



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO CEARÁ**  
**IFCE CAMPUS ARACATI**  
**COORDENADORIA DE CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO**  
**BACHARELADO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO**

**MATHEUS GURGEL RIBEIRO**

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE REDES EM MALHA SEM FIO**  
**OPENSOURCE COM MÚLTIPLAS INTERFACES E MÚLTIPLOS**  
**CANAIS EM CENÁRIOS REAIS**

**ARACATI-CE**  
**2017**

MATHEUS GURGEL RIBEIRO

ANÁLISE DE DESEMPENHO DE REDES EM MALHA SEM FIO  
OPENSOURCE COM MÚLTIPLAS INTERFACES E MÚLTIPLOS CANAIS EM  
CENÁRIOS REAIS

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC)  
apresentado ao curso de Bacharelado em  
Ciência da Computação do Instituto Fede-  
ral de Educação, Ciência e Tecnologia do  
Ceará - IFCE - Campus Aracati, como re-  
quisito parcial para obtenção do Título de  
Bacharel em Ciência da Computação.

Orientador: Prof. Dr. Reinaldo Bezerra  
Braga

Aracati-CE  
2017

MATHEUS GURGEL RIBEIRO

ANÁLISE DE DESEMPENHO DE REDES EM MALHA SEM FIO  
OPENSOURCE COM MÚLTIPLAS INTERFACES E MÚLTIPLOS CANAIS EM  
CENÁRIOS REAIS

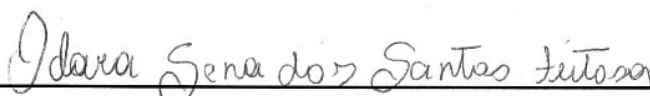
Trabalho de Conclusão de Curso (TCC)  
apresentado ao curso de Bacharelado em  
Ciência da Computação do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE - Campus Aracati, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Ciência da Computação.

Aprovada em 24 de Outubro de 2017

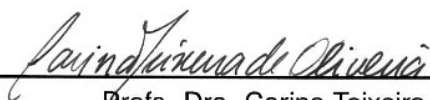
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Reinaldo Bezerra Braga (Orientador)  
Instituto Federal do Ceará - IFCE



Profa. MSc. Odara Sena dos Santos Feitosa  
Instituto Federal do Ceará - IFCE



Profa. Dra. Carina Teixeira de Oliveira  
Instituto Federal do Ceará - IFCE

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho aos meu pais Carlos Alberto e Zélia Maria, as minhas tias Zuleide e Socorro Gurgel e a toda minha família, pois se fizeram presentes nos momentos de dificuldade e me prestaram todo o devido apoio.



## AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus, pois sem ele nada disso seria possível. Agradeço aos meus pais Carlos Alberto e Zélia Maria por todo apoio e referências prestadas não só durante estes quatro anos, mas durante toda a vida. Agradeço as orações, os concelhos e até as *brincas*, pois em especial, estas me fizeram ser melhor para não recebê-las mais. E por mais que eu não demonstre muitas vezes, agradeço por tudo, amo vocês.

À toda minha família, minhas tias Zuleide Gurgel e Socorro Gurgel em especial. Estas prestaram-me todo o apoio e deram-me suporte não só durante a graduação, mas durante a vida. Agradeço *de coração* por todo suporte, esforço e apoio.

Agradeço aos amigos que fiz durante esta jornada, por todas as brincadeiras, apoio, concelhos e gargalhadas trocadas nestes "*anos de IFCE*", nosso LAR. Dentre todos, agradecimentos especiais aos amigos Marcos Antônio e Alex Lima, pessoas excelentes com quem tive o prazer de conviver e que guardarei para toda a vida. Foram várias as dificuldades enfrentadas, mas cá estamos nós. *Touché, "Sobrevivemos!"*

Agradeço a todos os professores com quem tive o prazer de aprender e compartilhar conhecimentos. Vocês foram muito importantes em minha formação. Aos professores "*exceleeeeeentes*" Mauro Oliveira e Carina Oliveira, que "de repita em repita", guiaram-me com muita sabedoria, vocês são referência. Agradecimentos especiais ao meu orientador e amigo Prof. Dr. Reinaldo Braga, que com paciência e dedicação se prestava sempre a disposição para me ajudar na elaboração deste trabalho. Guardarei os ensinamentos e conselhos. Grato aos três pela guia, influência e contribuição em minha vida atual e futura, acadêmica e profissional.

Gostaria de agradecer também à FUNCAP (Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico) por ter financiado o projeto PrESP (Uma Proposta baseada em informações Espaço-temporais para identificar Similaridade de interesses entre usuários em redes de Próxima geração) edital Nº 09/2015, ao qual fui vinculado como bolsista. Grato pelo suporte financeiro que custeou toda a pesquisa da qual este trabalho teve base e também pela oportunidade.

À banca avaliadora, especificamente os professores: Reinaldo Bezerra Braga, Carina Texeira de Oliveira e Odara Sena dos Santos Feitosa por terem aceitado o convite para participar da banca de avaliação. Agradeço aos apontamentos pertinentes que enriqueceram e contribuíram para melhoria deste trabalho e para minha formação.

Aos amigos e companheiros do Laboratório Avançado de Redes do Aracati, "são vocês que fazem este laboratório ser diferente. Vocês são a diferença". Aos funcionários e todas as pessoas que colaboram para o crescimento e continuidade do IFCE Campus Aracati, pois sem vocês este campus seria apenas mais um. Por fim,

disseram-me no início do curso: "Vocês não podem entrar por aquela porta e saírem os mesmos. Vocês devem sempre que passar por ela, serem melhores!". Com as palavras do professor e filósofo Mauro Oliveira, abro espaço à reflexão e encerro os agradecimentos.

## RESUMO

Com a popularização do IoT (Internet das coisas - *Internet of Things*) e o avanço da tecnologia, bilhões de objetos heterogêneos são esperados para os próximos anos, e estes necessitarão de qualidade de acesso e conexão a Internet. As redes em malha sem fio (WMN - *Wireless Mesh Network*) têm sido apontadas como uma das principais tecnologias para atender os desafios de mobilidade e cobertura para redes do futuro. Mesmo com a popularização das WMN no meio acadêmico de pesquisa, a maior parte das validações e experimentos ainda são em ambientes simulados. Isto pode ocorrer por diversos motivos, como a facilidade de configuração e a boa precisão dos ambientes simulados, problemas com software proprietário, dentre outros motivos. Apesar de ambientes simulados se aproximarem bastante dos resultados obtidos em ambientes reais, aspectos como a interferência no meio físico são de extrema relevância no desempenho das redes e de difícil precisão em ambientes simulados. Neste sentido, testes ambientes reais possuem mais precisão que ambientes simulados e permitem uma melhor avaliação destas redes. De todo modo, na literatura existem vários trabalhos em ambientes reais, mas poucos testes com múltiplos canais e múltiplas interfaces. Deste modo, neste trabalho são apresentadas análises e experimentos feitos em ambientes reais de redes em malha sem fio tanto com um único canal e uma interface, quanto múltiplos canais com múltiplas interfaces no uso dos protocolos B.A.T.M.A.N., AODV e HWMP para seleção de rotas com equipamentos de baixo e médio custo. É apresentado ainda um estudo acerca da heterogeneidade de equipamentos e o impacto no desempenho das redes em malha sem fio.

**Palavras-chave:** WMN. Múltiplos Canais. Ambientes Reais. Baixo Custo.

## **ABSTRACT**

With Internet of Things (IoT) popularization and advance of technology, billions of heterogeneous objects are expected over the next few years, and these will require access quality and Internet connectivity. WMNs have been defined as one of the leading technologies to meet the mobility and coverage challenges for future networks. Even with popularization of WMNs in the academic research environment, most validations and experiments are still in simulated environments. This can occur for several reasons, such as the facility to setup and the good accuracy of the simulated environments, avoiding problems with proprietary software, among other reasons. Although simulated environments are very close to the results obtained in real environments, aspects such as interference in the physical environment are extremely relevant in network performance and difficult to accurately analyze in simulated environments. In this sense, real-world tests have more precision than simulated environments and allow a better evaluation of these networks. However, there are several works in real environments in the literature, but few tests with multiple channels and multiple interfaces. In this work, we present results of experiments done in real wireless network environments with a single channel and single interface, as well as multiple channels with multiple interfaces in the use of BATMAN, AODV and HWMP protocols to select routes, with equipment of low and medium cost. A study is also presented on the heterogeneity of equipment and the impact on the wireless mesh network performance.

**Keywords:** WMN. Multiple Channel. Real Environments. Low cost.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 – Padrão IEEE para classificação das redes sem fio. . . . .   | 25 |
| Figura 2 – Parte da Pilha de Protocolos IEEE 802.11. . . . .   | 26 |
| Figura 3 – Elementos de uma rede sem fio 802.11. . . . .   | 27 |
| Figura 4 – Modo de infraestrutura de LAN IEEE 802.11. . . . .  | 29 |
| Figura 5 – Rede ad hoc IEEE 802.11. . . . .  | 30 |
| Figura 6 – Taxa de erro de bits, taxa de transmissão e SNR. . . . .  | 33 |
| Figura 7 – Problema do terminal oculto. . . . .  | 34 |
| Figura 8 – Problema do Desvanecimento. . . . .   | 35 |
| Figura 9 – Reconhecimento da camada de enlace. . . . .   | 39 |
| Figura 10 – Transmissão de um quadro com CSMA/CA. . . . .  | 41 |
| Figura 11 – Exemplo de terminal oculto. . . . .  | 41 |
| Figura 12 – Prevenção de colisão usando quadros RTS e CTS. . . . .   | 43 |
| Figura 13 – Exemplo de detecção de canal virtual (NAV) com CSMA/CA. . . . .  | 44 |
| Figura 14 – Arquitetura de Rede em Malha IEEE 802.11s. . . . .   | 46 |
| Figura 15 – Possível topologia de uma rede <i>mesh</i> em um ambiente doméstico. . . . .   | 47 |
| Figura 16 – Possível topologia de uma rede <i>mesh</i> comunitária em uma vizinhança. . . . .  | 48 |
| Figura 17 – Possível topologia de uma rede <i>mesh</i> empresarial inter prédios. . . . .  | 49 |
| Figura 18 – Possível topologia de uma rede <i>mesh</i> metropolitana. . . . .  | 50 |
| Figura 19 – Possível topologia de uma rede <i>mesh</i> com sensores na borda. . . . .  | 51 |
| Figura 20 – Seleção de três canais ortogonais (1, 6 e 11) com o IEEE 802.11b/g/n na banda de 2,4 GHz. . . . .  | 51 |
| Figura 21 – Modos de Operação do Protocolo HWMP. . . . .   | 57 |
| Figura 22 – Ilustração da construção de uma rota no protocolo HWMP no modo reativo através de pacotes de requisição de caminho (PREQ) e um pacote de resposta de caminho (PREP). . . . . | 58 |
| Figura 23 – Ilustração da construção da árvore de caminhos no protocolo HWMP no modo proativo através de quadros de anúncio RANN e respostas PREG). . . . .                              | 59 |
| Figura 24 – Ilustração de quebra no caminho do fluxo de dados e notificação de erro no caminho. . . . .  | 60 |
| Figura 25 – Cenários de rede considerados para os experimentos do trabalho. . . . .  | 68 |
| Figura 26 – Equipamentos utilizados para construção da rede em malha. . . . .  | 69 |
| Figura 27 – Interfaces de configuração do usuário no OpenWrt. . . . .  | 73 |
| Figura 28 – Exemplo de saída do iPerf 3. . . . .   | 74 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 29 –Gráfico representativo do número de perdas de pacote por canal na banda 2,4 GHz. . . . .  | 78 |
| Figura 30 –Análise do impacto da distância no desempenho das conexões entre nós da malha. . . . .  | 80 |
| Figura 31 –Explicação das terminologias HE e HO. . . . .   | 82 |
| Figura 32 –Desempenho de conexões homogêneas e heterogêneas configuradas em mono e multi-canais em função do número de saltos - Protocolo TCP. . . . . | 84 |
| Figura 33 –Desempenho de conexões homogêneas e heterogêneas configuradas em mono e multi-canais em função do número de saltos - Protocolo UDP. . . . . | 85 |
| Figura 34 –Desempenho dos protocolos em função do número de saltos - Protocolo UDP. . . . .  | 87 |

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1 – Padrões IEEE 802.11 e suas características. . . . .  | 26 |
| Tabela 2 – Especificações do roteador TP-LINK TL-WR842ND utilizado na composição do primeiro cenário de teste. . . . .                        | 70 |
| Tabela 3 – Especificações do roteador PC Engines ALIX3D3 utilizado na composição do segundo cenário de teste. . . . .                         | 71 |
| Tabela 4 – Parâmetros de configuração para análise de canais. . . . .   | 76 |
| Tabela 5 – Análise da qualidade dos canais no ambiente de avaliação. . .  | 77 |
| Tabela 6 – Parâmetros de configuração para análise da distância. . . . .  | 78 |
| Tabela 7 – Parâmetros de configuração para análise de heterogeneidade dos dispositivos através do TCP. . . . .                                | 83 |
| Tabela 8 – Parâmetros de configuração para análise de heterogeneidade dos dispositivos com UDP. . . . .                                       | 83 |
| Tabela 9 – Parâmetros de configuração para análise do impacto do número de saltos e dos protocolos de roteamento para redes em malha. . . . . | 86 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|                  |   |
|------------------|---|
| ACK              | <i>Acknowledgment</i>   |
| Anatel           | Agência Nacional de Telecomunicações  |
| AODV             | <i>Ad-hoc On-demand Distance Vector</i>                                       |
| AP               | <i>Access Point</i> (Ponto de Acesso)   |
| B.A.T.M.A.N.     | <i>Better Approach To Mobile Adhoc Networking</i>                             |
| B.A.T.M.A.N. ADV | <i>Better Approach To Mobile Adhoc Networking ADVanced</i>                    |
| BER              | <i>Bit Error Rate</i> (Taxa de erro de bit)                                   |
| BSS              | <i>Basic Service Set</i>  |
| BSSID            | <i>Basic Service Set Identifier</i>   |
| COTS             | <i>Commercial off-the-shelf</i>   |
| CRC              | <i>Cyclic redundancy check</i> (Verificação de Redundância Cíclica)           |
| CSMA/CA          | <i>Carrier Sense Multiple Access with Collision avoidance</i>                 |
| CSMA/CD          | <i>Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection</i>                 |
| CTS              | <i>Clear To Send</i> (Livre para enviar)                                      |
| DCF              | <i>Distributed Coordination Functions</i> (Função de Coordenação distribuída) |
| DFW-MAC          | <i>Distributed Foundation Wireless Medium Access Control</i>                  |
| DIFS             | <i>Distributed Inter Frame Space</i>  |
| DSDV             | <i>Destination-Sequenced Distance-Vector</i>                                  |
| DSR              | <i>Dynamic Source Routing</i>   |
| ESS              | <i>Extended Service Set</i>   |
| ESSID            | <i>Extended Service Set Identifier</i>  |
| ETT              | Estimated Transmission Time   |
| ETX              | Estimated Transmission Count  |



|       |   |
|-------|---|
| HWMP  | <i>Hybrid Wireless Mesh Protocol</i>  |
| IEEE  | <i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> (O Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos ou Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos) |
| IFCE  | Instituto Federal do Ceará  |
| IFS   | <i>Inter Frame Space</i>  |
| IOT   | <i>Internet of Things</i> (Internet das Coisas)   |
| ISM   | <i>Industrial, Scientific and Medical</i>   |
| LAN   | Local Area Network (Área de Rede Local)   |
| LLC   | <i>Link Logical Control</i>   |
| MAC   | <i>Media Access Control</i> (Controle de Acesso ao Meio)  |
| MAN   | <i>Metropolitan Area Network</i> (Área de Rede Metropolitana)   |
| MANET | <i>Mobile Ad hoc Network</i> (Redes ad hoc Móveis)  |
| MC    | Múltiplos Canais  |
| MCHE  | Múltiplos Canais HEterogêneos   |
| MCHO  | Múltiplos Canais HOmogêneos   |
| MCTI  | Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação  |
| MIMC  | Múltiplas Interfaces e Múltiplos Canais   |
| MIMO  | <i>Multiple Input, Multiple Output</i>  |
| MIT   | Massachusetts Institute of Technology   |
| ML    | Minimum Loss  |
| NASA  | National Aeronautics and Space Administration   |
| NAV   | <i>Network Allocation Vector</i> (Vetor de Alocação de Rede)  |
| NIC   | <i>Network Interface Card</i> (Cartão de Interface de Rede)   |
| NS-3  | <i>Network Simulator 3</i>  |
| OFSR  | <i>Optimized Fish-eye Link State Routing</i>  |
| OGM   | OriGinator Message  |

|          |   |
|----------|---|
| OLSR     | <i>Optimized Link State Routing</i>   |
| OLSR-ML  | Optimized Link State Routing - Minimum Loss                                 |
| OSI      | Interconexão de sistemas abertos  |
| PC       | Personal Computer   |
| PCF      | <i>Point Coordination Function</i>  |
| PERR     | <i>Path Error</i> (Erro de Caminho)   |
| PHY      | <i>Physical Layer</i> (Camada Física)                                       |
| PIFS     | <i>Priority Inter Frame Space</i>   |
| PREG     | Path REGistration   |
| PREP     | <i>Path Replay</i> (Resposta de Caminho)                                    |
| PREQ     | <i>Path Request</i> (Requisição de Caminho)                                 |
| QoS      | <i>Quality of Service</i> (Qualidade de Serviço)                            |
| RANN     | <i>Root Announcement</i> (Anúncio de Raiz)                                  |
| RF       | Rádio Frequência  |
| RREP     | Route REPLY   |
| RREP-ACK | Route Reply Acknowledgment  |
| RREQ     | Route REQuest   |
| RRER     | Route ERRor   |
| RSSF     | Rede de Sensores Sem Fio  |
| RTS      | <i>Request to Send</i> (Requisição para Enviar)                             |
| SCTP     | Stream Control Transmission Protocol  |
| SIFS     | <i>Short Inter Frame Space</i>  |
| SNR      | <i>Signal-To-Noise Ratio</i> (Relação Sinal Ruído)                          |
| TCP      | <i>Transmission Control Protocol</i> (Protocolo de controle de transmissão) |
| TTL      | Time To Live  |

|        |  |
|--------|--|
| UC     | Único Canal  |
| UCHE   | Único Canal HEterogêneo  |
| UCHO   | Único Canal HOmogêneo  |
| UDP    | <i>User Datagram Protocol</i>  |
| UFF    | Universidade Federal Fluminense  |
| USB    | <i>Universal Serial Bus</i>  |
| VANETs | <i>Veicular Ad Hoc Networks</i> (Redes ad hoc Veiculares)                      |
| Wi-Fi  | <i>Wireless Fidelity</i> (Fidelidade Sem Fio)                                  |
| WLANs  | <i>Redes Locais Sem Fio</i>  |
| WMAN   | <i>Wireless Metropolitan Area Network</i> (Área de Rede Metropolitana Sem fio) |
| WMN    | <i>Wireless Mesh Network</i> (Redes em Malha Sem fio)                          |
| WPAN   | <i>Wireless Personal Area Network</i> (Área de Rede pessoal sem fio)           |
| WWAN   | <i>Wireless Wide Network</i> (Rede sem fio de longa distância)                 |

## SUMÁRIO

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO</b>                                | <b>18</b> |
| <b>2</b> | <b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>                     | <b>24</b> |
| 2.1      | Redes Locais Sem Fio Padrão IEEE 802.11          | 24        |
| 2.1.1    | Arquitetura                                      | 27        |
| 2.1.1.1  | Modo de Infraestrutura                           | 28        |
| 2.1.1.2  | Modo ad hoc                                      | 29        |
| 2.2      | Características de Enlaces e Redes Sem Fio       | 31        |
| 2.2.1    | Redução da força do sinal                        | 31        |
| 2.2.2    | Interferência de outras fontes                   | 31        |
| 2.2.3    | Propagação multivias                             | 32        |
| 2.2.4    | SNR - Signal-To-Noise Ratio                      | 32        |
| 2.2.5    | Problema do terminal oculto                      | 33        |
| 2.2.6    | Desvanecimento                                   | 34        |
| 2.3      | Controle de Acesso ao Meio - MAC                 | 35        |
| 2.3.1    | MAC IEEE 802.3                                   | 35        |
| 2.3.2    | Protocolo DFWMAC para acesso ao meio             | 37        |
| 2.3.3    | Função de Coordenação Distribuída - DCF          | 38        |
| 2.3.3.1  | CSMA/CA  | 38        |
| 2.3.3.2  | Tratamento de Terminais Ocultos com RTS e CTS    | 40        |
| 2.3.4    | Vetor de Alocação de Rede - NAV                  | 42        |
| 2.3.5    | Função de Coordenação Pessoal - PCF              | 44        |
| 2.4      | Redes em Malha Sem Fio                           | 44        |
| 2.4.1    | Arquitetura de uma Rede Mesh                     | 45        |
| 2.4.2    | Cenários de Aplicação                            | 46        |
| 2.4.2.1  | Redes domésticas                                 | 46        |
| 2.4.2.2  | Redes de acesso comunitário                      | 47        |
| 2.4.2.3  | Redes Universitárias                             | 48        |
| 2.4.2.4  | Redes Empresariais                               | 48        |
| 2.4.2.5  | Redes Metropolitanas                             | 49        |
| 2.4.2.6  | Redes de Sensores                                | 50        |
| 2.4.3    | WMN com Múltiplos Canais Múltiplas Interfaces    | 50        |
| 2.4.4    | Estratégias de Atribuição de Canais e Interfaces | 52        |
| 2.5      | Protocolos de Roteamento                         | 53        |
| 2.5.1    | Protocolo B.A.T.M.A.N.                           | 53        |

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| 2.5.2    | Protocolo AODV   | 55        |
| 2.5.3    | Protocolo HWMP   | 56        |
| 2.5.3.1  | Roteamento Reativo   | 57        |
| 2.5.3.2  | Roteamento Proativo  | 58        |
| 2.5.3.3  | Modo Híbrido   | 60        |
| 2.5.3.4  | Detecção de Alterações na Topologia                                | 60        |
| 2.6      | Trabalhos Relacionados   | 61        |
| <b>3</b> | <b>PROPOSTA</b>  | <b>67</b> |
| 3.1      | Cenário de Experimentação  | 67        |
| 3.1.1    | Cenário de testes 1  | 69        |
| 3.1.2    | Cenário de testes 2  | 70        |
| 3.2      | Ferramentas de Software  | 71        |
| 3.2.1    | OpenWrt  | 71        |
| 3.2.2    | iPerf 3  | 74        |
| <b>4</b> | <b>RESULTADOS</b>  | <b>76</b> |
| 4.1      | Análise da Qualidade dos Canais                                    | 76        |
| 4.2      | Impacto da distância no desempenho da comunicação entre nós        | 77        |
| 4.3      | Análise do número de saltos e heterogeneidade dos equipamentos     | 80        |
| 4.4      | Análise do número de saltos e impacto dos protocolos de roteamento | 85        |
| <b>5</b> | <b>CONCLUSÕES</b>  | <b>89</b> |
|          | <b>REFERÊNCIAS</b>   | <b>92</b> |

# 1 INTRODUÇÃO

O crescente avanço da tecnologia e a maior facilidade de aquisição de equipamentos eletrônicos têm aumentado a gama de dispositivos conectados à Internet. Devido à popularização da Internet das coisas (Internet of Things - IOT), o surgimento de bilhões de dispositivos com características heterogêneas, é esperado nos próximos anos, juntamente de um aumento significativo no tráfego da Internet (SANTOS et al., 2016). De acordo com o Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) e a Agência Nacional de Telecomunicações (Anatel), no Brasil há 20 milhões de conexões entre objetos inteligentes podendo chegar a 43 milhões em 2020. Globalmente, estima-se cerca de 50 bilhões de dispositivos conectados para 2020 (ALBERTIN; MARIA, 2017).

Os dispositivos IoT dispõem de características que os possibilitam coletar, trocar informações e interagir com o ambiente (SANTOS et al., 2016) e precisarão de qualidade de acesso e conexão com a Internet. Neste sentido, torna-se necessário a compreensão inteligente das infraestruturas de rede para obter avanços em termos de inovação na configuração e gerenciamento dos meios de transmissão de dados. Esta compreensão deve ser feita a fim de atender as necessidades dos usuários e de suportar de maneira eficiente o tráfego e a quantidade de equipamentos conectados.

Os dispositivos IoT possuem diversas características heterogêneas e diferentes tipos. Estes podem ser desde sensores com uma finalidade específica até mesmo *smartphones*. O uso destes dispositivos com necessidade de acesso à Internet para obter conexão com o ambiente, juntamente da necessidade de mobilidade tem impulsionado o uso das redes sem fio (BRITO; VELLOSO; MORAES, 2014), principalmente no padrão IEEE 802.11 (MONTEIRO et al., 2016). Diversos dispositivos heterogêneos (*smartphones*, tablets, laptops, sensores, etc.) conectam-se a estas redes a fim de obter acesso à Internet (SANTOS et al., 2016). Em geral, os dispositivos conectam-se a um ponto de acesso (Access Point - AP) que está conectado à rede mundial de computadores, servindo como gateway. Deste modo, os dispositivos associados ao AP conseguem acesso à Internet.

Para conectar-se aos APs, basta que os dispositivos clientes (*smartphones*, tablets, notebooks, sensores, etc.) façam uso do mesmo padrão wireless e utilizem a mesma banda de frequência. Uma vez conectados, os dispositivos podem transitar livremente por uma determinada região de espaço sem perder a conexão com o ponto de acesso, desde que esteja dentro da área de cobertura do AP ao qual o usuário está conectado. Assim, torna-se desnecessário o uso de um cabo que limita a mobilidade do usuário por seu comprimento, como em redes cabeadas convencionais

([KARTHIKA, 2016](#)).

Dois fatores que contribuíram para a popularização das redes IEEE 802.11 são o acesso transparente à Internet e a necessidade de mobilidade dos usuários. Essa mobilidade, porém, é limitada pelo alcance da cobertura de um AP, como descrito anteriormente, impedindo assim, que um determinado cliente possa transitar por áreas significativamente grandes que ultrapassem os limites de cobertura do ponto de acesso. Deste modo, um cliente que deseja estar conectado o tempo todo durante um trajeto de um ponto *A* a um ponto *B* por tal área, deve enquanto transita, conectar-se a diversas redes ao longo do caminho para ter acesso à Internet durante todo seu trajeto.

Trocar de rede manualmente a cada novo ponto de acesso encontrado pode vir a ser uma tarefa um tanto quanto exaustiva, além do desconforto e problemas que podem ser gerados devido da queda de conexão que ocorre ao sair de uma determinada rede e entrar em outra. Neste sentido, a mobilidade deve ser provida sem quedas e interrupções de maneira transparente como ocorre na conexão a um único ponto de acesso (AP). No entanto, é um desafio nesse cenário possibilitar que os usuários se movam por meio das diferentes redes e mantenham suas comunicações com qualidade e segurança ([ABID et al., 2012](#)).

As Redes em Malha sem fio (*Wireless Mesh Network* – WMN) são redes com topologia dinâmica, variável e de fácil expansão, constituídas por nós cuja comunicação, no nível físico, é feita através de variantes dos padrões IEEE 802.11 e 802.16, e cujo roteamento é dinâmico ([ABELÉM<sup>1</sup> et al., 2007](#); [CHENG et al., 2015](#)). As WMNs abordam as limitações existentes nas redes convencionais ([BARI; ANWAR; MASUD, 2012a](#)), cobrem uma vasta área e ainda contam com baixo custo de implantação (se comparadas às redes convencionais), se tornando assim, uma alternativa viável para solucionar problemas de mobilidade e cobertura ([BARI; ANWAR; MASUD, 2012a](#)).

As WMNs são compostas por roteadores sem fio, chamados roteadores mesh, que são interligados para formar um *backbone* de múltiplos saltos. Esses roteadores mesh não possuem um nó controlador central, sendo totalmente descentralizados. Esta característica provê, através do protocolo IEEE 802.11s ([IEEE 802.11s, 2011](#)), serviços como auto-organização e auto configuração, tornando a rede tolerante a falhas caso algum dos nós torne-se inoperante. Além disso, uma WMN pode ser implantada incrementalmente pela simples adição de um novo nó (roteador sem fio) na rede para uma maior área de cobertura de serviços ([NASSEREDDINE; MAACH; BEN-NANI, 2009](#); [KARTHIKA, 2016](#)), de acordo com a necessidade da rede, fornecendo assim escalabilidade.

Sendo uma variação do protocolo IEEE 802.11, o IEEE 802.11s permite a criação de redes em malha (ou em grade) com capacidade e facilidade de expansão e

adaptação para uso em diversos cenários (CHENG et al., 2015). Neste sentido, as WMNs solucionam o problema da mobilidade de um usuário que transita por uma área extensa, como descrito anteriormente, mas adiciona outros problemas. Por exemplo, a expansão e a implantação destas redes de forma heterogênea com roteadores de diferentes fabricantes e arquiteturas de *hardware*, apesar de que, por definição, a facilidade de expansão da rede ter sido citada antes. Neste sentido, equipamentos de uma determinada marca  $X$  e arquitetura  $Y$ , podem ter problemas de comunicação e implantação se à rede fossem adicionados também roteadores da marca  $A$  com arquitetura  $B$ . Isto ocorre devido a maior parte dos equipamentos de mercado no padrão IEEE 802.11s possuírem *software* proprietário, o que torna difícil mudanças e a manipulação parcial ou total, visto que o acesso a informações específicas e à configuração detalhada estão muitas vezes inacessíveis ou desabilitadas.

Devido às dificuldades apresentadas, o uso de simuladores de rede, tais como o NS-3 (2017) para a validação de estudos acadêmicos é mais comum que testes em cenários reais (ABID; BENBRAHIM; BIAZ, 2010). Os simuladores permitem ao usuário, criar redes homogêneas e/ou heterogêneas, sem limites no número de dispositivos usados (MACIEL et al., 2014), além de necessitar apenas de uma máquina física para emular todos os dispositivos criados via *software*. A ausência de altos custos de aquisição, instalação, configuração e manutenção de equipamentos da infraestrutura de rede, também é um de seus principais atrativos. Tais recursos citados, possibilitam criar diversos cenários com diversas configurações nos mais variados tipos de ambiente de rede. Como exemplo, podem ser citadas as redes Ethernet, Celular, Wi-Fi, Sensores e até mesmo as redes *mesh* (MACIEL et al., 2014).

Apesar dos simuladores serem bem aceitos no meio acadêmico e de se aproximarem bastante da maioria das aplicações no mundo real, alguns fatores são cruciais e afetam grande parte do desempenho das redes *wireless*. Um exemplo desses fatores é a propagação de RF (Rádio Frequência), que é de suma importância na determinação dos níveis de interferência (ABID; BENBRAHIM; BIAZ, 2010; LAUFER; KLEINROCK, 2016). A interferência pode vir do meio físico, por exemplo, que é variável e há um déficit nesse quesito em grande parte dos simuladores, não reproduzindo assim, resultados tão fiéis em ambientes simulados quanto em *testbeds* reais. Neste sentido, a validação de experimentos em ambientes reais é mais precisa que ambientes simulados (ABID; BENBRAHIM; BIAZ, 2010).

Sendo a dificuldade de mudanças e a incompatibilidade de equipamentos para criação de redes *mesh*, duas de suas principais dificuldades, existem *softwares* de código aberto (*Open Source*) bem definidos e aceitos na comunidade acadêmica que se propõem à criação de redes em malha sem fio. Neste sentido, o OpenWRT (2017) é um *firmware* de distribuição Linux para sistemas embarcados compatível com a



maioria dos roteadores com arquitetura ar71xx. O mesmo já foi usado na validação de diversos trabalhos acadêmicos tais como (BAROLLI et al., 2016; ASRIADI et al., 2015; DUTT; HABIBI; AHMAD, 2012). Por ser uma distribuição livre e totalmente *open source*, o usuário possui controle total para configuração e personalização do *firmware* de acordo com a necessidade, apenas pela adição de pacotes presentes no repositório do OpenWrt.

Mesmo a maioria dos dispositivos de mercado possuindo *firmwares* proprietários, estes podem ser removidos e ainda substituídos por distribuições Linux. O OpenWrt pode ser embarcado em diversos modelos de roteadores e possibilita a criação de redes em malha sem fio, solucionando os problemas com *software* proprietário anteriormente citados. Vale ressaltar ainda, que o suporte do *software* é dado pela comunidade assim como as demais distribuições Linux e que, apesar do suporte prestado e da documentação oficial, o uso de alguns ou vários recursos prestados são de difícil acesso e necessitam de um certo grau de conhecimento.

Uma das principais características das WMNs, a escalabilidade, é também uma de suas principais fraquezas. Com o crescimento e expansão da rede, o número de nós aumenta. E, em consequência disso, o número de saltos que um pacote precisa percorrer de sua origem ao seu destino, também. Uma WMN deve suportar os limites mínimos exigidos de qualidade de serviço (*Quality of Service* - QoS) (HILARIO et al., 2007; GOMES et al., 2010; JIN; WANG; FENG, 2012), e um número elevado de nós na rede acarretaria na passagem dos pacotes por meio de diversos nós entre origem e destino podendo gerar perda, atrasos e baixas taxas de transferência de modo que ultrapassem estes limites. Portanto, a escolha de um bom protocolo de roteamento torna-se crucial e impacta diretamente no desempenho, definindo o sucesso ou fracasso de determinada rede (IBRAHIM et al., 2013), dado que este fará, por exemplo, o tratamento e seleção de caminho para os dados que trafegam na rede.

O desempenho de uma WMN depende do protocolo de roteamento e das métricas utilizadas pelo mesmo (BARI; ANWAR; MASUD, 2012b). Existem diversos protocolos tais como o B.A.T.M.A.N (Better Approach To Mobile Adhoc Networking) (JOHNSON; NTLATLAPA; AICHELE, 2008), OLSR (Optimized Link State Routing) (CLAUSEN; JACQUET, 2003), AODV (Ad-hoc On-demand Distance Vector) (PERKINS; BELDING-ROYER; DAS, 2003), OFSR (Optimized Fish-eye Link State Routing), DSR (Dynamic Source Routing), HWMP (Hybrid Wireless Mesh Protocol) dentre outros. Este último, o HWMP, é o protocolo padrão utilizado pela IEEE 802.11s (IEEE 802.11s, 2011) o qual possui mecanismos para seleção de caminhos e encaminhamento de pacotes através de múltiplos saltos na camada de enlace. A seleção de caminhos é feita pelos próprios nós de forma descentralizada e todos são capazes de fazê-la. O HWMP é um protocolo híbrido (opera em modo reativo e pró-ativo) e foi ba-

seado no protocolo AODV, adaptado para operar na camada de enlace. Sua intenção é funcionar fazendo uso das vantagens utilizadas pelas abordagens proativa e reativa, para fazer a seleção de caminho entre os nós.

Ao projetar uma WMN, deve ser considerada a interação entre roteamento e atribuição de canais. Este é um fator importante que influencia o desempenho da rede (QU; NG; SEAH, 2016) pois grande parte destas, possuem diversos dispositivos móveis com conexão sem fio padrão IEEE 802.11/b/g/n na banda ISM 2,4GHz (ISM - *Industrial, Scientific and Medical*). O ISM 2,4GHz é dividido em 14 canais (cuja a utilização depende da região) separados por uma frequência de 5MHz com largura de banda de 22MHz cada. Isso gerou uma maior concorrência por porções de frequência, nesta banda, disponíveis para sua utilização nas redes sem fio. Esta concorrência acarretou na diminuição da qualidade do tráfego das redes e um aumento na quantidade de ruído gerado (MONTEIRO et al., 2016).

Foi visto os problemas com alocação de canais, sua pequena quantidade e interferência. Sabendo disto, o uso devido de tais recursos possui influência no desempenho das redes. Neste sentido, uma forma de melhorar o desempenho das WMNs, é fazendo uso de múltiplos canais ortogonais (i.e., livres de interferência inter-canais) para que assim diversos roteadores mesh possam funcionar de forma simultânea em diferentes canais (OLIVEIRA; THEOLEYRE; DUDA, 2012). Na utilização desta estratégia, é possível distribuir a carga entre os canais ortogonais disponíveis para permitir a comunicação simultânea de fluxos, ao mesmo tempo em que minimiza os problemas de interferência e de congestionamento do canal.

Deste modo, a vazão da rede pode ser aumentada e o atraso reduzido. Neste sentido, os roteadores mesh podem ser equipados com mais de uma interface de rede, NIC (*Network Interface Card*), para se utilizar com maior eficiência dos canais ortogonais disponíveis. As principais vantagens dessa abordagem são: permitir a operação *full-duplex* em cada roteador; transportar tráfego livre de interferência entre enlaces vizinhos alocados em canais ortogonais, reduzindo o atraso da camada de enlace (ISLAM et al., 2016); e aumentar a quantidade de caminhos para o roteamento de pacotes (NETO et al., 2014). É interessante ressaltar ainda, que o protocolo HWMP não foi projetado para o uso com múltiplas interfaces e múltiplos canais (MIMC) mas o mesmo pode ser adaptado para funcionar com tal proposta.

Neste trabalho, são apresentadas questões práticas ainda não abordadas sobre a implantação de uma WMN multi-interface e multicanal *open source* de baixo custo com características homogêneas e heterogêneas em nível PHY, realizando uma análise de desempenho de uma rede real em diversos cenários. Entender finamente os limites dessas redes em termos de *hardware* e *software* ainda é um problema em aberto. Assim, é apresentado um estudo comparativo e uma avaliação em um ambi-

ente real de rede em malha com múltiplas interfaces conectadas por meio de antenas homogêneas e heterogêneas. Também é mostrado que os problemas não podem ser resolvidos no nível de um componente individual, ao contrário, devem ser resolvidos considerando o comportamento completo do sistema. Também é discutido sobre o impacto do *hardware*. Os resultados obtidos apontam diretrizes para a implantação e uso de tecnologias de redes em malha heterogêneas.

Este trabalho tem como objetivo geral apresentar uma análise de redes em malha sem fio *open source* de baixo custo com características de *hardware* heterogêneas em cenários de rede reais fazendo uso de múltiplos canais e múltiplas interfaces. E como objetivos específicos: construir uma rede em malha sem fio totalmente *open source* utilizando o *firmware* OpenWrt; analisar o comportamento de redes em malha sem fio no uso de estratégias com múltiplos canais e múltiplas interfaces; avaliar o comportamento destas redes no uso de equipamentos homogêneos e heterogêneos; comparar o desempenho da rede e o comportamento do protocolo utilizado em equipamentos de baixo e alto custo; apresentar resultados em cenários reais.

O restante deste trabalho está organizado como segue. O capítulo 2 está dividido entre as seções Fundamentação Teórica e Trabalhos Relacionados. Respectivamente, na seção 2 são apresentados os principais conceitos para o entendimento do presente trabalho. É discorrido sobre o estudo da arte de redes sem fio e redes mesh, mostrando suas características, arquitetura e funcionamento. É mostrado também os protocolos das redes mesh, com ênfase no protocolo HWMP, ao qual foi utilizado para os testes e obtenção dos resultados. Na seção 2.6, de trabalhos relacionados, são apresentados trabalhos com interesses similares ou que propõem objetivos que são de interesse ou servem de base para formulação de conceitos e discussões apresentadas neste trabalho. O capítulo 3, de Proposta, apresenta os objetivos bem como a metodologia experimental utilizada na formulação deste trabalho, destacando os cenários e equipamentos utilizados para realização dos testes e obtenção dos resultados. O capítulo 4, de Resultados, apresenta os resultados obtidos através de extensivos testes realizados conforme a descrição apresentada no capítulo 3, além de discussões desses resultados, formulando e conceituando explicações que justificam tais resultados. O capítulo final 5, Conclusões e Trabalhos futuros, são apresentadas as conclusões deste trabalho com base no capítulo 3 e, ainda, a possibilidade de trabalhos futuros.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

No decorrer deste capítulo serão apresentados os conceitos necessários para o entendimento dos termos, ideias e argumentações utilizadas neste trabalho. Diante disso, serão introduzidas as Redes Locais Sem Fio (WLANs) que serão descritas detalhadamente, apresentando uma visão geral de seu funcionamento, padrões, protocolos utilizados dentre outros aspectos interessantes sobre as mesmas. Uma seção de Redes em malha sem fio (WMN - *Wireless Mesh Network*) irá discorrer sobre conceitos, cenários de aplicação, protocolos, dentre outras características importantes para realização dos objetivos deste trabalho. Será apresentado ainda, questões sobre WMNs de baixo custo, com múltiplos canais e interfaces (MIMC - Multiple Interface Multiple Channel) e equipamentos de características homogêneas e heterogêneas. Ao final deste capítulo espera-se que o leitor disponha dos conhecimentos necessários para entendimento do funcionamento das redes *wireless* e redes *mesh*, possibilitando uma melhor compreensão e análise dos resultados deste trabalho.

### 2.1 Redes Locais Sem Fio Padrão IEEE 802.11

As redes *Wireless* (sem fio) são redes cujo a comunicação e transferência de dados ocorre por meio do ar fazendo uso de ondas de rádio em várias frequências. Estas, vem ganhando cada vez mais espaço em termos de comunicação (MONTEIRO et al., 2016), e sendo temas de diversos estudos na área acadêmica e empresarial, principalmente devido ao fato de possibilitar mobilidade aos usuários e possuir fácil implantação, em sua maioria.

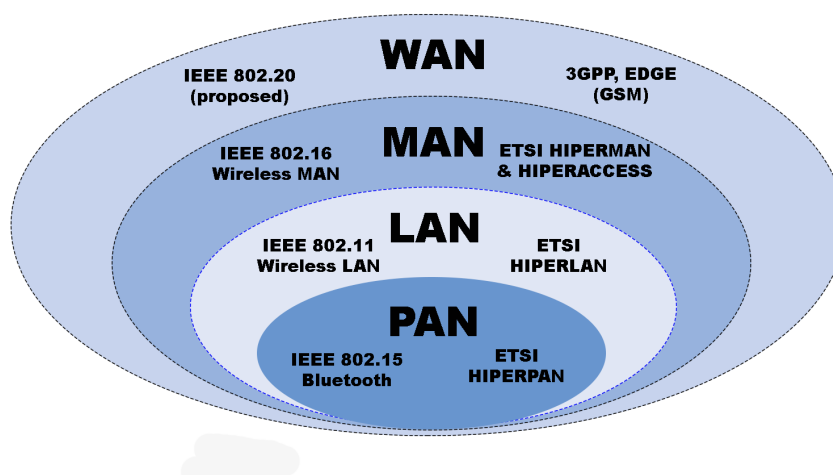
Tais fatores contribuíram para evolução dessas redes tanto em questão de desempenho, quando área de cobertura e estabilidade e, assim, tornaram possível seu uso e aplicação nos mais diversos ambientes e cenários, fazendo desta uma das tecnologias mais importantes para fornecer acesso à Internet, atualmente (KUROSE; ROSS, 2016). Neste sentido, é possível encontrar facilmente redes sem fio que permitem a conexão de diversos dispositivos como smartphones, notebooks, smartwatches, tablets, etc. em diversos ambientes, tais como: escritórios, áreas de lazer, shoppings, aeroportos, super mercados, bibliotecas, dentre outros (KUROSE; ROSS, 2016).

A cada dia, bilhões de dispositivos dos mais diversos tipos se utilizam de conexões sem fio para trocarem informações (BRITO; VELLOSO; MORAES, 2014; SANTOS et al., 2016). A troca de informações por meio do ar pode ocorrer por diversos padrões da família IEEE 802, como por exemplo, as redes Wi-Fi, Bluetooth e WiMax.

Estes modelos de comunicação se diferem pelo alcance de sua área de cobertura, pela taxa de transmissão de dados e pela frequência utilizada. A figura 1 mostra a classificação destas redes e exemplifica a diferença de alcance entre as mesmas. As seguintes denominações são apresentadas:

- Redes Pessoais sem Fio (*Wireless Personal Area Network* - WPAN);
- Redes Locais sem Fio (*Wireless Local Area Network* - WLAN);
- Redes Metropolitanas sem Fio (*Wireless Metropolitan Area Network* - WMAN);
- e Redes de Longa Distância sem Fio (*Wireless Wide Area Network* - WWAN).

Figura 1: **Padrão IEEE para classificação das redes sem fio.**



Fonte: Elaborado pelo autor.

Embora diversas estratégias descritas no padrão IEEE 802 de comunicação em LANs sem fio tenham sido criadas na década de 1990, uma delas se destaca, o padrão 802.11, popularmente conhecido como Wi-Fi (*Wireless Fidelity* - fidelidade sem fio), que permite a criação de WLANs. Existem diversas variações do padrão IEEE 802.11, sendo algumas delas: 802.11a, 802.11b, 802.11g, 802.11n, 802.11ac e ainda, o 802.11s que terá uma seção de destaque e será apresentado detalhadamente no decorrer deste trabalho. Cada uma das variantes do padrão 802.11 possui características que representam uma evolução principalmente em questões relacionadas ao ganho da taxa de transferência. A tabela 1 apresenta um resumo das principais características de algumas das variantes do padrão 802.11.

Os protocolos usados por todas as variantes do padrão 802, possuem características comuns em sua estrutura, inclusive a Ethernet (TANENBAUM, 2011). O padrão

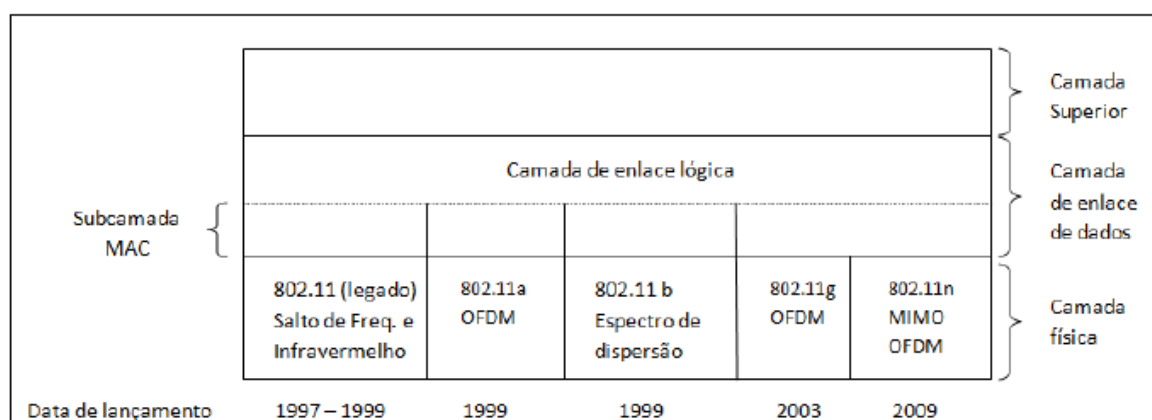
Tabela 1: **Padrões IEEE 802.11 e suas características.**

| Padrão   | Frequência  | Alcance (M) | Velocidade de transmissão |
|----------|-------------|-------------|---------------------------|
| 802.11a  | 5 GHz       | 25 à 100    | 54 Mbits/s                |
| 802.11b  | 2,4 GHz     | 100 à 150   | 11 Mbits/s                |
| 802.11g  | 2,4 GHz     | 100 à 150   | 54 Mbits/s                |
| 802.11n  | 2,4 / 5 GHz | 100 à 150   | 300 Mbits/s               |
| 802.11ac | 5 GHz       | 100 à 200   | 1,3 Gbits/s               |

Fonte: Elaborado pelo autor.

802.11, assim como os demais padrões de sua família, também possui as especificações da camada física (PHY) e as especificações da camada de controle de acesso ao meio (MAC - Media Access Control), juntamente da camada de ligação de dados que faz junção da camada MAC e da camada de controle de ligação lógica (LLC - Link Logical Control), ambas presentes no modelo de referência OSI (*Open System Interconnection* - OSI) em seus níveis 1 e 2, respectivamente.

A figura 2 apresenta uma visão da pilha de protocolos do IEEE 802.11 onde a camada física corresponde exatamente à camada física do modelo OSI e a camada de enlace de dados se divide em duas subcamadas, a camada MAC e a camada LLC. Esta primeira, é responsável por fazer a determinação da alocação do canal, bem como quem terá a vez de transmitir no meio. A segunda subcamada é responsável por prover transparência no que se refere à camada de rede, tentando assim ocultar as diferenças existentes nas variantes do padrão 802.11 (TANENBAUM, 2011). Na camada superior a responsabilidade é prover roteamento, controle de endereços, integridade dos dados dentre outros serviços.

Figura 2: **Parte da Pilha de Protocolos IEEE 802.11.**

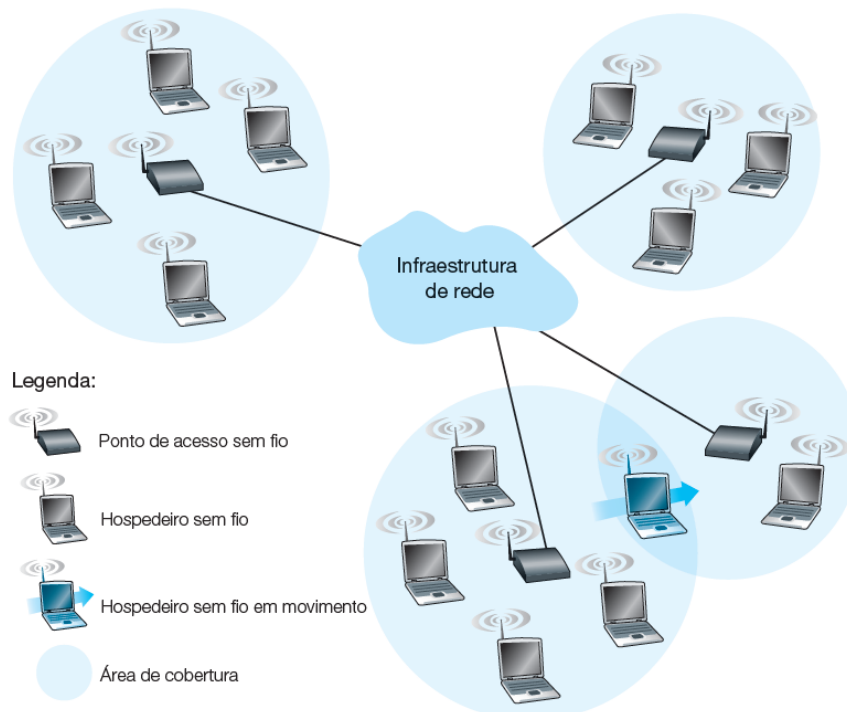
Fonte: (TANENBAUM, 2011).

## 2.1.1 Arquitetura

As redes sem fio podem ser classificadas com base em dois critérios: (i) se um pacote atravessa um único ou múltiplos saltos sem fio para atingir seu destino, e (ii), se a rede possui infraestrutura, como uma estação base, por exemplo (KUROSE; ROSS, 2016). Neste sentido, há redes sem fio de salto único com e sem infraestrutura e redes de múltiplos saltos com e sem infraestrutura. As redes com infraestrutura são denominadas redes infraestruturadas e as sem infraestrutura são denominadas ad hoc.

Todos os padrões 802.11 apresentados anteriormente podem funcionar nos 2 modos de operação: Infraestrutura e ad hoc. Esta seção apresenta e detalha sobre estes dois modos de arquitetura de redes *wireless*, percorrendo sobre seu funcionamento e características. A figura 3 mostra um exemplo de rede sem fio com saída para uma rede maior, a Internet. Nesta figura, são mostrados os elementos de uma rede sem fio. Compreender o que são estes elementos refinará o entendimento das subseções seguintes (modo Infraestrutura e ad hoc), neste sentido, segue-se uma descrição breve de cada um deles.

Figura 3: Elementos de uma rede sem fio 802.11.



Fonte: (KUROSE; ROSS, 2016).

- Hospedeiros sem fio: Os hospedeiros sem fio são quaisquer dispositivos clientes sem fio que estão na borda da rede, conectados a uma estação base. Um



hospedeiro sem fio pode ser um *smartphone*, notebook, tablet, consoles de videogame ou quaisquer outros equipamentos de sistemas finais que executam aplicações.

- Estação base: A estação base é a parte fundamental da infraestrutura de rede sem fio (KUROSE; ROSS, 2016). Uma estação base é um nó central à qual os hospedeiros estão diretamente conectados. Esta é responsável pelo recebimento e encaminhamento dos dados transmitidos pelo hospedeiro sem fio associados a ela. Uma estação base é, nas LANs sem fio 802.11, um ponto de acesso que possui uma área de cobertura (como pode ser visto na figura 3 e interliga dispositivos clientes à rede maior. Exemplos são, a Internet, rede corporativa, residencial ou rede telefônica.
- Infraestrutura de rede: É a rede maior (geralmente a Internet) com a qual um hospedeiro sem fio pode querer se comunicar.
- Enlaces sem fio: Um elemento não representado na figura 3, os enlaces sem fio são o meio de comunicação pelo qual um hospedeiro sem fio se utiliza para se comunicar com outro hospedeiro sem fio, ou a uma estação base (que será apresentada adiante). Vale ressaltar que diferentes tecnologias de enlace sem fio possuem taxa de transmissão variadas, assim como a distância em que podem transmitir.

### 2.1.1.1 Modo de Infraestrutura

O modo de infraestrutura é o modo mais comum para conectar vários clientes (dispositivos finais como: *smartphones*, notebooks, etc.) às redes maiores, como já citado. Neste modo, existe um AP com acesso à rede maior, e ao qual os clientes estão associados. Neste tipo de rede, onde a comunicação é centralizada e gerenciada pelo o AP, toda comunicação deve obrigatoriamente passar pelo ponto de acesso, impedindo assim que os dispositivos finais possam se comunicar diretamente uns com os outros.

O modo de infraestrutura possui 2 tipos de classificação: o Conjunto Básico de Serviço (*Basic Service Set* - BSS) e o Conjunto Estendido de Serviço (*Extended Service Set* - ESS) e ambos podem ser visualizados na figura 4 e serão melhor definidos a seguir.

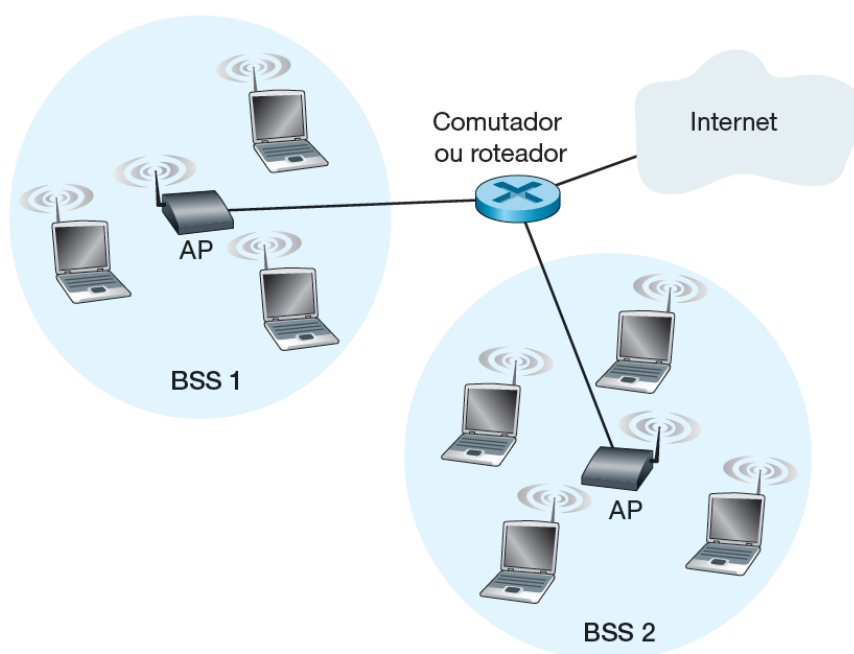
- Conjunto Básico de Serviço: O BSS representa um grupo de estações sem fio que estão associadas a um Ponto de Acesso ao qual é o nó controlador central desta rede, a estação base. Note que a arquitetura do BSS apresentado na



figura 4 é semelhante ao exemplo descrito na figura 3 onde, em comparação, cada BSS corresponde a um ponto de acesso e sua área de cobertura. Cada BSS é identificado por um Identificador Básico de Conjunto de Serviço (Basic Service Set Identifier - BSSID) que consiste de uma sequência de caracteres (letras e/ou números) que servem como identificador da rede.

- Conjunto Estendido de Serviço: O ESS representa a associação de 2 ou mais conjuntos BSS, como visto na figura 4 onde o BSS1 e o BSS2 estão conectados por meio de um comutador ou roteador. de forma semelhante ao BSS, o ESS também possui um identificador chamado de ESSID (Extended Service Set Identifier - BSSID) e de maneira similar, é um conjunto de caracteres alfanumérico e serve para identificar um conjunto de serviços (2 ou mais BSSs associados). É interessante ressaltar que é permitido *roaming* neste tipo de infraestrutura, permitindo assim que um usuário possa se mover entre as células BSS sem perder sua conexão. Esta ideia bem como sua vantagem será melhor discutida posteriormente.

Figura 4: **Modo de infraestrutura de LAN IEEE 802.11.**



Fonte: (KUROSE; ROSS, 2016).

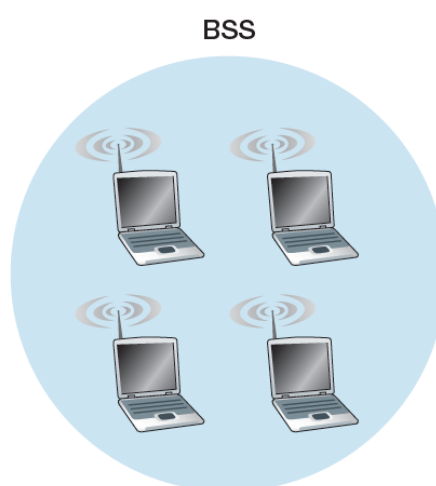
### 2.1.1.2 Modo ad hoc

O modo ad hoc consiste em um conjunto de estações sem fio que conectam-se diretamente uns com os outros para se comunicarem. Este tipo de rede não depende

de um ponto de acesso central ou infraestrutura já existente para fazer o encaminhamento e controle dos dados que trafegam na rede. Os próprios nós fazem o controle e encaminhamento dos dados, eles mesmos, repassando as informações através de múltiplos saltos sem fio, para que assim, uma determinada informação possa atingir seu destino. Toda comunicação nestas redes é feita com a ausência de cabos, isto é, *wireless* e este fator torna este tipo de rede ideal para comunicações em lugares com difícil acesso. A figura 5 mostra uma representação deste tipo de rede com ausência de uma estação base, e apenas dispositivos hospedeiros funcionando como nós da rede.

Uma das características desta rede, é a mobilidade dos nós. Uma rede ad hoc com nós móveis denomina-se MANET (*Mobile Ad hoc Network*) e é um sistema autônomo composto por estações móveis. Com a ausência de infraestrutura e o controle sendo feito pelos próprios nós, estes têm liberdade para entrar e sair da rede de acordo com a necessidade, podendo mudar a topologia da rede maneira imprevisível requerendo adaptação e reconfiguração de rotas. Nas redes ad hoc, uma mensagem pode chegar ao seu destino quando o nó destino está dentro do alcance de transmissão do nó emissor ou quando algum outro nó ou conjunto de nós possa transmitir a mensagem até o destino. Se um dos nós deixa a rede, as demais estações buscam novos caminhos para contornar a queda de um nó e encaminharem a mensagem à seu destino corretamente.

Figura 5: **Rede ad hoc IEEE 802.11.**



Fonte: (KUROSE; ROSS, 2016).

Outra característica neste tipo de rede, é o consumo de energia. Como a rede é formada geralmente por dispositivos hospedeiros que servem como nós da rede e estes dispositivos hospedeiros são geralmente sistemas finais móveis (notebooks, smartphones, etc.) o problema de consumo de energia dos equipamentos é atribuído

a este tipo de rede. Assim, diversos trabalhos acadêmicos nas décadas de 1990 e 2000 foram produzidos no sentido de redes ad hoc e consumo de energia (CUNHA; COSTA; DUARTE, 2003; BANNACK, 2008). Os trabalhos nesta área visam minimizar o consumo de energia para que, deste modo, um nó possa operar por mais tempo na rede.

As redes em malha sem fio podem ser consideradas uma evolução das redes ad hoc. Estas, funcionam de maneira similar, porém, possuem nós estacionários diretamente ligados à energia, não limitando o potencial destas redes, neste fator. Devido a popularidade destas redes, foi criado o padrão IEEE 802.11s, para redes em malha. Posteriormente, serão apresentadas e detalhadas as redes em malha sem fio, dissertando suas características, funcionamento, cenários de aplicação, protocolos, dentre outros assuntos relevantes para este trabalho.

## **2.2 Características de Enlaces e Redes Sem Fio**

Esta seção trata de descrever características existentes nas redes IEEE 802.11, discutindo e analisando conceitos fundamentais para o entendimento do comportamento destas redes. Conceitos como relação sinal ruído, redução de força do sinal, dentre outras apresentadas a seguir são de fundamental importância para entendimento dos resultados apresentados neste trabalho.

### **2.2.1 Redução da força do sinal**

Ondas eletromagnéticas sofrem atenuação quando atravessam algum tipo de objeto material. Por exemplos, é comum em diversos ambientes *indoor* (interior) como casas, prédios, escritórios, etc. a instalação de um ponto de acesso para fornecer conexão à Internet às pessoas que transitam neste ambiente. No entanto, em ambientes *indoor* quando o sinal de rádio atravessa as paredes destes ambientes, as ondas sofrem atenuação e o sinal se dispersará mesmo ao ar livre. Esta dispersão resulta na redução da força do sinal (algumas vezes denominada atenuação de percurso) à medida que a distância entre o emissor e o receptor aumenta.

### **2.2.2 Interferência de outras fontes**

É comum a instalação de APs WiFi em ambientes pessoais, como as moradias. Devido a popularização deste método, diversas moradias próximas possuem APs aos quais uns sobrepõem o sinal de outros. Neste sentido, se diversos dispositivos sem fio (telefones, *joysticks*, controladores remotos, telefones, etc.) se utilizam da frequên-

cia 2,4 GHz e sabendo que uma LAN sem fio 802.11 também utiliza esta banda de frequência é esperado que nem a rede nem os dispositivos funcionem particularmente, bem devido a interferência que causam uns aos outros. Além da interferência de fontes transmissoras, como as citadas anteriormente, o ruído eletromagnético presente no ambiente também pode causar interferência. Exemplos são: motores ou equipamentos de micro-ondas próximos.

### 2.2.3 Propagação multivias

Em comunicações sem fio, a propagação multivias ou *multipath* (caminhos) é um fenômeno que ocorre quando partes da onda eletromagnética se refletem em objetos e/ou no solo, tomando caminhos de comprimentos diferentes entre o transmissor e o receptor. Este fenômeno pode causar desvanecimento e resultar no embaralhamento do sinal recebido pelo destinatário (KUROSE; ROSS, 2016).

### 2.2.4 SNR - Signal-To-Noise Ratio

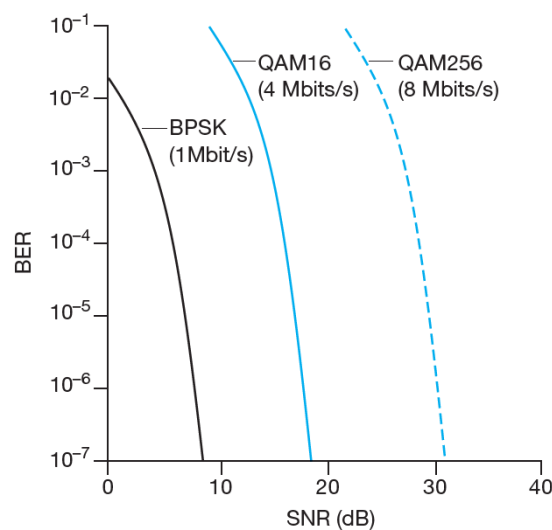
Um sinal eletromagnético é a combinação da forma degradada do sinal original transmitido por um transmissor e um ruído de fundo. Os efeitos da degradação do sinal pode se dar por diferentes modos, como a propagação multivias, por exemplo, discutida anteriormente. A relação sinal ruído (*Signal-To-Noise Ratio* - SNR) é uma medida relativa da potência do sinal recebido do transmissor e o ruído de fundo e é comumente calculada em decibéis (dB). Neste sentido, quanto mais alta for a relação sinal ruído, menor é o efeito do ruído de fundo e melhor é a qualidade do sinal recebido, facilitando a detecção ou medição do sinal para o destinatário.

A figura 6 Apresenta a taxa de erro de bits (*Bit Error Rate* - BER) em relação ao SNR para três técnicas de modulação diferentes para codificar informações para transmissão em um canal sem fio idealizado. Algumas características podem ser observadas:

- Para uma determinada modulação, quanto mais alta for a SNR, mais baixa será a BER. Sabe-se que o nó transmissor consegue aumentar a SNR através da elevação da potência de transmissão, mas, também pode diminuir a probabilidade de um quadro ser recebido com erro diminuindo tal potência (KUROSE; ROSS, 2016). Vale ressaltar que aumentar a potência de transmissão pode prejudicar a comunicação de conexões de nós transmissores vizinhos visto ao aumentar a potência um determinado nó irá *falar mais alto* que os demais nós e também aumentará o consumo de energia.

- Para determinada SNR, uma técnica de modulação com uma taxa de transmissão de bit maior (com erro ou não) terá uma BER maior. Isto implica no conceito de que, quanto mais bits forem transmitidos no canal, maior o número de bits que pode ser a taxa de erro.
- A seleção dinâmica da técnica de modulação da camada física pode ser usada para adaptar a técnica de modulação para condições de canal. Neste caso, a SNR e a BER podem mudar de acordo com a mobilidade ou em função de mudanças no ambiente. A modulação adaptativa e a codificação são usadas em redes de dados Wi-Fi 802.11 e celular, por exemplo. A técnica de modulação adaptativa representa basicamente a ideia de que quanto mais perto emissor e transmissor estiverem, maior a SNR e assim, maior será a taxa de transmissão de dados sem erro, devido à baixa BER. No entanto, o contrário disso também é verdadeiro. Quanto maior a distância entre o transmissor e o receptor, menor será a SNR e maior a BER, resultando em taxas de transmissão menores e com mais instabilidade.

Figura 6: Taxa de erro de bits, taxa de transmissão e SNR.



Fonte: (KUROSE; ROSS, 2016).

### 2.2.5 Problema do terminal oculto

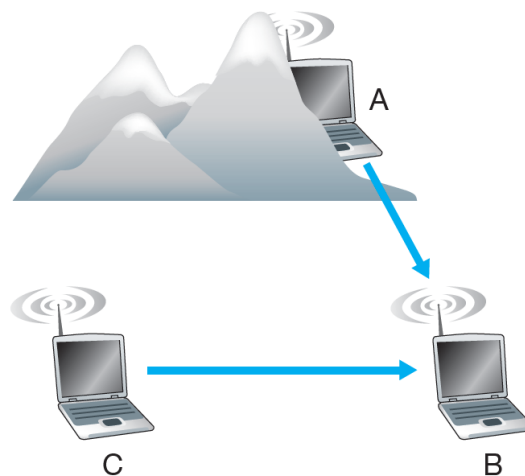
O clássico problema do terminal oculto parte do pressuposto que, dadas três estações de exmplo, apenas duas delas conseguem se *enxergar*, o que resultaria em colisões de quadros caso a terceira entidade quisesse transmitir no mesmo instante que outra estação não visível. A figura 7 mostra como exemplo três estações *A*, *B* e

$C$  onde  $A$  apenas enxerga  $B$ ,  $C$  também enxerga apenas  $B$ , e  $B$  enxerga ambas as estações  $A$  e  $C$ . o terminal  $A$  troca mensagens com o terminal  $B$ .

Neste sentido, suponha que  $A$  deseja transmitir quadros para  $B$  e que  $C$  também deseja enviar quadros à  $B$  neste mesmo instante. O denominado problema do terminal oculto, ou também chamado de terminal oculto acontece neste caso, devido a interferências físicas no ambiente. De acordo com a figura 7,  $A$  está oculto de  $C$ , e vice-versa, devido a existência de uma montanha entre ambos. Trazendo a exemplificação para um exemplo real, pode-se pensar na montanha como sendo paredes de casas, que também prejudicam a comunicação do meio como descrito na subseção 2.2.1.

Dada a transmissão entre quadros de  $A$  e  $C$  para  $B$  no mesmo instante, acarretará na colisão de quadros e no desperdício do canal no tempo de transmissão dos quadros de  $A$  e  $C$ . A solução para este problema através de quadros de controle para reserva de canal será apresentada em seções posteriores ( 2.3.3.2).

Figura 7: **Problema do terminal oculto.**



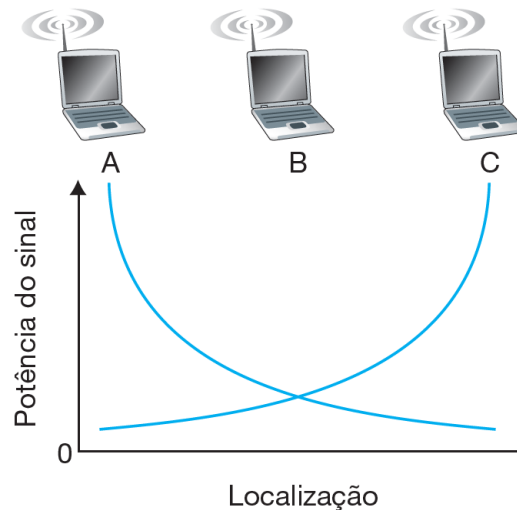
Fonte: (KUROSE; ROSS, 2016).

## 2.2.6 Desvanecimento

O problema do desvanecimento ocorre pelo princípio da redução da força do sinal à medida em que ela se propaga através do meio sem fio. Na figura 8 está ilustrada uma representação deste problema. Dado que as estações  $A$  e  $B$  desejam transmitir, estas emitem seus quadros através de ondas eletromagnéticas que se propagam por meio do ar. À medida em que a onda se propaga em função da distância, a força do sinal diminui. Assim, dado o exemplo, as forças das potências das transmissões de  $A$  e  $B$  não são suficientes para que elas detectem a transmissão uma

da outra. No entanto, como ambas as transmissões alcançam a estação *B*, isto é o bastante para interferir na comunicação de *A* e *C* com *B*, dado que *A* e *C* não se enxergam e não possuem conhecimento de sua interferência. Assim como o problema do terminal oculto, a solução para o problema do desvanecimento será apresentado em seções posteriores (2.3.3.2).

Figura 8: **Problema do Desvanecimento.**



Fonte: (KUROSE; ROSS, 2016).

## 2.3 Controle de Acesso ao Meio - MAC

Quando um hospedeiro sem fio se conecta a um ponto de acesso, estes, podem agora trocar mensagens (quadros de dados) um com o outro. Este é um caso simples onde há comunicação apenas entre duas estações. No entanto, várias estações podem querer transmitir dados ao mesmo tempo sobre o mesmo canal. É neste sentido que surge a necessidade de um protocolo a fim de coordenar o acesso ao meio para múltiplas transmissões “simultâneas” (KUROSE; ROSS, 2016).

### 2.3.1 MAC IEEE 802.3

O padrão Ethernet (IEEE 802.3) define um protocolo de Controle de Acesso ao Meio (*Media Access Control* - MAC). O protocolo de Acesso Múltiplo por Detecção de Portadora com Detecção de Colisão (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection* - CSMA/CD) funciona basicamente do seguinte modo, seguindo seis passos:

1. **Canal Livre:** Se o canal está livre, inicia-se a transmissão da informação, senão, segue para o ponto 4;

2. **Transmissão da informação:** se uma colisão é detectada, a transmissão continua até que seja atingido um tempo mínimo de transmissão para o pacote (para garantir que todos os outros transmissores e receptores detectaram a colisão), então segue para o ponto 4;
3. **Sucesso e fim da transmissão:** é informado uma mensagem de sucesso para as camadas superiores da rede, deixando o modo de transmissão;
4. **Canal ocupado:** espera até que o canal esteja livre;
5. **canal se torna livre:** espera-se um tempo aleatório, e vai segue o ponto 1, a menos que o número máximo de tentativa de transmissão tenha sido excedido;
6. **Número de tentativa de transmissão excedido:** informa falha para as camadas superiores da rede e deixa o modo de transmissão;

O protocolo CSMA/CD descrito anteriormente, opera em modo *full-duplex*, isto é, enquanto é feita a transmissão de informações a estação pode continuar ouvindo o meio para detectar se outra estação também está enviando naquele instante de tempo. Caso mais de uma estação esteja transmitindo ao mesmo tempo, a transmissão das informações serão abortadas e tenta-se uma nova transmissão instantes depois.

O protocolo MAC CSMA/CD funciona corretamente apenas no meio físico (cabeado) onde é fácil de se detectar colisões e corrigir este problema rapidamente, contornando-o com o cancelamento e o reenvio de forma aleatória das informações. No entanto, no meio sem fio, a detecção de colisão não é uma alternativa viável. Isto ocorre por dois motivos: O primeiro, é o fato dos rádios serem, em sua maioria, *half-duplex*, ou seja, não possuem a capacidade de transmitir e receber informações ao mesmo tempo em uma única frequência. Isto ocorre devido a intensidade do sinal recebido ser mais fraco que o sinal transmitido, não podendo assim, ser detectadas colisões ao mesmo tempo como em tecnologias *half-duplex* (TANENBAUM, 2011). Assim, para detecção de colisão ser feita, há a necessidade da construção de um *hardware* de alto valor monetário que opera em modo *full-duplex* (KUROSE; ROSS, 2016). O segundo e mais importante, é que mesmo com *hardwares* capazes de operar em modo *full-duplex*, ainda assim não seria possível detectar todas as colisões, devido ao clássico problema do terminal oculto (descrito na seção 2.2) e o desvanecimento (KUROSE; ROSS, 2016).

Deste modo, como não há detecção de colisão nas LANs 802.11, sempre que uma estação iniciar a transmissão de um quadro, este quadro será transmitido de maneira integral, ou seja, não há o cancelamento do envio após a inicialização do mesmo. Assim, é válido pensar que transmitir quadros inteiros (em particular, os longos) em



um meio com grandes possibilidades de colisão pode gerar a degradação significativa do protocolo de acesso ao meio. Para contornar a probabilidade de colisões, o IEEE 802.11 conta com técnicas para evitar colisões no meio. Estas serão descritas posteriormente no decorrer deste trabalho.

Neste sentido, o protocolo MAC para redes *wireless* é bem diferente do protocolo MAC da Ethernet, devido às implicações existentes no meio sem fio. O controle de acesso ao meio das redes sem fio é feito pelo protocolo de Acesso Múltiplo por Detecção de Portadora com Prevenção de Colisão (*Carrier Sense Multiple Access with Collision avoidance* - CSMA/CA), onde neste, o objetivo é evitar as colisões, não detectá-las. Para isto, a estação fica “ouvindo” o canal, antes de iniciar uma transmissão. Caso o canal esteja ocupado, esta estação priva-se de sua comunicação no canal até que este esteja livre e com possibilidade de transmissão de informações. A seção seguinte detalha o funcionamento deste protocolo.

### **2.3.2 Protocolo DFWMAC para acesso ao meio**

Foi definido pelo IEEE um mecanismo de acesso ao meio denominado DFWMAC - (*Distributed Foundation Wireless Medium Access Control*) para transmissão física usando radiofrequência e infravermelho. Este protocolo define dois métodos de acesso ao meio: um método distribuído obrigatório (DCF) e um método opcional centralizado (PCF). Respectivamente, os dois são apresentados em detalhes nas subseções 2.3.3 e 2.3.5 seguintes.

Antes de se aprofundar nos métodos de acesso ao meio DCF e PCF, é interessante entender e conhecer que, para ambos, existem parâmetros de controle para gerenciar o tempo de espera para acessar o meio. Assim, se uma estação deseja ter acesso ao meio para transmitir informações, esta deve, primeiramente, detectar se o meio está livre por um período de tempo mínimo IFS (*Inter Frame Space*), antes de utilizá-lo. O DFWMAC define três prioridades de acesso ao meio, através de diferentes períodos de tempo:

- DIFS (*Distributed Inter Frame Space*): É o espaço de tempo entre quadros da DCF. Este é o parâmetro de maior tempo de espera e com isso, possui a menor prioridade. Este faz monitoramento do meio aguardando no mínimo um intervalo onde as demais estações não estejam utilizando o canal, para assim, transmitir os dados.
- PIFS (*Priority Inter Frame Space*): É o espaço de tempo intermediário entre os quadros da PCF, um tempo de espera entre o DIFS e o SIFS. O PIFS é usado para serviços de acesso ao meio com retardo. Em exemplo, quando um AP

(maior prioridade que estações associadas) com hospedeiros associados (menor prioridade) necessita transmitir informações, o AP precisa apenas esperar um tempo PIFS para se utilizar do meio e transmitir as informações desejadas.

- SIFS (*Short Inter Frame Space*): É um espaço de tempo curto, com alta prioridade que é usado para transmissão de quadros com respostas imediatas (curtas). Um exemplo, é o ACK (*Acknowledgment*), que possui alta prioridade de transmissão.

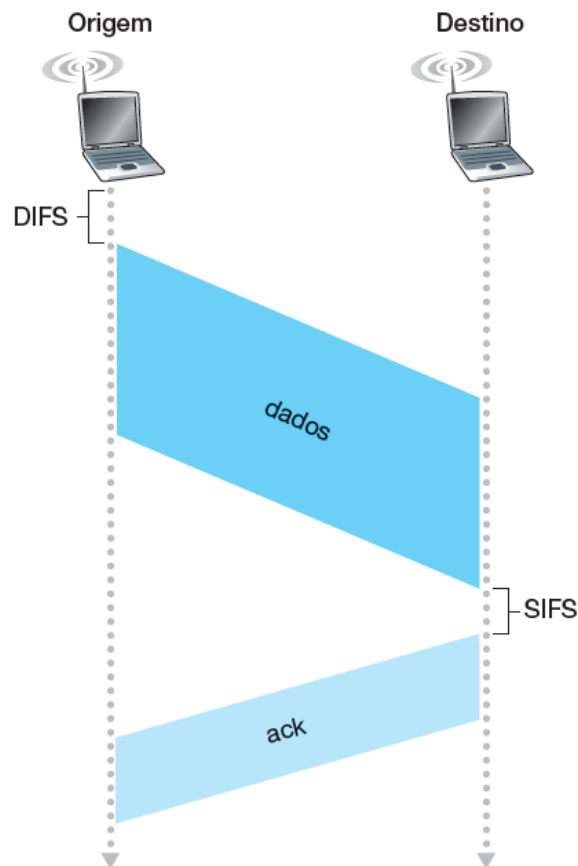
### 2.3.3 Função de Coordenação Distribuída - DCF

Uma Função de Coordenação Distribuída (*Distributed Coordination Functions - DCF*) tem como objetivo definir quando uma estação pode, ou não, transmitir. Como todos os dispositivos utilizam o mesmo protocolo e executam tarefas individuais, é possível que dois dispositivos decidam enviar suas informações ao mesmo tempo sem que a outra perceba. Assim, torna-se necessário coordenar o envio das informações. Neste sentido, a DCF decide o controle de acesso ao meio nas redes IEEE 802.11, através do protocolo CSMA/CA, que faz a verificação do canal para enviar informações quando o meio está livre, ou se abstrai da possibilidade de enviar quando o meio está ocupado.

Antes de se aprofundar nos conceitos de prevenção de colisão é interessante, antes, analisar o esquema na comunicação para reconhecimento na camada de enlace do 802.11. Quando o quadro de dados que passou na verificação de CRC (Verificação de Redundância Cíclica - *Cyclic redundancy check*) for recebido, o receptor deverá aguardar um período de tempo SIFS e em seguida enviar um quadro de reconhecimento (ACK). Caso a estação transmissora não receba o ACK, ela irá admitir que houve um erro e tentará transmitir novamente o quadro. Se a estação transmissora não receber um quadro ACK após um determinado número de retransmissões, desistirá e descartará o quadro. Este esquema é feito pois um quadro, após ser transmitido, talvez não chegue intacto à estação de destino, e isto pode ocorrer por diversos motivos (como a interferência de outras fonte, por exemplo).

#### 2.3.3.1 CSMA/CA

Foi dito que uma DCF se utiliza do protocolo CSMA/CA para definir o controle de acesso ao meio. O esquema a seguir, descreve em 4 passos a abordagem usada por este protocolo. Suponha que uma estação (um AP, por exemplo) deseja transmitir um quadro de dados à um nó hospedeiro.

Figura 9: **Reconhecimento da camada de enlace.**

Fonte: (KUROSE; ROSS, 2016).

1. **Transmissão imediata:** A estação analisa o canal e se, este estiver ocioso de imediato, o quadro será transmitido após um curto período de tempo conhecido como Espaçamento Interquadros Distribuído (DIFS).
2. **Espera por canal ocioso:** Caso o canal não esteja ocioso, a estação irá escolher um valor aleatório de recuo em um intervalo curto usando o recuo exponencial binário. Após a escolha do valor irá iniciar uma contagem regressiva a partir desse valor quando perceber que o canal está ocioso. Caso o canal não esteja ocioso, isto é, continue ocupado, o valor do contador irá permanecer congelado.
3. **Transmissão:** Quando o contador chegar a zero (isto irá ocorrer apenas se a estação perceber o canal ocioso), a estação irá transmitir o quadro inteiro e ficará a espera de um reconhecimento (ACK).
4. **Mensagem de reconhecimento** Se uma mensagem de reconhecimento for recebida pela estação transmissora, esta saberá que o quadro foi entregue corretamente na estação destino. Caso a estação transmissora possuir outro quadro para transmitir, deverá iniciar novamente o protocolo CSMA/CA no passo

2. Caso nenhuma mensagem de reconhecimento for recebida, a estação transmissora entrará na fase de recuo (passo 2) e irá determinar um valor de recuo aleatório em um intervalo maior.

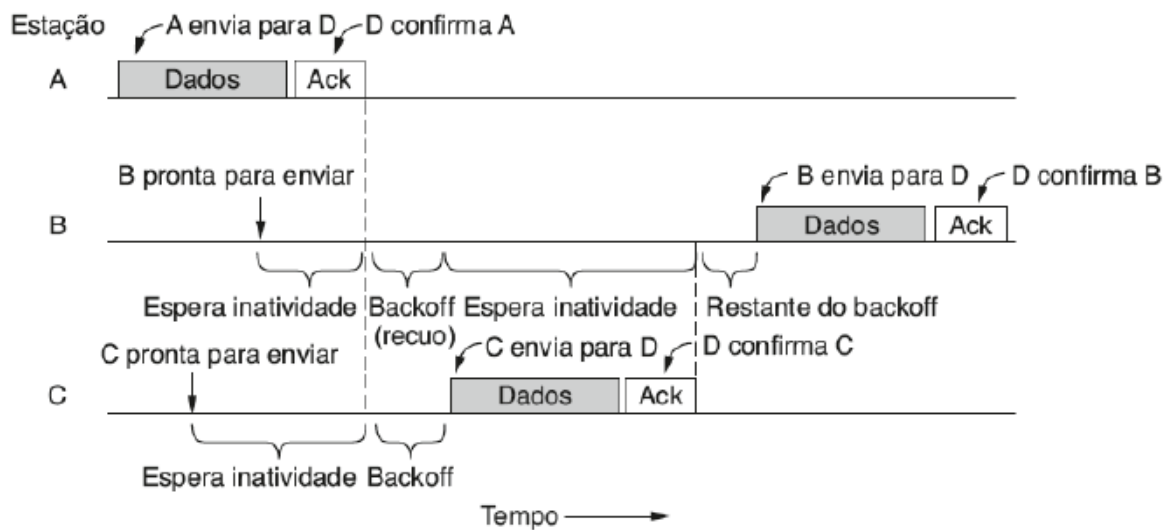
O esquema descrito nestes quatro passos está ilustrado na figura 9. Vale ressaltar que, no protocolo CSMA/CD, a estação irá transmitir de imediato tão logo perceber o meio ocioso. Já no CSMA/CA, uma estação priva-se da transmissão quadros durante a contagem regressiva mesmo percebendo o meio ocioso. Para entender o motivo disso, considere um cenário com três estações, duas delas ouvindo o meio ( $B$  e  $C$ , respectivamente) e outra transmitindo ( $A$ ). No CSMA/CD, quando a estação  $A$  completasse a transmissão do quadro e  $B$  e  $C$  percebessem o meio ocioso, ambas transmitiriam informações de imediato através do meio e isto iria ocasionar uma colisão. No CSMA/CD isto não seria um problema, pois a colisão seria detectada e a transmissão cancelada. Entretanto, no protocolo CSMA/CA, quando as estações  $B$  e  $C$  transmitissem ao mesmo tempo e a colisão ocorresse, os quadros iriam ser transmitidos integralmente independentemente da colisão pois não há detecção de colisão nas redes 802.11. Assim, o 802.11 objetiva evitar as colisões sempre que for possível.

Neste sentido, com uso do protocolo CSMA/CA, se as estações  $B$  e  $C$  percebem o meio ocioso, ambas entrarão de imediato em *backoff* aleatório que, na maior probabilidade, terão valores diferentes para ambas as estações. Deste modo, a estação que estiver de posse do menor *backoff* irá iniciar sua transmissão primeiro enquanto a outra perceberá o meio ocioso e irá interromper seu contador, não transmitindo até que a outra estação conclua sua transmissão. Seguindo o exemplo, Após o tempo *backoff* esperado ao término da conclusão do envio de  $A$ , a estação  $C$  irá iniciar a transmissão de seu quadro enquanto  $B$  interrompe sua contagem após perceber que  $C$  está fazendo uso do canal. Assim, somente após  $C$  receber a confirmação (ACK),  $B$  conclui seu recuo e transmite seu quadro, como ilustrado na figura 10. Deste modo, é evitada uma colisão dispendiosa.

Vale ressaltar ainda, que as colisões ainda podem ocorrer no protocolo IEEE 802.11 (em casos como o do terminal oculto, descritos na seção 2.2), por exemplo, mas a partir deste princípio são evitadas a maior parte das colisões no meio sem fio (KUROSE; ROSS, 2016). O tratamento para este tipo de colisão (terminal oculto) será apresentado na seção seguinte.

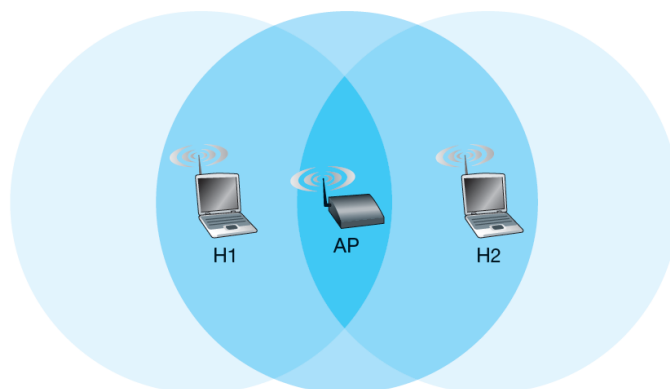
### 2.3.3.2 Tratamento de Terminais Ocultos com RTS e CTS

O protocolo 802.11 MAC também possui um esquema inteligente, mas opcional, para reserva do canal baseado em pacotes de permissão para transferir. Este esquema trata de evitar colisões dos quadros mesmo em cenários com terminais ocultos.

Figura 10: **Transmissão de um quadro com CSMA/CA.**

Fonte: (TANENBAUM, 2011).

Na figura 11, está esquematizado este problema. De início, vale destacar que a área de cobertura de cada um dos nós está representada por um círculo que se expande a partir do centro de cada terminal. Assim,  $H2$  está oculto para  $H1$  (e vice-versa) por desvanecimento, mas ambos estão visíveis ao AP que está entre eles.

Figura 11: **Exemplo de terminal oculto.**

Fonte: (KUROSE; ROSS, 2016).

Dado o exemplo, suponha que  $H1$  esteja a transmitir um quadro durante o tempo  $t1$  e que  $H2$ , agora, queira enviar em um tempo  $t2$  com intervalo de intersecção com o tempo  $t1$ . Como  $H2$  não está ouvindo a transmissão de  $H1$ , por meio do protocolo CSMA/CA,  $H2$  primeiro irá esperar um intervalo de tempo DIFS e depois transmitirá um quadro, acarretando na colisão com o quadro em transmissão de  $H1$ . Consequentemente, o canal será desperdiçado durante o tempo em que  $H1$  e  $H2$  transmitiram.

Para que seja evitado este tipo de problema, o protocolo MAC IEEE 802.11 permite a utilização de dois quadros de controle curtos, o quadro de Requisição Para Enviar (*Request to Send* - RTS) e o de Pronto para Enviar (*Clear to Send* - CTS). Ambos fazem uso de um mecanismo virtual para escuta de canal, NAV que será descrito posteriormente, para solucionar o problema de terminais escondidos através da reserva e permissão, respectivamente, para transmitir quadros no meio. O funcionamento dos quadros RTS e CTS estão apresentados na figura 12 que é descrita a seguir.

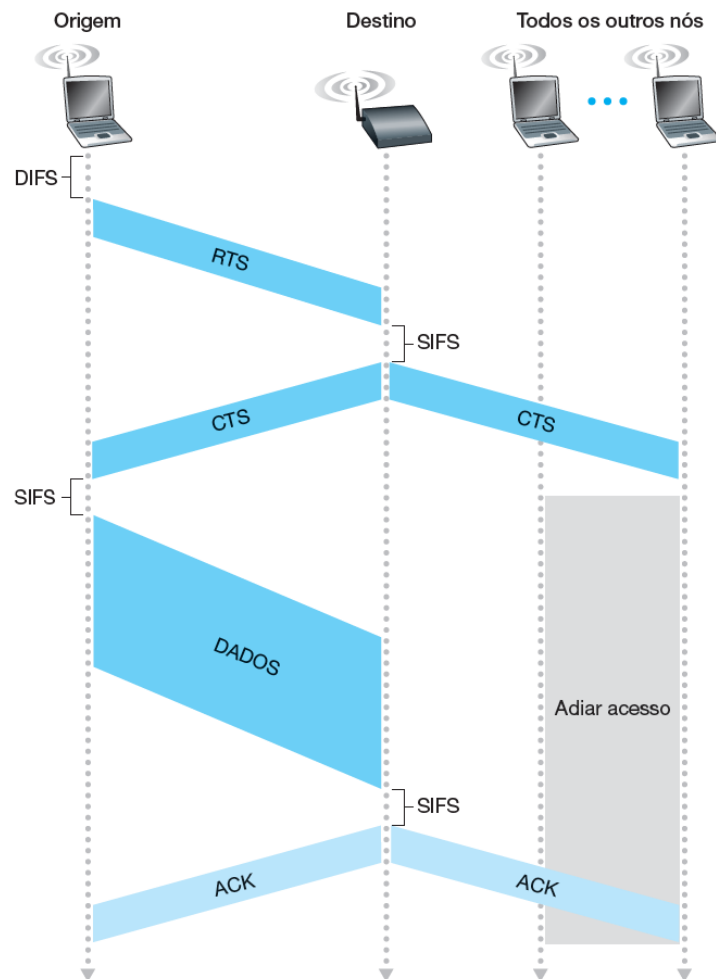
Quando um hospedeiro (origem) quer enviar um quadro de dados *DATA*, ele pode, primeiramente, enviar um quadro RTS para o AP (destino) indicando o tempo total requerido para transmitir o quadro *DATA* e o quadro de reconhecimento (ACK). Quando o AP (destino) receber o quadro RTS, ele responde com um quadro CTS através de uma transmissão por difusão (em *broadcast*). O quadro CTS tem duas finalidades: (1) indicar ao hospedeiro (origem) que este possui permissão explícita para enviar *DATA*; e (2) instituir as demais estações (outros nós) a não transmitirem quadros durante o tempo em que o canal está reservado. Este esquema está representado na figura 12

De acordo com a figura 11, o tratamento deste exemplo com RTS e CTS se dá do seguinte modo: antes de efetuar a transmissão de um quadro *DATA* imediatamente, como antes, *H1* primeiro transmite por *broadcast* um quadro RTS, que é ouvido por todas as estações dentro da sua área de alcance (incluindo o AP). Tendo recebido, o AP então responde com um quadro CTS, que também é ouvido por todas as estações em seu alcance (incluindo *H1* e *H2*). Deste modo, como a estação *H2* recebeu um quadro CTS enviado pelo AP, *H2* se abstém de transmitir durante o tempo especificado no quadro CTS.

### 2.3.4 Vetor de Alocação de Rede - NAV

Ainda para tratar de terminais ocultos, o DCF implementa um mecanismo virtual de escuta do canal, denominado *Network Allocation Vector* (NAV). Enquanto a detecção no meio físico apenas detecta se há sinal, este mecanismo guarda a informação do tempo pelo qual o meio ficará ocupado de acordo com a reserva do canal. Deste modo, independentemente se as estações detectam o sinal físico, quando estas recebem o quadro que transporta um quadro NAV, esperam o tempo designado no cabeçalho antes de tentar efetuar uma transmissão.

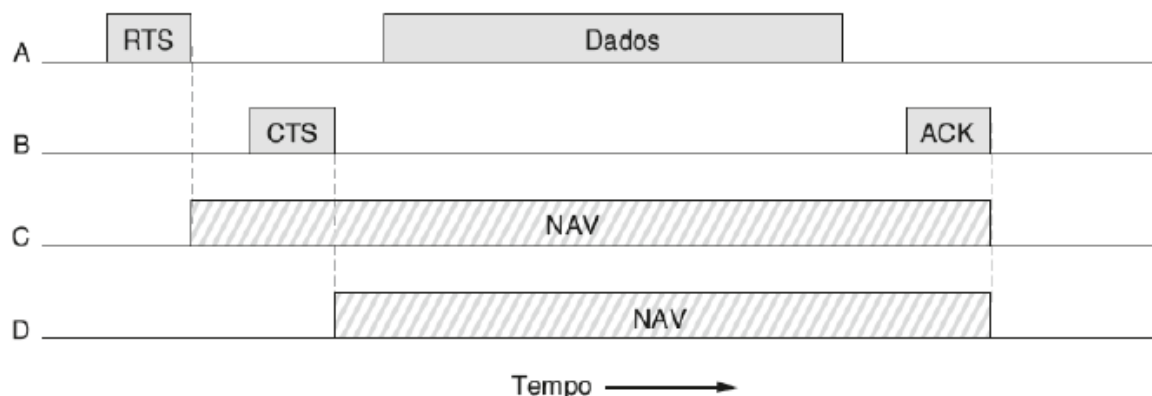
A figura 13 exemplifica o uso do NAV nos quadros de controle RTS e CTS para tratar terminais ocultos. Neste exemplo, a estação *A* deseja transmitir dados para *B*, onde *C* é uma estação dentro do alcance de *A* e *D*, e *D* é uma estação dentro do

Figura 12: **Prevenção de colisão usando quadros RTS e CTS.**

Fonte: (KUROSE; ROSS, 2016).

alcance de  $B$ , mas fora do alcance de  $A$ . Deste modo, quando  $A$  deseja transmitir dados para estação  $B$ ,  $A$  deve primeiro transmitir um quadro RTS.  $B$  ao receber o quadro RTS responde com um CTS indicando que  $A$  pode transmitir.  $A$  responde com um ACK e começa a transmitir. Ao final da transmissão  $B$  transmite um ACK indicando a completude da transmissão.

Analisando a transmissão de  $A$  para  $B$  a partir de  $C$  e  $D$ , após o envio do RTS de  $A$ , a estação  $B$  entra em um período de ociosidade. Apesar de  $D$  não estar ao alcance de  $A$  e não saber que o meio está ocupado pois não recebeu o quadro RTS enviado por  $A$ ,  $D$  recebe o CTS emitido por  $B$  e deste modo também entra no período de ociosidade definido pelo NAV. Assim,  $C$  e  $D$  apenas aguardam o fim do período indicado pelo NAV, para voltar a tentar acessar o meio, não interferindo na comunicação entre  $A$  e  $B$ .

Figura 13: **Exemplo de detecção de canal virtual (NAV) com CSMA/CA.**

Fonte: (TANENBAUM, 2011).

### 2.3.5 Função de Coordenação Pessoal - PCF

A Função de Coordenação Pessoal (*Point Coordination Function - PCF*) é opcional e implementada sobre a DCF. A PCF suporta a transmissão de tráfego assíncrono ou com retardo limitado, onde quadros assíncronos são implementados através de um mecanismo de acesso ao meio. Para fazer a integração das funções DCF e PCF, é utilizado o conceito de superquadro, fazendo assim, com que o protocolo possa trabalhar de modo que a PCF assuma controle da transmissão e possa evitar colisões dos quadros no meio.

No entanto, este não é usado na prática pois não garante que estações vizinhas não gerem tráfego concorrente, assim, não evita colisões de estações próximas. Além do mais, é centralizado e atribuídos à redes com um controlador central como um AP, ou estação celular. Convenientemente, como o uso de uma PCF necessita de uma infraestrutura de rede e um nó central, não se aplica à redes ad hoc ou mesh, por exemplo, que são totalmente descentralizadas. Neste sentido, o uso de uma função PCF não contribui para os fundamentos deste trabalho e por isto esta função não será apresentada em mais detalhes.

## 2.4 Redes em Malha Sem Fio

Esta seção descreve uma visão geral das redes em malha sem fio e o uso de múltiplas interfaces e múltiplos canais, além dos protocolos e seus modos de operação para descoberta de rotas. Será discutido também sobre os desafios da atribuição de canais e interfaces e o *trade-off* entre conectividade e interferência.



### 2.4.1 Arquitetura de uma Rede Mesh

A popularidade das WMNs levou à criação do padrão IEEE 802.11s ([IEEE 802.11s, 2011](#)), uma solução de rede para difusão e entrega de pacotes *unicast* ao longo de uma topologia de múltiplos saltos auto configurável. O padrão propõe, entre outros serviços de malha, a seleção de caminhos e o encaminhamento com competências de roteamento na camada MAC, interoperabilidade com redes externas e soluções de segurança.

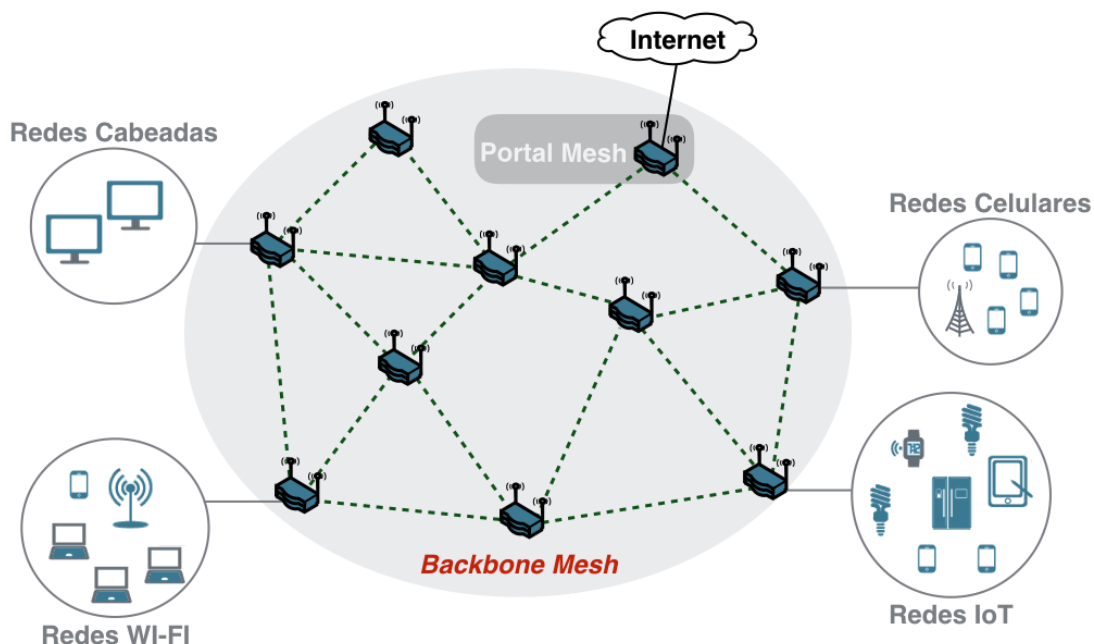
A arquitetura de uma WMN consiste em um *backbone* de roteadores mesh que fornece uma grande cobertura, conectividade e robustez à rede. A Figura 14 ilustra uma WMN, onde as linhas tracejadas e contínuas indicam enlaces sem fio e com fio, respectivamente. Para estender o acesso à rede com fio além do alcance de transmissão de um único ponto de acesso, os roteadores mesh são interconectados através do meio sem fio para estabelecer e manter a conectividade da malha. Eles encaminham, através de múltiplos saltos, o tráfego recebido das redes externas, bem como o tráfego recebido de outros roteadores mesh. Vale ressaltar que os roteadores mesh também podem desempenhar o papel de *gateway*, permitindo a integração da WMN com diferentes redes cabeadas e sem fio, como Ethernet, Wi-Fi, IoT e celular. Os roteadores mesh também podem atuar como portais em direção à Internet (Portal Mesh na Figura 14) via enlaces cabeados de alta velocidade. Através de uma WMN integrada, os usuários e dispositivos podem se beneficiar de serviços que, de outra forma, seriam impossíveis de acessar ([RAMAN et al., 2009](#)).

Uma WMN envolve, portanto, um conjunto de características desafiadoras, como a interoperabilidade das diferentes tecnologias de rede ([AVELAR et al., 2015](#); [ISLAM et al., 2016](#)). Neste artigo, o foco está em questões centradas nos roteadores mesh, ou seja, no *backbone* IEEE 802.11. Nele, os dados são encaminhados de um roteador para outro até chegar ao destino. Os roteadores tendem a se conectar uns com os outros através de ligações curtas ao invés de longas conexões diretas. Como resultado, a WMN pode cobrir uma mesma área com uma potência de transmissão menor que a de roteadores sem fio tradicionais e, então, sofrer menor interferência e alcançar uma maior vazão. Por outro lado, esse bom desempenho pode ser degradado com o aumento da densidade e consequente número de saltos, o que se deve principalmente à interferência inter-fluxos, que ocorre entre fluxos concorrentes, e à interferência intra-fluxo, que ocorre quando diferentes nós transmitindo pacotes em um mesmo fluxo interferem entre si.

Uma peculiaridade do *backbone* mesh é o padrão de tráfego. Os usuários e dispositivos (ex: IoT) normalmente desejam acessar os recursos disponíveis na Internet. Assim, o tráfego é principalmente entre um usuário/dispositivo final e o Portal

Mesh. Logo, uma grande quantidade de tráfego tem de percorrer o *backbone* através de longos caminhos. Tal padrão de tráfego pode resultar em congestionamento nas proximidades do Portal, levando a uma degradação significativa do desempenho em termos de vazão e latência.

Figura 14: **Arquitetura de Rede em Malha IEEE 802.11s.**



Fonte: Elaborado pelo autor.

## 2.4.2 Cenários de Aplicação

As redes *mesh* possuem características como baixo custo de implantação, fácil expansão, auto cura e auto organização. Tais características tornam possível a aplicação das WMNs nos mais diversos cenários. As subseções seguintes apresentam e descrevem alguns dos cenários onde há possibilidade de aplicação das redes mesh.

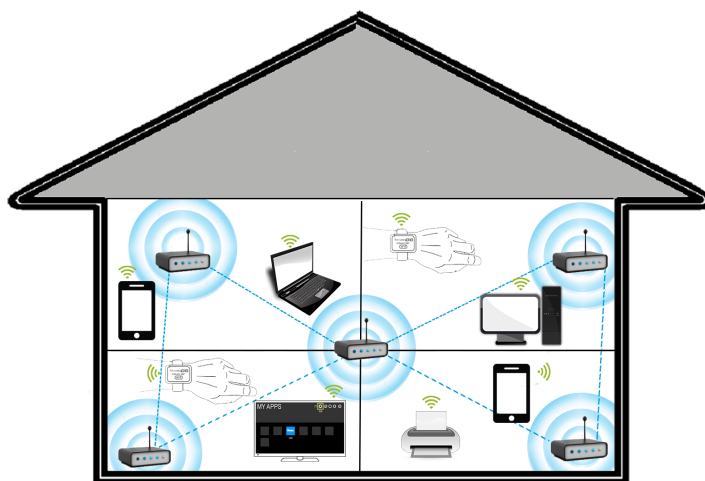
### 2.4.2.1 Redes domésticas

As redes mesh podem substituir as tradicionais redes 802.11 que possuem roteadores que funcionam como APs individuais conectados à uma rede maior em determinados pontos de uma residência para prover cobertura e acesso. No sentido de malha, os roteadores mesh podem ser espalhados por determinados locais de uma residência fornecendo área de cobertura e acesso de modo descentralizado com adição de características como auto cura e auto organização da rede. Vale ressaltar, que ao invés de ligar diversos APs à rede mundial de computadores (Internet) através de

um cabo em sua porta WAN *Wide Area Network - Rede de Longa Distância*, nas redes *mesh* apenas um nó da rede necessita estar ligado à Internet.

Uma das vantagens que estão previstas no uso de WMNs para substituição das tradicionais IEEE 802.11 é a não há necessidade de cabos de para conectar todos os pontos de acesso. Neste sentido é mais fácil cobrir áreas de difícil acesso pois basta conectar os roteadores *mesh* uns com os outros através do meio sem fio criando um caminho para o tráfego de dados através múltiplos saltos. A imagem a seguir apresenta um exemplo da aplicação de uma rede em malha em um ambiente doméstico para prover a comunicação entre diversos dispositivos com à Internet.

Figura 15: **Possível topologia de uma rede *mesh* em um ambiente doméstico.**



Fonte: Elaborado pelo autor.

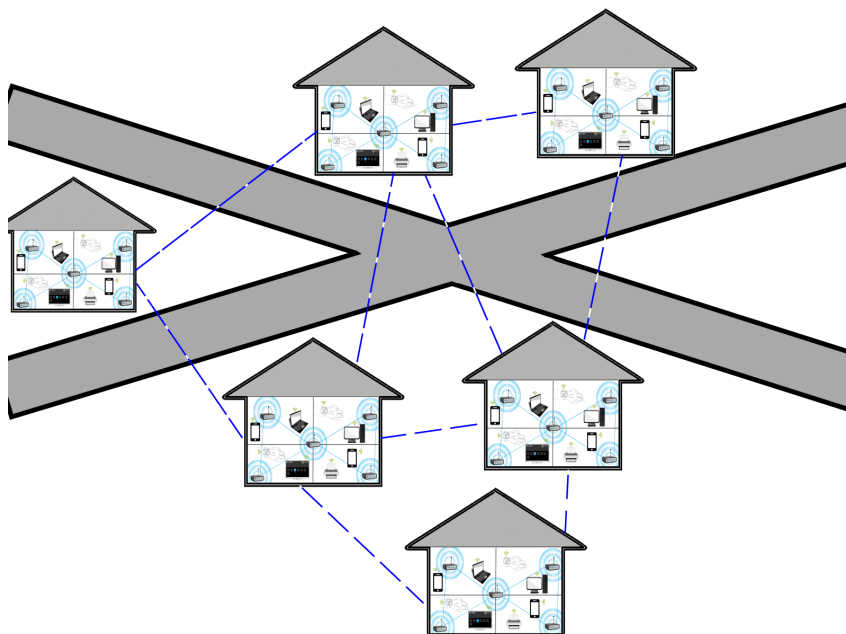
### 2.4.2.2 Redes de acesso comunitário

Em cenários residenciais comuns, encontra-se normalmente um roteador sem fio conectado através de um cabo de rede de um provedor *X* de acesso à Internet. O morador *A* possui em sua residência o cenário descrito. Os moradores *B*, *C* e *D* também possuem o mesmo cenário descrito. Como se pode notar, há quatro redes diferentes para cada morador em sua determinada residência. Com a aplicação de um cenário em malha, apenas um dos moradores (*A*, por exemplo) iria necessitar do acesso à Internet fornecido pelo provedor *X* que estaria conectado à um roteador mesh que serviria como *backbone* para rede em malha que cobriria os demais moradores *B*, *C* e *D*.

Neste sentido, uma única rede em malha cobriria as residências dos quatro moradores, provendo como vantagens, todas as características relacionadas às redes *mesh*. A proposta neste cenário é expandir a ideia apresentada na subseção anterior

(2.4.2.1), permitindo a cobertura de não mais uma residência, mas diversas. Deste modo, é possível servir uma vizinhança inteira através de uma rede em malha fornecendo acesso comunitário. A figura 16 exemplifica a ideia apresentada.

Figura 16: **Possível topologia de uma rede *mesh* comunitária em uma vizinhança.**



Fonte: Elaborado pelo autor.

### 2.4.2.3 Redes Universitárias

De maneira similar às redes domésticas e comunitárias já apresentadas, as redes *mesh* têm a possibilidade de aplicação em cenários de universidades. No mesmo sentido, todas as características relacionadas às redes *mesh* são providas. Na seção de trabalhos relacionados, foram citadas redes universitárias reais (tais como a GT-REMESH (SAADE et al., 2007)) que se utilizaram das redes em malha para cobrir a área da universidade e fornecer serviços e conexão à Internet. Neste sentido, a criação e experimentação de tais redes puderam ser vistas na prática.

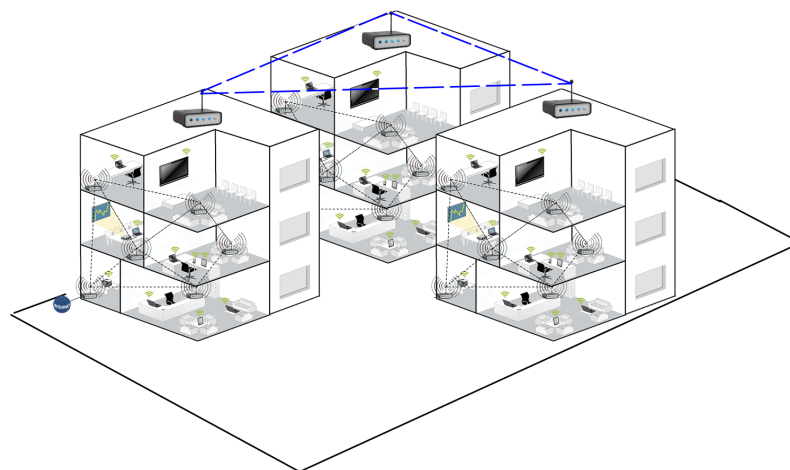
### 2.4.2.4 Redes Empresariais

No âmbito de redes empresariais, há três possíveis cenários para aplicação das redes *mesh*. Em um escritório pequeno (um quarto, por exemplo) ou de tamanho médio, diversos escritórios ao longo de um prédio e seus andares, ou ainda, entre outros prédios. Neste último, especificamente, nas redes sem fio tradicionais cada prédio deveria possuir sua própria infraestrutura de rede, isolando uns dos outros ou fazendo a comunicação por meio de uma infra-estrutura cabeada ou mesmo a própria Internet.

No uso de redes em malha sem fio, os cabos seriam eliminados e a comunicação entre os prédios seria feita através de roteadores *mesh* sem fio diminuindo o custo de implantação de uma infraestrutura cabeada. A figura 17 apresenta um exemplo da aplicação de uma rede em malha sem fio no meio empresarial.

As redes empresariais possuem maior complexidade que as redes residenciais ou de acesso comunitário, pois podem apresentar um maior número de dispositivos que se utilizam da rede. Além disso, a estrutura física do prédio em si pode ser prejudicial para a comunicação no meio sem fio, dada a possibilidade de barreiras que bloqueiam ou interferem na qualidade do sinal de um nó para outro. Portanto níveis de qualidade de serviço se aplicam como um fator agravante para a aplicação de redes em malha no meio empresarial. Vale ressaltar ainda, que este mesmo cenário de redes *mesh* empresariais é válido para aplicação em diversos outros cenários como *shoppings*, centros de convenções, hotéis, aeroportos, dentre outros ambientes de características similares.

Figura 17: **Possível topologia de uma rede *mesh* empresarial inter prédios.**



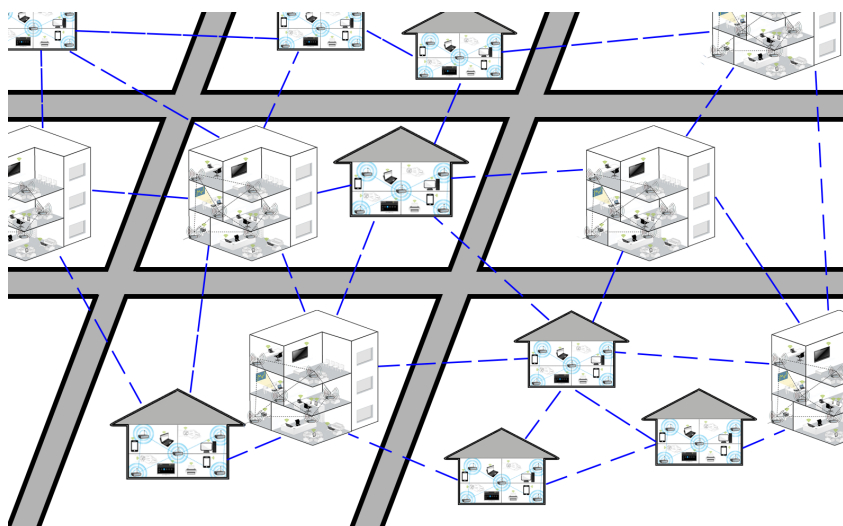
Fonte: Elaborado pelo autor.

#### **2.4.2.5 Redes Metropolitanas**

As redes em malha sem fio também se adequam ao uso em redes metropolitanas (*Metropolitan Area Network* - MAN). A capacidade de expansão e o baixo custo de implantação são características essenciais para aplicação no meio metropolitano. Neste sentido, é possível cobrir uma vasta área com diversos roteadores *mesh* espalhados por diversos pontos de uma metrópole para assim prover área de cobertura e

acesso até nas regiões de difícil acesso onde há dificuldade na implantação de redes infraestruturadas. A figura 18 apresenta um possível cenário de aplicação de redes em malha sem fio no meio metropolitano.

Figura 18: **Possível topologia de uma rede *mesh* metropolitana.**



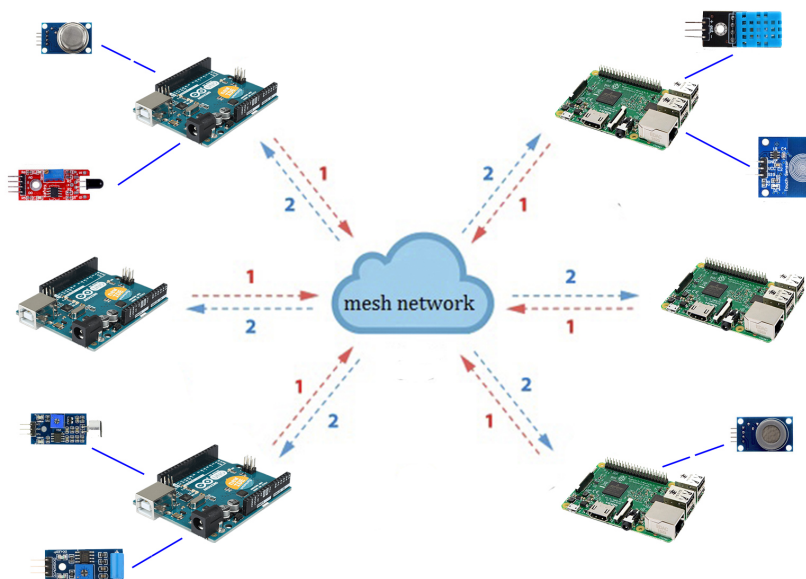
Fonte: Elaborado pelo autor.

#### **2.4.2.6 Redes de Sensores**

Além das possibilidades dos cenários de aplicação para redes *mesh* já citados, há ainda a possibilidade de uso destas redes com sensores. A comunicação entre Redes de Sensores Sem Fio (RSSF) e redes *mesh* possibilita a coleta de dados em regiões de difícil acesso facilitando o monitoramento dos sensores. Neste sentido, diversos sensores poderiam ser alocados na borda de uma rede *mesh* para coletar informações do ambiente (como temperatura, umidade, grau de poluição, dentre outros). Assim, as informações após serem coletadas trafegariam por meio de múltiplos saltos da rede *mesh* que serviria como *backbone* da RSSF, permitindo assim a possibilidade de consultas remotas para o tratamento dos dados coletados. A figura 19 ilustra um exemplo de aplicação de redes em malha sem fio no uso de sensores.

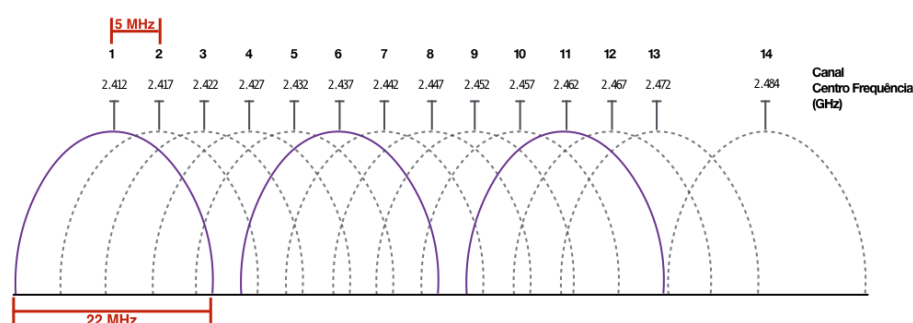
#### **2.4.3 WMN com Múltiplos Canais Múltiplas Interfaces**

O padrão IEEE 802.11 divide o espectro sem fio em diferentes bandas (*canais*) nas faixas de 2,4 GHz e 5 GHz. Por exemplo, o IEEE 802.11b/g usa a banda de 2,4 GHz e o IEEE 802.11a/ac usa a banda de 5 GHz. O IEEE 802.11n usa as duas bandas. Conforme mostrado na Figura 20, os canais têm uma frequência central de 5 MHz e uma largura de banda total do canal de 22 MHz. O nível de energia

Figura 19: **Possível topologia de uma rede *mesh* com sensores na borda.**

Fonte: Elaborado pelo autor.

de radiofrequência que cruza entre esses canais determina a interferência. Assim, qualquer par de canais separados em frequência em 25 MHz (2,4 GHz) / 20 MHz (5 GHz) pode ser utilizado simultaneamente sem interferência mútua. Estes canais são ditos ortogonais ou “não sobrepostos”. O IEEE 802.11b/g/n em 2,4 GHz fornece três canais ortogonais (1, 6, 11), como destacado na Figura 20. Os padrões na frequência de 5 GHz fornecem 12 canais ortogonais. Vale lembrar que a disponibilidade de canais varia de acordo com os órgãos reguladores em todo o mundo. Na Figura 20, a banda de frequência de 2,4 GHz é composta por 14 canais: 11 canais para os domínios brasileiro e norte-americano, 13 canais para o domínio europeu. O último canal é projetado especificamente para o domínio japonês.

Figura 20: **Seleção de três canais ortogonais (1, 6 e 11) com o IEEE 802.11b/g/n na banda de 2,4 GHz.**

Fonte: Elaborado pelo autor.

Cada interface de um roteador da malha está associada às suas próprias cama-



das PHY e MAC. Várias tecnologias de camadas PHY estão disponíveis após subseqüentes modificações da versão inicial do IEEE 802.11. A maioria destas alterações propõe novas PHY a fim de aumentar a vazão agregada da rede, preservando a camada MAC. Como o IEEE 802.11 suporta múltiplos canais ortogonais, os roteadores podem se beneficiar do uso de múltiplas interfaces, ao contrário de nós de redes sem fio que sofrem com restrições de energia (ex: sensores IoT) ou com a alta mobilidade dos nós (ex: Redes veiculares - VANETs *Veicular Ad Hoc Networks*). Dois roteadores vizinhos que desejam se comunicar em uma WMN com múltiplas interfaces devem estabelecer um enlace sem fio entre si, ajustando pelo menos uma das suas interfaces para o mesmo canal. Do ponto de vista geral, uma WMN com múltiplas interfaces está sujeita aos seguintes requisitos:

- O número de canais ortogonais disponíveis é limitado por um padrão (ex: IEEE 802.11a/b/g/n) e regulamentações governamentais;
- As interfaces podem ter diferentes faixas de transmissão e taxas de dados;
- Um nó equipado com  $i$  interfaces só pode se comunicar em  $i$  canais ortogonais de cada vez, o que pode causar o problema de surdez (i.e., o transmissor falha ao tentar se comunicar com o receptor porque as interfaces do receptor estão sintonizadas em canais diferentes);
- Uma interface é capaz de alternar entre canais, mas com sobrecarga.

Um ponto a ser destacado é que o custo de várias interfaces já não é um fator proibitivo para a proliferação de redes sem fio. Porém, o roteador mesh deve ser capaz de processar mais de um canal e implementar mecanismos específicos de coordenação entre os canais disponíveis. A próxima subseção discute sobre as possíveis estratégias de atribuição de canais e interfaces.

#### **2.4.4 Estratégias de Atribuição de Canais e Interfaces**

O potencial de uma WMN com múltiplas interfaces pode ser atingido quando um conjunto de tarefas é executado com sucesso, como a atribuição de canais e interfaces, o roteamento e o escalonamento de enlaces. Entre essas tarefas, a atribuição de canais e interfaces tornou-se a mais proeminente a ser investigada (MOGAIBEL et al., 2016; ISLAM et al., 2016) dado que ela fornece uma base para a melhoria das outras tarefas.

Uma estratégia de atribuição de canais e interfaces define *quando* uma interface deve mudar de canal e para *qual* canal deve mudar (OLIVEIRA; THEOLEYRE;



DUDA, 2011). Esse problema não é trivial no caso típico em que o número de interfaces por nó é geralmente menor que o número de canais disponíveis. Uma estratégia de atribuição de canais e interfaces pode otimizar o desempenho da rede a partir de diferentes perspectivas. Em particular, muitas estratégias propõem um *trade-off* entre conectividade e interferência: uma medida de interferência é otimizada com a restrição de que seja preservada alguma noção de conectividade. No presente trabalho, seguimos essa abordagem. Porém, medidas como vazão, balanceamento de carga, estabilidade e tolerância a falha também podem ser utilizadas. Uma visão mais detalhada de estratégias de alocação de canais e interfaces em WMN pode ser encontrada em (OLIVEIRA; THEOLEYRE; DUDA, 2011; MOGAIBEL et al., 2016; ISLAM et al., 2016).

## 2.5 Protocolos de Roteamento

Nesta seção será discutido sobre os protocolos de roteamento, destacando suas características e funcionamento. Os protocolos dividem-se em três grupos referentes ao modo de operação: reativos; proativos e híbridos. Tendo isso em vista, foi escolhido um protocolo de cada modo, sendo o B.A.T.M.A.N escolhido no modo proativo, o AODV no modo reativo e o HWMP no modo híbrido. Ambos os três protocolos escolhidos foram testados e tiveram sua análise apresentada no capítulo 4.

### 2.5.1 Protocolo B.A.T.M.A.N.

O protocolo B.A.T.M.A.N. (Better Approach To Mobile Adhoc Networking) (JOHNSON; NTLATLAPA; AICHELE, 2008; B.A.T.M.A.N., 2008) é um protocolo que opera em modo proativo que opera para determinar rotas multisaltos em redes *ad hoc* com nós móveis (MOZUMDER; ACHARJEE; ROY, 2014). A estratégia usada por este protocolo consiste em espalhar conhecimento dos melhores caminhos ponta a ponta para os nós que constituem a malha. Assim, cada nó mantém a informação do *melhor próximo salto* na direção dos demais nós, evitando guardar informações desnecessárias de todos os demais nós que compõem a rede (B.A.T.M.A.N., 2008).

Com mais detalhes, cada nó envia mensagens periodicamente para informar os nós vizinhos de sua existência. Tais mensagens são denominadas OGM (*OriGinator Message* - Mensagem da Origem). Os vizinhos, por sua vez, retransmitem os OGMS para informar seus vizinhos acerca da existência do nó originário e assim é feito até atingir todos os nós da rede. Neste sentido, a rede é inundada com estes pequenos pacotes de 52 bytes que contêm pelo menos o endereço do nó originador, o endereço do nó que está a transmitir, um número de sequência e o período de vida dos

pacotes na rede (*Time To Live* - TTL) que pode ser alterado pelos nós de forma a limitar o número de saltos ([HARIYADI; PRATOMO; AFFANDI, 2016](#)). Os números de sequência servem para perceber se uma mensagem recebida trata-se de uma mensagem nova ou antiga, pois qualquer mensagem recebida com um número de sequência menor que o número de sequência recebido na mensagem anterior trata-se de uma mensagem antiga e deve ser descartada. Vale ressaltar ainda, que durante a difusão dos pacotes OGM, cada nó o retransmite apenas uma vez caso receba o OGM do nó considerado o melhor salto ([B.A.T.M.A.N., 2008](#)).

OGMs que seguem por caminhos onde a qualidade dos links sem fio é fraca ou está saturada sofrerão atrasos ou falhas durante seu percurso na malha. Deste modo somente as OGMs que trafegam por boas rotas se propagaram com mais confiança e rapidez na rede. Assim, a malha é inundada por OGMs seletivamente de acordo com os melhores links pelos quais as OGMs percorrem ([B.A.T.M.A.N., 2008](#)).

O protocolo B.A.T.M.A.N. se sai melhor que outros protocolos em alguns cenários de comparação de desempenho devido à sua concepção simples. Como este protocolo recolhe poucas e somente informações necessárias sobre os vizinhos, os nós conseguem calcular rotas de maneira mais eficiente pois não precisam tratar tantas informações ([RODRIGUES, 2017](#)). Um exemplo é que o cabeçalho do B.A.T.M.A.N. é menor que o cabeçalho do protocolo OLSR. Isto evidencia que o tratamento mais complexo dos dados podem conduzir a um menor desempenho do protocolo.

Acerca de sua evolução, o protocolo B.A.T.M.A.N. foi inicialmente lançado como um protocolo que opera na camada 3 (referente ao modelo OSI) e se utiliza de pacotes UDP (*User Datagram Protocol*) para trocar informações de rotas. Tempos depois foi desenvolvida uma extensão chamada de B.A.T.M.A.N. ADV (*B.A.T.M.A.N. ADVanced*) ([ADVANCED, 2012](#)) que opera sob a camada 2 (referente ao modelo OSI). Esta nova versão emula uma ponte Ethernet de modo que todos os nós pareçam estar ligados diretamente e todos os protocolos que operam no topo desta camada não estejam cientes de uma arquitetura de múltiplos saltos na rede subjacente. O B.A.T.M.A.N. ADV opera de modo similar ao B.A.T.M.A.N., mas com as adaptações necessárias para o tratamento de endereços da camada 2, onde em vez do uso de IPs são usados endereços MAC. Outra característica desta nova versão é que em vez de o *daemon* (utilizado no B.A.T.M.A.N.) funcionar no espaço do utilizador, ele funciona no espaço do kernel, evitando assim o custo de copiar pacotes para o espaço do utilizador. Assim, o B.A.T.M.A.N. ADV encapsula todo o tráfego de entrada e saída funcionando como um *switch* entre os nós. Neste momento o protocolo suporta operações de *bridging* e *roaming* para clientes não-*mesh*. Atualmente o B.A.T.M.A.N. ADV é incluído no kernel dos sistemas operacionais Linux como um módulo, permitindo seu uso apenas pelo carregamento do módulo e controle através da ferramenta *batctl* ([B.A.T.M.A.N.,](#)

2008).

## 2.5.2 Protocolo AODV

O AODV (*Ad-Hoc On-Demand Distance Vector*) é um protocolo que opera em modo reativo, assim ele tende a criar e manter rotas somente quando estas são solicitadas (PERKINS; BELDING-ROYER; DAS, 2003). Ele foi baseado no protocolo DSDV (*Destination-Sequenced Distance-Vector*) com o intuito de corrigir os erros existentes no DSDV, como o grande número de mensagens de controle, por exemplo. No AODV, cada nó armazena em sua tabela de roteamento informações acerca do próximo salto, o destino desejado, o número de saltos e um número de sequência. O protocolo AODV foi concebido para cenários *ad hoc* que possuem desde um pequeno até um grande número de nós, onde o protocolo possa funcionar de modo a evitar o desperdício da banda e minimizar o processamento dos nós que pertencem à rede e atuam como roteadores (XAUD, 2017).

O AODV pode ser utilizado em ambientes com baixa, média ou alta mobilidade onde se utiliza de quatro tipos de pacotes de controle para criação e manutenção das rotas na rede:

1. Pacote de Requisição de Rota (*Route REQuest - RREQ*): é uma mensagem de requisição de rota enviada em *broadcast* que dissemina o pedido de rota para os demais nós da rede.
2. Pacote de Resposta (*Route REPLY - RREP*): é uma mensagem de controle enviada em *unicast* que informa a rota até o destino.
3. Pacote de Erro do Caminho (*Route ERRor - RERR*): uma mensagem de controle que informa quando uma rota está indisponível, inválida ou é inexistente.
4. Pacote de Resposta de Reconhecimento da Rota (*Route Reply Acknowledgment - RREP-ACK*): é uma mensagem de controle que realiza a confirmação do recebimento pelo nó de origem do RREQ.

Assim, quando uma descoberta de rota é solicitada, uma mensagem RREQ é difundida pelos vizinhos de modo que estes farão o encaminhamento da mensagem RREQ até o destino. Cada nó ao receber uma requisição de caminho RREQ incrementa a métrica do número de saltos e atualiza sua própria tabela. Quando o destino recebe o RREQ, encaminha em *unicast* uma mensagem RREP para o nó origem. Entradas que não estão sendo usadas na tabela de roteamento são removidas após um determinado período de tempo. Quando um *link* falha, uma mensagem de erro RERR é

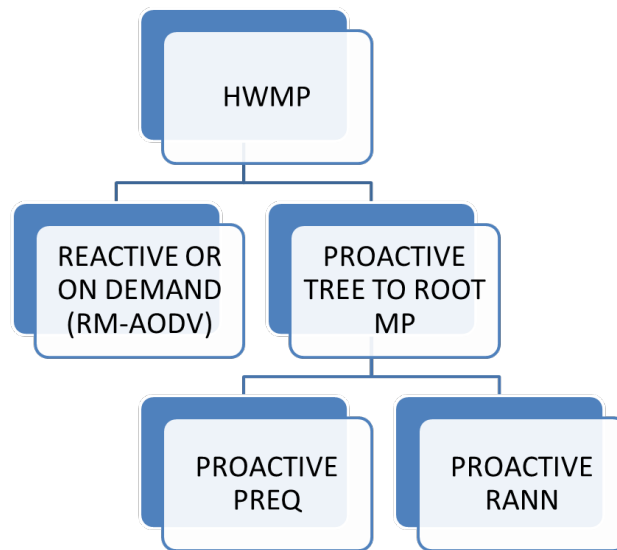
emitida ao nó transmissor e novas requisições de caminho são feitas quando necessário (KUKREJA; SINGH, 2016).

O AODV é um protocolo *loop free*, ou seja, livre de *loops* (ciclos). Assim, os pacotes não ficam circulando indefinidamente pela rede. Outras características deste protocolo são uma rápida convergência quanto à mudanças na rede possibilitando o roteamento dinâmico, tolerância à falhas e alcance de múltiplos saltos entre nós móveis em uma rede ad hoc. Protocolos reativos como AODV tendem a reduzir os cabeçalhos das mensagens usados para controle do tráfego, embora isso acarrete o custo de um aumento da latência na execução de busca por novas rotas.

É importante ressaltar, ainda, acerca da importância da manutenção das rotas. Periodicamente o protocolo AODV envia pacotes chamados de *hello* que são difundidos na rede a fim de verificar a existência ou ruptura de rotas. Se um determinado pacote é esperado por algum nó mas não é recebido, uma mensagem RERR é imediatamente enviada para sinalizar a ruptura de uma rota. Esta manutenção e verificação é importante dado a mobilidade dos nós na rede e, caso não houvessem verificações quanto a validade de links, isto poderia acarretar em uma sequência de erros na tentativa de transmitir informações (XAUD, 2017).

### 2.5.3 Protocolo HWMP

O HWMP (*Hybrid Wireless Mesh Protocol*) é o protocolo padrão utilizado pela IEEE 802.11s (IEEE 802.11s, 2011) para a seleção de caminho, à qual é feita pelos nós que compõem a rede. Todos os nós são capazes de fazer essa seleção, tornando o protocolo totalmente descentralizado. O HWMP foi baseado no protocolo AODV, adaptado para operar na camada de enlace (YANG; MA; MIAO, 2009). A Figura 21 apresenta os modos de operação do protocolo HWMP onde é possível notar que este fornece dois modos de operação para construção da árvore de caminhos: roteamento sob demanda (*On-demand Routing*) ou modo reativo (*Reactive Mode*) apresentado na subseção 2.5.3.1 e roteamento proativo (*Proactive Routing*) ou modo proativo (*Proactive Mode*) apresentado na subseção 2.5.3.2. Há ainda o modo híbrido (*Hybrid Mode*), descrito em 2.5.3.3 que une as 2 (duas) estratégias e opera de modo a variar entre estas (BARI; ANWAR; MASUD, 2012a). Também é interessante ressaltar que as funções do HWMP são implementadas de utilizando dos quadros de controle PREQ/PREP/PERR/RANN/PREG (os quais serão melhor detalhados a seguir) dependendo do modo de operação (proativo, reativo ou híbrido) (RAMADHANI et al., 2016).

Figura 21: **Modos de Operação do Protocolo HWMP.**

Fonte: Elaborado pelo autor.

### 2.5.3.1 Roteamento Reativo

A construção da árvore de caminhos e descoberta de rotas neste modo, ocorre somente se esta operação for necessária, isto é, requisitada. O modo reativo se utiliza de três quadros de controle para descoberta de rota:

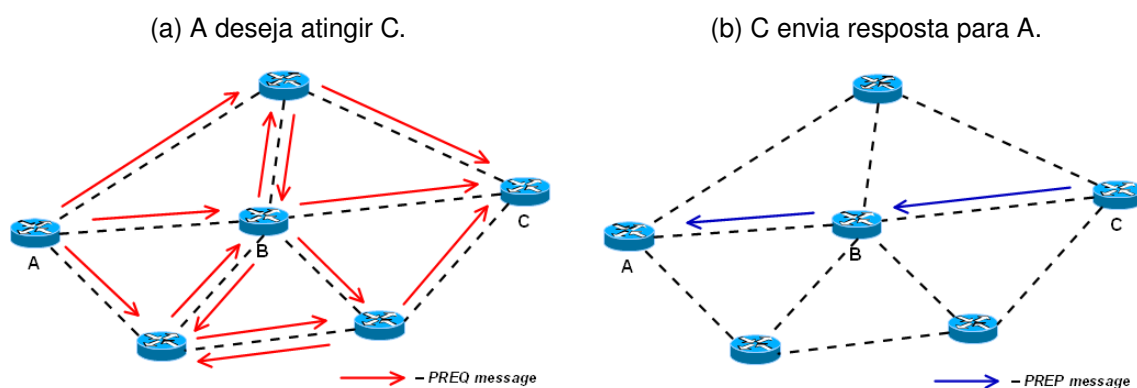
- *Path Request* (PREQ): Quadro de requisição de caminho, enviado pelo nó origem em *broadcast*.
- *Path Replay* (PREP): Quadro de resposta de caminho, enviado pelo nó destino em *unicast* como resposta ao quadro de controle PREQ.
- *Path Error* (PERR): Quadro de controle de erro no caminho. Este, é usado para notificar que um caminho não está mais disponível (Como este quadro de controle é utilizado por ambos os modos, uma subseção exclusiva apresentará seu funcionamento).

Assim, quando um nó quer enviar uma informação pela rede, um nó origem envia um quadro de controle PREQ em *broadcast* para todos os nós da rede. Cada PREQ tem um número de sequência, que permite que os nós percebam se o quadro recebido trata-se de uma mensagem antiga ou recente. Os nós intermediários que recebem o PREQ criam ou atualizam o caminho para a origem, dependendo do número de sequência; se não existir caminho, o quadro PREQ é reencaminhado até que este chegue ao destino. Quando o caminho da origem ao destino é estabelecido, guarda-o na memória. Quando o nó destino recebe o PREQ, envia um PREP via *unicast*

de volta para o nó origem com o caminho que é estabelecido na rede entre ambos os nós. Perceba que neste modo de operação o HWMP se parece com o protocolo AODV descrito anteriormente. Isto porque o modo de operação reativo do HWMP foi baseado no protocolo AODV.

As figuras 22a e 22b apresentadas a seguir ilustram a descrição da construção de rotas do protocolo HWMP descrita no parágrafo anterior. Na figura 22a à esquerda, o roteador *A* quer descobrir o caminho para *C* e para isso envia um quadro PREQ em *broadcast* que será difundido na rede. Quando o roteador *C* recebe o PREQ de *A*, imediatamente responde à requisição através de um quadro de controle PREP em *unicast* para *A* estabelecendo o caminho, como apresentado na figura 22b à direita (MIKROTIK, 2013).

Figura 22: Ilustração da construção de uma rota no protocolo HWMP no modo reativo através de pacotes de requisição de caminho (PREQ) e um pacote de resposta de caminho (PREP).



Fonte: (MIKROTIK, 2013).

### 2.5.3.2 Roteamento Proativo

No modo proativo a construção da árvore de caminhos se dá com um dos nós funcionando como *root* (raiz) que, em geral, são os nós atribuídos como **Portal**. Na maioria dos casos, atribuir um nó como portal significa que o roteador possui interfaces com conexão à alguma outra rede. Assim, por serem roteadores com acesso direto à redes externas é conveniente que os nós atribuídos de portal sejam as raízes. Quando um determinado nó da rede (*A*, por exemplo) deseja transmitir informações (à *C*, por exemplo) o nó origem não conhecendo a rota para o destino encaminhará todas as informações ao portal mais próximo. Este conhece toda a topologia da rede e fará o encaminhamento das informações em nome de *A* através do melhor caminho para atingir o destino *C* (MIKROTIK, 2013).

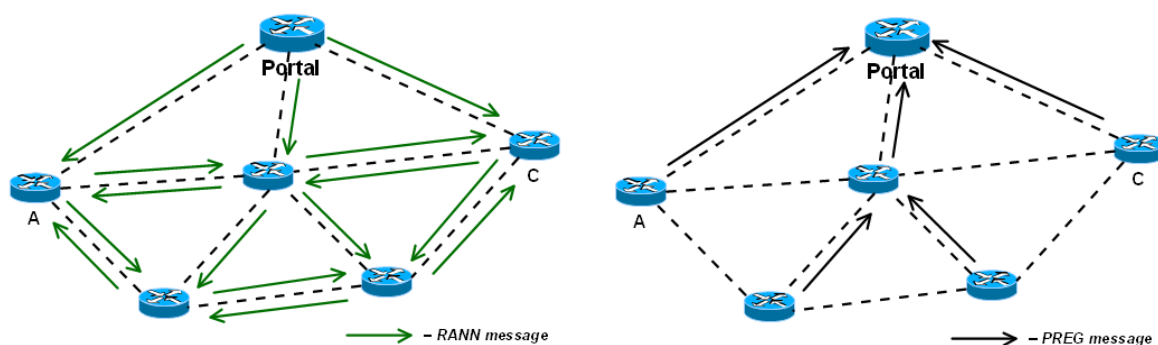
O *root* se utiliza de três mecanismos para descoberta de rotas, o quadro de anúncio RANN para atingir as demais estações da rede, um quadro de resposta PREG e um PERR para identificação de ruptura no caminho.

- *Root Announcement* (RANN): Anúncio de estação raiz; estes quadros são utilizados pela estação que se anuncia como estação raiz para criar a árvore de rotas.
- *Path REGistration* (PREG): Registro de caminho é um quadro de resposta à estação *root* acerca de um caminho estabelecido entre uma estação  $x$  e o *root*.
- *Path Error* (PERR): É o quadro de controle de erro no caminho ou rota. Este, é usado para notificar que um caminho não está mais disponível.

Assim, para a construção da árvore de caminhos, o nó origem (*root*) envia periodicamente RANNs para toda a rede (por *broadcast* para anunciar sua presença inundando a rede com quadros de controle RANN. Deste modo, todos os nós que recebem os RANNs enviam um PREG para o nó origem informando-o do caminho para atingi-lo. Desta forma é construída uma árvore proativa em que o nó origem tem a tabela de *routing* preenchida com todos os possíveis destinos da rede (GUESMIA; GUEZOURI; MBAREK, 2012).

Figura 23: Ilustração da construção da árvore de caminhos no protocolo HWMP no modo proativo através de quadros de anúncio RANN e respostas PREG).

(a) Nó raiz anuncia-se através da inundação de quadros RANN. (b) Demais nós respondem com quadros PREG à requisição da raiz.



Fonte: (MIKROTIK, 2013).

As figuras 23a e 23b ilustram melhor a descrição apresentada no parágrafo anterior. Na figura 23a é apresentada uma topologia em mesh operando em modo reativo onde o nó no topo da rede e denominado de portal é o nó raiz. Neste sentido, são enviados diversos quadros RANN que inundam a rede *mesh* e atingem a todos os nós (à esquerda). Em seguida, na figura 23b as mensagens de resposta PREGs



são enviadas por todos os nós que receberam os quadros de controle RANN à raiz (MIKROTIK, 2013).

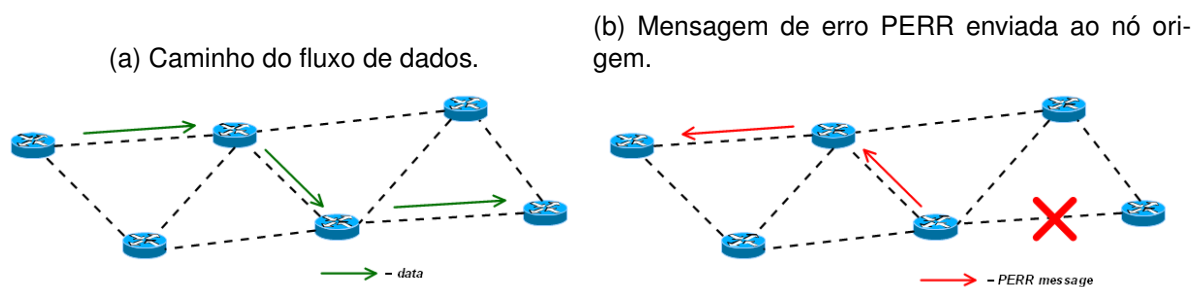
Como pode ser observado na figura 21 a construção da árvore de caminhos no modo proativo também pode ocorrer por meios de quadros PREQ e PREP. O nó origem (*root*) envia periodicamente PREQs para toda a rede por *broadcast* (de modo similar ao RANN). Deste modo, todos os nós que recebem os PREQs enviam um PREP para o nó origem. Desta forma é construída uma árvore proativa em que o nó origem tem a tabela de *routing* preenchida com todos os possíveis destinos da rede (BARI; ANWAR; MASUD, 2012a).

### 2.5.3.3 Modo Híbrido

Com o HWMP operando no modo híbrido, tanto os componentes proativos como os reativos atuam em conjunto no seu funcionamento. A ideia básica por trás deste modo é usar em determinados momentos ou em partes da rede o modo reativo ou o modo proativo para aumentar a escalabilidade do roteamento na rede (RODRIGUES, 2017). Existem extensões do HWMP que possibilitam a escolha de qualquer métrica de roteamento ou ainda, a combinação de diversas regras para tentar obter um melhor desempenho. O Modo reativo tende a oferecer uma grande flexibilidade em redes que variam de topologia. Já a árvore de caminhos construída proativamente é muito eficiente em cenários de redes mesh fixas. A combinação de ambos faz com que o HWMP seja apropriado para uma variedade de diferentes configurações de rede e cenários (YANG; MA; MIAO, 2009).

### 2.5.3.4 Detecção de Alterações na Topologia

Figura 24: Ilustração de quebra no caminho do fluxo de dados e notificação de erro no caminho.



Fonte: (MIKROTIK, 2013).

As figuras 24a e 24b representam um cenário onde a topologia da rede sofre alteração devido a quebra no caminho do fluxo de dados. Na figura 24a à esquerda,



é possível observar o caminho por onde os dados trafegam de um nó origem à seu destino. Quando a conexão entre um dos links é quebrada, pode-se observar na figura 24b à direita, o envio de uma mensagem de erro PERR ao nó origem. A mensagem PERR é propagada para todos os nós no caminho até a origem. Quando o nó origem recebe o PERR, é iniciado um novo processo de descoberta de rotas (seja através do modo proativo ou reativo) para que assim os dados possam trafegar novamente pelos roteadores na malha através de uma nova rota (MIKROTIK, 2013).

## 2.6 Trabalhos Relacionados

Desde a padronização do IEEE 802.11, houve um crescente avanço no número de pesquisas relacionadas às redes wireless. Isto se deve à popularização do padrão, dadas às facilidades de uso e desenvolvimento, além do baixo custo que o IEEE 802.11 proporciona. Tais fatores fizeram a comunidade acadêmica e mercadológica abraçarem o padrão e, assim, a quantidade de pesquisas desde o ano 1999 relacionadas ao IEEE 802.11 chegou a mais de 165 mil até 2014 (SERRANO et al., 2015).

O trabalho de (SERRANO et al., 2015) apresenta uma extensa pesquisa sobre trabalhos e experimentações realizadas com dispositivos de baixo custo (COTS) 802.11. O trabalho investigou diversos artigos acadêmicos e fornece uma visão detalhada do estudo da arte acerca do 802.11 e dispositivos COTS. Assim, este trabalho auxilia os pesquisadores e profissionais a entender as realizações e áreas de pesquisa abordadas, até agora, quanto aos temas em estudo.

De acordo com a pesquisa de (SERRANO et al., 2015), o número de trabalhos realizados em ambientes reais também deve ser destacado. Segundo os autores, entre 20% e 30% das pesquisas realizadas foram feitas utilizando equipamentos reais e, ainda, grande parte destes trabalhos fazem uso de equipamentos de baixo custo na composição de seus *testbeds*. Isto mostra a importância dos testes em ambientes reais, visto que menos da metade dos experimentos usaram *testbeds* (*indoor* ou *outdoor*) reais e enfatizam a dificuldade na criação de *testbeds* reais devido a diversos fatores (como por exemplo: custo, implantação e complicações em termos de manutenção).

Existem diversos trabalhos na área de redes que provam que as redes *mesh* surgiram como uma solução eficiente para fornecer Internet em regiões geograficamente grandes (centros urbanos, universidades, etc.), tanto nacionais quanto internacionais. Além disso, as redes *mesh* estão entre os principais temas estudados e possuem diversos entre os trabalhos de pesquisa mais relevantes, como apresentado em (SERRANO et al., 2015). Os cenários construídos em *testbeds* reais tanto *indoor* quanto *outdoor* apresentados em parte destes trabalhos se destacam entre os mais relevantes

no meio de pesquisas relacionadas ao IEEE 802.11.

Dentre os trabalhos sobre redes *mesh* analisados, destaca-se o de (BICKET et al., 2005) e a criação de um *testbed* real para experimentações apontado entre os mais relevantes. O *Roofnet* foi um projeto elaborado por uma equipe de pesquisadores do Instituto de Tecnologia de Massachusetts (*Massachusetts Institute of Technology* - MIT), em Cambridge, com o objetivo de estudar o comportamento de redes em malha sem fio cujo posicionamento dos nós não possui planejamento. De acordo com os autores, esta estratégia valida com mais precisão a facilidade de implantação, requisito bastante destacado quando o assunto é redes *mesh*. No entanto, o não planejamento da rede pode acarretar em baixas taxas de transmissão ou mesmo não conectividade devido a distância e/ou interferências no meio físico.

O projeto apresentado em (BICKET et al., 2005) consiste em uma rede formada por 37 nós posicionados em edifícios de três a quatro andares que cobrem uma área urbana de alta densidade populacional, próxima a Universidade com cerca de quatro quilômetros. De acordo com os pesquisadores a localização dos nós no topo dos prédios apresentava uma melhor *visão* entre os nós para comunicação em longas distâncias. Como a maior parte dos edifícios possuem coberturas planas, a instalação da antena em seus topos melhora o alcance do rádio com alcance útil para cerca de 100 metros, apesar da grande variação (BICKET et al., 2005). O acesso é realizado por um conjunto de *hardware* específico fornecido pelos pesquisadores que incluía um Computador Pessoal (PC) com sistema operacional Linux e equipado com uma placa de rede sem fio compatível com o padrão 802.11b que era conectada a uma antena omni-direcional por meio de cabeamento *Ethernet*. As antenas omni-direcionais funcionavam a uma potência de 200mW todas no mesmo canal possibilitando assim, a comunicação entre nós vizinhos.

O protocolo de roteamento utilizado na rede *Roofnet* foi um protocolo baseado no DSR (Dynamic Source Routing - Roteamento de Fonte Dinâmica), denominado de *Srcr* que utiliza uma métrica baseada no Tempo Estimado de Transmissão (*Estimated Transmission Time* - ETT). Com isso, o protocolo *Srcr* utilizado busca a rota com maior vazão entre os nós da rede *Roofnet*, isto é, o caminho com menor valor de ETT (BICKET et al., 2005). A vazão média relatada foi de 627 Kbps.

Outro trabalho de enorme contribuição e relevância acerca da criação de uma rede *mesh* apontado por (SERRANO et al., 2015) é o trabalho de (CAPONE et al., 2007) destacado na tabela dos mais relevantes *testbeds*. O *MobiMESH*, do Politécnico de Milão, é a implementação de uma WMN com nós 802.11b/g/h que fornece uma estrutura completa para realização de análises, estudos e testes de comportamento de uma rede em malha em um ambiente real. A *MobiMESH* incluía suporte de mobilidade contínuo para os clientes da malha, roteamento aprimorado com reconhecimento

de múltiplos canais, atribuição de canal, bem como plataformas de provisionamento, gerenciamento, monitoramento e segurança (CAPONE et al., 2007).

A criação de redes em malha sem fio em território nacional como solução eficiente de problemas para fornecer acesso à Internet em áreas institucionais também é realidade. O trabalho de (SAADE et al., 2007) propõe o uso de redes em malha sem fio como solução para o problema da popularização do acesso à Internet em várias comunidades brasileiras. Para tal, é apresentada uma solução de redes *mesh* de baixo custo desenvolvida pela Universidade Federal Fluminense (UFF). Neste sentido, o projeto ReMesh (REMESH-UFF-RNP, 2006) apresenta a criação da rede proposta por (SAADE et al., 2007).

O trabalho de (SAADE et al., 2007) implantou uma rede em malha sem fio de acesso comunitário em um dos campi da UFF, fornecendo acesso banda larga para funcionários, alunos e professores que residem nas proximidades do campus. A UFF possui seus campi integrados a diversas comunidades na cidade de Niterói, incluindo os bairros de Icaraí, Boa Viagem, Ingá, Santa Rosa, além do centro de Niterói. De acordo com os autores, a topologia da cidade juntamente da alta densidade populacional e a proximidade dos edifícios residenciais aos diversos campi da UFF propiciam um cenário perfeito para implantação de redes de acesso do tipo Mesh.

No projeto, foi definido o protocolo OLSR (Optimized Link State Routing Protocol) como responsável pela seleção de caminhos e roteamento. O mesmo é um protocolo que opera em modo proativo e que, de acordo com os autores, foi escolhido por apresentar maior estabilidade neste tipo de rede e roteadores sem fio. Os roteadores usados são do fabricante linksys modelo WRT54G equipados com *firmware* de código aberto OpenWRT, que foi embarcado substituindo o *firmware* original, utilizando o padrão IEEE 802.11g para comunicação entre links. Os roteadores mesh sem fio foram instalados no topo dos edifícios ou casas dos usuários da comunidade próximos à universidade (SAADE et al., 2007).

Vale ressaltar ainda que o protocolo OLSR utilizado no projeto ReMesh não estava em sua forma original. O mesmo teve o cálculo de suas métricas modificado. Primeiramente, a métrica utilizada era a ETX (*Estimated Transmission Count*), porém, foi constatado que a utilização da mesma poderia acarretar em instabilidade nas tabelas de roteamento bem como uma alta taxa de perda de pacotes. Isto ocorre pois o ETX seleciona sempre o menor caminho, independentemente se este possui altas taxas de perda, ao invés de caminhos mais longos com melhores taxas de entrega (ALBUQUERQUE et al., 2006). Tendo isso em vista, para melhoria da métrica ETX foi proposta uma nova métrica intitulada de *Minimum Loss* (ML) à qual foi integrada ao protocolo OLSR, denominando-se assim, de OLSR-ML. Em sua proposta, o OLSR-ML define a probabilidade de transmissão com sucesso entre dois nós. Em um caminho

com múltiplos saltos, a probabilidade de transmissão com sucesso é dada pelo produto das probabilidades em cada salto. Desta forma o melhor caminho entre dois nós será a rota que apresenta maior probabilidade de sucesso na transmissão (SAADE et al., 2007). De acordo com o trabalho apresentado, o novo protocolo apresentou, em testes, maior estabilidade e perda menor de pacotes quando comparado a métrica ETX em sua forma original.

O trabalho de (NETO et al., 2014) avaliou o comportamento do protocolo IEEE 802.11s (HWMP) em topologias com múltiplos saltos. Em particular, no trabalho destacaram-se os limites do protocolo HWMP para lidar com os nós de múltiplas interfaces. É apresentado que o protocolo IEEE 802.11s pode explorar roteadores sem fio com múltiplas interfaces e múltiplos canais para aumentar o *through-put* (vazão) da rede. A proposta é caracterizar completamente o desempenho do IEEE 802.11s ao usar roteadores com múltiplas interfaces e isolar alguns problemas de desempenho existentes no protocolo. Como resultado é mostrado que a replicação de mensagens de controle conduz a um mau comportamento, impactando negativamente o desempenho do HWMP. No entanto, apesar das descobertas e da relevância dos resultados, a validação foi obtida por meio de simuladores. O presente trabalho apresenta resultados obtidos através de um *testbed* de uma WMN com múltiplos canais e múltiplas interfaces real, com uso do protocolo HWMP. Vale ressaltar que o presente trabalho não visa avaliar o comportamento do HWMP a fundo, porém os resultados apresentados por (NETO et al., 2014) foram considerados para entender o funcionamento da WMN criada neste trabalho.

Uma ferramenta que trata da interferência de canais é o Meraki, um sistema de gerenciamento de redes baseado em nuvem para monitoramento de dados de redes wireless convencionais, trocando informações entre pontos de acesso. O trabalho de (BISWAS et al., 2015) apresenta uma análise dos dados coletados em um longo período de tempo por milhares de pontos de acesso Cisco Meraki System. São coletados dados de 20.667 redes sem fio em regiões urbanas e rurais operadas por 11.788 organizações administrativas. É apresentado ainda, uma análise da utilização de canais feita por 10.000 pontos de acesso próximos a estes pontos de acesso. Os equipamentos utilizados foram o Cisco Meraki MR16 e Cisco Meraki MR18 802.11n com o segundo possuindo 3 rádios, o primeiro operando na banda 2,4 GHz, o segundo na banda 5 GHz e o terceiro é responsável exclusivamente pela análise de espectro. Assim, são utilizados equipamentos homogêneos para obtenção dos resultados. Apesar de eficiente, esta é uma solução de custo elevado e utiliza *software* proprietário, o qual é restrito à mudanças, não permitindo ser manipulado com total acesso e limitando a popularização da proposta.

O trabalho de (ANAS et al., 2015) avalia o protocolo B.A.T.M.A.N. para redes

móveis *ad hoc* mostrando a implementação prática de uma rede em malha sem fio em ambiente *outdoor*. Para a criação da malha são usados nós ALIX 3d2 *series* equipados com processador AMD Geode LX800 de 500 MHz, com um cartão de memória *flash* compacto contendo o sistema Voyage Linux na versão 0.8 equipado com o protocolo B.A.T.M.A.N. Os rádios se dão por antenas omnidirecional de 6 dBi que opera o padrão 802.11 b/g/n na faixa de 2,4 GHz. Foi utilizada a ferramenta iPerf para efetuar medição da largura de banda. Neste sentido, o artigo apresentado fornece tanto experimentações reais quanto práticas de malhas sem fio em ambientes *outdoor* usando o protocolo B.A.T.M.A.N. para roteamento.

Vale ainda ressaltar os estudos da NASA (*National Aeronautics and Space Administration* - Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço) que apontou as redes *mesh* como uma tecnologia chave para o futuro das operações espaciais humanas e robóticas. Isto porque as redes de malha sem fio permitem a implantação rápida e fornecem cobertura em regiões não desenvolvidas. Além disso, as redes de malha também possuem características de auto cura, flexibilidade e facilidade de extensão, qualidades não encontradas nas infra-estruturas tradicionais redes. O trabalho de (DECRISTOFARO; LANSDOWNE; SCHLESINGER, 2014) desenvolveu uma rede *mesh* 802.11b/g/n que consiste na combinação de dispositivos heterogêneos comerciais de baixo custo (COTS) equipados com *firmware* de código aberto objetivando entender melhor a maturidade, características e a capacidade deste tipo de rede.

No trabalho de (DECRISTOFARO; LANSDOWNE; SCHLESINGER, 2014), foram utilizados roteadores TP-Link WR 1043ND equipados com o *firmware* OpenWRT e *laptops* com sistema operacional Linux. Como o protocolo HWMP (usado nos experimentos) vem incluído no *kernel* Linux por padrão, ambos os equipamentos que executavam o mesmo protocolo podiam se comunicar na mesma malha. Quando ao protocolo B.A.T.M.A.N. que também foi utilizado, o mesmo possui pacotes de fácil instalação através de comandos presentes na distribuição Linux. Neste sentido, se dava a heterogeneidade citada pelos autores, graças a comunicação entre os equipamentos usados que executavam os mesmos protocolos.

O trabalho de (DECRISTOFARO; LANSDOWNE; SCHLESINGER, 2014) apresentou uma análise de redes *mesh* com equipamentos comerciais de baixo custo heterogêneos com código livre em ambientes de múltiplos saltos *indoor* e *outdoor*. Os protocolos utilizados para obtenção dos resultados foram o B.A.T.M.A.N.-Adv e o HWMP juntamente da ferramenta iPerf para medir a largura de banda na rede. Diversas aplicações de transmissão foram submetidas através da malha, incluindo voz e vídeo, e as medidas de desempenho foram feitas em diferentes cenários operacionais.

Apesar dos inúmeros trabalhos estudados e apresentados por (SERRANO et al., 2015), dos demais trabalhos apresentados no decorrer desta seção e de suas

contribuições, é possível observar, no entanto, que apesar da relevância e do elevado número de pesquisas envolvendo IEEE 802.11, redes *mesh* e equipamentos de baixo custo (*Commercial off-the-shelf* - COTS), os trabalhos estudados e relatados em (SERRANO et al., 2015) tratam dos temas, geralmente, como elementos para discussão individual destes assuntos. Neste sentido, dados os temas de trabalhos mais relevantes apresentados, o presente trabalho se adequa na importância e relevância quanto às áreas de pesquisas relacionadas às redes sem fio. E em contraponto à análise de componentes individuais, o trabalho além de apresentar uma rede *mesh* com equipamentos de baixo custo (COTS) formada a partir do IEEE 802.11, são apresentadas questões quando a qualidade e seleção de canais bem como discussões quanto o impacto de equipamentos heterogêneos e homogêneos na construção das redes em malha. Estes últimos, são de relevância para a qualidade e desempenho das redes *mesh* e apesar de haver trabalhos neste sentido, poucos são os trabalhos validados em *testbeds* reais, como é feito no presente trabalho.

Levando todos estes aspectos em consideração, o presente trabalho apresenta a criação e configuração de uma rede em malha sem fio com múltiplas interfaces e múltiplos canais em um ambiente real, com equipamentos comerciais de baixo custo (COTS) e de código aberto. Os testes na malha e equipamentos utilizados são submetidos ao uso de três protocolos, que operam em modo híbrido, reativo e proativo, sendo eles o HWMP, B.A.T.M.A.N. e AODV. Os experimentos foram conduzidos a fim de compreender finamente o comportamento destas redes em determinadas condições, bem analisar suas características e capacidade.



### 3 PROPOSTA

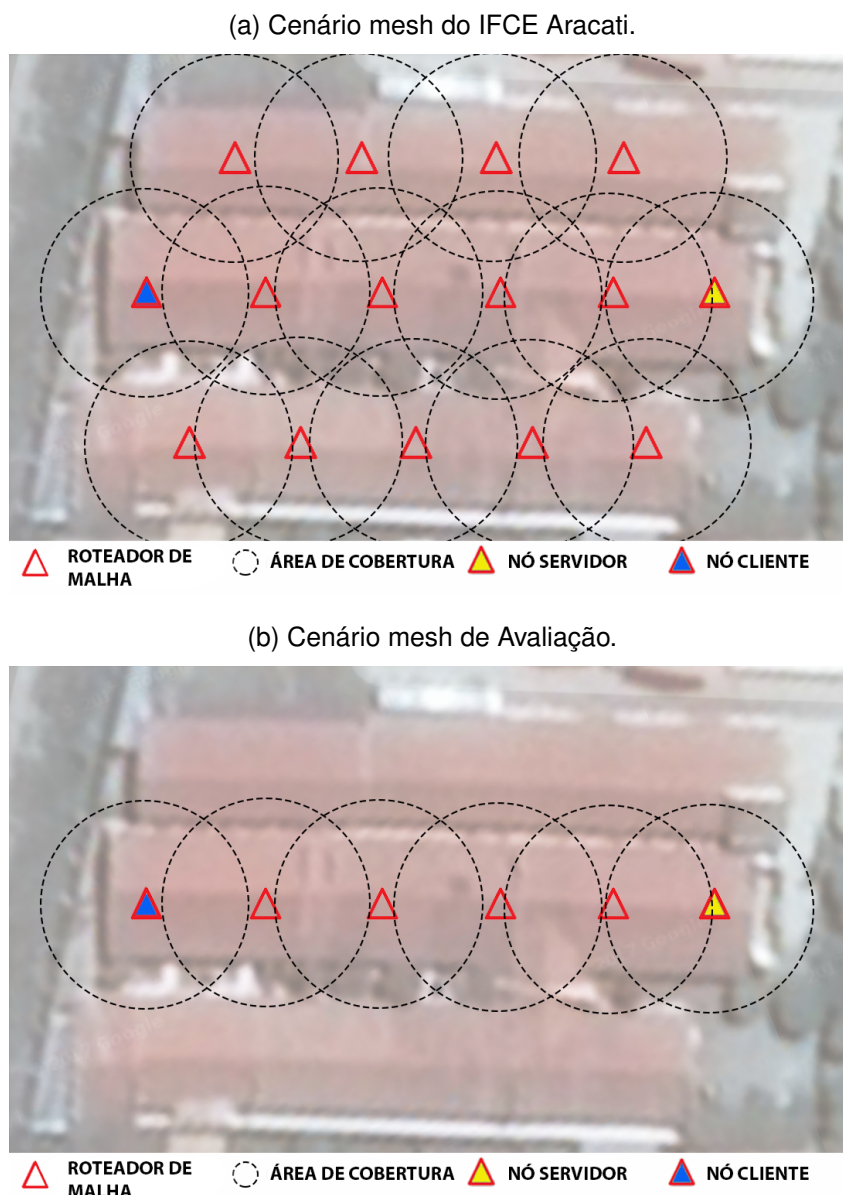
Esta seção descreve a metodologia experimental empregada na avaliação da rede mesh. São apresentados os componentes de *hardware* que compõem a rede *mesh* dos cenários de avaliação, bem como as principais entidades de software responsáveis pelo gerenciamento, controle e adaptação da comunicação entre as camadas. O objetivo é delinear e discutir as peculiaridades de uma WMN multi-interface e multi canal de baixo custo com *software* aberto em dois tipos de equipamentos que compõem dois cenários, ao qual foi experimentado em três protocolos de roteamento.

#### 3.1 Cenário de Experimentação

Nesta proposta, o cenário de rede adotado foi o disponibilizado para a comunidade acadêmica do Instituto Federal do Ceará (IFCE) - Campus Aracati conforme ilustrado na Figura 25a. Como é possível observar, o cenário completo da malha possui 15 roteadores que estão dispostos de modo a cobrir praticamente toda a área do campus, com os nós posicionados a aproximadamente 25 metros de distância um do outro. Para os experimentos apresentados neste trabalho foram selecionados os roteadores centrais da rede conforme é destacado na Figura 25b. A escolha dos nós centrais da rede, apenas, ocorreu para que a obtenção dos resultados fossem melhor analisados em função do número de saltos. Entender o comportamento da rede, bem como avaliar a vazão da rede através do número de saltos é importante para prover os requisitos mínimos acerca da QoS requerida para o funcionamento de uma rede usual para os universitários que desfrutam da malha.

Outro fator para justificar a escolha dos nós centrais, é para continuar provendo acesso à Internet para os usuários por através dos demais nós enquanto, em paralelo, são feitos experimentos na rede. Fazer experimentações enquanto há tráfego de dados de usuários na rede pode não ser uma proposta interessante. Isto porque o desempenho da malha nos *horários de pico* pode ser comprometido, gerando resultados inconsistentes acerca da capacidade que a malha pode suportar.

Neste sentido, é interessante destacar ainda, que o mesmo cenário de teste foi utilizado em todos os experimentos, havendo apenas a substituição dos equipamentos para serem efetuados testes na proposta de diferentes *hardwares*. Dito isso, os resultados serão tratados acerca de dois cenários de teste iguais, porém, com equipamentos com *hardwares* diferentes a fim de verificar o comportamento das WMN no uso dos protocolos B.A.T.M.A.N., HWMP e AODV. O primeiro cenário é composto por equipamentos de baixo custo com interfaces *heterogêneas* e o segundo é composto

Figura 25: **Cenários de rede considerados para os experimentos do trabalho.**

Fonte: Elaborado pelo autor.

por equipamentos de médio custo com interfaces de *hardware* homogêneas. Este tipo de análise visa comparar o desempenho dos protocolos no uso de componentes de *hardware* homogêneos e heterogêneos na criação da malha, bem como comparar o desempenho dos roteadores de baixo e médio custo utilizados.

Conforme citado anteriormente, o uso de múltiplas interfaces na rede em malha melhora o seu desempenho, pois diminui as interferências intra e interfluxo, aumenta a relação sinal-ruído (*Signal-to-Noise Ratio – SNR*) e, conseqüentemente, melhora a vazão na rede. Neste sentido os dois cenários de testes possuem equipamentos com 2 interfaces de rede. As subseções seguinte apresentam os cenários e em detalhes os equipamentos de *hardware* utilizados na sua configuração. São apresentadas suas



características e composição em detalhes, visando o esclarecimento e possibilidade de replicação do cenário através de outros pesquisadores.

Figura 26: **Equipamentos utilizados para construção da rede em malha.**

(a) Roteador TP-Link TL-WR842ND equipado com antena externa USB TP-Link TL-WN721N.



(b) Roteador PC Engines ALIX3D3.



Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.1.1 Cenário de testes 1

O primeiro cenário é composto por seis roteadores TP-Link de baixo custo (COTS *Commercial off-the-shelf*) modelo TL-WR842ND (uma visualização do equipamento também é apresentada na figura 26a) que opera na banda 2,4 GHz e é capaz de atingir até 300 Mbps de velocidade. É interessante ressaltar que apesar de existirem duas antenas físicas no roteador em questão, ambas estão associadas a apenas uma interface de rede (*Network Interface Card* - NIC). Assim, para que este equipamento pudesse se adequar a proposta de múltiplas interfaces houve a necessidade da adição de um segundo NIC no roteador. Portanto, o segundo NIC foi adicionado ao roteador por meio de uma antena externa USB, que consequentemente gera um cenário com *hardwares* heterogêneos. A segunda interface é da fabricante TP-Link modelo TL-WN721N que opera na banda 2,4 GHz e pode atingir velocidades de até 150 Mbps. A tabela 2 apresenta as especificações de técnicas de *hardware* do roteador TP-Link TL-WR842ND.

Com a adição de um novo NIC USB, o roteador em questão agora se adequa a proposta deste trabalho, possuindo baixo custo e múltiplas interfaces. Para detalhar melhor a diferença de custo, um roteador com múltiplas interfaces custa em média no mercado R\$ 1.000,00, enquanto o roteador TL-WR842ND juntamente com a antena externa TL-WN721N totalizam aproximadamente R\$ 300,00.

Tabela 2: **Especificações do roteador TP-LINK TL-WR842ND utilizado na composição do primeiro cenário de teste.**

|                                  |   |
|----------------------------------|---|
| <b>Interfaces:</b>               | 1 Placa de rede sem fio<br>4 Portas LAN 10/100Mbps<br>1 Porta WAN 10/100Mbps<br>1 Porta USB 2.0 |
| <b>Antenas:</b>                  | 2 antenas externas destacáveis de 5 dBi (RP-SMA)  |
| <b>Padrões Wireless:</b>         | IEEE 802.11n, IEEE 802.11g, IEEE 802.11b  |
| <b>Frequência:</b>               | 2.400-2.4835 GHz e 5 GHz  |
| <b>Arquitetura:</b>              | MIPS 74Kc V4.12   |
| <b>Velocidade da CPU:</b>        | 535 MHz   |
| <b>Tamanho da memória flash:</b> | 8 MB  |
| <b>Tamanho da memória RAM:</b>   | 32 MB   |
| <b>System-On-Chip:</b>           | Atheros AR9341  |
| <b>RAM chip:</b>                 | Winbond W9425G6JH-5   |

Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.1.2 Cenário de testes 2

O segundo cenário é composto por seis roteadores de médio custo da fabricante PC Engines modelo ALIX3D3 (uma visualização do equipamento também é apresentada na figura 26b). Em contraponto ao primeiro cenário, deste tipo de equipamento já conta com 2 interfaces de rede (NIC), não necessitando da adição de uma antena externa USB. Vale ressaltar que neste segundo cenário, o equipamento utilizado também suporta *dual band*, assim seus NICs podem operar tanto na frequência 2,4 GHz quando em 5 GHz. Porém, a avaliação foi feita apenas utilizando a banda 2.4GHz, visando igualdade na comparação dos resultados obtidos, visto que esta frequência possui um número muito limitado de canais ortogonais (apresentado em 2.4.3) quando comparado à banda 5 GHz.

O equipamento ALIX3D3 utilizado no segundo cenário possui *hardware* muito superior quando comparados aos roteadores do primeiro cenário. No entanto, este segundo equipamento conta com um maior custo para aquisição. Os roteadores ALIX3D3 custam na faixa de R\$ 800,00 já com adição de seus periféricos (2 NICs, *SD Card* de 8 GB, antenas de 5 dBi, fonte de alimentação). É válido ainda ressaltar que este produto não está disponível para venda no Brasil, assim, este é o valor bruto estimado através da conversão das moedas Dólar (US\$) para Real (R\$) na cotação atual, sem contar taxa de exportação do equipamento. A tabela 3 apresenta as especificações de técnicas de *hardware* do roteador.

Tabela 3: **Especificações do roteador PC Engines ALIX3D3 utilizado na composição do segundo cenário de teste.**

|                                  |   |
|----------------------------------|---|
| <b>Interfaces:</b>               | 2 Placas de rede sem fio<br>1 Porta LAN 10/100Mbps<br>2 Porta USB 2.0 |
| <b>Antenas:</b>                  | 2 antenas externas destacáveis de 5 dBi (RP-SMA)                      |
| <b>Padrões Wireless:</b>         | IEEE 802.11n, IEEE 802.11g, IEEE 802.11b, IEEE 802.11ac               |
| <b>Frequência:</b>               | 2.400-2.4835 GHz  |
| <b>Arquitetura:</b>              | x86   |
| <b>Velocidade da CPU:</b>        | 500 MHz   |
| <b>Tamanho da memória flash:</b> | 50 MB   |
| <b>Tamanho da memória RAM:</b>   | 256 MB  |
| <b>System-On-Chip:</b>           | AMD Geode LX800   |
| <b>RAM chip:</b>                 | DDR SDRAM, 64 bit de largura para alta largura de banda de memória    |

Fonte: Elaborado pelo autor.

## 3.2 Ferramentas de Software

Em geral, equipamentos comerciais de baixo custo não possuem configuração para criar redes em malha e ainda, quando possuem, estes se utilizam de *software* proprietário e isso dificulta a manipulação bem como a coleta de dados para pesquisas na área. Neste sentido, existem algumas soluções de código aberto que podem ser embarcadas em roteadores dos mais diversos fabricantes e modelos e assim possibilitam a criação de redes em malha, bem como a manipulação total acerca de configurações no *software*. Como exemplo, podem ser citadas as distribuições OpenWRT ([OPENWRT, 2017](#)) e DD-WRT ([DD-WRT, 2017](#)).

Neste trabalho, a configuração da malha se deu a partir da instalação do *OpenWrt*. A subseção seguinte apresenta uma introdução ao OpenWRT e destaca as soluções utilizadas para criação da malha no uso do *firmware* citado.

### 3.2.1 OpenWrt

O OpenWrt ([OPENWRT, 2017](#)) é uma distribuição GNU / Linux altamente extensível para dispositivos embarcados, no geral, roteadores sem fio. Ele foi projetado para ser um sistema operacional completo e facilmente modificável para atuar em roteadores. O OpenWrt fornece um sistema de arquivos com gerenciamento de pacotes, permitindo assim, a instalação de diversos módulos que permitem a criação, modificação e uso dos mais variados cenários e configurações a partir do próprio sistema,

incluindo a criação de redes em malha. Esse tipo de estratégia libera as restrições antes encontradas com *software* proprietário, permitindo o uso e modificação completa para que o sistema se adeque às necessidades do usuário.

Assim como a generalidade de distribuições Linux, o OpenWrt é uma ferramenta livre e de código aberto, possui acesso fácil e gratuito e seu suporte é prestado por meio da comunidade desenvolvedora. Ainda, este sistema pode ser incorporado à diversos tipos de dispositivos tais como roteadores, computadores pessoais, etc. Devido a estas características, o *firmware* OpenWrt foi embarcado nos roteadores utilizados neste trabalho objetivando a criação de uma rede *mesh*.

Outra característica chave, é que o OpenWrt vem integrado no kernel dos sistemas Linux, podendo assim ser utilizado diretamente nos sistemas de distribuição Linux. A configuração do OpenWrt se dá tanto a partir do terminal através de linhas de comando (*shell*) como pode ser observada na figura 27a quanto através da interface LuCi, que está apresentada na figura 27b. O LuCi é uma interface web desenvolvida na linguagem lua de programação e permite a fácil configuração de parâmetros no OpenWrt.

Apesar da utilização de equipamentos com software proprietário dificultarem a interoperabilidade dos equipamentos, estes no geral são mais fáceis de configurar e possuem, no geral, comandos intuitivos e documentação detalhada para seu uso desenvolvida pelo fabricante. Em contrapartida, os *softwares open source*, como é o caso do OpenWRT, possuem em geral uma documentação diversificada e construída a partir de múltiplas fontes, o que dificulta o uso de determinadas funcionalidades específicas para desempenhar certas tarefas.

Assim como a maioria das demais distribuições Linux, o OpenWRT possui uma comunidade de desenvolvimento ativa que se propõe a evoluir o *firmware* disponibilizado no site oficial através de versões. Porém, a documentação para configurar uma função específica é muitas vezes insuficiente ou desatualizada, necessitando de diversas consultas a fóruns, no geral, através de soluções dadas por outros usuários. A diversificação de fontes de consultas e material consistente para apoio, tornam a utilização do OpenWRT em alguns pontos difícil, confusa e trabalhosa. Tais dificuldades foram constantemente enfrentadas no decorrer deste trabalho.

Os roteadores foram configurados para executar no modo mesh através da instalação e configuração da distribuição linux embarcada OpenWrt (OPENWRT, 2017). Todos os roteadores nos dois cenários de teste foram configurados com os protocolos HWMP, B.A.T.M.A.N. e AODV a fim de terem seu comportamento analisado. A configuração e uso se deu em conjunto com o IEEE 802.11n na banda ISM 2.4 GHz (*Industrial, Scientific and Medical*), que provê a comunicação direta entre os links.



### 3.2.2 iPerf 3

O iPerf 3 é uma ferramenta de teste de velocidade para utilização em conjunto dos protocolos TCP, UDP e SCTP (Iperf 3, 2017). Esta ferramenta é ideal para medições ativas de largura de banda em redes IP, permitindo avaliar o *throughput* máximo atingido na conexão entre *links*. Neste sentido o iPerf 3 suporta vários parâmetros de configuração de entrada tais como tempo, buffers, protocolos (TCP, UDP, SCTP com IPv4 e IPv6) além de dados acerca do tamanho dos pacotes e quantidade de dados a ser transferida. Através desta ferramenta é possível obter resultados como a taxa de transferência, perda de pacotes, vazão e *jitter*. A validação deste *software* acerca de resultados concisos se dá através dos vários trabalhos existentes na literatura que fazem uso do iPerf em seus resultados. Alguns trabalhos que fazem uso do iPerf 3 que podem ser citados são (SINGH; TALASILA, 2015; ANAS et al., 2015; DECRISTOFARO; LANSLOWNE; SCHLESINGER, 2014). A figura 28 apresenta um exemplo de saída de uma simulação executada no iPerf 3.

Figura 28: Exemplo de saída do iPerf 3.

```
[root@centos ~]# iperf3 -c 192.168.1.1
Connecting to host 192.168.1.1, port 5201
[ 4] local 192.168.224.129 port 51357 connected to 192.168.1.1 port 5201
[ ID] Interval      Transfer    Bandwidth  Retr  Cwnd
[ 4]  0.00-1.01    sec  9.85 MBytes 82.0 Mbits/sec    0   29.9 KBytes
[ 4]  1.01-2.00    sec  9.35 MBytes 79.0 Mbits/sec    0   37.1 KBytes
[ 4]  2.00-3.00    sec  9.03 MBytes 75.7 Mbits/sec    0   37.1 KBytes
[ 4]  3.00-4.00    sec  9.93 MBytes 83.1 Mbits/sec    0   45.6 KBytes
[ 4]  4.00-5.00    sec  9.77 MBytes 82.1 Mbits/sec    0   35.6 KBytes
[ 4]  5.00-6.00    sec  9.28 MBytes 77.8 Mbits/sec    0   38.5 KBytes
[ 4]  6.00-7.01    sec  9.87 MBytes 82.0 Mbits/sec    0   38.5 KBytes
[ 4]  7.01-8.00    sec  9.73 MBytes 82.4 Mbits/sec    0   49.9 KBytes
[ 4]  8.00-9.00    sec  9.32 MBytes 78.3 Mbits/sec    0   47.1 KBytes
[ 4]  9.00-10.00   sec  9.30 MBytes 78.0 Mbits/sec    0   37.1 KBytes
- - - - -
[ ID] Interval      Transfer    Bandwidth  Retr
[ 4]  0.00-10.00   sec  95.4 MBytes 80.0 Mbits/sec    0
[ 4]  0.00-10.00   sec  95.1 MBytes 79.8 Mbits/sec
iperf Done.
```

Fonte: Elaborado pelo autor.

O iPerf 3 não possui interface gráfica, necessitando da configuração de parâmetros por linha de comando. Ele foi desenvolvido na linguagem C++ de programação e pode rodar em diversas plataformas, incluindo Linux, Unix e Windows (Iperf 3, 2017). No entanto, existe ainda, uma versão do iPerf que possui uma interface gráfica desenvolvida em JAVA onde nela, podem ser ajustados diversos parâmetros através da interface. No entanto, o jperf executa em uma versão antiga do iPerf, além de não ter sido continuada. Deste modo, os resultados apresentados foram obtidos através do iPerf 3.

O uso desta ferramenta consiste na instalação em um determinado sistema operacional (neste caso, OpenWrt) e necessita executar dois processos, um cliente e um

servidor, aos quais irão trafegar dados entre eles. Neste sentido, como na rede apresentada na figura 25b, um dos nós na extremidade da rede foi configurado como cliente e outro como servidor na extremidade oposta. Feito isso, foram trafegados dados na utilização dos protocolos de transporte TCP e UDP no uso dos três protocolos de roteamento para rede em malha propostos: HWMP, B.A.T.M.A.N. e AODV. Ao término das simulações um arquivo de saída no formato 28 é gerado, ao qual teve o devido tratamento e teve seus resultados discutidos no capítulo 4. A seção seguinte apresenta um maior nível de detalhes quanto à coleta e tratamento dos resultados, além de apresentar e discutir os resultados objetivos a partir de extensivos testes realizados com base na fundamentação apresentada neste capítulo.



## 4 RESULTADOS

Este capítulo apresenta e discute os principais resultados obtidos através de extensivos experimentos realizados na rede *mesh* apresentada na Figura 25b. Serão destacados os resultados mais interessantes que apresentam situações que fundamentam o desempenho das redes *mesh* avaliada no uso de três protocolos HWMP, B.A.T.M.A.N e AODV. Em todas as avaliações, um fluxo de dados foi gerado para cada rodada na ferramenta iPerf 3 (Iperf 3, 2017). Os resultados foram obtidos a partir da execução de 25 repetições às quais foi aplicado um intervalo de confiança de 95%. Os resultados apresentados consistem de uma análise da qualidade dos canais, do impacto da distância, do tipo de tráfego, e por fim uma análise de vazão, SNR, taxa de entrega e retransmissões em função do número de saltos em ambos os cenários em cenários homogêneos e heterogêneos.

### 4.1 Análise da Qualidade dos Canais

Primeiramente, foi realizada uma análise da qualidade dos canais no cenário avaliado. A análise foi feita através da comunicação de um salto entre dois roteadores *mesh* ALIX3D3 conectados a uma distância curta, visando apenas detalhar a interferência de outras fontes sobre a malha. O tráfego gerado foi do tipo TCP para que assim, fosse possível determinar a maior largura de banda possível, ao contrário do UDP que teria que ser limitado pelo referido parâmetro. A tabela 4 apresenta os parâmetros de configuração utilizados para o teste.

Tabela 4: **Parâmetros de configuração para análise de canais.**

|                                 |               |
|---------------------------------|---------------|
| <b>Número de Nós:</b>           | 2             |
| <b>Distância:</b>               | 1 Metro       |
| <b>Número de Repetições:</b>    | 25            |
| <b>Protocolo de Roteamento:</b> | HWMP          |
| <b>Topologia da Rede:</b>       | Ponto a Ponto |
| <b>Protocolo de Transporte:</b> | TCP           |
| <b>Dados Transmitidos:</b>      | 600 MB        |
| <b>Tamanho do Pacote:</b>       | 128 KB        |
| <b>Número de Fluxos:</b>        | 1             |
| <b>Especificação PHY:</b>       | 802.11n       |
| <b>Frequência:</b>              | 2,4 GHz       |

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 5 mostra o resultado dessa análise em termos de vazão, SNR e número



de retransmissões. Os resultados foram capturados por um único roteador para que fosse verificado o impacto das interferências no desempenho da rede. Como observa-se, o canal 6 está entre os canais com menor SNR (80 dB) e ainda apresenta um elevado número de retransmissões. Isso deve-se ao fato de diversos roteadores da rede sem fio do campus e vizinhança serem pré-configurados neste canal. Por outro lado, o canal 1 apresentou o melhor resultado sem nenhuma retransmissão realizada. Esse experimento foi importante para seleção do canal 1, que será considerado para análise dos cenários com um Único Canal (UC), bem como na definição da estratégia de atribuição dos canais nos cenários com Múltiplos Canais (MC). A atribuição de canais em cenários MC prioriza aqueles com um menor número de retransmissões, reduzindo também a interferência com canais adjacentes.

Tabela 5: **Análise da qualidade dos canais no ambiente de avaliação.**

| Canal | Vazão (Mbps) | SNR (dB) | Nº de Retransmissões |
|-------|--------------|----------|----------------------|
| 1     | 59.3         | 82       | 0                    |
| 2     | 56.7         | 80       | 54                   |
| 3     | 54.4         | 80       | 75                   |
| 4     | 51.6         | 80       | 290                  |
| 5     | 51.7         | 81       | 323                  |
| 6     | 52.1         | 80       | 1346                 |
| 7     | 52.7         | 81       | 243                  |
| 8     | 53.9         | 81       | 221                  |
| 9     | 53.5         | 82       | 150                  |
| 10    | 54.3         | 81       | 36                   |
| 11    | 57.5         | 82       | 4                    |

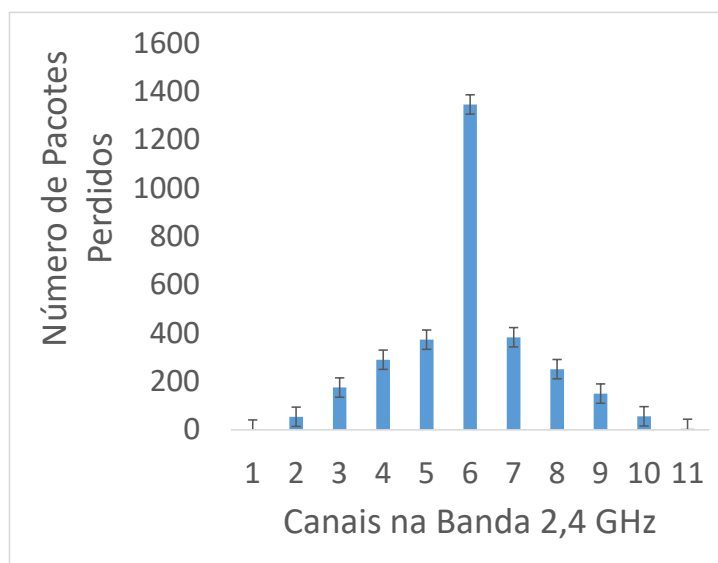
Fonte: Elaborado pelo autor.

É apresentado ainda, um gráfico para melhor visualização dos resultados extraídos da tabela 5. A figura 29 apresenta através de um gráfico de barras a visualização do número de pacotes perdidos em cada canal nos testes que utilizam a banda 2,4 GHz para comunicação entre os nós.

## 4.2 Impacto da distância no desempenho da comunicação entre nós

Esta seção apresenta uma análise do impacto da distância entre os nós que compõem a rede em malha sem fio. Esta análise visa compreender os limites físicos de comunicação entre os *links* bem como a vazão, taxa de entrega, SNR e *jitter* à medida em que dois roteadores se distanciam um do outro. Neste sentido, espera-se encontrar uma distância *ideal* à qual os roteadores possam se comunicar a ponto de

Figura 29: **Gráfico representativo do número de perdas de pacote por canal na banda 2,4 GHz.**



Fonte: Elaborado pelo autor.

manter uma boa qualidade no link e um bom desempenho para que sejam providos os requisitos de QoS para os usuários da malha.

Os testes executados nesta seção foram feitos utilizando ambos os equipamentos, roteadores TL-WR842ND e ALIX3D3. O protocolo de transporte dos dados utilizado foi o UDP e a distância entre os nós variou a cada 25 metros, iniciando-se com 1 (muito próximos) e encerrando-se em 100 metros. Os experimentos foram conduzidos através da comunicação entre dois nós apenas, submetidos a 30 rodadas de teste à quais foi aplicado intervalo de confiança de 95%. A tabela 6 apresenta os parâmetros de configuração utilizados para testar a proposta.

Tabela 6: **Parâmetros de configuração para análise da distância.**

|                                 |                           |
|---------------------------------|---------------------------|
| <b>Número de Nós:</b>           | 2 ALIX3D3<br>2 TL-WR842ND |
| <b>Distância:</b>               | 1 a 100 Metros            |
| <b>Número de Repetições:</b>    | 25                        |
| <b>Protocolo de Roteamento:</b> | HWMP                      |
| <b>Topologia da Rede:</b>       | Ponto a Ponto             |
| <b>Protocolo de Transporte:</b> | UDP                       |
| <b>Número de Pacotes:</b>       | 76800                     |
| <b>Tamanho do Pacote:</b>       | 8 KB                      |
| <b>Número de Fluxos:</b>        | 1                         |
| <b>Especificação PHY:</b>       | 802.11n                   |
| <b>Frequência:</b>              | 2,4 GHz                   |

Fonte: Elaborado pelo autor.

A figura 30 apresenta o resultado obtido a partir das experimentações feitas em função da distância entre os nós. Em mais detalhes, A figura 30a apresenta a vazão em função da distância onde se pode perceber que quanto maior a proximidade entre os nós, maior será a vazão obtida no *link* e obviamente o contrário disso também é verdadeiro. A justificativa para tal resultada está apresentada na subseção 2.2.4, onde em resumo, quanto menor for a distância, melhor será a relação sinal ruído e maior será a taxa de transmissão (vazão). A Figura 30c apresenta o SNR deste experimento e seu resultados e encaixa perfeitamente ao conceito apresentado. Como se pode perceber, nos pontos onde a distância é menor, o SNR é mais alto e a vazão na figura 30a é maior. Conforme a distância aumenta, o SNR diminui ocasionando também na diminuição da vazão.

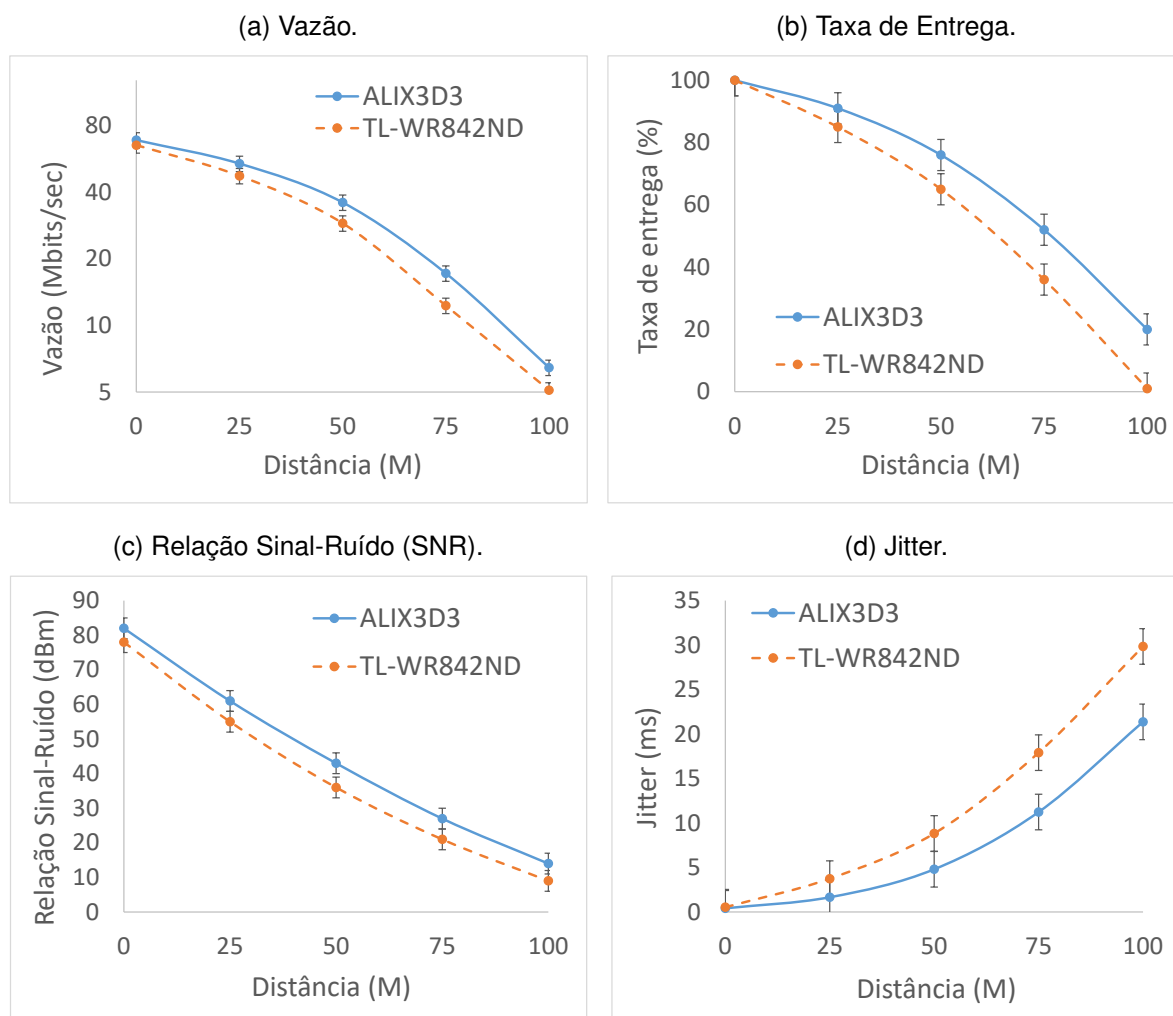
A figura 30b apresenta a taxa de entrega dos pacotes transmitidos em função da distância. Neste resultado se pode perceber que quanto mais distantes os nós estiverem, menor será a taxa de entrega. Tal resultado também pode ser justificado pela relação sinal ruído já explicada. A medida que os nós se distanciam o SNR diminui e consequentemente a conexão física entre os nós torna-se fraca e os pacotes são perdidos com mais frequência, ocasionando na diminuição da taxa de entrega conforme o aumento da distância.

Por fim, a figura 30d apresenta a variação do atraso na rede *jitter*. Como se pode observar, o *jitter* aumenta conforme a distância também aumenta. A relação sinal ruído entre dois nós foi usada para justificar os demais resultados apresentados e com o *jitter* não é diferente. A fraca conexão no meio físico ocasionada pelo baixo SNR faz com que a variação do atraso na entrega dos pacotes na rede, aumente.

Entender estes resultados torna-se necessário para escolha de uma distância média a ser adotada na elaboração do cenário em malha. Como visto, a escolha de distâncias menores que ocasionam na aproximação dos nós pode apresentar bons resultados de desempenho da rede. Por outro lado, quanto maior a distância piores são os resultados. Neste sentido, escolher distâncias próximas de 100 metros pode ocasionar em uma não conexão entre dois nós ou mesmo no não funcionamento da rede. Em termos dos resultados apresentados, escolher uma distância de 100 metros entre os roteadores acarreta em taxas baixíssimas de transmissão que tendem a zero, tornando o uso da malha inviável para prover conexão aos usuários.

Neste sentido, uma distância de 20 metros foi adotada nos cenários de construção da malha. A escolha deste parâmetro se deu a partir da análise dos resultados da figura 30, onde a distância de 20 metros é considerável para cobrir uma determinada área no uso de poucos equipamentos. Os resultados mostram que as taxas atingidas nesta distância não sofreram tanta variação quando em comparação às demais distâncias analisadas, apresentando uma redução de apenas 10% do valor máximo

Figura 30: **Análise do impacto da distância no desempenho das conexões entre nós da malha.**



Fonte: Elaborado pelo autor.

relatado. Portanto, o cenário de malha do IFCE Aracati apresentado na figura 25a possui uma distância média de 20 metros entre cada roteador da malha.

### 4.3 Análise do número de saltos e heterogeneidade dos equipamentos

Esta seção apresenta os resultados obtidos através dos experimentos conduzidos através de *hardwares* heterogêneos e homogêneos. Foi investigado o impacto do número de saltos no desempenho de uma rede *mesh* mono e multicanal com roteadores equipados com múltiplas interfaces homogêneas (roteadores ALIX3D3) e heterogêneas (roteadores TP Link com adição da antena USB). Em todos os cenários, foram enviados 600 Mb de dados do nó gerador para o nó receptor, com em média

20 metros de distância para cada nó. Foram analisados experimentos tanto com o protocolo TCP, quanto com o protocolo UDP. O objetivo principal é analisar o impacto do equipamento utilizado no encaminhamento de pacotes em múltiplos saltos. Para esclarecer as terminologias das figuras apresentadas nos resultados, temos:

- Cenário 1.1 *UCHE* (Único Canal HEterogêneo): todos os roteadores usam um único canal (o canal 1) e as conexões entre os roteadores são estabelecidas entre antenas diferentes, sempre a antena interna (do próprio roteador) gerando tráfego para a externa (antena USB) a cada salto. Os roteadores utilizados foram os TP-Link de baixo custo equipados com uma antena externa USB. É importante destacar que por utilizar apenas um canal em todos os saltos, cada salto é diferenciado apenas pelo *meshid*, parâmetro de configuração para rede *mesh* a partir do OpenWrt.
- Cenário 1.2 *MCHE* (Múltiplos Canais HEterogêneos): todos os roteadores estão configurados com canais diferentes a cada salto. De forma similar ao primeiro cenário, são utilizados roteadores TP-Link de baixo custo equipados com uma antena externa USB. as conexões estabelecidas entre as antenas dos roteadores é heterogênea, ou seja, da antena interna para a externa.
- Cenário 2.1 *UCHO* (Único Canal HOmogêneo): todos os roteadores usam apenas o canal 1 e as conexões entre os roteadores são estabelecidas entre as antenas internas. Neste cenário com interfaces homogêneas foram utilizados os roteadores ALIX3D3 que já possuem duas interfaces de rede que são iguais, sendo assim, homogêneas quanto ao *hardware*. Neste cenário, os saltos também foram definidos pelo *meshid*.
- Cenário 2.2 *MCHO* (Múltiplos Canais HOmogêneos): todos os roteadores estão configurados com canais diferentes a cada salto. De forma similar ao cenário *UCHO*, as conexões entre os roteadores são estabelecidas entre as antenas internas em um salto e os roteadores utilizados foram os ALIX3D3.

As terminologias usadas se referem ao tipo de conexão usada. Quanto a primeira parte da sigla, as duas letras iniciais, sempre em que for citada a sigla UC, refere-se a configuração dos roteadores aos quais dispõem da conexão utilizando apenas um único canal. Em contrapartida, a sigla MC refere-se ao uso de múltiplos canais. Quanto a segunda parte, às duas letras finais, quando é citado HE refere-se a conexão entre antenas de *hardware* heterogêneo que pode ser vista na figura 31a. Esta configuração sempre se utilizará dos roteadores TP-Link no uso de uma antena USB externa. Em contrapartida, quando se utiliza a sigla HO refere-se a conexão en-

tre *hardwares* heterogêneos que pode ser visto na figura 31b que sempre se utilizará de roteadores ALIX3D3.

Figura 31: **Explicação das terminologias HE e HO.**

(a) Cenário referente a uma conexão HE - Heterogênea.



(b) Cenário referente a uma conexão HO - Homogênea.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A figura 32 apresenta os resultados obtidos através do protocolo TCP com base nos cenários descritos anteriormente. O protocolo de roteamento para rede *mesh* utilizado para estes testes foi o HWMP. maiores detalhes acerca dos parâmetros de teste estão descritos na tabela 7.

A Figura 32b mostra que a taxa de entrega em todos os cenários é de 100% dado que o TCP garante a entrega dos pacotes mesmo em casos de perdas na rede. A Figura 32a destaca a superioridade na vazão de banda com utilização de múltiplas interfaces e múltiplos canais visto que em ambos os cenários com os diferentes tipos de equipamentos utilizados, esta arquitetura de rede mostrou-se superior a arquitetura de rede com canais únicos. E ainda, destaca claramente que os cenários com conexões entre antenas homogêneas (*UCHO* e *MCHO*) apresentam uma vazão superior aos cenários com conexões entre antenas heterogêneas (*UCHE* e *MCHE*) para todos os números de saltos. As figuras 32c e 32d mostram um maior número de retransmissões nos cenários com interfaces heterogêneas e também um menor valor de SNR, respectivamente. Vale destacar que o melhor desempenho obtido nos cenários 2.1 e 2.2 em relação aos cenários 1.1 e 1.2 se deve ao tipo de *hardware* utilizado,

Tabela 7: **Parâmetros de configuração para análise de heterogeneidade dos dispositivos através do TCP.**

|                                 |           |
|---------------------------------|-----------|
| <b>Número de Nós:</b>           | 6         |
| <b>Distância:</b>               | 20 Metros |
| <b>Número de Repetições:</b>    | 25        |
| <b>Protocolo de Roteamento:</b> | HWMP      |
| <b>Topologia da Rede:</b>       | Linha     |
| <b>Protocolo de Transporte:</b> | TCP       |
| <b>Dados Transmitidos:</b>      | 600 MB    |
| <b>Tamanho do Pacote:</b>       | 128 KB    |
| <b>Número de Fluxos:</b>        | 1         |
| <b>Especificação PHY:</b>       | 802.11n   |
| <b>Frequência:</b>              | 2,4 GHz   |

Fonte: Elaborado pelo autor.

mas, é interessante observar a consistência do protocolo HWMP visto a constância dos resultados mesmo em diferentes *hardwares*.

A figura 33 apresenta os resultados obtidos para os testes feitos utilizando o protocolo UDP. Todos os quatro cenários de teste foram submetidos e analisados. O protocolo para roteamento de rede *mesh* foi o HWMP, apenas. Maiores detalhes acerca da configuração dos testes estão dispostos na tabela 8

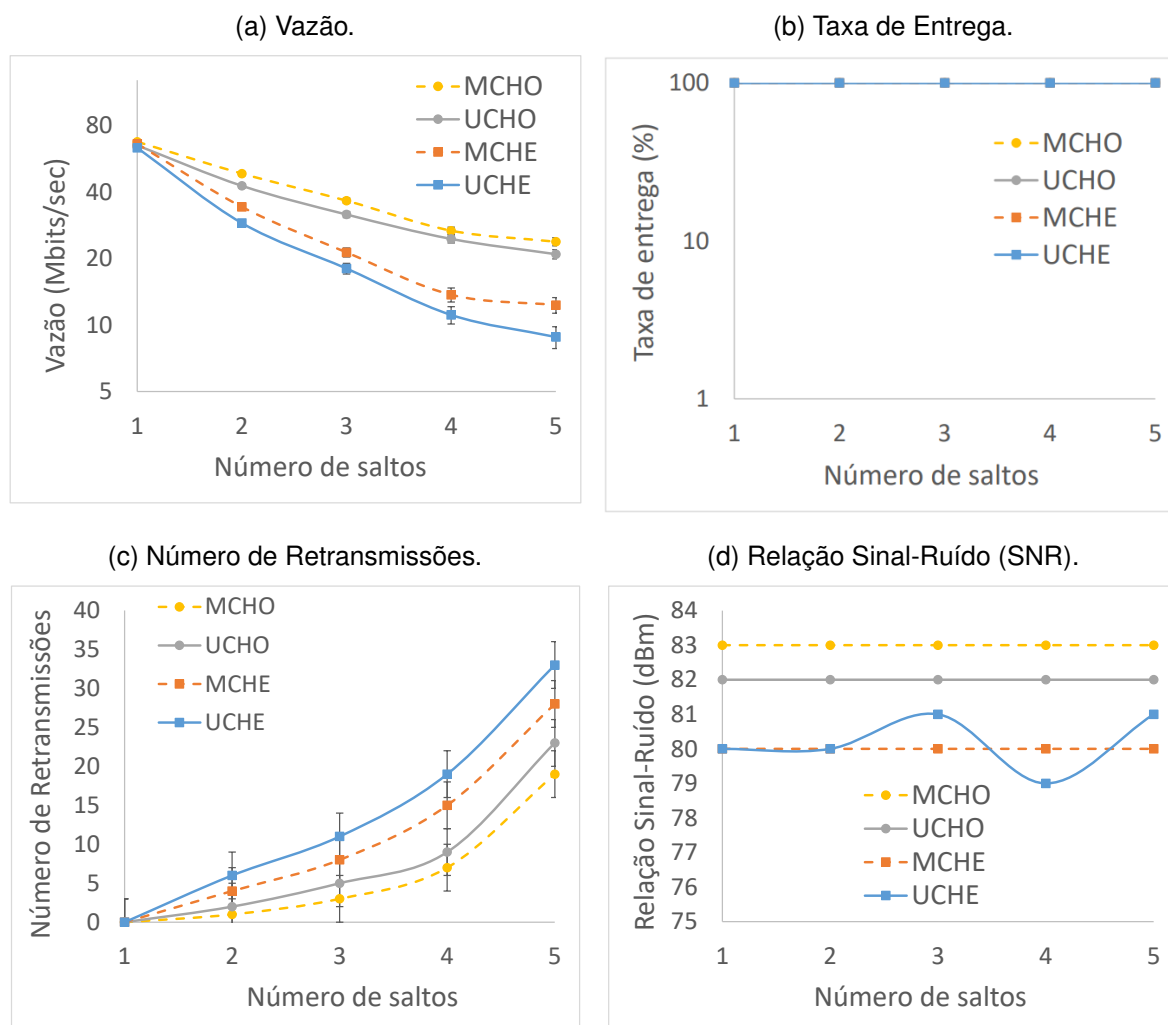
Tabela 8: **Parâmetros de configuração para análise de heterogeneidade dos dispositivos com UDP.**

|                                 |           |
|---------------------------------|-----------|
| <b>Número de Nós:</b>           | 6         |
| <b>Distância:</b>               | 20 Metros |
| <b>Número de Repetições:</b>    | 25        |
| <b>Protocolo de Roteamento:</b> | HWMP      |
| <b>Topologia da Rede:</b>       | Linha     |
| <b>Protocolo de Transporte:</b> | UDP       |
| <b>Número de Pacotes:</b>       | 76800     |
| <b>Tamanho do Pacote:</b>       | 8 KB      |
| <b>Número de Fluxos:</b>        | 1         |
| <b>Especificação PHY:</b>       | 802.11n   |
| <b>Frequência:</b>              | 2,4 GHz   |

Fonte: Elaborado pelo autor.

A figura 33a apresenta a vazão obtida pelos experimentos. Os resultados mantêm-se constantes em relação aos testes feitos no protocolo TCP, mostrando superioridade na vazão obtida pelas redes construídas por interfaces de *hardware* homogêneas. É possível perceber a consistência dos resultados em relação a superioridade de redes homogêneas. É notório que em todos os cenários de testes apresentados estas redes se saem melhor nos resultados. Os cenários 1.1 e 2.1 possuem maior

Figura 32: **Desempenho de conexões homogêneas e heterogêneas configuradas em mono e multi-canais em função do número de saltos - Protocolo TCP.**



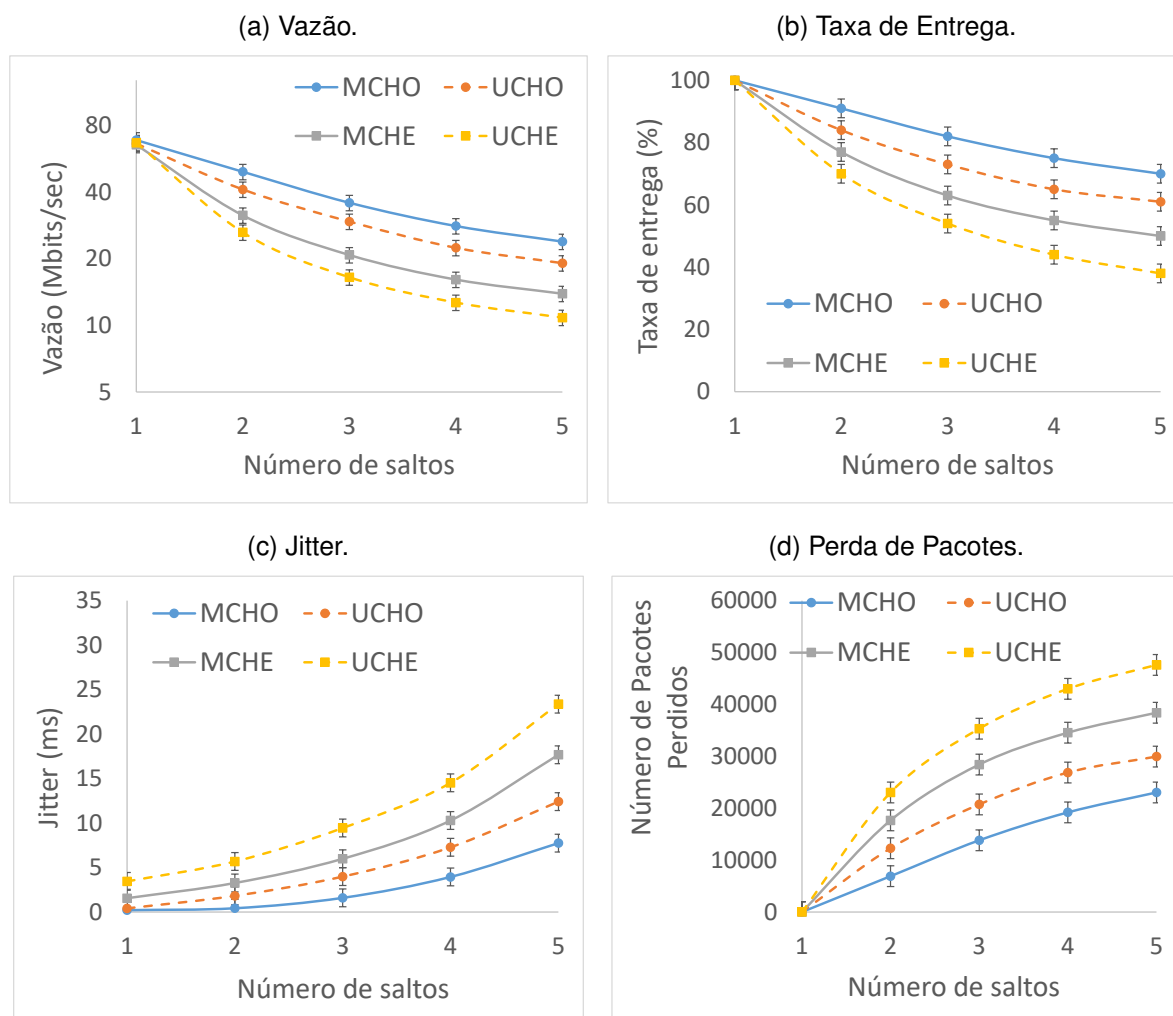
Fonte: Elaborado pelo autor.

vazão 33a, melhores taxas de entrega dos pacotes 33b, menor variação na entrega dos pacotes 33c e menor perda 33d.

Portanto, conclui-se que redes mono e multicanal configuradas em múltiplas interfaces, através de conexões entre antenas do mesmo hardware, conseguem um melhor SNR (ver Figura 32d), um menor número de retransmissões (Figura 32c), menor variação do atraso (33c), menor perda de pacotes (33d), maior taxa de entrega (ver figuras 32b e 33b) e aumentam a largura de banda (figuras 32a e 33a). Em razão disso, o desempenho de redes de múltiplos canais mostrou-se melhor quando comparado a utilização do mesmo canal em todas as interfaces.



Figura 33: **Desempenho de conexões homogêneas e heterogêneas configuradas em mono e multi-canais em função do número de saltos - Protocolo UDP.**



Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 4.4 Análise do número de saltos e impacto dos protocolos de roteamento

Esta seção apresenta os resultados obtidos a partir dos testes com os protocolos percorridos na seção 2.5. Foram analisados 3 protocolos que operam nos 3 modos: reativo (AODV), proativo (B.A.T.M.A.N.) e híbrido (HWMP) com o intuito de comparar o desempenho dos mesmos a fim de efetuar a melhor escolha do protocolo de roteamento para rede em malha implementada. Esta seção visa analisar e entender o comportamento da rede *mesh* a partir de diversos protocolos no uso de múltiplas interfaces e múltiplos canais além de equipamentos de baixo e médio custo com características homogêneas e heterogêneas acerca do *hardware*.

Os testes para estes experimentos foram feitos utilizando a ferramenta iPerf 3

(assim como os demais) gerando um fluxo de 600 Mb de dados entre um nó cliente e um nó servidor. Os nós estão posicionados a uma distância média de 20 metros escolhida com base nos resultados da seção 4.2 e o protocolo utilizado para o transporte dos dados foi o UDP. A estrutura de rede selecionada foi o cenário com múltiplas interfaces e múltiplos canais homogêneos (MCHO) apresentado na seção 4.3, visto que este obteve o melhor desempenho dos cenários testados. Assim, serão apresentados resultados quanto a vazão obtida na rede, a taxa de entrega, a variação do atraso (*jitter* e o número de pacotes perdidos. A tabela 9 apresenta com mais detalhes os parâmetros usados para obtenção dos resultados neste cenário de teste.

**Tabela 9: Parâmetros de configuração para análise do impacto do número de saltos e dos protocolos de roteamento para redes em malha.**

|                                  |                          |
|----------------------------------|--------------------------|
| <b>Número de Nós:</b>            | 6                        |
| <b>Distância:</b>                | 20 Metros                |
| <b>Número de Repetições:</b>     | 25                       |
| <b>Protocolos de Roteamento:</b> | HWMP, B.A.T.M.A.N e AODV |
| <b>Topologia da Rede:</b>        | Linha                    |
| <b>Protocolo de Transporte:</b>  | UDP                      |
| <b>Número de Pacotes:</b>        | 76800                    |
| <b>Tamanho do Pacote:</b>        | 8 KB                     |
| <b>Número de Fluxos:</b>         | 1                        |
| <b>Especificação PHY:</b>        | 802.11n                  |
| <b>Frequência:</b>               | 2,4 GHz                  |

Fonte: Elaborado pelo autor.

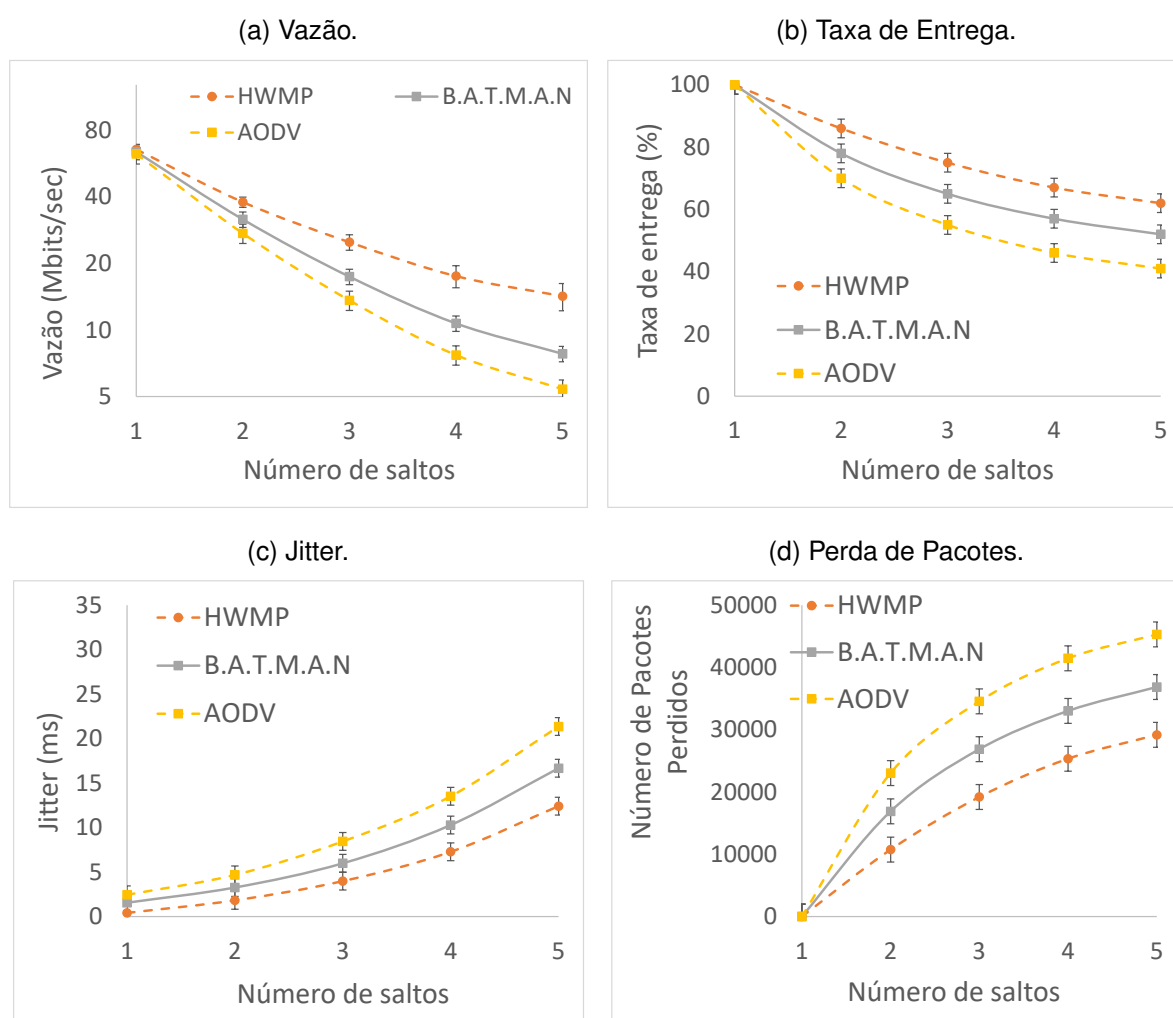
A figura 34a apresenta a vazão obtida na rede em função do número de saltos. Como se pode observar, ambos os protocolos tem estimadamente a mesma vazão quando utilizado com apenas um salto. Em teoria, como há apenas um salto na rede, o protocolo de roteamento tende a alocar a banda total para o tráfego exclusivo gerado pelo iPerf que se utiliza do transporte por UDP. Deste modo, é esperado que os protocolos tivessem desempenho igual ou similar com apenas um salto. No entanto, é perceptível a degradação dos protocolos em função do número de saltos. A vazão na rede tende a zero conforme o número de saltos aumenta, dando maior destaque ao protocolo HWMP que apresenta melhores taxas acerca da vazão, seguido pelo protocolo B.A.T.M.A.N. e depois o AODV que foi o que se mais degradou. Todavia, através da análise da figura 34a é perceptível que o protocolo com melhor desempenho é o protocolo HWMP.

Os demais resultados apresentados na figura 34 seguem a análise apresentada no parágrafo anterior. Deste modo, a figura 34b apresenta a taxa de entrega em função do número de saltos onde se pode notar novamente o melhor desempenho do protocolo HWMP ao qual apresenta maior taxa de entrega dos pacotes. O ADOV é o

protocolo que apresenta a menor taxa de entrega.

As figuras 34c e 34d apresentam a variação do atraso e a quantidade de pacotes perdidos em função do tempo, respectivamente. É notório a consistência dos dados obtidos. O protocolo HWMP possui o menor valor de *jitter* e o menor número de pacotes perdidos. Analisando as figuras de 34, pode-se observar que o protocolo que apresenta os melhores resultados é o protocolo que opera em modo híbrido HWMP.

Figura 34: **Desempenho dos protocolos em função do número de saltos - Protocolo UDP.**



Fonte: Elaborado pelo autor.

Levando todos estes aspectos em consideração, após a comparação com os resultados obtidos, pode-se perceber que, um projeto de redes sem fio deve levar em conta a tecnologia e a qualidade dos equipamentos, devendo preferencialmente utilizar a mesma tecnologia embarcada de um único fabricante. Além disso, deve-se utilizar da estratégia de atribuição de múltiplos canais para diminuir a interferência de outras fontes. A compreensão dos experimentos realizados tornou possível decidir a melhor estratégia de configuração para o cenário em malha aplicado no IFCE Aracati.

Após as análises apresentadas na seção de resultados, foi escolhida a configuração que se utiliza de múltiplos canais e múltiplas interfaces com características de *hardware* homogêneas e utilizando o protocolo HWMP para criação das rotas bem como o roteamento na rede.

## 5 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi investigado o desempenho de três protocolos de roteamento para rede *mesh* no uso de múltiplos canais e múltiplas interfaces de rádio com características físicas homogêneas e heterogêneas em um ambiente real de redes em malha sem fio. Particularmente, foram avaliadas e analisadas as implicações de uma abordagem multi-interface e multicanal efetuando experimentos com diferentes *hardwares* em dois tipos de canários mono e multicanal com *hardwares* homogêneos e heterogêneos de diferentes custos e características.

Foram apresentados resultados a partir de extensivos testes em uma malha real aplicada no ambiente universitário do IFCE campus Aracati, ao qual foi desenvolvido no decorrer deste trabalho. O capítulo 4 destaca medidas como a vazão, taxa de entrega, número de retransmissões, relação sinal ruído, variação do atraso, e perda de pacotes coletadas com uso da ferramenta iPerf 3 utilizando os protocolos TCP e UDP para transporte dos dados.

A análise e construção da rede se deu a partir de uma sequência de passos e análises tal como apresentadas no capítulo 4, iniciando-se com a verificação de canais e a interferência por outras redes em cada canal. Esta teve por objetivo avaliar os canais de maior e menor uso acerca de roteadores vizinhos, para assim melhorar o desempenho da malha visando diminuir o impacto de interferências externas que também utilizam a banda 2,4 GHz. Os resultados obtidos foram extremamente relevantes para a escolha do canal a ser usado nos testes em redes de único canal, que também foram investigados.

Em seguida, experimentações foram conduzidas acerca da distância nos dois tipos de equipamento, avaliando o comportamento e desempenho da rede conforme os nós eram dispostos a uma distância cada vez maior. Estes resultados foram conduzidos a fim de escolher a melhor distância entre dois nós que permitisse uma boa conexão com melhores taxas de SNR e vazão, com baixas taxas de perda de pacotes e retransmissões. Para tal, concluiu-se à distância média *ideal* que cumprisse com as características esperadas.

Ainda, foi conduzida uma análise do impacto de rádios homogêneos e heterogêneos, visando oferecer a melhor configuração de *hardware* com múltiplas interfaces possível para prover qualidade no acesso dos usuários da malha. Neste sentido, mostrou-se que o uso de rádios com características PHY diferentes afetam significativamente a qualidade das conexões, influenciando no desempenho apresentado pelos nós.

Por fim, foi apresentada uma análise com base em três protocolos de roteamento para redes em malha, o protocolo AODV que opera em modo reativo, o B.A.T.M.A.N. que opera em modo proativo e o HWMP que opera em modo híbrido. Esta análise teve por objetivo avaliar o desempenho destes protocolos em ambos os equipamentos para assim selecionar um bom protocolo que pudesse fornecer as funcionalidades de uma rede de qualidade. Investigar o impacto dos protocolos para a seleção de um bom protocolo, é uma característica chave que influencia diretamente no desempenho da rede (IBRAHIM et al., 2013). Os resultados apontaram que o protocolo HWMP foi o protocolo que obteve melhor desempenho em todos os cenários e testes apresentados. Este manteve resultados superiores aos demais protocolos analisados, possuindo maior vazão, maiores taxas de transmissão, menores variações de atraso e perda de pacotes.

Os resultados mostraram que os equipamentos roteadores TP-Link de baixo custo utilizados atingiram cerca de 15 Mb/s de taxa de transferência, enquanto os roteadores de médio custo ALIX3D3 atingiram cerca de 30 Mb/s através dos 5 saltos. Neste sentido, a viabilidade no uso de equipamentos COTS para prover acesso a áreas relativamente grandes através de múltiplos saltos, torna-se possível. Vale ressaltar, que melhorias acerca da qualidade dos canais aplicando estratégias de atribuição de múltiplos canais devem ser aplicadas. O impacto de equipamentos de *hardwares* de características heterogêneas também deve ser levado em consideração, visto que os resultados apresentados neste tipo de cenário foram inferiores aos cenários que se utilizavam das mesmas características PHY em suas interfaces.

Levando todos estes aspectos em consideração, o presente trabalho ao qual discutiu e avaliou uma rede em malha sem fio com equipamentos de baixo e médio custo no uso de múltiplos canais e múltiplas interfaces homogêneas e heterogêneas, fornece avaliações acerca do desempenho da rede com tais características. As análises apresentadas contribuem no estudo e criação das redes em malha, bem como em estratégias para melhorar o desempenho destas redes, bem como na escolha de um bom protocolo de roteamento. A criação e as avaliações em um *testbed* real, no entanto, está entre as principais contribuições deste trabalho visto a tendência de validações utilizando simuladores bem como a dificuldade e carência de ambientes de testes reais, com tais características.

Os trabalhos futuros envolvem a utilização da rede *mesh* criada como um *backbone* para rede de sensores e ambientes IoT. Tal proposta é de cunho fundamental para entender e preparar ambientes que possam suportar redes de próxima geração. Sabendo-se que a utilização do HWMP para criação das redes em malha possui vulnerabilidade a ataques mal intencionados, questões acerca da segurança da rede também podem ser estudadas. Além disso, pretende-se estender a proposta e os ex-

perimentos deste trabalho através de cenários com maior heterogeneidade dos equipamentos que compõem a rede *mesh*, adicionando-se outros modelos de roteadores ou microcomputadores funcionando como tal. Como exemplo, podem ser citadas placas Raspberry Pi ou Beaglebone. Este tipo de análise permitirá um estudo mais aprofundado e melhor entendimento das WMNs heterogêneas. E ainda, testes utilizando além da banda 2.4 GHz, a banda 5 GHz à qual possui mais canais ortogonais disponíveis, diminuindo a interferência intra e inter fluxo, aumentando o desempenho da rede.

## REFERÊNCIAS

- ABELÉM<sup>1</sup>, A. J. G. et al. Redes mesh: Mobilidade, qualidade de serviço e comunicação em grupo. 2007. Citado na página 19.
- ABID, M. R. et al. Ieee 802.11 s wireless mesh networks for last-mile internet access: An up-down link approach. *Journal of Emerging Trends in Computing and Information Sciences*, v. 3, n. 6, p. 876–884, 2012. Citado na página 19.
- ABID, R. M.; BENBRAHIM, T.; BIAZ, S. Ieee 802.11 s wireless mesh networks for last-mile internet access: An open-source real-world indoor testbed implementation. *Wireless Sensor Network*, Scientific Research Publishing, v. 2, n. 10, p. 725, 2010. Citado na página 20.
- ADVANCED, B. B.A.T.M.A.N. ADVanced. <https://www.open-mesh.org/projects/batman-adv/wiki>. Último acesso em: Junho, 2017. 2012. Disponível em: <<https://www.open-mesh.org/projects/batman-adv/wiki>>. Citado na página 54.
- ALBERTIN, A. L.; MARIA de M. A. R. A internet das coisas irá muito além as coisas. *GV-executivo*, v. 16, n. 2, p. 12–17, 2017. Citado na página 18.
- ALBUQUERQUE, C. de et al. Gt-mesh-termo de referência e estado da arte. *RNP-Rede Nacional de Ensino e Pesquisa, Tech. Rep*, 2006. Citado na página 63.
- ANAS, N. M. et al. Performance analysis of outdoor wireless mesh network using b.a.t.m.a.n. advanced. In: *2015 IEEE/ACIS 16th International Conference on Software Engineering, Artificial Intelligence, Networking and Parallel/Distributed Computing (SNPD)*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1–4. Citado 2 vezes nas páginas 64 e 74.
- ASRIADI et al. Openvoice: Low-cost mobile wireless communication project for rural area based on openwrt. In: *2015 International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA)*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 391–396. Citado na página 21.
- AVELAR, E. et al. Interoperability Issues on Heterogeneous Wireless Communication for Smart Cities. *Computer Communications*, v. 58, 2015. ISSN 0140-3664. Citado na página 45.
- BANNACK, A. Aplicando gestão de energia ao protocolo de roteamento para redes ad hoc móveis vrp. 2008. Citado na página 31.
- BARI, S.; ANWAR, F.; MASUD, M. Performance study of hybrid wireless mesh protocol (hwmp) for ieee 802.11 s wlan mesh networks. In: *IEEE. Computer and Communication Engineering (ICCCE), 2012 International Conference on*. [S.l.], 2012. p. 712–716. Citado 3 vezes nas páginas 19, 56 e 60.
- BARI, S. M. S.; ANWAR, F.; MASUD, M. H. Performance study of hybrid wireless mesh protocol (hwmp) for ieee 802.11s wlan mesh networks. In: *2012 International Conference on Computer and Communication Engineering (ICCCE)*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 712–716. Citado na página 21.



- BAROLLI, A. et al. Experimental results of a raspberry pi and olsr based wireless content centric network testbed considering openwrt os. In: *2016 IEEE 30th International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 95–100. ISSN 1550-445X. Citado na página 21.
- B.A.T.M.A.N. *B.A.T.M.A.N. - Better Approach To Mobile Ad-hoc Networking*. <https://www.open-mesh.org>. Último acesso em: Junho, 2017. 2008. Disponível em: <<https://www.open-mesh.org>>. Citado 3 vezes nas páginas 53, 54 e 55.
- BICKET, J. et al. Architecture and Evaluation of an Unplanned 802.11B Mesh Network. In: *Proc. ACM MobiCom*. [S.l.: s.n.], 2005. Citado na página 62.
- BISWAS, S. et al. Large-Scale Measurements of Wireless Network Behavior. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, v. 45, n. 4, 2015. Citado na página 64.
- BRITO, G. M. de; VELLOSO, P. B.; MORAES, I. M. Uma análise do desempenho de redes sem-fio orientadas a conteúdo. *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC)*, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 24.
- CAPONE, A. et al. MobiMESH: a Complete Solution for Wireless Mesh Networking. In: *Proc. IEEE MASS*. [S.l.: s.n.], 2007. ISSN 2155-6806. Citado 2 vezes nas páginas 62 e 63.
- CHENG, J. et al. From architecture to implementation for ieee 802.11s wireless mesh networks. In: *11th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCOM 2015)*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1–7. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 20.
- CLAUSEN, T.; JACQUET, P. *Optimized link state routing protocol (OLSR)*. [S.l.], 2003. Citado na página 21.
- CUNHA, D. d. O.; COSTA, L.; DUARTE, O. Um mecanismo de roteamento para o consumo balanceado de energia em redes móveis ad hoc. *XXI Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores (SBRC 2003)*, Natal, RN, Maio, 2003. Citado na página 31.
- DD-WRT. *DD-WRT*. <http://www.dd-wrt.com>. Último acesso em: Março, 2017. 2017. Disponível em: <<http://www.dd-wrt.com>>. Citado na página 71.
- DECRISTOFARO, M. A.; LANSDOWNE, C. A.; SCHLESINGER, A. M. Heterogeneous Wireless Mesh Network Technology Evaluation for Space Proximity and Surface Applications. In: *Proc. International Conference on Space Operations (SpaceOps)*. [S.l.: s.n.], 2014. Citado 2 vezes nas páginas 65 e 74.
- DUTT, S.; HABIBI, D.; AHMAD, I. A low cost atheros system-on-chip and openwrt based testbed for 802.11 wlan research. In: *TENCON 2012 IEEE Region 10 Conference*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 1–4. ISSN 2159-3442. Citado na página 21.
- GOMES, R. L. et al. Providing qoe and qos in wireless mesh networks through dynamic choice of routing metrics. *IEEE Latin America Transactions*, v. 8, n. 4, p. 454–462, Aug 2010. ISSN 1548-0992. Citado na página 21.

- GUESMIA, M.; GUEZOURI, M.; MBAREK, N. Performance evaluation of the hwmp proactive tree mode for ieee 802.11s based wireless mesh networks. In: *Third International Conference on Communications and Networking*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 1–7. ISSN 2163-663X. Citado na página 59.
- HARIYADI, M.; PRATOMO, I.; AFFANDI, A. Implementation and performance analysis of routing batman on voip applications in the campus area. In: *2016 International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 333–338. Citado na página 54.
- HILARIO, L. E. N. et al. Qosmesh—qualidade de serviço em redes mesh. In: *XXXIII Conferência Latinoamericana de Informática*. [S.l.: s.n.], 2007. Citado na página 21.
- IBRAHIM, I. et al. Performance comparison of aodv and hwmp routing protocols in wireless mesh networks. In: *IEEE. RF and Microwave Conference (RFM), 2013 IEEE International*. [S.l.], 2013. p. 116–120. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 90.
- IEEE 802.11s. *IEEE Standard for Information Technology - Telecommunications and Information Exchange Between Systems - Local and Metropolitan Area Networks - Specific Requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications - Amendment 10: Mesh Networking, IEEE Std.* 2011. Citado 4 vezes nas páginas 19, 21, 45 e 56.
- Iperf 3. *IPerf 3 - The Ultimate Speed Test Tool for TCP, UDP and SCTP*. <http://www.iperf.fr>. Último acesso em: Março, 2017. 2017. Disponível em: <<http://www.iperf.fr>>. Citado 2 vezes nas páginas 74 e 76.
- ISLAM, A. B. M. A. A. et al. Channel Assignment Techniques for Multi-Radio Wireless Mesh Networks: A Survey. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, v. 18, n. 2, 2016. ISSN 1553-877X. Citado 4 vezes nas páginas 22, 45, 52 e 53.
- JIN, D.; WANG, K.; FENG, L. End-to-end qos performance analysis of wireless mesh network on rm-aodv routing protocol. In: *International Conference on Automatic Control and Artificial Intelligence (ACAI 2012)*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 987–990. Citado na página 21.
- JOHNSON, D.; NTLATLAPA, N.; AICHELE, C. Simple pragmatic approach to mesh routing using batman. 2008. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 53.
- KARTHIKA, K. C. Wireless mesh network: A survey. In: *2016 International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1966–1970. Citado na página 19.
- KUKREJA, S.; SINGH, P. Performance metrics of aodv and olsr in wireless mesh network. In: *2016 3rd International Conference on Computing for Sustainable Global Development (INDIACom)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 3182–3185. Citado na página 56.
- KUROSE, J. F.; ROSS, K. W. Computer networking: a top-down approach. 2016. Citado 14 vezes nas páginas 24, 27, 28, 29, 30, 32, 33, 34, 35, 36, 39, 40, 41 e 43.
- LAUFER, R.; KLEINROCK, L. The capacity of wireless csma/ca networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, v. 24, n. 3, p. 1518–1532, June 2016. ISSN 1063-6692. Citado na página 20.

MACIEL, F. A. O. et al. Uma proposta de portal de aplicação do ns-3 para aprendizagem de redes de computadores. 2014. Citado na página 20.

MIKROTIK. *Manual: Interface / HWMPplus*. [https://wiki.mikrotik.com/wiki/Manual:Interface/HWMPplus#Protocol\\_description](https://wiki.mikrotik.com/wiki/Manual:Interface/HWMPplus#Protocol_description). Último acesso em: Junho, 2017. 2013. Disponível em: <[https://wiki.mikrotik.com/wiki/Manual:Interface/HWMPplusProtocol\\_description](https://wiki.mikrotik.com/wiki/Manual:Interface/HWMPplusProtocol_description)>. Citado 4 vezes nas páginas 58, 59, 60 e 61.

MOGAIBEL, H. A. et al. Review of Channel Assignment Approaches in Multi-Radio Multi-Channel Wireless Mesh Network. *Journal of Network and Computer Applications*, v. 72, 2016. ISSN 1084-8045. Citado 2 vezes nas páginas 52 e 53.

MONTEIRO, A. et al. Atribuição dinâmica de canais em redes sem fio não coordenadas ieee 802. 11, baseada em fatores de sobreposição e intensidade de sinal. *XXXIV Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*, p. 704–717, 2016. Citado 3 vezes nas páginas 18, 22 e 24.

MOZUMDER, A. H.; ACHARJEE, T.; ROY, S. Scalability performance analysis of batman and hwmp protocols in wireless mesh networks using ns-3. In: *2014 International Conference on Green Computing Communication and Electrical Engineering (ICGCCEE)*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 1–5. Citado na página 53.

NASSEREDDINE, B.; MAACH, A.; BENNANI, S. The scalability of the hybrid protocol in wireless mesh network 802.11 s. In: *IEEE. Microwave Symposium (MMS), 2009 Mediterranean*. [S.l.], 2009. p. 1–7. Citado na página 19.

NETO, R. J. et al. Performance Issues with Routing in Multi-Channel Multi-Interface IEEE 802.11s Networks. In: *IFIP Wireless Days*. [S.l.: s.n.], 2014. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 64.

NS-3. *ns-3*. <https://www.nsnam.org>. Último acesso em: Junho, 2017. 2017. Disponível em: <<https://www.nsnam.org>>. Citado na página 20.

OLIVEIRA, C. T.; THEOLEYRE, F.; DUDA, A. Channel Assignment Strategies for Optimal Network Capacity of IEEE 802.11s. In: *Proc. ACM PE-WASUN*. [S.l.: s.n.], 2012. ISBN 978-1-4503-1621-7. Citado na página 22.

OLIVEIRA, C. T. D.; THEOLEYRE, F.; DUDA, A. Connectivity in Multi-Channel Multi-Interface Wireless Mesh Networks. In: *Proc. IEEE IWCMC*. [S.l.: s.n.], 2011. Citado na página 53.

OPENWRT. *OpenWRT - Wireless Freedom*. <http://www.openwrt.org>. Último acesso em: Março, 2017. 2017. Disponível em: <<http://www.openwrt.org>>. Citado 3 vezes nas páginas 20, 71 e 72.

PERKINS, C.; BELDING-ROYER, E.; DAS, S. *Ad hoc on-demand distance vector (AODV) routing*. [S.l.], 2003. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 55.

QU, Y.; NG, B.; SEAH, W. A survey of routing and channel assignment in multi-channel multi-radio wmnns. *Journal of Network and Computer Applications*, v. 65, p. 120 – 130, 2016. ISSN 1084-8045. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1084804516300054>>. Citado na página 22.

RAMADHANI, P. E. et al. Performance evaluation of hybrid wireless mesh protocol (hwmp) on vanet using vanetmobisim. In: *2016 International Conference on Computational Intelligence and Cybernetics*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 41–46. Citado na página 56.

RAMAN, B. et al. On the Feasibility of the Link Abstraction in Wireless Mesh Networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, v. 17, n. 2, April 2009. ISSN 1063-6692. Citado na página 45.

REMESH-UFF-RNP, P. *Rede Mesh de Acesso Universitário Faixa Larga Sem Fio*. 2006. Citado na página 63.

RODRIGUES, P. *Protocolos das Redes Mesh*. [https://wirelesspt.net/wiki/Protocolos\\_das\\_redes\\_mesh](https://wirelesspt.net/wiki/Protocolos_das_redes_mesh). Último acesso em: Junho, 2017. 2017. Disponível em: <[https://wirelesspt.net/wiki/Protocolos\\_das\\_redes\\_mesh](https://wirelesspt.net/wiki/Protocolos_das_redes_mesh)>. Citado 2 vezes nas páginas 54 e 60.

SAADE, D. et al. Redes em malha: Solução de baixo custo para popularização do acesso a internet no Brasil. *XXV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações-SBrT*, p. 1–6, 2007. Citado 3 vezes nas páginas 48, 63 e 64.

SANTOS, B. P. et al. *Internet das Coisas: da Teoria à Prática*. [S.l.]: Minicursos do SBRC, 2016. 1-50 p. ISBN 2177-4978. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 24.

SERRANO, P. et al. Experimenting with commodity 802.11 hardware: Overview and future directions. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, v. 17, n. 2, p. 671–699, Secondquarter 2015. ISSN 1553-877X. Citado 4 vezes nas páginas 61, 62, 65 e 66.

SINGH, M. S.; TALASILA, V. A practical evaluation for routing performance of batman-adv and hwmn in a wireless mesh network test-bed. In: *IEEE. Smart Sensors and Systems (IC-SSS), International Conference on*. [S.l.], 2015. p. 1–6. Citado na página 74.

TANENBAUM, A. Computer networks, /andrew s. tanenbaum, david j. wetherall. *Cloth: Prentice Hall*, 2011. Citado 5 vezes nas páginas 25, 26, 36, 41 e 44.

XAUD, A. L. D. M. A. F. dos Santos Xaud; Marco F. dos S. *Redes Ad Hoc - Protocolos DSR, AODV, OLSR, DSDV*. [https://www.gta.ufrj.br/grad/09\\_1/versao-final/adhoc/aodv.html](https://www.gta.ufrj.br/grad/09_1/versao-final/adhoc/aodv.html). Último acesso em: Junho, 2017. 2017. Disponível em: <[https://www.gta.ufrj.br/grad/09\\_1/versao-final/adhoc/aodv.html](https://www.gta.ufrj.br/grad/09_1/versao-final/adhoc/aodv.html)>. Citado 2 vezes nas páginas 55 e 56.

YANG, K.; MA, J. f.; MIAO, Z. h. Hybrid routing protocol for wireless mesh network. In: *2009 International Conference on Computational Intelligence and Security*. [S.l.: s.n.], 2009. v. 1, p. 547–551. Citado 2 vezes nas páginas 56 e 60.