportamento linear em função do logaritmo da distância, e como discutido anteriormente, quanto maior a distância entre o transmissor e o receptor, menor a potência recebida. Além disso, quanto maior o coeficiente de perda de percurso, maior a atenuação na potência recebida. Portanto, para uma mesma distância, o sinal pode chegar com maior ou menor atenuação dependendo do ambiente de propagação.

Figura 4 – Efeito da perda de percurso na potência do sinal recebido.



Fonte: Produção do próprio autor.

### 2.1.2 Sombreamento

Considerando o sombreamento [23], além da atenuação na potência causada pela perda de percurso, a potência do sinal sofrerá alterações aleatórias causadas por construções, automóveis e outros obstáculos. Ou seja, em dois locais diferentes com a mesma distância entre o transmissor e o receptor, a potência recebida pode ser diferente e variar de acordo com a disposição de obstáculos encontrada no trajeto realizado. A potência medida em inúmeros locais com a mesma distância transmissor-receptor tem distribuição log-normal. O modelo para potência recebida considerando a perda de percurso e o sombreamento é

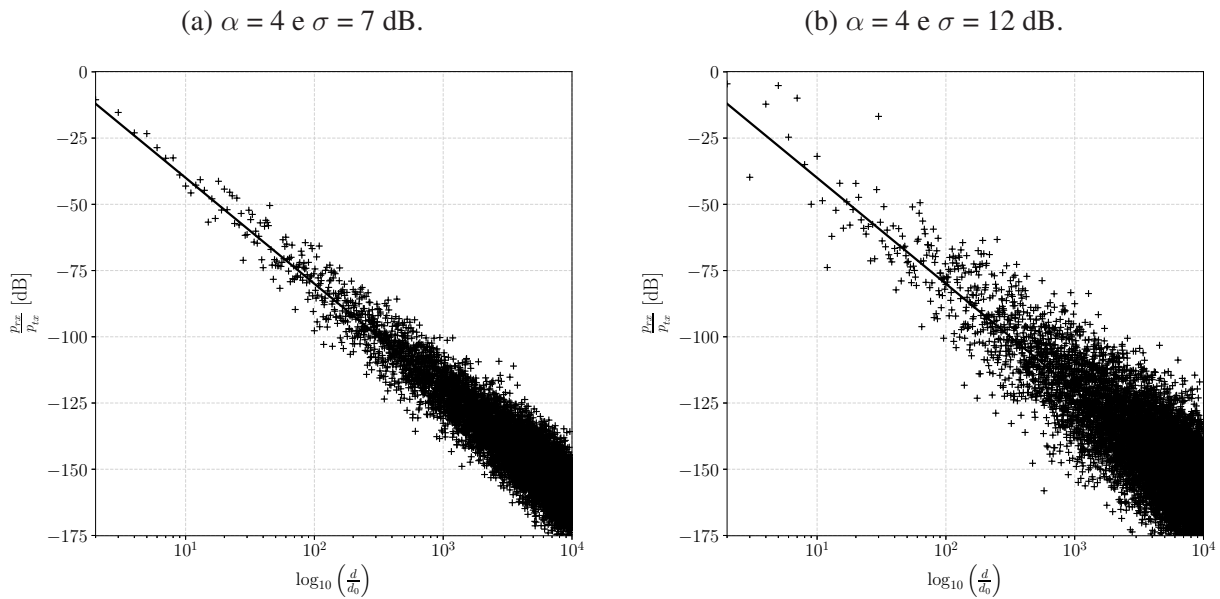
$$p_{rx_{dBm}} = p_{tx_{dBm}} - 10\alpha \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right) + x_\sigma \quad [\text{dBm}], \quad (5)$$

em que  $x_\sigma$  é uma variável aleatória com distribuição Gaussiana com média 0 e desvio padrão  $\sigma$ , dados em dB. O valor de  $\sigma$  varia de acordo com o ambiente de propagação.

De (5), nota-se que a potência recebida não terá comportamento linear em função do logaritmo da distância pois o sombreamento tem distribuição Gaussiana. Logo, a potência recebida também terá comportamento Gaussiano em função do logaritmo da distância entre o transmissor e o receptor.

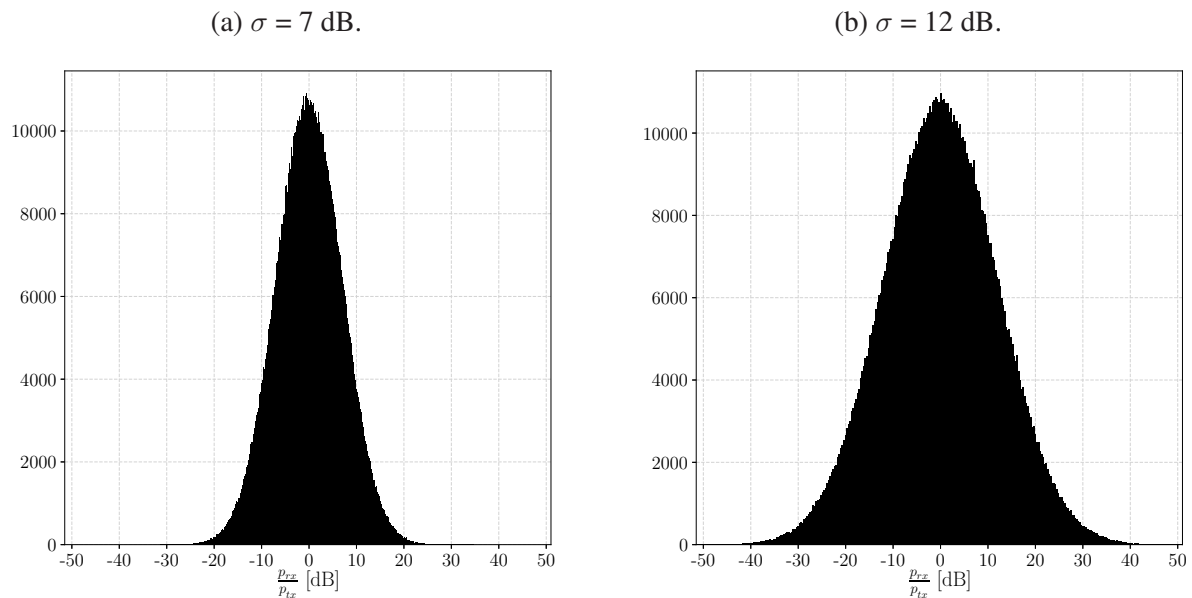
A Figura 5 mostra o efeito da perda de percurso e sombreamento juntos. O sombreamento tem efeito aleatório e para cada ponto na distância terá um valor diferente e o desvio entre os valores obtidos tem comportamento Gaussiano. Para observar melhor esse efeito, a Figura 6 mostra um histograma onde  $10^6$  amostras de valor de atenuação de potência são calculados para uma distância fixada. Quanto maior o desvio padrão do sombreamento, maior a variação nos valores de atenuação

Figura 5 – Efeito do sombreamento combinado à perda de percurso na potência do sinal recebido.



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 6 – Efeito Gaussiano do sombreamento.



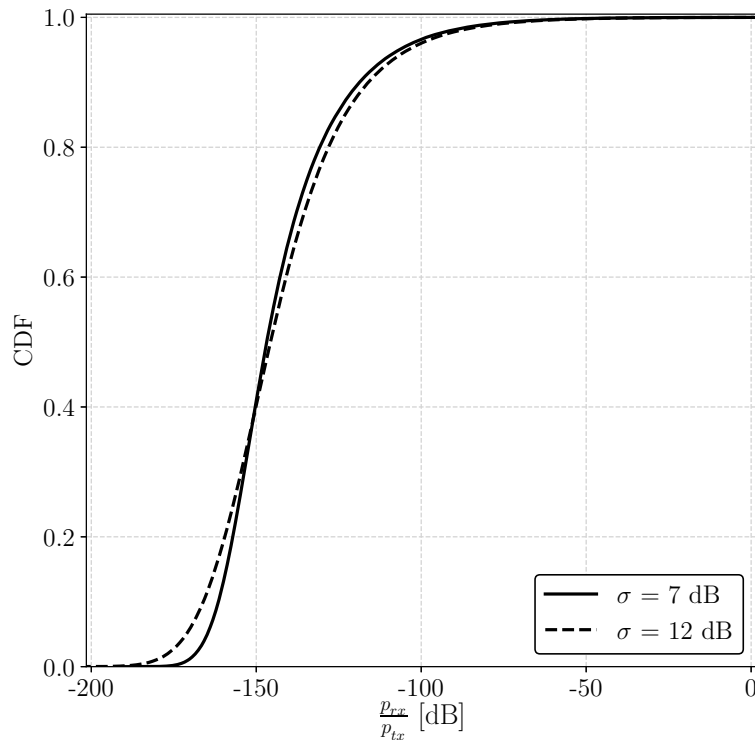
Fonte: Produção do próprio autor.

de potência recebida. Nota-se na Figura 6b um alargamento nos valores de perda com relação aos valores na Figura 6a, sendo esse o efeito do sombreamento para diferentes ambientes.

Outra característica importante ainda sobre o efeito do sombreamento na comunicação é a Função Distribuição Acumulada (CDF, *Cumulative Distribution Function*). Como o sombreamento é um efeito aleatório e que segue uma distribuição de probabilidade, essa função é útil para avaliar a probabilidade de receber certas potências em um dado canal. A Figura 7 mostra a CDF das perdas do canal com efeitos de perda de percurso e sombreamento.

Na CDF da Figura 7 é possível avaliar qual o percentual (eixo y) de perda menor ou igual a dado valor (eixo x).

Figura 7 – Função distribuição acumulada do sombreamento.



Fonte: Produção do próprio autor.

## 2.2 TÉCNICAS DE ACESSO MÚLTIPLO

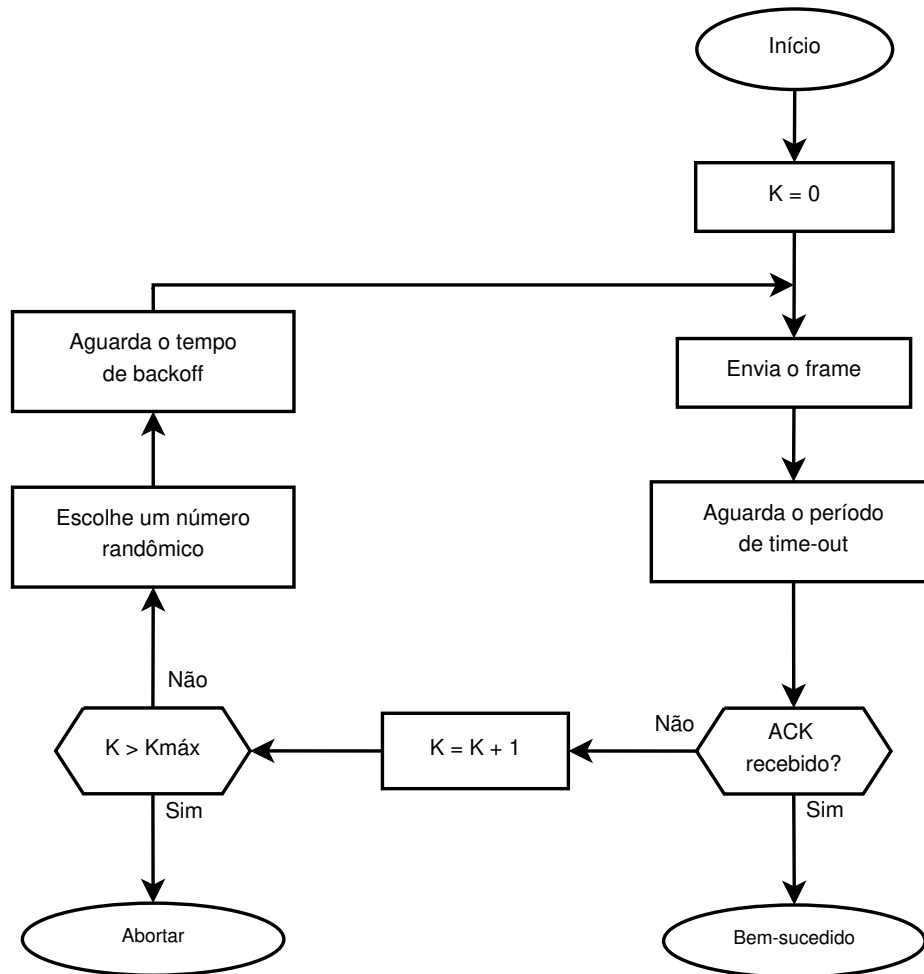
Nas comunicações entre máquinas, assim como nas comunicações celulares, não existem canais dedicados para transmissão de informação. Ou seja, os dispositivos devem acessar o canal, fazer uso dos recursos e em seguida liberá-lo para os demais dispositivos. Os protocolos de acesso múltiplo são divididos em protocolos de acesso randômico, de acesso controlado e de canalização. Trataremos aqui dos protocolos de acesso randomico ALOHA e CSMA [24].

### 2.2.1 ALOHA

O protocolo ALOHA foi o primeiro método de acesso randômico desenvolvido para uma rede LAN via rádio, podendo ser usado para qualquer meio de transmissão compartilhado. A primeira versão do protocolo é denominada ALOHA puro.

O protocolo ALOHA puro tem uma abordagem um tanto quanto simplista para o acesso múltiplo do canal. Os dispositivos que compartilham o canal enviam seus quadros sempre que tiverem algum para enviar. Como é de se esperar, quando mais de um dispositivo transmitir um quadro em um dado instante, haverá colisão e o quadro será corrompido. O envio dos quadros que são corrompidos deve ser realizado novamente. Para saber se um quadro foi corrompido ou não, o nó transmissor aguarda uma mensagem de confirmação (ACK) do destino durante um tempo denominado de *time out*. Se após o intervalo de *time out* não houver chegado nenhuma mensagem de confirmação, o transmissor reenvia o quadro. Além disso, quando o intervalo de *time out* esgota, os dispositivos devem esperar um tempo aleatório de *backoff* para tentar a transmissão novamente. Após um número máximo de

Figura 8 – Procedimento para o ALOHA puro.



Fonte: Adaptado de FOROUZAN, 2007. [24]

tentativas, a estação deve desistir. A Figura 8 mostra o procedimento de transmissão do ALOHA puro. No diagrama,  $K$  é o número de tentativas de transmissão,  $K_{\text{máx}}$  é o número máximo de tentativas de transmissão e o número randômico será utilizado para calcular o tempo de *backoff* dependendo do mecanismo utilizado.

### 2.2.2 CSMA

O método de acesso múltiplo CSMA (*Carrier Sense Multiple Access*) foi criado para diminuir a probabilidade de colisão existente no método ALOHA. O método CSMA consiste em basicamente em "ouvir" o canal antes de transmitir, ou seja, o nó conhecerá as condições de uso do canal antes de realizar a transmissão. Os nós verificam se o canal está ocupado, em caso afirmativo, os nós recebem tempos seguindo a regra de *backoff*. O tempo de *backoff* no método CSMA é atribuído aleatoriamente aos dispositivos. Um nó que está ativo e tem dados para transmitir verifica o canal, se o canal está ocupado ou ocorre colisão, recebe um tempo de *backoff* aleatório. Ao passar esse tempo, o nó tenta a transmissão novamente, se o canal estiver ocupado novamente, recebe outro tempo de *backoff* aleatório e dessa vez, duas vezes maior que o anterior.

### 2.2.2.1 Técnicas de *backoff*

No método convencional de *backoff*, todos os nós possuem a mesma prioridade, sendo o tempo de *backoff* dado por

$$\Delta = \lfloor 2^K \times x \rfloor \times \delta, \quad (6)$$

em que  $K$  é um número não negativo,  $x$  é um número aleatório que segue distribuição uniforme entre 0 e 1,  $\lfloor \cdot \rfloor$  é a função piso (ou *floor function*) e  $\delta$  é o intervalo de tempo de *backoff* definido pelo sistema. O valor de  $K$  é acrescido de 1 a cada tentativa de transmissão até um dado valor  $K_{max}$ , que é o número máximo de tentativas. Se o canal ainda estiver ocupado quando o valor  $K_{max}$  for atingido, o pacote é perdido. Utilizando a estratégia de tempo de *backoff*, os nós ativos em dado momento receberão tempos aleatórios que deverão esperar até que tentem acessar o canal novamente. Dessa maneira, a probabilidade de mais de um nó tentar acesso ao canal simultaneamente diminui e, conseqüentemente, obtém-se maior sucesso na transmissão de pacotes.

A latência para qualquer dispositivo ainda pode ser alta, um dispositivo que requer baixa latência pode ser o último a conseguir enviar ou ainda não conseguir efetuar a transmissão. Uma alternativa para diminuir a latência é designando prioridade aos dispositivos que a requerem. Essa prioridade pode ser atribuída aos dispositivos utilizando diversos critérios. Os critérios podem ser o comprimento dos pacotes que os nós enviam, a importância do nó para dada aplicação, a relevância dos dados a serem transmitidos e outros. Nesse trabalho, o objetivo é avaliar o desempenho do algoritmo com prioridade, logo, os nós serão divididos entre os que não tem prioridade e os que tem. O tempo de *backoff* em um sistema que trabalha com prioridade é dado por

$$\Delta' = \left\lfloor \frac{2^K \times x}{f_p} \right\rfloor \times \delta, \quad (7)$$

em que  $f_p$  é o fator de prioridade. Quanto maior a prioridade do dispositivo, menor o tempo de *backoff*. Dessa maneira, maiores as chances de usuários prioritários conseguirem a transmissão mais rápido e não perder o pacote. Nesse trabalho,  $f_p$  pode assumir os valores de 1 ou 2, onde 1 é atribuído aos nós sem prioridade e 2, aos nós com prioridade.

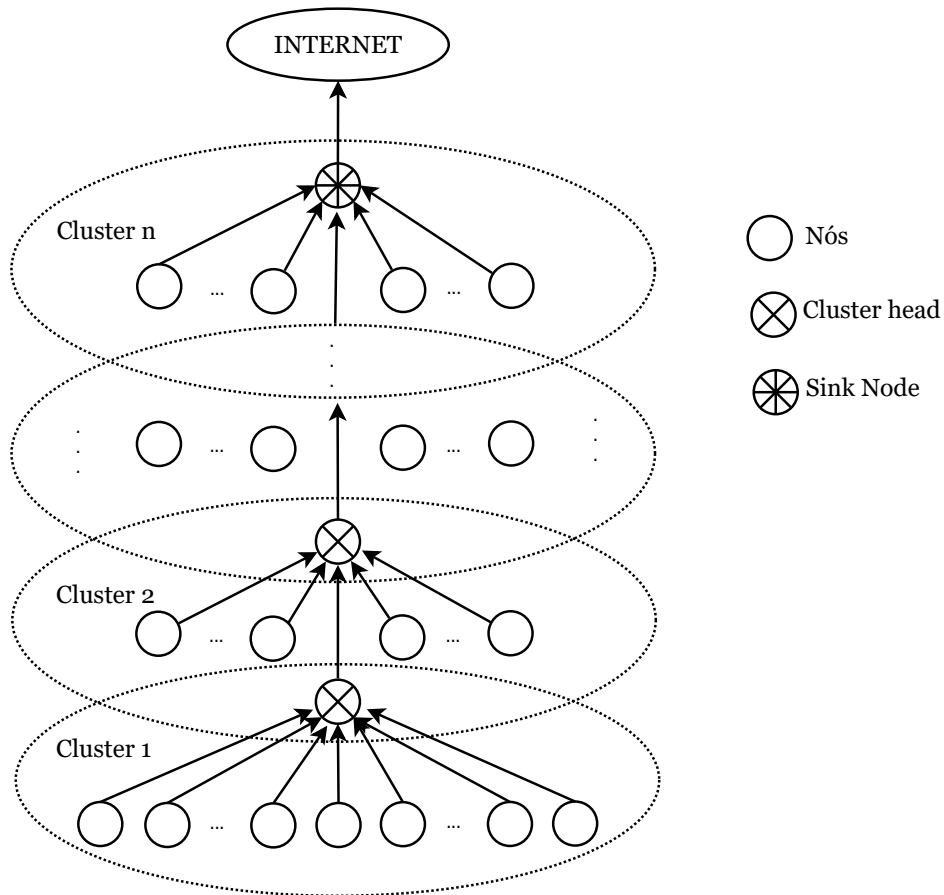
## 2.3 HIERARQUIA DE REDES M2M

As redes implementadas seguem uma hierarquia baseada em múltiplos saltos, ou seja, até que os pacotes dos dispositivos cheguem de fato na rede de internet, eles devem trafegar pela rede na qual estão inseridos. A hierarquia implementada é ilustrada na Figura 9.

Cada *cluster* é composto pelos nós, dispositivos ativos com pacotes a serem transmitidos e pelos *cluster heads*, dispositivos ativos responsáveis por receber os pacotes de todos os nós do *cluster* e enviá-los ao *cluster head* do *cluster* subsequente. O *cluster head* do último *cluster* da hierarquia é denominado *sink node*, recebe os pacotes de todos os nós da rede e os encaminha para a internet.



Figura 9 – Hierarquia de redes de comunicação entre máquinas com  $n$  clusters.



Fonte: Adaptado de PARK, 2015. [7]

### 2.3.1 Técnicas de Clusterização

Foram implementados dois métodos de clusterização dos nós, o método de setorização em faixas retangulares e o método *K-Means*, baseado em *Machine Learning* utilizando a biblioteca *scikit-learn* em *Python* [25].

O método *K-Means* agrupa os nós tentando separá-los em  $n$  clusters de variância igual, minimizando a soma de mínimos quadrados dentro do cluster. Esse algoritmo requer que o número de clusters seja especificado [26].

O algoritmo *K-Means* divide um conjunto de  $N$  amostras no espaço bidimensional  $X$  em  $K$  clusters disjuntos no espaço bidimensional  $C$ , cada um descrito pela média  $\mu_j$  das amostras do cluster. Os centros do cluster não necessariamente são nós que foram dispostos na área, sendo assim, o *cluster-head* foi definido como sendo o nó mais próximo ao centro de cada cluster. O algoritmo visa escolher centros que minimizem o critério de soma dos mínimos quadrados dentro do cluster

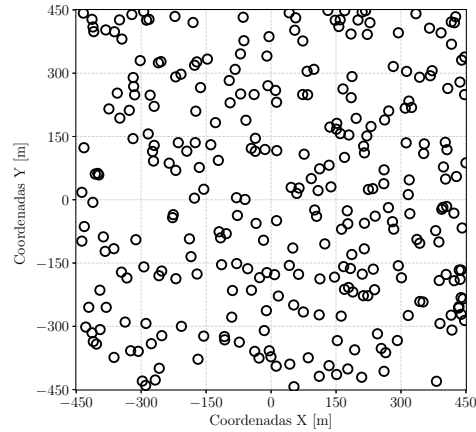
$$\sum_{i=0}^n \min_{\mu_j \in C} (||x_j - \mu_i||^2). \quad (8)$$

em que  $x_j$  é a posição dos nós a serem clusterizados e  $\mu_i$  é a posição do centro cluster.

A Figura 10 mostra como os *clusters* são divididos na área de implantação da rede pelas duas técnicas de clusterização implementadas considerando 3 *clusters*.

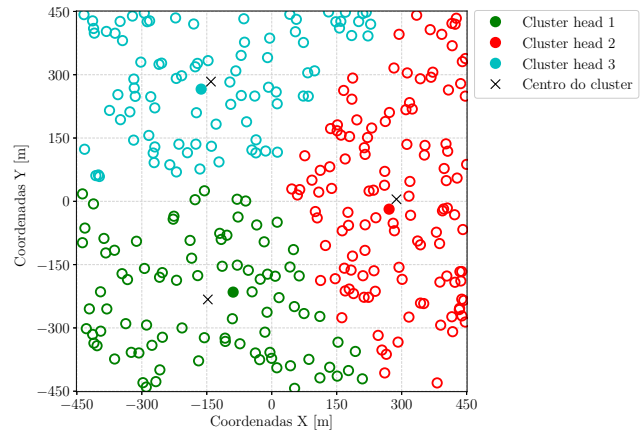
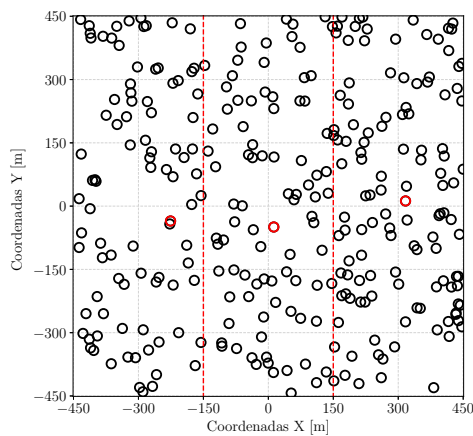
Figura 10 – Técnicas de clusterização.

(a) Nós dispostos na área de implantação.



(c) Nós clusterizados pelo algoritmo *K-Means*.

(b) Nós clusterizados apenas por setorização.



Fonte: Produção do próprio autor.

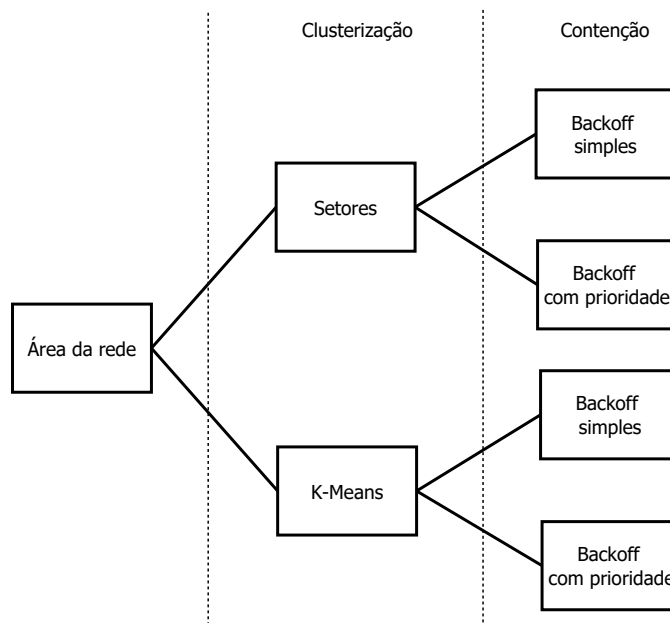
### 3 METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO

As redes em estudo serão avaliadas utilizando simulações computacionais e métricas específicas de desempenho definidas neste capítulo.

#### 3.1 SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

Foi implementado um simulador em Python utilizando o método de Monte Carlo. O simulador dispõe os nós na área da rede, os clusteriza e realiza todo o processo de contenção da rede, calculando as métricas de interesse para posterior avaliação. Como já mencionado, os nós serão clusterizados pelas técnicas de setorização e K-Means. Por outro lado, a contenção será realizada pelas técnicas de *backoff* convencional sem designação de prioridade entre nós e a técnica que designa prioridades aos nós. A Figura 11 mostra um diagrama de árvore onde cada ramo corresponde a um cenário simulado.

Figura 11 – Estratégias aplicadas na área de implantação da rede.



Fonte: Produção do próprio autor.

Os cenários mostrados foram simulados seguindo o pseudo-código apresentado no Algoritmo 1. Inicialmente há uma estrutura de repetição que acontecerá enquanto o número de iterações (ou *snapshots*) não for atingido; Em cada iteração inicialmente são definidas uniformemente as posições de todos os nós, dentre os nós são definidos os ativos e os inativos, onde cada nó tem 50% de probabilidade de estar ativo; Os nós então são clusterizados (caso esteja ocorrendo simulações para o método *K-Means*, eles são clusterizados pela técnica *K-Means*, caso contrário, em setores.), a potência recebida pelos *cluster heads* é calculada e a prioridade de cada nó, 1 para nós sem prioridades e 2 para nós com prioridades, é definida. Inicia-se o processo de contenção da rede, uma nova estrutura de

repetição condicionada a existir algum nó ativo e o número máximo de tentativas de transmissão não tiver sido atingido é iniciada; Verifica-se quais *clusters* tem nós ativos e calcula-se o tempo de *backoff* para cada nó de cada *cluster*; O tempo de *backoff* calculado é adicionado ao tempo que o nó já está esperando para transmissão e o nó com o menor tempo de espera do *cluster* conseguirá transmitir o pacote; Os tempos de espera dos nós que conseguiram transmissão são transferidos para as filas do próximo *cluster*, exceto os tempos do último *cluster*; As prioridades dos nós que conseguiram transmitir pacotes são armazenadas; O número de nós ativos é diminuído em 1 e o número de tentativas de transmissão é acrescido em 1; Encerra-se a estrutura de repetição interna e armazena-se os tempos de transmissão até o *sink node*, as prioridades dos nós e as potências recebidas pelo *cluster heads* nesse *snapshot*; Por fim, encerra-se a estrutura de repetição externa.

---

**Algoritmo 1:** Simulação das redes em estudo

---

**while** não atingir o número de snapshots **do**

definir as posições dos nós no cenário atual;  
 clusterizar os nós (por setores ou K-Means);  
 definir se os nós estão ativos ou não (50% de chance de estar ativo);  
 calcular a potência recebida no destino de todos os nós;  
 definir a prioridade dos nós (1 ou 2);

**while** número de ativos é maior que zero & número máximo de tentativas ( $i_{max}$ ) não foi atingido. **do**

verificar em quais *clusters* existem nós ativos calcular o tempo de *backoff* para cada dispositivo de cada *clusters* levando em consideração a prioridade dos nós;  
 adicionar o novo tempo de *backoff* ao tempo de espera de cada dispositivo;  
 verificar qual o menor tempo de espera entre os dispositivos ativos de cada *cluster*;  
 armazenar o menor tempo de cada em uma matriz;  
 realizar a transferência dos nós para as filas dos *clusters* subsequentes; armazenar a prioridade dos nós enviados em uma matriz;  
 diminuir o número de nós ativos em 1;  
 aumentar o número de tentativas em 1;

**end**

armazenar os tempos, as prioridades e as potências dos dispositivos enviados nesse *snapshot* em uma matriz;

**end**

---

## 3.2 MÉTRICAS DE DESEMPENHO

O desempenho da rede será avaliado a partir de duas métricas de grande importância em redes de comunicação sem fio, a saber: latência e eficiência energética. As métricas serão avaliadas a partir da CDF correspondente de cada métrica.

### 3.2.1 Latência

A latência é definida como o tempo que leva desde o momento em que a informação foi gerada até o momento em que ela chega ao seu destino final. Inclui os tempos de processamento dos equipamentos envolvidos na transmissão, o tempo de espera em todas as filas e o tempo de propagação pelo

meio. Neste trabalho, a latência será avaliada considerando apenas os tempos que os pacotes ficam na fila assumindo as outras componentes da latência como desprezíveis. O objetivo é avaliar o desempenho dos métodos de acesso ao meio utilizados sendo que este intervalo de tempo é consideravelmente maior que as outras componentes de tempo, logo, será o único intervalo de tempo considerado.

### **3.2.2 Eficiência Energética**

A eficiência energética será avaliada por meio do nível de potência recebido pelos *cluster heads* durante todo o processo de contenção da rede. A partir dela será possível avaliar as técnicas de clusterização utilizadas e definirá um importante papel na hierarquia de redes.

## 4 RESULTADOS NUMÉRICOS E DISCUSSÃO

Considerando os efeitos do canal sobre a comunicação sem fio discutidos no Capítulo 1, a latência e a eficiência energética dos nós foram medidas por meio de simulações computacionais implementadas em Python utilizando o método de Monte Carlo. Foi implementado o sistema de acordo com o modelo discutido no Capítulo 2. Os parâmetros da rede utilizados nas simulações computacionais são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros utilizados nas simulações.

Parâmetro	Valor
Dimensões da rede	900 m x 900 m
Número médio de dispositivos por cenário	200
Expoente de perda de percurso ( $\alpha$ )	4
Desvio padrão de somreamento ( $\sigma$ )	10 dB
Tempo de transmissão	1ms
<i>backoff_slot_time</i>	100us
Fator de prioridade ( <i>fp</i> )	1 ou 2
$i_{min}$	2
$i_{max}$	10
$t_{max}$	150 ms

Fonte: Produção do próprio autor.

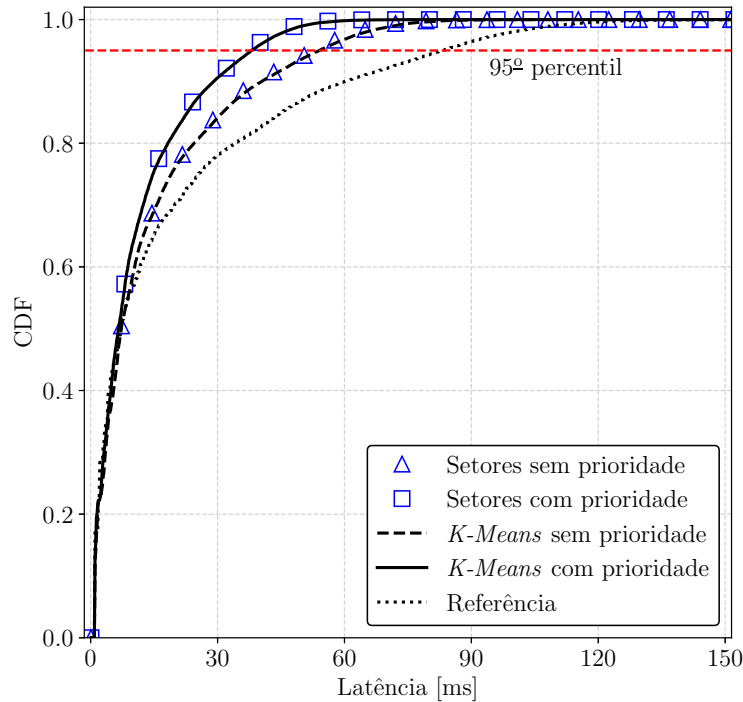
A área da rede foi definida arbitrariamente, o número médio de dispositivos por cenário foi definido de acordo com o tamanho da área em que os cenários serão implantados e simulados. Os valores do expoente de perda de percurso e do desvio padrão foram escolhidos de acordo com o que foi discutido no Capítulo 2, assumindo ambientes usuais para esses tipos de dispositivos. O tempo de transmissão do pacote é igual a 1 ms pois usualmente em comunicações de dispositivos, um quadro (ou *frame*) tem 10ms e é dividido em 10 *slots* de 1ms, onde cada *slot* de tempo é ocupado por um pacote. O fator de prioridade (*fp*) é igual a 1 para nós sem prioridade e 2 para nós com prioridade. O *backoff\_slot\_time*,  $i_{min}$  e o  $i_{max}$  são parâmetros considerados similarmente como em [7].

Baseado nos parâmetros citados, foram realizadas simulações com 10000 iterações (ou *snapshots*) a fim de avaliar o desempenho das soluções propostas. Os cenários foram construídos com uma média de 200 usuários seguindo a distribuição de *Poisson*.

O primeiro resultado obtido é mostrado na Figura 12. Nesse resultado, compara-se a CDF da latência dos dispositivos de uma rede considerando o algoritmo de *backoff* convencional sem distinção de prioridade e de uma rede que utiliza o algoritmo de *backoff* com prioridade. As técnicas de *backoff* foram implementadas em cenários clusterizados em setores e pelo método *K-Means*.

A curva pontilhada mostra um cenário de referência onde nenhum método de clusterização é utilizado, ou seja, existe apenas um *cluster* na rede e esse, irá receber os pacotes de todos os nós. Além disso, apenas a técnica de *backoff* convencional é utilizada na contenção desse cenário. A curva tracejada mostra a CDF do sistema clusterizado pelo método *K-Means* sem utilizar designação

Figura 12 – CDF da latência fim a fim dos cenários simulados.



Fonte: Produção do próprio autor.

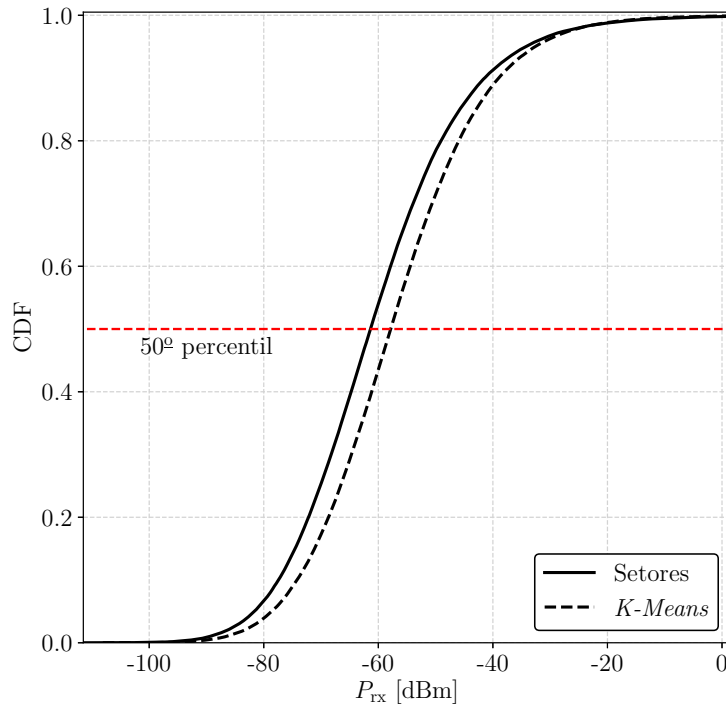
de prioridades e a curva cheia utiliza o mesmo método de clusterização, porém, com designação de prioridades aos nós.

A latência dos dispositivos no sistema que atribui prioridades aos nós é consideravelmente menor comparada a latência do sistema que não designa prioridades aos nós, apresentando uma redução de até 15 ms (cerca de um *frame* e meio) no 95º percentil de probabilidade acumulada.

A fim de observar o efeito da técnica de clusterização na latência da rede, os triângulos e quadrados mostram a CDF do sistema clusterizado em setores sem e com designação de prioridade, respectivamente. Observa-se que a CDF da rede clusterizada em setores coincide com a CDF da rede clusterizada por *K-Means*, tanto para o cenário que designa prioridade aos nós quanto no cenário que não designa. A diferença entre os dois métodos de clusterização será dada principalmente na distância entre os nós e seus *cluster heads*, ou seja, por se tratar de um algoritmo que visa diminuir a distância entre os nós e o centro do *cluster*, os nós clusterizados por *K-Means* terão menor distância de seus respectivos *cluster heads*. Como discutido anteriormente na Seção 3.2, o intervalo de tempo de latência relacionado ao tempo de propagação do sinal no percurso tem influência desprezível no tempo total de latência quando comparado ao tempo de espera na fila. Dessa maneira, a diminuição nas distâncias entre os nós e os *cluster heads* obtida pela clusterização *K-Means* não influencia na latência.

É possível, ainda, observar que utilizar qualquer um dos dois métodos de clusterização é eficiente para diminuição de latência de redes de comunicação entre máquinas, pois há uma diferença de cerca de 30 ms entre as curvas dos cenários que utilizam *backoff* com prioridade e a curva de referência. O resultado mostra a eficiência da designação de prioridades na estratégia de *backoff* para diminuir a latência na comunicação massiva entre máquinas.

Figura 13 – CDF das potências recebidas pelos *cluster heads* dos cenários simulados.



Fonte: Produção do próprio autor.

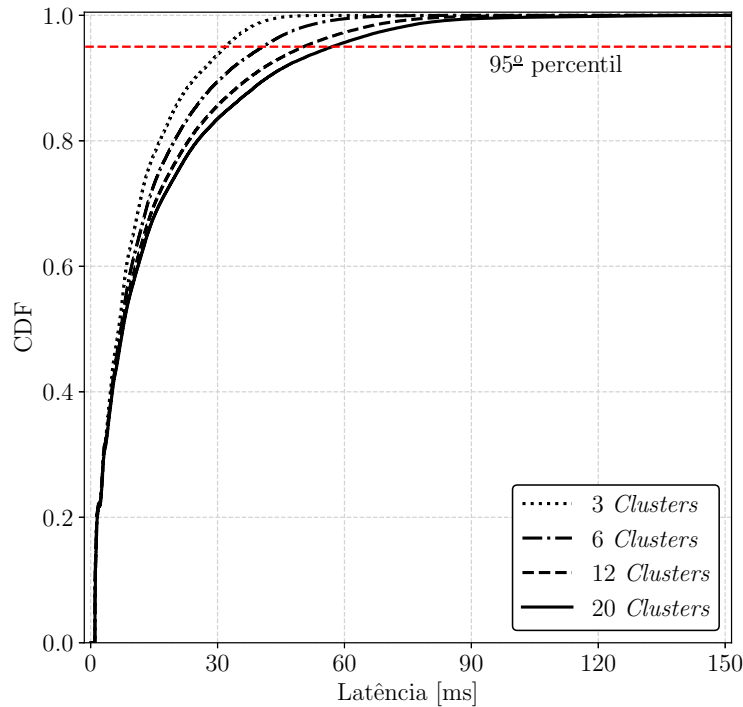
Uma vez que a designação de prioridade no mecanismo de *backoff* é eficiente para diminuir a latência da rede, os próximos resultados foram obtidos sempre considerando esse mecanismo. A eficiência energética da rede é avaliada por meio da CDF das potências recebidas pelos *cluster heads* da rede. A Figura 13 mostra a CDF da potência recebida pelos *cluster heads* em cenários onde os nós são clusterizados em setores e em um segundo momento, por *K-Means*.

Nesse resultado, vemos que os níveis de potências recebidos pelos *cluster heads* no cenário clusterizado pela técnica *K-Means* são até 3 dB maiores que os recebidos no cenário setorizado. Isso mostra que a eficiência energética é maior quando se trabalha com a técnica proposta. Esse aumento na potência recebida pelos *cluster heads* se dá pelo fato da técnica de clusterização *K-Means* buscar minimizar a distância entre os nós e o centro do *cluster*. Dessa maneira, os nós estão mais próximos de seus *cluster heads* e a transmissão dos pacotes sofre menos efeitos degradantes, logo, o sinal recebido tem menor atenuação. Partindo dessa premissa e da importância da economia de energia nos sistemas atuais, passou-se a trabalhar com adaptação de potência, onde os nós (após um período de sensoria-mento das condições de propagação do canal) transmitem apenas o nível de potência necessário para alcançar o destino.

Considerando os resultados anteriores, constatou-se que as estratégias de contenção e clusterização propostas, quando usadas em conjunto são capazes tanto de diminuir a latência da rede quanto aumentar a eficiência energética. Todos os resultados apresentados então foram obtidos com simula-ções considerando apenas 3 *clusters*. Após esses resultados, o simulador utilizando tanto o mecanismo de *backoff*, que designa prioridade aos nós, quanto a técnica de clusterização de nós *K-Means* foi re-formulado. Dessa maneira, o simulador se tornou capaz de simular redes com um número arbitrário de *clusters*, a fim de avaliar o comportamento das métricas de desempenho estudadas.



Figura 14 – CDF da latência fim a fim do cenário simulado para diferentes números de *clusters*.



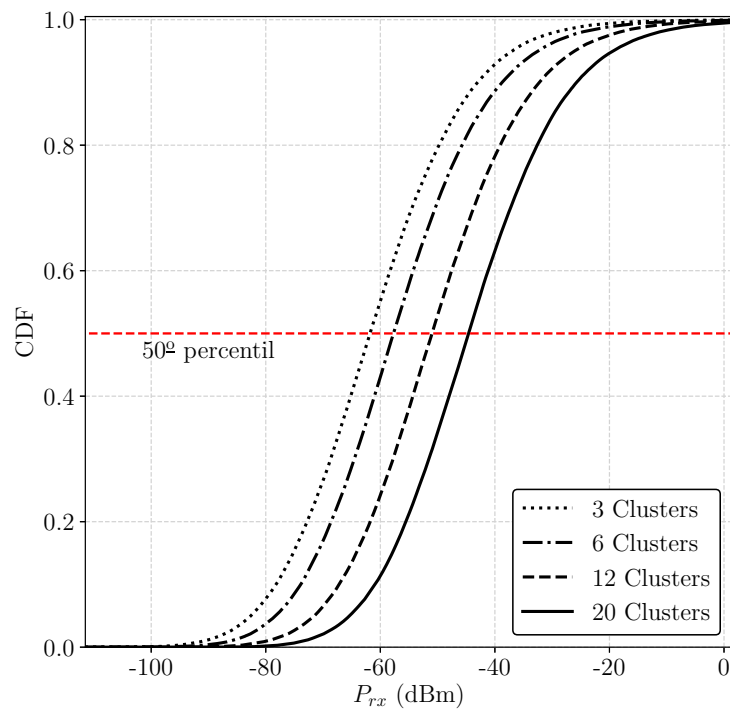
Fonte: Produção do próprio autor.

A Figura 14 mostra a CDF da latência dos nós ao utilizarmos diferentes números de *clusters*. Observa-se que conforme o número de *cluster heads* aumenta, há um aumento considerável na latência da rede. É possível observar um aumento de aproximadamente 30 ms no 95º percentil entre utilizar 3 e 20 *clusters*. Esse resultado se deve ao fato de que quanto maior o número de *clusters*, maior o número de contenções realizadas na rede e consequentemente, maior o número de saltos até que um pacote alcance o nó agregador (ou *sink node*). Os pacotes de todos os nós ficarão aguardando mais tempo nas filas dos clusters e terão que passar por mais filas, isso aumentará consideravelmente a latência da rede. Portanto, o uso de um número alto de *clusters* não é favorável à latência da rede, pois além de aumentar a latência dos nós, aumenta a probabilidade de perda de pacote devido a um tempo muito longo de espera nas filas.

No que diz respeito a eficiência energética da rede para um número arbitrário de clusters, a Figura 15 mostra a CDF das potências recebidas pelos *cluster heads*. Diferente da latência, quanto maior o número de *clusters*, melhor a eficiência energética da rede. É possível observar um ganho em torno de 15 dB entre utilizar 3 e 20 *clusters*. Ao elevar-se o número de *clusters* dentro da área de implementação da rede, cada cluster tem um tamanho menor, ou seja, os nós ficam mais próximos aos seus *cluster heads*. Essa maior proximidade aumenta os níveis de potência recebidos pelo *cluster head* e aumenta a eficiência energética da rede. Embora aumentar o número de *clusters* aumente a eficiência energética da rede, deve-se observar que com isso, nós muito próximos, mas de *clusters* diferentes, podem realizar transmissão simultânea aos seus respectivos *cluster heads* e terem alto nível de interferência, o que ocasionará na perda dos pacotes.

Por fim, pode se afirmar que aumentar o número de *clusters* em uma rede aumenta tanto a latência quanto a eficiência energética da rede. A partir disso, cria-se um compromisso entre o número de

Figura 15 – CDF potências recebidas pelos *cluster heads* do cenário simulado para diferentes números de *clusters*.



Fonte: Produção do próprio autor.

*clusters*, a latência e a eficiência energética da rede. Dependendo dos requerimentos de determinada rede, tem-se um número de *clusters* que pode satisfazê-los. Esse compromisso viabiliza que redes auto-organizáveis determinem o número de *clusters* e clusterize os nós de acordo com a necessidade naquele instante.

## 5 CONCLUSÕES

Estratégias para viabilizar o regime de Comunicação de Baixa Latência e Ultra Confiável diminuindo a latência e aumentando a eficiência energética foram estudadas. O desempenho de sistemas que designam prioridades aos nós no cálculo do tempo de *backoff* foi calculado e comparado com o de sistemas que não designam prioridade. Ambos os sistemas foram simulados em cenários com clusterização de nós em setores e utilizando a técnica *K-Means*, implementada através de um algoritmo em *Python* da biblioteca de aprendizagem de máquina *scikit-learn*. O método de múltiplos saltos utilizado pelas redes em estudo segue a hierarquia de redes M2M.

Sistemas que usam o algoritmo de *backoff* organizam os dispositivos para efetuar a transmissão, ou seja, resolvem o problema da contenção. Ainda assim, alguns dispositivos que requerem latência baixa para operarem de acordo com os requerimentos de sua aplicação ainda apresentam tempo de latência elevado. Já nas simulações em que a regra de tempo de *backoff* com prioridade foi utilizada, dispositivos com prioridade tiveram tempo de latência consideravelmente menor que dispositivos sem prioridade. Dessa maneira, fica claro que essa estratégia é válida para diminuir o tempo de latência na comunicação entre máquinas.

A clusterização em setores é eficaz para organizar a contenção e atender a hierarquia de redes proposta, mas ao utilizar o algoritmo de clusterização *K-Means* há um ganho de até 3 dB na eficiência energética dos cenários analisados quando se utiliza adaptação de potência nos nós ativos. Constatou-se ainda que a técnica de clusterização utilizada não interfere na latência da rede e apenas na eficiência energética. Sendo assim, ao combinar as técnicas de *backoff* com prioridade e clusterização *K-Means*, garante-se dois dos principais requisitos da comunicação ultra confiável entre máquinas.

Ao estender-se o simulador para diferentes números de *clusters* usando as duas estratégias propostas, verificou-se que nesses cenários existe um compromisso entre o número de *clusters*, a latência e a eficiência energética da rede. Quanto maior o número de *clusters*, maior a latência e maior a eficiência energética da rede. Em redes auto-organizáveis é possível que a própria rede defina o número de *clusters* a serem utilizados de acordo com seus requisitos de latência e eficiência energética.

## REFERÊNCIAS

- [1] M. Olsson, C. Cavdar, P. Frenger, S. Tombaz, D. Sabella, and R. Jantti, “5GrEEen: Towards Green 5G mobile networks,” in *Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob), 2013 IEEE 9th International Conference on*. IEEE, 2013, pp. 212–216.
- [2] A. Osseiran, F. Boccardi, V. Braun, K. Kusume, P. Marsch, M. Maternia, O. Queseth, M. Schellmann, H. Schotten, H. Taoka *et al.*, “Scenarios for 5g mobile and wireless communications: the vision of the metis project,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 5, pp. 26–35, 2014.
- [3] “The Metis2020 project – laying the foundation of 5G,” [Online]. Available: [www.metis2020.com](http://www.metis2020.com).
- [4] J. Van Dijk, *The network society*. Sage Publications, 2012.
- [5] H. Shariatmadari, R. Ratasuk, S. Iraji, A. Laya, T. Taleb, R. Jäntti, and A. Ghosh, “Machine-type communications: current status and future perspectives toward 5G systems,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 53, no. 9, pp. 10–17, 2015.
- [6] J. A. Thomas and T. M. Cover, *Elements of information theory*. John Wiley & Sons, 2006.
- [7] I. Park, D. Kim, and D. Har, “MAC achieving low latency and energy efficiency in hierarchical M2M networks with clustered nodes,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 15, no. 3, pp. 1657–1661, 2015.
- [8] W. S. Souza and C. H. M. Lima, “Estratégia de Backoff Com Prioridade em Sistemas Hierárquicos de Comunicação entre Máquinas,” in *Proc. XXXV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais - SBrT 2017*, 2017, pp. 776–777.
- [9] K. Ashton, “That ‘internet of things’ thing,” *RFiD Journal*, vol. 22, no. 7, pp. 97–114, 2009.
- [10] S. D. T. Kelly, N. K. Suryadevara, and S. C. Mukhopadhyay, “Towards the implementation of iot for environmental condition monitoring in homes,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 13, no. 10, pp. 3846–3853, 2013.
- [11] A. A. Loureiro, J. M. S. Nogueira, L. B. Ruiz, R. A. d. F. Mini, E. F. Nakamura, and C. M. S. Figueiredo, “Redes de sensores sem fio,” in *Proc. Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores*, vol. 21, 2003, pp. 19–23.
- [12] C. Stamford, “Garner’s 2015 hype cycle for emerging technologies identifies the computing innovations that organizations should monitor,” 2015.
- [13] H. Chaouchi, *The internet of things: connecting objects*. John Wiley & Sons, 2013.
- [14] G. Press, “Internet of things by the numbers: Market estimates and forecasts,” *Forbes, Forbes Media, Jersey City, NJ*, 2014.

- [15] F. Wang, L. Hu, J. Zhou, and K. Zhao, “A survey from the perspective of evolutionary process in the internet of things,” *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 11, no. 3, p. 462752, 2015.
- [16] B. P. Santos, L. Silva, C. Celes, J. B. Borges, B. S. P. Neto, M. A. M. Vieira, L. F. M. Vieira, O. N. Goussevskaia, and A. Loureiro, “Internet das coisas: da teoria a prática,” *Minicursos SBRC-Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*, 2016.
- [17] E. Dutkiewicz, X. Costa-Perez, I. Z. Kovacs, and M. Mueck, “Massive machine-type communications,” *IEEE Network*, vol. 31, no. 6, pp. 6–7, 2017.
- [18] P. Popovski, “Ultra-reliable communication in 5G wireless systems,” in *5G for Ubiquitous Connectivity (5GU), 2014 1st International Conference on*. IEEE, 2014, pp. 146–151.
- [19] M. Frodigh, P. Johansson, and P. Larsson, “Wireless ad hoc networking: the art of networking without a network,” *Ericsson review*, vol. 4, no. 4, p. 249, 2000.
- [20] W. H. Tranter, T. S. Rappaport, K. L. Kosbar, and K. S. Shanmugan, *Principles of communication systems simulation with wireless applications*. Prentice Hall New Jersey, 2004, vol. 1.
- [21] P. Andres-Maldonado, P. Ameigeiras, J. Prados-Garzon, J. Navarro-Ortiz, and J. M. Lopez-Soler, “Narrowband IoT data transmission procedures for massive machine-type communications,” *IEEE Network*, vol. 31, no. 6, pp. 8–15, 2017.
- [22] C. Lima and G. T. F. de Abreu, “Clusterization for robust geographic routing in wireless sensor networks,” in *Wireless Communications and Networking Conference, 2008. WCNC 2008. IEEE*. IEEE, 2008, pp. 2385–2390.
- [23] T. S. Rappaport, *Comunicações sem fio: princípios e práticas*. Pearson Prentice Hall, 2009.
- [24] A. B. Forouzan, *Data communications & networking (sie)*. Tata McGraw-Hill Education, 2007.
- [25] F. Pedregosa, G. Varoquaux, A. Gramfort, V. Michel, B. Thirion, O. Grisel, M. Blondel, P. Prettenhofer, R. Weiss, V. Dubourg *et al.*, “Scikit-learn: Machine learning in python,” *Journal of machine learning research*, vol. 12, no. Oct, pp. 2825–2830, 2011.
- [26] D. Arthur and S. Vassilvitskii, “k-means++: The advantages of careful seeding,” in *Proc. Eighteenth Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms*. Society for Industrial and Applied Mathematics, 2007, pp. 1027–1035.