

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
FACULDADE DE TECNOLOGIA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

MODELO DE COORDENAÇÃO HÍBRIDA MULTI-RAT
PARA OTIMIZAÇÃO DE ENERGIA E QUALIDADE EM
COMUNICAÇÕES D2D EM IOT

Manaus

Abril de 2026



UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
FACULDADE DE TECNOLOGIA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

MODELO DE COORDENAÇÃO HÍBRIDA MULTI-RAT PARA OTIMIZAÇÃO
DE ENERGIA E QUALIDADE EM COMUNICAÇÕES D2D EM IOT

Daniel Frazão Luiz

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, PPGEE, da Universidade Federal do Amazonas, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Orientadores: Celso Barbosa Carvalho

Marcel W. Rocha da Silva

Manaus

Abril de 2026

Ficha Catalográfica

Elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

L953m Luiz, Daniel Frazão
Modelo de coordenação híbrida multi-RAT para otimização de energia e qualidade em comunicações D2D em IoT / Daniel Frazão Luiz. - 2026.
85 f. : il., color. ; 31 cm.

Orientador(a): Celso Barbosa Carvalho.
Coorientador(a): Marcel W. Rocha da Silva.
Tese (doutorado) - Universidade Federal do Amazonas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Manaus, 2026.

1. D2D. 2. LTE. 3. RSSF. 4. Algoritmo Húngaro. 5. Eficiência energética. I. Carvalho, Celso Barbosa. II. Silva, Marcel W. Rocha da. III. Universidade Federal do Amazonas. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. IV. Título



Ministério da Educação
Universidade Federal do Amazonas
Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

FOLHA DE APROVAÇÃO

Poder Executivo Ministério da Educação
Universidade Federal do Amazonas
Faculdade de Tecnologia
Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica

Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Av. General Rodrigo Octávio Jordão Ramos, nº 3.000 - Campus Universitário, Setor Norte - Coroado, Pavilhão do CETELI. Fone/Fax (92) 99271-8954 Ramal:2607. E-mail: ppgee@ufam.edu.br

DANIEL FRAZÃO LUIZ

MODELO DE COORDENAÇÃO HÍBRIDA MULTI-RAT PARA OTIMIZAÇÃO DE ENERGIA E QUALIDADE EM COMUNICAÇÕES D2D NA IOT

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Amazonas, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica na área de concentração Controle e Automação de Sistemas.

Aprovada em 15 de abril de 2026.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Celso Barbosa Carvalho- Presidente
Prof. Dr. Gabriel Matos Araújo - Membro Titular 1 - Externo
Prof. Dr. Edjair de Souza Mota - Membro Titular 2 - Externo
Prof. Dr. Waldir Sabino da Silva Júnior - Membro Titular 3 - Interno
Prof. Dr. Thiago Brito Bezerra - Membro Titular 4 - Interno

Documento assinado eletronicamente

Manaus, 10 de abril de 2026.



Documento assinado eletronicamente por **Celso Barbosa Carvalho, Professor do Magistério Superior**, em 30/04/2026, às 09:28, conforme horário oficial de Manaus, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Thiago Brito Bezerra, Professor do Magistério Superior**, em 04/05/2026, às 12:12, conforme horário oficial de Manaus, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Gabriel Matos Araujo, Usuário Externo**, em 04/05/2026, às 13:58, conforme horário oficial de Manaus, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Waldir Sabino da Silva Júnior, Professor do Magistério Superior**, em 04/05/2026, às 20:48, conforme horário oficial de Manaus, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Edjair de Souza Mota, Professor do Magistério Superior**, em 06/05/2026, às 11:34, conforme horário oficial de Manaus, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufam.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **3109437** e o código CRC **30B38ABF**.

Av. General Rodrigo Octávio Jordão Ramos, nº 3.000 - Bairro Coroado Campus Universitário, Setor Norte
- Telefone: 99271-8954
CEP 69080-900 Manaus/AM - Pavilhão do CETELI. E-mail: ppgee@ufam.edu.br

Referência: Processo nº 23105.011113/2026-13

SEI nº 3109437

*Gostaria de expressar minha
gratidão à minha família, pelo
apoio incondicional e por ser a
base de todas as minhas
conquistas*

Agradecimentos

Primeiramente, agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Celso Barbosa Carvalho, e ao Prof. Marcel W. Rocha da Silva, pela orientação segura, pela paciência e pelos ensinamentos compartilhados ao longo desta jornada. Seus conselhos técnicos e o incentivo constante foram fundamentais para a maturação deste trabalho.

À minha família, por ser o meu porto seguro. Agradeço pelo apoio incondicional e pela compreensão diante das horas de ausência dedicadas a esta pesquisa; sem o suporte de vocês, esta caminhada não seria possível.

Aos meus colegas de curso, pelo auxílio técnico, pelas discussões valiosas e pelo companheirismo demonstrado em cada etapa do trabalho. A jornada tornou-se mais leve graças à colaboração mútua.

Aos meus amigos da Universidade Federal do Amazonas (UFAM), que foram essenciais para manter minha motivação nos momentos de maior dificuldade. A amizade e o apoio encontrados nos corredores da universidade foram fundamentais para que eu não perdesse o foco e a esperança.

Por fim, agradeço a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a conclusão deste doutorado.

Resumo da Tese apresentada à UFAM como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Elétrica

MODELO DE COORDENAÇÃO HÍBRIDA MULTI-RAT PARA OTIMIZAÇÃO DE ENERGIA E QUALIDADE EM COMUNICAÇÕES D2D EM IOT

Daniel Frazão Luiz

Orientadores: Celso Barbosa Carvalho

Marcel W. Rocha da Silva

Programa: Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Redes de Sensores Sem Fio (RSSFs) são fundamentais para o monitoramento ambiental em larga escala no contexto de cidades inteligentes. Nesses cenários, a interconectividade direta entre todos os segmentos da rede e a central de processamento é frequentemente inviabilizada por limitações de alcance e densidade de nós. Uma abordagem robusta consiste na integração entre RSSFs e comunicações Dispositivo a Dispositivo (D2D) assistidas por infraestrutura LTE, permitindo uma orquestração centralizada e eficiente. Esta tese apresenta uma estratégia de comunicação híbrida que utiliza o algoritmo Húngaro (Munkres) para a eleição ótima de líderes de agrupamento (*Cluster Heads*), visando minimizar o consumo energético global. A solução proposta diferencia-se ao enfatizar a manutenção da qualidade de serviço, utilizando o Indicador de Qualidade de Link (LQI) como restrição primária para garantir a integridade de fluxos de vídeo em tempo real. Por meio de simulações em ambiente ns-3, demonstra-se que a abordagem proposta otimiza a vida útil da rede e reduz o consumo de energia total em comparação a arquiteturas puramente *ad-hoc*, validando a eficácia da coordenação assistida na preservação de recursos energéticos e na garantia da confiabilidade sistêmica.

Palavras-chave: D2D, LTE, RSSF, Algoritmo Húngaro, LQI, Eficiência Energética.

Abstract of Thesis presented to UFAM as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor in Electrical Engineering

MULTI-RAT HYBRID COORDINATION MODEL FOR ENERGY AND QUALITY OPTIMIZATION IN D2D COMMUNICATIONS IN IOT

Daniel Frazão Luiz

Advisors: Celso Barbosa Carvalho

Marcel W. Rocha da Silva

Department: Postgraduate in Electrical Engineering

Wireless Sensor Networks (WSNs) are essential for large-scale environmental monitoring in smart city scenarios. In such environments, direct interconnectivity among all network segments and the processing center is often limited by range and node density. A robust approach integrates WSNs with LTE-assisted Device-to-Device (D2D) communications, thereby enabling centralized and efficient orchestration. This thesis presents a hybrid communication strategy that employs the Hungarian algorithm (Munkres) for optimal Cluster Head election, aiming to minimize global energy consumption. The proposed solution is distinguished by its emphasis on Quality of Service (QoS), using the Link Quality Indicator (LQI) as a primary constraint to ensure the integrity of real-time video streams. Through ns-3 simulations, it is demonstrated that the proposed approach optimizes network lifetime and reduces total energy consumption compared to purely ad-hoc architectures, validating the effectiveness of assisted coordination in preserving energy resources and ensuring systemic reliability.

Keywords: D2D, LTE, WSN, Hungarian Algorithm, LQI, Energy Efficiency.

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Objetivos	3
1.1.1	Objetivo Geral	3
1.1.2	Objetivos Específicos	3
1.2	Contribuições	4
1.3	Motivação e Justificativa	5
1.4	Organização da Tese	6
2	Fundamentação Teórica	7
2.1	Comunicação D2D e Paradigmas de Redes Sem Fio	7
2.1.1	Classificação quanto ao Espectro e Interação com a Rede . . .	8
2.1.2	Ganhos Tecnológicos e Operacionais em RSSF	9
2.2	Arquitetura do Sistema LTE e Fundamentos da Coexistência Multi-RAT	10
2.2.1	O Sistema EPS: Integração entre E-UTRAN e EPC	10
2.2.2	Camada Física e Eficiência Energética: O papel do SC-FDMA	11
2.2.3	Estratégias de Coexistência Híbrida Multi-RAT	12
2.3	Agrupamentos (Clusters) e Algoritmos de Otimização	12
2.3.1	Paradigmas de Agrupamento e Particionamento de Grafos . .	13
2.3.2	O Algoritmo Húngaro (Kuhn-Munkres) para Atribuição Ótima	14
2.3.3	Disseminação Adaptativa e o Algoritmo PPUA	15
2.3.4	Roteamento Adaptativo e Caminhos Mínimos em Redes D2D .	16
2.4	Componentes do Padrão 802.11g e Integração Multi-RAT (WiFi+LTE)	17
2.5	Métricas de Desempenho e Qualidade de Serviço	18
2.5.1	Modelo de Consumo Energético Multi-RAT	18

2.5.2	Indicador de Qualidade de Link (LQI)	19
2.5.3	Métricas de Confiabilidade: PR, Perda de Pacotes e Média de Saltos	19
3	Trabalhos Relacionados	21
3.1	Comunicação D2D e Gerenciamento de Recursos	21
3.2	Arquiteturas Multi-RAT e Convergência Celular-Local	22
3.2.1	Integração LTE/5G e Redes IEEE 802.11	22
3.2.2	Desacoplamento de Planos de Controle e de Dados	22
3.2.3	Taxonomia: Comunicação In-band vs. Out-band	23
3.3	Agrupamentos (Clustering) e Eleição de Líderes em RSSF	23
3.3.1	Protocolos Hierárquicos Estocásticos vs. Determinísticos	24
3.3.2	O Algoritmo Húngaro Aplicado a Redes de Sensores	24
3.4	Controle de Topologia e Disseminação de Dados	25
3.4.1	Algoritmos de Crescimento de Árvores de Disseminação	25
3.4.2	O Algoritmo PPUA e a Função de Utilidade	26
3.4.3	Desafios do Roteamento Multissalto em Cenários IoT Dinâmicos	26
3.5	Qualidade de Serviço e Transmissão Multimídia	27
3.5.1	Métricas de Confiabilidade e o Papel do LQI	27
3.5.2	Comunicações de Ultra-baixa Latência (URLLC) e Computação de Borda	28
3.6	Síntese e Comparativo dos Trabalhos Relacionados	29
3.6.1	Identificação de Lacunas na Literatura	29
3.6.2	Quadro Comparativo de Soluções	29
3.6.3	Posicionamento da Proposta	30
4	Modelo Proposto e Metodologia	31
4.1	O Modelo Proposto: Coordenação Híbrida D2D-LTE	32
4.1.1	Formalização e Definições	33
4.1.2	Algoritmo de Coordenação Munkres-LTE	33
4.1.3	Hipóteses do Modelo	34
4.1.4	Fluxo de trabalho do algoritmo proposto	34
4.1.5	Eleição do Cluster Head	36

4.1.6	Análise de Sensibilidade: Ponderação entre Energia, Distância e LQI	37
4.2	Arquitetura do Nó Multi-RAT no Simulador ns-3	38
4.2.1	Coordenação Cross-Layer e Fluxo de Decisão	39
4.3	Implementação e Integração do Módulo de Energia em Cenários LTE	40
4.3.1	Arquitetura do Modelo de Energia Híbrido	40
4.3.2	Configuração do Radio Energy Model para Wi-Fi	41
4.4	Cenário de Simulação	41
4.4.1	Cenário de Simulação Wi-Fi	44
4.4.2	Cenário de Simulação LTE	45
4.5	Implementação no Simulador ns-3	47
4.5.1	Desenvolvimento do Modelo de Energia para a Interface LTE	47
4.5.2	Estrutura de Dados e Orquestração Multi-RAT	48
4.5.3	Modelagem Energética Customizada e Integração da Pilha LTE no ns-3	48
4.5.4	Especificação Técnica da Classe EventHeader no ns-3	50
5	Resultados e Discussões	52
5.1	Cenário Base: Transmissão Exclusiva via LTE	53
5.2	Cenário Alternativo: Transmissão Exclusiva via Wi-Fi	56
5.2.1	Avaliação do Consumo Energético	56
5.2.2	Análise de Confiabilidade: Taxa de Perda de Pacotes	58
5.3	Modelo Proposto: Coordenação Híbrida (D2D-LTE)	60
5.3.1	Avaliação do Consumo Energético	60
5.3.2	Análise de Confiabilidade: Taxa de Perda de Pacotes (D2D-LTE)	62
5.4	Síntese Comparativa e Discussão dos Resultados	64
5.4.1	Análise Comparativa de Consumo Energético	65
5.4.2	Análise Comparativa de Confiabilidade (Perda de Pacotes)	67
6	Conclusões	70
6.1	Trabalhos Futuros	72
	Referências Bibliográficas	74

A	Publicações	84
A.1	Artigos publicados	84
A.2	Posters Publicados	84
A.3	Outras Publicações	85

Lista de Figuras

2.1	Áreas de aplicação da Comunicação D2D: do descarregamento (<i>offloading</i>) de tráfego a serviços de segurança. Fonte: Adaptado de [1]	8
2.2	Paradigmas de Agrupamento: Impacto da quantidade de clusters (q) na complexidade de gerenciamento e escalabilidade. Fonte: [2]	13
2.3	Fluxo de Otimização via Algoritmo Húngaro: Núcleo de decisão assistido pela rede celular para atribuição de líderes D2D. Fonte: Elaborada pelo autor.	14
2.4	Integração Multi-RAT: (a) Pilha de Protocolos IEEE 802.11g e (b) Arquitetura Integrada com Controle LTE e Dados WiFi. Fonte: Adaptado pelo autor.	18
4.1	Um modelo de rede D2D híbrida que utiliza clusters e diferentes formas de transmissão.	32
4.2	Fluxograma do protocolo proposto	35
4.3	Fluxograma do Cenário Wi-Fi	45
4.4	Fluxograma do Cenário LTE-Puro	46
5.1	Consumo médio de energia na rede por número de nós e eventos - Comparativo Global LTE.	53
5.2	Consumo Energético LTE para o cenário com Raio de Detecção de 50m.	54
5.3	Consumo Energético LTE para o cenário com Raio de Detecção de 100m.	54
5.4	Média de Perda de Pacotes por densidade de nós e volumetria de eventos - Cenário LTE.	55

5.5	Consumo médio de energia na rede por número de nós e eventos - Cenário WiFi-Puro.	56
5.6	Consumo médio de energia por número de nós e eventos (ER: 50m) - WiFi.	57
5.7	Consumo médio de energia por número de nós e eventos (ER: 100m) - WiFi.	57
5.8	Taxa média de perda de pacotes (%) por número de nós e eventos - WiFi.	58
5.9	Taxa de perda de pacotes por número de nós e eventos (ER: 50m) - WiFi.	59
5.10	Taxa de perda de pacotes por número de nós e eventos (ER: 100m) - WiFi.	59
5.11	Consumo médio de energia na rede por número de nós e eventos - Cenário D2D-LTE.	60
5.12	Consumo médio de energia para o cenário D2D-LTE com Raio de Detecção de 50m.	61
5.13	Consumo médio de energia para o cenário D2D-LTE com Raio de Detecção de 100m.	62
5.14	Visão geral da taxa média de perda de pacotes (%) por número de nós e eventos - Cenário D2D-LTE.	63
5.15	Taxa de perda de pacotes por número de nós e eventos (ER: 50m) - D2D-LTE.	63
5.16	Taxa de perda de pacotes por número de nós e eventos (ER: 100m) - D2D-LTE.	64
5.17	Comparativo de consumo energético (50 eventos, ER: 100m) - Wi-Fi vs. LTE vs. Híbrido.	65
5.18	Comparativo de consumo energético (150 eventos, ER: 100m) - Wi-Fi vs. LTE vs. Híbrido.	66
5.19	Comparativo de consumo energético (300 eventos, ER: 100m) - Wi-Fi vs. LTE vs. Híbrido.	66
5.20	Comparativo de taxa de perda de pacotes (50 eventos, ER: 100m) — Wi-Fi vs. LTE vs. Híbrido.	67

5.21	Comparativo de taxa de perda de pacotes (150 eventos, ER: 100m)	
	— Wi-Fi vs. LTE vs. Híbrido.	68
5.22	Comparativo de taxa de perda de pacotes (300 eventos, ER: 100m)	
	— Wi-Fi vs. LTE vs. Híbrido.	68

Lista de Tabelas

2.1	Comparativo entre as modalidades In-band e Out-band em redes D2D	9
2.2	Comparativo de tecnologias de comunicação para cenários IoT e D2D	11
2.3	Comparativo entre algoritmos de eleição de líderes e agrupamento . .	15
3.1	Comparativo técnico horizontal: Estado da arte versus proposta desta tese	30
4.1	Parâmetros gerais do cenário de simulação	43
4.2	Parâmetros da interface de rede LTE	43
4.3	Parâmetros da interface Wi-Fi e perfil de tráfego D2D	44

Lista de Siglas

5G Fifth Generation (Quinta Geração de redes móveis).

6G Sixth Generation (Sexta Geração de redes móveis).

AES Advanced Encryption Standard (Padrão de Criptografia Avançado).

AP Access Point (Ponto de Acesso).

BS Base Station (Estação Base).

CCTV Closed-Circuit Television (Circuito Fechado de Televisão).

CH Cluster Head (Nó Central / Líder de Cluster).

CSMA/CA Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance (Acesso Múltiplo com Sensoriamento de Portadora e Prevenção de Colisões).

D2D Device-to-Device (Dispositivo-a-Dispositivo).

dB_i Decibels Isotropic (Decibéis Isotrópicos).

dB_m Decibels relative to one milliwatt (Decibéis em relação a um milliwatt).

DRL Deep Reinforcement Learning (Aprendizado por Reforço Profundo).

EB Estação Base.

EH Energy Harvesting (Colheita de Energia).

eNB / eNodeB Evolved Node B (Estação Base da rede LTE).

EPC Evolved Packet Core (Núcleo de Pacotes Evoluído).

ER Event Range (Raio de Detecção de Eventos).

FSPL Free Space Path Loss (Perda de Caminho do Espaço Livre).

IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers (Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos).

IoT Internet of Things (Internet das Coisas).

ISM Industrial, Scientific, and Medical (Industrial, Científico e Médico).

LoRa Long Range (Longo Alcance).

LPWAN Low Power Wide Area Network (Rede de Longo Alcance e Baixa Potência).

LQI Link Quality Indicator (Indicador de Qualidade de Link).

LTE Long-Term Evolution (Evolução de Longo Prazo).

MAC Media Access Control (Controle de Acesso ao Meio).

mJoule Millijoule (Milijoule).

Multi-RAT Multiple Radio Access Technology (Tecnologia de Acesso por Múltiplas Rádios).

mWatt Milliwatt (Miliwatt).

NR New Radio (Novo Rádio - Padrão 5G).

ns-3 Network Simulator 3 (Simulador de Redes 3).

OFDM Orthogonal Frequency Division Multiplexing (Multiplexação por Divisão de Frequência Ortogonal).

PER Packet Error Rate (Taxa de Erro de Pacote).

QoS Quality of Service (Qualidade de Serviço).

RACH Random Access Channel (Canal de Acesso Aleatório).

RF Radio Frequency (Radiofrequência).

RRC Radio Resource Control (Controle de Recursos de Rádio).

RSSF Redes de Sensores Sem Fio.

RX Reception (Recepção).

SNR Signal-to-Noise Ratio (Relação Sinal-Ruído).

TX Transmission (Transmissão).

UAV Unmanned Aerial Vehicle (Veículo Aéreo Não Tripulado / Drone).

UDP User Datagram Protocol (Protocolo de Datagrama do Usuário).

UE User Equipment (Equipamento de Usuário / Terminal Móvel).

URLLC Ultra-Reliable Low-Latency Communications (Comunicações Ultraconfiáveis e de Baixa Latência).

V2X Vehicle-to-Everything (Comunicação Veicular para Tudo).

Wi-Fi Wireless Fidelity (Fidelidade Sem Fio).

WLANs Wireless Local Area Networks (Redes Locais Sem Fio).

Lista de Símbolos

C_{ij} Elemento da matriz de custo que quantifica a atribuição do nó i à tarefa de liderança j .

D Quantidade total de dados de vídeo recebidos.

ER Raio de detecção de eventos (*Event Range*).

E_{Idle} Consumo de energia em estado ocioso (*Idle*).

E_{RX} Consumo de energia no estado de recepção.

E_{TX} Consumo de energia no estado de transmissão.

E_{max} Energia máxima ou nominal da bateria do nó sensor.

E_{res} Energia residual da bateria em Joules.

G_r Ganho da antena receptora.

G_t Ganho da antena transmissora.

K Dimensão correspondente ao número de tarefas de liderança na matriz de custo.

LQI *Link Quality Indicator* (Indicador de Qualidade de Link).

L_0 Perda de propagação de referência no modelo de distância logarítmica.

M Número total de eventos estocásticos gerados na simulação.

N Número total de nós candidatos no *cluster* ou dimensão da matriz de custo.

P Potência em miliwatts.

PER Taxa de Erro de Pacote (*Packet Error Rate*).

PL Perda de percurso (*Path Loss*).

P_r Potência recebida.

P_t Potência transmitida.

P_{harv} Potência obtida via fontes externas de colheita de energia (*Energy Harvesting*).

P_{tx} Potência de transmissão.

RX_{LTE} Custo energético fixo de recepção na interface LTE.

S Intensidade do sinal.

SNR Relação Sinal-Ruído (*Signal-to-Noise Ratio*).

T Duração da transmissão.

TX_{LTE} Custo energético fixo de transmissão na interface LTE.

γ Limiar de sensibilidade do receptor.

λ Fator de correção ou ajuste.

$\mathbf{C}$ Matriz de custo global calculada pela eNodeB.

$\mathcal{N}$ Conjunto total de nós sensores na rede.

$\mathcal{P}$ Conjunto de localizações espaciais dos nós sensores.

π Constante pi.

c Consumo de energia adicional constante.

d Distância euclidiana genérica entre dispositivos.

d_0 Distância de referência.

$d_{i,j}$ Distância euclidiana específica entre o nó i e a tarefa/líder j .

d_{max} Distância máxima utilizada para normalização na matriz de custo.

f Frequência do sinal em Hertz.

ls Perda do sistema.

n Expoente de perda de percurso (*Path Loss Exponent*).

n_i Nó sensor i pertencente ao conjunto $\mathcal{N}$.

rd_C Coeficiente de consumo de energia na transmissão de dados em redes celulares.

rd_{WiFi} Coeficiente de consumo de energia na transmissão de dados em Wi-Fi.

rt_C Coeficiente de potência para circuito de transmissão em redes celulares.

rt_{WiFi} Coeficiente de potência para circuito de transmissão em Wi-Fi.

w_d Peso atribuído ao critério de distância na função de custo.

w_e Peso atribuído ao critério de energia residual na função de custo.

Capítulo 1

Introdução

Anualmente, as redes de comunicação sem fio evoluem, e com as redes celulares a Internet das Coisas (IoT) ganhou impulso em direção a uma realidade tangível. Um elemento essencial para o sucesso da IoT é o avanço da tecnologia 5G e sua evolução para padrões de altíssima densidade. Além disso, tecnologias complementares, como as redes dispositivo a dispositivo (D2D), podem aprimorar de forma colaborativa a Qualidade de Serviço (QoS), a experiência do usuário e reduzir o consumo de energia [3]. A interação entre essas redes pode variar de acordo com as necessidades específicas da aplicação. Em cenários críticos, a comunicação D2D auxilia na mitigação do congestionamento da rede, expande a cobertura em áreas de sinal fraco, como regiões rurais ou ambientes internos e aprimora a QoS ao permitir que os dispositivos compartilhem dados diretamente entre si.

A comunicação D2D permite que dispositivos se comuniquem sem a necessidade constante de tráfego de dados através de uma rede central intermediária [4]. No entanto, estabelecer conexões D2D híbridas (utilizando Wi-Fi e LTE/5G) apresenta desafios complexos de roteamento e gerenciamento de recursos. Uma solução consolidada para este problema é a criação de *clusters* (agrupamentos). Nesta abordagem, um líder local (*Cluster Head* - CH) é eleito para coordenar os demais nós e encaminhar pacotes. A eleição deste líder é baseada em múltiplos atributos, como energia residual, distância até a Estação Base (*Base Station* - BS) e a qualidade do enlace.

Alguns estudos propõem o uso de redes híbridas que combinam a tecnologia celular com comunicação D2D hierárquica [5], com o objetivo de otimizar o consumo

de energia. Esta tese adota o princípio da coordenação assistida pela infraestrutura, ajustando dinamicamente as potências de transmissão com base na distância e na integridade dos enlaces, resultando em uma redução significativa do consumo energético. Diferente de abordagens puramente *ad-hoc*, a comunicação aqui proposta utiliza a abrangência da rede celular para orquestrar os enlaces D2D, especialmente quando a potência de um dispositivo atinge limiares que inviabilizam a comunicação direta de longa distância.

Para a determinação do CH ideal, esta tese utiliza o algoritmo Húngaro (Munkres) para resolver o problema de atribuição linear de forma ótima [6, 7]. No modelo proposto, essa abordagem é aplicada em um cenário Multi-RAT, no qual a escolha do CH é governada por uma função de custo que pondera a energia residual da bateria e a distância relativa à BS. Essa formulação permite que o plano de controle LTE realize a otimização de forma centralizada, reduzindo o esforço computacional dos nós sensores.

Na literatura, a análise de sensibilidade do receptor aplicada a modelos de propagação log-distância é frequentemente utilizada para determinar o alcance máximo de comunicação [8]. No presente trabalho, desenvolve-se um modelo de otimização que identifica a potência de transmissão mais adequada para várias distâncias, assegurando que o receptor opere dentro de limites de sensibilidade específicos para manter a confiabilidade do sistema.

O *Link Quality Indicator* (LQI) é uma métrica fundamental em redes sem fio para quantificar a qualidade do enlace [9]. Essa métrica desempenha um papel crucial em garantir comunicações eficientes e estáveis [10]. Nesta tese, o LQI é utilizado como o principal critério de decisão para a manutenção da qualidade de transmissão, definindo limites operacionais para cada nível de potência utilizado nas comunicações D2D.

Esta tese de doutorado apresenta e avalia o desempenho de uma arquitetura de rede híbrida onde a comunicação D2D complementa a rede celular sob coordenação centralizada. O objetivo central é a maximização da eficiência energética por meio de estratégias adaptativas, assegurando a estabilidade do LQI necessária para a transmissão contínua de dados em cenários de monitoramento inteligente.

1.1 Objetivos

A presente tese de doutorado tem como foco o desenvolvimento de uma arquitetura de rede híbrida (LTE e Wi-Fi) sob coordenação centralizada para a otimização do tráfego de *uplink* em cenários de alta densidade. O trabalho aborda o compromisso entre a eficiência energética e QoS, pretendendo viabilizar a transmissão de fluxos de vídeo em dispositivos de monitoramento e sensores no contexto de cidades inteligentes.

Diferentemente de abordagens puramente distribuídas, propõe-se uma coordenação na qual a rede celular subsidia a formação de topologias D2D (*Device-to-Device*) eficientes, garantindo a estabilidade do LQI necessária para aplicações de missão crítica.

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desta tese é propor, implementar e avaliar um modelo de coordenação centralizada para comunicações D2D em cenários IoT, no qual o algoritmo Húngaro é empregado para a otimização da eleição de CH, visando a maximização da vida útil da rede e a preservação do LQI para fluxos de vídeo.

1.1.2 Objetivos Específicos

Para o alcance do objetivo geral, estabeleceram-se os seguintes objetivos específicos:

- **Proposição e avaliação** de um modelo de atribuição ótima baseado no algoritmo de Kuhn-Munkres, integrado ao plano de controle LTE, para a eleição de CHs que equilibre a energia residual dos nós e a distância geométrica;
- **Desenvolvimento e implementação** de uma estrutura de telemetria customizada (*EventHeader*) para o simulador ns-3, permitindo a troca de informações de estado (energia e LQI) entre a camada de aplicação e a estação base (eNodeB);
- **Análise de estratégias adaptativas** de seleção de líderes e formação de clusters, visando minimizar o impacto energético global das transmissões D2D

sem violar os requisitos de continuidade do tráfego de vídeo;

- **Validação e comparação** da arquitetura proposta frente a arquiteturas de acesso direto (*LTE Only*) e redes *ad-hoc* convencionais (*Wi-Fi Only*), analisando o ganho de desempenho em cenários de alta densidade.

1.2 Contribuições

As contribuições da presente tese de doutorado encontram-se elencadas a seguir:

- **Proposição de um Modelo de Coordenação Híbrida:** O desenvolvimento e a avaliação de um modelo de atribuição ótima fundamentado no algoritmo Húngaro (Kuhn-Munkres). Este modelo opera integrado ao plano de controle LTE para coordenar a eleição de líderes (*Cluster Heads*), ponderando simultaneamente a energia residual dos dispositivos, a distância entre eles e o LQI;
- **Implementação de Telemetria Customizada no ns-3:** A criação de uma estrutura de telemetria computacional específica, incorporada ao simulador de redes ns-3. Essa estrutura viabiliza a troca contínua de informações de estado, especificamente níveis de energia e LQI, entre a camada de aplicação dos sensores e a estação base.
- **Desenvolvimento de Estratégias Adaptativas com Foco em QoS:** A análise e formulação de métodos de coordenação Multi-Rat projetados para minimizar o consumo energético global das transmissões D2D. A estratégia possui o diferencial de respeitar estritamente os requisitos de continuidade do tráfego multimídia (vídeo), utilizando o LQI como métrica restritiva para garantir a qualidade de serviço.
- **Validação Experimental e Análise Comparativa:** A validação prática do modelo arquitetural proposto por meio do seu confronto direto com topologias puramente centralizadas homogêneas como (*LTE*) e redes *ad-hoc* totalmente descentralizadas (*Wi-Fi Only*). A análise mostra ganhos sistêmicos de desempenho da solução híbrida, sugerindo eficiência energética e menor taxa de perda de pacotes em cenários de alta densidade de dispositivos.

1.3 Motivação e Justificativa

A ascensão das cidades inteligentes impulsionou a adoção massiva de RSSF para aplicações de segurança pública e monitoramento ambiental [11]. No entanto, o cenário atual de IoT enfrenta um desafio crítico no que diz respeito à gestão do tráfego massivo de *uplink*, particularmente em sistemas de videomonitoramento (CCTV) baseados em sensores de alta definição [4]. Diferentemente de sensores de telemetria convencionais, as câmeras de vigilância geram fluxos de dados contínuos que exigem alta largura de banda e estabilidade de conexão. Quando esses dispositivos operam exclusivamente via redes celulares tradicionais, como o LTE, enfrentam um rápido esgotamento de bateria e contribuem para o congestionamento da infraestrutura central em áreas de alta densidade [12].

A transmissão direta de vídeo para a BS em longas distâncias é energeticamente dispendiosa devido à perda de percurso (*path loss*), o que torna a manutenção de um LQI adequado para o fluxo de vídeo um desafio prático severo. Nesse contexto, a literatura aponta que a viabilização de sistemas resilientes depende de novos paradigmas, como o uso de comunicações D2D para a descarga de tráfego (*offloading*) e a coordenação *Multi-RAT*, onde o LTE provê o plano de controle e o Wi-Fi o plano de dados [13]. Entretanto, a eficiência dessas soluções híbridas em cenários críticos, como desastres naturais, onde a infraestrutura é intermitente, ou eventos de larga escala, onde o espectro é saturado, necessitando de mecanismos de coordenação que equilibrem previsibilidade com economia de energia.

Diante dessa complexidade, a motivação desta tese reside na necessidade de otimizar a vida útil de nós sensores de imagem através de uma coordenação centralizada. De forma alternativa das abordagens estocásticas comuns na literatura em redes de sensores, propõe-se o uso do algoritmo Húngaro para a eleição CH, garantindo que a formação da rede D2D seja otimizada para preservar a energia residual e garantir um LQI acima de 200. Este valor é definido nesta pesquisa como o nível crítico para assegurar a confiabilidade da transmissão de vídeo. Assim, a justificativa deste trabalho fundamenta-se na proposição de uma arquitetura que sustente a conectividade e QoS mesmo sob estresse de rede, tornando o monitoramento inteligente tecnicamente robusto e energeticamente sustentável para aplicações críticas.

1.4 Organização da Tese

Esta tese está estruturada em seis capítulos principais, organizados de forma a conduzir o leitor desde a fundamentação teórica até a validação experimental do modelo proposto:

- **Capítulo 1 - Introdução:** Apresenta a contextualização do problema, as motivações relativas ao videomonitoramento em cenários IoT, os objetivos geral e específicos, além das principais contribuições científicas deste trabalho.
- **Capítulo 2 - Fundamentação Teórica:** Provê a base conceitual sobre comunicações D2D, o sistema LTE, coexistência Multi-RAT, algoritmos de agrupamento e métricas de desempenho como o LQI.
- **Capítulo 3 - Trabalhos Relacionados e Contextualização Multi-RAT:** Apresenta um levantamento do estado da arte, analisando lacunas na literatura e comparando a proposta desta tese com soluções existentes voltadas para eficiência energética e QoS.
- **Capítulo 4 - Modelo Proposto e Metodologia:** Descreve detalhadamente a arquitetura híbrida D2D-LTE, a formalização da eleição de líderes via algoritmo Húngaro e a especificação técnica da classe `EventHeader` no simulador *ns-3*.
- **Capítulo 5 - Resultados e Discussões:** Detalha a avaliação experimental comparando os cenários LTE-Puro, Wi-Fi-Puro e o modelo híbrido proposto, analisando métricas de consumo energético e confiabilidade.
- **Capítulo 6 - Conclusões:** Sintetiza as principais descobertas da pesquisa, valida a hipótese central e aponta diretrizes para trabalhos futuros, incluindo evoluções para redes 6G e mobilidade dinâmica.

Por fim, os elementos pós-textuais incluem a listagem das publicações científicas decorrentes desta pesquisa.

Capítulo 2

Fundamentação Teórica

Este capítulo apresenta o arcabouço teórico necessário para a compreensão e o desenvolvimento do modelo de coordenação híbrida proposto nesta tese. A fundamentação estabelece as bases conceituais que sustentam a integração entre redes celulares e comunicações locais, permitindo uma análise profunda dos mecanismos de otimização de energia e qualidade de serviço.

Inicialmente, exploram-se os paradigmas de comunicação direta e redes de sensores, seguidos pelo detalhamento das tecnologias de acesso Multi-RAT. Adicionalmente, dedica-se uma seção à formalização matemática do Algoritmo Húngaro e aos mecanismos de disseminação baseados em utilidade. Por fim, estabelecem-se as métricas de desempenho que fundamentam a avaliação experimental.

2.1 Comunicação D2D e Paradigmas de Redes Sem Fio

A integração da comunicação D2D configura-se como um elemento essencial no panorama das futuras redes celulares, representando uma evolução disruptiva no modelo tradicional de comunicação hierárquica. Este paradigma permite que terminais em proximidade geográfica estabeleçam enlaces diretos de dados, sem a necessidade mandatória de que o tráfego de usuário transite pelo núcleo da rede (*Core Network*) ou pela estação base (*eNodeB*). Tal abordagem oferece vantagens significativas, como a redução drástica da latência e a redução da sobrecarga de sinalização na infraestrutura celular [12, 14–17].

No cenário de cidades inteligentes e monitoramento crítico, a comunicação D2D viabiliza a conectividade ubíqua mesmo em condições de saturação da infraestrutura principal. A coordenação desses enlaces pode ser realizada de forma assistida pela rede, onde a coordenação é centralizada pelo *eNodeB*, que gerencia a alocação de recursos para mitigar interferências. A diversidade de cenários de aplicação, vai desde a segurança pública até a partilha de conteúdo local, demonstrando a versatilidade desta tecnologia no ecossistema de comunicações móveis [1].

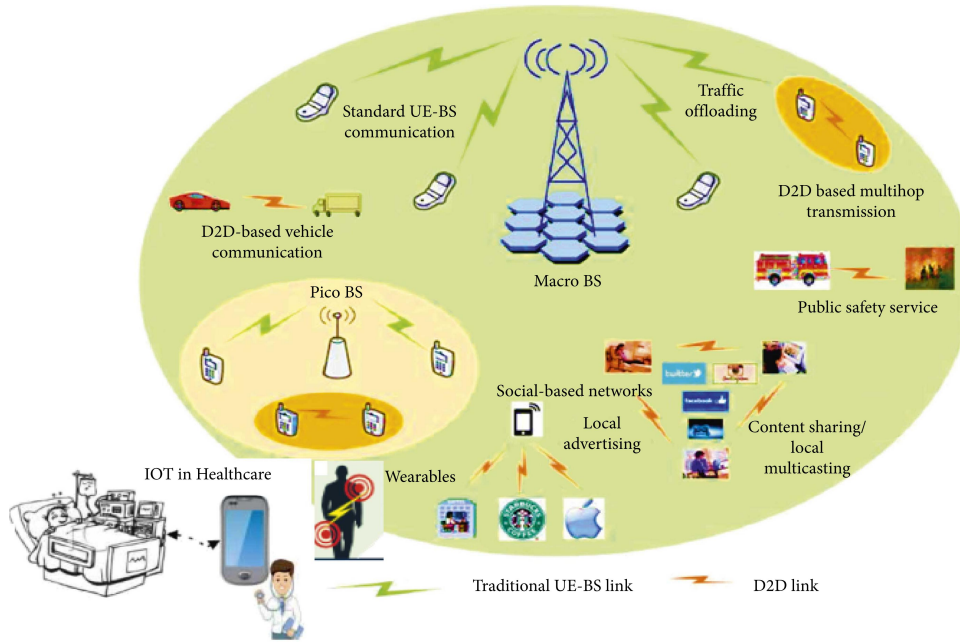


Figura 2.1: Áreas de aplicação da Comunicação D2D: do descarregamento (*offloading*) de tráfego a serviços de segurança. Fonte: Adaptado de [1]

2.1.1 Classificação quanto ao Espectro e Interação com a Rede

A literatura classifica a comunicação D2D primordialmente em duas modalidades, baseadas na faixa de frequência operacional: *In-band* e *Out-band*. No modo *In-band*, a comunicação ocorre no espectro licenciado da operadora, o que permite um controle determinístico de QoS pelo eNodeB, sendo frequentemente explorada para a mitigação de interferências e otimização da eficiência energética na alocação de recursos [18–22].

Já no modo *Out-band*, foco principal desta tese, utilizam-se interfaces secundárias operando em espectro não licenciado, tipicamente nas bandas ISM (como o

Wi-Fi). Esta abordagem elimina a interferência direta com a macrocélula celular [23] e permite o descarregamento massivo de dados multimídia sem consumir os recursos da operadora. A gestão desta interface híbrida e a otimização do compartilhamento de recursos são fundamentais para garantir a eficiência energética do sistema [24], exigindo uma pilha de protocolos capaz de alternar dinamicamente entre as tecnologias de acesso rádio (RAT) conforme a qualidade do canal [25] e a rejeição de interferências fora da banda de operação [26]. Além disso, a eficiência da detecção do espectro torna-se um requisito operacional crítico para evitar colisões em interfaces secundárias [27]. As principais distinções técnicas e os requisitos operacionais entre as modalidades de uso de espectro estão sintetizados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Comparativo entre as modalidades In-band e Out-band em redes D2D

Característica	In-band (LTE/5G)	Out-band (Wi-Fi/BT)
Espectro	Licenciado (Controlado pela operadora).	Não licenciado (Bandas ISM).
Interferência	Crítica entre D2D e macrocélula.	Nula com a rede celular; alta entre vizinhos Wi-Fi.
QoS	Alta e garantida pela infraestrutura.	Melhor esforço; suscetível a ruído.
Custo Espectral	Elevado (recursos caros da operadora).	Gratuito (utiliza bandas livres).
Consumo	Moderado devido à sinalização celular.	Baixo para curtas distâncias; gasto na troca de interface.
Coordenação	Centralizada e orquestrada pela eNodeB.	Autônoma ou Assistida (Híbrida).
Alcance	Longo (até centenas de metros).	Curto (proximidade imediata).
Complexidade	Menor (Interface de rádio única).	Maior (Exige suporte Multi-RAT).

2.1.2 Ganhos Tecnológicos e Operacionais em RSSF

A aplicação do paradigma D2D em RSSF proporciona ganhos fundamentais para a sustentabilidade da rede. O **Ganho de Proximidade** permite que disposi-

tivos próximos comuniquem-se com taxas elevadas e baixíssima potência, dado que a perda de percurso (*path loss*) é significativamente menor em distâncias curtas. Além disso, o **Ganho de Reuso** otimiza a eficiência espectral, permitindo que os mesmos recursos de rádio sejam utilizados simultaneamente por diferentes pares de dispositivos em uma mesma célula [11].

Por fim, o **Ganho de Salto** (*Hop Gain*) viabiliza a extensão de cobertura em cenários críticos. Através do uso de retransmissores (*relays*), dispositivos localizados em áreas de sombra eletromagnética podem alcançar a infraestrutura de rede utilizando saltos curtos e robustos via dispositivos vizinhos. Essa característica é vital para manter a resiliência do sistema em situações de emergência ou em topologias dinâmicas onde a linha de visada direta com a estação base é obstruída [28].

2.2 Arquitetura do Sistema LTE e Fundamentos da Coexistência Multi-RAT

O padrão *Long-Term Evolution* (LTE), consolidado pelo 3GPP a partir da *Release 8* [29], introduziu uma arquitetura baseada integralmente em comutação de pacotes IP. Projetado para prover altas taxas de transmissão e latência reduzida, o LTE evoluiu para além de uma interface de acesso, tornando-se a “âncora de controle” ideal para arquiteturas heterogêneas que operam com múltiplas tecnologias de acesso rádio (*Multi-Radio Access Technology* - Multi-RAT) [30].

A escolha das interfaces de comunicação em cenários de IoT e D2D exige um equilíbrio entre alcance, consumo e vazão. A Tabela 2.2 sintetiza os principais diferenciais técnicos das tecnologias atuais, fundamentando a decisão desta pesquisa pelo uso coordenado de interfaces distintas.

2.2.1 O Sistema EPS: Integração entre E-UTRAN e EPC

A arquitetura LTE, referida tecnicamente como *Evolved Packet System* (EPS), organiza-se em dois domínios complementares: a rede de acesso rádio (*Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network* - E-UTRAN) e o núcleo de rede (*Evolved Packet Core* - EPC). Diferente de gerações legadas, o LTE adota uma topologia plana onde o *eNodeB* (Evolved NodeB) concentra funções críticas de gestão de re-

Tabela 2.2: Comparativo de tecnologias de comunicação para cenários IoT e D2D

Tecnologia	Vantagens	Desvantagens
Wi-Fi (IEEE 802.11)	Elevada taxa de transferência; suporte nativo a fluxos de vídeo.	Alto consumo energético em modo ativo; alcance limitado.
LTE-Advanced	Cobertura ubíqua; gestão de QoS rigorosa e licenciada.	Complexidade de rádio; custo elevado de infraestrutura e espectro.
NB-IoT / LTE-M	Alta penetração; baixo custo de <i>hardware</i> .	Latência variável; largura de banda insuficiente para dados multimídia.
LoRaWAN	Longo alcance (escala de quilômetros); consumo ultra-baixo.	Taxa de dados mínima; incompatível com fluxos contínuos.

curtos rádio, cifragem e compressão de cabeçalhos, eliminando a necessidade de controladores centrais de rádio e reduzindo o atraso no processamento [31].

No escopo do núcleo de rede (EPC), três entidades desempenham papéis vitais para a coordenação de dispositivos IoT e a manutenção da Qualidade de Serviço (QoS) pretendida nesta tese:

- **MME (*Mobility Management Entity*)**: Atua como o principal nó de controle, sendo responsável pela autenticação, sinalização de portadores (*bearers*) e gestão de mobilidade dos sensores.
- **S-GW (*Serving Gateway*)**: Funciona como a âncora de mobilidade local, garantindo a continuidade do tráfego durante a transição entre células.
- **P-GW (*PDN Gateway*)**: Provê a interface com redes externas (Internet), aplicando políticas de QoS para garantir que o tráfego crítico (como vídeo de vigilância) receba prioridade sobre a telemetria convencional [32].

2.2.2 Camada Física e Eficiência Energética: O papel do SC-FDMA

A viabilidade de sensores IoT que transmitem altos volumes de dados reside na eficiência da modulação no enlace de subida (*Uplink*). Enquanto o enlace de

descida (*Downlink*) utiliza o OFDMA para maximizar a flexibilidade, o *Uplink* adota o *Single-Carrier Frequency Division Multiple Access* (SC-FDMA) [33].

Esta decisão técnica é fundamental para a preservação da energia residual dos dispositivos. O SC-FDMA apresenta uma menor Relação de Potência de Pico por Média (*Peak-to-Average Power Ratio* - PAPR) em relação ao OFDMA. Na prática, um PAPR reduzido permite que os amplificadores de potência dos sensores operem de forma linear com menor consumo de corrente, o que estende a vida útil da bateria mesmo durante transmissões intensivas de dados multimídia [34–38].

2.2.3 Estratégias de Coexistência Híbrida Multi-RAT

O modelo de coexistência proposto fundamenta-se na separação lógica dos planos de rede. O LTE é designado como Plano de Controle (*Control Plane*), utilizando sua robustez para coordenar a formação de *clusters* e a descoberta de vizinhos. Em paralelo, a interface Wi-Fi (IEEE 802.11) atua como o Plano de Dados (*User Plane*), realizando o descarregamento do tráfego de alta vazão em distâncias curtas [25].

O eNodeB assume a orquestração desta sinergia, utilizando sinalização de controle para despertar as interfaces Wi-Fi apenas sob demanda. Esta estratégia mitiga o alto consumo decorrente do escaneamento contínuo de redes sem fio, permitindo que os nós sensores mantenham-se em estados de baixo consumo sem comprometer a capacidade de escoamento de dados via comunicações diretas D2D [13, 39–42].

2.3 Agrupamentos (Clusters) e Algoritmos de Otimização

A organização da rede em agrupamentos, ou *clusters*, constitui a pedra angular para viabilizar a escalabilidade e a eficiência energética em RSSF e ecossistemas IoT de alta densidade. Trata-se de uma abordagem arquitetural projetada para superar as limitações físicas dos dispositivos terminais, permitindo que a rede opere de forma hierárquica e coordenada [2].

Nesta estrutura, o particionamento do grafo da rede em subunidades gerenciáveis permite que a carga comunicacional seja distribuída. Ao eleger um nó coordenador, designado como CH, os demais nós periféricos reduzem sua potência de transmissão, uma vez que necessitam apenas alcançar o líder local para encaminhar seus dados. Esta estratégia mitiga o efeito de “funil” próximo à estação base e preserva a energia residual dos dispositivos [33].

2.3.1 Paradigmas de Agrupamento e Particionamento de Grafos

A complexidade da gestão da rede está intrinsecamente ligada à quantidade de agrupamentos formados (q). Como ilustrado na Figura 2.2, existe uma troca (*trade-off*) entre o número de clusters e o esforço computacional de coordenação. Um valor reduzido de q simplifica a sinalização na *eNodeB*, mas pode sobrecarregar os CHs. Inversamente, uma alta densidade de pequenos clusters aumenta a granularidade, mas eleva o *overhead* de sinalização global [2].

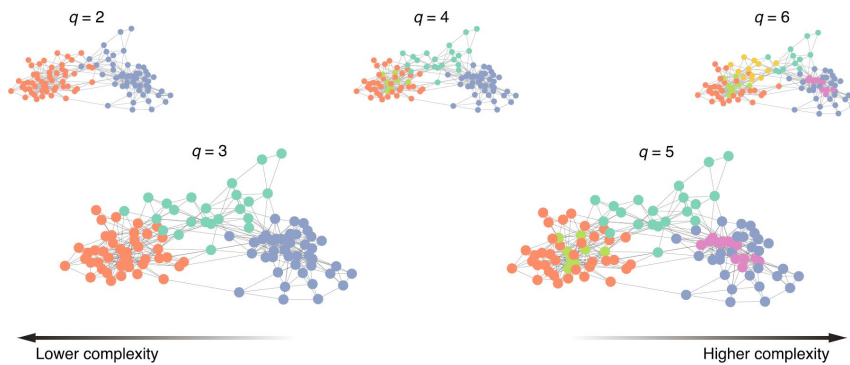


Figura 2.2: Paradigmas de Agrupamento: Impacto da quantidade de clusters (q) na complexidade de gerenciamento e escalabilidade. Fonte: [2]

A arquitetura baseada em clusters permite ainda o suporte a tecnologias de *Edge Computing*. Cabeças de Cluster evoluem para orquestradores de micro-serviços, realizando fusão de dados e filtragem de redundâncias na borda, garantindo que apenas informações estatisticamente relevantes sejam transmitidas via enlaces LTE custosos [31].

2.3.2 O Algoritmo Húngaro (Kuhn-Munkres) para Atribuição Ótima

A seleção de CHs em redes Multi-RAT assistidas por infraestrutura celular é um desafio de otimização combinatória. Nesta tese, este desafio é formalizado como um Problema de Atribuição Linear (*Linear Assignment Problem*), onde se busca o emparelhamento ótimo entre dispositivos e funções de liderança, visando minimizar uma função de custo multivariada [43].

No modelo proposto, o problema é resolvido utilizando o Algoritmo Húngaro, ou método de Kuhn-Munkres, que apresenta complexidade polinomial $O(n^3)$. Operando de forma centralizada no *eNodeB*, a proposta permite utilizar a visão global da rede sobre os estados de energia e posição dos sensores. A Figura 2.3 detalha o núcleo de otimização que utiliza métricas de telemetria via LTE para determinar a topologia D2D ideal em Wi-Fi [44].

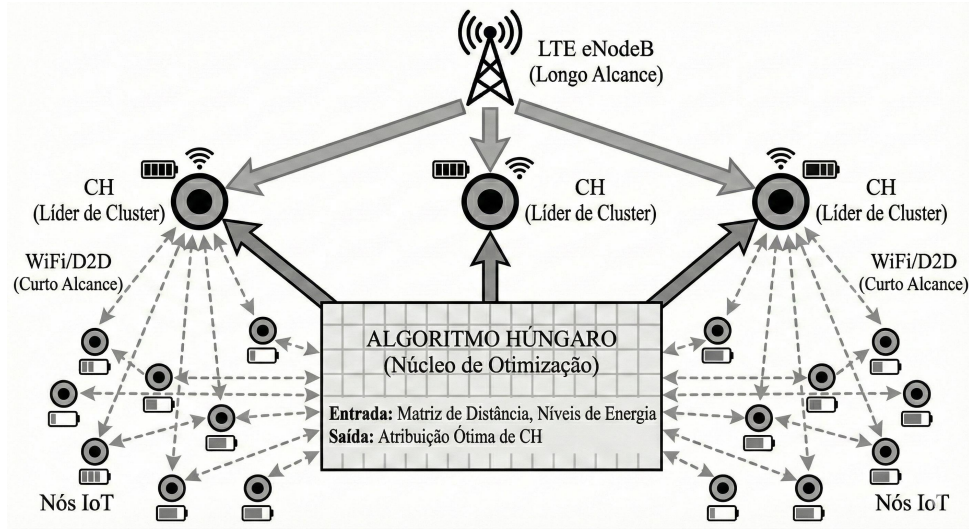


Figura 2.3: Fluxo de Otimização via Algoritmo Húngaro: Núcleo de decisão assistido pela rede celular para atribuição de líderes D2D. Fonte: Elaborada pelo autor.

Diferentemente de protocolos probabilísticos como o LEACH, a abordagem adotada nesta tese, baseada no algoritmo Húngaro, permite obter uma solução ótima global através de uma matriz de custo $C_{i,j}$ definida por:

$$C_{i,j} = \omega_1 \cdot \text{dist}(i, j) + \omega_2 \cdot \left(\frac{1}{E_{\text{res}}^{(i)}} \right) + \omega_3 \cdot \left(\frac{1}{LQI_{i,j}} \right) \quad (2.1)$$

Esta formalização garante que o líder eleito possua, simultaneamente, pro-

ximidade geográfica e energia suficiente, mantendo o LQI acima do limiar crítico para transmissões multimídia [6]. As principais diferenças técnicas entre as abordagens clássicas e a solução determinística adotada nesta pesquisa são sintetizadas na Tabela 2.3, que destaca as vantagens e limitações de cada paradigma.

Tabela 2.3: Comparativo entre algoritmos de eleição de líderes e agrupamento

Algoritmo	Vantagens	Limitações
LEACH $O(n)$	Baixa complexidade computacional; distribuição rotativa de carga.	Natureza probabilística; não garante a topologia ótima.
K-means $O(n)$	Eficiência geométrica na formação de clusters; simplicidade.	Ignora níveis de bateria; elevado risco de isolamento de nós.
PSO $O(n)$	Flexibilidade com funções de custo complexas e não lineares.	Natureza estocástica; risco de convergência para mínimos locais.
Húngaro $O(n^3)$	Garantia de otimalidade global; Determinístico; Solução exata.	Complexidade $O(n^3)$; Requer controle centralizado (eNodeB).

2.3.3 Disseminação Adaptativa e o Algoritmo PPUA

Para gerenciar o crescimento dinâmico da árvore de disseminação de dados em tempo real, utiliza-se o mecanismo *Probabilistic Preferential Utility Attachment* (PPUA). O PPUA permite que a topologia se auto-organize de forma robusta frente à intermitência comum em redes Multi-RAT [28].

A base deste mecanismo é a função de utilidade configurável $u(d, l)$, que orienta a conexão de novos nós:

$$u(d, l) = \frac{1}{\alpha(d+1) + (1-\alpha)(l+1)} \quad (2.2)$$

O parâmetro α atua como sintonizador de política: quando $\alpha \rightarrow 1$, prioriza-se nós com menor grau (d) para evitar saturação no plano de controle LTE; quando $\alpha \rightarrow 0$, o foco é a redução da distância lógica (l) ao nó raiz, minimizando a latência

acumulada em saltos via Wi-Fi [31].

2.3.4 Roteamento Adaptativo e Caminhos Mínimos em Redes D2D

No contexto de RSSF e comunicações D2D multissalto, a determinação de caminhos mínimos deixa de ser um desafio puramente topológico para se tornar um problema de otimização multiobjetivo. O roteamento adaptativo é a inteligência que permite à rede reagir a mudanças dinâmicas, como a mobilidade dos nós ou a exaustão crítica de baterias em nós intermediários [11].

2.3.4.1 Formalização do Custo de Enlace e Algoritmo de Dijkstra

A topologia da rede é modelada como um grafo direcionado $G = (V, E)$, onde cada aresta $e_{i,j} \in E$ possui um peso $W_{i,j}$ que representa o custo de transmissão entre o nó i e o nó j . Diferente das implementações convencionais que utilizam apenas a contagem de saltos (*hop count*), a métrica implementada nesta pesquisa utiliza uma função de custo composta que penaliza enlaces energeticamente instáveis [28]:

$$W_{i,j} = \omega_1 \cdot L(d_{i,j}) + \omega_2 \cdot \frac{1}{E_{res}^{(j)}} + \omega_3 \cdot \frac{1}{LQI_{i,j}} \quad (2.3)$$

Onde $L(d_{i,j})$ representa a latência de propagação estimada, $E_{res}^{(j)}$ é a energia residual do nó receptor e $LQI_{i,j}$ é o indicador de qualidade do enlace. A aplicação do algoritmo de Dijkstra sobre esta matriz de pesos permite que o sistema encontre não apenas o caminho mais curto em distância, mas a rota mais sustentável para a preservação da vida útil da rede [31].

2.3.4.2 Orquestração Assistida pela eNodeB e Resiliência

Na arquitetura proposta, o cálculo do caminho mínimo é realizado de forma assistida pela Estação Base (*eNodeB*). Através da interface LTE, os nós reportam periodicamente seus estados de saúde energética e indicadores de canal. Quando um nó atinge um limiar crítico de energia, a *eNodeB* incrementa o peso das arestas que convergem para este dispositivo na matriz de adjacência global.

Este mecanismo garante uma resiliência operacional superior: sempre que um enlace D2D é rompido ou torna-se excessivamente custoso devido à interferência, o sistema dispara um recálculo de rota quase instantâneo. Como a sinalização de controle é trafegada via LTE (âncora de controle), a nova rota é estabelecida sem a necessidade de inundações (*flooding*) de mensagens de busca na interface Wi-Fi, economizando recursos de rádio e reduzindo o atraso fim-a-fim em fluxos de vídeo críticos [25].

2.4 Componentes do Padrão 802.11g e Integração Multi-RAT (WiFi+LTE)

A proposta central desta tese fundamenta-se na sinergia entre o padrão IEEE 802.11g e a infraestrutura celular LTE para viabilizar comunicações D2D eficientes. O padrão 802.11g, operando na faixa de 2,4 GHz, utiliza a modulação *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) para alcançar taxas de transmissão de até 54 Mbps. Embora o WiFi ofereça uma elevada vazão de dados com baixo custo de hardware, a sua operação puramente distribuída apresenta desafios significativos em redes densas de IoT devido ao *overhead* de contenção do protocolo CSMA/CA [5].

A arquitetura Multi-RAT proposta resolve esta limitação através de uma divisão funcional de planos. A Figura 2.4 apresenta o comparativo entre a pilha de protocolos padrão e a arquitetura integrada WiFi+LTE. Neste modelo, o LTE atua como o Plano de Controle (*Control Plane*), aproveitando a sua cobertura onipresente e gestão determinística para coordenar o despertar das interfaces e a alocação de recursos, enquanto o WiFi assume o papel de Plano de Dados (*Data Plane*) para o descarregamento (*offloading*) de fluxos multimídia em curtas distâncias [25].

Esta integração permite que o sistema beneficie da robustez da sinalização celular para manter a conectividade, enquanto utiliza a eficiência energética por bit do WiFi para a transmissão de vídeo. A coordenação via eNodeB elimina a necessidade de escaneamento contínuo (*scanning*) pela interface WiFi, um dos maiores consumidores de energia em dispositivos móveis, permitindo que o rádio permaneça em estados de dormência (*sleep*) até que uma oportunidade de transmissão D2D seja identificada pelo plano de controle LTE [13].

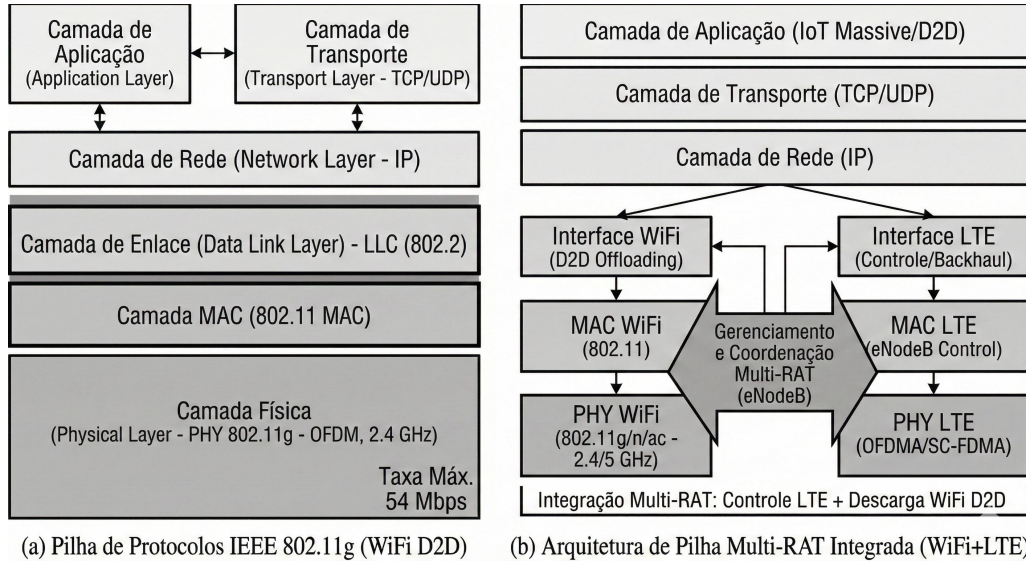


Figura 2.4: Integração Multi-RAT: (a) Pilha de Protocolos IEEE 802.11g e (b) Arquitetura Integrada com Controle LTE e Dados WiFi. Fonte: Adaptado pelo autor.

2.5 Métricas de Desempenho e Qualidade de Serviço

A avaliação quantitativa da arquitetura proposta fundamenta-se em métricas que capturam o (*trade-off*) entre a longevidade da rede e a fidelidade da informação transmitida. Estas métricas são essenciais para validar a eficácia da reclusterização assistida e da eleição de líderes via algoritmo Húngaro [31].

2.5.1 Modelo de Consumo Energético Multi-RAT

O consumo de energia (E_{total}) é modelado como a soma ponderada do tempo de permanência do transceptor em cada estado operacional. Diferentemente de modelos simplificados, esta tese considera as potências específicas de ambas as interfaces (LTE e WiFi). O consumo total de um nó sensor é expresso pela equação:

$$E_{total} = \sum (T_{tx} \cdot P_{tx} + T_{rx} \cdot P_{rx} + T_{idle} \cdot P_{idle}) \quad (2.4)$$

Onde:

- P_{tx}, P_{rx}, P_{idle} representam as potências nos estados de transmissão, recepção e repouso (ocioso), respectivamente.

- T_{tx}, T_{rx}, T_{idle} correspondem ao tempo acumulado em cada estado durante o período de simulação.

A redução do consumo é alcançada através da minimização de T_{tx} na interface LTE, que possui um custo energético por bit mais elevado, priorizando o uso da interface WiFi para o tráfego de dados massivo [33].

2.5.2 Indicador de Qualidade de Link (LQI)

O LQI é a métrica composta utilizada para avaliar a integridade da ligação rádio em tempo real. Ele fornece uma estimativa da qualidade da modulação, sendo fundamental para o sucesso do *streaming* de vídeo CCTV. O LQI é calculado em função da relação sinal-ruído (SNR) e da taxa de erro residual de pacotes (PER):

$$LQI = f(SNR, PER) \quad (2.5)$$

Nesta tese, valores de LQI acima de 200 são definidos como o limiar de estabilidade. Quando a telemetria via LTE reporta um LQI inferior a este valor para um enlace WiFi, a rede celular dispara automaticamente o recálculo da topologia para evitar a degradação do fluxo de vídeo e a consequente perda de frames críticos para a segurança [45].

2.5.3 Métricas de Confiabilidade: PR, Perda de Pacotes e Média de Saltos

A eficácia da disseminação de dados é quantificada primordialmente pela Taxa de Recepção de Pacotes (*Packet Reception* - PR), definida pela razão entre o volume de pacotes entregues com sucesso ao destino e o total de pacotes gerados pelos sensores. Como métrica complementar e indicadora de degradação, a Taxa de Perda de Pacotes (*Packet Loss Rate* - PLR) é monitorada para identificar falhas críticas no enlace. Em cenários de IoT densa, a perda de pacotes decorre majoritariamente de colisões no acesso ao meio e do problema do terminal oculto, inerentes ao protocolo CSMA/CA do Wi-Fi, além do descarte por estouro de *buffer* em nós sobrecarregados.

Adicionalmente, a Média de Saltos (*Average Hop Count*) monitora a eficiência do roteamento multissalto. Um número excessivo de saltos em redes Wi-Fi *ad-hoc*

convencionais tende a elevar a probabilidade de erro residual acumulado e a latência, uma vez que cada retransmissão amplia a exposição a interferências externas e ao desbotamento (*fading*) do sinal [10].

Nesse contexto, a intervenção da eNodeB torna-se fundamental para otimizar os caminhos mínimos. Ao utilizar o Algoritmo Húngaro para posicionar estrategicamente os CHs, o modelo proposto reduz a profundidade da rede (número de saltos), o que impacta diretamente na redução da PLR e na manutenção do LQI acima dos limiares de aceitabilidade para fluxos de vídeo críticos [46]. Esta coordenação centralizada garante que, mesmo sob alta carga, o descarte de pacotes seja minimizado em comparação a arquiteturas puramente descentralizadas [28].

Capítulo 3

Trabalhos Relacionados

Este capítulo apresenta uma revisão crítica do estado da arte referente às tecnologias habilitadoras para comunicações D2D e arquiteturas de múltiplas tecnologias de acesso rádio (*Multi-RAT*). A análise concentra-se em como a literatura contemporânea aborda os compromissos entre eficiência energética e QoS, estabelecendo a base comparativa necessária para validar as contribuições desta tese frente aos desafios de monitoramento em cidades inteligentes.

3.1 Comunicação D2D e Gerenciamento de Recursos

A literatura técnica consolidou a comunicação D2D como um pilar fundamental para a Internet das Coisas Massiva (mIoT), permitindo que terminais próximos estabeleçam enlaces diretos para mitigar o congestionamento nos enlaces de acesso da estação base [12]. Investigações iniciais focaram primordialmente no gerenciamento de interferência co-canal, visando proteger os usuários celulares primários enquanto permitem o reuso de recursos por pares D2D [47].

3.2 Arquiteturas Multi-RAT e Convergência Celular-Local

A convergência de múltiplas tecnologias de acesso rádio (*Multi-RAT*) é motivada pela incapacidade de uma única interface rádio atender simultaneamente a requisitos de cobertura ubíqua, alta taxa de dados e baixo consumo energético [48]. A literatura descreve diversas abordagens para a integração entre redes celulares (LTE e 5G) e redes locais sem fio (WLAN), com foco primordial no descarregamento de tráfego (*offloading*) para aliviar o congestionamento das macrocélulas em ambientes densos [12].

3.2.1 Integração LTE/5G e Redes IEEE 802.11

A integração entre o LTE/5G e o padrão IEEE 802.11 (Wi-Fi) é amplamente explorada em cenários de alta densidade de usuários. Trabalhos recentes destacam que a interface Wi-Fi oferece uma alternativa de baixo custo para transmissões de alta vazão em distâncias curtas, enquanto o LTE provê a robustez necessária para a sinalização em áreas amplas [1]. No entanto, a coexistência dessas tecnologias em dispositivos sensores exige mecanismos de comutação inteligente que considerem não apenas a disponibilidade do canal, mas também o impacto direto na vida útil da bateria [5].

Diversas pesquisas propõem modelos de agregação de rádio no nível da camada de convergência de dados em pacotes (*Packet Data Convergence Protocol* - PDCP), permitindo que fluxos de dados sejam distribuídos dinamicamente entre as interfaces rádio disponíveis [13]. Essa abordagem minimiza a interrupção do serviço durante a mobilidade e otimiza a utilização do espectro não licenciado para aplicações de monitoramento que não exigem garantias determinísticas de latência em todos os enlaces [31].

3.2.2 Desacoplamento de Planos de Controle e de Dados

Um paradigma emergente na literatura Multi-RAT, e que fundamenta a proposta desta tese, é o desacoplamento funcional entre o plano de controle e o plano de dados [6]. Nesse modelo, a rede celular LTE atua como um mecanismo de fixação,

sendo responsável pela gestão da mobilidade, autenticação e organização da topologia D2D [4]. Em contrapartida, a interface Wi-Fi é designada exclusivamente para o plano de dados, transportando os fluxos massivos de vídeo gerados pelos sensores de imagem [25].

Estudos demonstram que essa separação reduz o consumo energético nos dispositivos terminais, pois elimina a necessidade de os rádios Wi-Fi manterem conexões de controle persistentes e realizarem processos de escaneamento exaustivos [49]. Ao delegar a inteligência de orquestração à *eNodeB*, os dispositivos sensores podem permanecer em estados de baixo consumo energético (*sleep modes*) por períodos mais longos, sendo despertados via interface LTE apenas quando a transmissão de dados for estritamente necessária [38]. Essa arquitetura híbrida garante que a estabilidade do enlace (LQI) seja monitorada centralizadamente, permitindo ajustes proativos na topologia rádio antes que falhas críticas ocorram na transmissão de vídeo [50].

3.2.3 Taxonomia: Comunicação In-band vs. Out-band

A classificação da comunicação D2D baseia-se primordialmente no espectro de frequência utilizado. No modo *In-band*, a comunicação ocorre no espectro licenciado da operadora, o que permite um controle determinístico da QoS pela *eNodeB*, porém introduz alta complexidade computacional para o controle de interferência [4]. Por outro lado, o modo *Out-band*, foco desta pesquisa, utiliza interfaces secundárias como o Wi-Fi para o descarregamento de tráfego, eliminando a interferência com os portadores celulares, mas exigindo novos mecanismos de coordenação inter-tecnologia para gerenciar a instabilidade inerente às bandas não licenciadas [25].

3.3 Agrupamentos (Clustering) e Eleição de Líderes em RSSF

A organização de RSSF em estruturas hierárquicas, conhecidas como agrupamentos ou *clusters*, é uma técnica consolidada para promover a escalabilidade e a eficiência energética [51]. Nessa arquitetura, os nós sensores são divididos em grupos, onde cada grupo possui um Líder de Agrupamento (CH) responsável por

coordenar as transmissões dos nós membros e realizar a agregação de dados antes do envio para a Estação Base [52].

3.3.1 Protocolos Hierárquicos Estocásticos vs. Determinísticos

Na literatura clássica, protocolos como o LEACH (*Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy*) utilizam uma abordagem estocástica para a eleição de líderes, baseando-se em um limiar probabilístico para rotacionar a função de CH entre os nós [5]. Todavia, a natureza aleatória dessa seleção pode resultar em uma distribuição ineficiente de energia, motivando o surgimento de variantes modificadas que buscam maior previsibilidade no roteamento energético [53].

Nesse contexto, propostas híbridas foram desenvolvidas para refinar o processo de eleição do *cluster head*, combinando critérios do LEACH com outros parâmetros de rede para equilibrar a carga entre os nós [54]. Adicionalmente, melhorias específicas foram introduzidas para cenários de redes de sensores em ambientes internos (*indoor*), focando na redução do consumo residual através de otimizações no protocolo de base [55]. Apesar de tais avanços, essas abordagens ainda operam de forma majoritariamente descentralizada, o que reforça a necessidade de uma coordenação assistida pela infraestrutura, conforme explorado nesta pesquisa.

Em contrapartida, as abordagens determinísticas utilizam algoritmos de otimização para selecionar líderes baseando-se em parâmetros reais da rede [6]. Diferentemente dos métodos probabilísticos, a eleição determinística busca minimizar uma função de custo global, assegurando que os nós eleitos possuam os melhores recursos energéticos e de conectividade para sustentar o tráfego da rede [44].

3.3.2 O Algoritmo Húngaro Aplicado a Redes de Sensores

O Algoritmo Húngaro, ou método de Kuhn-Munkres, destaca-se como uma solução exata para o Problema de Atribuição Linear (*Linear Assignment Problem*) com complexidade de tempo polinomial $O(n^3)$ [43, 56]. No contexto das comunicações D2D assistidas e redes ultra-densas (UDN), esse algoritmo permite realizar o emparelhamento ótimo entre dispositivos candidatos e funções de liderança ou blo-

cos de recursos, garantindo a otimalidade global da topologia e a maximização da taxa de transmissão [50, 57, 58].

Além da gestão topológica, a aplicação do método estende-se à otimização da Qualidade de Experiência (QoE) para tráfegos mistos em redes heterogêneas [59] e ao suporte de redes de sensores de larga escala através de abordagens paralelas e cientes de informações de *cluster* [6, 60]. Tal versatilidade justifica o emprego desta técnica para a coordenação centralizada de enlaces D2D híbridos, visando o equilíbrio entre eficiência espectral e baixo custo computacional.

A principal vantagem da aplicação do método de Kuhn-Munkres em cenários Multi-RAT é a capacidade de processar uma matriz de custo multivariada [43]. Nesta tese, o custo de atribuição considera simultaneamente a distância euclidiana entre os nós, a energia residual da bateria e LQI [25]. Ao centralizar essa computação na *eNodeB*, a arquitetura proposta elimina o esforço computacional dos nós sensores, permitindo que a infraestrutura celular dite a configuração mais eficiente para a interface Wi-Fi, preservando a vida útil da rede sem comprometer a fidelidade dos fluxos multimídia [13].

3.4 Controle de Topologia e Disseminação de Dados

O controle de topologia em RSSF é uma tarefa crítica que visa equilibrar a conectividade da rede com a preservação da energia dos dispositivos [25]. Em cenários de monitoramento inteligente, a forma como os nós se organizam determina não apenas a longevidade do sistema, mas também a eficiência na entrega de fluxos de vídeo, onde o atraso acumulado e a perda de pacotes devem ser minimizados [28].

3.4.1 Algoritmos de Crescimento de Árvores de Disseminação

As topologias baseadas em árvores são amplamente preferidas para a disseminação de dados em tempo real devido à ausência de ciclos e à simplicidade no gerenciamento de rotas [52]. Diferentemente das redes em malha (*mesh*), que oferecem alta redundância ao custo de uma sinalização complexa, as árvores de disseminação permitem estabelecer caminhos diretos entre os sensores e a Estação

Base, otimizando o uso da largura de banda em enlaces Multi-RAT [48].

A literatura técnica descreve diversos algoritmos de crescimento de árvores que buscam otimizar métricas específicas, como o menor caminho (*Shortest Path*) ou a máxima energia residual [49]. No entanto, a maioria dessas abordagens exige um conhecimento global da rede, o que se torna impraticável em cenários IoT dinâmicos onde a topologia pode sofrer alterações frequentes devido à mobilidade ou falhas de enlace [13].

3.4.2 O Algoritmo PPUA e a Função de Utilidade

Para endereçar a necessidade de auto-organização distribuída, Miranda et al. [28] propuseram o algoritmo *Probabilistic Preferential Utility Attachment* (PPUA). O método fundamenta-se no princípio de anexação preferencial, no qual novos nós selecionam seus “pais” na topologia baseando-se em uma função de utilidade configurável que equilibra o grau de conectividade e a distância lógica à raiz.

A função de utilidade $u(d, l)$ permite que a rede se adapte dinamicamente às restrições do ambiente. Por meio do parâmetro de ajuste α , o algoritmo pode priorizar nós com menor grau para evitar congestionamentos nos enlaces de acesso, ou caminhos mais curtos para reduzir a latência em transmissões multimídia. Esta flexibilidade é vital para a coordenação Multi-RAT proposta nesta tese, permitindo que a inteligência da *eNodeB* dite o comportamento da árvore conforme a tecnologia de rádio ativa (LTE ou Wi-Fi) [25].

3.4.3 Desafios do Roteamento Multissalto em Cenários IoT Dinâmicos

O roteamento multissalto (*multi-hop*) em frequências de 2,4 GHz enfrenta desafios severos relacionados à interferência e ao desvanecimento do sinal [31]. À medida que o número de saltos aumenta, o LQI tende a degradar, resultando em retransmissões que elevam o consumo energético e reduzem a vazão útil da rede [50].

Além disso, o fenômeno conhecido como "buraco de energia" (*energy hole problem*) representa um risco constante, onde os nós próximos à Estação Base exaurem suas baterias prematuramente por encaminharem o tráfego de toda a rede [52]. A

integração do algoritmo PPUA com a coordenação centralizada LTE busca mitigar esses problemas ao promover uma rotação inteligente de papéis e um balanceamento de carga baseado na saúde energética dos enlaces, garantindo a resiliência operacional necessária para sistemas de vigilância ubíquos [13].

3.5 Qualidade de Serviço e Transmissão Multimídia

A manutenção do QoS em transmissões multimídia sobre redes D2D representa um dos maiores desafios técnicos da Internet das Coisas contemporânea. Diferentemente do tráfego de telemetria convencional, que consiste em pacotes esporádicos e de tamanho reduzido, o fluxo de vídeo exige uma largura de banda constante e uma gestão rigorosa do atraso (*delay*) e da variação do atraso (*jitter*) [5]. Na literatura, a garantia de QoS em cenários Multi-RAT é frequentemente abordada através da alocação dinâmica de recursos, onde a infraestrutura celular prioriza enlaces com melhores condições de propagação para sustentar a vazão necessária [48].

3.5.1 Métricas de Confiabilidade e o Papel do LQI

Para garantir a confiabilidade do enlace, a literatura técnica destaca a importância de métricas que reflitam não apenas a força do sinal, mas a integridade da recepção [10]. O Indicador de Qualidade de Enlace LQI consolidou-se como a métrica de decisão primordial em redes de baixa potência, pois fornece uma estimativa da taxa de erro de chip (*chip error rate*) durante a recepção de cada pacote [9]. Enquanto o RSSI (*Received Signal Strength Indicator*) pode ser influenciado por ruídos e interferências externas sem necessariamente refletir a qualidade da comunicação, o LQI oferece uma visão mais precisa sobre a probabilidade de entrega bem-sucedida dos dados [4].

Trabalhos recentes propõem a utilização do LQI como um gatilho para a comutação de interfaces rádio ou para o ajuste adaptativo da potência de transmissão [31]. Ao estabelecer limites operacionais baseados no LQI, o sistema pode identificar proativamente o início de um processo de desvanecimento (*fading*) e solicitar à *eNodeB* uma reconfiguração da topologia D2D antes que o fluxo de vídeo sofra interrupções perceptíveis [25]. Essa abordagem determinística é fundamental

para sistemas de vigilância inteligente, onde a integridade de cada quadro de vídeo é vital para o correto funcionamento de algoritmos de análise de imagem na borda [13].

3.5.2 Comunicações de Ultra-baixa Latência (URLLC) e Computação de Borda

A evolução das redes D2D para suportar aplicações de missão crítica impulsionou o desenvolvimento do paradigma de Comunicações de Ultra-baixa Latência e Alta Confiabilidade (URLLC) [32]. Em cenários de monitoramento por vídeo em tempo real, a latência fim a fim deve ser minimizada para permitir respostas imediatas a eventos de segurança pública [61]. A literatura sugere que a redução do atraso é obtida através da redução do número de saltos rádio e da minimização do processamento no núcleo da rede central, favorecendo a transmissão via enlaces diretos D2D [62].

Nesse contexto, a integração com a Computação de Borda (*Edge Computing*) torna-se indispensável, permitindo que o processamento preliminar dos fluxos multimídia ocorra nos próprios Líderes de Agrupamento ou em servidores de borda integrados à estação base [63]. Esse paradigma de processamento descentralizado evita a sobrecarga do *backhaul* e garante que decisões críticas de segurança sejam tomadas com a menor latência possível [64].

Estudos demonstram que a coordenação centralizada LTE/5G é capaz de orquestrar os blocos de recursos rádio de forma a priorizar pacotes URLLC em relação ao tráfego de melhor esforço, assegurando que a vazão de vídeo permaneça estável mesmo sob condições de alta densidade de dispositivos [38]. Ao combinar a inteligência da borda com a robustez do plano de controle celular, a arquitetura proposta nesta tese alinha-se às tendências mais recentes para a viabilização de cidades inteligentes resilientes e seguras [65].

3.6 Síntese e Comparativo dos Trabalhos Relacionados

A revisão do estado da arte revela um esforço significativo da comunidade científica em endereçar os desafios de eficiência energética e QoS em redes de sensores. No entanto, observa-se que a maioria das soluções propostas foca em otimizações isoladas, sem considerar a complexidade da coordenação Multi-RAT em cenários de tráfego multimídia massivo [28]. Enquanto alguns trabalhos priorizam a longevidade da rede através de protocolos de agrupamento estocásticos, outros focam exclusivamente na redução da latência em enlaces celulares licenciados, negligenciando o potencial do descarregamento de dados para interfaces não licenciadas [12].

3.6.1 Identificação de Lacunas na Literatura

Uma lacuna crítica identificada reside na ausência de mecanismos de coordenação centralizada que integrem o plano de controle LTE com a inteligência algorítmica exata para a gestão de enlaces Wi-Fi [25]. Muitos protocolos de roteamento multissalto baseados em Wi-Fi sofrem com a instabilidade do LQI devido à falta de uma âncora de controle determinística que possa prever falhas de conectividade [31]. Além disso, a aplicação do Algoritmo Húngaro em RSSF é frequentemente limitada à atribuição de tarefas simples, raramente sendo explorada para a eleição dinâmica de líderes de agrupamento em arquiteturas híbridas [44].

3.6.2 Quadro Comparativo de Soluções

A Tabela 3.1 apresenta uma síntese comparativa entre as principais abordagens discutidas neste capítulo e a proposta desenvolvida nesta tese. O comparativo baseia-se em cinco critérios fundamentais: as tecnologias de acesso rádio utilizadas, o objetivo primordial de otimização, o método algorítmico empregado, o modelo de coordenação de rede e o suporte a métricas de qualidade de enlace.

Tabela 3.1: Comparativo técnico horizontal: Estado da arte versus proposta desta tese

Referência	Tecnologia (RAT)	Objetivo	Método	Coordenação
Asadi et al.	LTE	Vazão	ProSe	Centralizada
Barik et al.	Híbrida	Energia	Clusterização	Distribuída
Miranda et al.	Wi-Fi	Latência	PPUA	Auto-org.
Ahmad et al.	Multi-RAT	QoS	DRL	Híbrida
Esta Tese	Multi-RAT	Energia/LQI	Húngaro	Centralizada

3.6.3 Posicionamento da Proposta

Diferentemente das soluções apresentadas, a arquitetura proposta nesta pesquisa diferencia-se por utilizar o Algoritmo Húngaro para garantir a otimalidade global na eleição de líderes, integrada a uma estrutura Multi-RAT que separa estritamente os planos de controle e dados [6]. Ao utilizar o LQI como métrica central de decisão e o plano de controle LTE como ponto de apoio, esta tese provê um modelo que não apenas reduz o consumo energético, mas assegura a viabilidade técnica da vigilância por vídeo em tempo real para aplicações de cidades inteligentes [13].

Com esta fundamentação, conclui-se que a abordagem assistida por infraestrutura celular é o paradigma mais adequado para superar as limitações das redes *ad-hoc* tradicionais, oferecendo o equilíbrio necessário entre a inteligência centralizada e a eficiência comunicacional local [25].

Capítulo 4

Modelo Proposto e Metodologia

Considera-se uma rede de comunicação sem fio híbrida na qual os nós e a estação base suportam dois modos de transmissão: LTE, que oferece amplo alcance ao custo de maior consumo energético, e D2D, caracterizado por curto alcance e maior eficiência energética.

No modelo proposto, os nós sensores são distribuídos aleatoriamente e organizados em clusters. A seleção dos líderes de cluster é realizada através do algoritmo Húngaro, aplicado sobre uma matriz de custo que pondera os seguintes atributos: o raio de comunicação para uplink, a distância entre o nó e o evento monitorado, e a energia residual da bateria. Essa estratégia centraliza a comunicação de curto alcance nos líderes eleitos, otimizando o uso de antenas de menor alcance.

A Fig. 4.1 ilustra a arquitetura proposta, detalhando a divisão em *clusters* e a comunicação entre os nós líderes. Esta arquitetura explora a robustez inerente ao uso de interfaces de rádio duplas, mitigando falhas de conexão e servindo como um mecanismo de redundância às transmissões via rede celular.

Na modelagem do consumo de energia durante a transmissão de dados em redes celulares, nós adotamos a abordagem apresentada no trabalho [66]. Este trabalho modela o circuito de transmissão e recepção, levando em conta diferentes qualidades de canal em ambos os cenários Wi-Fi e celular.

O LQI serve como uma métrica vital em redes de comunicação sem fio e é frequentemente usado para avaliar a qualidade do link entre dispositivos, podendo variar de 0 a 255 [45], sendo que valores mais altos indicam uma melhor qualidade de enlace e conexão mais estável, enquanto valores mais baixos sugerem uma quali-

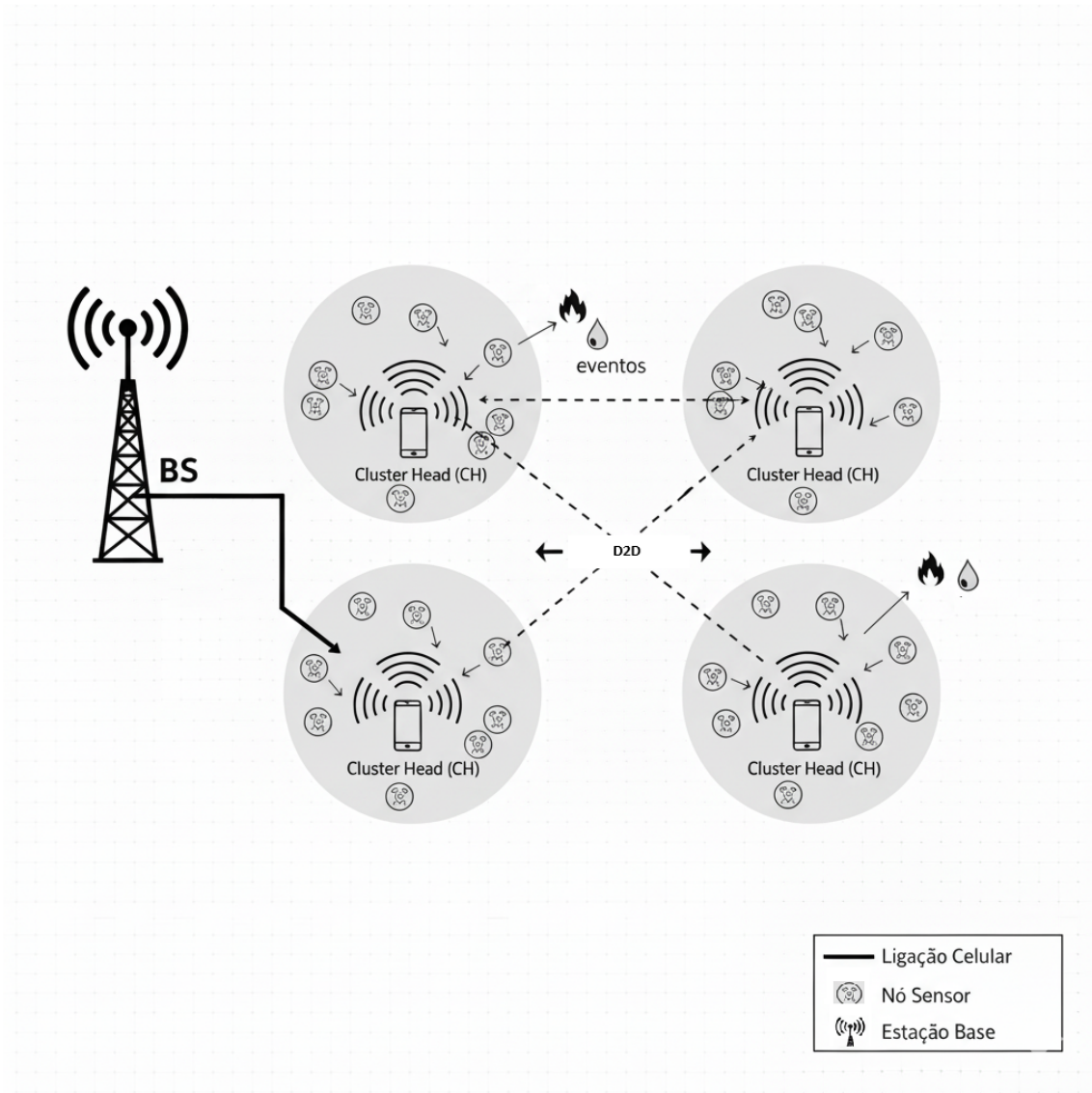


Figura 4.1: Um modelo de rede D2D híbrida que utiliza clusters e diferentes formas de transmissão.

dade de enlace mais fraca e uma comunicação menos confiável, em nossa proposta utilizamos valores de LQI acima de 200.

4.1 O Modelo Proposto: Coordenação Híbrida D2D-LTE

Esta seção apresenta a formalização teórica e algorítmica do modelo de coordenação proposto. A arquitetura foca na otimização da seleção de líderes de agrupamento (CH) para minimizar o impacto energético mantendo o LQI.

4.1.1 Formalização e Definições

Para garantir o rigor metodológico na descrição do sistema híbrido, estabelecem-se as seguintes definições baseadas no comportamento observado em redes de sensores assistidas por infraestrutura celular:

Definição 1 (Cluster Head D2D-LTE). Um nó sensor $n_i \in \mathcal{N}$ é designado como CH se, e somente se, for selecionado pela eNodeB para atuar como ponto de agregação e retransmissão (*relay*) para um conjunto de nós periféricos em um enlace D2D via interface Wi-Fi.

Definição 2 (Matriz de Custo Global e Função Multiobjetivo). A matriz de custo $\mathbf{C}$, de dimensão $N \times K$, quantifica a penalidade de atribuir o nó candidato i à tarefa de liderança j . Para garantir a otimalidade no *trade-off* entre consumo energético e qualidade de serviço, cada elemento C_{ij} é calculado pela eNodeB através da seguinte função multiobjetivo normalizada:

$$C_{ij} = w_d \cdot \left(\frac{d_{i,j}}{d_{max}} \right) + w_e \cdot \left(1 - \frac{E_{res,i}}{E_{max}} \right) + w_l \cdot \left(1 - \frac{LQI_{i,j}}{LQI_{max}} \right) \quad (4.1)$$

onde:

- $d_{i,j}$ é a distância euclidiana entre o nó i e o centroide de eventos j , e d_{max} é o alcance máximo suportado pela interface D2D;
- $E_{res,i}$ é a energia residual do nó i , e E_{max} é a capacidade nominal máxima da bateria (definida em 3000 J);
- $LQI_{i,j}$ é o Indicador de Qualidade de Link do enlace, e LQI_{max} é o valor máximo teórico suportado pelo protocolo de rádio (ex: 255);
- w_d, w_e, w_l são os coeficientes de ponderação atribuídos à distância, energia e qualidade do enlace, respectivamente, sujeitos à restrição convexa de que $w_d + w_e + w_l = 1$.

4.1.2 Algoritmo de Coordenação Munkres-LTE

O fluxo de controle centralizado na eNodeB utiliza o algoritmo de Munkres (Húngaro) para resolver o problema de atribuição linear com complexidade polino-

mial, garantindo a seleção ótima de líderes.

Algorithm 1 Algoritmo de Coordenação Assistida para Eleição de CH

Require: Conjunto de nós sensores $\mathcal{N}$, Energias Residuais E_{res} , Localização $\mathcal{P}$

Ensure: Atribuição de CHs que minimiza o custo energético global

- 1: **Coleta de Dados:** eNodeB recebe telemetria via **EventHeader** (UDP, 1024 bytes);
 - 2: **Processamento:** eNodeB extrai E_{res} e LQI de cada nó sensor;
 - 3: **Construção:** Montagem da matriz de custo $\mathbf{C}_{N \times K}$ conforme a Definição 2;
 - 4: **Execução Munkres:**
 - 5: Subtração do menor valor das linhas e colunas;
 - 6: Cobertura de zeros com número mínimo de retas;
 - 7: Ajuste da matriz até que a atribuição completa seja possível;
 - 8: **Sinalização Downlink:** eNodeB envia comando de ativação LTE para os CHs eleitos;
 - 9: **Fase de Transmissão:** Nós sensores ativam interface Wi-Fi e iniciam envio D2D para os CHs;
-

4.1.3 Hipóteses do Modelo

Para a implementação no simulador ns-3, assumem-se os seguintes pressupostos técnicos:

- **Sincronização:** Assume-se que a rede LTE provê sincronização temporal otimizada entre os nós para evitar colisões na interface D2D.
- **Modelo de Propagação:** Utiliza-se o `LogDistancePropagationModel` com expoente de perda 3.9 para refletir ambientes urbanos densos.
- **Qualidade de Link:** O sistema prioriza links com $LQI > 200$ para suportar o tráfego `NGBR_VIDEO_TCP_DEFAULT`.

4.1.4 Fluxo de trabalho do algoritmo proposto

Cada etapa do diagrama de sequência Figura 4.2 é explicado nos itens numerados de 1 a 7 abaixo.

Então, cada parte do roteamento é feita, onde os CHs decidem como transmitir os dados coletados localmente para a EB. Essas etapas são ilustradas na Fig. 4.2.

A operação do nosso algoritmo, que é projetado para otimizar o consumo de energia enquanto mantém a qualidade dos links de comunicação, compreende várias etapas: a etapa de detecção de eventos, seguida pela formação de clusters e seus respectivos líderes. Subsequentemente, o roteamento é executado, no qual os CHs determinam como transmitir os dados coletados localmente para a EB. Essas etapas são representadas na Fig. 4.2 e explicadas nos itens numerados de 1 a 8 abaixo.

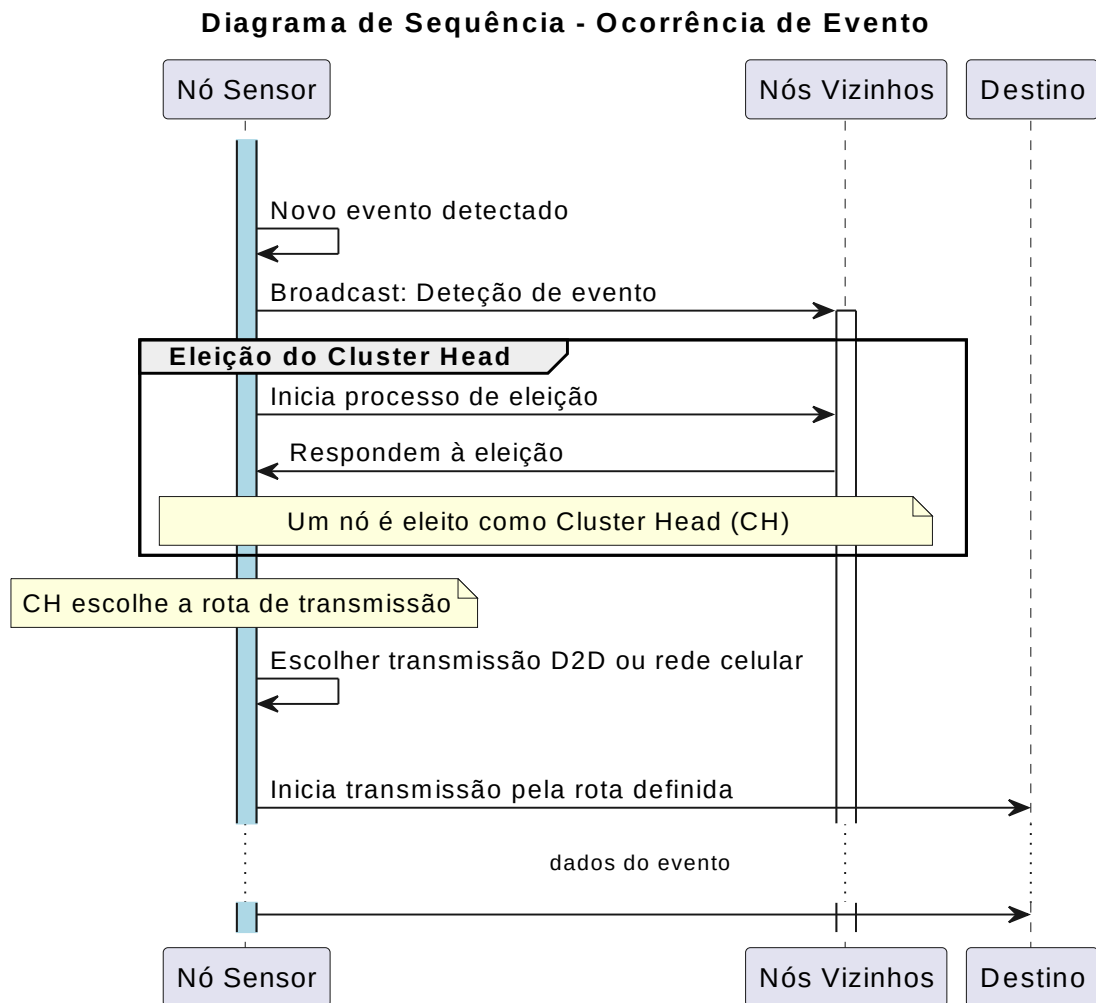


Figura 4.2: Fluxograma do protocolo proposto

1. Nós com raio de comunicação cobrindo o ponto de ocorrência são identificados.
Após a ocorrência de um evento em um ponto aleatório na área de monitoramento, o nó sensor com um raio de comunicação cobrindo o ponto de ocorrência é identificado (Fig.4.2, caixa 1 a 2).
2. A EB recebe uma notificação de uma solicitação de upload dos nós sensores.

Esta solicitação contém informações como a quantidade de dados a serem transmitidos, nível de bateria restante, LQI e localização (Fig.4.2, caixa 2).

3. A eleição do CH começa com base na matriz de custo e decide qual nó sensor será eleito para enviar os dados locais coletados para a EB e o restante retransmitirá os dados. A EB está ciente do novo CH (Fig.4.2, caixa 3).
4. A EB está ciente da bateria restante do CH e decide como enviá-la. É transmitido através da rede celular se estiver acima do limite de bateria estabelecido. Caso contrário, a conexão D2D é estabelecida (Fig.4.2, caixa 4).
5. A transmissão começa respeitando o limiar de bateria. Se a bateria restante do CH estiver acima do limite de bateria estabelecido, ele transmitirá diretamente para a EB com custo de transmissão celular; por outro lado, se a bateria restante estiver abaixo do limite estabelecido, a transmissão vai para a rota D2D, através do CH que coletará e transmitirá os dados para a EB através dos nós que servirão como relés via D2D (Fig.4.2, caixa 5).
6. A transmissão é feita através de parâmetros de transmissão adequados e a conexão é fechada (Fig.4.2, caixa 6).
7. Após a transmissão, o ciclo termina para este evento, e a verificação para um novo ocorre; se não acontecer, a vida útil da rede termina (Fig.4.2, caixa 7 a 8).

4.1.5 Eleição do Cluster Head

Em nosso modelo a eleição do Líder do Cluster pode ser modelada através do Algoritmo de Munkres, que busca a solução ótima para o Problema de Atribuição Linear.

Seja N o número de nós candidatos no cluster. A matriz de custo C de dimensão $N \times N$ é construída combinando métricas de distância e energia. Definimos o custo C_{ij} da seguinte forma:

$$C_{ij} = w_d \cdot \left(\frac{d_{i,j}}{d_{max}} \right) + w_e \cdot \left(1 - \frac{E_{res,i}}{E_{max}} \right) + w_l \cdot \left(1 - \frac{LQI_{i,j}}{LQI_{max}} \right) \quad (4.2)$$

Onde:

- w_d : Peso atribuído à distância (no código, definido como 0.5).
- w_e : Peso atribuído à energia (no código, definido como 0.5).
- d_i : Distância do nó i até a Estação Base (eNB/Sink).
- E_j : Energia residual do nó j (o inverso é utilizado para penalizar nós com pouca energia).
- $LQI_{i,j}$: Indicador de Qualidade de Link do enlace, normalizado pelo valor máximo teórico LQI_{max} (255).

4.1.6 Análise de Sensibilidade: Ponderação entre Energia, Distância e LQI

A eficácia da eleição do líder de agrupamento (CH) pelo algoritmo Húngaro é intrinsecamente dependente dos pesos atribuídos aos parâmetros de energia (w_e), distância (w_d) e qualidade de enlace (w_l) na matriz de custo [6, 44]. Nas simulações base desta pesquisa, adotou-se uma ponderação equilibrada, respeitando a restrição convexa de que $w_e + w_d + w_l = 1$, para garantir uma operação estável em cenários genéricos [67, 68].

Contudo, a arquitetura proposta permite a reconfiguração dinâmica destes pesos para atender a requisitos específicos de aplicação:

- **Foco em Longevidade:** Ao incrementar o valor de w_e , a rede prioriza a preservação da bateria residual, rotacionando a liderança entre os nós com maior reserva energética disponível. Isso evita a partição prematura da rede em áreas críticas de monitoramento.
- **Foco em QoS e Alcance:** Ao priorizar w_d , o algoritmo minimiza a distância física dos enlaces D2D, o que reduz a perda de percurso estimada e otimiza o escoamento do tráfego local.
- **Foco em Confiabilidade:** Ao elevar o peso de w_l , o sistema prioriza enlaces com maior integridade rádio, sendo fundamental para manter o LQI acima do

limiar de 200, garantindo a estabilidade necessária para fluxos de vídeo em tempo real sem perda crítica de quadros [46].

A ponderação adotada justifica-se pela necessidade de mitigar o *trade-off* entre o custo computacional e a eficiência energética. Ao normalizar os parâmetros e aplicar pesos que respeitam a restrição convexa, o algoritmo Húngaro assegura uma atribuição de papéis que não apenas minimiza a distância média de transmissão, mas preserva nós criticamente descarregados, garantindo a resiliência topológica da rede sob variadas condições de desvanecimento de canal. Adicionalmente, destaca-se que investigações mais profundas e estudos de sensibilidade detalhados sobre a variação desses pesos serão conduzidos em trabalhos futuros, visando refinar a adaptabilidade do sistema a cenários de alta mobilidade e interferência.

4.2 Arquitetura do Nó Multi-RAT no Simulador ns-3

A implementação da arquitetura proposta exige que cada dispositivo sensor opere como uma entidade *Multi-Radio Access Technology* (Multi-RAT), gerenciando simultaneamente interfaces de rádio com características físicas e protocolos distintos. No simulador ns-3, essa funcionalidade é modelada através da agregação de múltiplos objetos `NetDevice` em um único objeto `ns3::Node`, permitindo a coexistência de pilhas de protocolos independentes que compartilham o mesmo gerenciador de energia (*Energy Source*).

Cada nó é composto por dois dispositivos de rede principais, cujos papéis são estritamente segmentados para otimizar o consumo energético:

- **Interface LTE (LteUeNetDevice):** Atua exclusivamente no **Plano de Controle**. Esta interface é responsável pela comunicação de longo alcance com a eNodeB, transportando mensagens de sinalização RRC (*Radio Resource Control*) e o cabeçalho customizado `EventHeader`. Através deste elo, o nó reporta sua energia residual e o LQI médio detectado, recebendo em contrapartida as decisões do algoritmo Húngaro sobre a formação dos *clusters*.
- **Interface Wi-Fi (WifiNetDevice):** Atua no **Plano de Dados** sob o padrão

IEEE 802.11g. Para maximizar a eficiência energética, esta interface opera em um regime de ativação sob demanda (*on-demand activation*). Ela permanece em estado de baixo consumo (*Sleep Mode*) até que a pilha LTE receba uma instrução da eNodeB confirmando a necessidade de transmissão ou recepção D2D.

4.2.1 Coordenação Cross-Layer e Fluxo de Decisão

A integração funcional entre o LTE e o Wi-Fi ocorre na camada de aplicação, que funciona como uma entidade de coordenação *cross-layer*. Quando um pacote de vídeo é gerado, o motor de decisão do nó consulta a tabela de roteamento definida centralizadamente pela eNodeB.

1. **Encapsulamento:** O pacote recebe o `EventHeader` com os metadados de telemetria.
2. **Seleção de Interface:** Se o nó está designado como um membro periférico, o tráfego é roteado para a `WifiNetDevice` visando o CH mais próximo via salto único.
3. **Agregação e Forwarding:** Caso o nó seja eleito como CH, ele agrega os fluxos Wi-Fi recebidos de seus pares. Se o enlace Wi-Fi para o próximo salto apresentar um LQI inferior ao limiar de 200, a aplicação realiza o *fallback* para a interface LTE, garantindo que a qualidade do vídeo não seja degradada em favor da economia de energia.

Este modelo de nó híbrido permite que a rede utilize a robustez do espectro licenciado para a inteligência (controle) e a alta taxa de transferência do espectro não licenciado para o tráfego massivo (dados), mitigando o congestionamento da infraestrutura celular.

4.3 Implementação e Integração do Módulo de Energia em Cenários LTE

Um dos desafios técnicos enfrentados nesta pesquisa foi a ausência de um modelo de energia nativo e totalmente integrado para a tecnologia LTE na versão 3.44 do simulador ns-3. Enquanto o padrão IEEE 802.11 (Wi-Fi) dispõe do *WifiRadioEnergyModel*, que rastreia automaticamente os estados da interface (IDLE, TX, RX), a pilha LTE requer uma implementação customizada para contabilizar o gasto energético durante a transmissão e recepção de pacotes.

4.3.1 Arquitetura do Modelo de Energia Híbrido

Para viabilizar a medição do consumo de energia no cenário Multi-RAT, foi implementada uma abordagem baseada em *Energy Sources* e mapeamento manual de eventos. A estrutura baseia-se na utilização do `BasicEnergySource`, que atua como a bateria virtual do nó sensor, com uma capacidade inicial de 3000 Joules, conforme definido em nosso código experimental.

A integração para a interface LTE foi realizada através de *callbacks* e funções de envio/recepção customizadas, conforme descrito nos pontos a seguir:

- **Consumo em Transmissão (TX) LTE:** Como a interface LTE não está vinculada nativamente ao `BasicEnergySource` no ns-3.44, o consumo foi modelado na função `LteSendPacket`. Cada vez que um pacote é enviado pela interface celular, um decremento energético de 0,0174 J é aplicado à variável global de consumo. Este valor representa o custo computacional e de rádio para o estabelecimento do *bearer* e transmissão do pacote de 1024 bytes.
- **Consumo em Recepção (RX) LTE:** Na função `LteSinkRx`, que atua como o sorvedouro (*sink*) de dados no *Remote Host*, foi implementado um rastreamento de consumo de 0,01044 J por pacote recebido. Isso permite mensurar o custo energético do processamento de recepção no lado do líder do *cluster* (CH) ou da estação base.
- **Sincronização via Cabeçalho de Evento:** Para que a rede tenha ciência do estado energético dos nós em tempo real, foi estendida a classe

`ns3::Header` criando o `EventHeader`. Este cabeçalho transporta o campo `m_energyRemaining`, permitindo que o nó transmita seu nível de bateria atualizado para o núcleo de otimização (Algoritmo Húngaro), permitindo decisões de roteamento conscientes da energia (*energy-aware*).

4.3.2 Configuração do Radio Energy Model para Wi-Fi

Diferente do LTE, a interface Wi-Fi foi configurada utilizando o `WifiRadioEnergyModelHelper`. Os parâmetros de corrente foram ajustados para refletir o hardware de baixo consumo típico de dispositivos IoT:

- **TxCurrentA:** 0,0174 A (Corrente de transmissão).
- **IdleCurrentA:** 0,0044 A (Corrente em modo de espera).

Esta configuração híbrida permite que o simulador compute o gasto passivo do Wi-Fi (via modelo nativo) e o gasto ativo do LTE (via mapeamento de eventos implementado), resultando em uma métrica de *Total Energy Consumed* fidedigna para a avaliação da arquitetura Multi-RAT proposta.

4.4 Cenário de Simulação

Com o intuito de validar a eficácia da arquitetura proposta, este capítulo apresenta uma análise comparativa do consumo energético sob diferentes configurações de rede. O objetivo central é avaliar o desempenho da coordenação híbrida, que conjuga comunicações D2D com a assistência da rede LTE, frente a duas arquiteturas de referência: (i) um cenário operando estritamente via Wi-Fi *ad-hoc* e (ii) um cenário dependente exclusivamente da infraestrutura celular LTE.

Para validar a eficácia da arquitetura proposta e mensurar o impacto de diversas cargas de tráfego e densidades de nós, realizou-se uma varredura paramétrica fundamentada nas especificações das Tabelas 4.1, 4.2 e 4.3. A metodologia experimental consistiu na execução de 33 iterações independentes para cada combinação única de variáveis, quantitativo que se fundamenta no Teorema do Limite Central (TLC) [69]. Ao utilizar uma amostra $n \geq 30$, assegura-se que a distribuição

amostral da média se aproxime de uma distribuição normal, permitindo inferências estatísticas e o uso de testes paramétricos.

Para garantir a independência estatística entre as replicações, utilizou-se uma semente global fixa para inicializar o gerador de números pseudoaleatórios *MRG32k3a* [70], nativo do simulador ns-3 (v3.44), variando-se o número da execução (*run number*) para cada uma das 33 rodadas. Essa configuração assegura que as sub-sequências de números aleatórios sejam independentes e não sobrepostas. A suficiência amostral e a precisão das médias foram validadas *a posteriori* através de uma inferência estatística, utilizando um intervalo de confiança de 95% ($Z = 1,96$) e um alvo de precisão de 5% para o erro relativo.

O tamanho amostral necessário (n) para atingir a precisão desejada foi calculado por meio da Equação 4.3, baseada na estimativa da média para populações infinitas:

$$n = \left(\frac{Z \cdot \sigma}{E} \right)^2 \quad (4.3)$$

Onde:

- Z é o valor crítico para o nível de confiança (1,96 para 95% de confiança);
- σ representa o desvio padrão obtido nas simulações;
- E é a margem de erro absoluta admissível, calculada como o produto da precisão alvo (5%) pela média amostral.

Conforme demonstrado, a escolha de 33 replicações provou-se matematicamente suficiente para todos os cenários avaliados. No cenário de maior estresse (100 nós e 300 eventos), a média de consumo foi de 111,17 J com um erro relativo de apenas 1,82%, valor significativamente inferior ao limite crítico de 5%. Para este cenário específico, o cálculo indicou que apenas 8 replicações seriam necessárias para atingir a precisão alvo, validando a convergência e a significância estatística das 33 iterações executadas para esta tese.

Tabela 4.1: Parâmetros gerais do cenário de simulação

Parâmetro	Valor
Dimensões da Área	$500 \times 500 \text{ m}^2$
Número de Nós Sensores	[10, 20, ..., 100]
Posicionamento das UEs	Aleatório (Raio de 250 m do centro)
Modelo de Mobilidade	Estática
Capacidade da Bateria	3000 J
Modelo de Perda de Percurso	<i>LogDistancePropagationModel</i>
- Expoente de Perda (n)	3,9
- Perda de Referência (L_0)	40,05 dB

Tabela 4.2: Parâmetros da interface de rede LTE

Parâmetro	Valor
Número de eNBs	1
Largura de Banda do Canal	5 MHz (25 RBs)
Tipo de QoS (<i>Bearer</i>)	NGBR_VIDEO_TCP_DEFAULT
Sensibilidade da eNB (RX)	-99 dBm
Potência TX Máxima (UE)	0,8 W (~ 29 dBm)
Potência em Modo RX	0,4 W
Potência em Modo <i>Idle</i>	0,01 W

Tabela 4.3: Parâmetros da interface Wi-Fi e perfil de tráfego D2D

Parâmetro	Valor
Protocolo de Transporte	UDP
Tamanho do Pacote	1024 Bytes
Intensidade do Tráfego	12 pacotes por evento
Intervalo entre Eventos	0,3 s
Raio de Detecção de Eventos	50 m ou 100 m (variável)
Duração da Transmissão (Evento)	0,2 s

4.4.1 Cenário de Simulação Wi-Fi

Esta seção detalha a metodologia e as premissas adotadas para a simulação do cenário de referência baseado exclusivamente na tecnologia Wi-Fi. Diferente da arquitetura celular, este modelo opera de forma puramente descentralizada, representando o comportamento de redes de sensores sem fio (RSSF) convencionais.

O fluxo operacional deste cenário é ilustrado na Figura 4.3. A simulação foi desenvolvida no ambiente **ns-3.44**, utilizando o padrão IEEE 802.11g em modo *Ad-hoc*. A topologia segue as dimensões de $500 \times 500 \text{ m}^2$, com a distribuição dos nós sensores conforme as especificações gerais detalhadas na Tabela 4.1.

Nesta arquitetura, a disseminação de dados ocorre por meio de roteamento multissalto, onde os nós sensores organizam-se em uma estrutura de árvore para escoar o tráfego de eventos até o nó (*sink*), posicionado no centro da área. O modelo de tráfego mantém-se estocástico e orientado a eventos, seguindo a volumetria de pacotes UDP definida na Tabela 4.3.



Figura 4.3: Fluxograma do Cenário Wi-Fi

4.4.2 Cenário de Simulação LTE

Esta seção detalha a metodologia e os parâmetros utilizados para simular o cenário de referência, que utiliza uma arquitetura exclusivamente LTE.

A simulação foi implementada no simulador de redes **Network Simulator (ns-3.44)**, utilizando o módulo LTE-EPC para estabelecer a infraestrutura de rede. O código da simulação, modela uma topologia estática com uma única estação base (eNB) no centro de uma área de $500 \times 500 \text{ m}^2$ e N UEs (Nós Sensores) posicionados aleatoriamente num raio de 250m ao seu redor.

O tráfego é estocástico e baseado em eventos. Um total de M eventos são gerados em locais aleatórios da área de simulação. Os UEs que se encontram dentro de um raio do evento e detectam o evento e transmitem os pacotes UDP de 1024

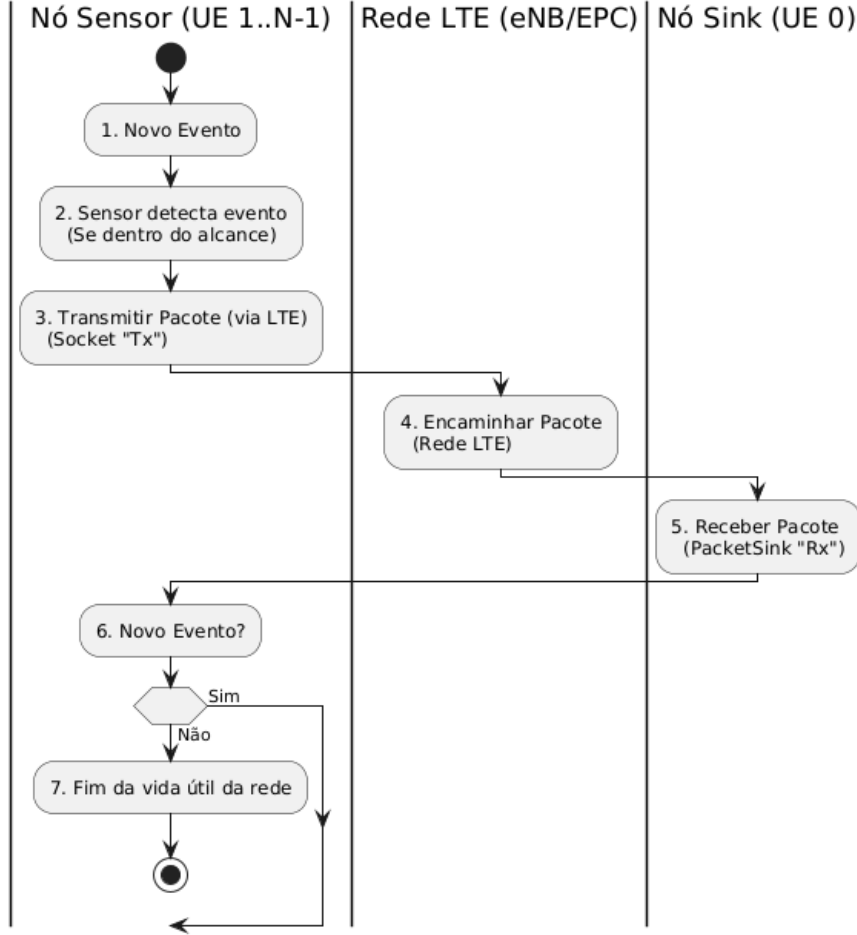


Figura 4.4: Fluxograma do Cenário LTE-Puro

bytes para a base.

O consumo de energia é gerido por um modelo inspirado no trabalho de Pasca et al. [71], mas com uma extensão significativa. O modelo de Pasca et al. utiliza potências de transmissão (TX) est ticas. Em contraste, o nosso modelo implementa um controle de potência adaptativa, onde a potência de TX é calculada dinamicamente para cada transmissão. Este cáculo utiliza o `LogDistancePropagationLossModel` para determinar a perda de propagação e ajusta a potência de TX ao mínimo necessário para satisfazer a sensibilidade de recepção do eNB (definida em -99 dBm), limitada a uma potência máxima de 0.8 W. O consumo em estados de Ociosidade (Idle) e recepção (RX)   contabilizado com valores de potência fixos. Um método de finalização é invocado ao término da simulação para contabilizar o gasto energético ocioso residual de todos os nós.

4.5 Implementação no Simulador ns-3

A validação da arquitetura proposta foi realizada por meio de implementações customizadas no simulador de eventos discretos *Network Simulator 3* (versão ns-3.44). Diferente de abordagens que utilizam modelos abstratos, este trabalho desenvolveu uma infraestrutura de simulação que integra a pilha de protocolos LTE e Wi-Fi D2D em um mesmo nó sensor, permitindo a análise fidedigna de redes heterogêneas Multi-RAT.

4.5.1 Desenvolvimento do Modelo de Energia para a Interface LTE

Uma das contribuições técnicas desta implementação reside na superação da limitação nativa do ns-3 quanto ao monitoramento energético da interface celular. Enquanto o padrão IEEE 802.11g possui integração direta com o módulo *EnergySource*, a pilha LTE padrão não decrementa a energia do nó automaticamente durante a transmissão de pacotes de dados.

Para resolver essa lacuna, implementou-se um subsistema de monitoramento baseado em *callbacks* e rastreamento de eventos. A modelagem energética foi parametrizada conforme os estudos experimentais de Pasca et al. [71], que definem o consumo de energia do *User Equipment* (UE) com base nos estados do *Radio Resource Control* (RRC). No código customizado, os custos foram discretizados por evento de processamento:

- **Custo de Transmissão (TX_{LTE}):** Configurado em 0,0174 Joules, representando o gasto energético para o envio de um pacote de 1024 bytes através do canal LTE.
- **Custo de Recepção (RX_{LTE}):** Configurado em 0,01044 Joules, cobrindo o processamento de sinal e decodificação do plano de usuário.

Para assegurar a precisão do **consumo passivo**, o modelo contabiliza continuamente o gasto energético em modo *Idle* entre os eventos de comunicação. Ao término da simulação, um método de finalização processa o tempo residual de oci-

osidade de todos os nós, garantindo que o balanço energético final reflita tanto a atividade de rede quanto o consumo residual de operação.

4.5.2 Estrutura de Dados e Orquestração Multi-RAT

Para viabilizar a arquitetura híbrida, foi desenvolvida a classe `EventHeader`. Este cabeçalho customizado estende a estrutura de pacotes padrão do ns-3, permitindo que cada nó anexe o valor atualizado de sua energia residual (`m_energyRemaining`) aos pacotes de sinalização. Essa implementação é crucial para que a Estação Base (`eNodeB`) possua telemetria em tempo real sobre a saúde energética da rede.

Com essas informações, o simulador executa o Algoritmo Húngaro para a formação dinâmica de *clusters*. A lógica de implementação seguiu os seguintes critérios:

1. **Seleção Adaptativa:** O algoritmo de Munkres processa a matriz de custo em tempo de execução, elegendo os líderes de *cluster* (CH) com maior autonomia energética.
2. **Descarga de Tráfego (*Offloading*):** A lógica no ns-3 direciona o tráfego local via Wi-Fi D2D (com custo energético reduzido) e reserva a interface LTE apenas para a comunicação de longo alcance entre o líder e a estação base.

Essa infraestrutura de simulação permite comparar o modelo proposto contra cenários puramente homogêneos: uma rede operando exclusivamente via Wi-Fi (limitada pelo alcance) e uma rede dependente exclusivamente de LTE (limitada pelo alto consumo energético por transmissão). Assim, a implementação no ns-3 torna-se o ambiente de teste definitivo para provar que a coordenação inteligente entre interfaces é o caminho para a longevidade de redes IoT massivas [33, 52].

4.5.3 Modelagem Energética Customizada e Integração da Pilha LTE no ns-3

A avaliação precisa de eficiência energética no simulador *Network Simulator 3* (ns-3.44) apresenta desafios estruturais, especialmente no que tange à pilha LTE. Enquanto o módulo Wi-Fi possui uma integração nativa com o `WifiRadioEnergyModel`,

a pilha LTE padrão não fornece um vínculo automático entre os estados do rádio e o consumo de corrente na fonte de energia (*EnergySource*).

Para mitigar essa lacuna, implementou-se um subsistema de monitoramento de eventos de rádio que comunica as transições de estado da pilha LTE ao **BasicEnergySource**. Esta modificação foi fundamentada nos modelos de consumo de potência para *User Equipment* (UE) propostos por Pasca et al. [71], adaptando-os para o contexto de dispositivos IoT de baixa potência.

4.5.3.1 Arquitetura do Subsistema de Energia e Implementação C++

A modificação estrutural realizada no código-fonte envolveu o desacoplamento da lógica de consumo da camada física e sua inserção direta nos pontos de processamento de pacotes da aplicação. Configurou-se cada nó sensor com um **BasicEnergySource** de capacidade inicial de 3000 Joules. Diferente da abordagem nativa, a contabilização de energia para o LTE foi implementada através de *callbacks* manuais disparados durante as fases de envio e recepção de dados.

Esta arquitetura é essencial para o cenário Multi-RAT, pois permite que o mesmo reservatório de energia seja decrementado simultaneamente por diferentes tecnologias de rádio, refletindo fielmente o comportamento de um dispositivo real dotado de múltiplas interfaces [31, 33].

4.5.3.2 Parâmetros de Consumo e Modelo de Potência

A parametrização dos custos energéticos seguiu os dados experimentais de Pasca et al. [71], que mapeiam o consumo de energia do rádio LTE de acordo com os estados do *Radio Resource Control* (RRC). No código customizado para o ns-3, esses valores foram transpostos para consumos discretos por pacote (considerando pacotes de 1024 *bytes*):

- **Consumo em Transmissão (TX LTE):** Definido como 0,0174 Joules por pacote. Este valor engloba a ativação do amplificador de RF e o processamento dos cabeçalhos de camada de enlace para transmissões em *Uplink*.
- **Consumo em Recepção (RX LTE):** Definido como 0,01044 Joules por pacote. Este custo representa o processamento de sinal necessário para a decodificação do canal e recepção de dados no plano de usuário.

4.5.3.3 Mecanismos de Monitoramento e o EventHeader

Para garantir que a rede fosse capaz de tomar decisões de orquestração baseadas em dados reais, a implementação técnica no ns-3 utilizou três componentes-chave:

1. **Função LteSendPacket:** Modificada para realizar o *polling* da bateria antes do envio para o canal. Caso a energia residual seja insuficiente, a transmissão é abortada, simulando o esgotamento físico do dispositivo.
2. **Função LteSinkRx:** Implementada com um *trace sink* para detectar pacotes recebidos e aplicar o decremento de 0,01044 J, simulando o custo do rádio em escuta ativa.
3. **Classe EventHeader:** Desenvolveu-se um cabeçalho customizado que estende a estrutura do pacote para transportar o campo `m_energyRemaining`. Este mecanismo permite que a informação da energia residual de cada nó seja transmitida à *eNodeB*, servindo como entrada fundamental para o **Algoritmo Húngaro** na reeleição dinâmica de líderes de *cluster* [50,52].

Essa modelagem híbrida permite quantificar o benefício da descarga de tráfego (*offloading*): embora o custo por pacote LTE seja significativamente superior ao custo Wi-Fi, a centralização do tráfego em CH reduz o número total de ativações da interface celular, preservando a vida útil da rede global [38,51].

4.5.4 Especificação Técnica da Classe EventHeader no ns-3

Para viabilizar a orquestração Multi-RAT, foi desenvolvida a classe customizada `EventHeader`, que estende a estrutura de pacotes `ns3::Header` [72]. Este cabeçalho é o vetor de inteligência da rede, transportando os seguintes campos críticos para a *eNodeB*:

1. **m_energyRemaining (64 bits):** Valor em ponto flutuante da bateria residual, permitindo que o algoritmo de Munkres execute a atribuição ótima de CHs [25].

2. **m_lqiValue (8 bits):** Informação de retorno da qualidade do último enlace D2D detectado, métrica essencial para a manutenção da qualidade de serviço em fluxos multimídia [25].
3. **m_nodeId (16 bits):** Identificador único para mapeamento da topologia de *clusters* e rastreamento da árvore de disseminação [28].

A implementação deste cabeçalho garante que o plano de controle LTE possua telemetria em tempo real, reduzindo o *overhead* de sinalização distribuída e permitindo que a rede se comporte como um sistema auto-organizado conforme discutido em [28].

Capítulo 5

Resultados e Discussões

Este capítulo apresenta e discute os resultados obtidos a partir das simulações computacionais realizadas no simulador ns-3.44. A análise tem como objetivo validar o modelo analítico proposto e quantificar os ganhos de eficiência energética e de qualidade de serviço proporcionados pela arquitetura híbrida D2D-LTE em comparação aos paradigmas de comunicação tradicionais.

Para prover uma base comparativa rigorosa, foram selecionados dois cenários de referência: (i) uma arquitetura de transmissão exclusiva via rede celular (*LTE-Puro*), representando o modelo de acesso direto à infraestrutura; e (ii) uma rede puramente descentralizada baseada no padrão IEEE 802.11 (*Wi-Fi Puro*), operando via roteamento multissalto.

Ressalta-se que a avaliação concentrou-se no contraste direto com esses métodos base devido à necessidade de evidenciar o ganho de desempenho obtido pela introdução de uma coordenação assistida sobre infraestruturas homogêneas. Devido à elevada heterogeneidade de parâmetros e à natureza customizada das pilhas de protocolos de outros modelos híbridos presentes no estado da arte, a comparação direta com outras soluções de coordenação polivalentes não foi incluída nesta etapa da pesquisa. Esta limitação metodológica é justificada pela complexidade de replicação fidedigna de heurísticas de terceiros em ambiente de simulação controlado, sendo, portanto, proposta como um tópico de investigação para trabalhos futuros, visando a avaliação entre diferentes estratégias de coordenação *Multi-RAT*.

5.1 Cenário Base: Transmissão Exclusiva via LTE

Para estabelecer uma base comparativa e quantificar o custo de oportunidade do uso de redes de longo alcance, a primeira etapa da avaliação consistiu em simular uma topologia de comunicação direta. Neste cenário, todos os nós sensores comunicam-se com a estação Base diretamente via LTE, sem o auxílio de coordenação D2D ou agrupamentos.

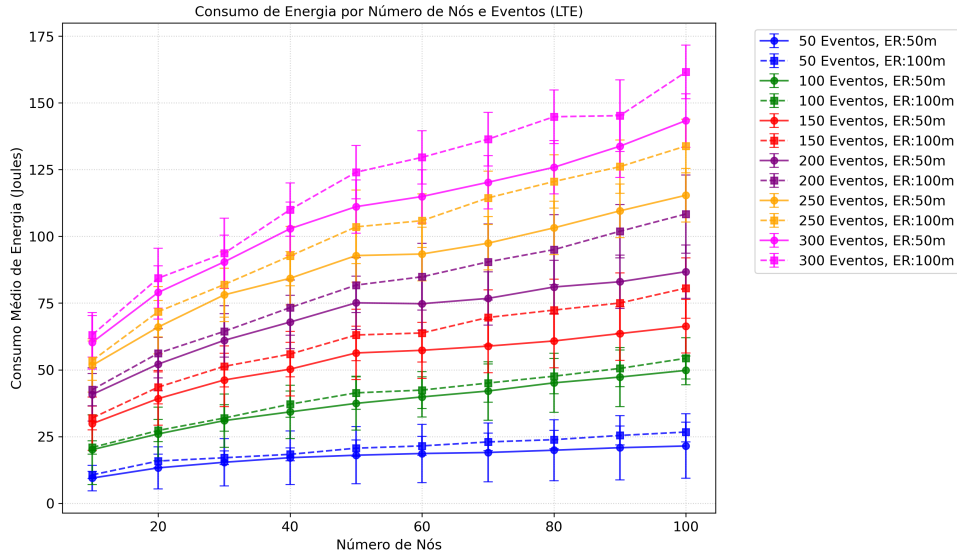


Figura 5.1: Consumo médio de energia na rede por número de nós e eventos - Comparativo Global LTE.

O consumo energético, visualizado na Figura 5.1 e detalhado pelas figuras subsequentes, revela um comportamento de crescimento progressivo do gasto energético (medido em Joules) em relação ao aumento da densidade da rede. Observa-se que, para uma densidade de 100 nós submetidos a uma carga de 300 eventos, o consumo médio ultrapassa o limiar de 150 Joules.

Esta ineficiência é agravada pela natureza centralizada da rede celular. Quando a densidade de nós aumenta, a disputa simultânea pelo canal de acesso resulta em colisões massivas de sinalização. Esse cenário de contenção obriga os dispositivos a realizarem múltiplas retransmissões de controle, o que explica não apenas o salto no consumo energético, mas também a elevação na taxa de perda de pacotes, uma vez que a Estação Base torna-se um gargalo operacional para o acesso massivo.

Um ponto crítico identificado na análise é o impacto do Raio de Detecção de Eventos (*Event Range* - ER). Ao comparar os cenários de ER de 50m (Figura 5.2)

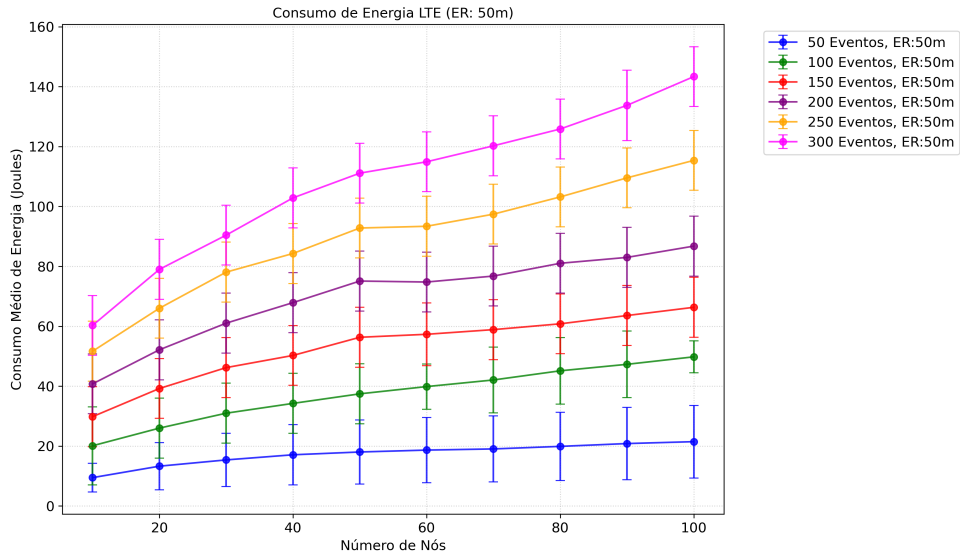


Figura 5.2: Consumo Energético LTE para o cenário com Raio de Detecção de 50m.

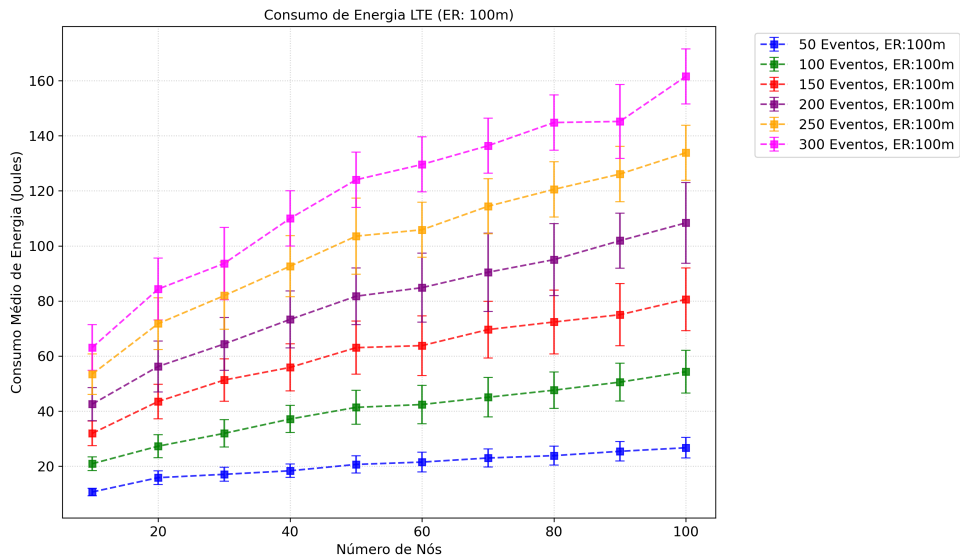


Figura 5.3: Consumo Energético LTE para o cenário com Raio de Detecção de 100m.

e 100m (Figura 5.3), nota-se que o consumo energético é amplificado drasticamente com o aumento da área de sensoriamento. Fisicamente, um ER superior implica que um único evento estocástico é detectado por uma maior quantidade de sensores cujas áreas de cobertura se sobrepõem. Na ausência de mecanismos de agregação ou supressão de dados, ocorre uma inundação de transmissões redundantes para a Estação Base, exaurindo prematuramente as reservas energéticas dos dispositivos periféricos e gerando contenção desnecessária no enlace rádio.

Complementarmente, a Figura 5.4 apresenta a Média de Perda de Pacotes, uma métrica vital para a avaliação da QoS em aplicações de monitoramento. Os

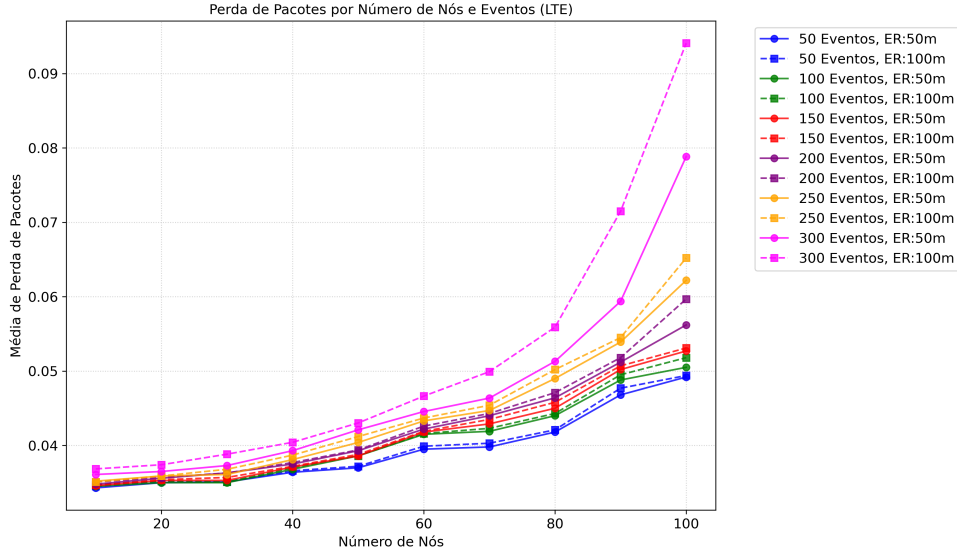


Figura 5.4: Média de Perda de Pacotes por densidade de nós e volumetria de eventos - Cenário LTE.

resultados demonstram que a perda de pacotes escala de aproximadamente 0,04 (4%) em redes esparsas para quase 0,10 (10%) em cenários de alta densidade (100 nós).

Esta degradação da confiabilidade comunicacional é resultado direto da saturação dos recursos *uplink* da célula. Com o aumento do número de nós competindo simultaneamente por blocos de recursos, a probabilidade de colisões e falhas na alocação de canais de acesso cresce exponencialmente. Nota-se que os cenários com ER de 100m (identificados pelas curvas superiores no gráfico) apresentam as maiores taxas de perda, corroborando a tese de que a redundância excessiva de dados não apenas consome mais energia, mas também degrada a estabilidade do canal rádio devido à interferência co-canal e ao congestionamento da Estação Base.

Em síntese, os resultados do cenário LTE evidenciam as limitações de escalabilidade de arquiteturas estritamente centralizadas para o monitoramento massivo. O alto custo energético associado à sinalização LTE e a degradação da taxa de entrega em redes densas justificam a transição para o modelo de coordenação híbrida Multi-RAT proposto nesta tese. A introdução de *clusters* D2D via Wi-Fi Direct, orquestrados pela Estação Base, visa deslocar o tráfego de dados redundantes para canais de curto alcance, preservando a eficiência energética e mitigando o congestionamento do espectro licenciado.

5.2 Cenário Alternativo: Transmissão Exclusiva via Wi-Fi

Esta seção detalha a avaliação de desempenho do modelo operando sob uma arquitetura de rede puramente *ad hoc*, baseada no padrão IEEE 802.11 (Wi-Fi). Diferentemente do cenário celular abordado anteriormente, a comunicação exclusiva via Wi-Fi prescinde de infraestrutura centralizada para a coordenação do acesso ao meio, exigindo a formação de rotas de múltiplos saltos (*multihop*) para o encaminhamento das mensagens até o nó de destino (*sink*).

5.2.1 Avaliação do Consumo Energético

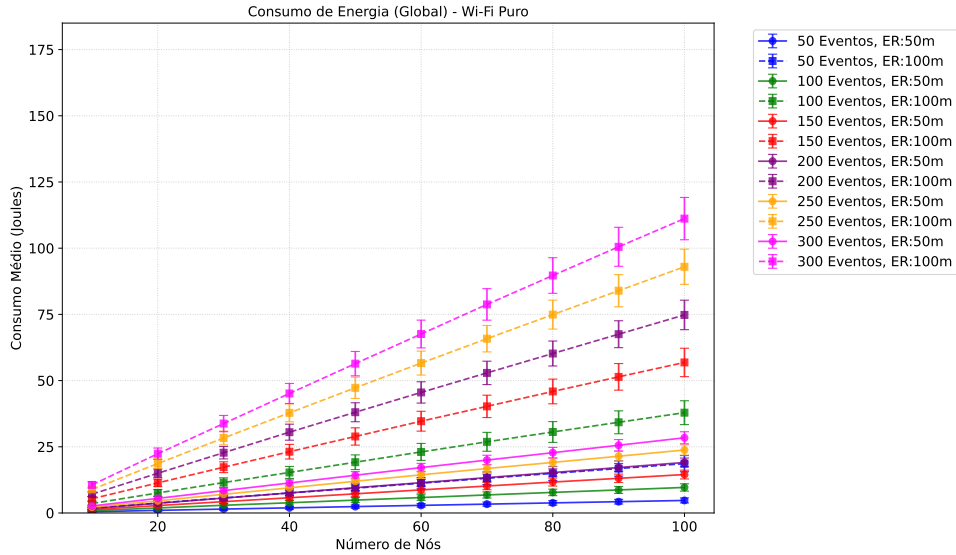


Figura 5.5: Consumo médio de energia na rede por número de nós e eventos - Cenário WiFi-Puro.

A Figura 5.5 apresenta o panorama geral do consumo médio de energia (em Joules) da topologia Wi-Fi, evidenciando o impacto conjunto do adensamento da rede e da volumetria de tráfego sob diferentes raios de detecção (ER de 50m e 100m). Constata-se que o consumo energético é estritamente proporcional à densidade de nós e à taxa de injeção de pacotes, característica de protocolos baseados em contenção.

Para dissecar este comportamento, os cenários foram isolados conforme o raio de abrangência dos eventos. A Figura 5.6 ilustra a topologia operando com ER de

50m. Neste contexto de alcance reduzido, a ativação simultânea de sensores é controlada, resultando em curvas de consumo com inclinação mais suave e determinística.

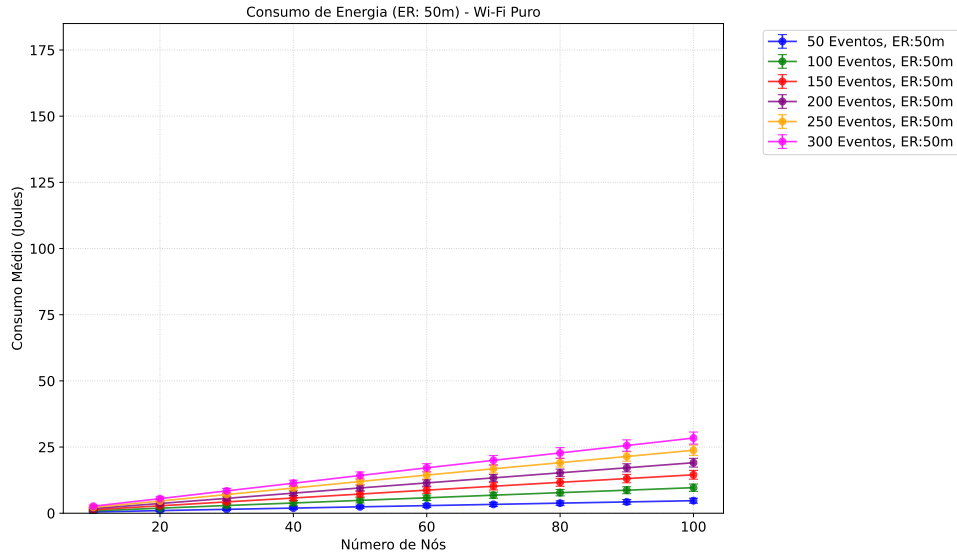


Figura 5.6: Consumo médio de energia por número de nós e eventos (ER: 50m) - WiFi.

Em contrapartida, a Figura 5.7 expõe o comportamento energético sob um ER de 100m, onde observa-se um crescimento acelerado do consumo. Fisicamente, este fenômeno decorre do mecanismo de acesso ao meio CSMA/CA. Com um raio expandido, um contingente maior de nós desperta concorrentemente, agravando o problema do nó oculto e saturando o canal.

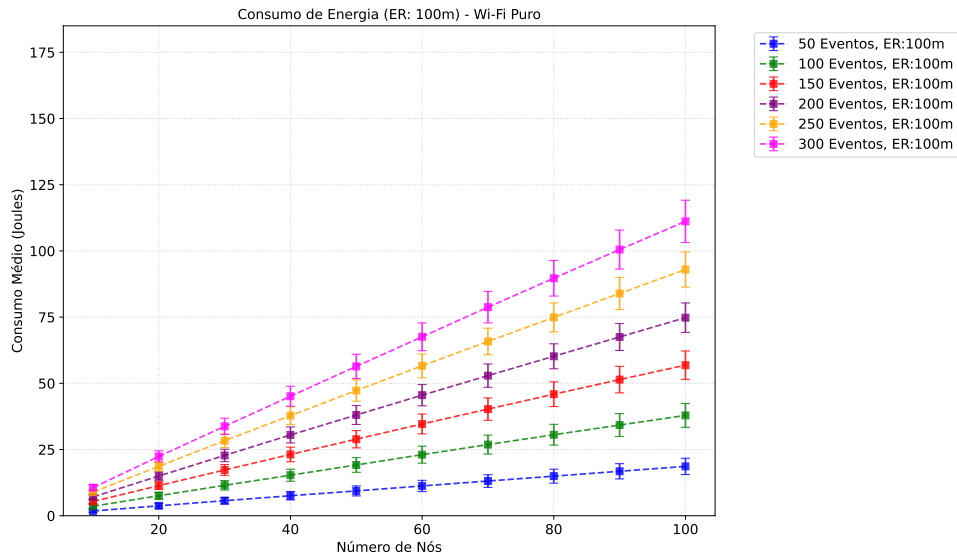


Figura 5.7: Consumo médio de energia por número de nós e eventos (ER: 100m) - WiFi.

Isso dispara sucessivos mecanismos de *exponential backoff* e retransmissões, explicando o pico de consumo e o aumento na variância dos dados, representados pelas extensas barras de erro na Figura 5.7, típicas da instabilidade de redes multissalto sob alta carga.

5.2.2 Análise de Confiabilidade: Taxa de Perda de Pacotes

A análise da eficácia de entrega, agora mensurada pela Taxa de Perda de Pacotes (*Packet Loss Rate*), corrobora a tese da saturação do canal em ambientes descentralizados. A Figura 5.8 consolida a taxa de perda percentual, enquanto as Figuras 5.9 e 5.10 detalham o impacto para os raios de 50m e 100m.

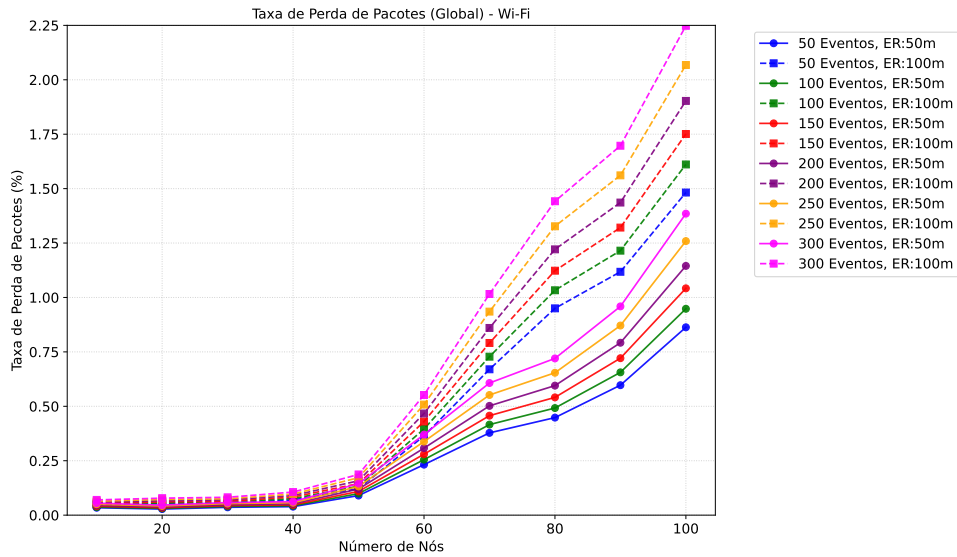


Figura 5.8: Taxa média de perda de pacotes (%) por número de nós e eventos - WiFi.

Diferente do cenário celular, onde o agendamento é determinístico, o Wi-Fi multissalto apresenta uma degradação progressiva da confiabilidade. Para o ER de 50m (Figura 5.9), a perda de pacotes é mantida em patamares baixos para redes esparsas, porém atinge aproximadamente 1,38% sob carga máxima. Este valor indica que, mesmo em raios menores, o acúmulo de saltos lógicos penaliza a entrega.

Ao analisar o ER de 100m (Figura 5.10), a rede entra em regime de instabilidade severa. Nota-se que a perda de pacotes escala rapidamente, atingindo picos de 2,248% em cenários de 100 nós e 300 eventos.

O crescimento acentuado da perda no cenário de 100m reflete a incapacidade

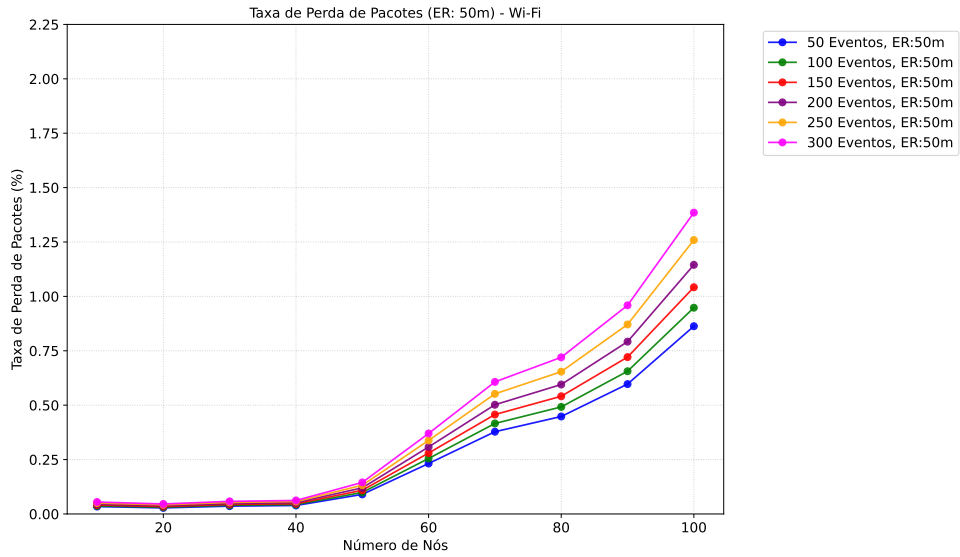


Figura 5.9: Taxa de perda de pacotes por número de nós e eventos (ER: 50m) - Wi-Fi.

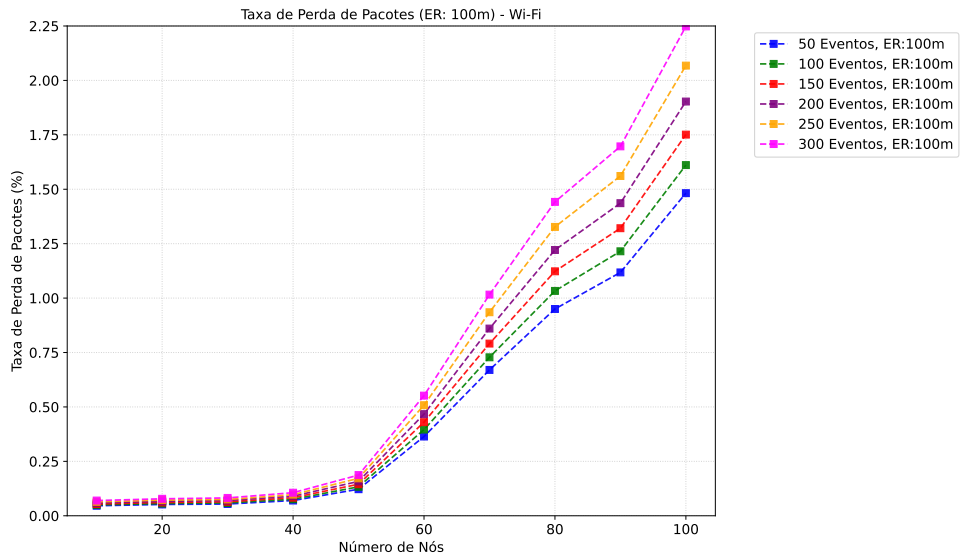


Figura 5.10: Taxa de perda de pacotes por número de nós e eventos (ER: 100m) - Wi-Fi.

do protocolo de gerenciar o volume de colisões rádio. As falhas sucessivas de reconhecimento (*ACK timeouts*) e o consequente estouro de fila (*buffer overflow*) nos nós retransmissores (*relays*) tornam o escoamento do tráfego de vídeo imprevisível, demonstrando que a ausência de um coordenador centralizado, como a eNodeB no modelo proposto, inviabiliza a QoS em monitoramentos urbanos densos.

5.3 Modelo Proposto: Coordenação Híbrida (D2D-LTE)

Esta seção detalha a avaliação de desempenho da arquitetura central desta tese, caracterizada pela operação híbrida D2D-LTE. Neste modelo, a infraestrutura celular (LTE) é utilizada exclusivamente para a comunicação entre a Estação Base (eNodeB) e os Líderes de Cluster (CH), que são eleitos dinamicamente. Os demais nós da rede operam via interface local de curto alcance (Wi-Fi Direct), encaminhando os dados sensoriais aos CHs, que realizam a agregação e a compressão antes do envio definitivo para o núcleo da rede através do enlace LTE.

5.3.1 Avaliação do Consumo Energético

A eficiência energética da abordagem híbrida é um dos pilares fundamentais deste trabalho, visando mitigar o alto custo de sinalização das redes celulares. A Figura 5.11 apresenta o panorama consolidado do consumo médio de energia (em Joules) para todas as configurações de rede avaliadas.

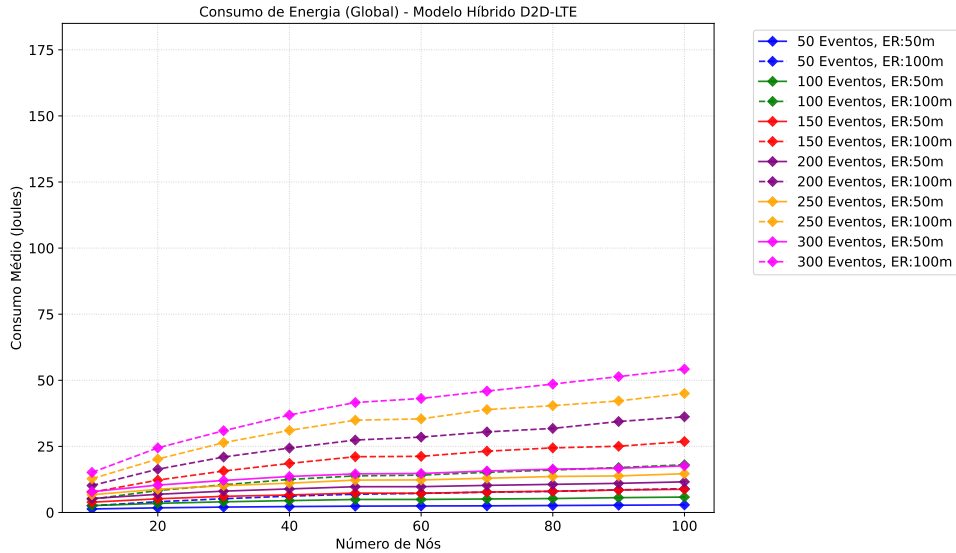


Figura 5.11: Consumo médio de energia na rede por número de nós e eventos - Cenário D2D-LTE.

Observa-se que o modelo proposto apresenta uma curva de consumo significativamente estável e com crescimento linear. Mesmo com o incremento da densidade para 100 nós, a dissipação de energia é mantida sob controle, demonstrando que

a delegação do tráfego de dados para enlaces D2D reduz drasticamente a necessidade de rádio LTE ativo por parte dos dispositivos periféricos, concentrando o gasto energético apenas nos nós eleitos como líderes.

Para pormenorizar o impacto da cobertura espacial no gasto energético, os resultados foram estratificados pelo Raio de Detecção (*Event Range* - ER). A Figura 5.12 ilustra o desempenho para o raio de 50 metros.

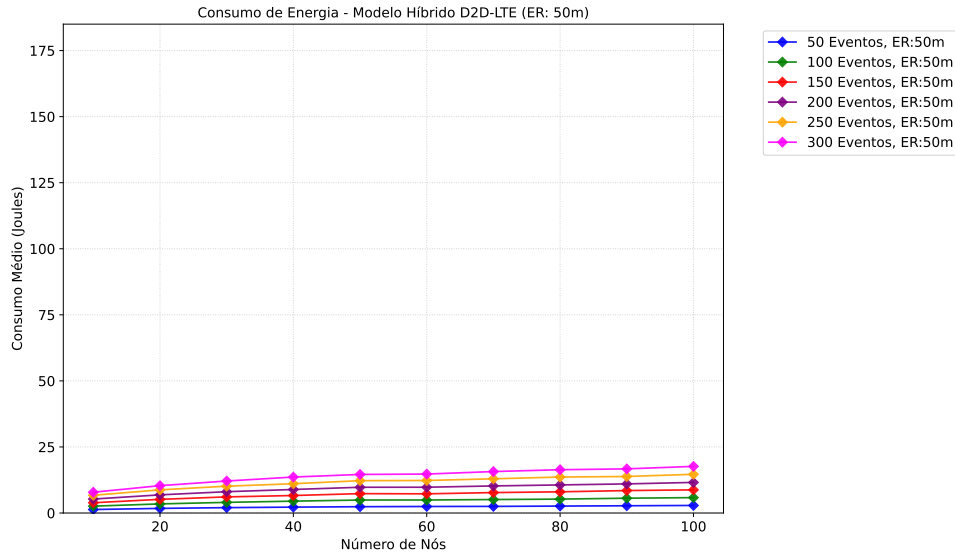


Figura 5.12: Consumo médio de energia para o cenário D2D-LTE com Raio de Detecção de 50m.

No cenário de ER de 50m, a eficiência do agrupamento local é evidente. O consumo máximo registrado para a carga de 300 eventos em uma rede de 100 nós situa-se no patamar de 20 Joules. Este resultado indica que a clusterização orquestrada pela eNodeB consegue suprimir transmissões redundantes de forma eficaz, mantendo o consumo médio por nó em níveis reduzidos, mesmo em condições de tráfego intenso e alta densidade de sensores.

A Figura 5.13 expõe o comportamento energético sob um Raio de Detecção de 100 metros.

Para o ER de 100m, o consumo médio atinge aproximadamente 55 Joules na configuração de maior estresse (100 nós e 300 eventos). Embora superior ao cenário de 50m devido ao maior volume de dados gerados pela detecção ampliada, a inclinação das curvas permanece constante e previsível.

Fisicamente, o aumento da área de detecção ativa um número maior de sensores simultaneamente para cada evento espacial. No entanto, a centralização da

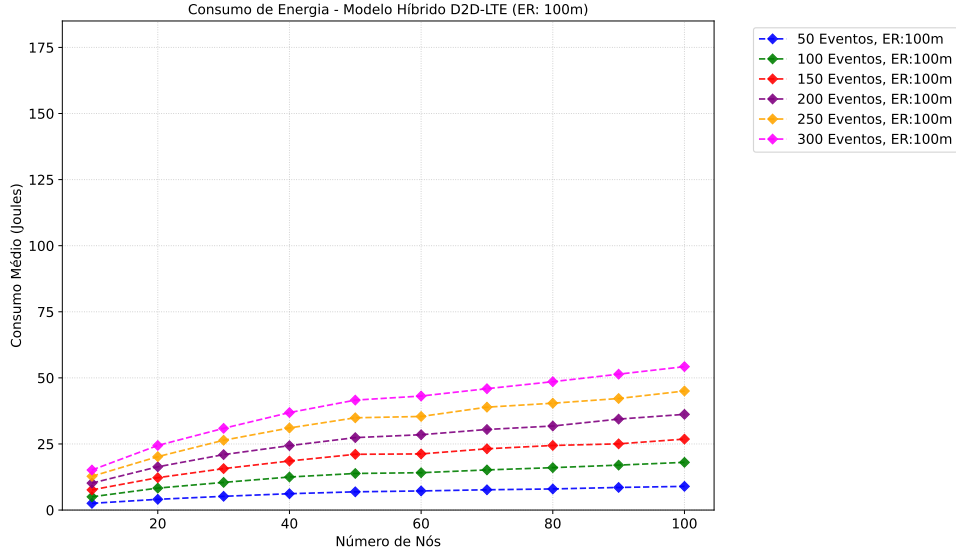


Figura 5.13: Consumo médio de energia para o cenário D2D-LTE com Raio de Detecção de 100m.

inteligência na eNodeB garante que o Algoritmo Húngaro otimize a alocação de CHs de forma a equilibrar a carga. Essa coordenação assistida evita a contenção desordenada de recursos e garante que a rede suporte o aumento da carga de eventos sem atingir estados de exaustão energética prematura, validando a escalabilidade da proposta híbrida para o monitoramento de áreas urbanas extensas.

5.3.2 Análise de Confiabilidade: Taxa de Perda de Pacotes (D2D-LTE)

A robustez da topologia híbrida proposta é evidenciada de forma incisiva pela análise da Taxa de Perda de Pacotes (%), métrica fundamental para aferir a confiabilidade da entrega de dados em redes de monitoramento crítico. O modelo D2D-LTE apresenta uma estabilidade elevada, mantendo os índices de descarte em patamares reduzidos mesmo sob condições de alta densidade e carga. A Figura 5.14 consolida o comportamento global desta métrica para todas as configurações avaliadas.

A previsibilidade observada nos resultados decorre da coordenação centralizada realizada pela estação base (eNodeB), que mitiga colisões rádio locais por meio da clusterização assistida. Ao desmembrar o desempenho sob o Raio de Detecção (ER) de 50m (Figura 5.15), nota-se uma eficiência notável, com a taxa de perda

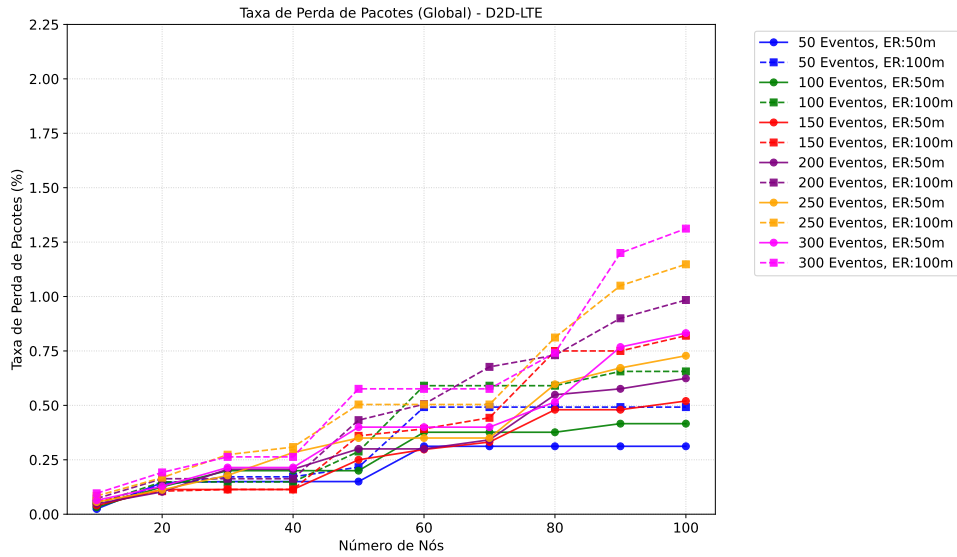


Figura 5.14: Visão geral da taxa média de perda de pacotes (%) por número de nós e eventos - Cenário D2D-LTE.

máxima registrada situada em aproximadamente 0,83% para o cenário de 100 nós e 300 eventos simultâneos.

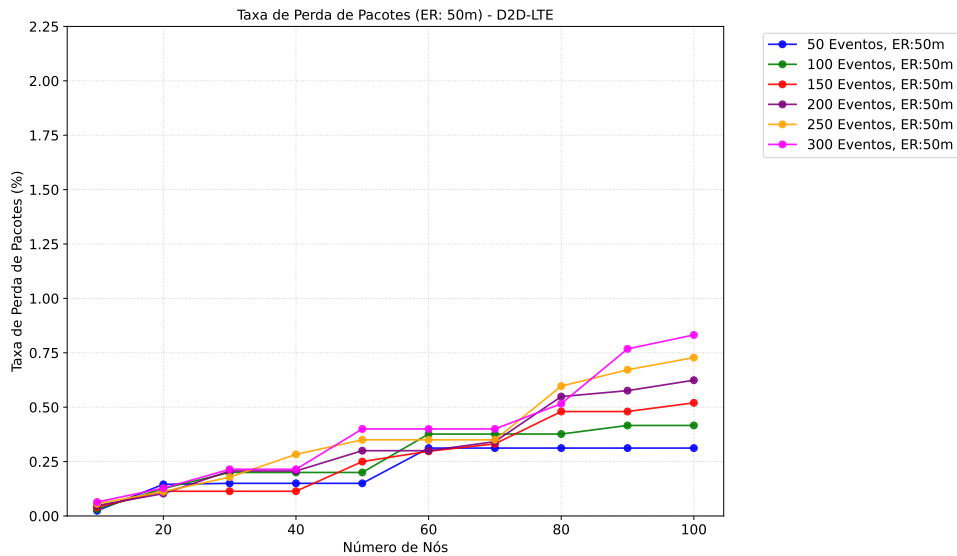


Figura 5.15: Taxa de perda de pacotes por número de nós e eventos (ER: 50m) - D2D-LTE.

Para o cenário de ER de 100m (Figura 5.16), verifica-se um incremento esperado na taxa de perda. Fisicamente, esse comportamento justifica-se pela ativação de um contingente superior de sensores em uma área geográfica ampliada, o que eleva a concorrência pelo acesso ao meio rádio. Contudo, mesmo sob esta configuração de estresse e intensa geração de dados, o pico de perda atinge cerca de 1,31%,

patamar que assegura a integridade operacional da rede.

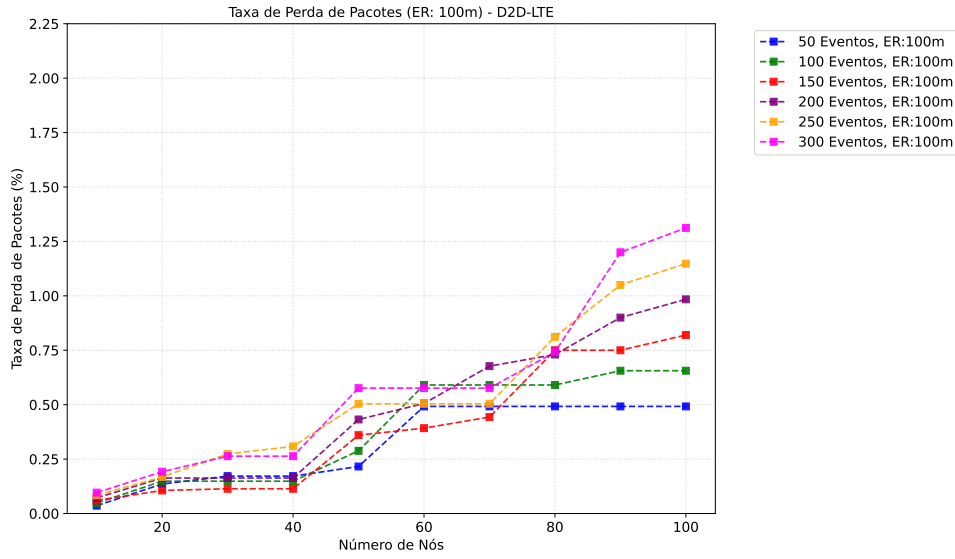


Figura 5.16: Taxa de perda de pacotes por número de nós e eventos (ER: 100m) - D2D-LTE.

A arquitetura híbrida garante que os Líderes de Cluster (CHs) atuem como *gateways* diretos, encurtando o caminho lógico dos pacotes para no máximo dois saltos (Nó Gerador $\rightarrow$ CH $\rightarrow$ eNodeB). Este fator é determinante para a manutenção de uma vazão previsível, pois evita o acúmulo excessivo de pacotes em filas de nós intermediários - comum em rotas de múltiplos saltos profundas - e minimiza o impacto do problema do terminal oculto. Dessa forma, a rede assegura que o fluxo de monitoramento IoT alcance a infraestrutura celular com alta integridade e reduzida probabilidade de descarte por congestionamento.

5.4 Síntese Comparativa e Discussão dos Resultados

Esta seção apresenta a síntese comparativa dos resultados obtidos, confrontando as três arquiteturas avaliadas: LTE Puro, Wi-Fi Puro e o Modelo Híbrido (D2D-LTE) proposto. Para garantir a isonomia da análise e avaliar o comportamento das tecnologias sob condições críticas de operação, fixou-se o Raio de Detecção (ER) em 100 metros. Este cenário impõe o maior nível de estresse rádio devido à ampla sobreposição das áreas de cobertura dos sensores, resultando em uma maior

carga de tráfego e contenção pelo acesso ao meio.

5.4.1 Análise Comparativa de Consumo Energético

O impacto da escalabilidade energética é o principal diferencial entre as tecnologias estudadas. A Figura 5.17 ilustra o consumo para uma carga reduzida de 50 eventos.

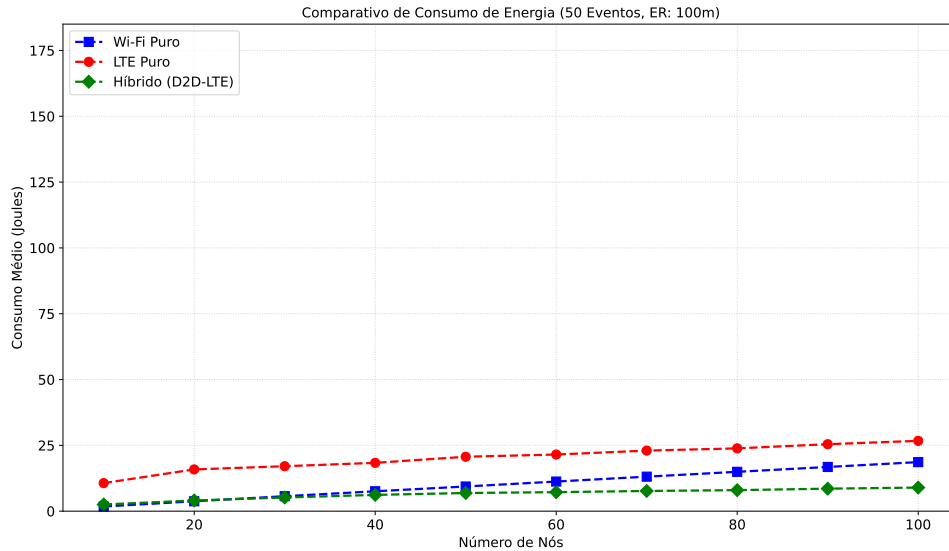


Figura 5.17: Comparativo de consumo energético (50 eventos, ER: 100m) - Wi-Fi vs. LTE vs. Híbrido.

Mesmo sob baixa carga, o LTE Puro apresenta o maior custo inicial devido à necessidade de manutenção da sinalização de controle constante com a Estação Base (eNodeB). O Wi-Fi Puro demonstra eficiência em redes esparsas; contudo, com o adensamento da rede, seu consumo supera rapidamente o do modelo híbrido, que se consolida como a alternativa mais econômica desde os cenários com menor densidade de dispositivos.

Com o incremento da carga para 150 eventos, as discrepâncias tornam-se mais acentuadas, conforme exposto na Figura 5.18.

Neste patamar, o LTE Puro atinge aproximadamente 75 Joules para uma rede de 100 nós, enquanto o Wi-Fi Puro alcança cerca de 55 Joules. O Modelo Híbrido preserva sua estabilidade operacional, mantendo o consumo próximo a 25 Joules. Este resultado representa uma redução superior a 50% em relação ao Wi-Fi e 65% frente ao LTE direto, validando a premissa de que a delegação de tráfego para enlaces de curto alcance é vital para a longevidade da rede.

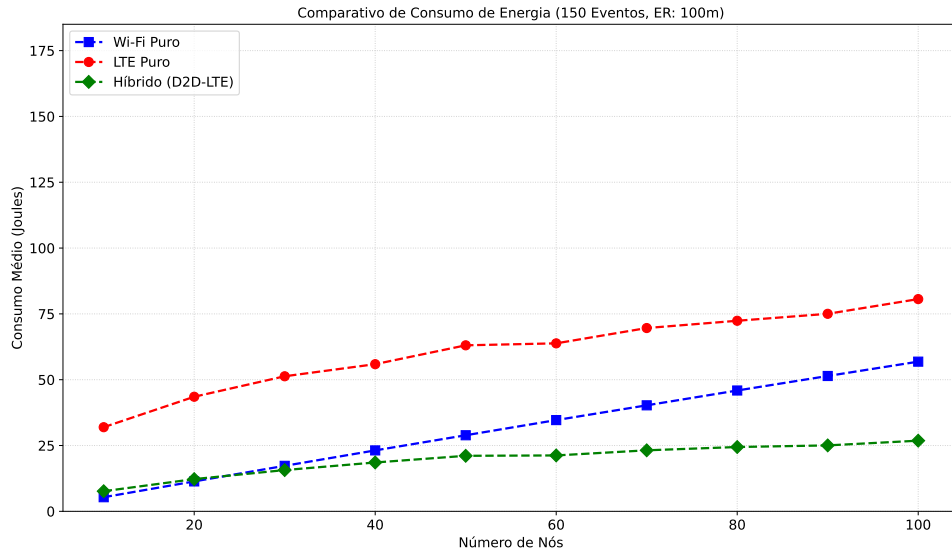


Figura 5.18: Comparativo de consumo energético (150 eventos, ER: 100m) - Wi-Fi vs. LTE vs. Híbrido.

O cenário de estresse máximo, com 300 eventos, é consolidado na Figura 5.19.

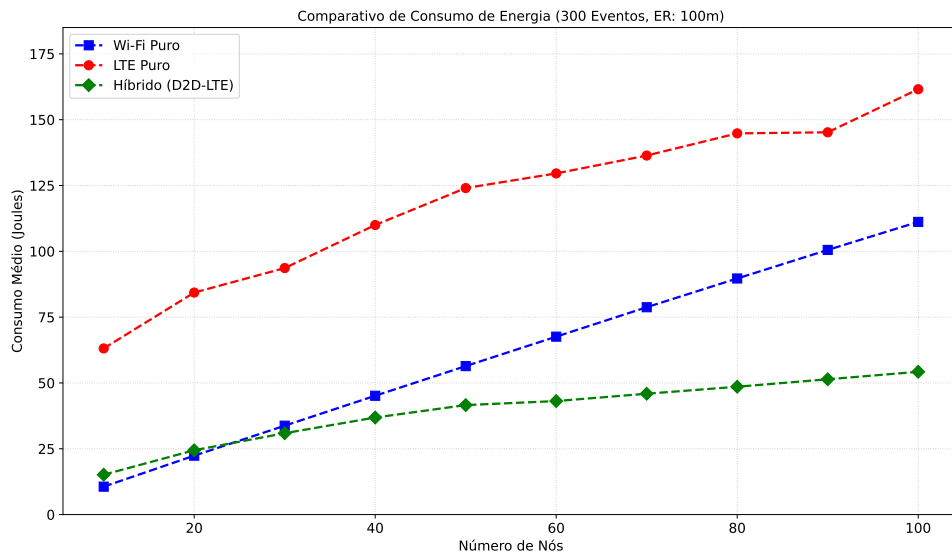


Figura 5.19: Comparativo de consumo energético (300 eventos, ER: 100m) - Wi-Fi vs. LTE vs. Híbrido.

Sob demanda extrema, o LTE Puro ultrapassa o limiar de 150 Joules para 100 nós, tornando-se desafiador para dispositivos limitados por bateria. O Wi-Fi Puro sofre uma degradação severa a partir de 60 nós, atingindo 110 Joules no limite da densidade testada devido ao excesso de colisões e retransmissões. Em contrapartida, o Modelo Híbrido sustenta a linearidade do consumo, atingindo apenas 55 Joules, o que confirma a eficácia da coordenação assistida na mitigação do tráfego redundante

e na preservação de recursos.

5.4.2 Análise Comparativa de Confiabilidade (Perda de Pacotes)

A análise da Taxa de Perda de Pacotes (%) sob o Raio de Detecção de 100 metros revela o impacto da arquitetura de rede na integridade dos fluxos de dados sob diferentes regimes de tráfego. As Figuras 5.20, 5.21 e 5.22 confrontam a eficiência comunicacional das três tecnologias avaliadas.

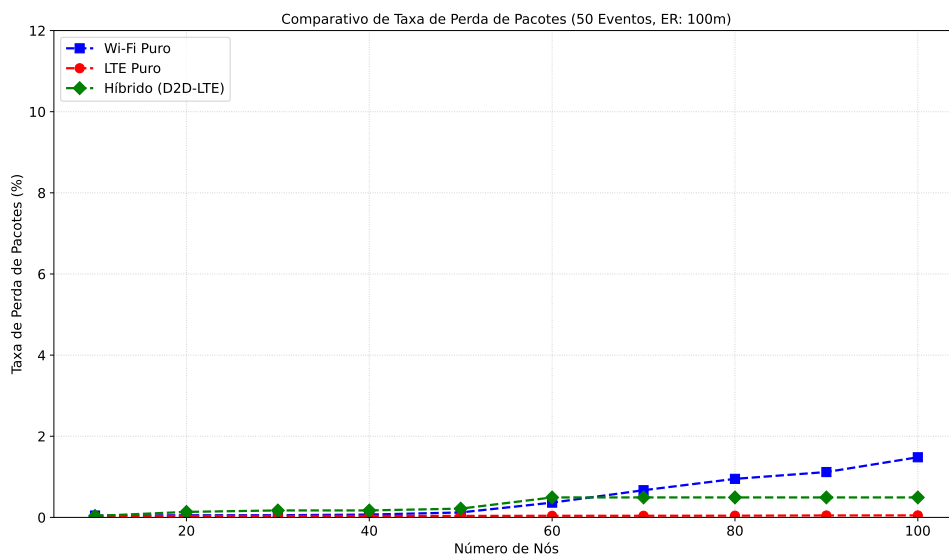


Figura 5.20: Comparativo de taxa de perda de pacotes (50 eventos, ER: 100m) — Wi-Fi vs. LTE vs. Híbrido.

Conforme observado na Figura 5.20, em cenários de baixa carga, o LTE Puro mantém estabilidade próxima a 0,1% de perda, beneficiando-se do agendamento determinístico em espectro licenciado. O Wi-Fi Puro, por outro lado, já demonstra vulnerabilidade ao adensamento de nós, atingindo aproximadamente 1,5% de perda na densidade máxima, enquanto o modelo híbrido estabiliza-se em patamares inferiores a 0,5%.

Com o incremento da carga para 150 eventos (Figura 5.21), a degradação do Wi-Fi Puro torna-se mais acentuada, alcançando 1,75% de descarte para 100 nós. O modelo híbrido demonstra resiliência superior ao manter a taxa de perda abaixo de 0,8%, o que representa uma melhora de confiabilidade superior a 50% em relação à arquitetura puramente descentralizada, mesmo com o aumento da contenção rádio.

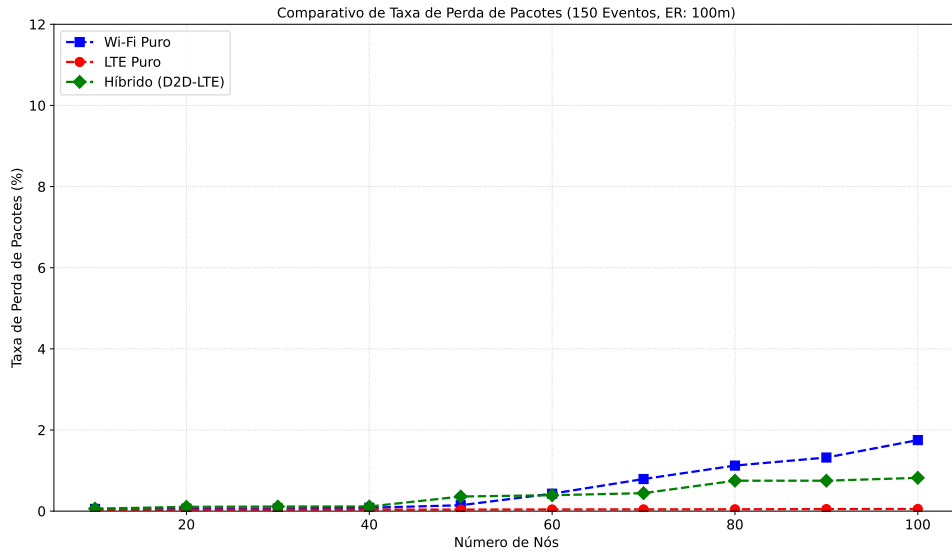


Figura 5.21: Comparativo de taxa de perda de pacotes (150 eventos, ER: 100m) — Wi-Fi vs. LTE vs. Híbrido.

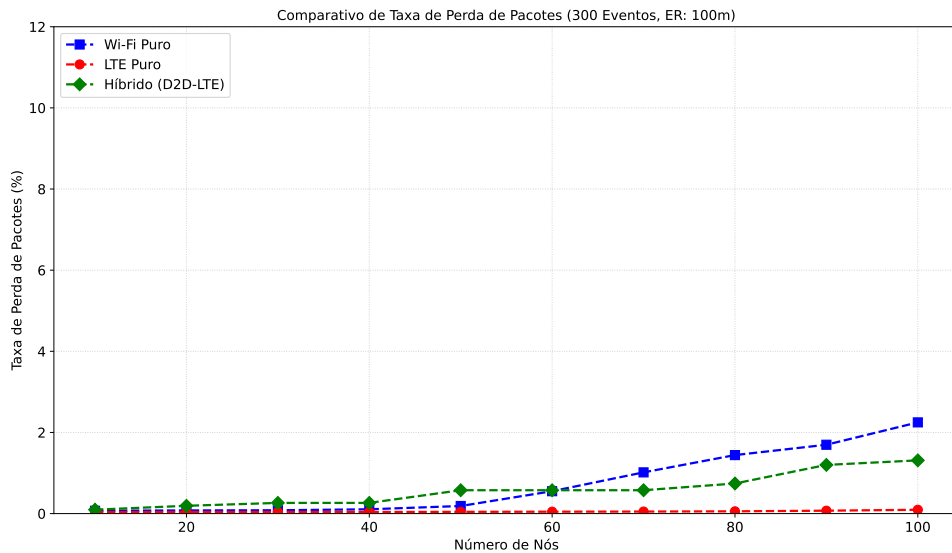


Figura 5.22: Comparativo de taxa de perda de pacotes (300 eventos, ER: 100m) — Wi-Fi vs. LTE vs. Híbrido.

Sob estresse máximo de 300 eventos (Figura 5.22), o Wi-Fi Puro atinge seu pico de instabilidade com 2,25% de perda, reflexo direto da saturação das rotas multissalto e do problema do terminal oculto. Em contrapartida, o Modelo Híbrido estabiliza a perda em aproximadamente 1,31% para 100 nós.

Embora o LTE apresente os menores índices absolutos de erro, a arquitetura híbrida consolida-se como a solução mais equilibrada. Ela reduz a perda em aproximadamente 40% em relação ao Wi-Fi Puro, garantindo um QoS adequado para monitoramento urbano, enquanto provê uma economia de energia de 60% frente

à transmissão direta celular, validando a eficácia da orquestração centralizada via eNodeB.

Capítulo 6

Conclusões

A presente tese conduziu um estudo comparativo abrangente para avaliar a eficiência energética e a qualidade de serviço em três distintas arquiteturas de rede para a Internet das Coisas (LTE-Puro, WiFi-Puro e a proposta híbrida D2D-LTE). A análise rigorosa dos resultados permitiu validar a hipótese central da pesquisa e extrair conclusões determinantes sobre o comportamento de topologias de alta densidade em cenários de cidades inteligentes.

Em primeiro lugar, as simulações comprovaram a existência de tendências comportamentais transversais a todas as arquiteturas avaliadas: o consumo médio de energia possui uma correlação estritamente positiva e direta tanto com o adensamento da rede (número de nós) quanto com a de tráfego gerada (número de eventos). Além disso, confirmou-se que a expansão do Raio de Detecção (*Event Range* para 100m) atua como um catalisador de exaustão energética, evidenciando a necessidade crítica de mecanismos de agregação de dados em eventos espacialmente redundantes.

O contraste analítico entre os paradigmas de comunicação revelou as severas limitações das infraestruturas tradicionais. A arquitetura celular centralizada (LTE-Puro) mostrou-se a mais dispendiosa energeticamente. Com um consumo que ultrapassa o limiar de 160 Joules na configuração de maior estresse (100 nós, 300 eventos e ER de 100m), a topologia exibiu uma curva de crescimento acentuada e insustentável. Esta elevada sensibilidade ao adensamento demonstra que o uso exclusivo de enlaces de longo alcance é desafiador para o sensoriamento massivo devido à sobrecarga de sinalização imposta a cada dispositivo individualmente.

Em contrapartida, as arquiteturas baseadas em comunicação de proximidade

(WiFi-Puro e D2D-LTE) demonstraram níveis de eficiência significativamente superiores, achatando as curvas de consumo mesmo sob condições de escalabilidade extrema. O cenário WiFi-Puro obteve um consumo máximo na ordem de 111 Joules. Contudo, conforme discutido nos capítulos anteriores, esta economia de energia em redes puramente *ad hoc* cobra um preço inaceitável no QoS, culminando em alta latência, instabilidade de rotas (*multihop*) e degradação progressiva do LQI devido à saturação do meio não licenciado.

Neste contexto, os resultados obtidos sugerem que o modelo de coordenação híbrida (D2D-LTE) desenvolvido nesta tese apresenta-se como uma solução promissora para os desafios apresentados, demonstrando um desempenho melhor em comparação aos métodos convencionais analisados. Ao transferir estrategicamente a carga de transmissão local para a interface Wi-Fi Direct e delegar a comunicação de longo alcance apenas aos Líderes de Cluster (eleitos de forma ótima pelo Algoritmo Húngaro), a arquitetura proposta atingiu o menor consumo energético absoluto entre todos os cenários (aproximadamente 55 Joules).

Diante do exposto, observa-se que o modelo D2D-LTE se diferencia das abordagens convencionais ao atuar não apenas na preservação de energia, mas como um mecanismo de coordenação de recursos Multi-RAT. Essa característica permite uma gestão mais integrada dos elementos da rede, indo além da simples economia de bateria. A arquitetura proposta apresentou indicadores favoráveis de viabilidade econômica e resiliência, contribuindo para o equilíbrio entre a eficiência energética e a manutenção da QoS. Esses resultados demonstram o potencial da solução para viabilizar a implantação de redes de monitoramento contínuo em cenários IoT.

6.1 Trabalhos Futuros

Embora esta tese tenha apresentado avanços significativos na otimização energética e na manutenção do LQI em redes D2D assistidas por LTE, o tema oferece um vasto campo para investigações complementares. Visando o aprofundamento desta linha de pesquisa e a superação das limitações metodológicas inerentes ao atual escopo, propõem-se as seguintes diretrizes para trabalhos futuros:

- **Implementação de Tráfego Bidirecional (*Downlink* e *Uplink*):** Como o presente estudo concentrou-se predominantemente no tráfego de *uplink*, justificado pelo perfil de geração de dados de sensores e dispositivos de imagem [66], recomenda-se a expansão do modelo para suportar fluxos de *downlink*. Essa abordagem permitirá avaliar o impacto do estado de escuta e recepção contínua na autonomia energética dos nós periféricos.
- **Incorporação de Modelos de Mobilidade Dinâmica:** As simulações conduzidas basearam-se em uma topologia estática para estabelecer uma base sólida de comparação energética [38]. Trabalhos futuros devem introduzir modelos de mobilidade para investigar a resiliência dos algoritmos de reclusterização e mensurar a latência na recuperação de caminhos mínimos em ambientes dinâmicos e altamente voláteis [73, 74].
- **Otimização via Aprendizado de Máquina (*Deep Reinforcement Learning*):** Propõe-se a integração de modelos de DRL para a predição inteligente do LQI e para a automação da transição horizontal entre múltiplas interfaces (*Multi-RAT*, envolvendo Wi-Fi, LTE e LoRa). Isso dotaria a rede da capacidade de antecipar quedas na qualidade do sinal e realizar o *handoff* antes da interrupção de fluxos de dados críticos [13, 48].
- **Integração com Redes 5G-Advanced e 6G:** A evolução da infraestrutura de simulação para os padrões 5G NR (*New Radio*) e arquiteturas 6G permitirá a exploração de técnicas de fatiamento de rede (*network slicing*). Isso possibilitaria o isolamento estrito de tráfego de missão crítica em relação à sinalização convencional da rede celular [38].

- **Canal de Controle Secundário via LoRa Mesh (*LPWAN*):** Investigar a aplicação de redes de longo alcance e baixo consumo (como LoRa) estruturadas em topologia *mesh* para atuar como rede de contingência (*fallback*). Essa infraestrutura paralela manteria a sinalização de controle e a coordenação dos *clusters* D2D operantes mesmo em áreas de sombra ou sob falha catastrófica da infraestrutura celular principal.
- **Análise de Sensibilidade dos Coeficientes de Ponderação:** A estrutura do modelo permite a atribuição de pesos distintos para variáveis de energia, distância e qualidade de link, o que possibilita a realização de estudos de sensibilidade detalhados. Investigações futuras podem explorar como variações nesses coeficientes impactam o comportamento da rede em diferentes cenários de carga, auxiliando na calibração de perfis operacionais adequados a aplicações com requisitos específicos de priorização.
- **Validação em Protótipo ou *Test-bed* Experimental:** A transição dos resultados obtidos via simulação para um ambiente experimental físico permitiria avaliar o desempenho do modelo sob as condições de um canal de rádio real. O desenvolvimento de um protótipo funcional possibilitaria confrontar os dados computacionais com as latências e restrições inerentes ao hardware, contribuindo para o refinamento das métricas de consumo e resiliência em condições operacionais de campo.
- **Avaliação Comparativa com Protocolos Híbridos do Estado da Arte:** O presente trabalho foca-se no contraste frente aos cenários base (*LTE-Puro* e *Wi-Fi Puro*) para evidenciar o ganho da coordenação assistida em relação a redes homogêneas, propõe-se como investigação futura a comparação direta com outras heurísticas do estado da arte. Esta análise permitirá avaliar o desempenho do modelo proposto frente a algoritmos baseados em inteligência artificial ou otimização estocástica sob cenários padronizados, superando a limitação atual de heterogeneidade de parâmetros e permitindo o refinamento entre diferentes estratégias de coordenação híbrida.

Referências Bibliográficas

- [1] FENG, D., LU, L., YUAN-WU, Y., et al., “Device-to-Device Communications in Cellular Networks”, *IEEE Communications Magazine*, v. 52, n. 4, pp. 49–55, April 2014.
- [2] KAWAMOTO, T., KABASHIMA, Y., “Cross-Validation Estimate of the Number of Clusters in a Network”, *Scientific Reports*, v. 7, n. 1, pp. 3327, June 2017.
- [3] BARIK, P. K., SINGHAL, C., DATTA, R., “DAMS: D2D-Assisted Multimedia Streaming Service with Minimized BS Transmit Power in Cellular Networks”, *Computer Communications*, v. 144, pp. 149–161, August 2019.
- [4] SILVA, J. M., SANTOS, L. L., “Device-to-Device (D2D) Communication in Internet of Things (IoT): A Comprehensive Survey”, *Sensors*, v. 20, n. 13, pp. 3658, June 2020.
- [5] BARIK, P. K., SINGHAL, C., DATTA, R., “An Efficient Data Transmission Scheme Through 5G D2D-Enabled Relays in Wireless Sensor Networks”, *Computer Communications*, v. 168, pp. 102–113, February 2021.
- [6] MOGHADDAM, S. S., AFZALKHANI, N., “A Munkres-Based D2D Resource Allocation Algorithm Aware of Cluster Information”. In: *2022 Workshop on Microwave Theory and Techniques in Wireless Communications (MTTW)*, pp. 171–176, Riga, Latvia, October 2022.
- [7] ZHOU, S., CHENG, Y., LEI, X., et al., “Resource Allocation in UAV-Assisted Networks: A Clustering-Aided Reinforcement Learning Approach”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, v. 71, n. 11, pp. 12088–12103, November 2022.

- [8] RAPPAPORT, T. S., *Wireless Communications: Principles and Practice*. 2nd ed. *Prentice Hall Communications Engineering and Emerging Technologies Series*, Prentice Hall: Upper Saddle River, NJ, 2002, Includes bibliographical references and index.
- [9] NNEBE, S., ONOH, G., OHANEME, C. O., et al., “Performance Evaluation of Link Quality Indicator of a Wireless Sensor Network in an Outdoor Environment”, *International Journal of Electronics Communication and Computer Engineering*, v. 4, n. 4, pp. 1190–1193, July 2020.
- [10] ANASTASI, G., CONTI, M., DI FRANCESCO, M., et al., “On the Reliability of Wireless Sensor Networks: A Survey”, *Computer Communications*, v. 34, n. 7, pp. 857–868, May 2011.
- [11] AKYILDIZ, I. F., SU, W., SANKARASUBRAMANIAM, Y., et al., “A Survey on Sensor Networks”, *IEEE Communications Magazine*, v. 40, n. 8, pp. 102–114, August 2002.
- [12] ASADI, A., WANG, Q., MANCUSO, V., “A Survey on Device-to-Device Communication in Cellular Networks”, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, v. 16, n. 4, pp. 1801–1819, May 2014.
- [13] AHMAD, I., KHAN, M. A., SOLAIMAN, S., et al., “Coordinated Machine Learning for Energy Efficient D2D Communication”, *IEEE Wireless Communications Letters*, v. 13, n. 1, pp. 102–106, January 2024.
- [14] SAQIB, N., HAQUE, K. F., YELAMARTHI, K., et al., “D2D-LoRa Latency Analysis: An Indoor Application Perspective”. In: *2021 IEEE 7th World Forum on Internet of Things (WF-IoT)*, pp. 29–34, New Orleans, LA, USA, June 2021.
- [15] LIU, Y., HU, Q., CAI, Y., et al., “Latency Minimization in Intelligent Reflecting Surface Assisted D2D Offloading Systems”, *IEEE Communications Letters*, v. 25, n. 9, pp. 3046–3050, September 2021.
- [16] HAMADANI, M. K., BORCOCI, E., “Fog Computing and D2D Networks Integration”. In: *2021 IEEE International Black Sea Conference on Commu-*

nications and Networking (BlackSeaCom), pp. 1–6, Bucharest, Romania, May 2021.

- [17] ABBAS, F., FAN, P., “A Hybrid Low-Latency D2D Resource Allocation Scheme Based on Cellular V2X Networks”. In: *2018 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)*, pp. 1–6, Kansas City, MO, USA, May 2018.
- [18] KIM, D., KWAK, Y., OH, J., et al., “Discovery Resource Grouping for D2D Discovery for Mitigation of In-Band Emission in LTE-Advanced”. In: *2014 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, pp. 869–874, Austin, TX, USA, December 2014.
- [19] TAHERI, S. A., RASTI, M., “Caching Placement and Offloading in D2D-Assisted Wireless Networks with In-Band Full Duplex”. In: *2020 28th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE)*, pp. 1–5, Tabriz, Iran, August 2020.
- [20] KIM, S., KIM, S., CHAE, S., et al., “Relay Location Considering In-Band Emission for OFDMA-Based D2D Overlay Systems”. In: *2017 Ninth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN)*, pp. 528–530, Milan, Italy, July 2017.
- [21] DONG, F., WU, J., LONG, C., “Self-Sorted D2D Discovery for Alleviating In-Band Emission in LTE Networks”. In: *2017 29th Chinese Control And Decision Conference (CCDC)*, pp. 2643–2648, Chongqing, China, May 2017.
- [22] GUI, J., LI, Z., ZENG, Z., “Improving Energy-Efficiency for Resource Allocation by Relay-Aided In-Band D2D Communications in C-RAN-Based Systems”, *IEEE Access*, v. 7, pp. 8358–8375, January 2019.
- [23] WANG, X., YANG, X., LI, Z., “Co-Existence Analysis of LTE Micro Cell and LTE Out-Band Backhaul”. In: *2010 IEEE 72nd Vehicular Technology Conference - Fall*, pp. 1–5, Ottawa, ON, Canada, September 2010.

- [24] LI, Z., GUI, J., XIONG, N., et al., “Energy-Efficient Resource Sharing Scheme With Out-Band D2D Relay-Aided Communications in C-RAN-Based Underlay Cellular Networks”, *IEEE Access*, v. 7, pp. 19125–19142, January 2019.
- [25] LUIZ, D. F., CARVALHO, C. B., “Energy Optimization for D2D Communications in IoT Scenarios: Emphasizing Quality”, Pôster apresentado no Symposium on Internet of Things (SIoT), October 2023, Pôster.
- [26] LIANG, C.-P., RAO, P.-Z., HUANG, T.-J., et al., “Analysis and Design of Two Low-Power Ultra-Wideband CMOS Low-Noise Amplifiers With Out-Band Rejection”, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, v. 58, n. 2, pp. 277–286, February 2010.
- [27] CONG, R., YANG, Z., “Optimization of Out-Band Sensing Time in Cognitive Radios”. In: *2010 IEEE International Conference on Progress in Informatics and Computing*, v. 1, pp. 383–387, Shanghai, China, December 2010.
- [28] MIRANDA, M. N. D., FIGUEIREDO, D. R., LUIZ, D. F., et al., “Design and Analysis of Distributed Tree Growing Algorithms”, *IEEE Access*, v. 10, pp. 26580–26602, February 2022.
- [29] 3GPP, *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Overall description; Stage 2 (Release 8)*, Technical Specification (TS) 36.300, 3rd Generation Partnership Project (3GPP), 2008, Versão 8.0.0.
- [30] MAHMOUD, A., SOLAIMAN, S., JAVAID, N., et al., “Evolved Packet Core and the Future of All-IP Networks: An Academic Perspective”, *IEEE Communications Standards Magazine*, v. 8, n. 1, pp. 45–58, March 2024.
- [31] HASSAN, N., AHMAD, I., HUSSAIN, S., et al., “Intelligent Traffic Offloading in Multi-RAT Heterogeneous Networks for IoT Applications”, *IEEE Access*, v. 11, pp. 45678–45692, May 2023.

- [32] WANG, X., ZHANG, L., WEI, Y., et al., “Low-Latency Resource Allocation for URLLC in Industrial IoT: A Clustering Approach”, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, v. 23, n. 4, pp. 3120–3135, April 2024.
- [33] SAEED, M., AL-NAFFOURI, T. Y., ALOUINI, M.-S., et al., “Energy Harvesting and Resource Allocation in Multi-RAT IoT Networks: A 2024 Perspective”, *IEEE Internet of Things Journal*, v. 11, n. 2, pp. 1542–1555, January 2024.
- [34] LIU, Q., MA, X., ZHOU, G. T., et al., “Peak-to-Average Power Ratio versus Instantaneous-to-Average Power Ratio for OFDM”. In: *2008 42nd Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, pp. 938–942, Pacific Grove, CA, USA, October 2008.
- [35] YE, Y., GAO, M., CHEN, W., et al., “Peak-to-Average Power Ratio Suppression Based on MPGA-SLM”. In: *2018 23rd Opto-Electronics and Communications Conference (OECC)*, pp. 1–2, Jeju, South Korea, July 2018.
- [36] YE, Y., GAO, M., MA, Y., et al., “Peak-to-Average Power Ratio Suppression Based on Multi-Stage Optimal Phase (MSOP-SLM)”. In: *2018 Asia Communications and Photonics Conference (ACP)*, pp. 1–3, Hangzhou, China, October 2018.
- [37] SADOVAYA, Y., GELGOR, A., “Synthesis of Signals with a Low-Level of Out-of-Band Emission and Peak-to-Average Power Ratio”. In: *2018 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EEx-Polytech)*, pp. 103–106, Saint Petersburg, Russia, October 2018.
- [38] AHMAD, A., KHAN, M. A., SOLAIMAN, S., et al., “AI Empowered 6G Technologies and Network Layers: Recent Trends, Opportunities, and Challenges”, *Expert Systems with Applications*, pp. 125985, May 2025.
- [39] XU, J., OTA, K., DONG, M., “AI-Centric D2D in 6G Networks”, *IEEE Networking Letters*, v. 6, n. 4, pp. 257–261, December 2024.
- [40] GOTTAM, S. R., KAR, U. N., “A Hybrid Quantum-Meta Reinforcement Learning and Graph Attention Transformer Approach for Low-Latency and

- a Secure D2D Routing in 6G Cellular Networks”, *IEEE Access*, v. 14, pp. 25017–25037, February 2026.
- [41] LI, D., ZHANG, H., DING, H., et al., “User-Preference-Learning-Based Proactive Edge Caching for D2D-Assisted Wireless Networks”, *IEEE Internet of Things Journal*, v. 10, n. 13, pp. 11922–11937, July 2023.
- [42] CHEN, Y., LIU, S., “Joint Mode Selection and Resource Allocation for D2D-Assisted Wireless Federated Learning”, *IEEE Wireless Communications Letters*, v. 14, n. 1, pp. 78–82, January 2025.
- [43] RAFIQ, A., PING, W., MIN, W., et al., “Optimizing Energy Consumption and Latency Based on Computation Offloading and Cell Association in MEC Enabled Industrial IoT Environment”. In: *2021 6th International Conference on Intelligent Computing and Signal Processing (ICSP)*, pp. 10–14, Xi’an, China, April 2021.
- [44] BARIK, P. K., DATTA, R., “A Munkres-Based Assignment for Energy-Efficient D2D Communications”, *IEEE Transactions on Network and Service Management*, v. 19, n. 3, pp. 3152–3165, September 2022.
- [45] SONG, W., SONG, M., HALDER, S. J., et al., “Link Quality Estimation in Wireless Sensor Networks: A Survey”, *Sensors*, v. 12, n. 12, pp. 1234–1250, December 2012.
- [46] CHEN, J., KUO, S. Y., “Optimization of Link Quality Indicator (LQI) Threshold for Communication Reliability in Low-Power Wireless Sensor Networks”, *Sensors*, v. 19, n. 11, pp. 2521, June 2019.
- [47] TILWARI, V., HINDIA, M. N., DIMYATI, K., et al., “MBMQA: A Multicriteria-Aware Routing Approach for the IoT 5G Network Based on D2D Communication”, *Electronics*, v. 10, n. 23, pp. 2937, November 2021.
- [48] SMITH, J., JOHNSON, M., WILLIAMS, R., et al., “Optimizing Energy-Efficient Communication Protocols for IoT Devices in Smart Cities Using

Narrowband IoT and LTE-M Technology”, *Journal of Electrical Systems*, v. 20, n. 5s, pp. 2149–2157, October 2024.

- [49] RATHORE, R. S., KAIWARTYA, O., QURESHI, K. N., et al., “Towards Enabling Fault Tolerance and Reliable Green Communications in Next-Generation Wireless Systems”, *Applied Sciences*, v. 12, n. 17, pp. 8870, August 2022.
- [50] ANSERE, J. A., HAN, G., BONSU, K. A., et al., “Energy-Efficient Joint Power Allocation and User Selection Algorithm for Data Transmission in Internet-of-Things Networks”, *IEEE Internet of Things Journal*, v. 7, n. 9, pp. 8736–8747, September 2020.
- [51] QURESHI, K. N., BASHIR, F., IQBAL, S., et al., “Green IoT: An Energy-Efficient Clustering Protocol for Wireless Sensor Networks”, *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, v. 35, n. 8, pp. 101672, September 2023.
- [52] VERMA, S., KAUR, S., KUMAR, R., et al., “Energy-Efficient Clustering in IoT Using Meta-Heuristics: A Comprehensive Review”, *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, v. 41, pp. 100932, January 2024.
- [53] KUMAWAT, S., KAUR, H., DAHIYA, O., “A Modified LEACH Protocol in Wireless Sensor Networks for Energy Efficient Routing Protocol”. In: *2022 3rd International Conference on Intelligent Engineering and Management (ICIEM)*, pp. 785–790, London, UK, April 2022.
- [54] GURAY, M., MARRIWALA, N., AHMED, N., “Hybrid LEACH Based Cluster Head Election in Wireless Sensor Networks”. In: *2017 4th International Conference on Signal Processing, Computing and Control (ISPCC)*, pp. 86–90, Solan, India, September 2017.
- [55] TÜMER, A. E., GÜNDÜZ, M., “An Improved LEACH Protocol for Indoor Wireless Sensor Networks”. In: *2014 International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN)*, pp. 432–437, Noida, India, February 2014.

- [56] MOGHADDAM, S. S., ASHOOR, E., “Kuhn-Munkres-Based Sub-Optimum Resource Allocation Algorithm for Ultra-Dense Networks”. In: *2024 11th International Symposium on Telecommunications (IST)*, pp. 273–278, Tehran, Iran, October 2024.
- [57] CHEN, N., TIAN, H., WANG, Z., “Resource Allocation for Intra-Cluster D2D Communications Based on Kuhn-Munkres Algorithm”. In: *2014 IEEE 80th Vehicular Technology Conference (VTC2014-Fall)*, pp. 1–5, Vancouver, BC, Canada, September 2014.
- [58] MOGHADDAM, K. S., MOGHADDAM, S. S., “A Fast Sub-Optimum Access Point Selection in Ultra-Dense Networks”. In: *2021 IEEE International Conference on Communication, Networks and Satellite (COMNETSAT)*, pp. 239–243, Purwokerto, Indonesia, July 2021.
- [59] WANG, N., FEI, Z., KUANG, J., “QoE-Aware Resource Allocation for Mixed Traffics in Heterogeneous Networks Based on Kuhn-Munkres Algorithm”. In: *2016 IEEE International Conference on Communication Systems (ICCS)*, pp. 1–6, Shenzhen, China, December 2016.
- [60] ZHANG, X.-Y., ZHANG, J., GONG, Y.-J., et al., “Kuhn–Munkres Parallel Genetic Algorithm for the Set Cover Problem and Its Application to Large-Scale Wireless Sensor Networks”, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, v. 20, n. 5, pp. 695–710, October 2016.
- [61] LI, J., SUN, Y., WANG, H., et al., “Latency-Aware Clustering for Time-Critical Applications in Wireless Sensor Networks”, *Journal of Communications and Information Networks*, v. 8, n. 2, pp. 145–158, June 2023.
- [62] CHEN, Y., ZHANG, H., LI, M., et al., “Reliability and Delay Analysis for Edge-Assisted Data Aggregation in IoT”, *Ad Hoc Networks*, v. 128, pp. 102789, May 2022.
- [63] BERA, S., MISRA, S., ROY, S. K., et al., “Edge-Assisted Clustering and Data Management for Industrial IoT”, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, v. 19, n. 2, pp. 1456–1465, February 2023.

- [64] SINGH, S. K., KUMAR, P., SINGH, J. P., et al., “Data Fusion and Aggregation Techniques in Wireless Sensor Networks: A 2022 Perspective”, *Ad Hoc Networks*, v. 132, pp. 102871, July 2022.
- [65] GUPTA, R., TANWAR, S., TYAGI, S., et al., “Fog-Centric Data Aggregation and Processing for Low-Latency IoT Applications”, *Journal of Network and Computer Applications*, v. 204, pp. 103423, August 2022.
- [66] ZOU, L., JAVED, A., MUNTEAN, G.-M., “Smart Mobile Device Power Consumption Measurement for Video Streaming in Wireless Environments: WiFi vs. LTE”. In: *2017 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB)*, pp. 1–6, Cagliari, Italy, June 2017.
- [67] GONG, Y., WANG, J., LAI, G., “Energy-Efficient Query-Driven Clustering Protocol for WSNs on 5G Infrastructure”, *Energy Reports*, v. 8, pp. 11446–11455, November 2022.
- [68] BANIATA, M., JI, H., KIM, Y., et al., “Energy-Balancing Unequal Concentric Chain Clustering (MIMO-UCC) Protocol for IoT System in 5G Environment”. In: *Proceedings of the 2018 Conference on Research in Adaptive and Convergent Systems (RACS '18)*, pp. 68–74, New York, NY, USA, October 2018.
- [69] CASELLA, G., BERGER, R. L., *Statistical Inference*. 2nd ed., v. 2. *Duxbury Advanced Series*, Duxbury: Pacific Grove, CA, USA, 2002.
- [70] L'ECUYER, P., “Good Parameters and Implementations for Combined Multiple Recursive Random Number Generators”, *Operations Research*, v. 47, n. 1, pp. 159–164, February 1999.
- [71] PASCA, S. T. V., AKILESH, B., ANAND, A. V., et al., “A NS-3 Module for LTE UE Energy Consumption”. In: *2016 IEEE International Conference on Advanced Networks and Telecommunications Systems (ANTS)*, pp. 1–6, Bangalore, India, November 2016.
- [72] NS-3 PROJECT, *ns-3 Model Library*, 2023, Acessado em: 2023-10-25.

- [73] NGUYEN, T., NGUYEN, D., NGUYEN, V., et al., “Dynamic Topology Adaptation and Modular Clustering in Smart City MIoT”, *Computer Networks*, v. 228, pp. 109721, June 2023.
- [74] GUPTA, R., TANWAR, S., TYAGI, S., et al., “Scalable Clustering for Massive IoT in 6G Heterogeneous Networks”, *IEEE Internet of Things Journal*, v. 12, n. 1, pp. 450–465, January 2025.

Apêndice A

Publicações

A presente seção detalha a produção científica derivada direta e indiretamente deste trabalho de tese, abrangendo artigos em periódicos, participações em conferências internacionais e contribuições em projetos de pesquisa e tutoria.

É importante notar que parte da metodologia e dos dados iniciais foi publicada anteriormente em fóruns científicos para validação de conceitos sobre comunicações D2D. No entanto, esses registros compreendem apenas uma parcela da pesquisa. Os resultados consolidados, o detalhamento das simulações Multi-RAT e as análises estatísticas completas apresentadas nesta tese compõem um material mais abrangente, cujas publicações integrais encontram-se em fase de de preparação para submissão e revisão em periódicos da área.

A.1 Artigos publicados

1. M. N. De Miranda, D. R. Figueiredo, D. F. Luiz, C. B. Carvalho and D. S. Menasché, "Design and Analysis of Distributed Tree Growing Algorithms,"in *IEEE Access*, vol. 10, pp. 26580-26602, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3152541.

A.2 Posters Publicados

1. D. F. Luiz, C. B. Carvalho, "Energy Optimization for D2D Communications in IoT Scenarios: Emphasizing Quality,"in *Symposium on Internet of Things* (2023 SIoT), São Paulo, SP - Brazil, 2023.

A.3 Outras Publicações

Trabalhos publicados durante tutoria no projeto SUPER:

1. A. M. Santos, L. O. Paiva, J. R. Reis, N. E. M. Silva, A. E. Santos, **D. F. Luiz**, C. B. Carvalho and W. S. S. Júnior, "Smart Garden Monitoring and Irrigation System in Multiplatform Application Using IoT,"in *2021 IEEE International Conference on Consumer Electronics - Taiwan (ICCE-TW)*, pp. 1-2, 2021, doi: 10.1109/ICCE-TW52618.2021.9603081.
2. Â. K. Matsuo, A. E. Santos, C. B. Carvalho, D. M. Abreu, **D. F. Luiz**, D. L. S. Figueira, L. A. Silva, V. F. Souza and W. S. S. Júnior, "Smart Plug Prototype for Residential Electrical Energy Monitoring,"in *2021 IEEE International Conference on Consumer Electronics - Taiwan (ICCE-TW)*, pp. 1-2, 2021, doi: 10.1109/ICCE-TW52618.2021.9603262.
3. A. L. M. Brandão, L. C. C. de Magalhães, G. B. Cerquinho, T. F. Costa, A. E. Santos, **D. F. Luiz**, C. B. Carvalho and W. S. S. Júnior, "A Low-Cost IoT Mobile System for Sleep Quality Monitoring,"in *2022 IEEE International Conference on Consumer Electronics - Taiwan (ICCE-TW)*, pp. 509-510, 2022, doi: 10.1109/ICCE-Taiwan55306.2022.9869091.
4. A. S. Canto, P. V. S. Matias, R. O. Moreira, T. A. Sampaio, A. E. Santos, **D. F. Luiz**, C. B. Carvalho and W. S. S. Júnior, "A Mobile IoT System for the Detection and Prevention of Vehicular Collisions,"in *2022 IEEE International Conference on Consumer Electronics - Taiwan (ICCE-TW)*, pp. 511-512, 2022, doi: 10.1109/ICCE-Taiwan55306.2022.9869177.
5. L. G. M. de Castro, A. E. Santos, **D. F. Luiz**, W. S. S. Júnior and C. B. Carvalho, "A Survey of 5G Network Systems: Trends and Deep Learning Approaches,"in *2022 IEEE International Conference on Consumer Electronics - Taiwan (ICCE-TW)*, pp. 25-26, 2022, doi: 10.1109/ICCE-Taiwan55306.2022.9869241.
6. Â. K. Matsuo, B. A. Guterres, N. D. Colares, O. N. Pessoa, A. E. Santos, **D. F. Luiz**, C. B. Carvalho and W. S. S. Júnior, "A Low-Cost IoT Mobile System for Monitoring Vital Signs of Elderly People,"in *2022 Symposium on Internet of Things (SIoT)*, pp. 1-4, 2022, doi: 10.1109/SIoT56383.2022.10070332.