

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS  
INSTITUTO DE INFORMÁTICA

VINÍCIUS NUNES MEDEIROS

# **Modelo de Otimização Multiobjetivo para Roteamento em Redes Sem Fio**

Goiânia  
2017

**TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE  
TESES E  
DISSERTAÇÕES NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG**

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou *download*, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

1. Identificação do material bibliográfico:     **Dissertação**     **Tese**

**2. Identificação da Tese ou Dissertação:**

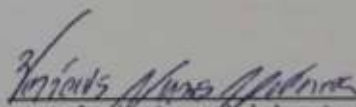
Nome completo do autor: Vinícius Nunes Medeiros

Título do trabalho: Modelo de Otimização Multiobjetivo para Roteamento em Redes Sem Fio.

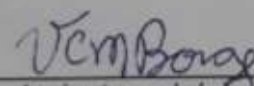
**3. Informações de acesso ao documento:**

Concorda com a liberação total do documento  **SIM**     **NÃO**<sup>1</sup>

Havendo concordância com a disponibilização eletrônica, torna-se imprescindível o envio do(s) arquivo(s) em formato digital PDF da tese ou dissertação.

  
Assinatura do(a) autor(a)<sup>2</sup>

Ciente e de acordo:

  
Assinatura do(a) orientador(a)<sup>2</sup>

Data: 29 / 09 / 2017

<sup>1</sup>Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. A extensão deste prazo suscita justificativa junto à coordenação do curso. Os dados do documento não serão disponibilizados durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente
- Submissão de artigo em revista científica
- Publicação como capítulo de livro
- Publicação da dissertação/tese em livro

<sup>2</sup>A assinatura deve ser escaneada.

VINÍCIUS NUNES MEDEIROS

# **Modelo de Otimização Multiobjetivo para Roteamento em Redes Sem Fio**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Instituto de Informática da Universidade Federal de Goiás, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciência da Computação.

**Área de concentração:** Ciência da Computação.

**Orientador:** Prof. Vinicius da Cunha Martins Borges

**Co-Orientador:** Prof. Bruno Oliveira Silvestre

Goiânia  
2017

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

Medeiros, Vinícius Nunes

Modelo de Otimização Multiobjetivo para Roteamento em Redes Sem Fio [manuscrito] / Vinícius Nunes Medeiros. - 2017. CIV, 104 f.

Orientador: Prof. Dr. Vinicius da Cunha Martins Borges; co orientador Dr. Bruno Oliveira Silvestre.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Instituto de Informática (INF), Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação, Goiânia, 2017.

Inclui tabelas, lista de figuras, lista de tabelas.

1. Roteamento. 2. Rede sem fio. 3. Rede de sensores sem fio. 4. Rede em malha sem fio . 5. Multiobjetivo. I. Borges, Vinicius da Cunha Martins , orient. II. Título.

CDU 004



ATA Nº 26/2017

**ATA DA SESSÃO DE JULGAMENTO DA DISSERTAÇÃO  
DE MESTRADO DE VINÍCIUS NUNES MEDEIROS**

Aos trinta e um dias do mês de agosto de dois mil e dezessete, às catorze horas, na sala 150 do Instituto de Informática da Universidade Federal de Goiás, Campus Samambaia, reuniu-se a banca examinadora designada na forma regimental pela Coordenação do Curso para julgar a dissertação de mestrado intitulada “**Modelo de Otimização Multiobjetivo para Roteamento em Redes sem Fio**”, apresentada pelo aluno Vinícius Nunes Medeiros como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Ciência da Computação, área de concentração Ciência da Computação. A banca examinadora foi presidida pelo orientador do trabalho de dissertação, Professor Doutor Vinicius da Cunha Martins Borges (INF/UFG), tendo como membros os Professores Doutores Bruno Oliveira Silvestre (INF/UFG – coorientador), Telma Woerle de Lima Soares (INF/UFG) e Eduardo Coelho Cerqueira (Instituto de Tecnologia/UFGPA). O prof. Dr. Eduardo Coelho Cerqueira participou distância por videoconferência. Aberta a sessão, o candidato expôs seu trabalho. Em seguida, o aluno foi arguido pelos membros da banca e:

tendo demonstrado suficiência de conhecimento e capacidade de sistematização do tema de sua dissertação, a banca concluiu pela **aprovação** do candidato, sem restrições.

tendo demonstrado suficiência de conhecimento e capacidade de sistematização do tema de sua dissertação, a banca concluiu pela **aprovação** do candidato, condicionado a satisfazer as exigências listadas na Folha de Modificação de Dissertação de Mestrado anexa à presente ata, no prazo máximo de 60 dias, a contar da presente data, ficando o professor-orientador responsável por atestar o cumprimento dessas exigências.

não tendo demonstrado suficiência de conhecimento e capacidade de sistematização do tema de sua dissertação, a banca concluiu pela **reprovação** do candidato.

Os trabalhos foram encerrados às 17 horas. Nos termos do Regulamento Geral dos Cursos de Pós-Graduação desta Universidade, lavrou-se a presente ata que, lida e julgada conforme, segue assinada pelos membros da banca examinadora.

Prof. Dr. Vinicius da Cunha Martins Borges

Prof. Dr. Bruno Oliveira Silvestre

Profa. Dra. Telma Woerle de Lima Soares

Prof. Dr. Eduardo Coelho Cerqueira

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador(a).

### **Vinícius Nunes Medeiros**

Graduado em tecnologia da Informação pelo Centro Universitário de Goiás (2010) e em Ciências da Computação pela UFG — Universidade Federal de Goiás (2013). Durante a graduação, foi monitor da disciplina de Pesquisa Operacional e teve sua iniciação científica junto com o Instituto de Química da UFG. Durante o mestrado na UFG foi bolsista pela CAPES, trabalhando com problemas de otimização em redes de comunicação.

Dedico esse trabalho a minha família, amigos e colegas.

---

## Agradecimentos

---

Agradeço a minha família principalmente por compreenderem minha ausência nos mais diversos momentos, em especial, a minha mãe Augusta Nunes e a meu pai Delvany S. Medeiros por seus conselhos e por apoiarem minhas decisões.

Agradeço, pelo esforço, a todos os envolvidos com o trabalho em especial ao Douglas Veronez pelo auxílio nas simulações e ao Paulo Brito pelo apoio dado na construção do protocolo de comunicação que agregou muito valor ao trabalho.

Agradeço especialmente a meu orientador Vinicius Cunha e ao meu co-orientador Bruno Silvestre pela paciência em me guiar durante todo o mestrado, as orientações e conselhos dadas por vocês serão guardadas para sempre e com certeza serão de grande importância na minha jornada profissional.

Agradeço aos colegas do laboratório, que ouviram com atenção os mais diversos problemas enfrentados durante o curso e sempre contribuíram com uma opinião que por muitas vezes me levou a repensar alguma solução.

Agradeço a todos os meus professores desde a minha formação básica, pois foi vocês que modelaram e modelam cada vez mais minha visão crítica sobre os mais diversos assuntos. Por fim agradeço a CAPES pelo apoio financeiro, sem o qual não seria possível realizar esse trabalho.



O senhor... mire, veja: o mais importante e bonito, do mundo, é isto: que as pessoas não estão sempre iguais, ainda não foram terminadas — mas que elas vão sempre mudando. Afinam ou desafinam, verdade maior. É o que a vida me ensinou. Isso que me alegra montão.

**João Guimarães Rosa,**  
*Grande Sertão: Veredas.*

---

## Resumo

---

Medeiros, Vinícius Nunes. **Modelo de Otimização Multiobjetivo para Roteamento em Redes Sem Fio**. Goiânia, 2017. 104p. Dissertação de Mestrado. Instituto de Informática, Universidade Federal de Goiás.

A utilização das redes sem fio em diversas aplicações está criando uma nova perspectiva de utilidade para a Internet atual fazendo com que novos paradigmas de comunicação sejam desenvolvidos, como a Internet das coisas (IoT) e redes 5G. Dois tipos de rede sem fio se destacam nesses novos cenários, a Rede de Sensores Sem Fio (RSSF) que fornece dispositivos fundamentais para a implementação dos ambientes inteligentes e da IoT, e a Rede em Malha Sem Fio (RMSF) que permite a interoperabilidade entre os tipos de redes, cobrindo grandes áreas e com um custo relativamente baixo. Essas redes possuem peculiaridade específicas, por exemplo a RSSF possui fortes restrições de consumo energético e capacidade de transmissão, já a RMSF é uma rede com maior capacidade de transmissão e maior alcance. Nesse contexto, é necessário desenvolver soluções que tornam a rede eficiente através da otimização dos seus recursos. Inicialmente foi desenvolvida a abordagem *Routing Aware of path Length, Link quality, and traffic Load* (RALL) para realizar o roteamento multiobjetivo em RSSF, em seguida, realizamos uma adaptação dessa abordagem para refletir as especificidades dos cenários de uma RMSF, essa adaptação foi intitulada de *Routing Aware of path Length, Link quality, and traffic Load Weighed* (RALLW). Em ambas abordagens o problema de roteamento multiobjetivo é composto por três objetivos (quantidade de saltos, quantidade de enlaces com baixa qualidade e balanceamento da rede), comuns a RSSF e a RMSF, apesar de existirem diferenças significativas entre elas ao modelar os objetivos. Os resultados indicam que a combinação de múltiplos objetivos ao realizar o roteamento pode beneficiar o desempenho da rede. As abordagens RALL e RALLW resultaram em bons resultados quando comparados com outras abordagens, em relação à taxa de entrega, vazão, atraso e consumo de energia, entretanto, a abordagem RALLW não mostrou diferenças significativas quando comparada a abordagem RALL.

### Palavras-chave

Roteamento, Rede sem fio, Rede de sensores sem fio, Rede em malha sem fio, Multiobjetivo, Balanceamento de carga, Menor caminho, Qualidade de transmissão

---

## Abstract

---

Medeiros, Vinícius Nunes. **Multiobjective Optimization Model for Wireless Network Routing — A Three-Purpose Approach**. Goiânia, 2017. 104p. MSc. Dissertation. Instituto de Informática, Universidade Federal de Goiás.

Owing to the huge range of application scenarios for wireless networks, new prospects for the current and future applications of the Internet, making new communication paradigms such as the Internet of Things (IoT) and 5G networks. Two important networks are included in this scenery: Wireless Sensor Networks (WSN) provide key devices for developing the IoT communication paradigm, such as the sensors used for collecting different kind of information, and the Wireless Mesh Network (WMN) that enable interoperability between heterogeneous network, covering large areas with at am low cost. Each one these networks have specific characteristics, for example, the WSN has serious restrictions (e.g. power consumption, low speed wireless links, interference) while the WMN offers high data rates through multiple radios and channels. In this context, it is necessary to find solutions that can ensure more efficient communication system based on the optimized utilization of the network resources. So it was created a multi-objective routing algorithm, called Routing-Aware of path Length, Link quality, and traffic Load (RALL). This seeks to strike a balance between three objectives: to minimize the network bottlenecks, to reduce path length, and to avoid links with low quality, for resolution the routing problem for WSN, Then the RALL approach was adapted to match the specialty of the WMN, entitled Routing Aware of path Length, Link quality, and traffic Load Weighted (RALLW). The results indicate that combining multiple objectives when performing routing can benefit networks performance. The RALL and RALLW results in a good performance with regard to the delivery rate, throughput, delay, and power consumption when compared to other approaches, however the RALLW approach did not significant differences when compared to the RALL.

### Keywords

Routing, Wireless Networks, Wireless Sensor Networks, Wireless Mesh Network, Multiobjective, Load Balancing, Lower Path, Transmission Quality

---

# Sumário

---

|  |           |
|--|-----------|
| Lista de Figuras   | 13        |
| Lista de Tabelas   | 15        |
| <b>1</b> Introdução  | <b>16</b> |
| 1.1 Artigos Aceitos  | 18        |
| <b>2</b> Roteamento para RSSF  | <b>20</b> |
| 2.1 Redes de Sensores Sem Fio  | 20        |
| 2.1.1 Roteamento em Redes de Sensores  | 22        |
| 2.2 Otimização Multiobjetivo   | 23        |
| 2.3 Trabalhos Relacionados   | 26        |
| 2.3.1 Comparação entre os Trabalhos  | 28        |
| 2.4 Proposta de um Modelo para Roteamento em RSSF                                | 31        |
| 2.4.1 Número de saltos   | 32        |
| 2.4.2 Enlaces com baixa qualidade  | 32        |
| 2.4.3 Gargalo da rede  | 33        |
| 2.4.4 Modelo multiobjetivo   | 34        |
| 2.5 Routing Aware of path Length, Link quality, and traffic Load — RALL          | 35        |
| 2.5.1 Análise de complexidade  | 40        |
| 2.6 Análise dos Resultados do Algoritmo RALL                                     | 41        |
| 2.6.1 Configuração do Cenário  | 41        |
| 2.6.2 Resultados   | 43        |
| 2.6.3 Considerações  | 48        |
| <b>3</b> Roteamento para RMSF  | <b>50</b> |
| 3.1 Redes em Malha Sem Fio   | 50        |
| 3.2 Trabalhos Relacionados   | 52        |
| 3.2.1 Comparação entre os Trabalhos  | 55        |
| 3.3 Adaptação de um Modelo de Otimização Multiobjetivo para Roteamento em RMSF   | 57        |
| 3.3.1 Enlaces com baixa qualidade  | 57        |
| 3.3.2 Balanceamento da rede  | 60        |
| 3.3.3 Modelo multiobjetivo   | 61        |
| 3.4 Routing Aware of path Length, Link quality, and traffic Load Weighed — RALLW | 62        |
| 3.4.1 Análise de complexidade  | 68        |
| 3.5 Análise dos Resultados do Algoritmo RALLW                                    | 68        |
| 3.5.1 Cenário de Monitoramento de Idoso Utilizando IoT                           | 68        |
| 3.5.2 Configuração da RMSF Simulada  | 70        |
| 3.5.3 Resultados   | 75        |

|         |   |           |
|---------|---|-----------|
| 3.5.3.1 | Variando a Quantidade de Roteadores em Malha                                    | 76        |
| 3.5.3.2 | Variando a Quantidade de Geradores de Interferência — posição<br>predeterminada | 81        |
| 3.5.3.3 | Variando a Quantidade de Geradores de Interferência — posição<br>aleatória      | 89        |
| 3.5.4   | Considerações   | 93        |
| 4       | Considerações Finais e Trabalhos Futuros  | <b>95</b> |
| 4.1     | Considerações Finais  | 95        |
| 4.2     | Trabalhos Futuros e Questões em Aberto  | 97        |
|         | Referências Bibliográficas  | <b>99</b> |

---

## Lista de Figuras

---

|      |   |    |
|------|---|----|
| 2.1  | Comunicação multi-hop em RSSF, cada vértice representa um dispositivo e as arestas os possíveis saltos. | 21 |
| 2.2  | Exemplo de dominância e de soluções Pareto-ótima em um POM.   | 24 |
| 2.3  | Diagrama de atividades da abordagem.  | 36 |
| 2.4  | Função objetivo resultante da soma ponderada entre funções objetivos 2-1 e 2-6                          | 37 |
| 2.5  | Demonstração da seleção de rotas para os fluxos.  | 39 |
| 2.6  | Taxa de perda de pacotes pela quantidade de nós.  | 44 |
| (a)  | Topologia, arestas representam a função objetivo de qualidade do enlace.                                | 44 |
| (b)  | Topologia, arestas representam a função objetivo de quantidade de saltos.                               | 44 |
| (c)  | Topologia, arestas representa a função resultante da soma ponderada                                     | 44 |
| (a)  | Função resultante da soma ponderada com $p_{const} = 7$ .   | 44 |
| (b)  | 1ª iteração, adicionando rota do nó 1.  | 44 |
| (c)  | 2ª iteração, adicionando rota do nó 2.  | 44 |
| (d)  | 3ª iteração, adicionando rota do nó 3.  | 44 |
| 2.7  | Média da vazão.   | 44 |
| 2.8  | Taxa de perda pelo número de fluxos ativos para uma topologia com 50 nós.                               | 45 |
| 2.9  | Latência para 10, 20, 30, 40 e 50 nós.  | 46 |
| (a)  | 50 nós  | 46 |
| (b)  | 10 nós  | 46 |
| (c)  | 20 nós  | 46 |
| (d)  | 30 nós  | 46 |
| (e)  | 40 nós  | 46 |
| 2.10 | Comprimento médio dos caminhos.   | 47 |
| 2.11 | Média do tempo de vida da rede.   | 47 |
| 2.12 | Média da quantidade de pacotes de controle transmitidos.  | 48 |
| 3.1  | Exemplo de rede em malha infraestruturada.  | 51 |
| 3.2  | Exemplos da variação IR.  | 58 |
| 3.3  | Histograma dos sucessos e falhas de transmissão de acordo com a qualidade do enlace.                    | 59 |
| 3.4  | Exemplo topologia de uma RMSF.  | 65 |
| 3.5  | Topologia par análise da potência do sinal de interferência.  | 72 |
| 3.6  | Análise da potência do sinal nos enlaces na presença de um sinal de interferência.                      | 73 |
| 3.7  | Taxa de perda para cada fluxo das aplicações.   | 77 |

|      |  |    |
|------|--|----|
| 3.8  | Atraso fim-a-fim para cada fluxo das aplicações.   | 78 |
| 3.9  | Tamanho médio do caminho para a aplicação de sinais vitais.                                    | 79 |
| 3.10 | Tamanho médio do caminho para a aplicação monitoramento quedas.                                | 80 |
| 3.11 | Vazão para cada fluxo das aplicações.  | 81 |
| 3.12 | Posições predeterminadas para os nós geradores de interferência.                               | 82 |
| 3.13 | Taxa de perda de acordo com a variação da potência dos nós geradores de interferência.         | 83 |
| 3.14 | Taxa de perda para cada fluxo das aplicações na presença de nós geradores de interferência.    | 84 |
| 3.15 | Atraso fim-a-fim para cada fluxo das aplicações na presença de nós geradores de interferência. | 86 |
| 3.16 | Tamanho médio do caminho para aplicação de sinais vitais.                                      | 87 |
| 3.17 | Tamanho médio do caminho para aplicação de monitoramento de quedas.                            | 88 |
| 3.18 | Vazão de dados para cada fluxo das aplicações na presença de nós geradores de interferência.   | 89 |
| 3.19 | Perda de dados para as aplicações na presença de nós de interferência — posição aleatória.     | 90 |
| 3.20 | Atraso fim-a-fim para as aplicações na presença de nós de interferência — posição aleatória.   | 91 |
| 3.21 | Vazão de dados para as aplicações na presença de nós de interferência — posição aleatória.     | 93 |

---

## Lista de Tabelas

---

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 2.1 | Comparação entre os trabalhos relacionados.                          | 30 |
| 2.3 | Parâmetros de simulação  | 42 |
| 2.4 | Configuração dos nós no Castalia                                     | 42 |
| 3.1 | Comparação entre os trabalhos relacionados.                          | 56 |
| 3.3 | Sequência de execução RALLW.   | 67 |
| 3.4 | Parâmetros de simulação ns-3.  | 71 |
| 3.5 | Resumo do sistema de monitoramento do idoso utilizado nas simulações | 74 |
| 3.6 | Combinação dos pesos para três configurações da abordagem RALLW.     | 75 |



---

## Introdução

---

As redes sem fio se tornam cada vez mais populares principalmente por conta da sua flexibilidade em permitir que dispositivos possam ser posicionados em locais onde a utilização de cabos é indesejada ou impossível, por facilitar a instalação evitando a passagem de cabos e tornando mais eficiente o uso do espaço, e por possibilitar a criação de tecnologias que acompanhem os usuários (celulares, relógios inteligentes, sensores vestíveis, etc.) nos mais diversos locais.

Através da utilização das redes sem fio tornou-se possível a criação de ambientes inteligentes em que os objetos geram dados e utilizam as redes sem fio como principal meio de comunicação, caracterizando o paradigma de Internet das Coisas (*Internet of Things* — IoT). Dentro desse cenário é possível destacar aplicações para os mais diversos propósitos, como monitoramento de trânsito, cidades inteligentes e saúde, o que consequentemente vai requerer o uso de diferentes tecnologias de redes sem fio.

As redes sem fio de próxima geração (redes 5G) possibilitarão a criação desses ambientes inteligentes baseadas em aplicações de IoT. As redes 5G levarão em conta uma gigantesca quantidade de aplicações com distintos requisitos de QoS como também a integração entre essas diversas aplicações existentes em um *workflow*, onde espera-se fornecer um nível de serviço personalizado para os usuários. Dentre essas aplicações, existem as aplicações de IoT baseadas em dados de sensoriamento geral (taxas de envio baixas com ou sem restrição de tempo) e aplicações multimídias (vídeo ou realidade virtual com alta demanda de taxa de transmissão com ou sem restrição de tempo) [21]. De forma a suportar essas demandas diversificadas de maneira personalizada, a comunidade científica das redes sem fio futuristas tem apostado na *softwarização* de redes através de conceitos como *Software Defined Networking (SDN)*, *Network Function Virtualization (NFV)*, *Software Defined Radio (SDR)* e *Cloud-RAN* que possibilitam o gerenciamento mais flexível e eficiente dos recursos de redes [36, 10].

É importante destacar o conceito de SDN como um facilitador fundamental para redes 5G, onde através da separação entre plano de controle e plano de dados como também através da visão global da rede contida no controlador, decisões mais otimizadas podem ser mais facilmente alcançadas para melhorar a eficiência do tráfego nas redes

sem fio, como por exemplo, roteamento e alocações de espectro. A interoperabilidade entre redes sem fio diferentes também deve ser alcançada, demandando uma rede sem fio mais heterogêneas, como entre Redes de Sensores Sem Fio (RSSF) e Redes em Malha Sem Fio (RMSF) que são redes de comunicações múltiplos saltos que quando integradas podem ser uma opção interessante para criação de ambientes inteligentes, uma vez que não demandam um investimento tão elevado [36, 55]

A Rede de Sensores Sem Fio (RSSF) surgiu como uma tecnologia promissora oferecendo um conjunto de operações (sensoriamento, processamento e comunicação) que, quando combinadas em um pequeno dispositivo, possibilitou a origem de um vasto número de aplicações. Por permitir a geração de dados em locais remotos ou inacessíveis, junto com a facilidade de implantação e o baixo custo dos dispositivos, a RSSF aumentou sua popularização rapidamente. Ao mesmo tempo, oferecendo numerosos desafios devido às suas peculiaridades, principalmente por causa das restrições rigorosas que os nós são tipicamente sujeitos [50, 26].

A RSSF despertou o interesse para os mais diversos campos como por exemplo: monitoramento ambiental [38, 15, 49], aplicações em tempo real [2, 7], vigilância [58], saúde [39, 23] e agricultura [14, 53]. Com a popularização, a RSSF passou a desempenhar um importante papel em novos paradigmas como a computação pervasiva/ubíqua, cuja a necessidade de coletar informações e realizar o monitoramento do ambiente são requisitos básicos e fundamentais. A RSSF também é utilizada na construção de dispositivos inteligentes de baixo custo, utilizados em grande escala por aplicações em IoT.

A capacidade de processamento, armazenamento e energia dos dispositivos que compõem uma RSSF são limitadas, assim, as suas configurações acabam sendo restritas. Essas restrições impõem certos limites a RSSF, que se ultrapassados resulta em um baixo desempenho da rede. O desempenho da RSSF é influenciado por uma série de fatores, como a seleção de rotas (roteamento), a quantidade de ruídos e perturbações presentes no meio, a interferência gerada por diferentes tecnologias de rádio que compartilham o mesmo espectro (por exemplo, Zigbee e Wi-Fi), como também o tempo de vida da rede e balanceamento de carga.

Por outro lado, a RMSF não possui restrições de taxa de transmissão, processamento e consumo energético. Muito pelo contrário, essas redes são fortemente baseadas na tecnologia Wi-Fi (IEEE 802.11a, b/g, n) que provê um alcance maior (100 metros) e também taxas de transmissões mais elevadas (até 600 Mbps), que pode ter a vazão agregada aumentada pelo uso de múltiplas interfaces de rede sem fio e múltiplos canais ou/e com padrões mais recentes, podendo alcançar até 1Gbps (IEEE 802.11ac). Essas redes sem fio são muito empregadas para transmitir dados de aplicações multimídias que demandam por maior capacidade de transmissão. No entanto, é também possível que na RMSF possa estar trafegando dados de RSSF e, portanto, estarem integradas para possi-

bilitar cenários com multitudes de aplicações de IoT (multimídia e sensoriamento). Ainda assim, a RMSF é também afetada pela interferência, que ainda é fenômeno que limita a capacidade útil dessa rede.

Com base principalmente nas restrições presentes nas redes sem fio (RSSF e RMSF) e na necessidade de construir um trabalho mais abrangente e genérico, isto é, que leve em conta mais restrições e fatores que afetam o desempenho das redes sem fio de forma geral, foi desenvolvido um modelo matemático de otimização multiobjetivo para o problema de roteamento, em que os objetivos usados para melhorar o desempenho e permitir um bom funcionamento da rede são: (i) minimizar o comprimento do caminho em saltos, (ii) minimizar o gargalo e (iii) minimizar a utilização de enlaces com baixa qualidade. Esses três objetivos, apesar de buscarem melhorar algum aspecto da rede, são conflitantes entre si, em outras palavras a obtenção da melhor solução para algum dos objetivos não colabora na determinação da melhor solução para os demais objetivos.

O principal objetivo deste trabalho é propor algoritmos capazes de encontrar uma solução para o modelo de otimização multiobjetivo referente ao problema de roteamento para RSSF e RMSF, por serem tipos de redes sem fio que possibilitam o desenvolvimento de soluções promissoras para aplicações de IoT atuais e futuristas. Por causa das restrições comuns impostas a elas, o roteamento se torna um problema não trivial de ser resolvido. Por essa razão os modelos matemáticos e algoritmos propostos serão adaptados e avaliados sobre redes sem fio que possuem nós que tenham sua posição fixa e que dentro da rede exista um único *gateway* responsável por possibilitar acesso a uma rede externa.

Este trabalho está organizado da seguinte maneira: no Capítulo 2 são descritos os conceitos sobre RSSF, o modelo matemático de otimização multiobjetivo, a heurística proposta e a análise dos resultados obtidos para solucionar o problema de roteamento com múltiplos objetivos em RSSF. Já no Capítulo 3 são descritos os conceitos sobre RMSF, as alterações do modelo matemático e da heurística para a determinação do roteamento em RMSF e a análise dos resultados obtidos nessa rede sem fio. Por fim, no Capítulo 4 são feitas as considerações finais e os trabalhos futuros.

## 1.1 Artigos Aceitos

Lista de artigos publicados ou aceitos para publicação decorrentes do trabalho:

- Artigos completos publicados:
  - Medeiros, Vinícius N.; de Brito, Paulo César G.; Borges, Vinicius da C. M.; Silvestre, Bruno; **RALL: routing-aware of path length, link quality and traffic load for wireless sensor networks.** *In:*

*Proceedings of the Symposium on Applied Computing (SAC '17)*. ACM, New York, NY, USA, 2017, p. 594-601. DOI: 10.1145/3019612.3019730

- Brito, Paulo César G. de; Medeiros, Vinícius N.; Borges, Vinicius da C. M.; Silvestre, Bruno; **Uma Avaliação de Desempenho de Algoritmos de Roteamento Multi-objetivos em Redes de Sensores Sem Fio**. *IV Escola Regional de Informática de Goiás, Goiânia, 2016*, p. 221-234.

- Artigo curto, aceito e não publicado:

- Medeiros, Vinícius N.; Santana, Douglas V. ; Borges, Vinicius da C. M.; Silvestre, Bruno; **A routing algorithm for multi-objective Internet of Things applications**, *9th IFIP Latin America Networking Conference (LANC)*, 2016.

---

## Roteamento para RSSF

---

Neste capítulo, será apresentada a revisão e a comparação, entre os principais aspectos, dos trabalhos relacionados com o problema de roteamento em rede de sensores sem fio (RSSF) que utilizem dois ou mais objetivos para selecionar uma solução de roteamento. Em seguida é apresentado um modelo matemático de otimização multiobjetivo para representar formalmente o problema de seleção de rotas em RSSF, na sequência é proposta a heurística *Routing Aware of path Length, Link quality and traffic Load (RALL)* para determinar uma solução para o modelo de otimização e também é apresentada a análise dos resultados obtidos pela heurística RALL através da realização de simulações.

### 2.1 Redes de Sensores Sem Fio

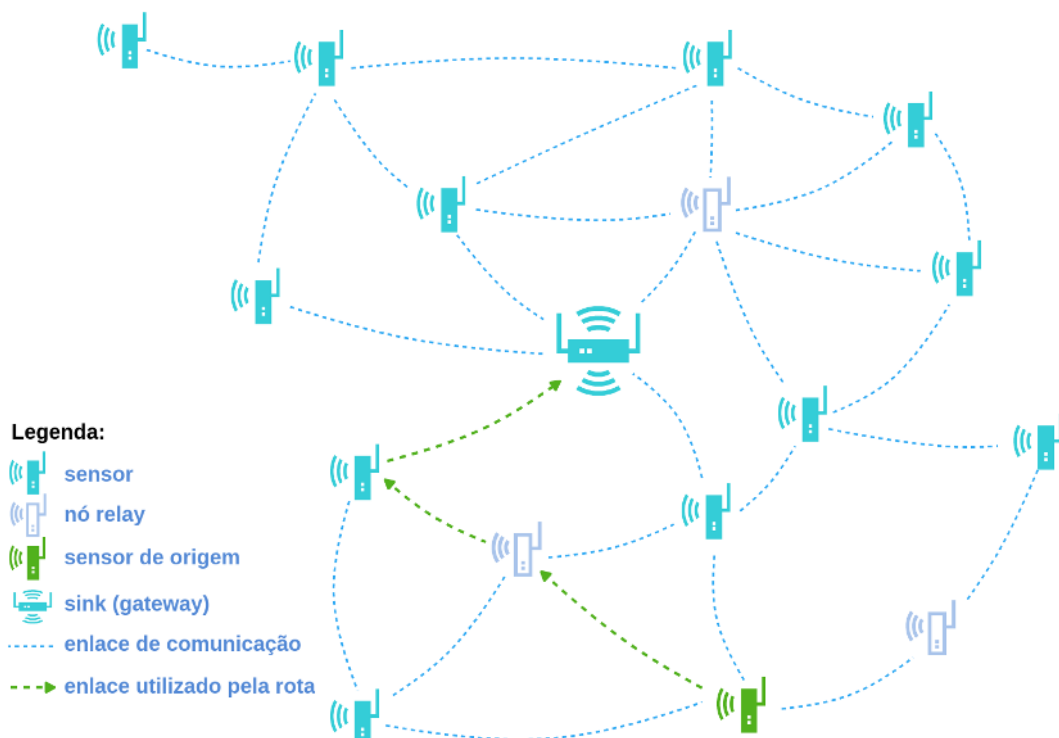
A Redes de Sensores Sem Fio (RSSF) surgiu como uma tecnologia promissora oferecendo vantagens sobre as redes tradicionais por oferecerem baixo custo, escalabilidade, flexibilidade e facilidade na implantação [52]. Esses aspectos fizeram com que a RSSF fosse empregada nos mais variados tipos de aplicações, devendo se tornar cada vez mais presente no cotidiano das pessoas.

A RSSF difere das redes tradicionais em alguns aspectos, como a forma de estruturação e os tipos de restrições que elas possuem. A RSSF é composta basicamente por dois tipos de dispositivos: os nós sensores e os nós *sinks* ou sorvedouros. Os nós sensores são os dispositivos responsáveis por gerar, processar e transmitir os dados na rede. Os nós *sinks* são responsáveis por receber todos os dados gerados pelos nós sensores e por proporcionar o acesso a máquinas com maior capacidade computacional ou a redes externas.

Existe uma grande variedade de sensores que apresentam configurações diferentes de processamento, armazenamento, alcance de comunicação e consumo energético. A RSSF pode ser formada com a utilização de sensores com configurações idênticas, formando redes homogêneas, ou com sensores que apresentam diferentes configurações, formando redes heterogêneas. Foi estabelecido que em qualquer uma dessas redes os nós sensores desempenham basicamente o mesmo papel de sensoriamento, processamento e

(re)transmissão de pacotes. As informações são repassadas (roteadas) nó a nó, até chegar a um nó *sink*, onde elas são processadas.

Quando os sensores são distribuídos em uma determinada área, eles formam uma rede de sensores sem fio *ad hoc*, onde cada sensor é capaz de realizar processamento localmente e decidir sobre o envio de pacotes entre seus vizinhos. A comunicação é comumente realizada entre os dispositivos da RSSF através de múltiplos saltos (*multi-hop*), como ilustrado na Figura 2.1. Na maior parte das aplicações, a RSSF é formada por uma numerosa quantidade de nós sensores e por um ou mais nós *sinks*.



**Figura 2.1:** Comunicação multi-hop em RSSF, cada vértice representa um dispositivo e as arestas os possíveis saltos.

Os dispositivos da RSSF compartilham o mesmo meio de comunicação e concorrem com outros dispositivos, externos à rede, pelo espectro para realizar a transmissão dos dados. Os dispositivos da RSSF são, em geral, dispositivos simples com baixa potência o que resulta em perda da qualidade do sinal e em maior probabilidade de contenção e colisão (com necessidade de retransmissão do pacote). Quando os dispositivos da rede operam em um mesmo canal, a quantidade de nós ativos na rede também aumenta as chances de contenção [22]. A interferência causada por outras redes sem fio, que utilizam a mesma faixa de espectro dos dispositivos da RSSF, ou até mesmo equipamentos que gerem algum tipo de onda magnética, impacta fortemente na capacidade efetiva de transmissão da RSSF.

A qualidade dos enlaces de comunicação, entre dois dispositivos de uma rede sem fio, pode ser estimado utilizando algumas métricas. O padrão IEEE 802.15.4, que especifica a camada física para rede de baixa potência, oferece o parâmetro *Link Quality Indication* (LQI) que tem como objetivo representar a qualidade do enlace no momento da recepção de um pacote [24].

A transmissão de dados entre a RSSF e algum outro tipo de rede, a Internet por exemplo, ocorre através do nó *sink*, que é um dispositivo que possui uma interface de comunicação com outros tipos de redes e serve como ponto de centralização dos dados gerados pelos sensores da rede. Dessa forma, todos os dados serão encaminhados/retransmitidos para o nó *sink*.

Para que uma RSSF seja funcional e forneça um bom ambiente para as aplicações, é necessária a existência de um protocolo de roteamento, que decida como os dados devem ser transmitidos pelos vários saltos da rede até que sejam entregues ao nó destino (*sink*). O roteamento sobre a RSSF leva em consideração as limitações dos dispositivos presentes na rede para determinar as rotas e obter bons resultados.

### 2.1.1 Roteamento em Redes de Sensores

Roteamento sobre a RSSF tem como propósito final a obtenção de um conjunto de rotas que possibilite a entrega de dados a um determinado nó destino. A criação das rotas são geralmente guiadas por objetivos, por exemplo: rotas mais curtas, com melhor qualidade, balanceadas, maior energia residual na bateria, etc.

Três critérios serão utilizados neste trabalho para determinar a estratégia de roteamento: a quantidade de saltos, a quantidade de enlaces com baixa qualidade e o balanceamento da carga entre os dispositivos da rede. No roteamento, cada salto pode significar aumento no atraso de entrega da informação para o nó *sink*. Além disso, uma quantidade maior de saltos acarreta a ativação de mais nós, o que gera mais utilização do meio de transmissão, podendo levar a mais contenção ou interferência [22]. Ao reduzirmos o número de saltos, é possível reduzir o atraso de entrega das mensagens da rede e diminuir a contenção.

O balanceamento de carga procura distribuir as rotas pelos dispositivos da rede de forma justa. Isso evita que um conjunto de nós seja sobrecarregado por serem utilizados em muitas rotas. Pelas características dos dispositivos da RSSF, que têm recursos limitados, um conjunto de caminhos sem balanceamento de carga tem como consequência a redução do tempo de vida, dado um maior consumo de bateria para o roteamento dos pacotes, e a perda de pacotes, causado pelo descarte de dados nas filas de processamento por estarem cheias [30]. Dessa forma, melhorar o balanceamento pode significar uma melhora também no atraso fim-a-fim e nas taxas de entrega [46].

Minimizar a utilização dos enlaces que sofrem com altas taxa de interferência ou ruído é uma opção para aumentar a taxa de entrega de dados. Por outro lado, a tentativa de utilizar somente enlaces livres ou com baixo níveis de interferência pode acarretar no aumento do tempo de entrega dos dados devido a escolhas que visam evitar uma região ou uma área da rede.

Entre os três objetivos abordados para realizar um roteamento nota-se uma inter-relação entre eles. O aumento do número de saltos no caminho do fluxo de dados é um efeito comum quando uma solução de roteamento procura minimizar nós sobrecarregados [22]. No entanto, o aumento do tamanho do caminho gera uma maior ativação de nós, causando mais interferência nos vizinhos, aumentando a quantidade de enlaces com baixa qualidade. É importante ressaltar que nem sempre caminhos mais curtos geram menos contenção/interferência na RSSF como um todo. Por exemplo, os caminhos mais curtos podem sofrer contenção devido à existência de muitos vizinhos ou outras redes/dispositivos que estão na mesma área de alcance desses caminhos.

## 2.2 Otimização Multiobjetivo

É comum a existência de problemas de otimização nos mais diversos setores. Quando esses problemas são formulados apresentando um único objetivo a ser maximizado ou minimizado existe somente um único valor ótimo para esse objetivo, existindo uma ou várias soluções que forneçam esse valor. Os problemas de otimização que necessitam da presença de dois ou mais objetivos são chamados de problemas de otimização multiobjetivo (POM) e possuem características bem diferentes dos problemas com um único objetivo.

Um POM com  $q$  objetivos pode ser definido formalmente dado uma variável de decisão  $x = x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$  com dimensão  $n$ , contida em um espaço  $X$ , em que é desejado determinar a melhor solução  $x^*$  tal que  $x^* \in X$  minimize as funções objetivos  $f(x^*) = \{f_1(x^*), f_2(x^*), \dots, f_q(x^*)\}$ . As funções objetivos são definidas em  $f_i : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$  e  $X$  como o conjunto de restrições. O POM pode ser escrito da seguinte forma [41]:

$$\begin{aligned} \text{minimizar:} \quad & f(x) = \{f_1(x), f_2(x), \dots, f_q(x)\} \\ \text{sujeito a:} \quad & x \in X \end{aligned}$$

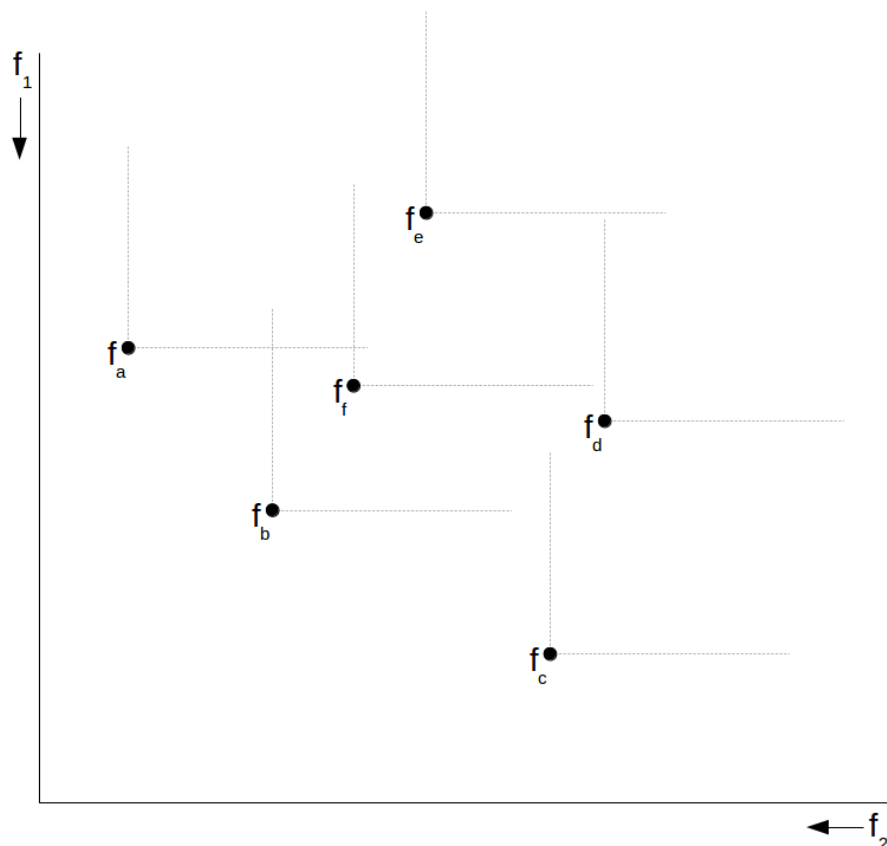
Em contraste com a otimização de um único objetivo, a solução para um problema multiobjetivo normalmente não é dada por uma única solução global, e muitas vezes é necessário determinar um conjunto de pontos que fazem parte da definição de uma grupo de soluções ótimas. O conceito predominante na definição de um ponto ótimo é o da otimização de Pareto (Pareto 1906). Soluções que ao serem comparadas com as



demais soluções do conjunto viável têm pior desempenho em todos os objetivos são dominadas por alguma outra solução e não irão compor o conjunto de soluções Pareto. Já as soluções que ao serem comparadas com as demais apresentam no mínimo um objetivo com valor melhor são ditas como solução de Pareto. O conjunto formado pelas soluções não dominadas é chamado de conjunto Pareto-ótimo. Se todos os objetivos do POM forem escritos na forma padrão, ou seja como problemas de minimização, o conjunto Pareto-ótimo pode ser descrito pelas definições:

**Dominância:** É dito que uma solução  $x_1$  domina uma outra solução  $x_2$  se  $f_i(x_1) \leq f_i(x_2)$  para  $i = 1, 2, \dots, q$  e que  $f_i(x_1) < f_i(x_2)$  seja verdadeiro para ao menos um objetivo [32, 42].

**Solução Pareto-ótima** Uma solução  $x^*$  é dita como Pareto-ótima se não existir qualquer outra solução  $x'$  tal que  $f_i(x') \leq f_i(x^*)$  para  $i = 1, 2, \dots, q$  e que  $f_i(x') < f_i(x^*)$  seja verdadeiro para ao menos um objetivo, com  $x^*$  e  $x' \in X$ . Ou seja,  $x^*$  não pode ser dominada por qualquer outra solução [32, 42].



**Figura 2.2:** Exemplo de dominância e de soluções Pareto-ótima em um POM.

A Figura 2.2 ilustra o conceito de dominância onde o ponto  $f_e$  é dominado pelo ponto  $f_a$  e os pontos  $f_f$  e  $f_d$  são dominados pelo ponto  $f_b$ . Já o conceito das soluções Pareto-ótima é representado pelos pontos  $f_a, f_b$  e  $f_c$ , já que não existem outros pontos que dominem essas soluções.

Existem várias abordagens para se determinar o conjunto Pareto, abordagens evolutivas [32, 59, 20], abordagens que possibilitam ao usuário especificar preferências pelos objetivos [41, 20] que podem ser elaboradas através do uso de metas ou quantificando uma importância relativa para diferentes objetivos. A seguir são apresentados alguns dos métodos clássicos mais conhecidos em que a preferência por um determinado objetivo é definida a priori:

**Método de soma ponderada** (*weighted sum method*) é a abordagem mais comum para a otimização multiobjetivo, com esse método uma solução de Pareto é encontrada porém não é possível determinar o conjunto Pareto.

**Ordenação Lexicográfica** (*lexicographic method*), com o método lexicográfico, as funções objetivos são organizadas por ordem de importância. E um novo problema de otimização é gerado adicionando o valor ótimo de uma função objetivo como restrição no próximo problema.

**Programação de metas** (*goal programming methods*) requer a especificação de metas para cada objetivo que deseja atingir fazendo com que o método procure soluções que consiga atingir uma meta pré definida considerando uma ou mais funções objetivo. Se não existir uma solução ótima que consiga bater as metas para todos os objetivos então uma solução que minimize os desvios para as metas é selecionada.

**Método  $\epsilon$ -Constraints** esse método seleciona uma solução utilizando um problema com um único objetivo selecionado a partir do conjunto de objetivos do problema original, os problemas não selecionados são adicionados como restrições ao problema com um único objetivo.

Dos quatro métodos clássicos apresentados o da soma ponderada aparenta ser um dos métodos mais flexíveis para se determinar a preferência pelos objetivos, já que é possível redistribuir os pesos dos objetivos de forma simples e direta. A ordenação lexicográfica por estabelecer uma sequência dos objetivos se torna a mais complicada para readaptar a preferência dos objetivos justamente por apenas depender da ordem em que as soluções para os objetivos são determinadas. A preferência proporcionada pela programação de metas depende da distância em que a solução determinada vai estar das metas, a determinação dos valores das metas é um processo difícil de ser realizado durante a seleção de soluções, na maior parte dessa abordagem as metas são determinadas pelo usuário que modelou o problema.

## 2.3 Trabalhos Relacionados

Há muitos trabalhos que procuram realizar a determinação de rotas combinando objetivos. Alguns deles tentam otimizar o roteamento, especialmente em RSSFs. A maior parte desses trabalhos utilizam um ou dois objetivos. A seguir é apresentado alguns desses trabalhos principalmente os que apresentam soluções que envolvam a utilização de múltiplos objetivos para determinar o roteamento.

Wang e Zhang [57] apresentaram um protocolo denominado “*Interference Aware Multipath Routing (IAMR)*” que seleciona caminhos espacialmente disjuntos, adotando um modelo de interferência onde o alcance de interferência é o dobro do alcance de transmissão. Esse tipo de modelagem de interferência pode sobre-estimar o nível de interferência, não refletindo um cenário real, isto é, as áreas de interferência não são regulares.

Radi *et al.* [51] propuseram “*Low-Interference Energy-Efficient Multipath Routing Protocol (LIEMRO)*”, que leva em consideração uma abordagem de balanceamento de carga de múltiplos caminhos e que também procura minimizar a interferência através do uso da métrica de roteamento ETX. Como já descrito na literatura, a métrica ETX tem limitações para capturar a interferência de uma forma mais precisa [11].

Minhas *et al.* [46] recomendaram uma abordagem baseada em lógica *fuzzy* para problema de otimização multiobjetivo em roteamento no trabalho intitulado como “*Multiobjective Routing for Simultaneously Optimizing System Lifetime and Source-to-Sink Delay in Wireless Sensor Networks*”. Essa abordagem procura equilibrar dois objetivos: maximizar o tempo de vida da rede (analisando os níveis de energia atual e residual dos nós) e o atraso na transmissão entre o nó ordinário e o nó *sink* (considerando o número de saltos).

O roteamento com balanceamento de carga através de uma distribuição uniforme dos fluxos na rede pode prover tanto a minimização da perda de pacotes como também a maximização do tempo de vida da rede. Por essa razão, abordagens de roteamento são propostas em redes sem fios ou em RSSFs para minimizar os gargalos e o tamanho médio dos caminhos em saltos, por exemplo, o algoritmo “*BPR (Bottleneck, Path Length and Routing overhead heuristic)*” proposto por Mello [45]. Essa abordagem porém não leva em consideração a qualidade do enlace quando o gargalo é minimizado ou um caminho curto é selecionado, sendo provável que os enlaces utilizados não tenham qualidade suficiente para realizar a comunicação.

Moghadam *et al.* [47] apresentaram uma heurística denominada “*Heuristic Load Distribution (HeLD)*”, que objetiva minimizar o *overhead* de comunicação e maximizar o tempo de vida da rede através de uma abordagem de roteamento com balanceamento de carga baseada em programação linear e o uso de um conjunto de caminhos entrelaçados.

Os testes em simulação mostraram que HeLD resulta em menos *overhead* e uma rede com mais tempo de vida. Entretanto, a taxa de entrega de pacotes alcançou níveis baixos e a latência nem foi apresentada. Isso pode ser parcialmente justificado pelo conjunto de caminhos entrelaçados, que pode gerar um grau elevado de interferência.

Machado *et al.* [37] propuseram uma heurística para ambientes de IoT intitulada “*Routing by Energy and Link Quality (REL)*”, que procura selecionar caminhos que minimizem o número de saltos, maximizem o tempo de vida da rede através da energia residual dos nós e maximizem a qualidade dos enlaces nos caminhos através do uso de métricas que descrevam a interferência, por exemplo, *Received Signal Strength Indicator (RSSI)*. No entanto, a heurística é bastante simples e é limitada em estabelecer um equilíbrio entre os três objetivos.

Bechkit e Koudil *et al.* [9] apresentaram uma abordagem chamada “*A New Weighted Shortest Path Tree for Convergecast Traffic Routing in WSN*” para a realização de roteamento em redes de sensores sem fio utilizando a geração de árvores. Para isso, privilégios são atribuídos para os enlaces de comunicação mais próximos do *sink*, com a justificativa que esses enlaces de comunicação são os mais críticos por serem utilizados como o meio de acesso ao *sink*. Dessa forma, é possível a associação de funções objetivos genéricas que serão utilizadas para a criação da árvore, associando a função objetivo a um modelo de consumo de energia gerado empiricamente. A abordagem teve bom desempenho analisando o consumo de energia em várias configurações, entretanto, a análise de outras métricas, como por exemplo da taxa de entrega de pacotes, sugere que como na abordagem alguns enlaces são mais privilegiados que outros, é provável que ocorra sobrecargas sobre alguns enlaces, o que pode proporcionar um aumento na perda de pacotes já que essa abordagem gera rotas sem considerar o balanceamento de carga.

Alghamdi *et al.* [3] apresentam “*Constructing a Shortest Path Overhearing Tree with Maximum Lifetime in WSNs*” em que busca encontrar uma combinação de rotas que forneça árvores de roteamento de caminhos mínimos que maximize o tempo de vida da rede. Para isso são apresentadas três abordagens: a primeira é uma heurística com tempo polinomial, a segunda apresenta uma modelagem usando programação linear inteira e a terceira um problema de programação não-linear mista. A utilização de árvores fornece uma solução limitada para melhorar a distribuição da carga na rede.

Alwan e Agarwal *et al.* [4] apresentaram uma abordagem intitulada “*Multi-objective Reliable Multipath Routing for Wireless Sensor Networks*” que cria rotas disjuntas para aumentar a confiabilidade do roteamento utilizando como objetivos o atraso na entrega dos pacotes e a qualidade de entrega de pacotes. Para estipular a qualidade dos enlaces, é utilizada uma função estatística que contabiliza a quantidade de pacotes entregues com sucesso.

Alwan e Agarwal *et al.* [5] propuseram uma heurística no trabalho intitulado

“*Multi-objective QoS Routing for Wireless Sensor Networks*” em que é combinado o roteamento, utilizando a posição geográfica dos nós para determinar os seus vizinhos, esse abordagem para determinar a vizinhança dos nós é limitada principalmente por depender do cenário em que se encontra os sensores, já que a determinação da posição geográfica pode ser impedida de ser realizada. Com os requisitos necessários de um protocolo com QoS para criar os objetivos. A heurística divide a forma de estipular os custos dos objetivos em dois tipos: os para realizar um único salto e os custos sobre todo o caminho selecionado. Para cada um desses tipos de custos é estipulado um grau de importância para realizar o roteamento, criando classes para cada tipo de configuração dos graus. Entretanto, a forma como o grau de importância é tratada pela heurística se torna frágil e com propriedades bem estáticas. Ao submeter essa abordagem a um cenário em que a carga de dados dos fluxos não são similares (aplicações de multimídia em tempo real por exemplo) as políticas de QoS podem acabar sendo infringidas.

Chen, Lin e Sun *et al.* [17] apresentaram a proposta “*LQER: A Link Quality Estimation Based Routing for Wireless Sensor Networks*” em que o histórico da qualidade de cada enlace é armazenado e utilizado na tomada de decisão para o encaminhamento dos dados, buscando manter a confiabilidade na comunicação entre os nós, alcançando melhor eficiência energética. Ao utilizar enlaces sem confiabilidade, aumenta a probabilidade de acontecer retransmissão de dados gerando mais gasto energético. Inicialmente é estabelecido um conjunto dos caminhos mais curto para o nó *sink*, de maneira que cada nó tenha algumas opções para transmitir os dados em direção ao nó *sink*. Dentro desse conjunto de possibilidade é escolhido o próximo salto que tenha o melhor valor referente a qualidade do enlace. Essa abordagem, apesar de tentar buscar enlaces com boa confiabilidade, fica restrita a um pequeno conjunto de rotas, desprezando outros caminhos que tenham melhor confiabilidade, porém, com maior número de saltos. Além do mais, a utilização de um enlace com boa qualidade pode sobrecarregar um nó, fazendo com que retransmissões aconteça pela falta de espaço na fila de processamento do nó, gerando gasto energético com o reenvio dos dados.

### 2.3.1 Comparação entre os Trabalhos

A Tabela 2.1 apresenta uma comparação de como o problema de roteamento em RSFS é abordado entre os trabalhos relacionados. A comparação é realizada observando os seguintes aspectos:

- Modelo: Quando a abordagem proposta pelo trabalho utiliza de um modelo matemático que represente formalmente o problema de roteamento, por exemplo: um modelo de programação linear.

- Quantidade de saltos: Se na abordagem do trabalho a quantidade de saltos realizados pelas rotas é levado em consideração.
- Qualidade dos enlaces: Se no trabalho a qualidade dos enlaces de comunicação são utilizados para determinar as rotas.
- Energia: Se no trabalho são determinadas as rotas de forma que o gasto energético dos dispositivos seja minimizado.
- Balanceamento: Se no trabalho apresentado o balanceamento de carga é aplicado.

Como pode ser observado na Tabela 2.1 poucos dos trabalhos relacionado apresentam um modelo matemático para representar o problema de roteamento em rede sem fio. A utilização de um modelo matemático tem um importante benefício para o trabalho que é a especificação clara dos objetivos que a abordagem deseja alcançar, fornecendo assim, com uma linguagem formal, subsídio para que as propostas possam ter seus limites testados além de construir a base para o desenvolvimento de novos algoritmos para solucionar o problema.

Uma característica percebida é que os trabalhos que abordam a criação de rotas, especialmente em RSSF, raramente levam como critério mais do que dois objetivos. A combinação de objetivos em um único problema pode trazer um bom equilíbrio para o desempenho da rede.

O principal desafio quando se utilizar vários objetivos é conseguir estabelecer ou encontrar o equilíbrio entre as soluções de forma que o desempenho da rede possa ser otimizado. Boa parte das propostas, raramente utilizam mais do que dois objetivos para determinar as rotas sobre a rede, a combinação de três ou mais objetivos pode fornecer resultados que uma combinação simples entre dois objetivos não seja capaz de alcançar por causa da limitação do seu conjunto de soluções.

**Tabela 2.1:** *Comparação entre os trabalhos relacionados.*

| <b>Trabalhos Relacionados</b>  | <b>Modelo matemático</b> | <b>Saltos</b> | <b>Qualidade</b> | <b>Energia</b> | <b>Balaceamento</b> |
|--|--------------------------|---------------|------------------|----------------|---------------------|
| Interference Aware Multipath Routing (IAMR) [57]   | não                      | não           | sim              | não            | não                 |
| Low-Interference Energy-Efficient Multipath Routing Protocol [51]                          | sim                      | sim           | sim              | não            | não                 |
| Multiobjective Routing for Simultaneously Optimizing System Lifetime and Delay in WSN [46] | não                      | sim           | não              | não            | sim                 |
| Bottleneck, Path Length and Routing overhead heuristic [45]                                | sim                      | sim           | não              | não            | sim                 |
| Heuristic Load Distribution (HeLD) [47]  | sim                      | não           | não              | sim            | sim                 |
| Routing by Energy and Link quality (REL) [37]  | não                      | sim           | sim              | sim            | não                 |
| A New Weighted Shortest Path Tree for Convergecast Traffic Routing in WSN [9]              | não                      | sim           | não              | sim            | não                 |
| Constructing a Shortest Path Overhearing Tree with Maximum Lifetime in WSNs [3]            | sim                      | sim           | não              | sim            | não                 |
| Multi-objective Reliable multipath routing for wireless sensor networks [4]                | não                      | sim           | sim              | não            | não                 |
| Multi-objective QoS routing for wireless sensor networks [5]                               | não                      | sim           | sim              | não            | sim                 |
| LQER: A Link Quality Estimation based Routing for Wireless Sensor Networks [17]            | não                      | sim           | sim              | não            | não                 |

## 2.4 Proposta de um Modelo para Roteamento em RSSF

Uma RSSF pode ser modelada através de um grafo  $G = (V, E)$ , onde  $V$  é definido como o conjunto que representa os sensores,  $E$  é definido como o conjunto de enlaces de comunicação entre dois dispositivos da RSSF. O enlace de comunicação  $e_{sd} \in E$  entre  $s, d \in V$  existe se, e somente se, for possível executar uma transmissão de dados entre os dispositivos  $s$  e  $d$ . Em outras palavras o nó  $d$  deve estar no alcance de transmissão do nó  $s$ .

Cada sensor  $s \in V - \{i\}$ , onde  $i$  representa o nó *sink*, é responsável pela origem de um fluxo de dados  $f \in F$ , sendo  $F$  o conjunto de fluxos gerados sobre a RSSF. Todos os fluxos da rede tem o nó *sink* como destino.

Todo caminho de um determinado fluxo de dado estabelecido sobre o grafo  $G$  com destino ao nó *sink* deve procurar atender a um conjunto de objetivos para manter o bom funcionamento de alguns recursos da rede, como por exemplo a perda de pacotes, o consumo de energia e o atraso na entrega dos dados. Rotas com uma grande quantidade de saltos requer a ativação de muitos enlaces, o que pode levar a uma maior utilização do meio de comunicação aumentando a contenção ou a interferência, bem como aumentando o atraso fim-a-fim [22].

O objetivo do balanceamento é distribuir os fluxos de maneira uniforme pela rede. Isso impede que um pequeno conjunto de nós seja usado pela maioria das rotas, o que causaria uma sobrecarga sobre esse conjunto de nós. Deve ser observado que os dispositivos da RSSF têm recursos limitados, de modo que uma sobrecarga pode, por exemplo, levar a redução do tempo de vida da rede, uma vez que existe um maior consumo de energia da bateria necessária para encaminhar os pacotes, bem como resultar em uma maior perda de pacotes, dada a pequena quantidade de memória dos nós para o armazenamento de pacotes [30].

A interferência degrada a qualidade do link [22], podendo ser provocada pela quantidade de nós ativos na vizinhança ou por outras redes sem fio que utilizam padrões de comunicação que compartilham a mesma faixa de frequência. Como os nós em uma RSSF compartilham a banda, e apenas empregam uma única interface de rádio e um único canal de comunicação, uma maior quantidade de nós presentes na rede tem como consequência níveis mais altos de interferência. Isso significa que há uma maior probabilidade de colisão (exigindo assim a retransmissão de pacotes), pois é provável que o canal esteja ocupado. Como resultado, a interferência tem um impacto considerável na capacidade de transmissão dos enlaces de comunicação. Assim, rotas que utilizam enlaces com um alto grau de interferência podem contribuir com maior atraso ou com um maior número de retransmissão dos pacotes, resultando em maior consumo de bateria.

É perceptível que esses três objetivos são conflitantes. O aumento no número de saltos em um caminho é uma consequência comum quando uma solução de roteamento



procura minimizar a sobrecarga [22]. Entretanto, o aumento do comprimento do percurso provoca maior ativação de enlaces e conseqüentemente aumentando a interferência gerada sobre os nós. Deve-se observar que caminhos curtos não geram necessariamente menos interferência na RSSF, pois os enlaces estão sujeitos a sofrer interferência de origens externa, devido à existência de outras redes/dispositivos sem fios que estão dentro do alcance de interferência e transmissão.

Para especificar a determinação das rotas sobre uma RSSF, foi criado um modelo de otimização tri-objetivo: reduzir o número de salto, diminuir o gargalo da rede e evitar o uso de links com baixa qualidade. Esses três objetivos são descritos e modelados em seguida.

### 2.4.1 Número de saltos

Minimizar o número de salto necessários em um caminho pode reduzir o atraso fim-a-fim. O modelo de programação linear é usado para encontrar os caminhos mais curtos para os fluxos  $f \in F$ .

$$\text{Minimizar} \quad \left\{ \sum_{e_{sd} \in E} a_{sd} \right\} \quad (2-1)$$

Sujeito a :

$$\sum_{d \in V} a_{vd} - \sum_{d \in V} a_{dv} = 1, \quad \forall v \in V, v \neq i \quad (2-2)$$

$$\sum_{s \in V} a_{si} = |F|, \quad i = \text{sink} \quad (2-3)$$

$$a_{sd} \geq 0 \quad (2-4)$$

A variável  $a_{sd}$  é definida com a soma dos fluxos que usam o enlace  $e_{sd}$  em sua rota. A restrição (2-2) garante que cada vértice gere um único fluxo, a restrição (2-3) garante que o nó *sink* receba uma quantidade de fluxos iguais ao número de sensores presentes na rede. A combinação das restrições (2-2) e (2-3) garante que não sejam criados *loops*. A restrição (2-4) garante a não negatividade da soma dos fluxos sobre os enlaces. A função objetivo (2-1) minimiza a somatória de todos os fluxos que passam por cada aresta  $e_{sd} \in E$ . Assim, cada fluxo é alocado para o caminho mais curto e, portanto, o valor da função objetivo é minimizado.

### 2.4.2 Enlaces com baixa qualidade

Caminhos curtos podem estar sujeitos a um nível elevado de interferência o que aumenta a taxa de perda dos pacotes, uma vez que a interferência prejudica a qualidade

dos enlaces. Esse objetivo é importante porque a qualidade da comunicação afeta a capacidade total da rede. Enlaces sem fio que não possuem sua qualidade degradada por fatores como interferência e ruído, são uma boa opção para serem utilizados nas rotas para o nó *sink*, enquanto que os enlaces com má qualidade de transmissão (por causa dos altos níveis de interferência, por exemplo) devem ser evitados para melhorar a taxa de entrega dos pacotes.

Varias métricas podem ser utilizadas para determinar a qualidade do enlace de comunicação entre dois sensores. O LQI (*Link Quality Indication*) é uma medida, baseada no RSSI, fornecida pela camada física, padrão IEEE 802.15.4, que pode ser usada como métrica para determinar a qualidade de transmissão de um enlace. O valor do LQI é representado pela faixa de valores de 0 a 255 [24]. A variável  $LQI_{sd}$  representa o valor do LQI para o enlace  $e_{sd}$ , enlaces são considerados como de baixa qualidade se o valor do LQI for inferior a um limite ( $TH_{LQI}$ ) estabelecido, como exibido pela condição:

$$l_{sd} = \begin{cases} 0 & , LQI_{sd} \geq TH_{LQI} \\ 1 - \left(\frac{LQI_{sd}}{TH_{LQI}}\right) & , LQI_{sd} < TH_{LQI} \end{cases} \quad (2-5)$$

A variável  $l_{sd}$  é usada no modelo proposto para representar os valores dos enlace que devem ser evitados (valores mais altos). Quando  $l_{sd}$  tem seu valor igual a zero, ou seja, o valor do  $LQI_{sd}$  é superior ao limite  $TH_{LQI}$ , indica que o enlace entre os dispositivos  $s$  e  $d$  possui um LQI aceitável. Caso contrário, o valor da variável  $l_{sd}$  é normalizado dentro do intervalo  $(0, 1]$  onde os valores mais próximos a 0 representam os enlaces com o LQI mais próximo ao limite  $TH_{LQI}$  e os valores mais distantes desse limite são descritos com o valor 1, representando os enlaces com a pior qualidade.

A variável  $l_{sd}$  é essencial para minimizar o uso de enlaces com baixa qualidade de um caminho. A função objetivo que minimiza a quantidade de enlaces com baixa qualidade é construída pela combinação da variável  $a_{sd}$  com o valor da variável  $l_{sd}$ .

$$\text{Minimizar} \quad \left\{ \sum_{e_{sd} \in E} l_{sd} \cdot a_{sd} \right\} \quad (2-6)$$

### 2.4.3 Gargalo da rede

A distribuição dos fluxos de forma balanceada aumenta o tempo de vida da rede. Por outro lado, o desbalanceamento dos caminhos para os fluxos de dados na rede, cria aglomerados de fluxos sobre um determinado nó (criando um gargalo) o que gera um maior consumo de energia devido ao aumento do número de pacotes transmitidos. Uma das restrições que geralmente os sensores apresentam é referente ao tempo de vida da rede

que está relacionada com o consumo de energia, um fator que beneficia um menor gasto energético é a minimização do gargalo da RSSF. Além disso, minimizar o gargalo da rede pode melhorar o desempenho do tráfego.

A função objetivo referente à minimização do gargalo utiliza a variável  $a_{sd}$  para realizar a contagem da quantidade de fluxos que estão utilizando um determinado nó. Dentre o conjunto de valores formado pela contagem procura-se minimizar o maior valor (maior gargalo).

$$\text{Minimizar} \quad \left\{ \max \left( \left\{ \sum_{d \in V} a_{sd} \right\}, \forall s \in V \right) \right\} \quad (2-7)$$

#### 2.4.4 Modelo multiobjetivo

A seguir é definido o modelo de otimização multiobjetivo para o problema do roteamento em RSSF com três objetivos (número de saltos, qualidade dos enlaces e gargalo da rede):

$$\begin{aligned} &\text{Minimizar} \quad \left\{ \sum_{e_{sd} \in E} a_{sd} \right\} \\ &\text{Minimizar} \quad \left\{ \sum_{e_{sd} \in E} l_{sd} \cdot a_{sd} \right\} \\ &\text{Minimizar} \quad \left\{ \max \left( \left\{ \sum_{d \in V} a_{sd} \right\}, \forall s \in V \right) \right\} \\ &\text{Sujeito a:} \\ &\quad \sum_{d \in V} a_{vd} - \sum_{d \in V} a_{dv} = 1, \forall v \in V, v \neq i \\ &\quad \sum_{s \in V} a_{si} = |F|, i = \text{sink} \\ &\quad a_{sd} \geq 0 \end{aligned}$$

As funções objetivos (2-1), (2-6) e (2-7), quando combinadas sobre um único modelo, conduzem a soluções conflitantes uma vez que possuem um conjunto de soluções ótimas que não são dominadas entre si, ou seja, um conjunto Pareto ótimo. Em outras palavras, os objetivos modelados são conflitantes entre si, pois pode não existir uma solução que seja capaz de fornecer os valores ótimos simultaneamente para cada um dos três objetivos.

O conflito entre os objetivos do menor número de saltos (2-1) e menor número de enlaces com baixa qualidade (2-6) com o objetivo que minimiza o gargalo da rede (2-7)

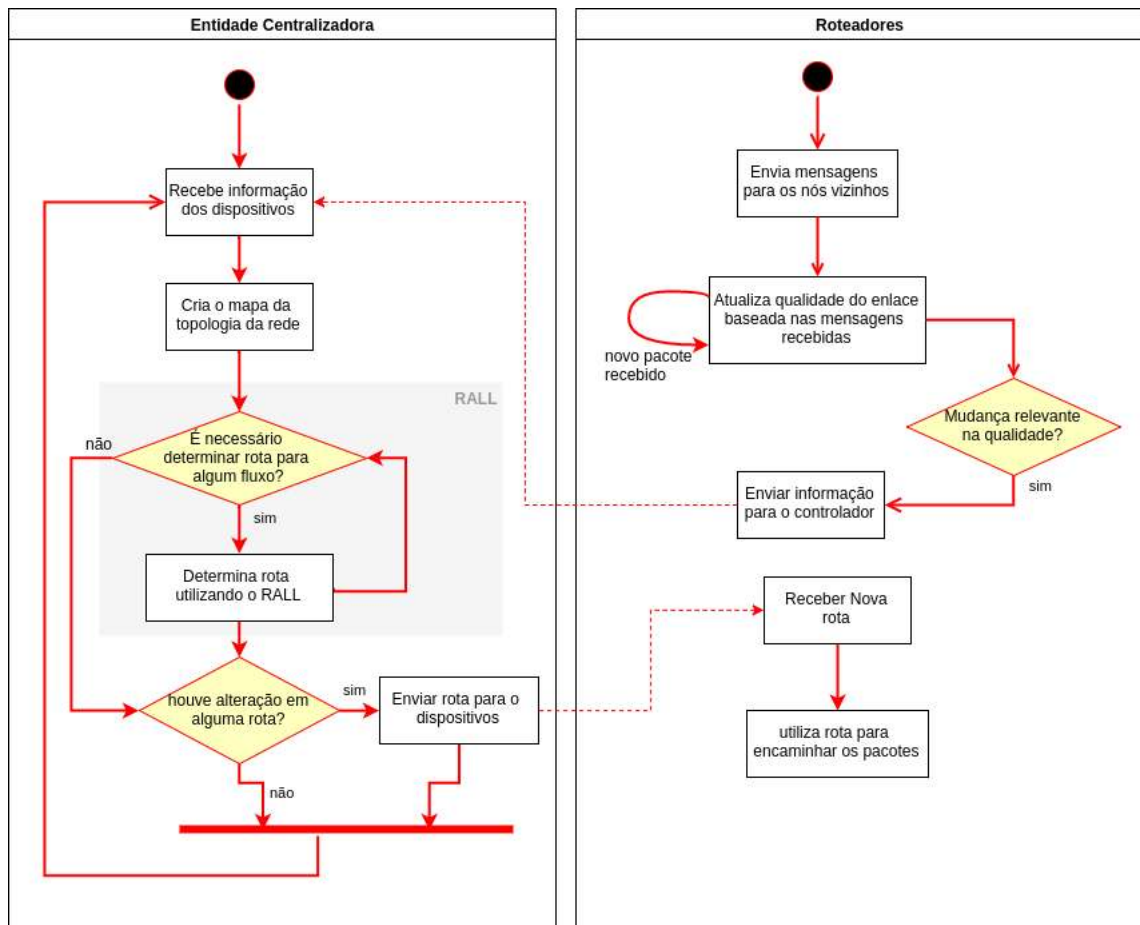
é evidente já que os objetivos (2-1) e (2-6) agrupam os fluxos em caminhos mais curtos ou em determinados enlaces que possuem boa qualidade. Já a função objetivo (2-7) busca distribuir os caminhos para os fluxos igualmente sobre os nós da rede, causando o aumento da média do comprimento dos caminhos e usando uma maior quantidade de enlaces, sendo que alguns desses enlaces podem ser de baixa qualidade. As funções objetivos (2-1) e (2-6) apresentam um conflito quando, para estabelecer um caminho curto, pode requer a utilização de enlaces com baixa qualidade.

## 2.5 Routing Aware of path Length, Link quality, and traffic Load — RALL

Nesta seção é descrito o algoritmo multiobjetivo intitulado de *Routing Aware of path Length, Link quality, and traffic Load (RALL)* que entrega uma solução *single-path* para o problema de roteamento em RSSF. O algoritmo *RALL* utiliza algumas técnicas para simplificar a complexidade de determinar uma solução pertencente ao conjunto de soluções Pareto ótima. Para isso, o algoritmo pesquisa caminhos que possuem um menor custo (algoritmo de Dijkstra por exemplo) para cada fluxo gerados pelos nó da RSSF. Os valores relacionado com a função objetivo são atualizados dependendo do nós que já tiveram sua rota estabelecida com a intenção de manter o balanceamento. Inicialmente, é executado a transformação do modelo onde as funções objetivos que minimiza o comprimento dos caminhos (2-1) e a que minimiza a quantidade de enlaces com baixa qualidade (2-6) possam ser combinadas em um único objetivo. O algoritmo é executado de forma centralizada em uma entidade que possui uma visão global da rede, para por exemplo obter a qualidade dos enlaces de comunicação. Portanto, essa proposta está preparada para ser facilmente adaptada ao contexto de SDN.

A Figura 2.3 apresenta o diagrama de atividade das principais operações realizadas pelo RALL. O diagrama apresenta duas entidades, os roteadores que representa os dispositivos da rede e a entidade centralizadora que é responsável por manter a instância do algoritmo RALL. Os roteadores são responsáveis por enviar informações sobre o estado da rede e receber novas rotas para encaminhar os pacotes de dados. Já a entidade centralizadora recebe as informações geradas pelos roteadores para construir o mapa da rede, então logo em seguida as rotas de todos os fluxos são geradas utilizando o algoritmo RALL (quadro cinza da Figura 2.3).

Figura 2.3: Diagrama de atividades da abordagem.



Quando a solução ótima de uma função objetivo não domina ou não é dominada por uma solução de um outro objetivo, é necessário estabelecer um *tradeoff* entre as funções para determinar a escolha da solução que satisfaça os objetivos, parcialmente ou completamente. O método da soma ponderada é normalmente aplicado para combinar os objetivos. Entretanto, para isso é preciso o estabelecimento de pesos para cada uma das funções objetivos e então calcular a soma ponderada com esses valores. Esse método foi escolhido porque é bem conhecido e utilizado em problemas de programação linear [40]:

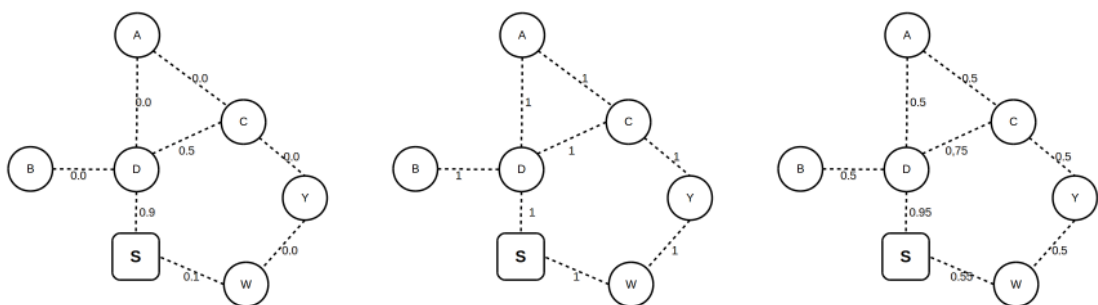
$$\text{Minimizar} \left\{ w_p \cdot \left( \sum_{e_{sd} \in E} a_{sd} \right) + w_l \cdot \left( \sum_{e_{sd} \in E} l_{sd} \cdot a_{sd} \right) \right\} =$$

$$\left\{ \sum_{e_{sd} \in E} (w_p + w_l \cdot l_{sd}) \cdot a_{sd} \right\} \quad (2-8)$$

$w_p$  e  $w_l$  são os pesos associados as funções objetivos que minimizam o número

de saltos (2-1) e a quantidade de enlaces com baixa qualidade (2-6), respectivamente. Para que seja possível utilizar essa técnica é obrigatório que as variáveis de decisão das funções objetivos se encontrem na mesma escala ou ordem de grandeza, não sendo esse o caso da função (2-7) responsável por minimizar o gargalo na rede. No modelo utilizado, a variável de decisão para ambos objetivos é o número de fluxos que passam pelos enlaces.

A função resultante da soma ponderada passa a ser utilizada como função objetivo principal para determinar as soluções do problema multiobjetivo. Na Figura 2.4(c) é exibido um exemplo do grafo, gerado pela soma ponderada dos grafos representado pelas Figuras 2.4(a) que apresenta os valores da qualidade dos enlaces e a Figura 2.4(b) que representa a quantidade de saltos, com os valores dos pesos  $w_l = 0,5$  e  $w_p = 0,5$ .



(a) Topologia, arestas representam a função objetivo de qualidade do enlace. (b) Topologia, arestas representam a função objetivo de quantidade de saltos. (c) Topologia, arestas representa a função resultante da soma ponderada

**Figura 2.4:** Função objetivo resultante da soma ponderada entre funções objetivos 2-1 e 2-6

Inicialmente o mapa da topologia da rede é construído através da troca de mensagens entre nós vizinhos, informações sobre a qualidade dos enlaces de comunicação entre os dispositivos da rede são então encaminhadas para uma entidade centralizadora da rede (por exemplo, o sink), onde o algoritmo RALL é executado, como feito pelo protocolo de comunicação desenvolvido por Brito *et al.* [18].

O algoritmo RALL inicia realizando a combinação das funções objetivos, usando a soma ponderada (2-8). Logo em seguida, o RALL realiza a minimização do gargalo da rede para cada rota determinada pela função objetivo resultante da soma ponderada, atualizando os valores da função objetivo a cada nova rota estabelecida. O Algoritmo 2.1 mostra o pseudocódigo do RALL que recebe como entrada um conjunto de fluxos ordenados, de forma decrescente pela quantidade de saltos do menor caminho até o *sink*, que serão utilizados para determinar os caminhos com menor custo.

Na linha 2, do Algoritmo 2.1, é executada a soma ponderada das funções objetivo. Nesse procedimento, o comprimento do caminho e a qualidade dos enlaces são

combinadas em um único vetor de custos. A variável  $l_{sd}$  corresponde ao valor normalizado do LQI para o enlace  $e_{sd}$  como apresentado na equação (2-5).

---

**Algoritmo 2.1:** RALL – Routing Aware of path Length, Link quality, and traffic Load

---

**Algoritmo:** RALL ()

**Entrada:**  
 $G = (V, E)$   
 $O_f$  – conjunto ordenado dos fluxos  
 $i$  – sink,  $i \in V$   
 $w_p, w_l$  – peso das funções objetivos

1 **início**  
2      $E \leftarrow \text{SomaPonderada}(E, w_p, w_l)$   
3      $A \leftarrow E$   
4      $P \leftarrow \emptyset$   
5     **para cada**  $f_s \in O_f$  **faça**  
6          $p_s \leftarrow \text{MCPath}(s, i, G < V, A >)$   
7          $A \leftarrow \text{AtualizarArestas}(p_s, E, A)$   
8          $P \leftarrow P \cup \{p_s\}$   
9     **fim**  
10    **retorna**  $P$   
11 **fim**

**Função:** SomaPonderada ( $E, w_p, w_l$ )

**Entrada:**  
 $E$  – conjunto de arestas  
 $w_p, w_l$  – pesos das funções objetivos

12 **início**  
13      $E_{new} \leftarrow \emptyset$   
14     **para cada**  $e_{sd} \in E$  **faça**  
15          $e_{sd}^{new} \leftarrow p_{const} \cdot (w_p + w_l \cdot l_{sd})$   
16          $E_{new} \leftarrow E_{new} \cup \{e_{sd}^{new}\}$   
17     **fim**  
18    **retorna**  $E_{new}$   
19 **fim**

**Função:** AtualizarArestas ( $p_s, E, A$ )

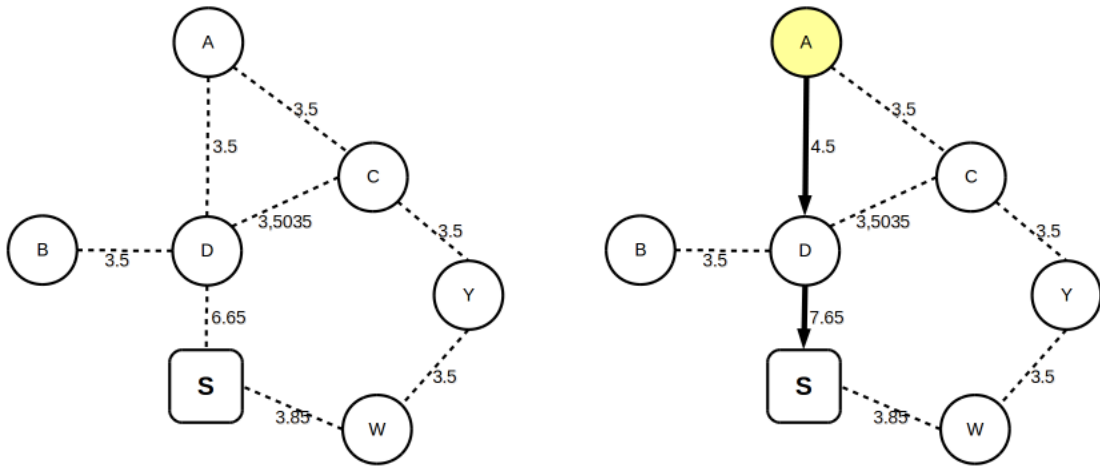
**Entrada:**  
 $E$  – conjunto de arestas  
 $P_s$  – caminho do nó  $s$  para o sink  
 $A$  – conjunto de arestas

20 **início**  
21     **para cada**  $b_{jh} \in P_s$  **faça**  
22          $r_{jh} \leftarrow E \cap \{b_{jh}\}$   
23          $amount \leftarrow \sum a_{sd}, \forall e_{sd} \in E, s = j$   
24          $r_{jh} \leftarrow e_{jh} + amount, e_{jh} \in E$   
25          $A \leftarrow A \cup \{r_{jh}\}$   
26     **fim**  
27    **retorna**  $A$   
28 **fim**

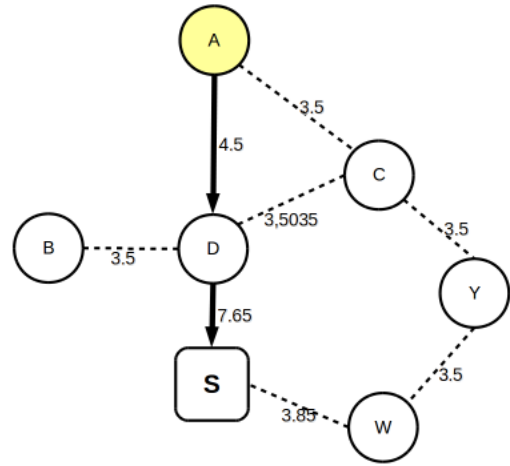
---

Após a soma ponderada ter sido executada, um caminho de custo mínimo  $p_s$  é gerado usando a função  $\text{MCPath}(\text{origem}, \text{destino}, \text{grafo})$  (linha 6) para cada fluxo  $f_s$ . Os enlaces presentes no caminho  $p_s$  terão os valores de suas arestas associadas  $e_{sd}$

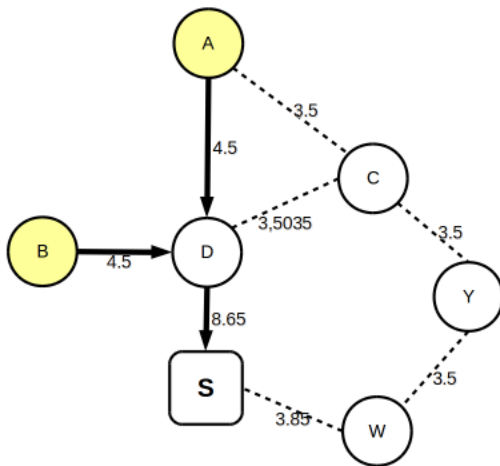
incrementados com a quantidade de fluxos que utilizam o nó  $s \in V$  (linhas 23 e 24 da função  $AtualizarArestas(p,E,A)$ ). Finalizando, o caminho é adicionado ao conjunto de soluções  $P$  que irá conter todas as rotas para cada fluxo.



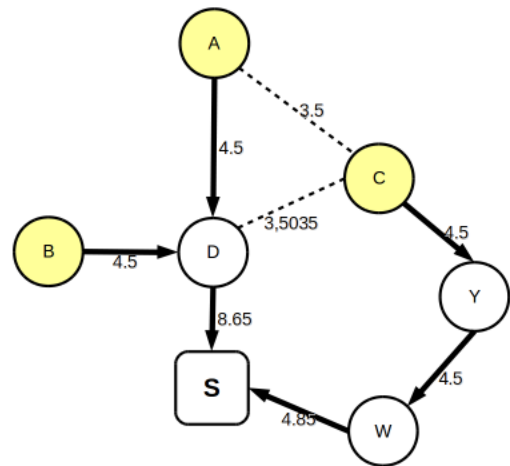
(a) Função resultante da soma ponderada com  $p_{const} = 7$ .



(b) 1ª iteração, adicionando rota do nó 1.



(c) 2ª iteração, adicionando rota do nó 2.



(d) 3ª iteração, adicionando rota do nó 3.

**Figura 2.5:** Demonstração da seleção de rotas para os fluxos.

A cada iteração do RALL são geradas novas rotas, nas Figuras 2.5(b) e 2.5(c) foram determinadas as rotas para os nós **A** e **B**, até o no sink **S**. Para cada aresta  $e_{sd}$  pertencente aos caminhos estabelecidos para esses nós: **[A-D-S]** e **[B-D-S]**, terão seus valores atualizados de acordo com a quantidade de rotas que utilizam o nó  $s$  como parte de seu caminho. Com as alterações realizadas pelas duas primeiras iterações (determinação das rotas dos nós **A** e **B**), a terceira iteração, que determina a rota com origem no nó **C**,



Figura 2.5(d), estabelece um caminho que irá evitar a utilização do nó **D** por ele já está presente nas outras rotas.

### 2.5.1 Análise de complexidade

A modelagem, para o problema de roteamento em RSSF, apresentada possui a estrutura composta por três funções objetivos de minimização sendo uma dessas um problema *min max*:

$$\begin{aligned} \text{Min:} & \quad \{ f_1(a_{sd}) \text{ e } f_2(a_{sd}) \} \\ \text{Min:} & \quad \text{Max} \{ a_{sd} \} \\ \text{Sujeito a:} & \quad x \cdot a_{sd} \in X \end{aligned}$$

A função objetivo que procura minimizar o maior valor dentro de um conjunto de soluções viáveis é classificado como um problema NP-difícil. Já que, a melhor solução possível para essa função objetivo é dada quando o valor máximo de qualquer variável  $a_{sd}$  for menor ou igual a 1, sendo equivalente a seleção de caminhos mutuamente disjuntos de um grafo. A obtenção de caminhos mutuamente disjuntos faz parte dos problemas NP-completos de Karp [25].

O algoritmo RALL apresentado apresenta a seguinte estrutura básica:

---

#### Algoritmo 2.2: Estrutura básica dos algoritmos

---

**Estrutura:** Seleção ()

```

início
  para cada fluxo faça
    Calcular caminho de custo mínimo.
    Atualizar valores das arestas.
  fim
fim

```

---

No desenvolvimento da abordagem foi utilizado o algoritmo de Dijkstra para selecionar um caminho de custo mínimo, que possui a complexidade:

$$O([m + n] \cdot \log(n))$$

onde  $m$  é o número de arestas e  $n$  é o número de vértices. A operação para atualizar os valores das aresta no grafo tem complexidade igual a  $O(m)$ . Assim em termos assintóticos a complexidade do laço interno é dada pela complexidade do algoritmo de Dijkstra.

Para o algoritmo RALL a quantidade de fluxos na rede é igual a quantidade de nós presentes na rede, já que cada dispositivo da rede é responsável pela origem de um único caminho. Assim a complexidade do algoritmo é igual a:

$$O(n[m+n] \cdot \log(n)) =$$

$$O([mn+n^2] \cdot \log(n))$$

como  $m > n$  para qualquer topologia, podemos concluir de forma trivial que  $mn > n^2$ , desta forma um limite superior para a complexidade de RALL pode ser dada por:

$$O(2mn \cdot \log(n))$$

## 2.6 Análise dos Resultados do Algoritmo RALL

Realizou-se simulações para analisar o impacto da abordagem proposta sobre o desempenho da RSSF, comparando com abordagens dos trabalhos relacionados. Primeiramente é descrito a configuração do cenário e em seguida são exibidos os resultados obtidos através do simulador e a discussão sobre os resultados.

### 2.6.1 Configuração do Cenário

Foi utilizado o Castalia [12] que é uma especialização do simulador OM-Net++ [56], o qual é utilizado para avaliar o desempenho de RSSF. A tabela 2.3 mostra os parâmetros gerais usados na simulação e a tabela 2.4 mostra a configuração dos nós como especificado em [47]. Uma rede com um único nó *sink* e vários sensores responsáveis por gerar os dados é especificado no simulador. O nó *sink* recebe os dados dos sensores e serve como um ponto de conexão a uma rede externa. Os nós sensores enviam os dados através de uma única rota para o nó *sink*, existe um único fluxo para cada nó sensor, exceto quando os testes variam o número de fluxos ativos na RSSF. Todos os nós são estáticos e usam enlaces assimétricos.

As simulações foram realizadas em cenários onde o número de nós variou de 10 a 50 nós (Tabela 2.3). Para cada conjunto de nós, dez topologias e quatro sementes aleatórias foram geradas, resultando em um total de 40 simulações para cada conjunto de nós. As posições dos nós em todas as topologias foram geradas por meio de uma distribuição normal, em uma área limitada para garantir que nenhum dos nós permaneceria isolado da rede (fora do alcance de qualquer outro nó), para isso foi empregado o algoritmo de geração de topologia utilizado por Machado *et al.* [37].

**Tabela 2.3:** *Parâmetros de simulação*

|  |                       |
|--|-----------------------|
| Taxa de geração de pacotes                           | 5 pacotes/minuto      |
| Modelo de geração de trafego                         | Poisson               |
| Área das topologias                                  | 50m × 50m             |
| Número de nós  | 10, 20, 30, 40 e 50   |
| Modelo de interferência                              | Additive <sup>1</sup> |
| Peso para função de comprimento do caminho ( $w_p$ ) | 50%                   |
| Peso para função de qualidade do enlace ( $w_l$ )    | 50%                   |

Para a avaliação dos algoritmos de roteamento foram testados e adaptados alguns protocolos de roteamento (por exemplo o AODV) para a captação de dados da rede, como a vizinhanças dos nós, qualidade dos enlaces, possíveis nós sem energia. Porém, os protocolos testados adicionavam uma carga excessiva de mensagens na rede que prejudicava a eficiência do algoritmo. Sendo assim foi desenvolvido um protocolo [18] com a finalidade de realizar a avaliação da abordagem onde as mensagens geradas na rede são específicas para o funcionamento do algoritmo.

**Tabela 2.4:** *Configuração dos nós no Castalia*

|                         |             |
|-------------------------|-------------|
| Energia Inicial         | 100 J       |
| TX Energia              | 20 mJ/pkt   |
| RX Energia              | 10 mJ/pkt   |
| MAC layer               | T-MAC       |
| Radio Model             | CC2420      |
| Potência de Transmissão | -10dBm      |
| Tamanho do pacote       | 127 bytes   |
| Enlace de comunicação   | Assimétrico |

O protocolo emprega mensagens de controle para descobrir a vizinhança de cada nó, para disseminar as rotas e para calcular o valor médio do LQI dos enlaces, de forma que o nó *sink* tenha as informações atualizadas sobre o estado atual da rede. O algoritmo de roteamento é executado de forma centralizada pelo nó *sink* (em um cenário real, isso pode ser feito por um computador conectado ao *sink*). Um vez em posse da visão global da rede, o *sink* executa o algoritmo de roteamento para determinar o caminho dos fluxos de

<sup>1</sup>*Additive interference*: Utiliza os valores do SINR dos pacotes recebidos, o nó receptor recebe o sinal com maior potência entre as transmissões (se o sinal for forte o bastante para realizar uma transmissão).

cada nó sensor. Cada nó envia mensagens para o *sink* através do protocolo de roteamento, que irá extrair algumas métricas de desempenho para análise.

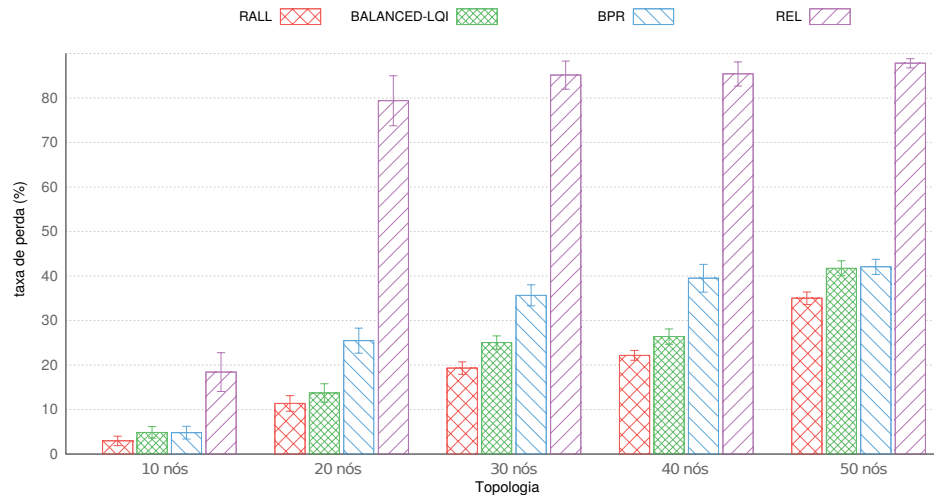
Outros algoritmos de roteamento foram testados para auxiliar na avaliação de desempenho do RALL. O objetivo de realizar a comparação entre essas abordagens é prover uma análise de desempenho entre a combinação de diferentes critérios de roteamento para a RSSF.

- *BALANCED – LQI*: Baseado no algoritmo RALL porém utilizando somente dois objetivos, as funções objetivos de balanceamento e quantidade de enlaces com baixa qualidade, com a finalidade de prover uma comparação entre a utilização da mesma heurística porém somente com dois objetivos.
- *BPR*: Esta é uma heurística com duas funções objetivos, balanceamento de carga e comprimento dos caminhos [45]. Para cada fluxo gerado na rede, o BPR procura selecionar a rota mais curta pertencente ao conjunto de caminhos candidatos que resulte em menor incremento na função objetivo do gargalo.
- *REL*: Este é um protocolo de roteamento que reduz o número de saltos e aumenta o tempo de vida da rede através da energia residual dos nós tentando maximizar a qualidade dos enlaces de cada caminho, utilizando como base a métrica de qualidade RSSI [37].

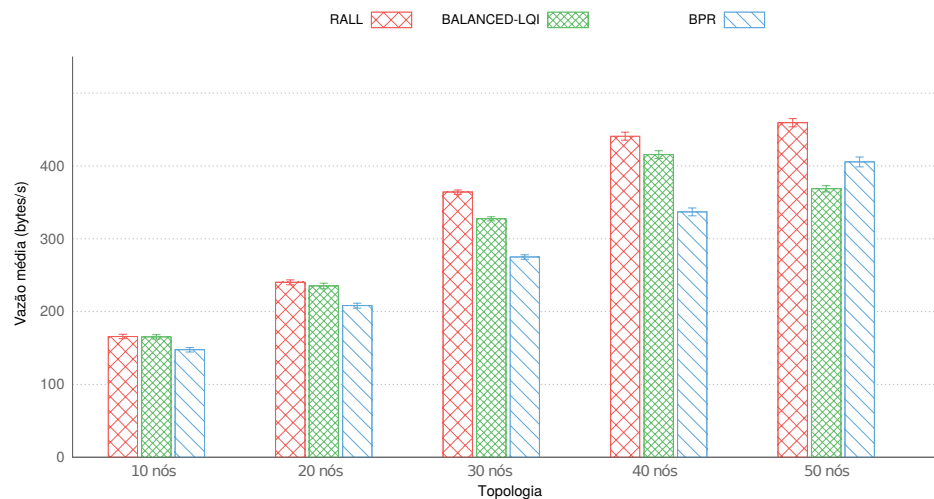
## 2.6.2 Resultados

As figuras 2.6 e 2.7 mostram a taxa de perda de pacotes e a média da vazão, respectivamente. Os gráficos mostram que o algoritmo RALL resulta em uma menor taxa de perda e uma maior vazão média, especialmente em cenários com uma maior densidade de nós (por exemplo 50 nós). Essa característica pode ser explicada pelo fato de que o RALL fornece uma combinação equilibrada entre os três objetivos o que resulta em melhores taxas de perda com uma melhor vazão em redes densas, que conseqüentemente tem maior quantidade de dados. *BALANCED-LQI* e *BPR* combinam apenas dois critérios, *BALANCED-LQI* tem menor perda de dados quando comparado com o *BPR* na maioria dos cenários (10, 20, 30 e 40 nós), isso é explicado pela presença da função objetivo referente à qualidade dos enlaces (*LQI*) exceto em redes densa (50 nós) quando existem altos níveis de contenção e interferência como resultado, apresenta uma taxa de perda ligeiramente inferior ao *BPR* e com uma maior vazão, já que o número de enlaces com boa qualidade é pequeno e caminhos mais curtos reduzem os níveis de contenção e interferência.

A proposta *REL* resulta em altas taxas de perda (80% ~ 90%) em cenários com um número mediano e alto de sensores. Isso é explicado pelo fato de que a abordagem não emprega forma de balanceamento da rede e não consegue estabelecer um bom equilíbrio



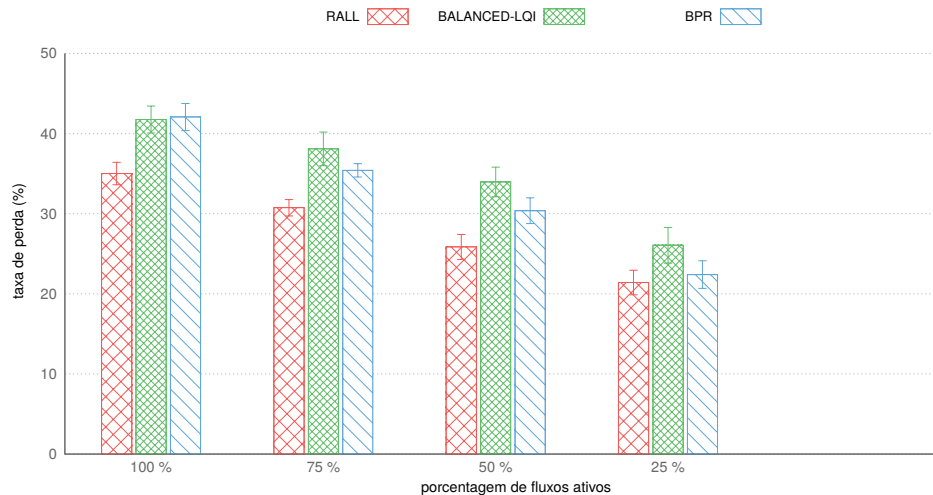
**Figura 2.6:** Taxa de perda de pacotes pela quantidade de nós.



**Figura 2.7:** Média da vazão.

entre o número de saltos e a utilização de enlaces com qualidade. Devido aos altos valores de perda de pacotes, a abordagem REL não é incluída nos gráficos.

O nível de tráfego gerado é um fator significant que influencia diretamente os níveis de interferência em redes sem fio. Por essa razão, as propostas de roteamento foram comparadas variando a porcentagem de fluxos ativos na RSSF com 50 nós (por exemplo, 100% representa um fluxo para cada nó, 75% representa aproximadamente 37 fluxos ativos). Nós sensores que não coletam informações são comumente usados somente como nós de retransmissão de pacotes (*relay nodes*). O gráfico da Figura 2.8 mostra que o RALL ainda tem menores taxas de perda quando a carga de tráfego é média ou alta (50%, 75% e 100%). BPR apresenta uma taxa de perda inferior à abordagem BALANCED-LQI em cargas de tráfego médias e altas, uma vez que existe também um elevado nível de contenção. Além disso, o BALANCED-LQI obtém maior taxa de perda do que o BPR quando é reduzida a porcentagem de fluxos ativos devido ao menor nível de interferência e, como resultado, a redução do comprimento do percurso leva a melhores taxas. Assim,

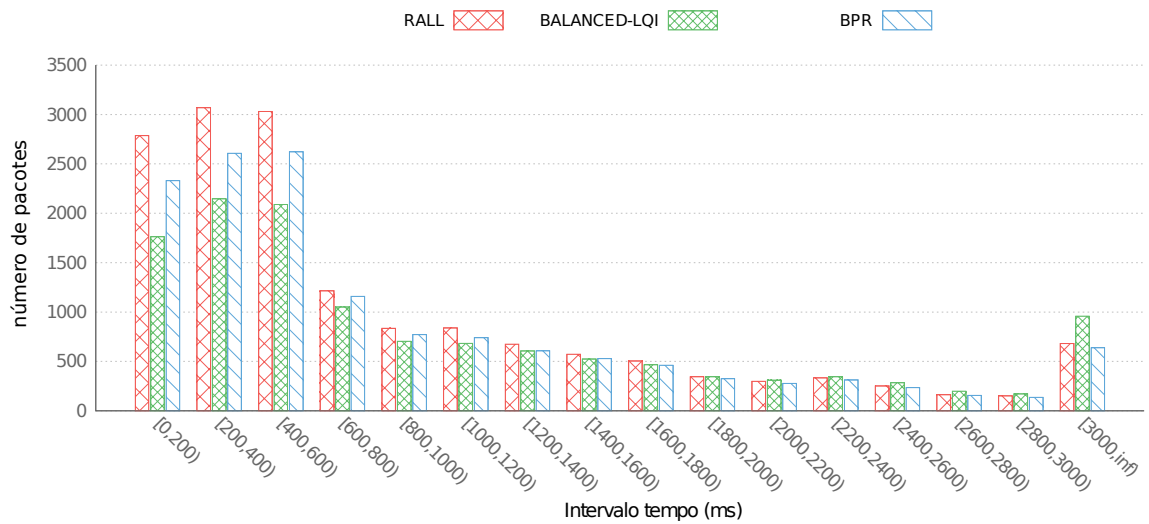


**Figura 2.8:** Taxa de perda pelo número de fluxos ativos para uma topologia com 50 nós.

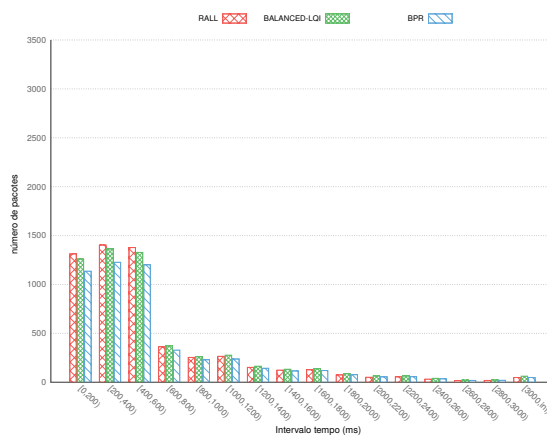
RALL resulta em menores taxas de perda para todas as configurações de carga de tráfego e tamanhos de rede, enquanto que BPR e BALANCED-LQI alternam na segunda posição, dependendo da carga de tráfego e do tamanho da rede.

A Figura 2.9 mostra a média da latência da entrega do dados para os cenários simulados. É importante ressaltar que na maioria dos cenários, os pacotes, em sua maior parte, foram entregues dentro do intervalo  $[0,600]$ ms. De fato, esse é o caso em todos os cenários. A maior diferença na latência entre as abordagens pode ser percebida quando o número de nós aumenta. Novamente, a abordagem RALL atinge um maior número de pacotes no menor período de tempo do que as abordagens BALANCED-LQI e BPR. RALL resulta em uma melhoria significativa da latência. Esses resultados podem ser explicados pela análise do comprimento médio do caminho gerado por cada abordagem (Figura 2.10), em que o RALL obteve os valores mais baixos.

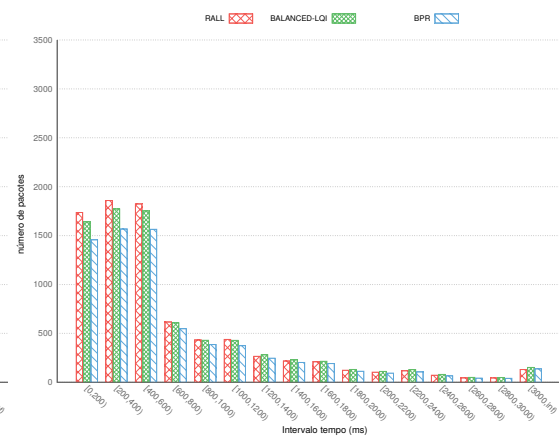
O tempo médio de vida da rede, que foi medido desde o início da simulação até que haja um nó sem conectividade com o nó *sink*, é mostrado na Figura 2.11. Deve ser salientado que o RALL tem um maior número de entregas de pacotes em uma latência menor do que as outras abordagens, favorecendo um melhor tempo de vida. O RALL também possui um comprimento médio de caminho menor, especialmente em redes mais densas e sobrecarregadas. É importante notar que caminhos mais curtos diminuem o número de ligações sem fios ativas, reduzindo assim o consumo de energia na transmissão e recepção de pacotes, uma vez que cada pacote gera um gasto de energia para enviar e receber os pacotes. Isso também explica o motivo do tempo de vida da rede alcançar tempos mais altos por possuir os caminhos mais curtos (ou seja, ativando menos enlaces). Por essas razões, a RALL alcança um tempo de vida útil mais longo do que o BALANCED-LQI e o BPR quando há um número médio e alto de nós (30, 40 e 50 nós), enquanto que o desempenho do RALL, BALANCED-LQI e BRP é muito semelhante



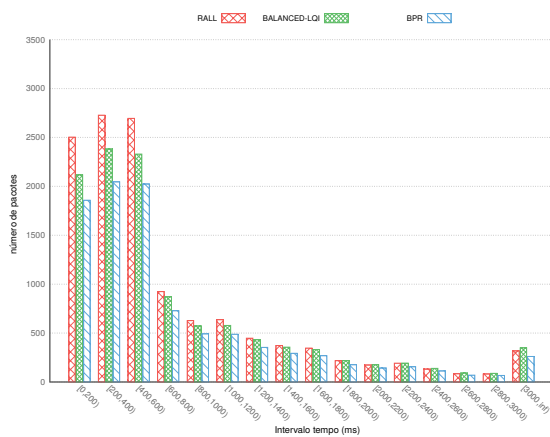
(a) 50 nós



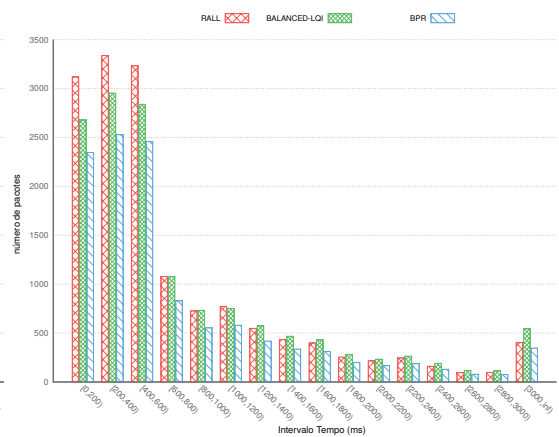
(b) 10 nós



(c) 20 nós



(d) 30 nós

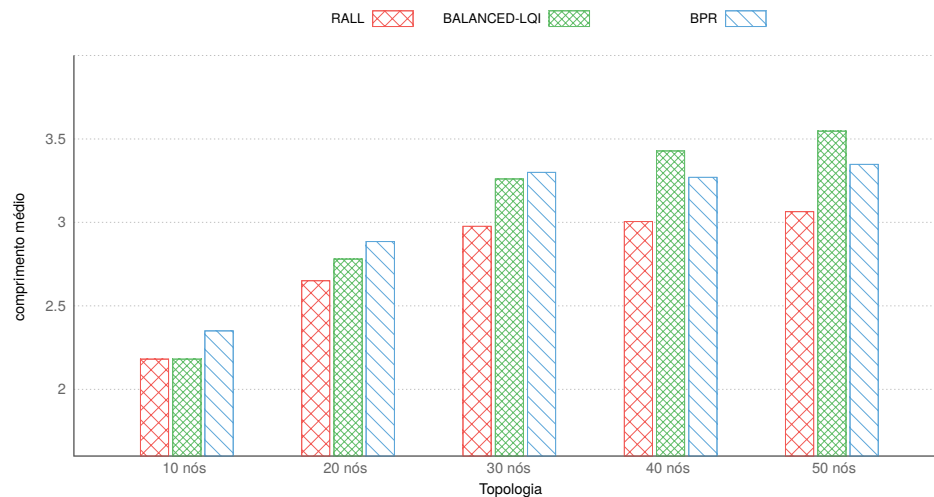


(e) 40 nós

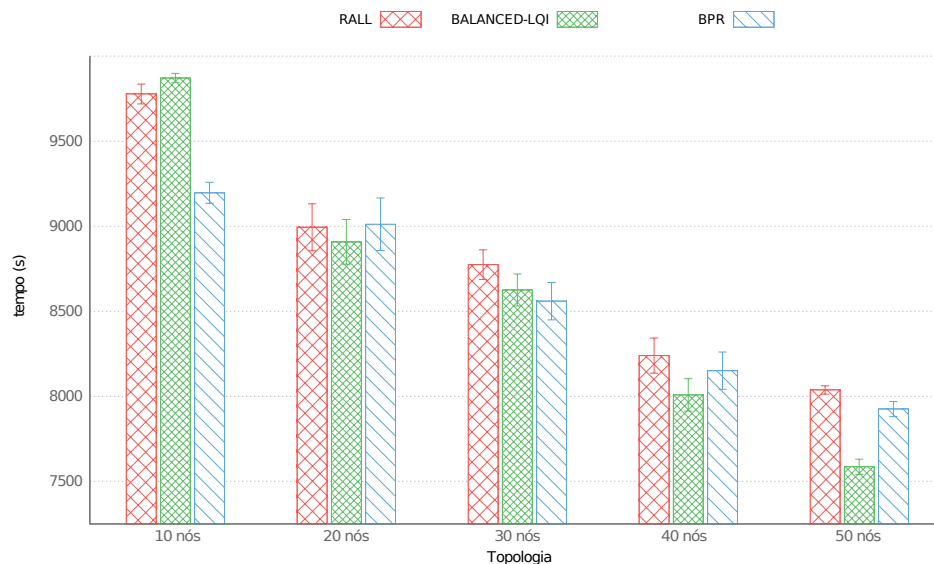
**Figura 2.9:** Latência para 10, 20, 30, 40 e 50 nós.

com um menor número de nós (10 e 20 nós).

Na Figura 2.12 é mostrado a quantidade de pacote de controle, pacotes gerados pela camada de enlace, que usa o protocolo T-MAC. Esse protocolo emprega um método



**Figura 2.10:** Comprimento médio dos caminhos.

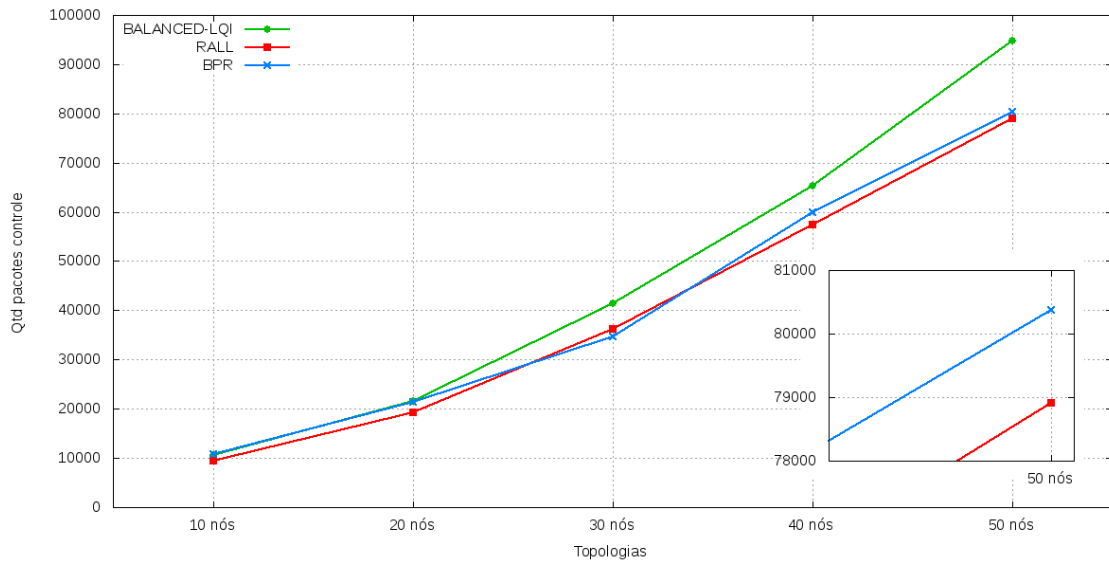


**Figura 2.11:** Média do tempo de vida da rede.

adaptativo de duty-cycle do rádio para reduzir o uso de energia e controlar a colisão.

Nota-se que o BALANCED-LQI possui um número maior de pacotes de controle enviados, a utilização de caminhos maiores, ativando mais enlaces de comunicação, e as possíveis retransmissões de pacotes que necessitam de uma quantidade maior de pacotes de controle para encaminhar os pacotes, leva a um aumento na quantidade de pacotes de controle utilizados em todos os cenários. O RALL além de apresentar uma menor taxa de perda de dados, como vista na Figura 2.6, foi a abordagem que menos utilizou o meio de comunicação para transmitir pacotes de controle, resultando em menos processamento o que beneficia diretamente o tempo de vida da rede.





**Figura 2.12:** Média da quantidade de pacotes de controle transmitidos.

### 2.6.3 Considerações

Neste capítulo foi apresentado uma solução para o problema de roteamento em RSSF utilizando múltiplos objetivos. A RSSF é uma rede projetada para um propósito específico sendo composta por dispositivos que possuem características particulares, como por exemplo, baixa capacidade de transmissão, processamento e tempo de vida da bateria.

Foi realizado uma análise extensa e detalhada sobre trabalhos relacionados que tratam o problema de roteamento através de várias abordagens, constatando que, apesar da quantidade de abordagens desenvolvidas para determinar as rotas em uma RSSF, poucos trabalhos apresentam uma solução que combine mais do que dois objetivos para o roteamento. Também são poucos os trabalhos que apresentam um modelo matemático que represente formalmente o problema de roteamento. Isso estimulou o desenvolvimento de uma abordagem para o roteamento que considere três objetivos e a apresentar um modelo matemático que descreve formalmente o problema de roteamento.

Para representar o problema de roteamento em RSSF foi criado um modelo de otimização multiobjetivo, utilizando três objetivos: quantidade de saltos, quantidade de enlaces com baixa qualidade e o balanceamento da rede, sendo esses objetivos conflitantes. Para determinar uma solução para o problema de otimização construído, foi desenvolvida uma heurística, RALL, utilizando uma adaptação do algoritmo de Dijkstra. Então, foi demonstrado e analisado através da realização de simulações que o algoritmo RALL, determina soluções para o problema de roteamento em RSSF que apresentam melhorias significativas no desempenho do tráfego da rede.

É previsto aumento da quantidade de dispositivos que devem utilizar uma rede

de comunicação, principalmente em cenários de IoT (resgate em desastres, cuidados para saúde e monitoramento do meio ambiente), desta forma as redes sem fio devem suportar maior capacidade de conectividade e dispor de mais recursos de rede. É normal a utilização de outros tipos de redes sem fio com dispositivos que forneçam meios de transmissões com melhores capacidades. Por isso, no próximo capítulo é exibida as alterações realizadas para adaptar a abordagem RALL para uma rede com maior capacidade.

---

## Roteamento para RMSF

---

Neste capítulo serão apresentados os principais conceitos que envolvem o roteamento em RMSF (Seção 3.1), em seguida são apresentadas a revisão e a comparação dos trabalhos relacionados (Seção 3.2) que abordam o problema de roteamento em *RMSF* que empregam em suas abordagens critérios de maneira multiobjetiva para selecionar uma solução para o roteamento. Após, são apresentadas as alterações realizadas no modelo de otimização multiobjetivo e na heurística *Routing Aware of path Length, Link quality and traffic Load (RALL)* (Seções 3.3 e 3.4) descritos no Capítulo 2 para adaptar a abordagem ao cenário das RMSF. Na sequência é apresentada a análise dos resultados obtidos pela heurística RALL através da realização de simulações, e por fim o sumário sobre o capítulo.

### 3.1 Redes em Malha Sem Fio

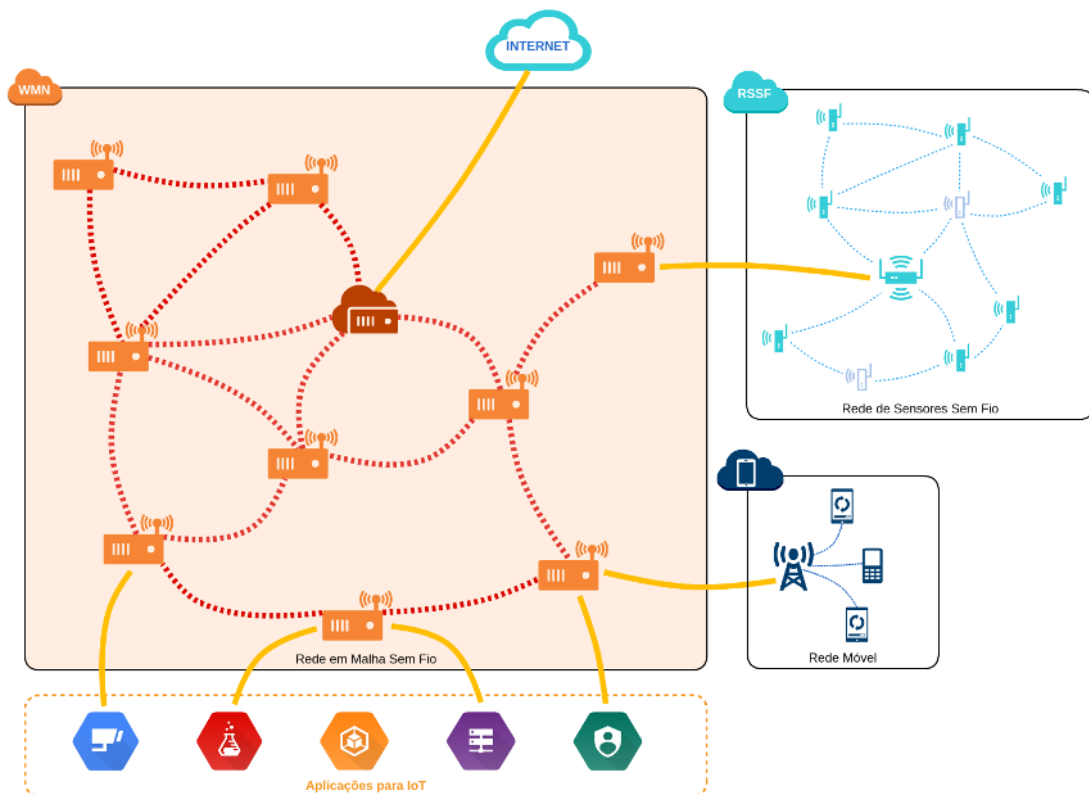
A Rede em Malha Sem Fio (RMSF), em inglês *Wireless Mesh Network (WMN)*, é um tipo de rede que possui a capacidade de prover acesso de forma ubíqua à Internet ou a alguma outra rede externa, sendo possível cobrir grandes áreas utilizando poucos requisitos financeiros e de infraestrutura. A RMSF fornece alta flexibilidade e escalabilidade o que a torna uma boa opção para ser empregada em diversos cenários, como redes domésticas de banda larga, redes de áreas metropolitanas, sistemas de transporte, sistemas de vigilância de segurança, implantação de redes comunitárias rurais e monitoramento.

Uma RMSF funciona como uma rede que utiliza um *backbone* sem fio estruturado para possibilitar a interoperabilidade entre redes heterogêneas, com ou sem fio, permitindo que os dados gerados em uma determinada rede possam ser encaminhados para outra rede possuindo outro tipo de tecnologia. Para realizar a transmissão dos dados a RMSF emprega a tecnologia de comunicação *Wi-Fi (IEEE 802.11 a/b/g/n)* no *backbone* sem fio. A RMSF pode ser definida como um caso especial de rede de múltiplos saltos para comutação de pacotes com *backbone* sem fio estático.

Uma RMSF é composta por três elementos básicos: roteadores de malha (*mesh routers*), clientes da malha (*mesh clients*) e o *gateway*, sendo definidos através das suas

funcionalidades dentro da rede:

- **Gateway:** esse elemento tem como finalidade fornecer um ponto de comunicação que permita a RMSF se conectar com a Internet de forma cabeada ou com outras redes.
- **Mesh routers (roteadores de malha):** esses elementos formam a *backbone* principal da rede sem fio e são responsáveis por fornecer conectividade a uma variedade de serviços para os clientes da malha. Através de uma estratégia de roteamento utilizando múltiplos saltos, os roteadores formam um sistema de retransmissão (malha) de dados para encaminhar o tráfego entre os clientes e *gateways* da RMSF.
- **Mesh clients (clientes da malha):** são dispositivos relacionados, em maior parte, aos usuários finais como notebooks, desktops e celulares. Em casos especiais os *mesh clients* podem ser dispositivos para conexão a outras redes (rede de sensores, rede de celulares, etc.). Os *Mesh clients* possuem várias finalidades e especificações podendo adquirir características similares às exercidas pelos *mesh routers* sendo capazes de participar do roteamento *multi-hop*.



**Figura 3.1:** Exemplo de rede em malha infraestruturada.

RMSF pode ser geralmente considerada como uma rede *ad hoc* devido às suas principais características. A RMSF pode ser descrita por três tipos de arquitetura: RMSF infraestruturada, RMSF cliente e RMSF híbrida.

A RMSF infraestruturada possui todos os seus *mesh routers* organizados de forma a constituírem um *backbone* sem fio, essa estrutura então é utilizada para fornecer o acesso a serviços externos a rede (Internet, por exemplo) para os *mesh clients* que estejam conectados a algum *mesh router*. Um exemplo da arquitetura infraestruturada é exibido na Figura 3.1 em que a RMSF fornece acesso a Internet aos *mesh clients* que podem ser um simples dispositivo ou uma outra rede.

A RMSF cliente é um tipo de arquitetura em que os *mesh clients* formam uma rede *peer-to-peer* dispensando a necessidade da existência dos *mesh routers* já que os *mesh clients* passam a realizar suas operações para fornecer os serviços da rede. Esse tipo de arquitetura é dependente do tipo de rádio utilizado por seus dispositivos e pode apresentar um alto grau de mobilidade dos dispositivos.

A arquitetura híbrida pode ser descrita como uma combinação entre a arquitetura RMSF infraestruturada e a arquitetura RMSF cliente. Os *mesh routers* constituem o *backbone* principal e os *mesh clients* quando possível colaboram para a criação da estrutura de malha.

## 3.2 Trabalhos Relacionados

Existem vários trabalhos que procuram otimizar a determinação de rotas combinando objetivos em RMSF. Alguns deles combinam a escolha das rotas com a atribuição de canais para melhorar a eficiência da rede. A seguir são apresentados alguns desses trabalhos principalmente os que apresentam soluções que envolvam a utilização de múltiplos objetivos para determinar o roteamento.

Boushaba, Hafid e Gendreau propuseram uma abordagem de roteamento na origem para RMSF denominada “*Source-Based Routing in Wireless Mesh Networks*” [13] que tem como objetivo melhorar a eficiência da rede apresentando uma nova métrica para determinar a qualidade dos enlaces entre os *mesh routers*, combinando os pacotes perdidos com a interferência gerada inter e intra-fluxos. A abordagem procura manter o balanceamento do *gateway (sink)* selecionado a melhor interface para receber fluxos baseado na média do tamanho da fila do dispositivo. Quando as duas métricas são combinadas, rotas que possuem uma boa qualidade são selecionadas. Porém o gargalo, apesar de ser crítico na vizinhança do nó *gateway*, quando não é tratado sobre os enlaces intermediários do caminho, enlaces que não fazem ligação direta com o *gateway* geram pontos de gargalos secundários na rede principalmente sobre enlaces com boa qualidade, o que resulta em retransmissão de pacotes e em perdas pois o dispositivo está com a fila de processamento cheia.

Em “*Quality of Experience-based Routing in Multi-Service Wireless Mesh Networks*” [43] é apresentado o método (*QoE*)-based para aprendizado por reforço não

supervisionado a fim de determinar o roteamento em redes em malha sem fio, buscando obter uma melhor experiência para o usuário. Para isso os fluxos da rede são divididos em três tipos de serviços: vídeo, áudio e transferência de dados, onde para cada serviço existem restrições de usabilidade (atraso, porcentagem de pacotes perdidos, etc.) que serão utilizadas como base de conhecimento para determinar as rotas. A cada intervalo de tempo informações como o atraso gerado pela fila, perda de dados, e qualidade do enlace são disseminadas para que os nós possam atualizar suas funções. A abordagem determina rotas individuais para cada tipo de serviço sem considerar aspectos importantes da rede, como a quantidade de nós ativos e o balanceamento de carga, deixando que o conhecimento gerado analisando a qualidade dos serviços determine quais rotas devem ser utilizadas o que pode levar a soluções com ótimos locais e não possuem desempenho razoável com grandes taxas de dados sobre a rede, que degrada todo o desempenho de maneira geral. Além disso, abordagens que utilizam a experiência do usuário para determinar e atualizar as rotas podem demandar tempo para tomar uma decisão o que limita a utilização desse tipo de abordagem em cenários que requer baixo atraso, como por exemplo uma rede em que trafegam dados de aplicações de saúde.

Zimian Hao e Yingxia Li apresentaram uma abordagem de roteamento para redes em malha com múltiplos *gateways* intitulada “*An Adaptive Load-aware Routing Algorithm for Multi-interface Wireless Mesh Networks*” [27] que utiliza uma adaptação do protocolo AODV para disseminar as métricas de balanceamento de carga e do gargalo em toda a rede. As mensagens RREQ têm por finalidade atualizar as tabelas de rotas com informações sobre as cargas de dados utilizadas em cada canal dos enlaces. As mensagens de RREP são utilizadas para atualizar as tabelas com os caminhos, quando o destino é encontrado, determinando quais enlaces e canais serão utilizados entre os vizinhos para a rota. Esse tipo de abordagem, apesar de tentar otimizar o meio de transmissão, cria uma sobrecarga de pacotes de controle que irá reduzir a eficiência da rede, além disso o controle da quantidade de saltos realizado para se atingir um determinado *gateway* pode prejudicar o atraso dos pacote e a quantidade de pacotes entregues pois aumenta a contenção e o gargalo na rede.

Alwan e Nuha apresentaram o trabalho intitulado “*Performance Analysis of Dijkstra-Based Weighted Sum Minimization Routing Algorithm for Wireless Mesh Networks*” [6] em que mostram a análise e o desenvolvimento de um método de otimização multiobjetivo para realizar o roteamento em RMSF utilizando o algoritmo Dijkstra e a soma ponderada entre os objetivos (atraso e capacidade do enlace) para determinar as rotas na rede. O método demonstrado se aplica somente a objetivos com comportamento linear restringindo a utilização de outras métricas para determinação das rotas. Os resultados obtidos poderiam ser melhor analisados em ambientes mais realistas, para uma melhor análise dos objetivos, por exemplo o atraso na entrega de pacotes pode ser consequência

de várias situações, como a interferência, quantidade de salto, tempo de processamento, etc.

Na proposta “*A Multi-objective Routing Algorithm for Wireless Mesh Network in a Smart Cities Environment*” [35] é apresentada uma formulação matemática para o problema de roteamento multiobjetivo em RMSF híbrida para cenários de cidades inteligentes, onde há grande variedade de dispositivos como por exemplo roteadores, telefones celulares, sensores, notebooks, etc. dessa forma, restrições são empregadas para, principalmente, manter QoS. Para isso a abordagem estipula quatro objetivos a serem otimizados: quantidade de saltos, atraso, perda de pacotes e consumo de energia, o consumo de energia não é uma preocupação comum em RMSF visto que na maioria dos casos não possui uma restrição energética forte. O modelo matemático é resolvido com uma abordagem evolutiva: *Strength Pareto Evolutionary Algorithm (SPEA)* de forma distribuída, já que cada nó pode calcular sua própria rota (nó de origem) para qualquer outro nó (nó destino) seguindo o modelo matemático. Todos os testes foram realizados de forma numérica sem o uso de um simulador ou *testbed* para validar as definições feitas pela abordagem. Por exemplo, para determinar o atraso na entrega dos pacotes foi atribuído um valor de atraso sobre cada enlace, porém, em cenários mais realistas esse valor não é estático. Já a função que modela a taxa de perda em um enlace é determinada por um fator calculado usando a distância entre os dispositivos, que compõe o enlace, para estabelecer a força do sinal no nó receptor.

Gálvez e Ruiz apresentam o trabalho “*Efficient Rate Allocation, Routing and Channel Assignment in Wireless Mesh Networks Supporting Dynamic Traffic Flows*” [25] em que desenvolveram a heurística “*Joint Routing, Channel Assignment and Rate allocation (JRCAR)*” em que são combinados os problemas de roteamento e a atribuição de canais em redes sem fio com múltiplos rádios e múltiplos canais. O objetivo do trabalho é equilibrar o tráfego instantâneo na rede através da distribuição dos fluxos, otimizando a atribuição dos canais dos enlaces para alcançar a equidade da carga na rede. Essa abordagem não considera a qualidade do enlaces em sua abordagem e todos os testes foram realizados sobre um único tipo de tráfego simples e não muito realista (isto é, só aplicação TCP).

Mello *et al.* apresenta uma heurística no trabalho: “*Improving Load Balancing, Path Length, and Stability in Low-Cost Wireless Backhauls*” [19] para realizar uma otimização bi-objetivo em que são selecionadas rotas com caminhos curtos e que mantenham o menor gargalo na rede procurando deixar o roteamento sempre o mais estável evitando troca de rotas desnecessárias. A abordagem de roteamento é então combinada a um algoritmo de atribuição de canais para melhorar a eficiência da rede. Essa abordagem é aplicada sobre *backhauls* sem fio de baixo custo como por exemplo uma RMSF. A abordagem em questão não leva em consideração que o cenário onde essas redes se encontram

é influenciado por fenômenos físicos naturais como interferência e desvanecimento do sinal, e que mesmo a rede tendo sua carga balanceada não é suficiente para fornecer um bom desempenho principalmente pelo fato dos enlaces sem fio estarem sujeitos a sofrerem degradação da qualidade do seu sinal em algumas regiões da rede.

### 3.2.1 Comparação entre os Trabalhos

A Tabela 3.1 apresenta uma comparação de como o problema de roteamento para RMSF é abordado entre os trabalhos relacionados.

Os campos da Tabela 3.1 descrevem os seguintes aspectos:

- **Modelo:** A abordagem proposta descreve um modelo matemático formal para o problema de roteamento.
- **Quantidade de saltos:** Se na abordagem a quantidade de saltos realizados pelas rotas é levado em consideração.
- **Qualidade dos enlaces:** Se no trabalho a qualidade dos enlaces de comunicação são utilizados para determinar as rotas.
- **Balanceamento:** Se no trabalho apresentado o balanceamento de carga é aplicado.
- **Tráfego:** Se no trabalho apresentado a abordagem utiliza tráfego com distintas aplicações (fluxos com diferentes taxas de dados).
- **Tipo de Abordagem:** Se a abordagem é executada de forma centralizada, distribuída ou híbrida.

A Tabela 3.1 mostra que mesmo nos cenários das RMSF existem poucos trabalhos que apresentam um modelo matemático para representar o problema de roteamento em rede sem fio, poucas abordagens que utilizam mais do que dois objetivos para determinar as rotas e a existência de poucas abordagens que analisem como os algoritmos se comportam quando o tráfego presente na rede tem características diferentes. Visto essas limitações dos trabalhos relacionados, será proposto uma solução de roteamento (modelo matemático e algoritmo) voltada para RMSF que procure levar em conta essas limitações/carências. Além do mais, com o intuito de possibilitar a evolução das soluções de roteamento de redes sem fio, principalmente para suportar as especificações e o grande consumo dos recursos da rede gerado pela IoT, que irá possuir uma infinidade de aplicações cada uma com um perfil de tráfego diferente.



**Tabela 3.1:** Comparação entre os trabalhos relacionados.

| <b>Trabalho Relacionado</b>  | <b>Modelo</b> | <b>Saltos</b> | <b>Qualidade</b> | <b>Balanciamento</b> | <b>Tráfego</b> | <b>Tipo de Abordagem</b> |
|--|---------------|---------------|------------------|----------------------|----------------|--------------------------|
| <i>Source-Based Routing in Wireless Mesh Networks</i> [13]   | não           | não           | sim              | sim                  | simples        | Centralizada             |
| <i>Quality of Experience-based Routing in Multi-Service Wireless Mesh Networks</i> [43]  | não           | sim           | sim              | não                  | misto          | Centralizada             |
| <i>An adaptive load-aware routing algorithm for multi-interface wireless mesh networks</i> [27]                                  | não           | não           | não              | sim                  | simples        | Distribuída              |
| <i>Performance Analysis of Dijkstra-Based Weighted Sum Minimization Routing Algorithm for Wireless Mesh Networks</i> [6]         | não           | sim           | sim              | não                  | simples        | Centralizada             |
| <i>A Multi-objective Routing Algorithm for Wireless Mesh Network in a Smart Cities Environment</i> [35]                          | sim           | sim           | sim              | não                  | simples        | Distribuída              |
| <i>Efficient rate allocation, routing and channel assignment in wireless mesh networks supporting dynamic traffic flows</i> [25] | sim           | sim           | não              | sim                  | simples        | Centralizada             |
| <i>Improving load balancing, path length, and stability in low-cost wireless backhubs</i> [19]                                   | sim           | sim           | não              | sim                  | misto          | Centralizada             |

### 3.3 Adaptação de um Modelo de Otimização Multiobjetivo para Roteamento em RMSF

A RMSF apresenta algumas diferenças em suas restrições quando comparadas a uma RSSF, por exemplo, as fortes limitações de consumo energético dos dispositivos que formam a RSSF não são aplicadas a RMSF. Assim, para obter o desempenho aceitável através do processo de roteamento a modelagem apresentada no Capítulo 2 deve ser adaptada para se adequar ao cenário estabelecido pela RMSF.

A modelagem apresenta os seguintes objetivos: quantidade de saltos, quantidade de enlaces com boa qualidade e balanceamento da rede. Desses três objetivos apenas a quantidade de saltos se mantém comum aos dois cenários (RSSF e RMSF). As métricas de qualidade do enlace e o balanceamento são dependentes da tecnologia utilizada pelos dispositivos que formam o *backbone* da RMSF, por exemplo o emprego de vários canais com múltiplas interfaces de rádios influenciam na capacidade de transmissão dos enlaces e na geração de interferência interna da rede.

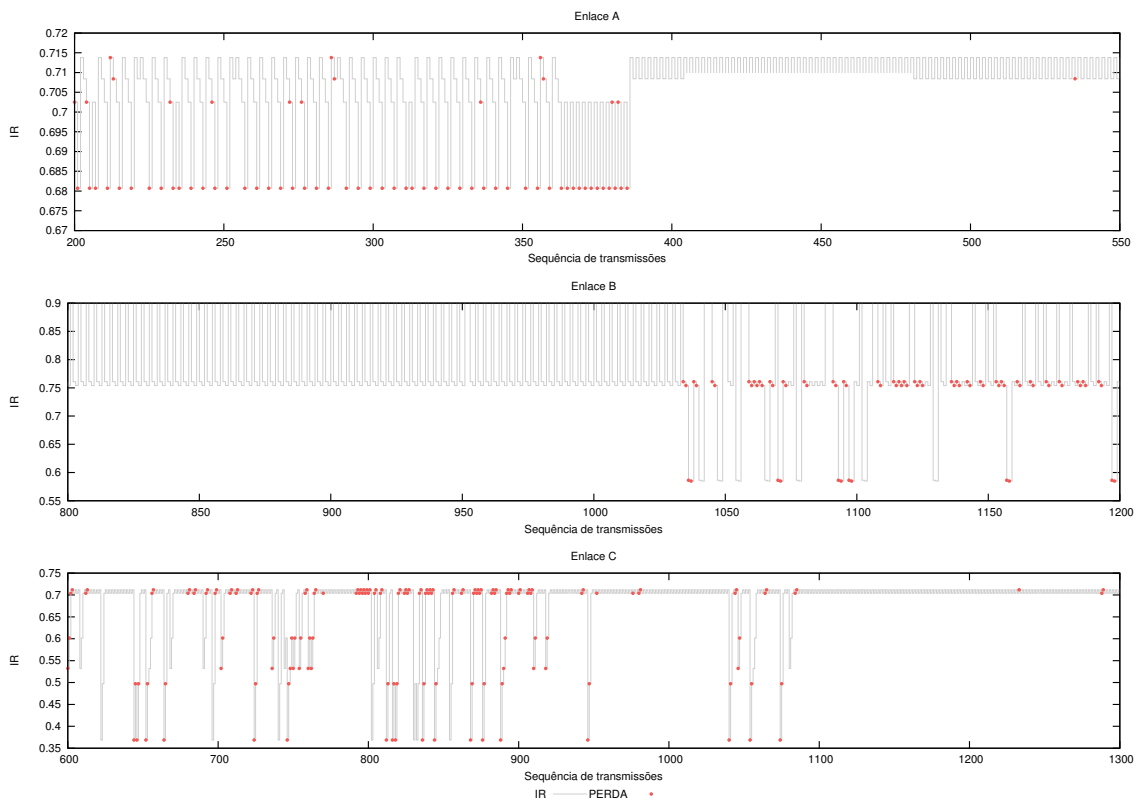
#### 3.3.1 Enlaces com baixa qualidade

A RMSF, como qualquer rede sem fio incluindo a RSSF, tem o desempenho impactado pela interferência gerada entre os canais utilizados pelos dispositivos e/ou por interferências geradas por fontes externas à rede. A camada física, descrita pelo padrão IEEE 802.11 apresenta uma métrica que pode ser utilizada para mensurar a qualidade de transmissão de um enlace sem fio [29]. Uma transmissão com origem em um nó para qualquer outro nó vizinho é bem sucedida somente se a relação sinal interferência e ruído (SINR) recebida pelo nó receptor for acima de um determinado limiar. O valor do SINR é utilizado como base para a obtenção da métrica de qualidade IR (*Interference Ratio*) [13] em que os valores estão representados entre o intervalo de 0 a 1. O IR é obtido através da relação entre o valor do SINR e a SNR (interferência máxima tolerável) para o nó receptor.

O IR será utilizado como métrica de qualidade para a RMSF como alternativa ao LQI utilizado pela RSSF. Na Figura 3.2, é apresentado a variação dos valores do IR de três enlaces de comunicação distintos, durante a realização de uma simulação utilizando o padrão IEEE 802.11n na faixa de 5Ghz de uma rede composta por 10 roteadores em malha, em que todos os enlaces estão utilizando o mesmo canal. Cada ponto marcado em vermelho no gráfico indica a perda de dados de uma das seqüências de transmissões realizadas com determinado valor de IR (linha cinza representa o valor absoluto do IR).

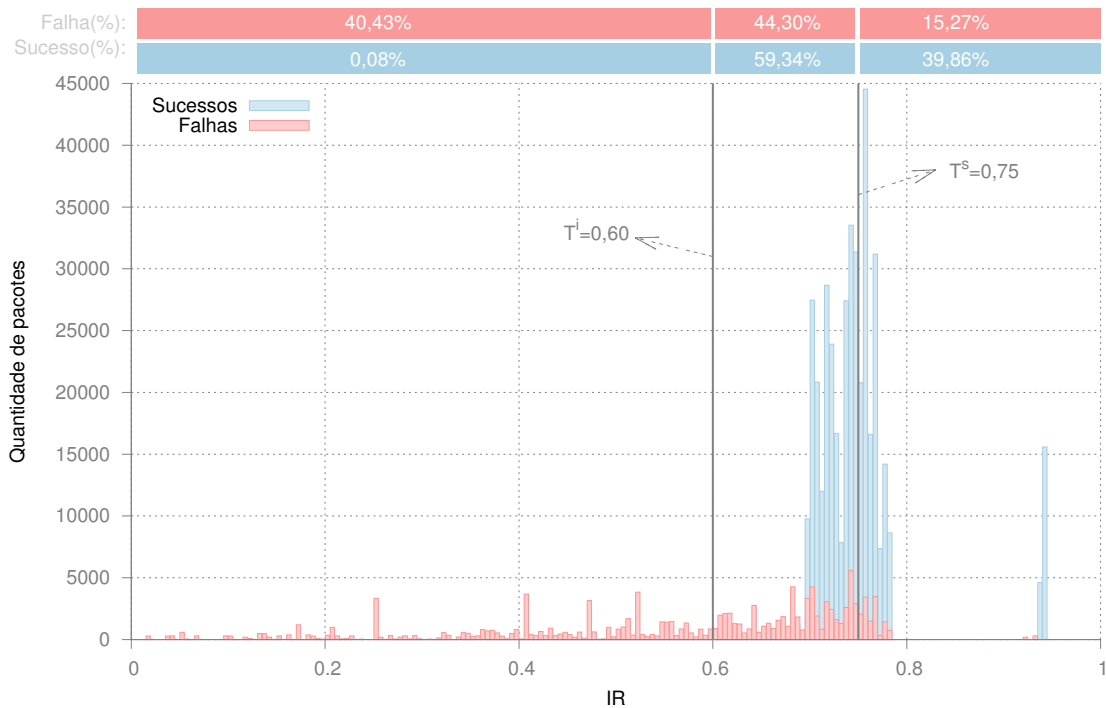
Ao avaliar a variação do IR durante a simulação percebe-se que quando o IR apresenta um valor baixo raramente a transmissão é finalizada com sucesso, como visto

no gráfico do enlace C na Figura 3.2, onde raramente quando o valor do IR é inferior a 0,5 resulta em uma transmissão bem sucedida. Por outro lado, quando o IR apresenta valor um pouco mais elevado (dentro do intervalo 0,70 a 0,78 por exemplo) nota-se que existe uma oscilação entre transmissões bem sucedidas e transmissões mal sucedidas, como observado no enlace A, em que a maior parte das transmissões são bem sucedidas, e no enlace B onde uma quantidade considerável de falhas ocorre. Já quando o valor do IR se aproxima de 1 menor se tornar a ocorrência de falhas nas transmissões.



**Figura 3.2:** Exemplos da variação IR.

A variação do IR sugere a existência de intervalos na qual se é possível classificar os enlaces de acordo com a sua qualidade. Para realizar essa classificação dos enlaces foi realizado um estudo empírico utilizando um conjunto de simulações (5 topologias com 6 repetições). Dessa forma, foi estipulado dois limiares  $T^i$  e  $T^s$  para dividir os enlaces de acordo com o valor do IR obtido, o limiar  $T^i$  limita a maior parte dos valores do IR, sendo responsável por separar os valores do IR onde praticamente não existe sucesso ao realizar uma transmissão. Já o limiar  $T^s$  é responsável por dividir os valores do IR onde a maior parte das transmissões resultam em sucessos. A Figura 3.3 mostra a quantidade de falhas e sucessos relacionadas ao valor do IR e os limiares  $T^i$  e  $T^s$ .



**Figura 3.3:** Histograma dos sucessos e falhas de transmissão de acordo com a qualidade do enlace.

Os valores dos limiares  $T^i$  e  $T^s$  foram estabelecidos em 0,60 e 0,75 respectivamente, dessa forma, ao realizar uma transmissão a maior parte das falhas ocorrem quando o valor de IR é inferior a 0,75 ( $IR < T^s$ ), com isso 15,27% das tentativas de transmissão que falharam ocorrem quando o valor do IR é superior a 0,75 ( $IR > T^s$ ) e 84,73% (40,43%+44,30%) das perdas estão associadas a valores de IR inferiores a 0,75. Já com o valor de  $T^i$  estipulado em 0,60 se têm 40,43% das transmissões que falharam e 0,08% das transmissões realizadas com sucesso, quando o valor do IR foi inferior ao valor de  $T^i$ .

Então, para realizar a classificação dos enlaces é estabelecido as seguintes condições: quando um enlace possuir um valor de IR que seja maior ao limiar superior  $T^s$  será considerado como um enlace de boa qualidade, qualquer o valor do IR for menor ao limiar inferior  $T^i$  o enlace será considerado como um de péssima qualidade. Já quando o valor do IR estiver entre os limiares  $T^i$  e  $T^s$  o enlace será considerado como uma qualidade intermediária.

A variável  $l_{sd}$  que é utilizada pela função objetivo que minimiza a quantidade de enlaces com baixa qualidade (2-6) e deve possuir valor igual a zero para representar enlaces com boa qualidade, dessa forma, enlaces com boa qualidade não acrescentam valor ao custo da função objetivo caso o enlace seja utilizado. Já quando um enlace não possui qualidade o valor de  $l_{sd}$  deve ser maior que zero e menor ou igual a 1 (que representa um enlace com péssima qualidade).

A variável  $l_{sd}$  então é responsável por armazenar o valor normalizado do IR, representado pela variável  $ir_{sd}$ , que irá indicar a qualidade do enlace entre o nó  $s$  de

origem e o nó  $d$  de destino de acordo com a equação 3-1. Com os dois limiares ( $T^s$  e  $T^i$ ) os valor do IR para os enlaces de comunicação são divididos em três faixas de valores, observando que existe um grande faixa dos valores de IR ( $ir_{sd} < T^i$ ) onde não ocorre sucesso nas transmissões realizadas, conforme visto na figura 3.3.

$$l_{sd} = \begin{cases} 0, & ir_{sd} \geq T^s \\ 1 - \left(\frac{ir_{sd} - T^i}{T^s - T^i}\right), & (T^s > ir_{sd} > T^i) \\ 1, & ir_{sd} \leq T^i \end{cases} \quad (3-1)$$

De acordo com a equação 3-1 o valor da variável  $l_{sd}$ , será igual a 0 se o enlace for considerado de boa qualidade (ou seja,  $ir_{sd} \geq T^s$ ). 1 caso o enlace seja classificado como um enlace de péssima qualidade (ou seja,  $ir_{sd} \leq T^i$ ). E entre o intervalo 0 (qualidade relativamente boa) e 1 (qualidade relativamente ruim) para representar níveis intermediários de qualidade.

Na Figura 3.3, 44,3% das falhas e 59,34% dos sucessos ocorrem quando o valor do IR situa-se entre os limites  $T^i$  e  $T^s$ , ou seja, utilizando enlaces com níveis intermediários de qualidade. A equação 3-1 atribui o valor da variável  $l_{sd}$  nesse intervalo próximo a 0 quando o valor do IR se aproxima do valor de  $T^s$ , que é a região onde acontece o maior número de sucessos de transmissão, e próximo de 1 quando o valor do IR se aproxima do valor de  $T^i$ , região onde não existe, ou existe poucas, tentativas que resultaram em sucessos ao tentar realizar uma transmissão.

A qualidade dos enlaces em uma rede sem fio está associada ao uso do meio de comunicação. Em redes em que a faixa de espectro é mais utilizada, como por exemplos as redes wi-fi que utilizam a banda de 2.4Ghz, se encontra uma grande diversidade de tecnologias que enviam dados utilizando os canais dessa frequência, o que degrada a qualidade do sinal. Uma solução atualmente bastante empregada para tentar diminuir o impacto da competição pela banda é a utilização da banda de 5Ghz que ainda não é muito utilizada e tem maior quantidade de canais (12 canais ortogonais) para serem utilizados, porém isso não resolve completamente o problema da qualidade dos enlaces já que com o aumento de dispositivos (*smartphones* e pontos de acesso IEEE 802.11n e 802.11ac), provocado principalmente pela IoT, existe também a possibilidade dessa faixa de frequência também sofrer com os mesmos problemas de superpovoamento como as que são encontradas na banda 2.4Ghz.

### 3.3.2 Balanceamento da rede

A utilização de múltiplos canais de comunicação beneficia a distribuição de carga entre os enlaces já que alivia o total de dados que utilizam o meio de comunicação. Cada

enlace possui uma capacidade máxima de recurso que pode ser utilizada pela rede antes de começar a gerar problema de gargalo (como o descarte de pacotes). Inicialmente, no Capítulo 2, uma simples contagem da quantidade de fluxos que utilizam um determinado enlace era suficiente para equilibrar a distribuição dos dados sobre a rede já que no cenário para a RSSF os fluxos gerados pela aplicação possuíam carga de dados similares em todos os nós, apresentando sempre a mesma taxa de envio e as mesmas restrições quanto a taxa de perdas, latência, etc.

Um dos principais requisitos das redes, especialmente no paradigma de IoT, é o fornecimento do meio de comunicação para os mais diversos tipos de aplicações, possibilitando a geração de tráfego misto sobre a rede. Diferentemente do cenário descrito no Capítulo 2, em que existe somente um único tipo de tráfego, a RMSF deve oferecer variados níveis de qualidade de serviço (QoS) para os diferentes tipos de tráfegos (dados, voz, vídeo), o que demanda maior capacidade de transmissão. Por causa dessa característica a função objetivo referente ao balanceamento deve levar em consideração os aspectos de cada tipo de tráfego, pois aplicações que tenham taxas de geração de dados maiores são responsáveis pelo alto consumo dos recursos dos dispositivos presentes na rede e não podem ser equiparadas à aplicações cujas taxas de geração de dados são consideravelmente inferiores.

Ao utilizar uma RMSF é possível realizar a atribuição de canais entre os diferentes rádios que possam existir nos dispositivos, melhorando assim o tráfego de dados e a contenção na rede. Então, antes de modelar o objetivo que reflita essas características da rede é necessário determinar algumas variáveis, utilizando a nomenclatura já apresentada na Seção 2.4:

$C_s$  — Conjunto de canais atribuído aos enlaces adjacentes ao nó  $s$ .

$c_{sd}$  — Canal utilizado pelo enlace  $e_{sd}$ .

$F_{sd}$  — Conjunto de fluxos que utiliza o enlace  $e_{sd}$ .

$T^f$  — Taxa do fluxo  $f \in F_{sd}$ .

Assim, podemos determinar a nossa função objetivo para o gargalo que minimize a maior soma das taxas de dados utilizadas por um canal de um nó da rede. A equação que representa esse objetivo é construída da seguinte forma:

$$\text{Minimizar} \quad \left\{ \left[ \max \left( \left\{ \sum_{d \in V} \sum_{\{f \in F_{sd} \mid c_{sd}=c\}} T^f \right\}, \forall c \in C_s \right) \right], \forall s \in V \right\} \quad (3-2)$$

### 3.3.3 Modelo multiobjetivo

Dessa forma todas as restrições apresentadas no modelo de otimização descrito na Seção 2.4 podem ser mantidas. As atualizações do modelo são realizadas através da

alteração da métrica de qualidade utilizada pela função objetivo (2-6), que passa a utilizar o IR, e a substituição da função objetivo de balanceamento (2-7) pela equação (3-2). Mesmo com essas atualizações o conflito entre todos os objetivos (número de saltos, qualidade dos enlaces e gargalo da rede) se mantém.

$$\begin{aligned}
 & \text{Minimizar} \quad \left\{ \sum_{e_{sd} \in E} a_{sd} \right\} \\
 & \text{Minimizar} \quad \left\{ \sum_{e_{sd} \in E} l_{sd} \cdot a_{sd} \right\} \\
 & \text{Minimizar} \quad \left\{ \left[ \max \left( \left\{ \sum_{d \in V} \sum_{\{f \in F_{sd} \mid c_{sd}=c\}} T^f \right\}, \forall c \in C_s \right) \right], \forall s \in V \right\} \\
 & \text{Sujeito a:} \\
 & \quad \sum_{d \in V} a_{vd} - \sum_{d \in V} a_{dv} = 1, \forall v \in V, v \neq i \\
 & \quad \sum_{s \in V} a_{si} = |F|, i = \text{sink} \\
 & \quad a_{sd} \geq 0
 \end{aligned}$$

### 3.4 Routing Aware of path Length, Link quality, and traffic Load Weighed — RALLW

Nesta seção são descritas as principais diferenças entre os Algoritmos RALLW e RALL. O RALLW apresenta algumas simplificações nos seus procedimentos por aproveitar melhor as estruturas de dados responsáveis por armazenar as informações dos fluxos de tráfego misto. Posteriormente é exibido o comportamento do RALLW ao ter a atribuição de diferentes pesos para as funções objetivos na determinação das rotas para os fluxos. A estrutura principal apresentada pelo Algoritmo 2.1 (RALL) basicamente se mantém, por implementar a ideia básica do algoritmo. O algoritmo é executado de forma centralizada em uma entidade que possui uma visão global da rede e apresenta basicamente a mesma sequência de atividades apresentadas na Figura 2.3.

A alteração mais importante presente no RALLW é a junção entre os dois procedimentos que executam a soma ponderada (linha 2 do Algoritmo 2.1) e a atualização das arestas (linha 7 no Algoritmo 2.1). A outra modificação do algoritmo inicial é a remoção do parâmetro de entrada  $O_f$  que representa um conjunto ordenado de fluxos para geração das rotas: no Algoritmo 3.1 (RALLW) as rotas para os nós serão determinadas de acordo com o surgimento do fluxo na rede, e cada nó estabelece qual tipo de fluxo terá a rota determinado primeiro.

---

**Algoritmo 3.1:** RALLW – Routing Aware of path Length, Link quality, and traffic Load Weighed
 

---

```

Algoritmo: RALLW ()
  Entrada:
     $G - (V, E)$ 
     $i - sink, i \in V$ 
     $w_p, w_l, w_b$  – peso das funções objetivos
  1 início
  2    $P \leftarrow \emptyset;$ 
  3   para cada  $f_s \in F$  faça
  4     AtualizarValoresArestas ( $w_p, w_l, w_b$ );
  5      $p_s \leftarrow \text{MCPath}(s, i, G < V, E >);$ 
  6      $P \leftarrow P \cup \{p_s\};$ 
  7   fim
  8   retorna  $P;$ 
  9 fim

Função: AtualizarValoresArestas ( $w_p, w_l, w_b$ )
  Entrada:
     $E$  – Conjunto de arestas
     $C_s$  – Conjunto de canais atribuídos aos enlaces adjacentes ao nó  $s$ 
     $T_x$  – Total da taxa de dados gerados sobre a rede
     $F$  – Matriz de fluxos,  $F_{ij}$  retorna o conjunto de fluxo sobre o enlace  $e_{ij}$ 
     $T^f$  – Taxa de dados para o fluxo  $f$ 
  10 início
  11   para cada  $e_{sd} \in E$  faça
  12      $cargaAresta \leftarrow 0.0$ 
  13      $S_{adj} \leftarrow \{\text{arestas adjacentes ao nó } s\}$ 
  14     para cada  $i_{sr} \in S_{adj}$  faça
  15        $cargaAresta \leftarrow \sum_{f \in F_{sr}} T^f \mid c_{sr} = c_{sd}, \{c_{sr}, c_{sd}\} \in C_s$ 
  16     fim
  17      $cargaAresta \leftarrow \frac{cargaAresta}{T_x}$ 
  18      $val(e_{sd}) \leftarrow (w_p \cdot 1) + (w_l \cdot l_{sd}) + (w_b \cdot cargaAresta)$ 
  19   fim
  20 fim

```

---

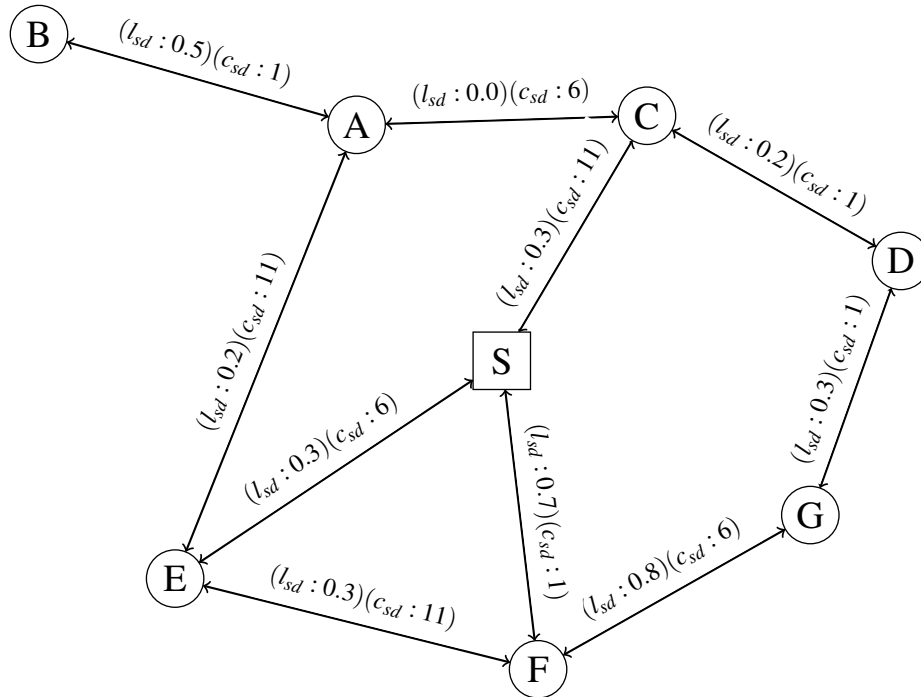
O RALL, apresentado no Capítulo 2, inicialmente realiza a soma ponderada entre as funções objetivos de qualidade (2-6) e quantidade de saltos (2-1), armazenando o valor resultante da soma ponderada em uma estrutura auxiliar, assim, a cada geração de uma nova rota o valor resultante da soma ponderada era recuperado e somado ao valor da quantidade de fluxos que utiliza determinado enlace. Como o objetivo do RALL é determinar rotas para um único perfil de tráfego, não é necessária a alteração do valor gerado pela soma ponderada. Essa abordagem quando é empregada sobre uma rede com tráfego misto, como a RMSF, precisa ser modificada para que a combinação das funções objetivos possam se adequar aos requisitos de cada tipo de tráfego.

O objetivo para minimização da quantidade de saltos realizados por um caminho tende a reduzir o atraso fim-a-fim dos pacotes, porém podem estar sujeitos a um nível elevado de interferência o que aumenta a taxa de perda dos pacotes, uma vez que a



interferência prejudica a qualidade dos enlaces além de, também, aumentar o atraso fim-a-fim dos pacotes por causa da quantidade de retransmissão efetuadas pelas tentativas de enviar os pacotes, por isso a necessidade de minimizar a quantidade de enlaces com baixa qualidade. Já a distribuição dos fluxos de forma balanceada aumenta a vazão dos dados e contribui para a entrega de pacotes já que distribui o consumo dos recursos pelos dispositivos da rede, evitando, por exemplo, que dados sejam descartados por falta de espaço na fila de processamento, como também o atraso fim a fim. Por outro lado, uma rede balanceada pode causar um considerável aumento no tamanho das rotas, impactando no tempo de atraso fim-a-fim.

Sendo assim, o Algoritmo 3.1 (RALLW), antes de determinar uma nova rota, executa a função  $AtualizarValoresArestas(w_p, w_l, w_b)$  como é mostrado nas linhas 4 e 5. Dessa forma, é possível alterar os valores das variáveis  $w_p, w_l, w_b$ , que representam os pesos das funções objetivos de quantidade de saltos, qualidade dos enlaces e balanceamento, respectivamente, antes que a rota para o novo fluxo seja gerada. Na função  $AtualizarValoresArestas(w_p, w_l, w_b)$ , o trecho de código das linhas 12 a 17 é responsável por calcular o valor da função objetivo de balanceamento (3-2). Logo em seguida esse valor é normalizado utilizando a relação entre a quantidade de dados que utilizam um determinado canal pela quantidade máxima de dados gerada na rede (linha 17), para manter o valor da função de balanceamento na mesma grandeza que os demais objetivo sem perder a representatividade da utilização da banda do enlaces. Por fim é realizada a soma ponderada (linha 18) e o valor da aresta em questão é atualizado, ficando pronta para ser utilizada pela função que descobre o caminho com menor custo, representada pela chamada à função  $MCPath(s, i, G < V, E >)$ , linha 5.



**Figura 3.4:** Exemplo topologia de uma RMSF.

A cada iteração do RALLW uma rota é gerada para um determinado tipo de fluxo. A Tabela 3.3 mostra os passos para a determinação das rotas da RMSF representada pela Figura 3.4. Supondo que a ordem de origem dos fluxos dos dispositivos da rede seja dada por  $F = \{D, C, A, E, B\}$  e que cada dispositivo irá gerar dois tipos de fluxo  $f^1$  e  $f^2$ . A aplicação que gera o fluxo  $f^1$  tem uma taxa de transmissão de  $256kbps$  e teve os pesos atribuídos como  $w_l = 0,6$ ,  $w_p = 0,2$  e  $w_b = 0,2$ . Já a aplicação que gera o fluxo  $f^2$  tem uma taxa de transmissão de  $1024kbps$  e os pesos atribuídos da seguinte maneira  $w_l = 0,2$ ,  $w_p = 0,2$  e  $w_b = 0,6$ . Dada a ordem  $F$  dos dispositivos, para cada um dos nós é dada uma prioridade para geração das rotas entre os fluxos originados nesse nó, como é mostrado no exemplo da Tabela 3.3, onde inicialmente, para cada nó, é gerada a rota para o fluxo de  $256kbps$  e logo em seguida para o fluxo com taxa igual a  $1024kbps$ .

Para cada sequência de passos, a Tabela 3.3 mostra a carga de dados em cada aresta utilizada por um ou mais fluxos. Somando todas as cargas dos fluxos que utilizam determinado enlace, os valores são incrementados a medida que novas rotas são geradas. O campo do custo apresenta o valor do caminho selecionado para o fluxo  $f_s^x$ , em que  $s$  é a origem e  $x$  o tipo do fluxo.

A nona e a décima sequências de passos demonstram a diferença entre o roteamento para cada tipo de fluxo: o fluxo  $f_b^1$  tem preferência por caminhos que apresentam melhores indicativos de qualidade, por apresentar peso mais elevado para a função objetivo de qualidade dos enlaces ( $w_l$ ). Já para o fluxo  $f_b^2$ , um caminho que distribua a carga de dados de forma balanceada sobre a rede foi selecionado. Dessa forma,

caminhos distintos são selecionados para cada um dos fluxos, mesmo eles apresentando a mesma origem (isto é, nó *B*).

**Tabela 3.3:** Sequência de execução RALLW.

| Seq.            | Fluxo   | Taxa     | Caminho selecionado                                   | Custo | Carga de dados nas arestas   |
|-----------------|---------|----------|---|-------|--|
| 1 <sup>a</sup>  | $f_d^1$ | 256kbps  | $(D) \rightarrow (C) \rightarrow (S)$                 | 0,70  | $(D) \rightarrow (C) = 256kbps$<br>$(C) \rightarrow (S) = 256kbps$   |
| 2 <sup>a</sup>  | $f_d^2$ | 1024kbps | $(D) \rightarrow (C) \rightarrow (S)$                 | 0,548 | $(D) \rightarrow (C) = 1280kbps$<br>$(C) \rightarrow (S) = 1280kbps$   |
| 3 <sup>a</sup>  | $f_c^1$ | 256kbps  | $(C) \rightarrow (S)$                                 | 0,50  | $(D) \rightarrow (C) = 1280kbps$<br>$(C) \rightarrow (S) = 1536kbps$   |
| 4 <sup>a</sup>  | $f_c^2$ | 1024kbps | $(C) \rightarrow (S)$                                 | 0,404 | $(D) \rightarrow (C) = 1280kbps$<br>$(C) \rightarrow (S) = 2560kbps$   |
| 5 <sup>a</sup>  | $f_a^1$ | 256kbps  | $(A) \rightarrow (C) \rightarrow (S)$                 | 0,66  | $(A) \rightarrow (C) = 256kbps$<br>$(D) \rightarrow (C) = 1280kbps$<br>$(C) \rightarrow (S) = 2816kbps$  |
| 6 <sup>a</sup>  | $f_a^2$ | 1024kbps | $(A) \rightarrow (C) \rightarrow (S)$                 | 0,676 | $(A) \rightarrow (C) = 1280kbps$<br>$(D) \rightarrow (C) = 1280kbps$<br>$(C) \rightarrow (S) = 3840kbps$   |
| 7 <sup>a</sup>  | $f_e^1$ | 256kbps  | $(E) \rightarrow (S)$                                 | 0,38  | $(E) \rightarrow (S) = 256kbps$<br>$(A) \rightarrow (C) = 1280kbps$<br>$(D) \rightarrow (C) = 1280kbps$<br>$(C) \rightarrow (S) = 3840kbps$  |
| 8 <sup>a</sup>  | $f_e^2$ | 1024kbps | $(E) \rightarrow (S)$                                 | 0,284 | $(E) \rightarrow (S) = 1280kbps$<br>$(A) \rightarrow (C) = 1280kbps$<br>$(D) \rightarrow (C) = 1280kbps$<br>$(C) \rightarrow (S) = 3840kbps$   |
| 9 <sup>a</sup>  | $f_b^1$ | 256kbps  | $(B) \rightarrow (A) \rightarrow (C) \rightarrow (S)$ | 1,208 | $(B) \rightarrow (A) = 256kbps$<br>$(E) \rightarrow (S) = 1280kbps$<br>$(A) \rightarrow (C) = 1536kbps$<br>$(D) \rightarrow (C) = 1280kbps$<br>$(C) \rightarrow (S) = 4096kbps$                                      |
| 10 <sup>a</sup> | $f_b^2$ | 1024kbps | $(B) \rightarrow (A) \rightarrow (E) \rightarrow (S)$ | 0,944 | $(A) \rightarrow (E) = 1024kbps$<br>$(B) \rightarrow (A) = 1280kbps$<br>$(E) \rightarrow (S) = 2304kbps$<br>$(A) \rightarrow (C) = 1536kbps$<br>$(D) \rightarrow (C) = 1280kbps$<br>$(C) \rightarrow (S) = 4096kbps$ |

### 3.4.1 Análise de complexidade

O algoritmo RALLW apresenta a mesma estrutura básica de repetição apresentada na análise de complexidade realizada no Capítulo 2. Porém, para o algoritmo RALLW cada dispositivo presente na rede deve determinar um caminho para cada tipo de fluxo originado no dispositivo. Dessa forma a quantidade de fluxo que deve ter um caminho determinado é igual a  $(n \cdot f)$ , onde  $f$  é a quantidade de tipos de fluxos e  $n$  é a quantidade de nós presente no grafo. Dessa forma a complexidade para o RALLW é dada por:

$$O(nf[m+n] \cdot \log(n)) =$$

$$O([mnf + n^2f] \cdot \log(n)) =$$

$$O(2mnf \cdot \log(n))$$

## 3.5 Análise dos Resultados do Algoritmo RALLW

A construção do cenário de aplicações, para realizar a análise do comportamento das abordagens sobre uma RMSF, deve possuir principalmente dois aspectos para suportar as características inerentes às aplicações que irão utilizar a rede sem fio:

- A possibilidade de tráfegos com maior capacidade, para suportar a grande variedade de aplicações que possam existir em um contexto de IoT, como por exemplo tráfegos que necessitem de uma maior consumo de banda.
- A possibilidade da geração de interferência interna, geradas pelos próprios nós da rede, e interferência externa à rede, gerada por dispositivos que não fazem parte da rede.

Assim, a configuração de um cenário em que esses dois aspectos estejam presentes é realizada para que a avaliação da solução proposta (RALLW) seja feita em um ambiente mais próximo das características descritas anteriormente. Por essa razão, um sistema de monitoramento de idosos e o simulador de redes ns-3 que possibilita uma modelagem da RMSF (incluindo a geração de interferência interna e externa) são empregados para compor o cenário de aplicação, detalhada na próxima subseção.

### 3.5.1 Cenário de Monitoramento de Idoso Utilizando IoT

O custo com serviços de saúde e bem-estar da população vem aumentando, principalmente em países em que a população possui alta longevidade. Dessa forma, os desafios de se obter serviços com qualidade que atendam, por exemplo a grande população

de idosos, obriga a evolução dos sistemas para acompanhamento e monitoramento da saúde populacional [1]. Um exemplo da evolução dos sistemas de informação para a saúde são os avanços em sistema de monitoramento sem fio portátil [54] que torna mais cômodo, por exemplo, para um idoso permanecer mais tempo em casa sendo monitorado por um sistema portátil. Dentro das aplicações em saúde existem sistemas de monitoramento específicos para determinados problemas de saúde ou para monitoramento preventivo [60, 31].

A grande quantidade de dispositivos portáteis e sensores (acelerômetros, giroscópios, tecidos inteligentes, atuadores, etc.) utilizados nos sistemas de monitoramento geram uma enorme quantidade de dados. Por exemplo, os sensores vestíveis possuem a capacidade de monitorar os sinais vitais de um paciente: electromiograma (EMG), electroencefalograma (EEG), taxa de respiração, sons do coração, glicose no sangue, saturação de oxigênio e temperatura corporal, sendo possível coletar também informações de mobilidade, queda, etc. [16, 54, 60, 1, 48].

Os dispositivos de monitoramento podem ser agrupados de acordo com a finalidade, localização, e formas de monitoramento [16], por exemplo:

- Dispositivos usados pelo indivíduo como acessório (relógios, pulseiras, colares, bandanas).
- Dispositivos implantáveis (câmera de vídeo miniaturizada, medição de pressão gástrica, monitoramento contínuo de glicose).
- Dispositivos ou sistemas multimídia (câmera de vídeo, microfone, celular).
- Dispositivos incorporados como parte da roupa.
- Dispositivos adaptados em objetos, móveis ou no chão de uma casa.

Todos os dispositivos presentes dentro de um sistema de monitoramento devem possuir um meio de comunicação com o centro de monitoramento de saúde que gerencia os serviços de assistência, para encaminhar os dados coletados pelos sensores. Cada aplicação construída sobre um conjunto de dispositivos possui especificações diferentes como a taxa de envio de dados e de latência [34, 54]. Dessa forma, o desempenho da estrutura de comunicação, uma RMSF por exemplo, pode ser analisado quando existe a presença de tráfego misto originado da presença de mais de uma aplicação de monitoramento utilizando a rede para encaminhar os dados em um determinado ambiente.

A arquitetura de comunicação para os serviços de saúde em geral são divididas em três níveis, o primeiro nível é composto por uma rede de sensores que está diretamente relacionada ao indivíduo monitorado, esse tipo de rede foi abordada no Capítulo 2. O segundo e terceiro níveis são responsáveis pelo envio das informações dos sensores até o centro de monitoramento, podem ser estruturados utilizando uma RMSF e têm como finalidade estabelecer uma conexão entre o nó *sink* de uma RSSF, assim todo o tráfego

da RSSF ou de um dispositivo específico (vídeo, microfone, PDA) é encaminhado pelos roteadores de malha à equipe médica ou centro de monitoramento [1, 28]. O sistema de informações para saúde tem vários requisitos críticos que devem ser considerados, como a entrega confiável de dados, privacidade, tempo de resposta dos sistemas, etc. [28]. A rede de comunicação deve fornecer restrições suficientes para atender a esses requisitos, para isso é necessário que os enlaces possuam capacidade de transferência suficiente para garantir o envio das informações geradas e que esses envios sejam realizados por meios que possuam qualidade para melhorar a eficiência.

Uma aplicação para um sistema de saúde pode envolver então um conjunto de dispositivos, cada um com propósito e restrições específicas e sendo responsável por gerar um fluxo de dados na rede. Por exemplo, um sistema para monitoramento de idosos pode ser formado por duas aplicações: uma aplicação de monitoramento de quedas usando gerando classes de fluxos multimídia e uma aplicação de monitoramento de sinais vitais gerando classes de fluxo de dados [60, 31, 16]. Essas duas aplicações podem compartilhar a mesma estrutura da RMSF para enviar seus dados. A aplicação de monitoramento de quedas pode utilizar dispositivos de vídeos como uma câmera RGB que tem uma taxa de geração de dados aproximadamente de 264kbps e um sensor de profundidade [60] que gera fluxo com uma taxa aproximada de 1Mbps, cada um dos dispositivos podendo ser instalados nos dois cômodos mais frequentados pelo idoso (por causa do custo elevado dos sensores de profundidade é utilizado um câmera RGB ao invés de outro sensor). Já a aplicação de monitoramento de sinais vitais utiliza um conjunto de sensores que realizam medições dos sinais de uma paciente. Esse conjunto de sensores pode variar de acordo com o tipo de monitoramento que deve ser feito, porém, a grande maioria desses sensores fica junto ao paciente [54, 1]. Uma aplicação por exemplo pode utilizar três tipos de sensores, cada um sendo responsável por gerar um tipo de fluxo na rede, eletrocardiograma (ECG) com taxa de envio de 3kbps, saturação de oxigênio (SpO2) com taxa de 32kbps e sensor de pressão sanguínea com taxa de 10bps [54, 48].

### 3.5.2 Configuração da RMSF Simulada

Para realizar os testes foi utilizado o simulador ns-3, por possibilitar a simulação de uma RMSF reunindo de forma mais completa características da rede, assim, realizando uma melhor análise do desempenho da abordagem proposta sobre uma RMSF. A Tabela 3.4 mostra os parâmetros gerais usados na simulação.

**Modelo da camada física.** Os modelos de camada física são os principais responsáveis pela modelagem da recepção e a transmissão de pacotes e pelo registro do consumo de energia. O simulador ns-3 disponibiliza, por padrão dois módulos para representar a camada física de dispositivos para redes sem fio: o *YansWifiPhy* [33] e o

*SpectrumWifiPhy* [8].

O modelo *YansWifiPhy* é o padrão adotado pelo ns-3, porém o modelo de interferência, tanto externa como a auto-interferência gerada pelo uso de canais não ortogonais, é simplório, o que limita o uso desse modelo para realizar as simulações de soluções que levem em conta a interferência. O modelo *SpectrumWifiPhy* apresenta uma implementação alternativa para o uso de modelos sem fio no ns-3. O *SpectrumWifiPhy* permite que cenários sejam criados utilizando várias tecnologias que coexistem no mesmo canal, gerando interferência entre os canais de uma mesma banda. Além de fornecer ferramentas capazes de simular interferência externa através da geração de ruídos [8].

A presença de múltiplos rádios possibilita a utilização de múltiplos canais simultaneamente para estabelecer os enlaces da RMSF (a atribuição dos canais para cada enlace contribui para a eficiência da rede). Utilizamos o algoritmo de atribuição de canais proposto por *Gálvez et al.* [25] que utiliza a distância, em saltos, dos dispositivos para o *gateway* e a qualidade dos enlaces para atribuir o canal ao enlace e tem sido empregado em trabalhos relacionados relevantes de RMSF [19, 25].

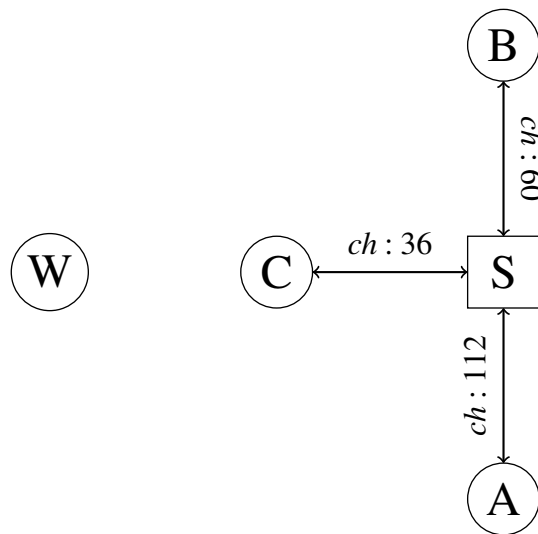
**Tabela 3.4:** Parâmetros de simulação ns-3.

|   |                        |
|---|------------------------|
| Potência de transmissão                   | 22 (dBm)               |
| Limiar de detecção de energia             | -78.0 (dBm)            |
| Limiar de detecção de portadora           | -62.0 (dBm)            |
| Padrão da camada física                   | IEEE 802.11n           |
| Taxa de transmissão                       | 80 Mbps                |
| Faixa do espectro                         | 5 GHz                  |
| RTS/CTS                                   | Desligado              |
| Protocolo MAC                             | Adhoc - CSMA/CA        |
| Número máximo de retransmissões           | 7                      |
| Tempo máximo de permanência fila          | 250ms                  |
| Modelo da camada física                   | <i>SpectrumWifiPhy</i> |
| Área das topologias                       | 400m × 400m            |
| Distância mínima entre nós                | 20m                    |
| Distância máxima entre nós                | 40m                    |
| Quantidade de interfaces de redes sem fio | 3                      |
| Número de nós                             | 10, 20, 30, 40 e 50    |

Utilizando o modelo *SpectrumWifiPhy* é possível adicionar na topologia da rede alguns nós que serão responsáveis pela geração de ondas de interferência nos sinais da rede sem fio, assim, dentro de uma simulação de uma RMSF pode ser adicionada interferência gerada por exemplo de outros *gateways*, por dispositivos móveis, etc. Com

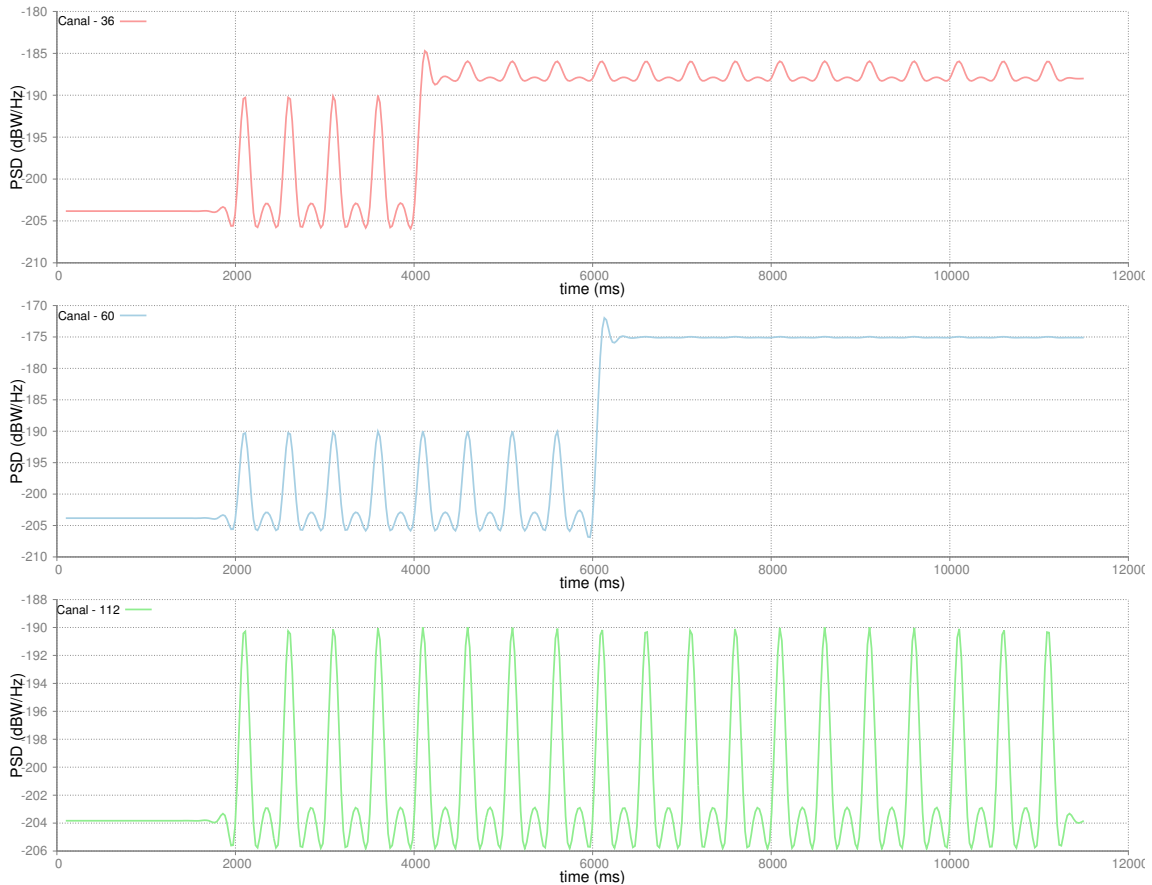


isso, o valor do IR para os enlaces irá apresentar uma grande variação, para suavizar essa oscilação será utilizado a média exponencial móvel do IR ao invés do seu valor absoluto.



**Figura 3.5:** Topologia par análise da potência do sinal de interferência.

A Figura 3.6 demonstra o efeito do uso dos nós geradores de interferência em uma pequena topologia representada pela Figura 3.5. Os nós **A**, **B** e **C** começam a transmitir pacotes com destino ao nó **S** em canais ortogonais (canais 36, 60 e 112 na figura), ou seja, não existe interferência interna por parte desses nós. O nó **W** é o dispositivo responsável por gerar ondas que interferem na transmissão dos dados. O gráfico da Figura 3.6 mostra a potência do sinal em função do tempo, os nós passam a transmitir dados após dois segundos, então quando o tempo da simulação está no intervalo de zero ( $t = 0s$ ) a dois ( $t = 2s$ ) segundos não existe sinal algum na rede. Quando o nó de interferência começa a disseminar suas ondas sobre o canal 36, utilizado pelo nó **C**, no momento  $t = 4s$  é possível perceber que a potência do sinal no canal tem uma súbita elevação provocada pelo nó **W**. Apesar disso, ainda é possível identificar o sinal dos pacotes enviados pelo nó **C**. Já no momento  $t = 6s$ , o nó gerador de interferência começa a gerar interferência sobre o canal 60 com maior potência, o que resulta na perda dos pacotes enviados pelo nó **A**, já que não é mais possível identificar o sinal oriundo do nó transmissor.



**Figura 3.6:** Análise da potência do sinal nos enlaces na presença de um sinal de interferência.

Para cada simulação será analisado o desempenho das abordagens através da mensuração do atraso, perda e vazão. Cada fluxo das aplicações tem restrições para esses parâmetros: a aplicação de monitoramento de quedas que utiliza tráfego multimídia tem restrições inerentes a taxa de perda, sendo desejável que não exista mais do que 20% a 30% de perdas durante o envio dos dados. Já a aplicação de monitoramento de sinais vitais possui restrições de atraso na entrega dos pacotes, sendo desejável não ultrapassar 125ms [54, 48].

Desta forma, as simulações foram realizadas em cenários onde o número de nós variou de 10 a 50 nós (Tabela 3.4) que representa em média a quantidade de dispositivos presente nas aplicações de monitoramento de queda e monitoramento de sinais vitais [54] além da variação da quantidade de nós geradores de interferência de 1 a 5 nós. Para cada configuração da quantidade de nós, dez topologias e quatro sementes aleatórias foram geradas, resultando em um total de 40 simulações para cada conjunto de nós. As posições dos roteadores de malha em cada topologia foram geradas por meio de uma distribuição normal, em uma área limitada para garantir que nenhum dos nós permaneceria isolado da rede (fora do alcance de qualquer outro nó), foi empregado o algoritmo de geração de topologia utilizado por Machado *et al.* [37]. Cada roteador em malha é responsável por

receber os fluxos das duas aplicações exibidas na Tabela 3.5. Todos os fluxos utilizam UDP como protocolo de transporte gerando tráfego misto na rede levando em conta as distintas taxas de geração de dados e parâmetros de desempenho desejável de cada aplicação (QoS).

**Tabela 3.5:** *Resumo do sistema de monitoramento do idoso utilizado nas simulações*

| Aplicação                      | Dispositivo                  | Classe de Fluxos |
|--------------------------------|------------------------------|------------------|
| Monitoramento de quedas        | Câmera RGB                   | 264kbps          |
|                                | Sensor profundidade          | 1024kbps         |
| Monitoramento de sinais vitais | Eletrocardiograma (ECG)      | 3kbps            |
|                                | Saturação de oxigênio (SpO2) | 32kbps           |
|                                | Pressão sanguínea            | 10bps            |

A análise dos resultados foi realizada comparando a abordagem RALLW com outros dois algoritmos de roteamento, a abordagem BPR [19], por apresentar dois objetivos que também são utilizados na abordagem proposta e por ser projetada para RMSF, e o algoritmo RALL [44], que utiliza os três objetivos iguais aos utilizados pela abordagem RALLW, porém, não leva em consideração a existência de tráfego misto na rede. O objetivo de realizar a comparação entre essas abordagens é prover uma análise de desempenho entre a combinação de diferentes critérios de roteamento para a RMSF e como irão se comportar na presença de tráfego misto. Uma das principais causas da falta de eficiência das redes está diretamente ligada com a qualidade do enlaces em que os dados trafegam, por isso a importância de se analisar os resultados em um cenário em que exista variação dos níveis de interferência na rede.

A Tabela 3.6 mostra três combinações de pesos e a preferência entre as aplicações para a abordagem RALLW que serão utilizadas durante as simulações.

Como a aplicação para monitoramento de sinais vitais têm fortes restrições de atraso fim-a-fim dos pacotes, ao realizar a distribuição dos pesos se optou por dar preferência para o peso  $w_p$  que é referente a quantidade de saltos realizados. A combinação RALLW(1) apresenta um valor mediano para o peso referente ao balanceamento  $w_b = 0,30$ , o que pode resultar em caminhos maiores do que os gerados pelas combinações RALLW(2 e 3), que possuem um valor maior para o peso referente a quantidade de saltos (ambas com  $w_p = 0,71$ ) e um menor valor para a função do balanceamento (ambas com  $w_b = 0,12$ ), o que deve favorecer caminhos menores. Todas as combinações estipularam um valor similar para a qualidade dos enlaces.

**Tabela 3.6:** *Combinação dos pesos para três configurações da abordagem RALLW.*

| Aplicação                    | RALLW(1)                         | RALLW(2)                         | RALLW(3)                         |
|------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| Monitoramento sinais vitais: |                                  |                                  |                                  |
| fluxo 10bps:                 | $w_p = 0,50$                     | $w_p = 0,71$                     | $w_p = 0,71$                     |
| fluxo 3kbps:                 | $w_l = 0,20$                     | $w_l = 0,17$                     | $w_l = 0,17$                     |
| fluxo 32kbps:                | $w_b = 0,30$                     | $w_b = 0,12$                     | $w_b = 0,12$                     |
| Monitoramento queda:         |                                  |                                  |                                  |
| fluxo 264kbps:               | $w_p = 0,37$                     | $w_p = 0,18$                     | $w_p = 0,18$                     |
|                              | $w_l = 0,46$                     | $w_l = 0,44$                     | $w_l = 0,44$                     |
|                              | $w_b = 0,17$                     | $w_b = 0,38$                     | $w_b = 0,38$                     |
| fluxo 1024kbps:              |                                  | $w_p = 0,15$                     | $w_p = 0,15$                     |
|                              |                                  | $w_l = 0,38$                     | $w_l = 0,38$                     |
|                              |                                  | $w_b = 0,47$                     | $w_b = 0,47$                     |
| Preferência dos fluxos:      | 1-Moni. queda<br>2-Sinais vitais | 1-Moni. queda<br>2-Sinais vitais | 1-Sinais vitais<br>2-Moni. queda |

Os pesos para a aplicação de monitoramento de quedas pretende obter baixas taxas de perda de pacotes, para isso valores mais altos são atribuídos para os objetivos de qualidade dos enlaces e/ou balanceamento. A abordagem RALLW(1) tem o peso para a quantidade de enlaces com baixa qualidade ( $w_l = 0,46$ ) e o peso para quantidade de saltos ( $w_p = 0,37$ ) altos, dessa forma os caminhos selecionados tendem a ter poucos saltos e utilizaram poucos enlaces com baixa qualidade, como o peso para o balanceamento é relativamente baixo ( $w_b = 0,17$ ) pontos de gargalo na rede podem surgir. Já as abordagens RALLW(2 e 3) apresentam a mesma combinação de pesos, atribuindo maiores valores para a função de balanceamento e qualidade dos enlaces ( $w_b = 0,38$  e  $w_l = 0,38$ ) essa combinação tende a gerar rotas que utilizem enlaces com boa qualidade e com uma quantidade elevada de saltos, visto que o peso para a quantidade de saltos é baixo ( $w_p = 0,18$ ), a única diferença entre as abordagens RALLW(2 e 3) é a ordem de prioridade para a geração das rotas entre os fluxos das aplicações.

### 3.5.3 Resultados

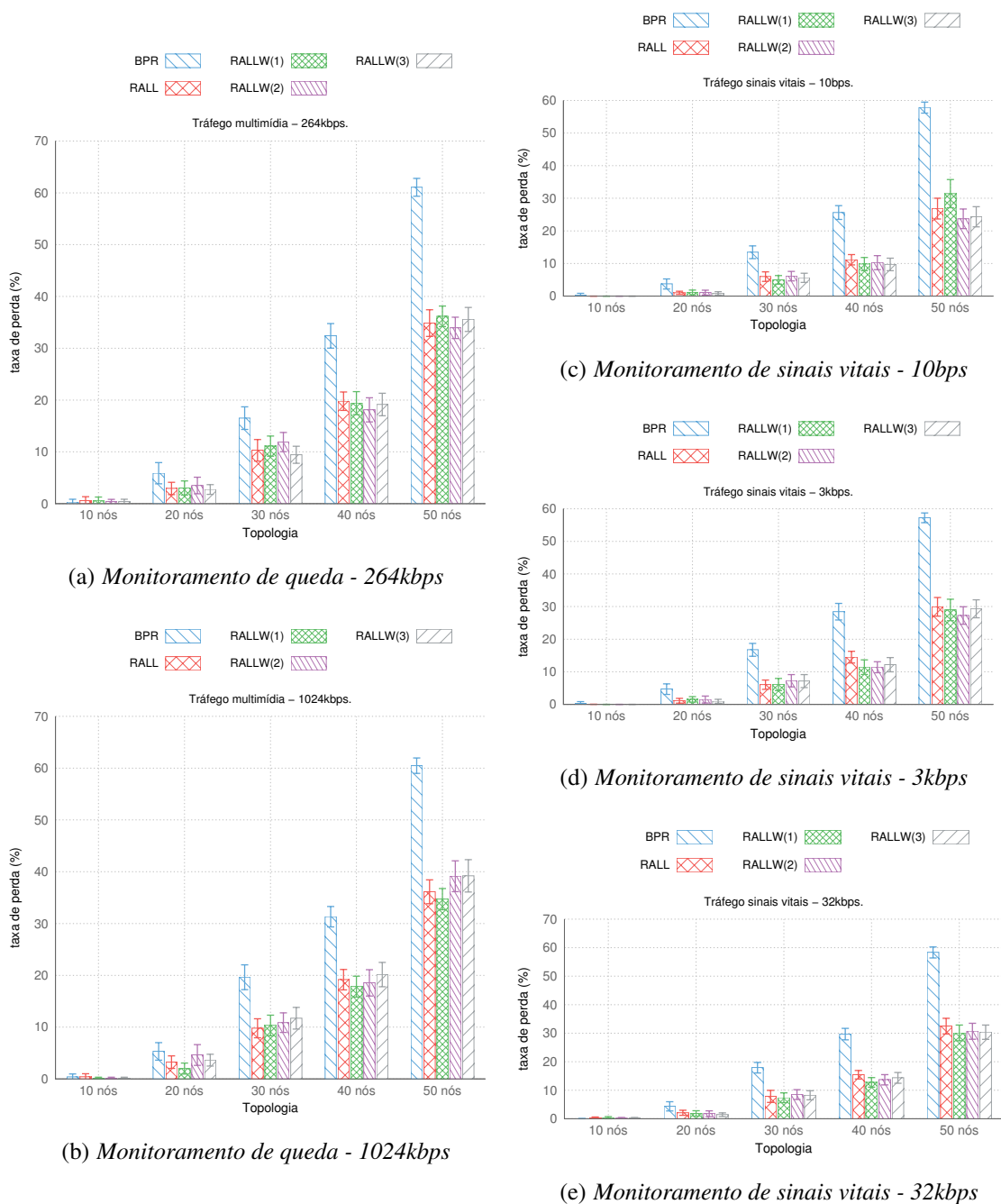
Inicialmente, na subseção 3.5.3.1, é apresentado os resultados variando a quantidade de roteadores de malha que formam a RMSF (10, 20, 30, 40 e 50 nós), dentro de uma região com a mesma área para todas as topologias. Dessa forma é possível analisar o comportamento das abordagens quando o nível de contenção na rede aumenta. Na sequência, foram realizadas simulações variando a quantidade de dispositivos geradores de interferência durante a transmissão dos dados na rede, para simular um cenário em

que a interferência externa esteja presente na rede. Os dispositivos responsáveis por gerar a interferência foram posicionados de duas formas, primeiro a localização dos nós foi atribuída de forma predeterminada (subseção 3.5.3.2) e depois as posições dos nós foram determinadas aleatoriamente sobre a rede (subseção 3.5.3.3).

### 3.5.3.1 Variando a Quantidade de Roteadores em Malha

O primeiro teste realizado consiste na variação da quantidade de roteadores de malha presentes no cenário (10, 20, 30, 40 e 50 nós), a quantidade de nós de interferência é igual a 10% da quantidade de roteadores de malha, não gerando assim um nível elevado de interferência na rede.

Como pode ser visto na Figura 3.7, as abordagens RALL e RALLW(1, 2 e 3) apresentam taxas de perda pequenas quando comparadas a abordagem BPR, principalmente quando a quantidade de nós presentes na rede aumenta. Essa característica é explicada principalmente pela presença do terceiro objetivo, referente à qualidade dos enlaces inexistentes na proposta BPR. As abordagens RALL e RALLW(1, 2 e 3) apresentam uma combinação desses objetivos, conseguindo assim determinar rotas que apresentam maior qualidade, influenciando diretamente a taxa de entrega dos pacotes. Quando comparamos as abordagens RALL e RALLW praticamente não existe diferença entre os resultados. A diferenciação entre os vários tipos de fluxos das aplicações, com a combinação dos pesos para o RALLW(1, 2 e 3), não obteve efeito significativo nas perdas dos pacotes, inclusive em várias configurações de nós resultou um aumento das perdas.



**Figura 3.7:** Taxa de perda para cada fluxo das aplicações.

A Figura 3.8 mostra os resultados obtidos para o atraso fim-a-fim dos pacotes para todos os tipos de fluxos. O atraso tem um papel fundamental principalmente em aplicações sensíveis a resposta do sistema, que é o caso do monitoramento de sinais vitais, assim, é necessário que os dados coletados pelos sensores sejam entregues rapidamente.

Analisando os resultados do tempo médio de atraso obtido, nota-se que de forma geral todas as abordagens entregam os pacotes dentro do limite de tempo aceitável para as aplicações testadas. Ao analisar os resultados referentes aos tráfegos da aplicação de monitoramento de queda, Figuras 3.8(a) e 3.8(b), o BPR e RALL resultam em

desempenho similares, entretanto, o BPR apresenta uma suave melhora principalmente nas topologias com 50 nós. Porém, como foi observado na Figura 3.7 a taxa de perda do BPR para esse cenário é elevada, e como o atraso médio é calculado sobre os pacotes entregues, uma quantidade razoável de pacotes não é contabilizada já que foram descartados.

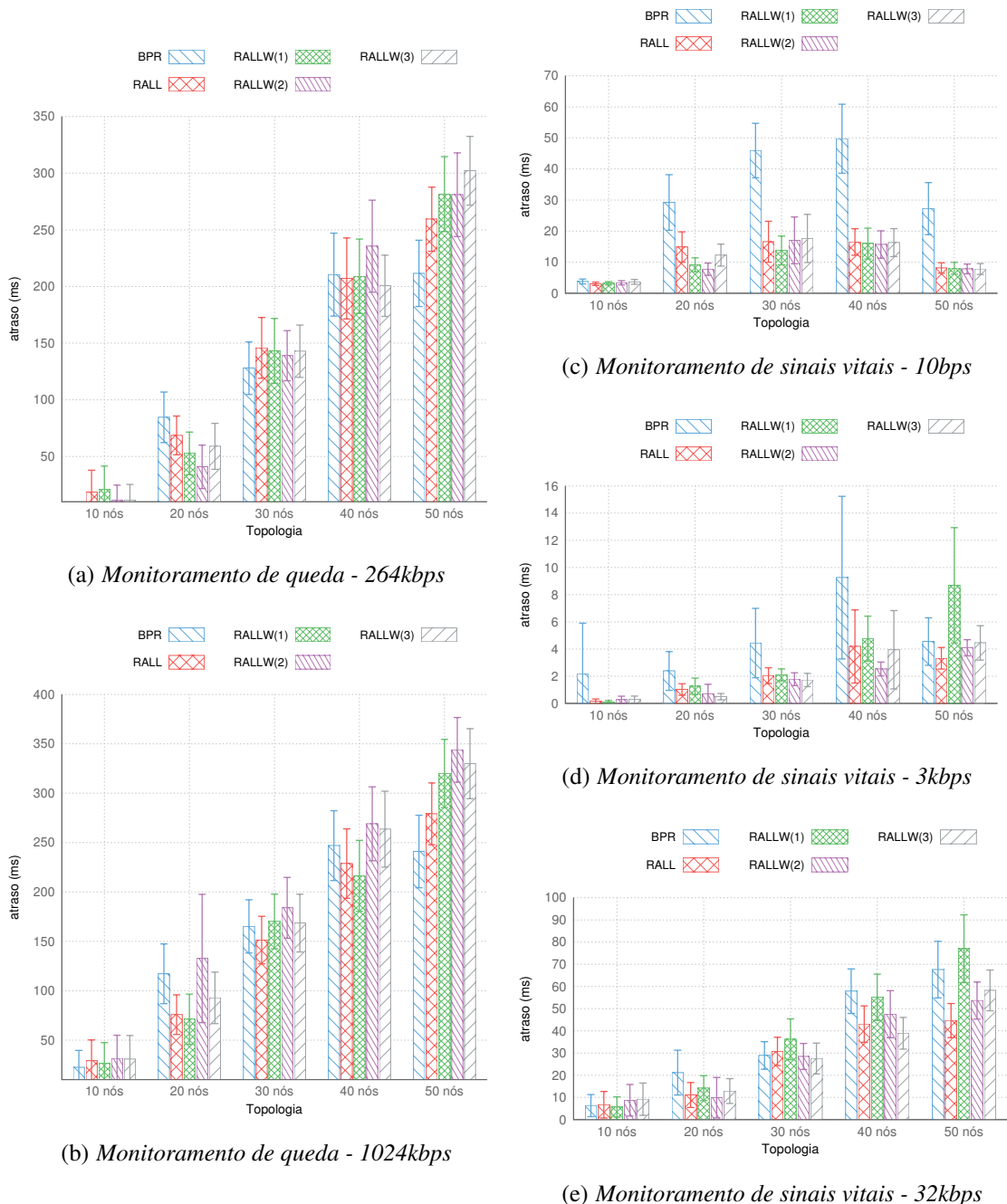
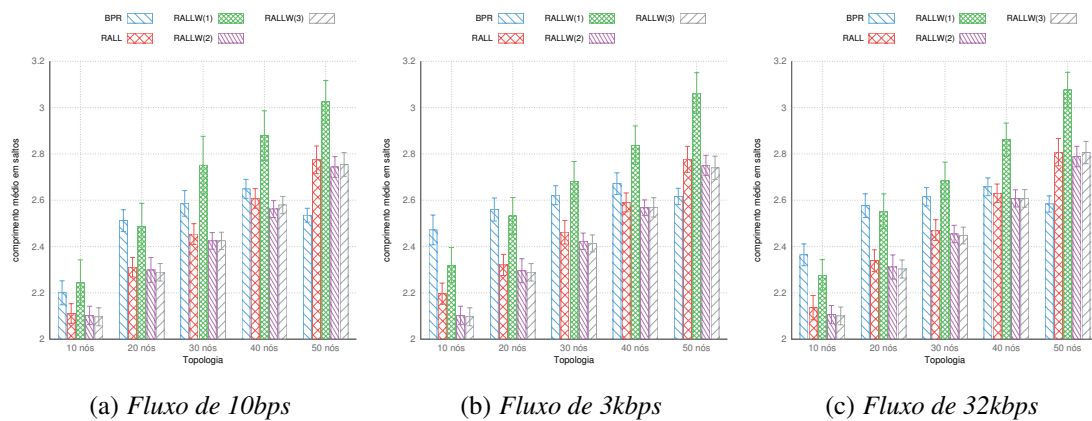


Figura 3.8: Atraso fim-a-fim para cada fluxo das aplicações.

Um comportamento interessante é quando as topologias se tornam mais densas (40 e 50 nós), mostrando que as abordagens RALL e RALLW(1) se diferenciam prin-

principalmente nos fluxos da aplicação de monitoramento dos sinais vitais. Por outro lado, as abordagens RALLW(2 e 3) se mantêm similar ao RALL, em certas configurações de cenários até chegando a ser brevemente melhor. A diferença entre o comportamento do RALL(1) e das abordagens RALL(2 e 3) é explicada pela distribuição desproporcional dos pesos referentes ao RALLW(1) em que os valores são relativamente maiores para as funções objetivos de quantidade de saltos e balanceamento (que são conflitantes diretamente) o que resulta em caminhos maiores e em um maior atraso. Já as abordagens RALLW(2 e 3) têm valores de pesos maiores para a função objetivo de quantidade de saltos e um valor menor para a função objetivo de balanceamento, contribuindo assim para a geração de caminhos curtos o que melhora o atraso médio, como visto na Figura 3.9 que exhibe a quantidade média de saltos por abordagem.



(a) Fluxo de 10bps

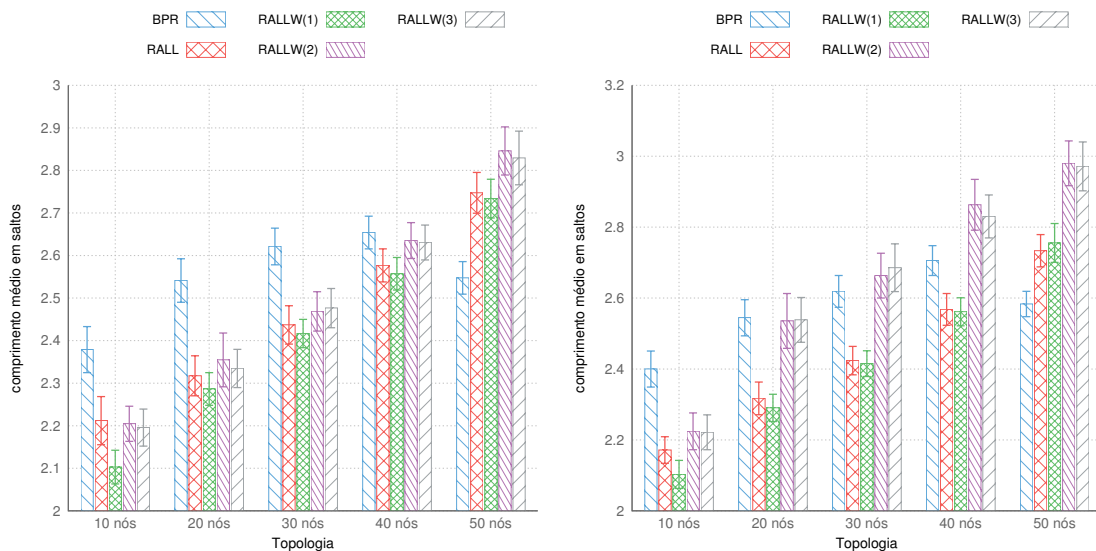
(b) Fluxo de 3kbps

(c) Fluxo de 32kbps

**Figura 3.9:** Tamanho médio do caminho para a aplicação de sinais vitais.

Para a aplicação de monitoramento de queda a atribuição de pesos é inversa a relação feita para a aplicação de monitoramento de sinais vitais. As abordagens RALLW(2 e 3) passam a dar preferência para soluções mais balanceadas, entretanto, com maior quantidade de saltos, diferentemente das abordagens RALL e RALLW(1) que possuem preferência por caminhos mais curtos, como pode ser visto na Figura 3.10. Isso justifica a pequena melhora no atraso médio das abordagens RALL e RALLW(1) em relação as abordagens RALLW(2 e 3).





(a) Fluxo de 264kbps

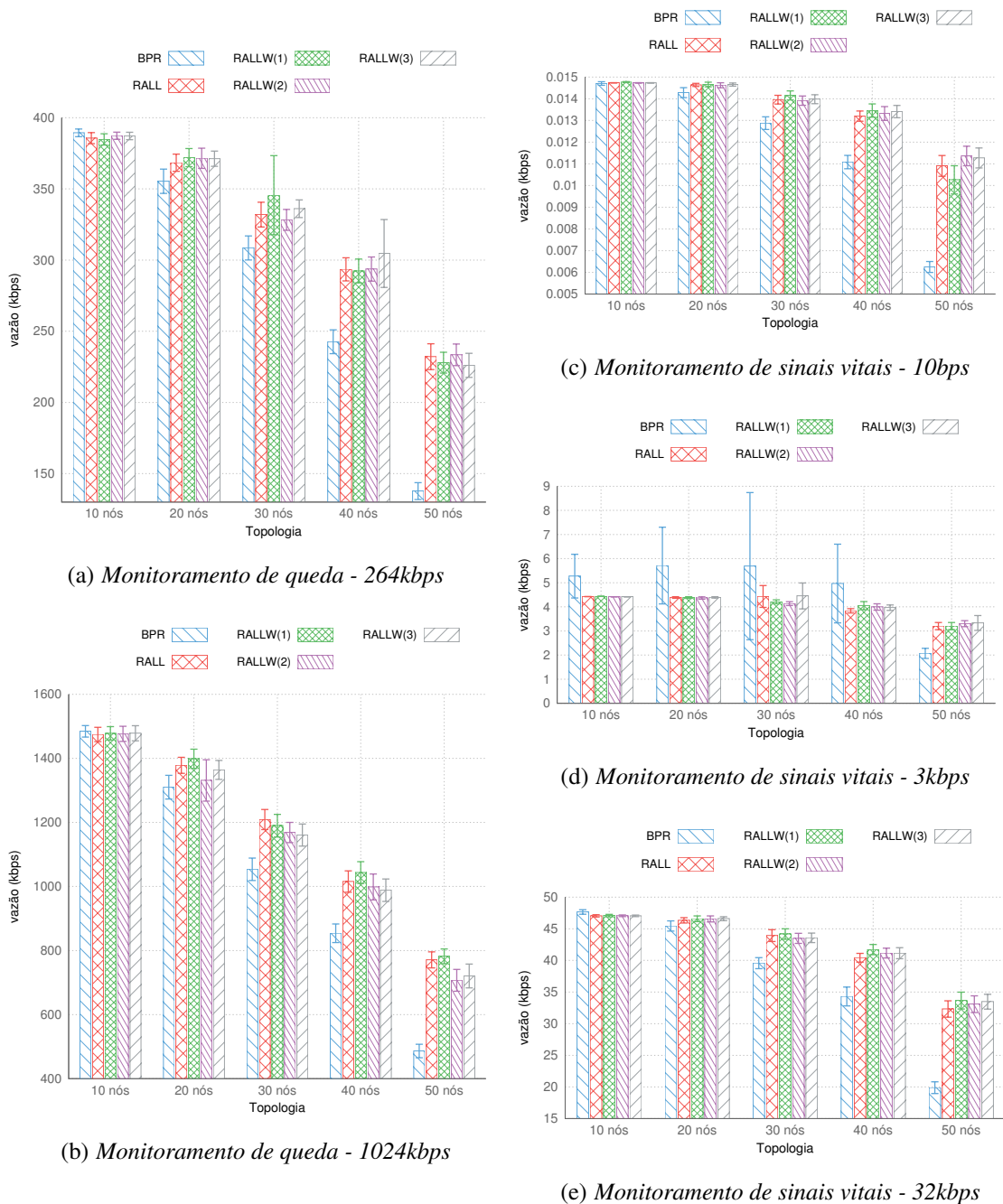
(b) Fluxo de 1024kbps

**Figura 3.10:** Tamanho médio do caminho para a aplicação monitoramento quedas.

É interessante observar que o atraso médio das abordagens RALLW(2 e 3), Figura 3.8, tiveram um desempenho diferente principalmente em cenários mais densos (40 e 50 nós). E é originado unicamente pela prioridade dada às aplicações em cada roteador em malha ao determinar qual terá sua rota determinada primeiro.

A Figura 3.11 mostra os resultados para a vazão média dos fluxos. Analisando os resultados da vazão para cada aplicação, percebe-se que para a aplicação de monitoramento de sinais vitais todas as abordagens possuem desempenhos praticamente idênticos, justamente pela baixa taxa de envio de dados gerados pelos sensores. Já as aplicações multimídia possuem uma vazão consideravelmente maior. A abordagem BPR tem uma vazão inferior considerável principalmente entre as topologias com maior densidade de roteadores de malha. Mesmo apresentando soluções que mantenham a rede balanceada, a quantidade de pacotes perdidos, como comentado anteriormente, tem um reflexo relevante na diminuição da vazão de dados do BPR.

Apesar da pouca variação entre as abordagens RALLW(1,2 e 3), em alguns casos as abordagens apresentam uma pequena diferença. Quando analisados os resultados para os fluxos de 264kbps da aplicação de monitoramento de quedas, todas as abordagens possuem pesos similares para a qualidade (entregando assim quantidade similares de dados), mas como as abordagens RALLW(2 e 3) têm um maior peso para o balanceamento elas têm uma suave diferença principalmente em cenários mais densos (40 e 50 nós). Já para os fluxos de 1024kbps, as abordagens RALLW(2 e 3) possuem um valor pequeno para o peso referente à qualidade o que afeta a quantidade de entregas realizada, diminuindo um pouco a vazão.

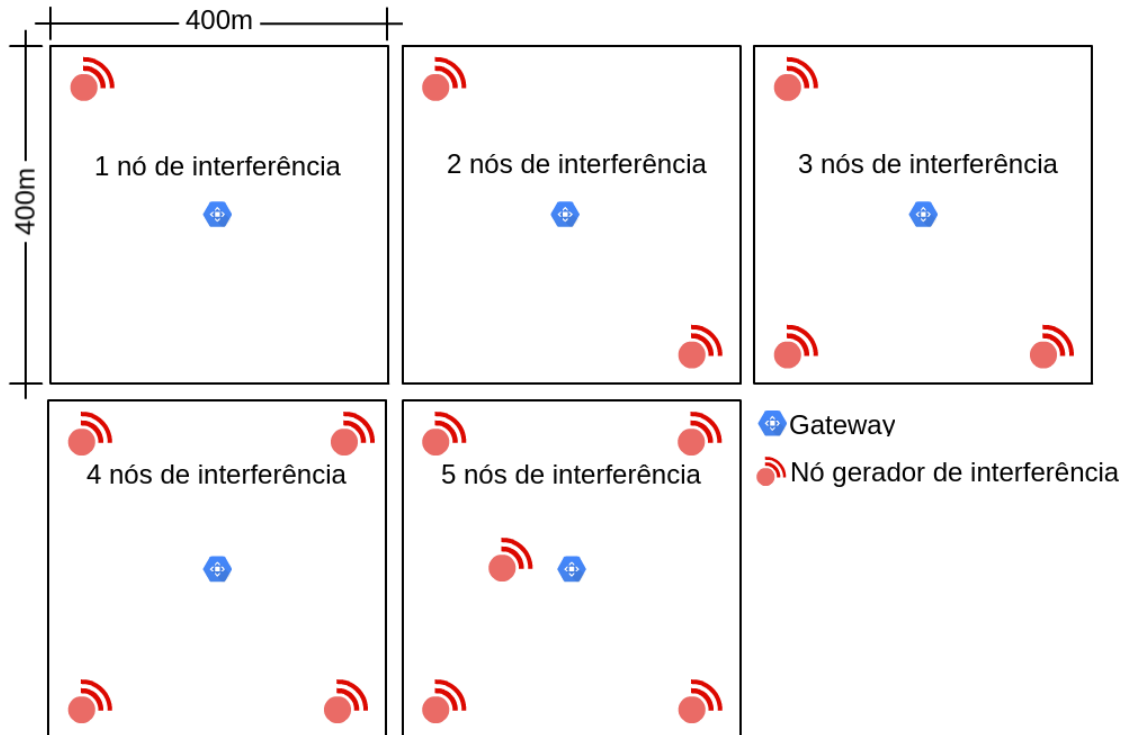


**Figura 3.11:** Vazão para cada fluxo das aplicações.

### 3.5.3.2 Variando a Quantidade de Geradores de Interferência — posição predeterminada

Uma das principais causas da falta de eficiência das redes sem fio está diretamente relacionado à qualidade do enlaces em que os dados trafegam. Mesmo em padrões que operam em faixas menos utilizadas essa questão deve ser levada em consideração, visto que a existência cada vez maior de dispositivos com esses padrões, por exemplo o IEEE 802.11n e o IEEE 802.11ac, vão propiciar maiores níveis de interferência nas redes

sem fio do futuro que empregam o padrão wi-fi. Esses dispositivos podem ser outros pontos de acessos ou por exemplo, *smartphones* não pertencentes aquela rede, e em cenários extremamente densos que tendem a aumentar cada vez mais [36]. Por isso a importância de se analisar os resultados em um cenário em que exista uma variação dos níveis de interferência dentro da rede.



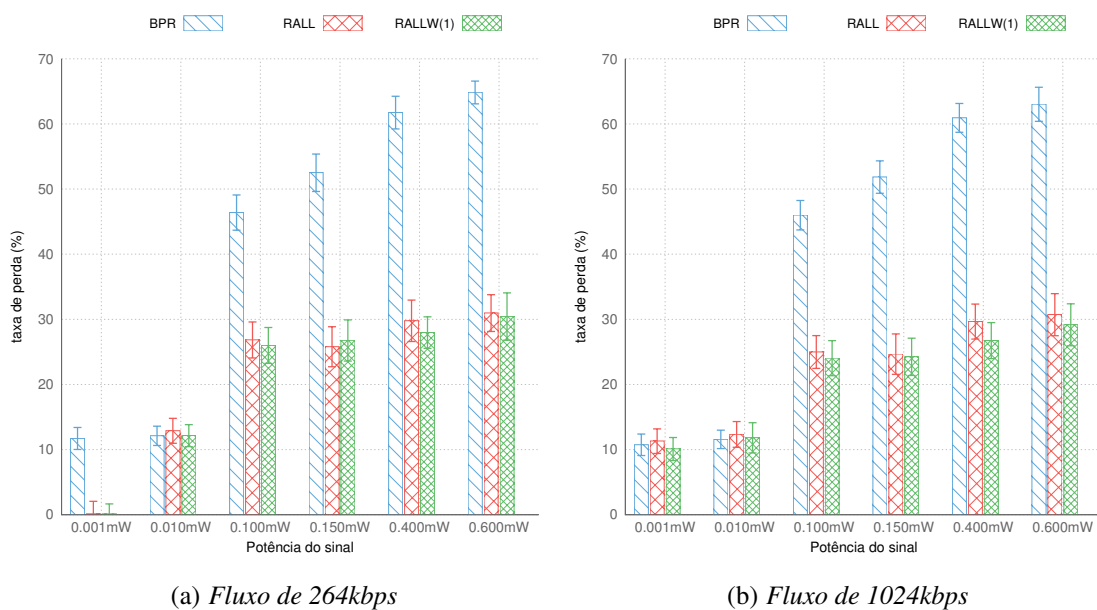
**Figura 3.12:** Posições predeterminadas para os nós geradores de interferência.

A interferência externa foi modelada através da inclusão de nós responsáveis por gerar sinais que interferissem na comunicação dos roteadores de malha presentes na rede. Para estabelecer a potência em que os nós de interferência devem gerar os sinais, foi realizado a seguinte simulação: dada uma rede composta por 40 roteadores de malha, distribuídos sobre uma área de  $400m \times 400m$  com o *gateway* posicionado no centro, e um nó gerador de interferência posicionado no canto superior esquerdo da rede, como representado na Figura 3.12, foram realizados testes variando a potência para avaliar o impacto causado.

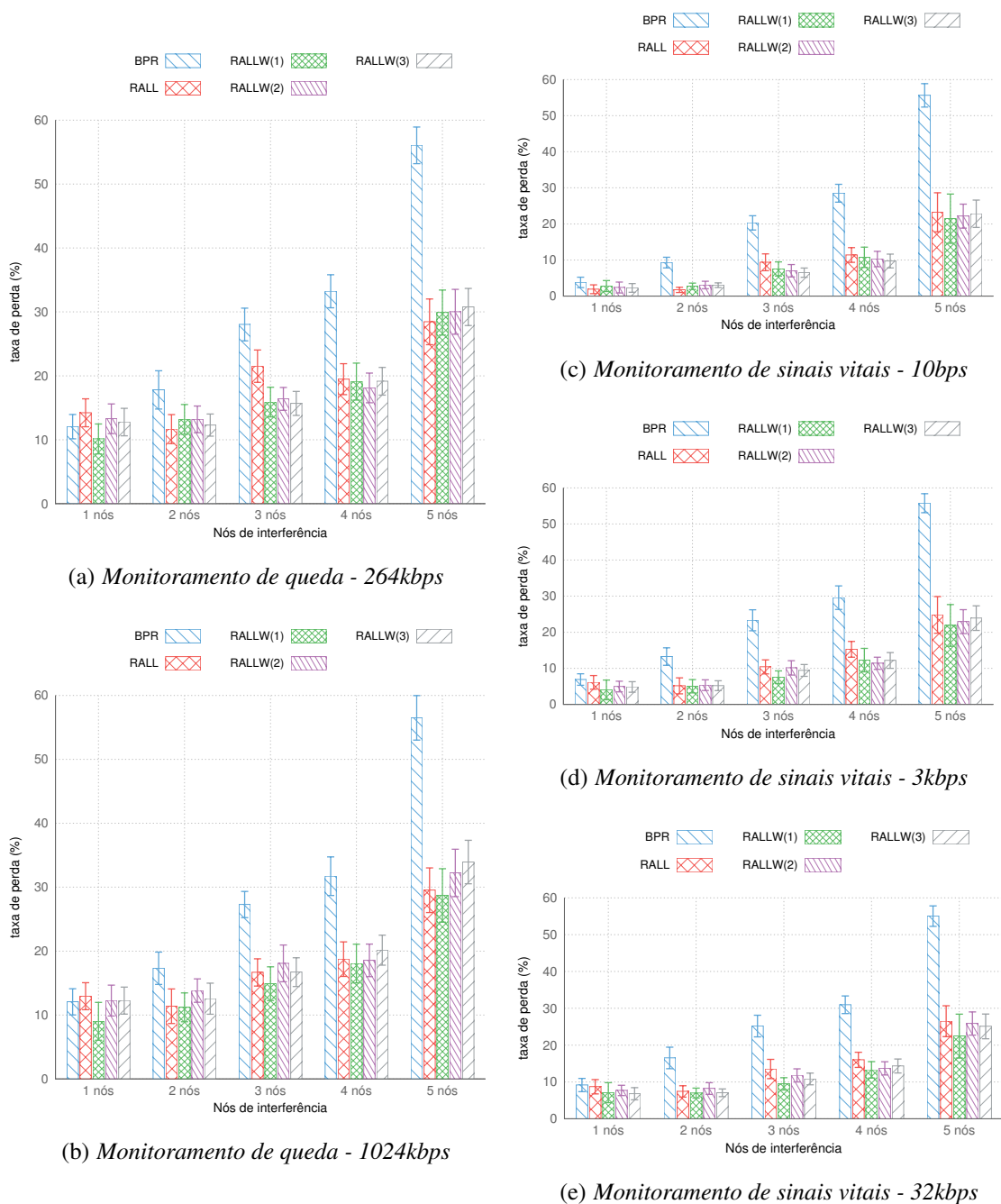
Como pode ser visto na Figura 3.13, ao aumentar a potência de sinal do nó gerador de interferência a taxa de perda aumenta consideravelmente ao ponto de causar taxa elevadíssimas de perdas, o que deixaria a rede inviável de ser utilizada, principalmente ao adicionar mais nós de interferência. Para evitar que isso ocorra, nas próximas simulações foi escolhida a potência de  $0,010mW$  para todos os nós de interferência já que a perturba-

ção causada por esse valor não é grande o suficiente para inviabilizar a comunicação na rede.

Dessa forma, foram realizadas simulações variando a quantidade de dispositivos geradores de interferência na rede, para simular um cenário em que a interferência externa esteja presente na rede. Escolhemos uma topologia formada por 40 roteadores de malha, que fornece uma boa densidade de nós por  $m^2$ , distribuídos na área configurada para simulação, como especificado na Tabela 3.4. Os dispositivos responsáveis por gerar a interferência foram posicionados de forma predeterminada de acordo com a Figura 3.12 em uma área de  $400m \times 400m$ .



**Figura 3.13:** Taxa de perda de acordo com a variação da potência dos nós geradores de interferência.

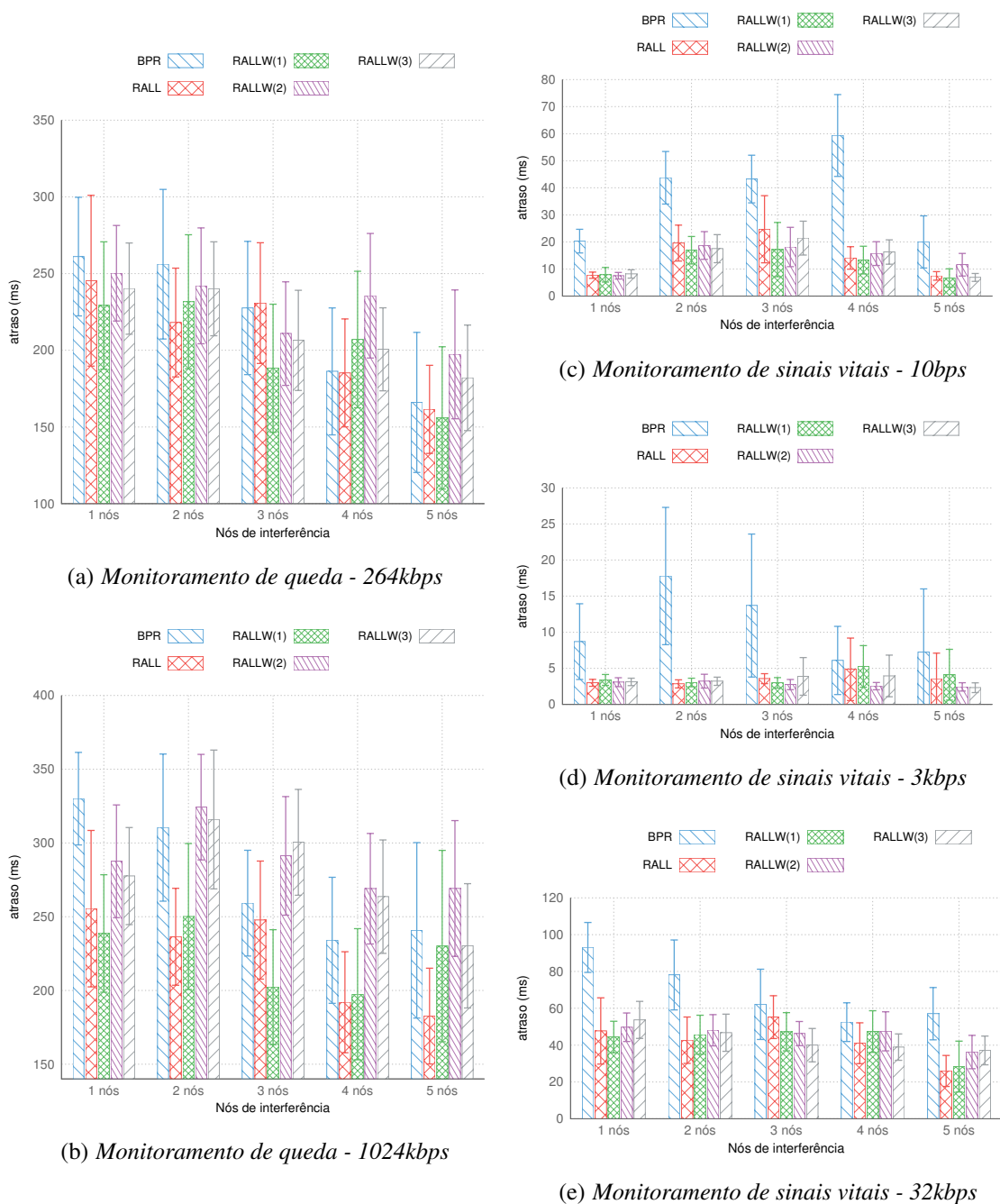


**Figura 3.14:** Taxa de perda para cada fluxo das aplicações na presença de nós geradores de interferência.

A Figura 3.14 exibe as taxas de perdas dos pacotes para as aplicações de monitoramento de quedas e de monitoramento de sinais vitais para topologias compostas por 40 roteadores de malha. É observado que a diferença entre a abordagem BPR e as abordagens RALL e RALLW(1,2 e 3) aumenta à medida que a quantidade de nós geradores de interferência cresce. Como o BPR mantém o gargalo da rede mínimo selecionando rotas curtas, rotas que utilizam regiões em que os níveis de perturbação e ruído na rede estão elevados fazendo com que a sua taxa de perda aumente consideravelmente com o aumento

da quantidade de interferência. Os algoritmos RALL e RALLW(1,2 e 3), por possuírem uma combinação entre os três objetivos (caminho, balanceamento e qualidade), resultam em uma elevação sutil de suas taxas de perda, pois mesmo com a existência de um maior número de regiões que tenham enlaces com baixa qualidade, o roteamento tenta evitar os enlaces com péssima qualidade. Uma observação a ser feita é sobre os fluxos de 1024kbps da aplicação de monitoramento de quedas em que as abordagens RALLW(2 e 3) apresentam taxas de perdas maiores que o RALL e o RALLW(1), isso é reflexo do valor mais baixo para o peso referente a qualidade dos enlaces para esse tipo de fluxos nas abordagens RALLW(2 e 3).

As abordagens RALLW(1, 2 e 3) apresentam, em algumas configurações, melhores resultados em relação ao RALL como pode ser observado nas Figuras 3.14(a) e 3.14(b) com 3 nós de interferência por exemplo. Isso pode ser justificado pela existência de uma região nas topologias em que não é muito afetada pela interferência (canto superior direito no caso das topologias com 3 nós de interferência) por causa da ausência de nós geradores de interferência. As abordagens RALLW(1, 2 e 3) possuem preferência por caminhos que tenham melhor qualidade (preferência determinada pelos pesos definidos), assim, é possível que os nós vizinhos a essas regiões com um menor nível de interferência tenham caminhos com enlaces de melhor qualidade do que as rotas determinadas pela abordagem RALL.

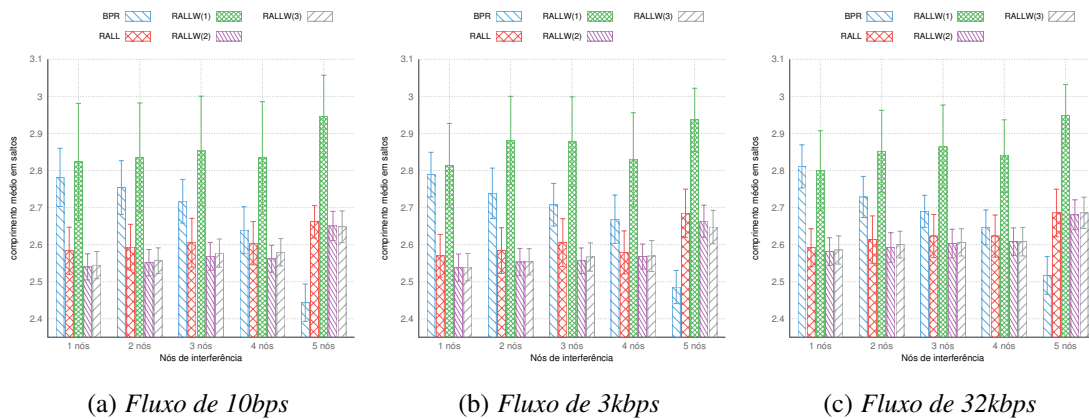


**Figura 3.15:** Atraso fim-a-fim para cada fluxo das aplicações na presença de nós geradores de interferência.

A Figura 3.15 exibe o atraso fim-a-fim dos pacotes para as aplicações. Analisando os resultados obtidos, nota-se que na aplicação de monitoramento de sinais vitais, a diferença entre as abordagens RALL e RALLW(1, 2 e 3) é mínima, porém, é perceptível a diferença entre a abordagem BPR. Essa característica se explica pela boa escolha de caminhos curtos e que tenham boa qualidade (a atribuição dos valores para o peso da qualidade é similar em todas as abordagens), o que evita a retransmissão de dados e a utilização de poucos saltos para alcançar o nó destino. Ao comparar o comprimento mé-



dio em salto de cada abordagem, Figura 3.16, percebe-se a importância da inclusão do terceiro objetivo (no caso a qualidade) para a determinação do roteamento, pois mesmo a abordagem RALLW(1), que apresenta caminhos relativamente maiores que as outras abordagens, ainda alcança um atraso médio pequeno por causa da redução de retransmissões de pacotes.

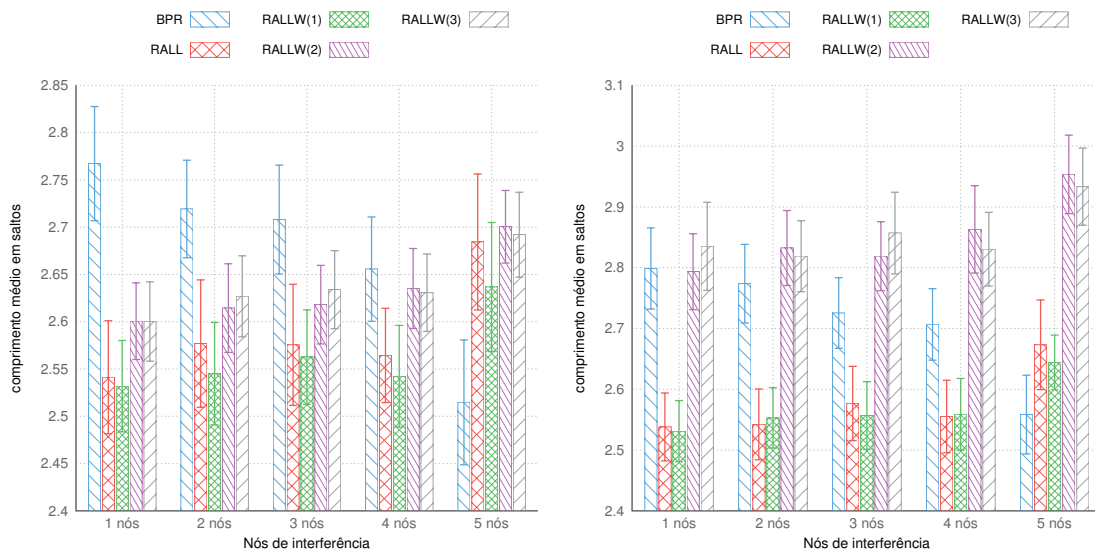


**Figura 3.16:** Tamanho médio do caminho para aplicação de sinais vitais.

É importante observar que o atraso médio diminui com o aumento da quantidade de nós geradores de interferência na rede, como visto na Figura 3.15. Isso é explicado pelo aumento da perda de dados (Figura 3.14), já que para calcular o atraso médio é considerado somente o tempo de atraso fim-a-fim dos pacotes que foram entregues com sucesso. Dessa forma, a quantidade de pacotes descartados após realizar todas as tentativas de retransmissão aumenta em toda a rede, assim, a maior parte dos pacotes entregues utilizam caminhos com qualidade razoável ou passam por poucos saltos, diminuindo a possibilidade de utilizar regiões com altos níveis de interferência, favorecendo o atraso médio.

As abordagens RALLW(2 e 3), para a aplicação de monitoramento de quedas, apresentam um maior atraso médio, principalmente para as topologias com 3, 4 e 5 nós de interferência. Isso é causado pelo comprimento médio dos caminhos gerados por essas abordagens, como visto na Figura 3.17, já que os pesos definidos pelas abordagens, leva à geração de rotas balanceadas que possuem caminhos com maior quantidade de saltos. Já a abordagem RALLW(1) consegue manter um atraso razoavelmente melhor do que as outras abordagens com a presença de 3 nós de interferência, pelas razões mencionadas anteriormente.





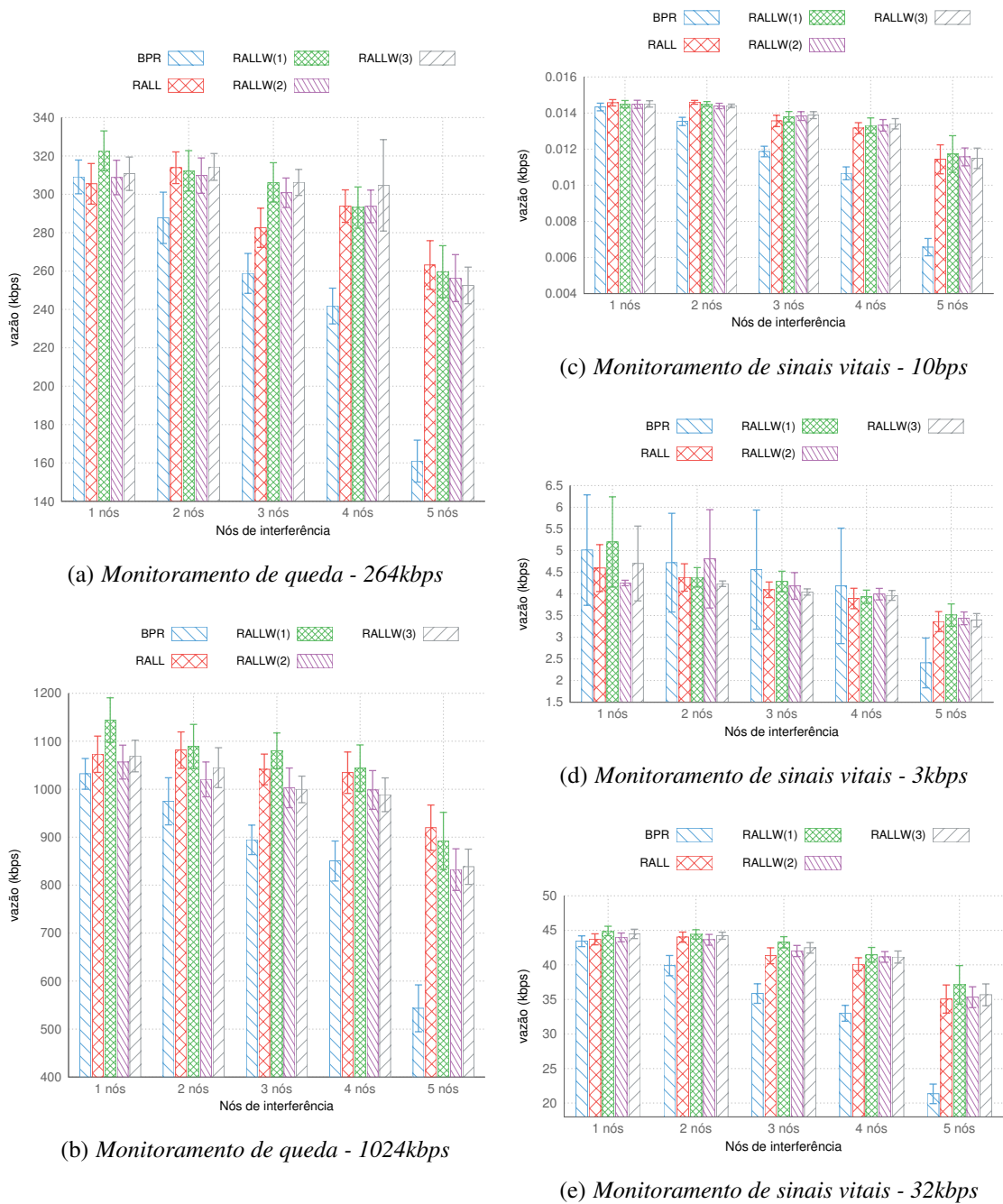
(a) Fluxo de 264kbps

(b) Fluxo de 1024kbps

**Figura 3.17:** Tamanho médio do caminho para aplicação de monitoramento de quedas.

A Figura 3.18 exibe a taxa de vazão de dados. A diferença entre as abordagens fica mais evidente quando um maior nível de interferência é gerado sobre a rede. Pode-se observar que nos cenários que possuem 4 ou 5 nós geradores de interferência a vazão do BPR tem uma queda considerável, enquanto que as abordagens RALL e RALLW(1, 2 e 3) possuem praticamente a mesma vazão. Isso indica que a junção entre os três objetivos consegue manter a eficiência da rede, mesmo em cenários com altos níveis de ruído. Sendo por exemplo uma boa solução para a aplicação de monitoramento de quedas por fornecer uma vazão de dados suficiente para manter o bom funcionamento da aplicação mesmo sobre altos níveis de interferência nos canais de comunicação.

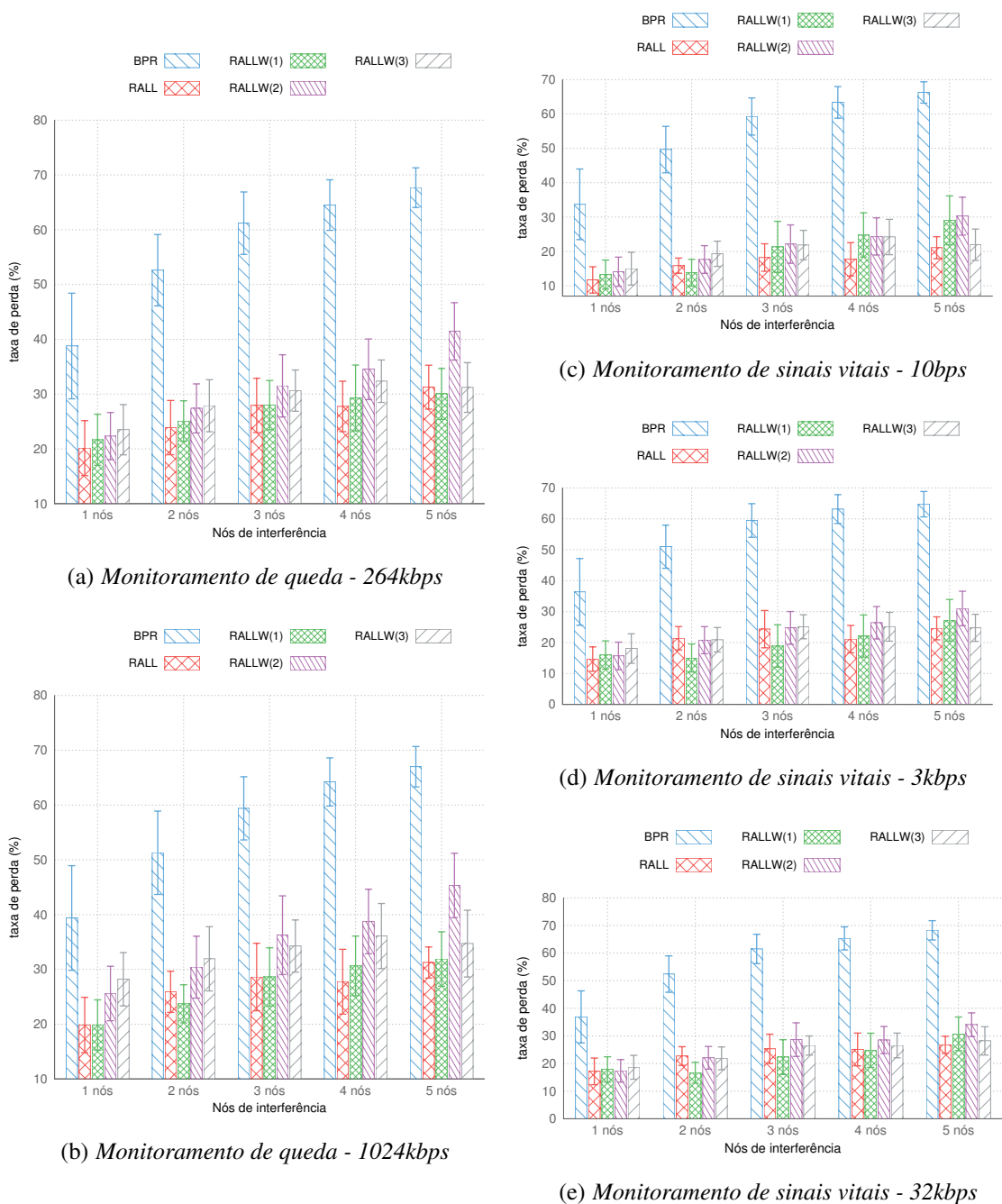
A abordagem RALLW(1) apresenta em sua combinação de pesos, um maior valor para a qualidade dos enlaces referente a aplicação de monitoramento de quedas, assim nos cenários em que a rede não esteja sobrecarregada de interferência (1, 2 e 3 nós geradores de interferência) ela apresenta uma pequena vantagem sobre as outras abordagens, porém, quando a configuração do cenário passa a ter 4 ou 5 nós geradores a qualidade dos enlaces são degradadas de forma parecida em toda a rede, fazendo com que a RALLW(1) tenha uma pequena desvantagem em relação ao RALL. Nas abordagens RALLW(2 e 3), apesar de apresentarem um valor alto para a qualidade dos enlaces, a função de balanceamento da rede causou um aumento demasiado na quantidade de saltos realizados, aumentando o atraso fim-a-fim dos pacotes e prejudicando a vazão dos dados.



**Figura 3.18:** Vazão de dados para cada fluxo das aplicações na presença de nós geradores de interferência.

### 3.5.3.3 Variando a Quantidade de Geradores de Interferência — posição aleatória

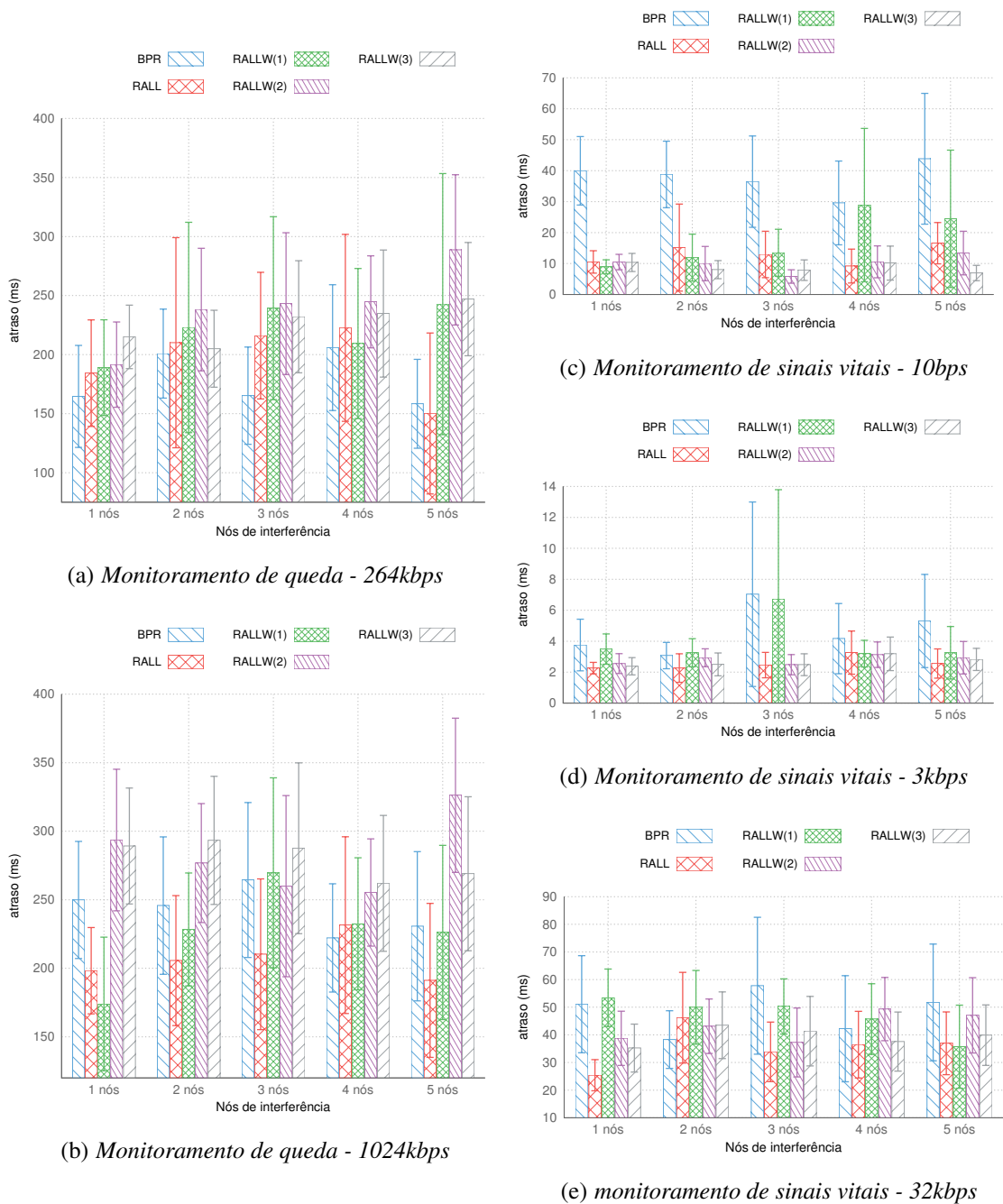
Os próximos resultados analisados têm as posições dos nós geradores de interferência atribuídas de forma totalmente aleatória sobre a topologia.



**Figura 3.19:** Perda de dados para as aplicações na presença de nós de interferência — posição aleatória.

A Figura 3.19 exibe as taxas de perdas para as aplicações e, diferentemente dos resultados em que os nós de interferência são posicionadas de forma predeterminada na topologia, as taxas de perdas são maiores em todas as configurações. Essa característica pode ser explicada pelo posicionamento dos nós degradar ainda mais os enlaces de comunicação, como por exemplo a existência de uma fonte de interferência próxima ao gateway. Mesmo com essa alteração as abordagens RALL e RALLW(1 e 3) conseguiram determinar as rotas de forma que a variação na taxa de perdas em todos os cenários não

sofresse grande aumento. Porém, a abordagem RALLW(2) apresentou uma maior taxa de perda, dado que nessa abordagem os nós definem primeiramente as rotas para os fluxos que pertencem a aplicação de queda, ou seja, com um menor nível de carga na rede, é possível a utilização de um mesmo enlace, com qualidade baixa, por fluxos com maior taxas de dados, prejudicando o desempenho da rede.



**Figura 3.20:** Atraso fim-a-fim para as aplicações na presença de nós de interferência — posição aleatória.

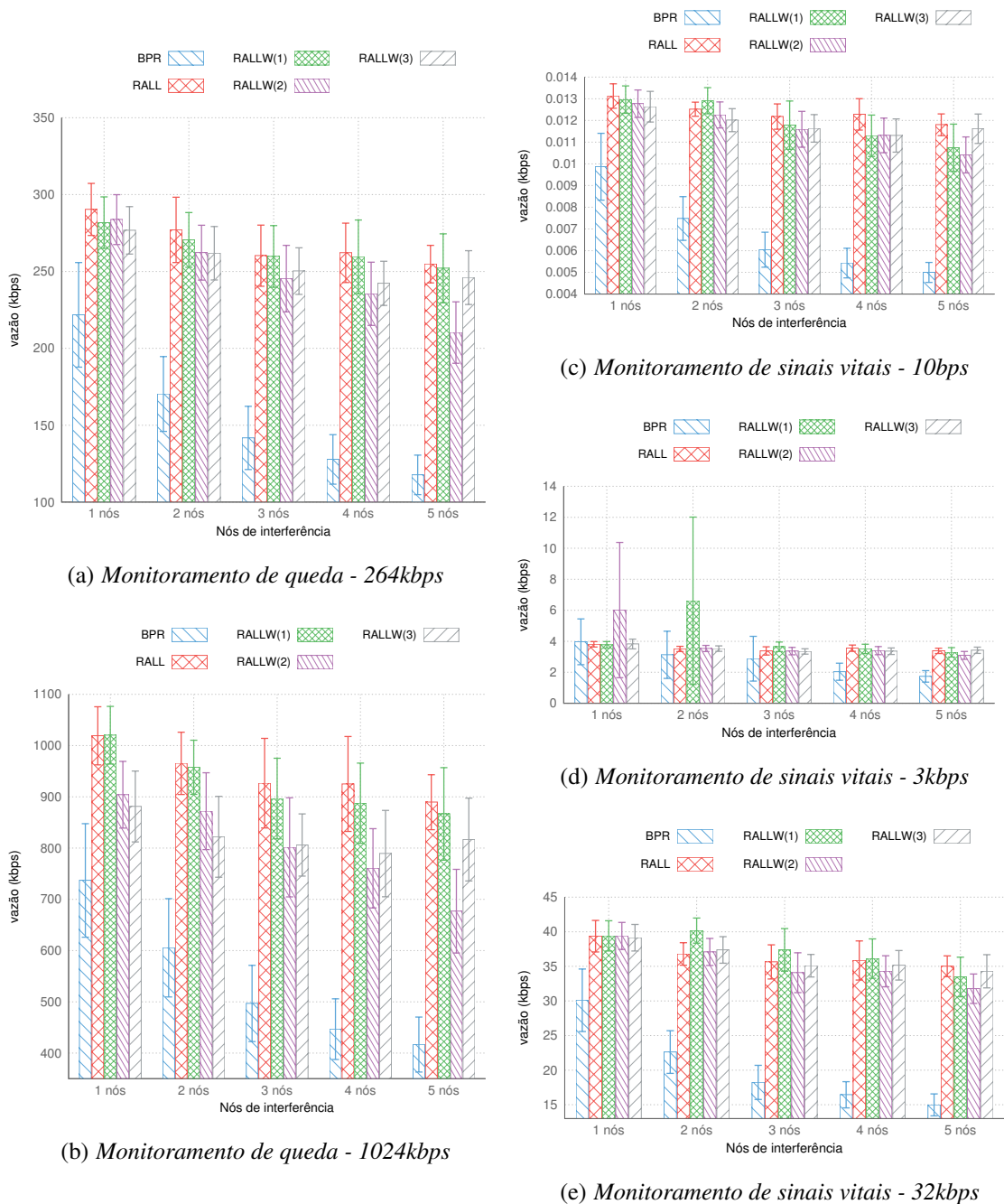
A Figura 3.20 mostra os resultados do atraso para todos os fluxos das aplicações.

Percebe-se que a abordagem RALLW(1) possui uma oscilação no atraso médio, ficando perceptível quando são analisados os fluxos pertencentes à aplicação de monitoramento de sinais vitais. Isso ocorre por causa da variação da potência do sinal que interfere nos enlaces de comunicação causada pela aleatoriedade dos nós de interferência. Como o peso referente ao objetivo de interferência teve um valor estipulado baixo, essa abordagem não consegue perceber as alterações sofridas nos níveis de interferência para cada nova posição atribuída aos geradores de interferência, dessa forma, mesmo que um grande conjunto de enlaces tenha sua qualidade degradada por estar situada na área de alcance do sinal de um nó gerador de interferência (próximo ao *gateway*, por exemplo), a abordagem RALLW(1) não seria capaz de distinguir com facilidade enlaces com melhor qualidade, diferentemente do RALL (por ter preferências iguais para seus objetivos).

A Figura 3.21 apresenta a vazão média para todos os fluxos das aplicações. A abordagem BPR apresentou uma vazão inferior em todas as configurações de quantidade de nós geradores de interferência, principalmente quando analisamos os fluxos da aplicação de monitoramento de quedas, Figuras 3.21(a) e 3.21(b). A razão para esse resultado pode ser justificada pela grande quantidade de pacotes perdidos. Já as abordagens RALL e RALLW(1) apresentam resultados semelhantes para a vazão, onde o RALL tem uma pequena melhora em ambas aplicações.

Ao comparar com os resultados anteriores, em que as regiões com maior nível de interferência ficavam nas posições predeterminada da topologia (Figura 3.12), conclui-se que uma abordagem que apresenta somente soluções balanceadas não é suficiente para se ter um bom rendimento em cenários onde o nível de interferência ou contenção sejam elevados e localizados em locais críticos da rede — proximidade do nó *gateway* por exemplo.

A atribuição do peso, referente a qualidade dos enlaces para a abordagem RALLW(2) é inferior ao peso da abordagem RALLW(1) quando comparado os pesos para os fluxos com taxa igual a 1024kbps da aplicação de monitoramento de queda, o que leva a abordagem RALLW(2) a selecionar enlaces com níveis menores de qualidade resultando em aumento na perda de dados e consequentemente um uma menor vazão. Por isso, ao analisar os resultados da Figura 3.21(a) percebe-se que, apesar dos pesos para a qualidade dos enlaces serem similares entre as abordagens RALLW(1) e RALLW(2), esta apresenta resultados inferiores para a vazão. O posicionamento aleatório dos nós geradores de interferência e a preferência por rotas mais balanceadas do RALLW(2) fazem com que uma maior quantidade de enlaces sejam ativados, prejudicando a vazão dos dados.



**Figura 3.21:** Vazão de dados para as aplicações na presença de nós de interferência — posição aleatória.

### 3.5.4 Considerações

Neste capítulo foi apresentado a adequação do algoritmo RALL para determinar uma solução para o problema de roteamento em RMSF que é um tipo de rede que pode fornecer altas taxas de transmissão, sendo capaz de possibilitar o acesso à Internet ou a outras redes externas para os clientes da malha em grandes áreas. A RMSF funciona como um *backbone* sem fio estruturado que possibilita a interoperabilidade entre redes



heterogêneas. Os dispositivos que formam um RMSF podem ser equipados de múltiplos rádios e canais o que contribui para aumentar a eficiência da rede.

Uma análise sobre os trabalhos relacionados que tratam o problema de roteamento multiobjetivo em RMSF mostrou que existem abordagens que utilizam várias técnicas para determinar o roteamento em RMSF, porém, boa parte dos trabalhos não apresentam um modelo matemático que represente o problema e não realizam teste com vários tipos de tráfegos. Poucos trabalhos apresentam uma solução que combinem mais do que dois objetivos para o roteamento. Dessa forma, iniciou a adaptação da abordagem descrita no Capítulo 2 para refletir as especialidade das RMSF. Assim, a abordagem adaptada foi intitulada de *Routing Aware of path Length, Link quality, and traffic Load Weighed* (RALLW), as principais alterações para essa abordagem forma realizadas na adaptação das métricas de qualidade dos enlaces e no cálculo do balanceamento da rede (Seções 3.3 e 3.4).

Com a intenção de realizar testes em uma RMSF mais fiel a suas características, utilizamos o simulador ns-3 e um modelo de camada física que possibilita a modelagem de interferência entre canais coexistentes, podendo assim adicionar dispositivos externos a rede para realizar a geração de sinais que causam interferência na comunicação. Os testes foram executados simulando um sistema de monitoramento de idosos que possibilita a geração de tráfegos com perfis diferentes (Seção 3.5).

Após analisar os resultados obtidos foi percebido que as abordagens RALL e RALLW obtiveram resultados semelhantes, mesmo atribuindo importâncias diferentes aos objetivos. Em poucos casos a abordagem RALLW apresentou uma pequena melhoria no desempenho do que a abordagem RALL. No entanto, existem algumas questões que ao serem esclarecidas podem beneficiar o RALLW e o comportamento da rede em cenários mais dinâmicos.

## Considerações Finais e Trabalhos Futuros

---

Neste capítulo são descritas as considerações finais do trabalho referente aos problemas de roteamento multiobjetivo em RSSF e em RMSF discutidos nos Capítulos 2 e 3 respectivamente, em seguida são descritos alguns questionamentos ainda não elucidados e os trabalhos futuros.

### 4.1 Considerações Finais

A popularização da utilização das redes sem fio é alta e continua crescendo, ainda mais com o avanço da redes sem fio de próxima geração (redes 5G) e os cenários existentes em Internet das coisas (IoT) necessitam que as redes sem fio tenham alta eficiência, principalmente para dar suporte a uma grande quantidade de fluxos com diferentes especificações e requisitos. A utilização de tecnologias como a SDN possibilita o emprego de algoritmos de otimização mais eficientes, que necessitem de utilizar a visão global da rede para realizar o controle e a tomada de decisão de forma centralizada e eficiente em uma rede. Além disso, uma das características para esses paradigmas de comunicação é a interoperabilidade entre vários tipos de redes, por exemplo uma Rede de Sensores Sem Fio (RSSF) utilizada para a criação de ambientes inteligentes e uma Rede em Malha Sem Fio (RMSF) utilizada para interligar os vários tipos de rede. Essas redes sem fio apresentam algumas características comuns, porém, cada rede tem as suas especificidades que afetam diretamente o desempenho da rede.

Com base nas restrições e características comuns e específicas dessas duas redes (RSSF e RMSF) desenvolvemos um modelo de otimização multiobjetivo para o problema de roteamento para RSSF e RMSF e propomos dois algoritmos, para determinar as soluções para o roteamento dessas redes, com o objetivo de melhorar o desempenho e demonstrar que a utilização de múltiplos objetivos, para determinar uma solução de roteamento, é eficiente e pode trazer benefícios para os novos paradigmas de comunicação.

Dessa forma, este trabalho foi dividido em duas seções principais uma dedicada ao roteamento em RSSF e suas especificidades e a outra dedicada a RMSF.



Para as RSSF desenvolvemos a heurística *Routing-Aware of path Length, link quality and traffic Load for wireless sensor networks* (RALL) para determinar uma solução para o modelo. Avaliamos a utilização da combinação de três objetivos de forma equilibrada na determinação das rotas em RSSF, analisando a eficiência da rede em algumas métricas, já que na maioria dos trabalhos relacionados pesquisados o problema de roteamento é modelado e/ou resolvido utilizando no máximo dois objetivos para determinar o roteamento.

Após realizar a avaliação da abordagem chegamos a conclusão que a utilização dos três critérios apresentou no geral melhores resultados, sendo melhor do que abordagens que combinam dois objetivos, como por exemplo, abordagens que procuram balancear os fluxos da rede utilizando caminhos curtos. Em todos os cenários a combinação dos três objetivos se mostrou eficiente, principalmente em redes que possuem alta densidade de dispositivos, que são os cenários mais desafiadores por apresentarem uma grande quantidade de possibilidades de rotas, muita variação na qualidade dos enlaces gerada, principalmente por causa da contenção e pela quantidade de dados transmitidos.

Por outro lado, a RMSF apresenta um cenário com mais carga de tráfego, permitindo o tráfego de fluxos de dados com taxas de envio de dados mais elevadas do que a RSSF, além da utilização de múltiplos rádios e canais para aumentar o desempenho da rede. Desta forma, para a RMSF, realizamos a adaptação do algoritmo RALL criando uma nova abordagem intitulada de *Routing Aware of path Length, Link quality, and traffic Load Weighed* (RALLW). Ela mantém a combinação dos três objetivos e os passos principais do algoritmo, entretanto alterações para refletir as especificidades do cenário foram realizadas, bem como teste com combinações de diferentes pesos para cada função objetivo a fim de estabelecer uma preferência que resultasse em melhores resultados em alguns parâmetros de desempenho para aplicações de forma específica.

Avaliamos a eficiência do RALLW para determinar as rotas de uma RMSF, analisando a eficiência da rede em algumas métricas, como vazão, atraso médio e perda de pacotes. O RALLW se mostrou eficiente quando comparada a abordagem BPR [45], que seleciona rotas curtas de forma a deixar o gargalo da rede mínimo, porém, ao ser comparada com a abordagem RALL, mesmo com as adaptações e variações das combinações de pesos a diferença entre as duas abordagens foi muito sutil, somente em alguns casos específicos RALLW obteve desempenho melhor que o RALL. As duas abordagens, RALL e RALLW, apresentam custo computacional similares para cenários em que não existem muitos tipos de fluxos existentes na rede.

Um caso especial em que a abordagem RALLW demonstrou ter melhores resultados é quando existe uma região da rede que não está sofrendo com altos níveis de interferência (situação representada pela utilização de três nós de interferência posicionado) e que a combinação de pesos para a RALLW atribui preferência para a qualidade

dos enlaces, fazendo com que alguns dispositivos tenham rotas mais eficientes do que as atribuídas pela abordagem RALL, no mesmo cenário. Esse comportamento leva a uma hipótese que a combinação entre os pesos das funções objetivos da abordagem RALLW pode resultar em bons resultados em alguns cenários (essa questão é detalhada na próxima seção).

O RALLW, quando utilizado sobre um cenário dinâmico, principalmente onde a qualidade dos enlaces são alteradas com frequência, demonstra uma instabilidade na escolha de rotas eficientes. Isso nos leva a crer que a utilização dos pesos não são factíveis ou necessita de algum mecanismo que os adapte em tempo real em um cenário dinâmico (com maiores graus de mobilidade por exemplo).

## 4.2 Trabalhos Futuros e Questões em Aberto

Um questionamento que carece de mais discussão e avaliação para a abordagem RALLW em RMSF é sobre a combinação entre os pesos das funções objetivos. Um melhor ajuste nas preferências entre os objetivos pode resultar em bons resultados em alguns cenários, apesar de termos realizado testes alterando os valores dos pesos, aparentemente não foi possível estabelecer uma relação entre os caminhos selecionados e os efeitos causados na eficiência da rede. O que se percebe é que se o cenário for instável, uma mesma combinação de pesos, por exemplo, pode obter resultados totalmente diferentes ao analisar a eficiência da rede, por causa de uma pequena variação no perfil dos fluxos (como uma pequena alteração na taxa de envio dos dados ou no tamanho dos pacotes).

Para complementar os estudos e trabalhos realizados sobre o problema de roteamento tanto para RSSF como para RMSF, alguns trabalhos podem contribuir para melhorar a solução e/ou aumenta o entendimento do problema.

- A RSSF é formada por dispositivos que na maior parte do casos possuem altas restrições de processamento, bateria e transmissão de dados, o que limita a quantidade de dados que trafegam na rede, já que facilmente pontos de gargalo serão criados, onerando rapidamente os recursos da rede. Uma forma de tentar melhorar o desempenho da rede, nesse caso, é utilizar dispositivos móveis (podem ser dispositivos externos a RSSF) que entrem na área de cobertura da rede de forma oportunista para aliviar algum ponto de sobrecarga na rede. Então, a abordagem RALL poderia ser alterada para aproveitar esporadicamente a presença desses nós na rede. Outra possibilidade é a inclusão de outras restrições ou funções objetivos no modelo, por exemplo, a maximização da energia residual dos dispositivos.
- Apesar de ter realizado uma série de combinações de pesos para a abordagem RALLW, não foi possível estabelecer uma relação entre a atribuição dos pesos e

os valores obtidos pelas funções objetivos com as métricas de eficiência da rede, mesmo quando um comportamento considerado clássico é encontrado por exemplo: a menor quantidade de saltos deveria resultar em um tempo de atraso menor. Isso acaba não sendo válido para todos os cenários. Dado que outras questões acabam influenciando o desempenho da rede sem fio (qualidade dos enlaces, quantidade de dados trafegando na rede, etc.). Assim, poderíamos empregar um método para descobrir a relação entre as preferências estipuladas para os objetivos do problema e as consequências na eficiência da rede.

- A abordagem RALLW utiliza a soma ponderada como forma de combinar dois objetivos, uma das desvantagens desse método é a não cobertura de todo o conjunto Pareto, assim, é possível que alguma solução que possa fornecer bons resultados de desempenho para a rede não seja selecionada. A utilização de outro método de otimização multiobjetivo, como por exemplo o  $\epsilon$ -Constraints [20], pode fornecer algum resultado interessante. Além dos métodos clássico de otimização multiobjetivo pode ser utilizado algum algoritmo evolutivo para determinar a solução para o problema de roteamento.

---

## Referências Bibliográficas

---

- [1] ACAMPORA, G.; COOK, D. J.; RASHIDI, P.; VASILAKOS, A. V. **A survey on ambient intelligence in healthcare**. *Proceedings of the IEEE*, 101(12):2470–2494, 2013.
- [2] ALANAZI, A.; ELLEITHY, K. **Real-time QoS routing protocols in wireless multimedia sensor networks: Study and analysis**. *Sensors*, 15(9):22209, 2015.
- [3] ALGHAMDI, W. Y.; WU, H.; ZHENG, W.; KANHERE, S. S. **Constructing a shortest path overhearing tree with maximum lifetime in WSNs**. In: *49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS)*, p. 5858–5867, Jan 2016.
- [4] ALWAN, H.; AGARWAL, A. **Multi-objective reliable multipath routing for wireless sensor networks**. In: *IEEE Globecom Workshops*, p. 1227–1231, Dec 2010.
- [5] ALWAN, H.; AGARWAL, A. **Multi-objective qos routing for wireless sensor networks**. In: *Computing, Networking and Communications (ICNC), 2013 International Conference on*, p. 1074–1079, Jan 2013.
- [6] ALWAN, N. A. S. **Performance analysis of dijkstra-based weighted sum minimization routing algorithm for wireless mesh networks**. *Model. Simul. Eng.*, 2014:32:32–32:32, Jan. 2014.
- [7] ATZORI, L.; IERA, A.; MORABITO, G. **The Internet of Things: A survey**. *Computer Networks*, 54(15):2787 – 2805, 2010.
- [8] BALDO, N.; MIOZZO, M. **Spectrum-aware channel and phy layer modeling for ns3**. In: *Proceedings of the Fourth International ICST Conference on Performance Evaluation Methodologies and Tools, VALUETOOLS '09*, p. 2:1–2:8, ICST, Brussels, Belgium, Belgium, 2009. ICST (Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering).
- [9] BECHKIT, W.; KOUDIL, M.; CHALLAL, Y.; BOUABDALLAH, A.; SOUICI, B.; BENAT-CHBA, K. **A new weighted shortest path tree for convergecast traffic routing in WSN**. In: *Computers and Communications (ISCC), IEEE Symposium on*, p. 000187–000192, July 2012.

- [10] BICZOK, G.; DRAMITINOS, M.; TOKA, L.; HEEGAARD, P. E.; LONSETHAGEN, H. **Manufactured by software: Sdn-enabled multi-operator composite services with the 5g exchange.** *IEEE Communications Magazine*, 55(4):80–86, April 2017.
- [11] BORGES, V. C. M.; CURADO, M.; MONTEIRO, E. **Cross-layer routing metrics for mesh networks: Current status and research directions.** *Computer Communications*, 34(6):681 – 703, 2011.
- [12] BOULIS, A. **Castalia: A simulator for wireless sensor networks and body area networks.** *NICTA: National ICT Australia*, 2011.
- [13] BOUSHABA, M.; HAFID, A.; GENDREAU, M. **Source-based routing in wireless mesh networks.** *IEEE systems Journal*, 10(1):262–270, 2016.
- [14] BURRELL, J.; BROOKE, T.; BECKWITH, R. **Vineyard computing: Sensor networks in agricultural production.** *IEEE Pervasive computing*, 3(1):38–45, 2004.
- [15] CERPA, A.; ELSON, J.; ESTRIN, D.; GIROD, L.; HAMILTON, M.; ZHAO, J. **Habitat monitoring: Application driver for wireless communications technology.** *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 31(2 supplement):20–41, 2001.
- [16] CHAN, M.; ESTÈVE, D.; FOURNIOLS, J.-Y.; ESCRIBA, C.; CAMPO, E. **Smart wearable systems: Current status and future challenges.** *Artificial Intelligence in Medicine*, 56(3):137 – 156, 2012.
- [17] CHEN, J.; LIN, R.; LI, Y.; SUN, Y. **LQER: A link quality estimation based routing for wireless sensor networks.** *Sensors*, 8(2):1025, 2008.
- [18] DE BRITO, P. C. G.; MEDEIROS, V. N.; DA CUNHA M. BORGES, V.; SILVESTRE, B. O. **Uma avaliação de desempenho de algoritmos de roteamento multiobjetivos em redes de sensores sem fio.** In: *IV Escola Regional de Informática de Goiás, Goiânia*, p. 221–234, 2016.
- [19] DE MELLO, M. O.; BORGES, V. C.; PINTO, L. L.; CARDOSO, K. V. **Improving load balancing, path length, and stability in low-cost wireless backhails.** *Ad Hoc Networks*, 48:16 – 28, 2016.
- [20] FEI, Z.; LI, B.; YANG, S.; XING, C.; CHEN, H.; HANZO, L. **A survey of multi-objective optimization in wireless sensor networks: Metrics, algorithms, and open problems.** *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 19(1):550–586, Firstquarter 2017.
- [21] FLORIS, A.; ATZORI, L. **Managing the quality of experience in the multimedia internet of things: A layered-based approach.** *Sensors*, 16(12), 2016.

- [22] FLUSHING, E. F.; DI CARO, G. A. **A flow-based optimization model for throughput-oriented relay node placement in wireless sensor networks.** In: *Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on Applied Computing, SAC'13*, p. 632–639, New York, NY, USA, 2013. ACM.
- [23] GAO, T.; PESTO, C.; SELAVO, L.; CHEN, Y.; KO, J.; LIM, J.; TERZIS, A.; WATT, A.; JENG, J.; CHEN, B.-R.; OTHERS. **Wireless medical sensor networks in emergency response: Implementation and pilot results.** In: *Technologies for Homeland Security, IEEE Conference on*, p. 187–192. IEEE, 2008.
- [24] GOMEZ, C.; BOIX, A.; PARADELLS, J. **Impact of LQI-Based routing metrics on the performance of a one-to-one routing protocol for IEEE 802.15.4 multihop networks.** *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, (1):1–20, 2010.
- [25] GÁLVEZ, J. J.; RUIZ, P. M. **Efficient rate allocation, routing and channel assignment in wireless mesh networks supporting dynamic traffic flows.** *Ad Hoc Networks*, 11(6):1765 – 1781, 2013.
- [26] HAMMOUDEH, M.; NEWMAN, R. **Adaptive routing in wireless sensor networks: QoS optimisation for enhanced application performance.** *Information Fusion*, 22:3–15, 2015.
- [27] HAO, Z.; LI, Y. **An adaptive load-aware routing algorithm for multi-interface wireless mesh networks.** *Wireless Networks*, 21(2):557–564, 2015.
- [28] HAYAJNEH, T.; ALMASHAQBEH, G.; ULLAH, S.; VASILAKOS, A. V. **A survey of wireless technologies coexistence in wban: analysis and open research issues.** *Wireless Networks*, 20(8):2165–2199, Nov 2014.
- [29] JAIN, K.; PADHYE, J.; PADMANABHAN, V. N.; QIU, L. **Impact of interference on multi-hop wireless network performance.** *Wirel. Netw.*, 11(4):471–487, July 2005.
- [30] KANG, J.; ZHANG, Y.; NATH, B. **End-to-end channel capacity measurement for congestion control in sensor networks.** In: *Proceedings of the 2nd International Workshop on Sensor and Actor Network Protocols and Applications (SANPA'04)*, 2004.
- [31] KOLODZEY, L.; GRANTCHAROV, P. D.; RIVAS, H.; SCHIJVEN, M. P.; GRANTCHAROV, T. P. **Wearable technology in the operating room: a systematic review.** *BMJ Innovations*, 2016.

- [32] KONAK, A.; COIT, D. W.; SMITH, A. E. **Multi-objective optimization using genetic algorithms: A tutorial.** *Reliability Engineering & System Safety*, 91(9):992 – 1007, 2006.
- [33] LACAGE, M.; HENDERSON, T. R. **Yet another network simulator.** In: *Proceeding from the 2006 Workshop on Ns-2: The IP Network Simulator*, WNS2 '06, New York, NY, USA, 2006. ACM.
- [34] LATRÉ, B.; BRAEM, B.; MOERMAN, I.; BLONDIA, C.; DEMEESTER, P. **A survey on wireless body area networks.** *Wireless Networks*, 17(1):1–18, Jan 2011.
- [35] LOZANO-GARZON, C.; CAMELO, M.; VILA, P.; DONOSO, Y. **A multi-objective routing algorithm for wireless mesh network in a smart cities environment.** *JNW - Journal of Networks*, 10(01):60–69, 2015.
- [36] M. BORGES, V. C.; CARDOSO, K. V.; CERQUEIRA, E.; NOGUEIRA, M.; SANTOS, A. **Aspirations, challenges, and open issues for software-based 5g networks in extremely dense and heterogeneous scenarios.** *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2015(1):164, Jun 2015.
- [37] MACHADO, K.; ROSÁRIO, D.; CERQUEIRA, E.; LOUREIRO, A. A. F.; NETO, A.; DE SOUZA, J. N. **A routing protocol based on energy and link quality for internet of things applications.** *Sensors*, 13(2):1942, 2013.
- [38] MAINWARING, A.; CULLER, D.; POLASTRE, J.; SZEWCZYK, R.; ANDERSON, J. **Wireless sensor networks for habitat monitoring.** In: *Proceedings of the 1st ACM International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications*, p. 88–97. ACM, 2002.
- [39] MALAN, D.; FULFORD-JONES, T.; WELSH, M.; MOULTON, S. **Codeblue: An ad hoc sensor network infrastructure for emergency medical care.** In: *International workshop on wearable and implantable body sensor networks*, volume 5, 2004.
- [40] MARLER, R. T.; ARORA, J. S. **The weighted sum method for multi-objective optimization: New insights.** *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 41(6):853–862, 2009.
- [41] MARLER, R. T.; ARORA, J. S. **The weighted sum method for multi-objective optimization: new insights.** *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 41(6):853–862, Jun 2010.
- [42] MARLET, T.; ARORA, J. S. **Multi-objective Optimization : Concepts and Methods for Engineering.** Saarbrucken : VDM Verlag Dr. Muller, 2009.

- [43] MATOS, R.; COUTINHO, N.; MARQUES, C.; SARGENTO, S.; CHAKARESKI, J.; KASLER, A. **Quality of experience-based routing in multi-service wireless mesh networks.** In: *2012 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, p. 7060–7065, June 2012.
- [44] MEDEIROS, V. N.; DE BRITO, P. C. G.; SILVESTRE, B.; DA C. M. BORGES, V. **Rall: Routing-aware of path length, link quality and traffic load for wireless sensor networks.** In: *Proceedings of the Symposium on Applied Computing, SAC '17*, p. 594–601, New York, NY, USA, 2017. ACM.
- [45] MELLO, M. O. M. C.; BORGES, V. C. M.; DE L. PINTO, L.; CARDOSO, K. V. **Load balancing routing for path length and overhead controlling in wireless mesh networks.** In: *IEEE Symposium on Computers and Communications, ISCC 2014, Funchal, Madeira, Portugal, June 23-26*, p. 1–6, 2014.
- [46] MINHAS, M. R.; GOPALAKRISHNAN, S.; LEUNG, V. C. M. **Multiobjective routing for simultaneously optimizing system lifetime and source-to-sink delay in wireless sensor networks.** In: *Proceedings of the 29th IEEE International Conference on Distributed Computing Systems Workshops, ICDCSW '09*, p. 123–129, Washington, DC, USA, 2009. IEEE Computer Society.
- [47] MOGHADAM, M.; TAHERI, H.; KARRARI, M. **Minimum cost load balanced multipath routing protocol for low power and lossy networks.** *Wireless Networks*, 20(8):2469–2479, 2014.
- [48] MOVASSAGHI, S.; ABOLHASAN, M.; LIPMAN, J.; SMITH, D.; JAMALIPOUR, A. **Wireless body area networks: A survey.** *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 16(3):1658–1686, Third 2014.
- [49] OLIVEIRA, L.; RODRIGUES, J. **Wireless sensor networks: a survey on environmental monitoring.** *Journal of Communications*, 6(2), 2011.
- [50] PUCCINELLI, D.; HAENGGI, M. **Wireless sensor networks: Applications and challenges of ubiquitous sensing.** *IEEE Circuits and Systems Magazine*, 5(3):19–31, 2005.
- [51] RADI, M.; DEZFOULI, B.; RAZAK, S. A.; BAKAR, K. A. **Liemro: A low-interference energy-efficient multipath routing protocol for improving QoS in event-based wireless sensor networks.** In: *Sensor Technologies and Applications (SENSORCOMM)*, p. 551–557, July 2010.



- [52] RAWAT, P.; SINGH, K. D.; CHAOUCHI, H.; BONNIN, J. M. **Wireless sensor networks: A survey on recent developments and potential synergies.** *The Journal of Supercomputing*, 68(1):1–48, 2014.
- [53] RUIZ-GARCIA, L.; LUNADEI, L.; BARREIRO, P.; ROBLA, I. **A review of wireless sensor technologies and applications in agriculture and food industry: State of the art and current trends.** *sensors*, 9(6):4728–4750, 2009.
- [54] SOH, P. J.; VANDENBOSCH, G. A. E.; MERCURI, M.; SCHREURS, D. M. M. P. **Wearable wireless health monitoring: Current developments, challenges, and future trends.** *IEEE Microwave Magazine*, 16(4):55–70, May 2015.
- [55] TRIVISONNO, R.; GUERZONI, R.; VAISHNAVI, I.; SOLDANI, D. **Sdn-based 5g mobile networks: architecture, functions, procedures and backward compatibility.** *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 26(1):82–92, 2015.
- [56] VARGA, A. **The OMNeT++ discrete event simulation system.** In: *Proceedings of the European simulation multiconference*, volume 9, p. 65, 2001.
- [57] WANG, Z.; ZHANG, J. **Interference aware multipath routing protocol for wireless sensor networks.** In: *IEEE GLOBECOM Workshops*, p. 1696–1700, Dec 2010.
- [58] WERNER-ALLEN, G.; JOHNSON, J.; RUIZ, M.; LEES, J.; WELSH, M. **Monitoring volcanic eruptions with a wireless sensor network.** In: *Proceedings of the Second European Workshop on Wireless Sensor Networks.*, p. 108–120. IEEE, 2005.
- [59] ZHOU, A.; QU, B.-Y.; LI, H.; ZHAO, S.-Z.; SUGANTHAN, P. N.; ZHANG, Q. **Multi-objective evolutionary algorithms: A survey of the state of the art.** *Swarm and Evolutionary Computation*, 1(1):32 – 49, 2011.
- [60] ZHU, Z.; LIU, T.; LI, G.; LI, T.; INOUE, Y. **Wearable sensor systems for infants.** *Sensors*, 15(2):3721–3749, 2015.