



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

MARCOS ANTÔNIO DA COSTA DA SILVA FILHO

**UMA ANÁLISE DE DESEMPENHO DO OPENFLOW EM RELAÇÃO
AOS PRINCIPAIS PROTOCOLOS DE ROTEAMENTO DE REDES EM
MALHA SEM FIO**

**ARACATI-CE
2017**

MARCOS ANTÔNIO DA COSTA DA SILVA FILHO

UMA ANÁLISE DE DESEMPENHO DO OPENFLOW EM RELAÇÃO AOS
PRINCIPAIS PROTOCOLOS DE ROTEAMENTO DE REDES EM MALHA SEM
FIO

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.

Orientador: Prof. Dr. Reinaldo Bezerra Braga

Aracati-CE
2017

MARCOS ANTÔNIO DA COSTA DA SILVA FILHO

UMA ANÁLISE DE DESEMPENHO DO OPENFLOW EM RELAÇÃO AOS
PRINCIPAIS PROTOCOLOS DE ROTEAMENTO DE REDES EM MALHA SEM
FIO

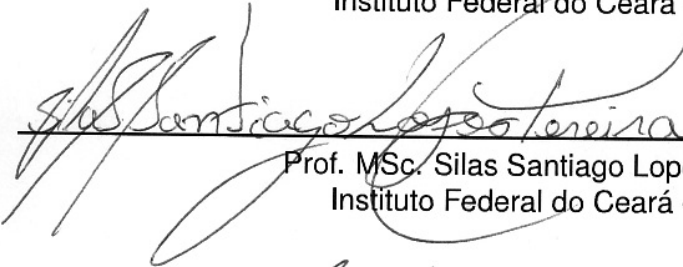
Trabalho de Conclusão de Curso (TCC)
apresentado ao curso de Bacharelado em
Ciência da Computação do Instituto Fede-
ral de Educação, Ciência e Tecnologia do
Ceará - IFCE - Campus Aracati, como re-
quisito parcial para obtenção do Título de
Bacharel em Ciência da Computação.

Aprovada em 24 de Outubro de 2017

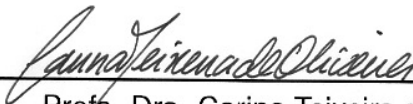
BANCA EXAMINADORA



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



Prof. MSc. Silas Santiago Lopes Pereira
Instituto Federal do Ceará - IFCE



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

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais e toda minha família que se fizeram presentes em todos os momentos de dificuldades.

AGRADECIMENTOS

Grato a Deus pelo dom da vida, pelo seu amor infinito, sem ele nada sou. Agradeço aos meus pais, Marcos Antônio e Maria de Fátima, meus maiores exemplos. Obrigado por cada incentivo e orientação, pelas orações e pela preocupação para que estivesse sempre andando pelo caminho correto.

Aos meus colegas de classe, em especial Alex e Matheus. Obrigado por todos os momentos em que fomos estudiosos e brincalhões. Porque em vocês, encontrei verdadeiros irmãos. Obrigado pela paciência, pelo esforço, pela dedicação, pela mão que sempre se estendia quando precisávamos. Esta caminhada não seria a mesma sem vocês.

Ao professor Reinaldo Braga que, com muita paciência e atenção, dedicou do seu valioso tempo para me orientar em cada passo deste trabalho. Aos professores Mauro Oliveira e Carina Oliveira pela contribuição na minha vida acadêmica e por tanta influência na minha futura vida profissional.

Meus sinceros agradecimentos a banca avaliadora, aos professores: Reinaldo Bezerra Braga, Silas Santiago Lopes Pereira e Carina Texeira de Oliveira por terem aceitado o convite para participar da banca de avaliação. Ao professor Reinaldo agradeço por ter me orientado por esta longa jornada de intensos estudos acadêmicos, foi uma imensa honra ter você como orientador. Ao professor Silas agradeço aos incentivos e pela motivação da constante busca por novos conhecimentos nas suas aulas, estou muito grato por sua participação na banca avaliadora. A professora Carina agradeço as sugestões e atenção prestada em cada detalhe deste trabalho, grato por ter me guiado a desenvolver um trabalho de qualidade. Agradeço a todos aos apontamentos pertinentes que enriqueceram e contribuíram para melhoria deste trabalho e para minha formação acadêmica.

Agradeço a todos aos integrantes do Laboratório de Redes de Aracati (LAR) e funcionários do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE), em especial ao professor Mauro Oliveira, pois, abriu nossos olhos para a realidade e nos transformou em profissionais éticos e conscientes para resolver os problemas da nossa sociedade. Segundo Mauro Oliveira, no seu livro ESCOLA PRA VALER! Diz: “Uma Escola que é reflexo da sociedade não consegue modificá-la, não serve a ela... nem pra ela”.

RESUMO

As redes em malha sem fio têm sido apontadas como a solução tecnológica de melhor custo benefício para a construção de uma plataforma de comunicação altamente escalável e capaz de promover conectividade a um baixo custo. Espera-se que em um futuro próximo, ocorra um aumento no tráfego da Internet devido ao advento de vários dispositivos heterogêneos que possuem a capacidade de trocar informações, coletar dados e interagir com o meio ambiente. Surge então a necessidade de estudar novas infraestruturas de rede que atendam a esta crescente demanda. São necessários avanços tecnológicos em relação a questões de configuração até o gerenciamento de mídia de transmissão de dados, para que promova benefícios aos usuários de diversos setores da sociedade. Por esse motivo, as redes em malha sem fio ganharam um destaque devido à sua facilidade de implementação, suporte à mobilidade, robustez, pontos de acesso econômicos e arquitetura *plug and play*. Entretanto, devido ao número limitado de canais ortogonais disponíveis no espectro radioelétrico (3 em IEEE 802.11b/g/n em 2,4 GHz), a interferência traz desafios para reduzir o impacto no desempenho destas redes. Neste contexto, a heterogeneidade de cenários implica na necessidade de alto grau de flexibilidade em estratégias de encaminhamento e de um controle mais eficiente da operação da rede, que propicie melhor utilização dos recursos da mesma, sob pena de perda de desempenho e degradação dos serviços. A adoção do paradigma de redes definidas por *software* no contexto de redes em malha sem fio abre espaço para novas funcionalidades, como engenharia de tráfego, encaminhamento de pacotes baseado em fluxos e a interoperabilidade da rede. Neste trabalho, são apresentados e discutidos resultados de uma análise de desempenho do protocolo OpenFlow, para adoção do paradigma de redes definidas por *software*, em relação aos tradicionais protocolos de redes em malha. Além de apontar diferentes estratégias para utilização de múltiplos canais e múltiplas interfaces em um cenário real de rede em malha.

Palavras-chave: Redes em malha. SDN. Desempenho.

ABSTRACT

The Mesh networks have been identified as the most cost-effective technology solution for the construction of a highly scalable communication platform capable of promoting connectivity at a relatively low cost. It is expected that in the near future there will be an increase in Internet traffic due to the advent of several heterogeneous devices that have the ability to exchange information, collect data and interact with the environment. The need arises to study new network infrastructures that meet this growing demand. Technological advances are needed in relation to configuration issues, to the management of data transmission media, so that it promotes benefits to users from diverse sectors of society. For this reason, wireless mesh networks have gained prominence because of their ease of deployment, mobility support, ruggedness, cost-effective access points, and plug and play architecture. However, due to the limited number of orthogonal channels available in the radio spectrum (3 in IEEE 802.11b/g/n in 2.4 GHz), interference and containment bring challenges to reduce the impact on the performance of these networks. In this context, the heterogeneity of scenarios implies the need for a high degree of flexibility in routing strategies and a more efficient control of the operation of the network, which allows better use of network resources, under penalty of loss of performance and degradation of services. The adoption of the software-defined network paradigm in the context of wireless mesh networks opens space for new features such as traffic engineering, flow-based packet forwarding, and network interoperability. In this work, we present and discuss the results of a performance analysis of the OpenFlow protocol for adoption of the paradigm of software defined networks, in relation to the traditional protocols of mesh networks. In addition to pointing out different strategies for using multiple channels and multiple interfaces in a real mesh network scenario.

Keywords: Mesh networks. SDN. Performance.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Elementos de uma rede sem fio.	22
Figura 2 – Características de enlaces de padrões selecionados de rede sem fio.	23
Figura 3 – Problema do terminal oculto.	24
Figura 4 – Arquitetura da WLAN IEEE 802.11.	26
Figura 5 – Reconhecimentos de camada de enlace 802.11.	28
Figura 6 – Rede Ad-Hoc IEEE 802.11.	30
Figura 7 – Arquitetura de Rede em Malha IEEE 802.11s.	35
Figura 8 – Cenário de redes domésticas de banda larga.	36
Figura 9 – Cenário de Rede Empresarial.	37
Figura 10 –Cenário de Rede Comunitária.	38
Figura 11 –Comparativo entre o clássico algoritmo de inundação e a técnica dos MPRs empregada pelo protocolo OLSR.	44
Figura 12 –Arquitetura de Rede Definida por Software.	57
Figura 13 –Arquitetura de um Nó da Rede em Malha OpenFlow.	59
Figura 14 –Arquitetura de Rede em Malha IEEE 802.11s com OpenFlow.	60
Figura 15 –Número de contribuições científicas por ano.	61
Figura 16 –Parâmetros de saída do iPer3.	69
Figura 17 –Interface Web (LuCI) do sistema embarcado OpenWrt.	70
Figura 18 –Cenário de rede em malha sem fio do IFCE Aracati.	71
Figura 19 –Cenário de rede em malha selecionado para avaliação.	73
Figura 20 –Roteadores usados no cenário de teste.	74
Figura 21 –Seleção de três canais ortogonais (1, 6 e 11) com o IEEE 802.11b/g/n na banda de 2,4 GHz.	75
Figura 22 –Análise da Qualidade dos Canais na Banda ISM 2,4 GHz e 5,0 GHz	79
Figura 23 –Análise do impacto da distância entre os diferentes equipamentos da rede.	81
Figura 24 –Análise do desempenho da rede com dispositivos heterogêneos em função do número de saltos configurados em mono e multi-canal.	83
Figura 25 –Análise do desempenho do protocolo OpenFlow em relação aos tradicionais protocolos de roteamento em função do número de saltos.	86
Figura 26 –Tráfego total de controle causado pelo HWMP e OpenFlow.	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparativo entre os padrões de tecnologias WLAN.	25
Tabela 2 – Diferença entre redes em malha e redes ad-hoc.	34
Tabela 3 – Comparativo entres os algoritmos de roteamento por vetor de distância e estado de enlace.	42
Tabela 4 – Especificações do roteador PC Engines modelo ALIX3D3.	72
Tabela 5 – Especificações do roteador TP-LINK modelo TL-WR842ND.	73
Tabela 6 – Parâmetros de simulação para análise de canais.	78
Tabela 7 – Análise da qualidade dos canais na banda ISM 2,4 GHz no ambiente de avaliação.	78
Tabela 8 – Análise da qualidade dos canais na banda ISM 5,0 GHz no ambiente de avaliação.	79
Tabela 9 – Parâmetros de simulação para análise da distância entre os nós da rede.	80
Tabela 10 –Parâmetros de simulação para análise de heterogeneidade dos dispositivos.	83
Tabela 11 –Parâmetros de simulação para análise do protocolo OpenFlow em relação aos tradicionais protocolos de roteamento para redes em malha.	85
Tabela 12 –Parâmetros de simulação para análise do tráfego de controle gerado pelo OpenFlow em relação aos tradicionais protocolos de roteamento para redes em malha.	88

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AODV	Ad-Hoc On-Demand Distance Vector
AP	Access Point (Ponto de Acesso)
APIs	Application Programming Interfaces (Interfaces de Programação de Aplicação)
ARPANET	Advanced Research Projects Agency Network
ARQ	Automatic Repeat Request (Solicitação de repetição automática)
B.A.T.M.A.N	Better Approach to Mobile Ad-Hoc Networking
BER	Bit Error Rate (Taxa de Erro de Bits)
BSS	Basic Service Set (Conjunto Básico de Serviço)
COTS	Commercial off-the-shelf (Comercialmente disponíveis)
CRC	Cyclic Redundancy Check (Verificação de Redundância Cíclica)
CTS	Clear to Send (Pronto para Envio)
DARPA	Defense Advanced Research Projects Agency (Agência de Projetos de Pesquisa Avançada de Defesa)
DSR	Dynamic Source Routing
EQ	Echo Quality (Qualidade de Eco)
FSR	Fisheye State Routing
GANN	Gate Announcement (Anúncio de Portal)
HTTPS	Hyper Text Transfer Protocol Secure (Protocolo de Transferência de Hipertexto Seguro)
HWMP	Hybrid Wireless Mesh Protocol
IC	Intervalo de Confiança
ICMP	Internet Control Message Protocol (Protocolo de Mensagens de Controle de Internet)
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers (Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos)

IFCE	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará
IoT	Internet of Things (Internet das Coisas)
IP	Internet Protocol (Protocolo de Internet)
LAN	Local Area Network (Rede de Área Local)
LuCI	Interface da Web
MAC	Media Access Control (Controle de Acesso ao Meio)
MANETs	Mobile Ad-hoc Networks (Redes Ad-hoc Móveis)
MBSS	Mesh Basic Service Set (Conjunto Básico de Serviço de Malha)
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output
MIT	Massachusetts Institute of Technology (Instituto de Tecnologia de Massachusetts)
MPRs	Multipoint Relays (Retransmissores Multiponto)
M2M	Machine to Machine (Máquina para Máquina)
NIC	Network Interface Card (Placa de Interface de Rede)
NOS	Network Operating System (Sistema Operacional de Rede)
OGM	Originator Messages (Mensagens de Origem)
OLSR	Optimized Link State Routing Protocol
OPKG	Sistema de Gerenciamento de Pacotes
PHY	Physical Layer (Camada Física)
QoS	Quality of Service (Qualidade de Serviço)
RANN	Root Announcement (Anúncio de Raiz)
RERRs	Route Errors (Erros de Rota)
RQ	Receive Quality (Qualidade de Recebimento)
RREPs	Route Replies (Respostas de Rotas)
RREQs	Route Requests (Requisições de Rotas)
RSSI	Received Signal Strength Indication (Indicação de Força do Sinal Recebido)

RTS	Request to Send (Solicitação de Envio)
SDN	Software Defined Networking (Redes Definidas por Software)
SHWMP	Secure Hybrid Wireless Mesh Protocol
SIFS	Short Inter-Frame Spacing (Espaçamento Curto Interquadros)
SNR	Signal-to-Noise Ratio (Relação Sinal-Ruído)
SSID	Service Set Identifier (Identificador de Conjunto de Serviços)
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
TCP	Transmission Control Protocol (Protocolo de Controle de Transmissão)
TORA	Temporally Ordered Routing Algorithm
TQ	Transmission Quality (Qualidade de Transmissão)
UDP	User Datagram Protocol (Protocolo de Datagrama de Usuário)
UFF	Universidade Federal Fluminense
USB	Universal Serial Bus
VANETs	Vehicular Ad Hoc Networks (Redes Ad Hoc Veiculares)
Wi-Fi	Wireless-Fidelity
WLAN	Rede Local sem Fio (Wireless Local Area Network)
WMN	Wireless Mesh Networks (Redes em Malha Sem Fio)
WPAN	Wireless Personal Area Network (Rede Pessoal sem Fio)
WRP	Wireless Routing Protocol
ZRP	Zone Routing Protocol

SUMÁRIO

1	Introdução	15
1.1	Motivação	18
1.2	Objetivos e Contribuições	19
1.3	Organização do Trabalho	19
2	Fundamentação Teórica	21
2.1	Redes sem Fio	21
2.1.1	Características de Enlaces e Redes sem Fio	23
2.1.2	Padrão IEEE 802.11	25
2.1.2.1	Arquitetura 802.11	25
2.1.2.2	Protocolo MAC 802.11	27
2.1.2.3	Redes Ad-hoc	29
2.2	Redes em Malha sem Fio	30
2.2.1	Características das Redes em Malha sem Fio	31
2.2.2	Protocolo IEEE 802.11s	33
2.2.2.1	Arquitetura	34
2.2.3	Cenários de Aplicação	36
2.3	Protocolos de Roteamento para Redes em Malha sem Fio	39
2.3.1	Pró-ativos	43
2.3.1.1	<i>Optimized Link State Routing Protocol (OLSR)</i>	43
2.3.1.2	<i>Wireless Routing Protocol (WRP)</i>	44
2.3.1.3	<i>Better Approach to Mobile Ad-Hoc Networking (BATMAN)</i>	45
2.3.2	Reativos	46
2.3.2.1	<i>Dynamic Source Routing (DSR)</i>	46
2.3.2.2	<i>Ad-Hoc On-Demand Distance Vector (AODV)</i>	48
2.3.2.3	<i>Temporally Ordered Routing Algorithm (TORA)</i>	50
2.3.3	Híbridos	51
2.3.3.1	<i>Zone Routing Protocol (ZRP)</i>	51
2.3.3.2	<i>Fisheye State Routing (FSR)</i>	52
2.3.3.3	<i>Hybrid Wireless Mesh Protocol (HWMP)</i>	53
2.4	Redes em Malha sem Fio Definidas por Software	55
2.4.1	Redes Definidas por Software (SDN)	56
2.4.2	Integração entre Redes em Malha sem Fio e SDN	58
2.5	Trabalhos Relacionados	61
3	Proposta	67

3.1 Iperf3	69
3.2 OpenWrt	70
3.3 Cenário Experimental	71
3.4 Melhorando o Desempenho com Múltiplos Canais e Interfaces	74
3.5 Mecanismo e Estratégias de Atribuição de Canais e Interfaces	76
4 Resultados	77
4.1 Análise da Qualidade dos Canais na Banda ISM 2,4 GHz e 5,0 GHz	77
4.2 Análise da Distância Entre os Nós da Rede	80
4.3 O Impacto da Heterogeneidade no Desempenho da Rede	82
4.4 Análise de Desempenho do OpenFlow em relação aos tradicionais protocolos de roteamento	85
4.5 Sobrecarga do Tráfego de Controle	88
5 Conclusões	90
REFERÊNCIAS	93

1 Introdução

Nos próximos anos, espera-se um aumento significativo no tráfego da Internet devido ao surgimento de bilhões de dispositivos heterogêneos com a capacidade de coletar, trocar informações e interagir de forma inteligente com o meio ambiente (SANTOS et al., 2016). É preciso aprofundar-se no estudo das infraestruturas de rede que atendam a esta crescente demanda, em particular para identificar seus limites. Desde avanços científicos em termos de inovações na configuração até o gerenciamento de mídia de transmissão de dados para atender às necessidades de várias escalas e demandas, provendo benefícios aos usuários de vários setores da sociedade, como transporte, saúde, etc.

Nesse contexto, as redes sem fio ganharam um vasto crescimento devido à sua facilidade de implementação, suporte à mobilidade, robustez, pontos de acesso econômicos e arquitetura *plug and play* (YAQOOB et al., 2017). São amplamente utilizadas em universidades, casas, escolas e *hotspots* públicos sem fio para fornecer diversos serviços como compartilhamento de informações, armazenamento de arquivos distribuídos, acesso a arquivos distribuídos e transmissão de áudio e vídeo. Porém, uma típica rede sem fio composta por pontos de acesso normalmente está conectada à Internet por meio de uma rede cabeada. Esta infraestrutura de rede sofre de alta complexidade e alto custo de implantação. Portanto, desde os últimos anos, as topologias de redes foram migrando lentamente para redes com infraestrutura de baixo custo, como redes *Ad hoc* ou Redes em Malha Sem Fio (*Wireless Mesh Networks - WMN*) (SINGH; TALASILA, 2015).

As WMNs apresentam-se como uma das tecnologias para atender os desafios desse cenário do futuro (AL-SAADY et al., 2016). As WMNs são compostas por roteadores sem fio, chamados roteadores de malha, interligados para formar um *backbone* de múltiplos saltos. Esses roteadores de malha são dinamicamente auto-organizáveis, auto-configuráveis e auto-curáveis, sem qualquer controle centralizado. Essas características permitem que uma WMN seja implantada incrementalmente, um nó de cada vez, de acordo com a demanda.

Portanto, as WMNs têm sido reiteradamente apontadas como a solução tecnológica de melhor custo benefício para a construção de uma plataforma de comunicação altamente escalável, capaz de promover conectividade a um custo relativamente baixo. Sua utilização traz benefícios potenciais, como alta capacidade de comunicação, alta disponibilidade e tolerância a falhas, além de propiciar uma rápida implantação de serviços de rede (BRITO et al., 2014).

Entretanto, essa heterogeneidade de cenários implica na necessidade de alto grau de flexibilidade em estratégias de encaminhamento e de um controle mais eficiente da operação da rede, que propicie melhor utilização dos recursos da mesma, sob pena de perda de desempenho e degradação dos serviços.

Para otimizar o desempenho das WMNs podem ser utilizados múltiplos canais ortogonais (i.e., livres de interferência inter-canais) para que diferentes roteadores de malha funcionem simultaneamente em diferentes canais (OLIVEIRA; THEOLEYRE; DUDA, 2012). Desta forma, 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. Logo, a vazão da rede pode ser aumentada e o atraso reduzido.

Os roteadores de malha podem ser equipados com múltiplas interfaces e tirar maior proveito 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).

Como mencionado, os roteadores de malha, em geral, são equipados com mais de uma interface, podem ser inclusive dispositivos dedicados a esse fim. Para garantir o alcance da rede é usado um protocolo de roteamento de maneira que os roteadores possam se conectar através de múltiplos saltos. Por causa dessa propriedade não é necessário gastar muita potência para a transmissão do sinal, facilitando a inserção de equipamentos de baixo consumo à rede. Porém, o roteamento em redes de malha apresenta alguns desafios como a necessidade de métricas mais eficientes, escalabilidade e robustez. Por exemplo, muitos protocolos utilizam o menor número de saltos para o cálculo da rota, mas nem sempre essa métrica levará ao melhor caminho (GUPTA et al., 2017). O aumento do número de dispositivos demanda uma rede mais densa que traz desafios como disputa dos enlaces e congestionamento, lavando a uma demora na descoberta de novas rotas e dificultando o roteamento. Existem vários protocolos de roteamento que tratam alguns desses problemas, mas nenhum soluciona todos eles (SCHILLER, 2017).

Atualmente, o roteamento em redes de malha tem sido um campo de pesquisa muito ativo (YUAN; KANHERE; HOLLICK, 2017). Diferentes abordagens ao roteamento foram investigadas e várias delas têm relação com as redes ad hoc (por exemplo, AODV (*Ad-Hoc On-Demand Distance Vector*) (PERKINS; BELDING-ROYER; DAS, 2003) ou B.A.T.M.A.N. (*Better Approach to Mobile Ad-Hoc Networking*) (JOHNSON; NTLATLAPA; AICHELE, 2008)), enquanto outras são mais influenciadas pelos clássicos protocolos de roteamento de redes locais (por exemplo, OLSR (*Optimized*

Link State Routing Protocol) (CLAUSEN; JACQUET, 2003)). No entanto, as funcionalidades desses protocolos de roteamento são bastante limitadas e se torna difícil de expandi-los (DELY; KASSLER; BAYER, 2011).

A inflexibilidade no processo de roteamento e do encaminhamento de pacotes tem sido reconhecida para redes sem fio (DELY; KASSLER; BAYER, 2011). Por exemplo, para realizar o roteamento baseado em fluxo, onde os fluxos seguem caminhos diferentes através da rede para alcançar um destino é difícil de implementar com os protocolos de roteamento tradicionais (HERTIANA; KURNIAWAN et al., 2016). O roteamento baseado em fluxo permite interessantes casos de uso, como o balanceamento de carga e mobilidade dos usuários na rede, onde é necessário lidar com a rápida rotação dos endereços de rede dos usuários para manter a conectividade de ponta a ponta.

Recentemente, OpenFlow surgiu como uma tecnologia para tornar *switches* em redes com fios mais inteligentes e programáveis via uma interface padronizada (CAMPOS, 2017). A ideia-chave do OpenFlow é mover a inteligência de encaminhamento para um servidor central de controle de rede, tornando o processo de roteamento nos roteadores ou switches mais simplificado. Desta maneira, é possível implementar diferentes abordagens de forma eficiente. Além disso, o OpenFlow pode coexistir com diversos protocolos de roteamento e oferecer a possibilidade de virtualização de rede (DELY; KASSLER; BAYER, 2011). Com o OpenFlow é possível realizar uma abordagem alternativa realizando o roteamento e encaminhamento baseados em fluxos. Os Fluxos de diferentes aplicações entre o mesmo par origem e destino podem ser transportados por diferentes caminhos, distribuindo a carga e o consumo energético pelos diversos nós da rede.

A adoção do paradigma de Redes Definidas por Software (*Software Defined Networking* - SDN) (LABRAOUI; BOC; FLADENMULLER, 2017) no contexto de redes em malha sem fio abre espaço para novas funcionalidades, como engenharia de tráfego, encaminhamento de pacotes baseado em fluxos e a interoperabilidade da rede. Utilizando o protocolo Openflow para a comunicação entre os componentes SDN é possível adotar técnicas e algoritmos que melhoram o funcionamento da rede, além de permitir um ambiente controlado para experimentação em WMNs. Entretanto, alguns desafios precisam ser considerados. Um primeiro desafio está no contraste entre a arquitetura inerentemente distribuída da rede em malha e o modelo centralizado de SDN. Além disso, o desafio de realizar o controle de forma integrada à rede de dados sem demandar recursos adicionais (BRITO et al., 2014).

Neste trabalho, é apresentado uma avaliação de desempenho do protocolo OpenFlow, para adoção do paradigma de SDN, em relação aos principais protocolos de redes em malha. Os experimentos foram realizados em um ambiente real de rede

em malha sem fio. A análise aborda a utilização de multi-interfaces e multi-canais, taxa de entrega, vazão, relação sinal-ruído (*Signal-to-Noise Ratio* - SNR), tipo de tráfego, número de saltos e a distância ideal entre os nós levando sempre em consideração a utilização de equipamentos de baixo custo. As redes sem fio de próxima geração precisam enfrentar vários desafios, incluindo o custo para cobrir áreas de alta densidade, eventos lotados ou áreas amplas, ou responder a mudanças de demanda domésticas, por exemplo, grandes eventos esportivos (CONSORTIUM et al., 2014). Portanto, a importância de avaliar o desempenho dessas redes é para identificar, medir e melhorar os processos internos. Além de conhecer os pontos fortes e de melhorias das redes em malha, tanto no que tange em termos de configuração de equipamentos quanto ao seu gerenciamento como um todo.

1.1 Motivação

O tráfego de Internet deverá aumentar de três a cinco vezes nos próximos três anos devido ao crescente número de dispositivos móveis conectados (INDEX, 2016). Espera-se que o número de dispositivos conectados e as comunicações de máquina para máquina (*Machine to Machine* - M2M) excedam o número da população nos próximos três anos (TANAB; HAMOUDA, 2017). Prevê-se que, na próxima década, uma infraestrutura de Internet mais avançada será necessária para suportar esse aumento no tráfego da Internet (HUAWEI, 2017).

A rede em malha é uma arquitetura promissora para a próxima geração de redes sem fio. Um paradigma desenvolvido para fornecer ampla cobertura de rede sem usar infraestrutura centralizada (AKYILDIZ; WANG; WANG, 2005). Portanto, as WMNs são uma opção viável para servir de *backbone* para redes de área metropolitana. Nessas redes, os *gateways* (nós sem fio conectados à uma rede cabeada de alta velocidade com à Internet) são empregados para fornecer uma conexão da rede em malha com à Internet.

A motivação do trabalho surge da necessidade de oferecer serviços de qualidade e eficiência para os usuários da próxima geração de redes sem fio. Portanto, é necessário realizar um estudo e analisar com maiores detalhes o desempenho e o comportamento dos tradicionais protocolos de roteamento para as WMNs, incluindo nessa lista a adoção do paradigma de SDN com o protocolo OpenFlow. O presente trabalho, apresenta uma avaliação de desempenho entre os principais protocolos de roteamento de redes em malha sem fio, apontando as vantagens e desvantagens de cada um e pontuando seus desempenhos no roteamento.

1.2 Objetivos e Contribuições

Este trabalho tem como objetivo geral realizar um estudo comparativo e avaliar o desempenho dos principais protocolos de roteamento de redes em malha em um ambiente real levando em consideração a utilização de equipamentos de baixo custo. Além dos tradicionais protocolos de roteamento para as WMNs, a presente proposta analisa e avalia o comportamento dessas redes introduzindo o paradigma de SDN com o protocolo OpenFlow apontando suas principais vantagens e desvantagens em relação aos demais protocolos.

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Realizar um estudo das tecnologias de redes sem fio;
- Analisar os protocolos de roteamento existentes para WMNs;
- Analisar e avaliar as WMNs com adoção do paradigma de SDN;
- Pesquisar trabalhos relacionados à avaliação de desempenho e protocolos de roteamento;
- Investigar estratégias para avaliação de desempenho; e
- Realizar uma avaliação de desempenho dos protocolos de roteamento.

O presente trabalho visa tanto a análise de desempenho e a compreensão da maneira em que trabalham os protocolos de roteamento nas WMNs quanto o estudo comportamental destes protocolos em diversas condições na topologia da rede, apontando os melhores desempenhos para que proporcione uma boa conectividade estável na rede.

1.3 Organização do Trabalho

O restante do trabalho encontra-se organizado e estruturado da seguinte forma. O Capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica relacionada ao tema proposto, descrevendo uma visão geral do estado da arte das redes sem fio, assim como os padrões estabelecidos para as redes em estudo. Além de apresentar o funcionamento e características dos protocolos de roteamento utilizados pelas redes WMNs e trabalhos relacionados à pesquisa. No Capítulo 3, são apresentados os métodos utilizados para avaliação de desempenho dos protocolos de roteamento. Em seguida, a análise dos resultados obtidos neste trabalho a partir de exaustivos experimentos realizados com equipamentos de baixo custo são abordados no Capítulo 4. Por fim, no Capítulo 5

apresentam-se as considerações finais, que relatam os resultados obtidos com este trabalho, bem como são propostos trabalhos futuros.

2 Fundamentação Teórica

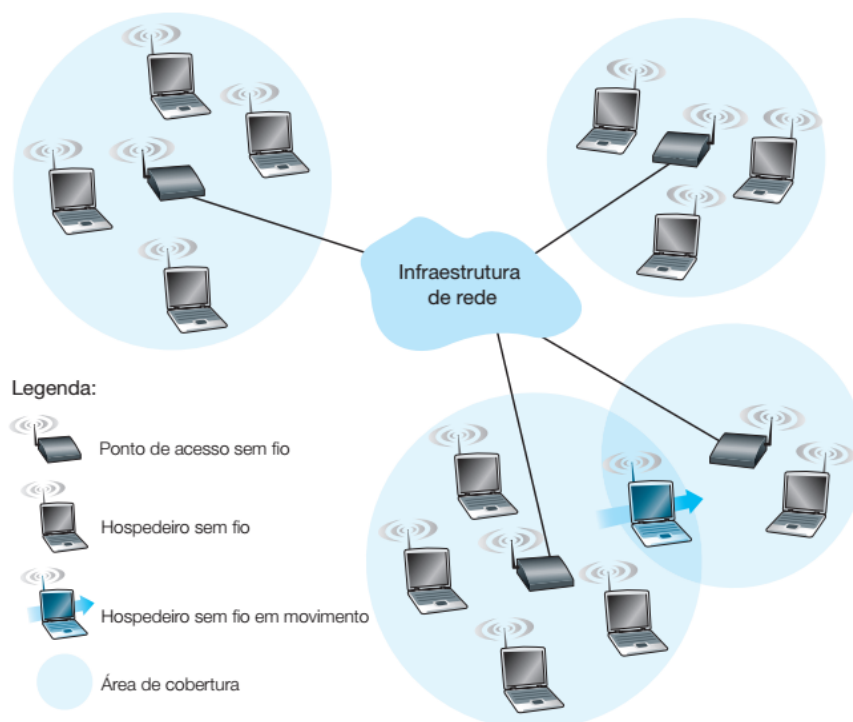
Neste capítulo será apresentada a fundamentação teórica necessária para uma melhor compreensão da proposta do trabalho. A seção 2.1 inicia com um estudo das redes sem fio apresentando os principais conceitos, características e elementos que compõem essas redes, traçando os desafios propostos pela natureza sem fio dos enlaces de comunicação nessas redes e pela mobilidade que esses enlaces sem fio possibilitam. Na seção 2.2 introduz as redes em malha sem fio apresentando suas características e cenários de aplicação. A seção 2.3 apresenta os tipos de protocolos de roteamento para as redes em malha mostrando as principais diferenças entre eles e, destacando as vantagens e desvantagens de cada um. Por fim, na seção 2.4 apresenta o conceito de SDN e integração com as redes em malha sem fio.

2.1 Redes sem Fio

As redes sem fio ganharam grande popularidade nos últimos anos devido à sua conveniência na configuração, uso e manutenção. Sua infraestrutura com fio reduzida e comercialização em larga escala combinada com o aumento das taxas de dados revolucionaram a forma como nos comunicamos (OLIVEIRA, 2012). A Figura 1 ilustra um cenário de comunicação e mobilidade sem fio. Onde podemos identificar os seguintes elementos em uma rede sem fio:

- **Hospedeiros sem fio:** Como nas redes cabeadas, os hospedeiros são os equipamentos de sistemas finais que executam as aplicações. Um hospedeiro final pode ser um *notebook*, um *smartphone* ou um *Desktop*.
- **Enlaces sem fio:** Para que um hospedeiro se conecte a outro dispositivo sem fio é necessário que haja um enlace sem fio. Existem várias tecnologias sem fio com diferentes taxas de transmissão a diferentes distâncias. A Figura 2 mostra as duas características fundamentais (área de cobertura e taxa de enlace) dos padrões de enlace sem fio mais populares.
- **Estação-Base:** A estação-base é uma parte fundamental da infraestrutura de rede sem fio. É responsável pelo envio e recebimento de dados para um hospedeiro sem fio associado a ela. Uma estação-base geralmente coordena a transmissão de vários hospedeiros sem fio com os quais está associada. Dizemos que um hospedeiro sem fio está associado a uma estação-base quando o hospedeiro está dentro do alcance de comunicação sem fio da estação-base e

Figura 1: Elementos de uma rede sem fio.



Fonte: (KUROSE; ROSS, 2016).

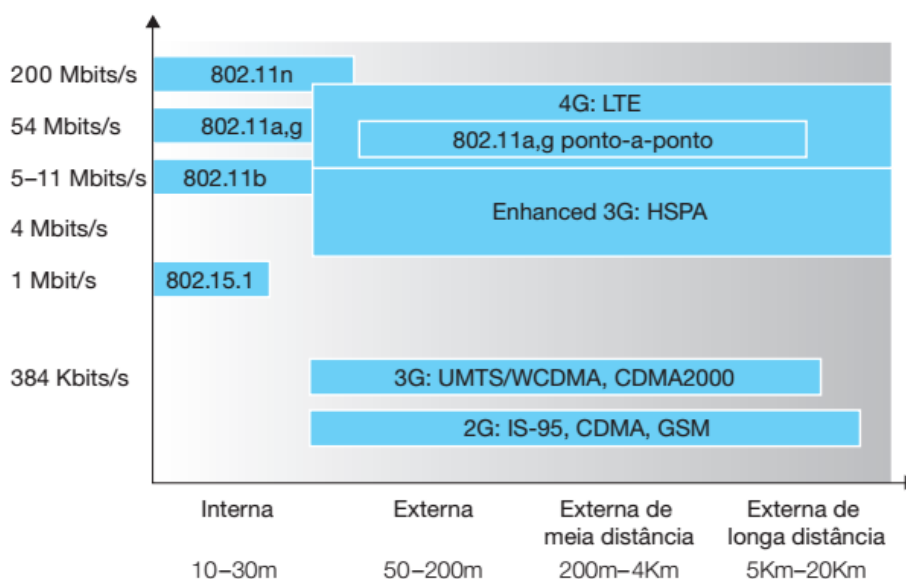
quando o hospedeiro usa a estação-base para transmitir dados para uma rede maior.

- **Infraestrutura de rede:** É a rede maior com o qual um hospedeiro sem fio pode se comunicar. As facilidades proporcionadas por essas redes impulsionaram o desenvolvimento de um conjunto de diferentes tecnologias sem fio, incluindo a Rede Local sem Fio (*Wireless Local Area Network* - WLAN) que oferece uma maneira flexível de comunicação, permitindo a mobilidade do usuário. A tecnologia de comunicação padrão para WLANs é o IEEE 802.11, comercialmente conhecido como *Wireless-Fidelity* (Wi-Fi) (GROUP et al., 2010).

As redes que operam no padrão IEEE 802.11 podem atuar em dois modos: infraestrutura e ad-hoc. Quando os hospedeiros estão associados com uma estação-base, diz-se que estão operando em modo de infraestrutura, já que todos os serviços de rede são fornecidos pela rede ao qual estão conectados. Em redes ad-hoc, os hospedeiros sem fio não dispõem de uma infraestrutura desse tipo. Portanto, os próprios hospedeiros devem prover os serviços tradicionais de rede como roteamento e atribuição de endereços.

Podemos observar que essas partes podem ser combinadas de diversas maneiras diferentes para formar diferentes tipos de rede sem fio. No nível mais alto,

Figura 2: Características de enlaces de padrões selecionados de rede sem fio.



Fonte: (KUROSE; ROSS, 2016).

podemos classificar as redes sem fio de acordo com dois critérios: (i) ou um pacote na rede sem fio atravessa exatamente um salto sem fio ou diversos saltos sem fio, e (ii) ou há infraestrutura, como uma estação-base na rede (KUROSE; ROSS, 2016). Neste trabalho, o foco será nas redes de múltiplos saltos, com infraestrutura. Nessas redes, está presente uma estação-base cabeada para as redes maiores. Entretanto, os nós sem fio podem se comunicar através de outros nós sem fio para se comunicarem por meio de uma estação-base. As redes em malha sem fio e algumas redes de sensores sem fio se encaixam nesta categoria.

2.1.1 Características de Enlaces e Redes sem Fio

Ao procurar diferenças entre redes com fio e sem fio, podemos encontrar várias diferenças importantes entre um enlace com fio e um enlace sem fio:

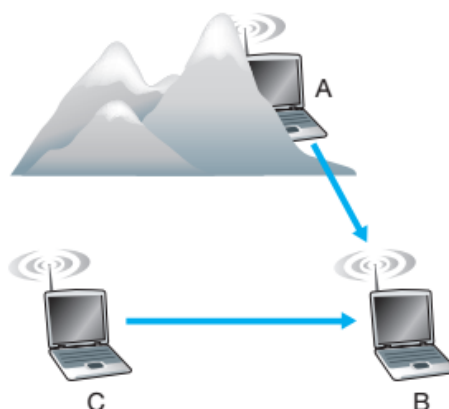
- **Redução da força do sinal:** Radiações eletromagnéticas são atenuadas quando atravessam algum tipo de material. O sinal se dispersa mesmo ao ar livre, resultando na redução de sua força à medida que aumenta a distância entre emissor e receptor (KUROSE; ROSS, 2016).
- **Interferência de outras fonte:** Várias fontes de rádio transmitindo na mesma banda de frequência sofrerão interferência umas das outras. Além da interferência de fontes transmissoras, o ruído eletromagnético presente no ambiente pode resultar em interferência (TSOURI; ZAMBITO; VENKATARAMAN, 2017).

- **Propagação multivias:** Propagação multivias ocorre quando porções da onda eletromagnética se refletem em objetos e no solo e tomam caminhos de comprimentos diferentes entre um emissor e um receptor. Resultando no embaralhamento do sinal recebido no destinatário. Objetos em movimento entre o emissor e o receptor podem fazer com que a propagação multivias mude ao longo do tempo (MAHLER et al., 2017).

Considerando as falhas que podem ocorrer em um canal sem fio, um hospedeiro recebe um sinal eletromagnético que é uma combinação de uma forma degradada do sinal original transmitido pelo remetente e um ruído de fundo no ambiente. A relação sinal-ruído (SNR) é uma medida relativa da potência do sinal recebido e o ruído. Quanto maior o SNR mais fácil será para o destinatário extrair o sinal transmitido de um ruído de fundo e menor será a taxa de erro de bits (*Bit Error Rate* - BER), que é a probabilidade de um bit transmitido ser recebido com erro no destinatário (KUROSE; ROSS, 2016).

Taxas de erro de bits mais altas e que variam ao longo do tempo não são as únicas diferenças entre um enlace com fio e um enlace sem fio. A Figura 3 mostra um cenário denominado o problema do terminal oculto, onde obstruções físicas presentes no ambiente, podem impedir que *A* e *C* escutem as transmissões de um e de outro, mesmo que as transmissões de *A* e *C* estejam interferindo no destino, *B*. Um segundo cenário que resulta em colisões que não são detectadas no receptor é causado pelo desvanecimento da força de um sinal à medida que ele se propaga pelo meio sem fio. O problema do terminal oculto e o desvanecimento torna o acesso múltiplo em uma rede sem fio consideravelmente mais complexo do que em uma rede cabeada.

Figura 3: Problema do terminal oculto.



Fonte: (KUROSE; ROSS, 2016).

2.1.2 Padrão IEEE 802.11

O *Institute of Electrical and Electronic Engineers* (IEEE), surgiu inicialmente como a união de dois institutos, um de Engenheiros Eletricistas e outro de Engenheiros de Telecomunicações, onde o mesmo tinha a finalidade de criar padrões para a indústria elétrica. Atualmente o IEEE é o instituto que visa compartilhar e integrar conhecimento na área de Tecnologia da eletricidade e tecnologia da informação. Para redes sem fio o IEEE criou alguns padrões dentre eles têm: a Rede Pessoal sem Fio (Wireless Personal Area Network - WPAN) que é uma tecnologia para pequeno campo de transmissão, definida pelo padrão 802.15 e o WLAN para campo de transmissão médio e geralmente utilizados em ambientes internos, esta tecnologia é definida através do padrão IEEE 802.11 (IEEE, 2017).

Atualmente, as redes sem fio estão presentes no local de trabalho, em casa, em instituições educacionais, em cafés, aeroportos e esquinas, as WLANs agora são uma das mais importantes tecnologias de rede de acesso na Internet de hoje. Embora muitas tecnologias e padrões para WLANs tenha sido desenvolvidos na década de 1990, uma classe particular de padrões surgiu claramente como a vencedora: a WLAN IEEE 802.11, conhecida como Wi-Fi (KUROSE; ROSS, 2016).

Existem diversos padrões para tecnologias de WLAN, entre eles 802.11a, 802.11b, 802.11g e o 802.11n. A Tabela 1 apresenta um resumo comparativo das principais características desses padrões. Os padrões 802.11 compartilham muitas características em comum. Todos usam o mesmo protocolo de acesso ao meio e também usam a mesma estrutura de quadro para seus quadros de camada de enlace. Todos eles têm a capacidade de reduzir a taxa de transmissão para alcançar distâncias maiores e permitem trabalhar no modo de infraestrutura e modo ad-hoc.

Tabela 1: Comparativo entre os padrões de tecnologias WLAN.

Padrão	Frequência (GHz)	Alcance (M)	Velocidade (Mbits/s)
802.11a	5	25 à 100	54
802.11b	2,4	100 à 150	11
802.11g	2,4	100 à 150	54
802.11n	2,4 / 5	100 à 150	150

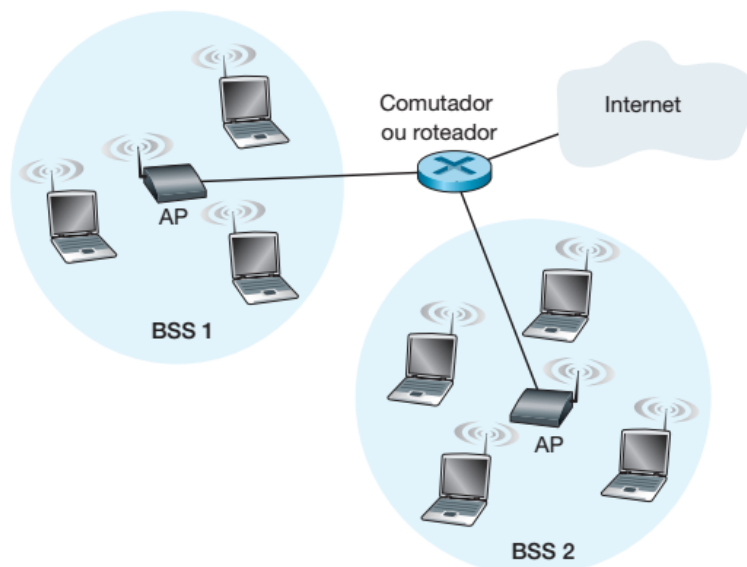
Fonte: Elaborado pelo autor.

2.1.2.1 Arquitetura 802.11

A Figura 4 mostra os principais componentes de uma WLAN 802.11. A parte fundamental da arquitetura 802.11 é o Conjunto Básico de Serviço (*Basic Service Set* - BSS). Um BSS é composto por uma ou mais estações sem fio e uma estação-

base central, conhecido como Ponto de Acesso (*Access Point* - AP). Em uma rede residencial típica, há apenas um AP e um roteador (normalmente integrados como uma unidade) que conecta o BSS à Internet.

Figura 4: Arquitetura da WLAN IEEE 802.11.



Fonte: (KUROSE; ROSS, 2016).

Nas redes 802.11, cada estação sem fio precisa se associar com um AP antes de poder enviar ou receber quadros contendo dados de camada de rede. Ao instalar um AP, é necessário definir ao ponto de acesso um Identificador de Conjunto de Serviços (*Service Set Identifier* - SSID) que pode ser composto por um conjunto de caracteres alfanuméricos. Também é necessário definir um número de canal ao AP. As redes que operam na faixa de frequência de 2,4 GHz a 2,485 GHz por padrão são definidos 11 canais que se sobrepõem parcialmente. Não há sobreposição entre quaisquer dois canais se, e somente se, eles estiverem separados por quatro ou mais canais. Portanto, o conjunto dos canais 1, 6 e 11 é o único conjunto de três canais não sobreposto. Isso significa que um administrador de rede pode utilizar destes canais ortogonais (i.e., canais não sobrepostos e livres de interferência inter-canais) para otimizar o desempenho de um rede sem fio (OLIVEIRA; THEOLEYRE; DUDA, 2012).

Para conseguir acesso à Internet, uma estação sem fio terá de se juntar a uma sub-rede e, portanto, precisará se associar com um AP. Quando uma estação se associa é criado um fio virtual entre a mesma e o AP. Somente o AP associado enviará quadros de dados à estação sem fio e a estação sem fio enviará quadros de dados à Internet somente por meio do AP associado. Para que uma estação sem fio se associe a um determinado AP, é necessário que o ponto de acesso envie periodicamente

quadros de sinalização, contendo o SSID e o endereço MAC do AP. Então, a estação sem fio realiza uma varredura dos 11 canais em busca de quadros de sinalização de quaisquer APs que estão dentro do seu alcance. Após a varredura dos canais, os APs disponíveis são listados e o hospedeiro sem fio seleciona um desses pontos de acesso para se associar.

Ao selecionar um AP, o hospedeiro sem fio envia um quadro de solicitação de associação ao AP, e este responde com um quadro de resposta de associação. Uma vez associada ao AP, o hospedeiro sem fio terá que participar da mesma sub-rede do AP. Portanto, o hospedeiro enviará uma mensagem de descoberta DHCP à sub-rede a fim de obter um endereço IP. Quando o endereço é obtido, o restante da rede, vê esse hospedeiro como qualquer outro hospedeiro com um endereço de IP naquela sub-rede.

2.1.2.2 Protocolo MAC 802.11

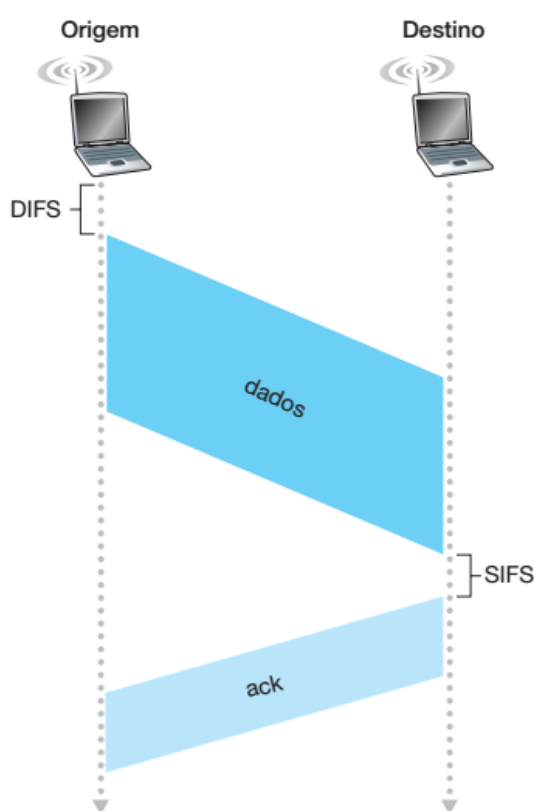
Quando uma estação sem fio está associada com um AP, podem começar a enviar e receber quadros de dados. Porém, é possível que várias estações possam querer transmitir quadros de dados ao mesmo tempo, sobre o mesmo canal, tornando necessário um protocolo de acesso múltiplo para coordenar as transmissões. No 802.11, o protocolo adotado foi o Acesso Múltiplo por Detecção de Portadora com Prevenção de Colisão (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance - CSMA/CA*). Este protocolo é de acesso aleatório e cada estação escuta o canal antes de transmitir ou deixa de transmitir quando percebe que o canal está ocupado.

Embora tanto a Ethernet quando o 802.11 usem o CSMA/CA, os dois protocolos de Controle de Acesso ao Meio (*Media Access Control - MAC*) apresentam diferenças importantes. Em vez de usar detecção de colisão, o 802.11 utiliza técnicas de prevenção de colisão. Devido às altas taxas de erros de *bits* em canais sem fio, o 802.11 usa um esquema de reconhecimento e retransmissão (*Automatic Repeat Request - ARQ*) de camada de enlace. O protocolo MAC 802.11 não implementa detecção de colisão devido à duas razões, a primeira é que para detectar colisões exige a capacidade de enviar o próprio sinal e de receber ao mesmo tempo, para determinar se uma outra estação está transmitindo. A segunda é, mesmo que o adaptador pudesse transmitir e receber ao mesmo tempo, ele não seria capaz de detectar todas as colisões devido ao problema do terminal oculto e do desvanecimento, como discutido anteriormente.

Como as WLANs 802.11 não utilizam detecção de colisão, quando uma estação começa a transmitir um quadro, ele o transmite integralmente. No entanto, transmitir quadros inteiros principalmente os longos existe uma grande possibilidade de

ocorrer colisão. Para reduzir a probabilidade de colisões, o 802.11 emprega diversas técnicas de prevenção de colisão para lidar com essa probabilidade de falhas. O MAC 802.11 utiliza reconhecimentos de camada de enlace, quando uma estação de destino recebe um quadro que passou na Verificação de Redundância Cíclica (*Cyclic Redundancy Check* - CRC), ela aguarda um curto período de tempo, conhecido como Espaçamento Curto Interquadros (*Short Inter-Frame Spacing* - SIFS), e então devolve um quadro de reconhecimento, como mostrado na Figura 5. Caso a estação transmissora não receba um reconhecimento após um certo número fixo de retransmissões, o quadro será descartado.

Figura 5: Reconhecimentos de camada de enlace 802.11.



Fonte: (KUROSE; ROSS, 2016).

Quando uma estação sem fio tem um quadro para transmitir, primeiramente ela deve perceber que o canal está ocioso, só então ela transmitirá seu quadro após um curto período de tempo conhecido como Espaçamento Interquadros Distribuído (*Distributed Inter-Frame Space* - DIFS). Caso contrário, a estação escolherá um valor aleatório de *backoff* e fará a contagem regressiva a partir desse valor quando perceber que o canal estiver ocioso. Quando o contador chegar ao zero, a estação transmite o quadro inteiro e então ficará esperando um reconhecimento. Se receber um reconhecimento, a estação transmissora saberá que esse quadro foi corretamente recebido na estação de destino. Caso não receba um reconhecimento, a estação transmissora

entrará novamente na fase de *backoff* e escolherá um valor aleatório dentro de um intervalo maior.

O protocolo MAC 802.11 inclui um esquema de reserva inteligente que ajuda a evitar colisões mesmo na presença de terminais ocultos. Para evitar esse problema, o protocolo IEEE 802.11 permite que uma estação utilize um quadro de controle de Solicitação de Envio (*Request to Send* - RTS) e um quadro de controle Pronto para Envio (*Clear to Send* - CTS) para reservar o acesso ao canal. Quando um remetente envia um quadro de dados, ele deve enviar primeiramente um quadro RTS ao AP informando o tempo total requerido para transmitir o quadro de dados e o quadro de reconhecimento. O AP ao receber o quadro RTS, responde fazendo a transmissão em *broadcast* de um quadro CTS. O quadro CTS tem por finalidade dar ao remetente uma permissão para enviar e também avisar as outras estações a não enviarem durante o tempo reservado.

A utilização dos quadros RTS e CTS podem melhorar o desempenho de dois modos importantes. O problema do terminal oculto, visto que um quadro de dados longo é transmitido somente depois do canal ter sido reservado e como os quadros RTS e CTS são curtos, uma colisão que envolva esses quadros terá apenas uma curta duração. Embora a troca de RTS e CTS possa ajudar a reduzir colisões, também introduz atraso e consome recursos do canal. Portanto, a troca de RTS e CTS é utilizada apenas para reservar o canal para a transmissão de um quadro de dados longo e geralmente estabelecido de acordo com um patamar.

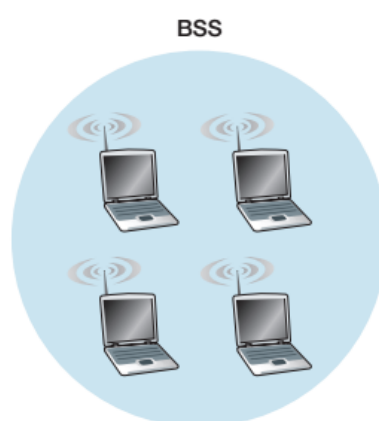
2.1.2.3 Redes Ad-hoc

Como mencionado, redes sem fio que disponibilizam APs normalmente são denominadas de WLANs de infraestrutura, nesse contexto, infraestrutura quer dizer os APs juntamente com a infraestrutura cabeada que conecta os APs a um roteador. A Figura 6 mostra que estações IEEE 802.11 também podem se agrupar e formar uma rede ad-hoc, essas redes não dispõem de nenhum controle central e nenhuma conexão com o mundo externo. São formadas basicamente conforme a necessidade de equipamentos móveis que, por acaso, estão próximo uns dos outros e têm a necessidade de se comunicar, porém, não dispõem de infraestrutura de rede no local onde se encontram. Uma rede ad-hoc pode ser criada quando pessoas com *notebooks* ou outros dispositivos móveis se reúnem e querem trocar dados na ausência de um ponto de acesso centralizado. Essas redes têm despertado um grande interesse com a contínua proliferação de equipamentos portáteis que podem se comunicar.

As redes ad-hoc não apresenta uma topologia pré-determinada, e nenhum controle centralizado, devido a sua forma dinâmica em relação aos seus componen-

tes. Portanto, não há necessidade de infraestruturas como *backbones* ou pontos de acesso, uma vez que a comunicação ocorre sem conexão física e diretamente entre os nós (ABUHMIDA; RADHAKRISHNAN; WELLS, 2015). Geralmente, a comunicação dos dispositivos ocorre com múltiplos saltos, pois, os mesmos ficam limitados ao alcance dos sinais emitidos pelos seus rádios. Fazendo com que os dispositivos sem fio atuem tanto como roteadores quanto hospedeiros.

Figura 6: Rede Ad-Hoc IEEE 802.11.



Fonte: (KUROSE; ROSS, 2016).

Como essas redes não apresentam uma topologia específica as redes ad-hoc possuem algumas características como flexibilidade e portabilidade, pois, não há necessidade de instalação de cabos tornando possível sua instalação em locais de difícil acesso. No entanto, também apresentam algumas implicações como interferência de sinal, interoperabilidade, perda de caminho, segurança e um gerenciamento de energia de forma eficiente. Como exemplo de redes ad-hoc temos as Redes Ad-hoc Móveis (*Mobile Ad-hoc Networks* - MANETs) são redes no qual os dispositivos apresentam uma mobilidade, por isso que os dispositivos são denominados de nós móveis. Estas redes apresentam uma topologia dinâmica, devido à mobilidade e a variação da quantidade de nós na rede (SHARMILA; SHANTHI, 2016). Na seção seguinte, será abordado as redes em malha sem fio, essas redes apresentam a característica de roteamento entre os nós de forma dinâmica, assemelham-se as MANETs. A principal diferença é que nas redes em malha os nós são estacionários.

2.2 Redes em Malha sem Fio

Quando o padrão IEEE 802.11 surgiu em 1997, desde então, várias aplicações vêm sendo desenvolvidas para esta tecnologia, porém, estas aplicações demandam de redes fixas cabeadas conectadas entre as redes sem fio (HOU; LUI; LI, 2011).

Com a necessidade de fornecer serviços com maior qualidade e que não dependesse de redes cabeadas surgiram às redes em malha sem fio (WMNs). Neste tipo de rede os nós roteia o tráfego de forma dinâmica (AKYILDIZ; WANG; WANG, 2005).

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 autoconfigurável. 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.

As redes em malha apresentam uma conectividade com mais de um nó, possuindo algumas características interessantes, devido à comunicação nestas redes ser do tipo de múltiplos saltos. Redes em malha tem a capacidade de ser dinamicamente auto-organizáveis, auto-configuráveis e auto-curáveis. Apresentam uma dependência de mobilidade dos roteadores de malha, devido os nós formarem um *backbone* central da rede. E semelhante às redes ad-hoc, as WMNs possuem dependência quanto ao consumo eficiente de energia (AKYILDIZ; WANG; WANG, 2005). Portanto, os nós de um rede de malha necessitam de protocolos que otimizem o consumo de energia.

Como a WMN apresenta a característica de roteamento entre os nós de forma dinâmica, estas redes assemelham-se as MANETs. A principal diferença é que nas WMNs os nós são estacionários, apesar da localização não ser pré-determinada (AKYILDIZ; WANG; WANG, 2005). As WMNs tem como vantagens o baixo custo, robustez, escalabilidade, simplicidade e os benefícios proporcionados pelas tecnologias sem fio. Como não são necessários cabos e outros equipamentos de infraestrutura, o custo de manutenção é reduzido. A robustez e escalabilidade, é uma vantagem devido à característica dinâmica e da facilidade ao adicionar ou remover um nó da rede. Porém, apresentam desvantagens como degradação da largura de banda, interferência eletromagnética e perda de pacotes. A degradação da largura de banda ocorre devido os nós da rede sem fio utilizarem a mesma frequência, devido a isto somente um nó pode transmitir de cada vez. O problema de interferência eletromagnética é inerente a toda rede sem fio, devido a diversos equipamentos que utilizam a mesma frequência, como telefones sem fio e fornos de micro-ondas. Já a perda de pacotes é causada pelas interferências e por obstáculos, pois, os sinais de rádio possuem dificuldades para ultrapassar alguns tipos de materiais.

2.2.1 Características das Redes em Malha sem Fio

WMNs apresentam características únicas que as diferenciam de outras redes sem fio e com fio. As principais características dessas redes são:

- **Falta de mobilidade e Limitações de Energia:** Como os roteadores de malha geralmente são estacionários e não possuem restrições de energia. Eles podem dispor de recursos como múltiplas interfaces, memória, armazenamento, poder de computação e assim por diante.
- **Comunicação de múltiplos saltos:** Os roteadores de malha estabelecem e mantêm uma conectividade entre eles para formar um *backbone* de malha sem fio de múltiplos saltos capaz de ampliar o alcance de cobertura das redes sem fio atuais. Da mesma forma que os nós das MANETs, os roteadores de malha encaminham através de múltiplos saltos o tráfego gerado por outros nós da malha que podem não estar dentro do alcance direto da transmissão sem fio de seus destinos. No entanto, ao contrário das MANETs, a mobilidade dos nós no *backbone* não é frequente (ABUHMIDA; RADHAKRISHNAN; WELLS, 2015). Os dados são encaminhados de um roteador da malha para outro até chegar ao destino. Assim, os roteadores de malha tendem a se conectar uns com os outros através de ligações de curta distância, em vez de longas conexões diretas. Como resultado, o WMN pode cobrir a mesma área com menos potência de transmissão do que um roteador sem fio tradicional e, portanto, tem menos interferência e obtém uma maior taxa de transferência (AKYILDIZ; WANG; WANG, 2005).
- **Auto-organizáveis, Auto-configuráveis e Auto-curáveis:** As características da rede em malha de múltiplos saltos dar origem às propriedades de auto-organização, auto-configuração e auto-cura (TRAGOS et al., 2010). O WMN pode ser implantado incrementalmente, um nó de cada vez, sem qualquer intervenção administrativa especial. Esta característica torna o WMN atraente para novos usuários que podem se juntar rapidamente a uma rede de malha existente configurando seu próprio roteador de malha. Os protocolos de roteamento de malha permitem que os roteadores aprendam sobre seus vizinhos e encaminhe dados dinamicamente entre eles enquanto os nós entram e saem da rede (LABRAOUI; BOC; FLADENMULLER, 2017). Como resultado, os WMNs requer um baixo investimento inicial, especialmente quando comparado com os APs baseado no IEEE 802.11. O recurso de auto-cura permite que o WMN continue operando, mesmo que faltem um ou mais roteadores de malha ou caso ocorra uma falha de conexão. Os roteadores de malha são capazes de encontrar rotas alternativas para seus destinos, porque os roteadores estão juntos e possuem vários caminhos disponíveis no *backbone* de múltiplos saltos. De fato, a extensão da capacidade de auto-cura depende do número de caminhos disponíveis. Adicionar mais roteadores pode aumentar a confiabilidade à medida que mais caminhos alternativos se tornam disponíveis. No entanto, um grande número de

nós que compartilham o meio sem fio pode resultar em maior contenção e gargalo. Para fornecer capacidade de auto-cura e manter o desempenho da rede em um nível aceitável é necessário obter equilíbrio entre os níveis de contenção e o número de caminhos alternativos.

- **Padrão de tráfego:** Uma particularidade da WMN é o padrão de tráfego. Normalmente, os usuários querem acessar os recursos disponíveis na Internet, que reside na infraestrutura com fio. Assim, o tráfego gerado é principalmente entre a parte de infraestrutura cabeada da rede e um usuário final. Consequentemente, um intenso tráfego tem que atravessar o *backbone* sem fio através de longos caminhos. Geralmente, os roteadores de malha nas proximidades do nó de infraestrutura da rede são mais propensos a se congestionar e sofrerem um excesso mais rápido de *buffer* do que os roteadores que estão longe do nó de infraestrutura. Consequentemente, esse padrão de tráfego pode resultar em congestionamento em áreas próximas aos nós de infraestrutura da rede, levando a uma degradação significativa do desempenho em termos de vazão e atrasos de ponta a ponta.

Como mencionado, às características das redes em malha são semelhantes às redes ad-hoc, porém, estas redes se diferenciam conforme mostrado na Tabela 2. Por apresentar estas características em comum, nessas arquiteturas de rede o roteamento nas redes de malha é realizado de forma semelhante ao roteamento nas redes ad-hoc (WU et al., 2015). No entanto, as métricas utilizadas nas WMNs são diferentes devido ao fornecimento de um roteamento eficiente e com diferentes Qualidades de Serviços (*Quality of Service* - QoS), como largura de banda, latência e a necessidade de segurança na rede. Portanto, o estado das ligações na rede passa a ser o fator mais importante no roteamento, devido, os nós estarem mais próximos. Contudo, a largura de banda pode ser pequena, resultando em uma maior latência na rede (RETHFELDT et al., 2015).

2.2.2 Protocolo IEEE 802.11s

A tecnologia WMNs teve origem por volta da década de 90 no *Defense Advanced Research Projects Agency* (DARPA), centro de desenvolvimento de tecnologia militar dos Estados Unidos com o objetivo de buscar uma rede que permitisse uma comunicação fim a fim, sem a necessidade de comunicação com um nó central, que pudesse fornecer banda larga, transmissão de voz, dados e vídeo, posicionamento geográfico e comunicação móvel (TEIXEIRA, 2004). Desde então, as WMNs têm recebido grande atenção, de modo que muitas empresas passaram a utilizar esse

Tabela 2: Diferença entre redes em malha e redes ad-hoc.

Características	Redes em Malha sem Fio	Redes Ad-hoc
Infraestrutura	Têm infraestrutura	Não têm infraestrutura
Conectividade	Depende do backbone central da rede	Depende apenas dos nós da rede
Roteamento	O roteamento é realizado por roteadores de malha, economizando energia do usuário final	Os nós da rede providenciam a entrega dos pacotes para os demais nós.
Interfaces	Múltiplas interfaces	Única interface
Interoperabilidade	Comunicação entre vários tipos de rede.	Comunicação somente entre os nós.

Fonte: Elaborado pelo autor.

modelo e a comercializarem seus produtos. Muitas delas se juntaram em uma força tarefa para convergir as WMNs e incentivar a sua adoção em escala mundial. Em 2004, o grupo de tarefa do IEEE 802.11s foi criado para atender a crescente demanda por um padrão de redes em malha, encarregado em criar um documento de *marketing*, uma especificação de certificação e um plano de testes (CARVALHO, 2014).

O IEEE 802.11s é uma alteração do protocolo IEEE 802.11 (Wi-Fi) para redes WLAN em malha. A primeira versão do IEEE 802.11s foi lançada em 2006, propondo um padrão inovador que estabelecia a descoberta e encaminhamento de quadros em vários saltos. Apenas em 2012 o IEEE conseguiu concluir o processo de padronização do 802.11s incorporando-o ao IEEE 802.11 (IEEE 802.11s, 2011).

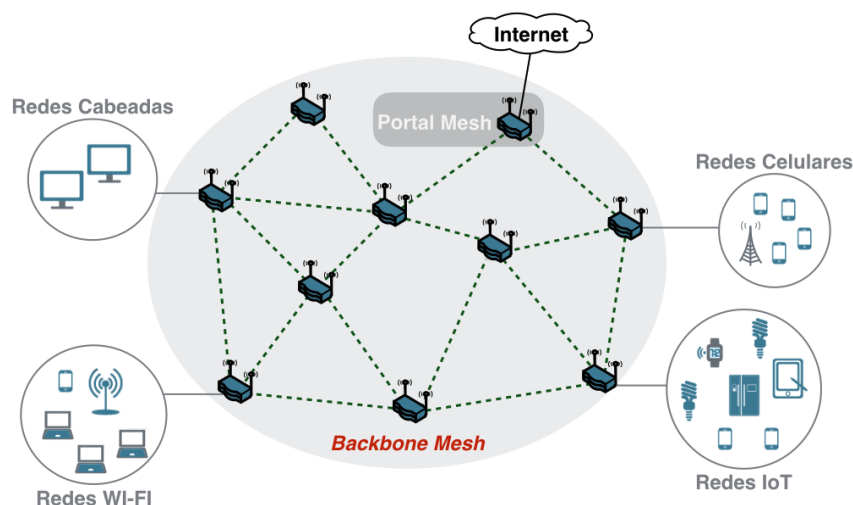
2.2.2.1 Arquitetura

A arquitetura de uma WMN é basicamente composta por nós autônomos que oferecem uma grande cobertura, conectividade e robustez à rede. Os nós podem se comunicar de forma direta ou a partir de múltiplos saltos, encaminhando quadros através de estações vizinhas até o destino. As redes em malha podem disponibilizar acesso à Internet a outras redes e estações, que não participam da rede. A Figura 7 fornece um exemplo de WMN, onde linhas tracejadas e sólidas indicam ligações sem fio e com fio, respectivamente. O padrão IEEE 802.11s introduz novos elementos para as redes em malha:

Fonte: Elaborado pelo autor.

- **Estação (Station - STA):** É a entidade básica em uma rede 802.11. Corresponde a um nó que solicita serviços, mas não envia quadros, nem participa

Figura 7: Arquitetura de Rede em Malha IEEE 802.11s.



em mecanismos de descoberta de caminho realizado pelos protocolos de roteamento.

- **Ponto de Malha (*Mesh Point* - MP):** É um nó que participa da formação e operação da rede de malha, repassando dados e participando das descobertas de rotas. Os MPs implementam as instalações da malha, como formação da topologia, seleção de caminho e encaminhamento de dados. Eles podem estabelecer conexões com vários MPs vizinhos, mas não fornecem suporte aos STAs.
- **Ponto de Acesso de Malha (*Mesh Access Point* - MAP):** É um MP agregado a um ponto de acesso (AP) que provê serviços aos clientes (STA). Para acessar a rede de malha um STA deve primeiro associar-se a um MAP, pois, as estações não conhecem os mecanismos internos da rede de malha, como por exemplo, os procedimentos de descoberta e roteamento. Portanto, as redes de malha são completamente transparente ao ponto de vista do STA.
- **Ponto Portal de Malha (*Mesh Portal Point* - MPP):** é um MP com uma funcionalidade especial de atuar como um *gateway* entre a rede em malha e uma rede externa, como a Internet. Cabe a cada MP escolher qual MPP usar para acessar a rede externa. Como os MPs, os MPPs não possuem funcionalidades de ponto de acesso e, portanto, não oferecem suporte para os STAs.

Um grupo de estações que formam a rede em malha é denominado de Conjunto Básico de Serviço de Malha (*Mesh Basic Service Set* - MBSS). Um MBSS pode conter MPs, MAPs e MPPs, dentro do MBSS, todas as estações estabelecem enlaces sem fio com as estações vizinhas para realizarem a troca de mensagens. Além disso, por meio da capacidade dessas redes de realizar os múltiplos saltos, as mensagens podem ser transferidas entre as estações que não possuem um enlace direto entre

si. A capacidade de múltiplos saltos tem o efeito de aumentar o alcance das estações sem fio, e desta forma amplia a conectividade da WLAN.

2.2.3 Cenários de Aplicação

As WMNs têm o potencial de fornecer suporte para uma variedade de aplicações que não podem ser suportados diretamente por outras redes sem fio, além de prover uma conectividade entre os nós da rede, com ou sem infraestrutura. As redes em malha vêm ganhando uma excelente aceitação no mercado, em diversos cenários e aplicações. Diversas empresas comerciais, centros de pesquisa e universidades desenvolvem e realizam pesquisas, mostrando o promissor mercado das WMNs para aplicações internas e externas (ROBERTAZZI, 2017). Nos cenários de aplicações mais comuns que se beneficiam das redes em malha temos (AKYILDIZ; WANG; WANG, 2005):

Figura 8: Cenário de redes domésticas de banda larga.



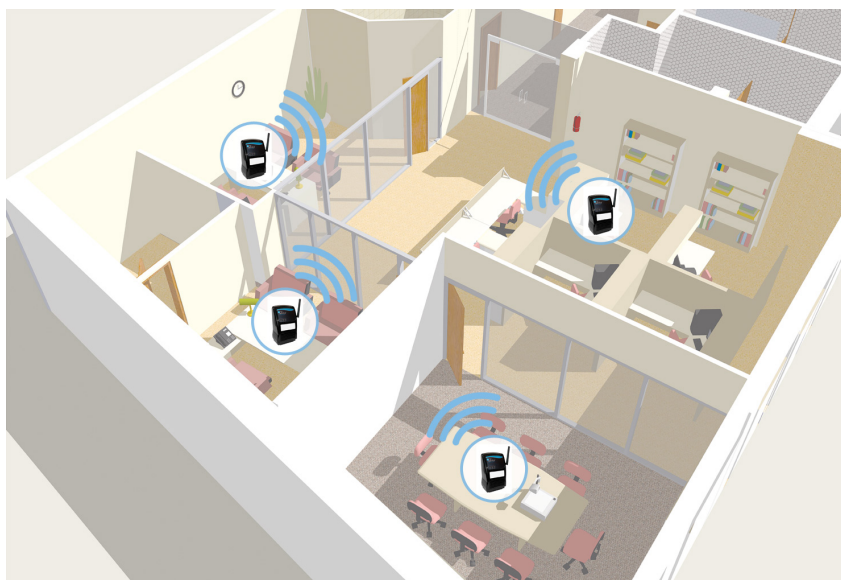
Fonte: (Devoló, 2017).

- **Rede doméstica de banda larga:** Geralmente, um único AP não abrange uma área maior, como uma casa inteira, devido à sua faixa de transmissão ser relativamente curta em ambientes internos. Além disso, os obstáculos no caminho podem reduzir a faixa de transmissão nesses locais. Para ampliar a cobertura sem fio, pode haver a necessidade de muitos pontos de acesso para o *backbone* o que tornaria inviável. A WMN é uma solução prática e eficaz para resolver a localização dos APs em uma rede doméstica. Como ilustrado na Figura 8, os

APs convencionais devem ser substituídos por roteadores de malha sem fio com conectividade de malha estabelecida entre eles, formando assim um *backbone* para ampliar a cobertura sem fio. Sendo assim, alterando as localizações dos roteadores de malha, ou então adicionando novos roteadores de malha na casa, pode facilmente eliminar zona sem cobertura de serviço.

- **Rede Empresarial:** Conforme mostrado na Figura 9, os edifícios empresariais geralmente consistem em vários andares e muitos escritórios que precisam ser interligados. Embora os edifícios modernos sejam geralmente construídos com suporte para redes com fio, quando a empresa cresce ou as tecnologias de rede evoluem, o cabeamento existente pode tornar-se insuficiente. Além disso, a implementação de redes cabeadas possui um custo muito elevado. As WMNs podem amenizar esses problemas. Em cenários empresariais, a rede de malha pode ser facilmente expandida instalando roteadores de malha adicionais e atualizar a rede simplesmente substituindo-os. O modelo de rede empresarial pode ser aplicado em outros cenários de rede de serviços, como *shopping centers*, hotéis, aeroportos, centros de convenções, feiras, estádios de esportes, cenários comerciais entre outros (AKYILDIZ; WANG; WANG, 2005).

Figura 9: Cenário de Rede Empresarial.

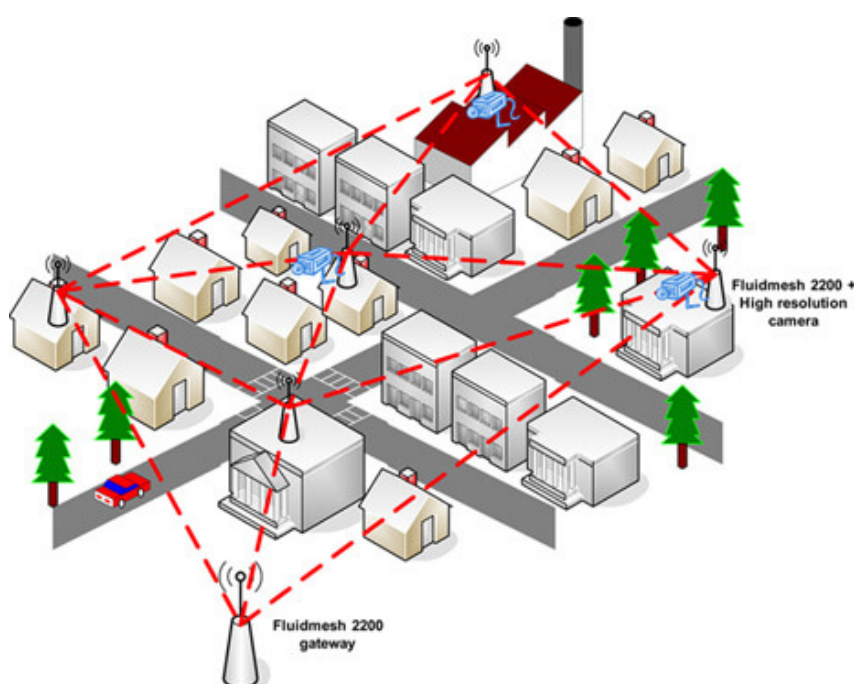


Fonte: (Metering, 2016).

- **Rede comunitária:** As redes comunitárias são destinadas a fornecer acesso à Internet para comunidades que possam compartilhar o mesmo enlace de acesso à Internet (AKYILDIZ; WANG; WANG, 2005). Neste cenário, os WMNs oferecem uma solução flexível e robusta para evitar congestionamentos de redes e falhas. As redes em malha incentiva o crescimento não planejado da rede e amplia o

acesso à Internet em áreas que não possuem infraestrutura de rede com fio, conforme mostrado na Figura 10. Embora o tráfego seja principalmente entre o MPP e os usuários finais (STAs), as WMNs também têm o potencial de aumentar a utilização dos recursos da rede dentro da comunidade. Por exemplo, permite o compartilhamento de informações sem usar a Internet, como armazenamento de arquivos distribuídos, acesso a arquivos distribuídos e transmissão de vídeo. Atualmente, as redes comunitárias de malha podem ser encontradas em todo o mundo, como em universidades e centros de pesquisa para fornecer acesso à Internet de banda larga, através da rede em malha que envolve o campus.

Figura 10: Cenário de Rede Comunitária.



Fonte: (Fluidmesh, 2017).

- **Sistemas de Transporte:** Atualmente, as agências governamentais e as empresas de transporte público tem despertado um interesse em soluções práticas de rede para sistemas de transporte inteligentes (KÜHLMORGEN; FESTAG; FETTWEIS, 2016). A principal ideia é implementar o gerenciamento de tráfego, bem como integrar sistemas de transporte público, como ônibus, trens, balsas, etc. As WMNs podem fornecer soluções de rede sem fio flexíveis para implementar o sistema de entrega de informações exigido. Com o uso de WMNs, é possível abordar e aliviar problemas de congestionamento de transporte, controlar a poluição e melhorar a segurança e segurança do transporte (LIN; WANG; MA, 2017).

Além dessas aplicações, as WMNs também podem ser aplicados para vários

outros propósitos, como comunicação peer-to-peer, redes espontâneas para desastres e emergências, no setor de segurança pública, em departamentos de bombeiros, policiais, primeiros socorros e serviços de emergência, nos sistemas médicos e de saúde, em sistemas de vigilância de segurança e redes de automação de edifícios (AKYILDIZ; WANG; WANG, 2005).

2.3 Protocolos de Roteamento para Redes em Malha sem Fio

Um protocolo de rede é similar a um protocolo de conversação humana, a diferença é que as entidades que trocam mensagens e realizam ações são componentes de hardware e software de algum dispositivo. Todas as comunicações em uma rede que envolvam duas ou mais entidades são realizadas por meio de um protocolo. Por exemplo, protocolos em roteadores determinam o caminho de um pacote da origem ao destino e, protocolos de controle de congestionamento em sistemas finais controlam a taxa com que os pacotes são transmitidos entre a origem e o destino. As trocas de mensagens e as ações realizadas quando mensagens são enviadas e recebidas são os elementos fundamentais para a definição de um protocolo. Basicamente, um protocolo define o formato e a ordem das mensagens trocadas entre duas ou mais entidades comunicantes, bem como as ações realizadas na transmissão ou no recebimento de uma mensagem ou outro evento. Em geral, todas as redes de computadores fazem uso intenso de protocolos, pois, diferentes tipos de protocolos são utilizados para realizar diferentes tarefas de comunicação (KUROSE; ROSS, 2016).

É na camada de rede onde são determinados os caminhos em que os pacotes de dados percorrerão entre a origem e o destino, utilizando-se de parâmetros como: número de saltos, que é a quantidade de nós que o pacote percorrerá até o destino; o estado das ligações, significa que cada roteador conhece o retardo das conexões para cada um dos seus vizinhos, ou uma estimativa deste retardo; e a Inundação, significa que o pacote é enviado a todos os demais nós, menos aquele que enviou o pacote.

O roteamento é um serviço em que o roteador avalia os possíveis caminhos que um pacote poderá percorrer até seu destino, e estabelece qual caminho este pacote deve seguir. O roteamento pode ser dividido em dois tipos: O roteamento direto, onde a comunicação entre dois nós ocorre de forma direta, pois, os nós estão em uma mesma rede física e, o roteamento indireto, onde a comunicação ocorre entre dois nós que não estão na mesma rede física, necessitando de um gateway entre os nós de origem e destino para a realização da comunicação (COMER, 2016).

Um algoritmo de roteamento é a parte do software da camada de rede responsável pela decisão sobre a linha de saída a ser usada na transmissão do pacote de entrada (TANENBAUM, 2011). Mesmo que as rotas sejam escolhidas independente-

mente para cada pacote ou apenas quando novas conexões são estabelecidas, certas propriedades são desejáveis em um algoritmo de roteamento:

- **Exatidão:** Escolher a melhor rota para um determinado pacote.
- **Simplicidade:** O algoritmo deve fornecer os serviços com o menor consumo de recursos possível.
- **Robustez:** Em uma rede de grande porte, espera-se que ela funcione continuamente durante anos sem apresentar falhas no sistema. No entanto, poderá ocorrer todos os tipos de falhas de hardware e software durante esse período. Os nós falharão repetidamente, e a topologia da rede sofrerá mudanças várias vezes. O algoritmo de roteamento deve ser capaz de tolerar as modificações de topologia e do tráfego de rede sem a necessidade de interromper todos os outros nós da rede.
- **Estabilidade:** Existem algoritmos que nunca convergem para um conjunto viável de rotas, independente do tempo em que são executados. Um algoritmo estável deve alcançar um ponto de equilíbrio e permanecer nesse estado. Portanto, ele deve convergir rapidamente, pois, a comunicação pode ser interrompida até que o algoritmo de roteamento tenha alcançado um ponto de equilíbrio.
- **Equidade:** A distribuição da carga deve ser de forma justa entre os nós da rede.
- **Eficiência:** Os algoritmos devem proporcionar o melhor caminho e de forma mais ágil possível.

Os algoritmos de roteamento podem ser agrupados em duas classes principais (TANENBAUM, 2011):

- **Algoritmos não adaptativos:** Esses algoritmos não tomam suas decisões de roteamento em medidas ou estimativas do tráfego e da topologia atual. A escolha da rota a ser utilizada é previamente calculada *off-line*, sendo transferida para os roteadores quando a rede é iniciada. Geralmente, esse procedimento é chamado de roteamento estático sendo mais útil para situações em que a escolha de rotas é óbvia.
- **Algoritmos adaptativos:** Já os adaptativos alteram as decisões de roteamento para refletir mudanças na topologia e no tráfego de rede. Esses algoritmos de roteamento dinâmico diferem no lugar em que obtêm suas informações, do momento em que alteram as rotas e da métrica utilizada na otimização.

Quando um algoritmo de roteamento é implementado, cada roteador precisa tomar decisões com base no conhecimento local. Uma simples técnica local é a de Inundação (*Flooding*), onde cada nó ao receber um pacote no qual ele não é o destino, envia a todos os outros nós menos para aquele que enviou o pacote. Porém, o algoritmo de inundação gera uma grande quantidade de pacotes duplicados e, portanto, o nó de destino poderá receber o mesmo pacote várias vezes. A técnica de inundação não é muito utilizada devido à essa quantidade de pacotes gerados, no entanto, para aplicações militares onde os nós podem ser facilmente danificados a característica de robustez desse algoritmo é bastante desejável (TANENBAUM, 2011).

Atualmente, as redes de computadores utilizam algoritmos de roteamento dinâmicos que são mais complexos que o de Inundação, porém, são mais eficientes, pois, descobrem os caminhos mais curtos para a topologia atual. Entre eles, dois algoritmos dinâmicos específicos se destacam, o **roteamento por vetor de distância** e o **roteamento de estado de enlace**.

Os algoritmos de roteamento por vetor de distância operam fazendo com que cada nó da rede mantenha uma tabela que forneça a melhor distância conhecida até cada destino e determine qual enlace deve ser utilizado para chegar até lá. Essas tabelas são atualizadas com a troca de mensagens com os nós vizinhos através da comparação da tabela recebida com a tabela atual, caso apresente uma melhor rota o nó atualiza sua tabela e armazena também a origem desta informação.

No entanto, este comportamento acarreta sobrecarga de informações de controle na rede, gerando um problema conhecido como **contagem ao infinito**, onde ao ser encontrada uma melhor rota esta informação é propagada rapidamente pela rede. Em relação às redes *ad-hoc* isso se torna um problema ainda maior, pois, os nós se movem de forma aleatória e não possuem topologias fixas.

O roteamento por vetor de distância foi utilizado na *Advanced Research Projects Agency Network* (ARPANET) até 1979, quando foi substituído pelo roteamento de estado de enlace (TANENBAUM, 2011). O problema principal que causou sua retirada foi que o algoritmo geralmente levava muito tempo para convergir (i. e., demorava no estabelecimento de rotas para os melhores caminhos pela rede). Consequentemente, ele foi substituído por um algoritmo inteiramente novo, chamado roteamento de estado de enlace.

Este algoritmo dinâmico surgiu com o propósito de solucionar o problema do roteamento por vetor de distância, visto que se utilizava o número de saltos até o destino, contudo, para um pacote chegar a um destino o mesmo poderá percorrer um caminho mais curto, ou seja, com poucos saltos. Porém, a largura de banda do enlace pode ser pequena, gerando um maior retardo na rede (TANENBAUM, 2011). Com isso o estado do enlace surgiu para encontrar rotas de forma eficiente, não se preocupando

somente com o número de saltos como também com as condições atuais em que a rede se encontra. A ideia por trás do roteamento de estado de enlace é simples e pode ser estabelecida em cinco partes:

1. Descobrir os nós vizinhos e obter seus endereços de rede.
2. Medir a distância ou o custo até cada um dos vizinhos.
3. Criar um pacote que informe tudo o que acabou de aprender.
4. Enviar esse pacote e receber os pacotes de todos os outros nós da rede.
5. Calcular o caminho mais curto até cada um dos outros nós da rede.

Desta forma, a topologia completa da rede é distribuída para todos os outros nós. Em seguida, o algoritmo *Dijkstra* pode ser utilizado para encontrar o caminho mais curto até cada um dos outros nós. Este algoritmo realiza uma análise dos dados obtidos após estes cinco passos para descobrir a melhor rota para um determinado pacote. A Tabela 3 mostra um comparativo entres os algoritmos de roteamento por vetor de distância e estado de enlace em relação aos fatores que eles utilizam para a criação e manutenção de suas tabelas de roteamento.

Tabela 3: Comparativo entres os algoritmos de roteamento por vetor de distância e estado de enlace.

Roteamento por Vetor de Distância	Roteamento de Estado de Enlace
Mantém a menor distância para o destino.	Mantém o melhor caminho para o destino.
A distância é medida pela quantidade de saltos até o destino.	A melhor rota é estabelecida com base no estado do enlace (taxa de entrega, vazão, atraso, etc).
Os nós vizinhos compartilham integralmente suas tabelas de roteamento com os demais nós da rede.	Os nós vizinhos compartilham o estado atual do enlace somente quando ocorre uma modificação em relação ao último compartilhamento.

Fonte: Elaborado pelo autor.

De uma forma geral, os protocolos de roteamento de redes em malha são divididos em três categorias: pró-ativos, reativos, e os híbridos. Os protocolos que pertencem à categoria dos pró-ativos exigem que cada nó mantenha todos os caminhos possíveis para os destinos, desta forma, caso haja necessidade de enviar um determinado pacote de dados basta utilizar as rotas que foram descobertas (SHIVAHARE et al., 2015). Na categoria dos protocolos reativos, os nós obtêm o caminho dos destinos sob demanda, por conseguinte, os protocolos reativos não trocam informações de roteamento periodicamente até que haja uma necessidade (DERHAMY; ELIAS-SON; DELSING, 2017). Por fim, os protocolos pertencentes à categoria dos híbridos,

combinam as características das duas abordagens anteriores (AGARWAL; BANSAL; SIDDIQUI, 2017).

2.3.1 Pró-ativos

Nos protocolos pró-ativos, cada nó na rede possui uma tabela de roteamento para realizar a transmissão dos pacotes de dados e para estabelecer conexão com outros nós da rede (AGARWAL; BANSAL; SIDDIQUI, 2017). Estes nós mantêm todos os caminhos que são descobertos para os destinos apresentados, além de manter o número de saltos necessários para chegar a cada destino na tabela de roteamento (SHIVAHARE et al., 2015). A entrada na tabela de roteamento é marcada com um número de sequência que é criado pelo nó de destino. Como exemplos de protocolos pró-ativos têm-se: OLSR, WRP (*Wireless Routing Protocol*) e B.A.T.M.A.N (*Better Approach to Mobile Ad-Hoc Networking*).

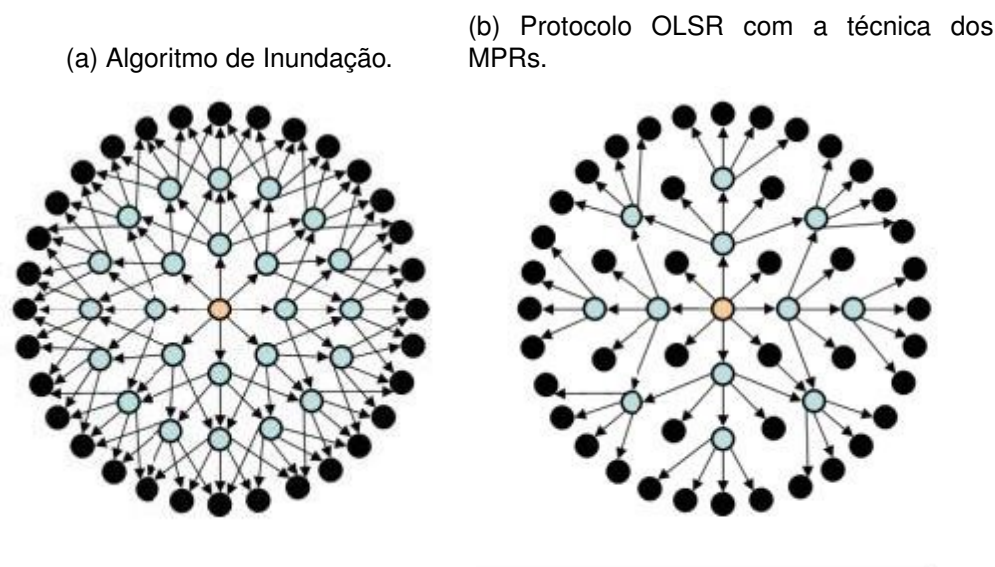
2.3.1.1 Optimized Link State Routing Protocol (OLSR)

O protocolo OLSR foi desenvolvido para uso em redes MANETs e redes em malha, basicamente é uma otimização do clássico algoritmo de estado de enlace adaptado aos requisitos de uma rede sem fio móvel (FERRONATO; TRENTIN, 2017). O conceito-chave usado no protocolo é o da técnica de Retransmissores Multiponto (*Multipoint Relays* - MPRs). Os MPRs são nós selecionados que encaminham e transmitem os pacotes de controle durante o processo de roteamento (RIVOIRARD et al., 2017). Sua principal funcionalidade é de retransmitir as informações de controle na rede. No protocolo OLSR, somente os MPRs são responsáveis por exercer o controle de tráfego na rede, portanto, os nós que não forem selecionados como MPR não poderão repassar as informações de controle adiante.

Como visto na Seção 2.3, quando um nó recebe pacotes de controle sobre o estado atual da rede, e retransmite essas informações para os seus vizinhos, esse mecanismo é conhecido como inundação. Desta forma, um nó pode receber o mesmo pacote dos seus vizinhos várias vezes gerando uma grande sobrecarga na rede, esse problema ainda é agravado pelo fato do OLSR ser um protocolo pró-ativo, ou seja, está sempre trocando informações. O objetivo dos MPR é minimizar esse problema através da seleção de nós que farão o processo de inundação. A Figura 11 mostra o funcionamento de uma rede através do algoritmo de inundação e do protocolo OLSR com a utilização da técnica do MPR, representado na Figura 11b pelos nós azuis.

No OLSR, a informação sobre o estado do enlace é gerada apenas por nós eleitos como MPRs. A técnica do MPR reduz consideravelmente a sobrecarga de

Figura 11: Comparativo entre o clássico algoritmo de inundação e a técnica dos MPRs empregada pelo protocolo OLSR.



Fonte: Elaborado pelo autor.

pacotes na rede em comparação com o mecanismo de inundação, reduz o número de pacotes de controle inundados na rede e, um MPR pode optar por relatar somente os enlaces entre ele e os seus vizinhos (RIVOIRARD et al., 2017). Portanto, ao contrário do algoritmo do estado de enlace, somente a informação parcial do estado atual dos enlaces são distribuídas na rede. O OLSR fornece ótimas rotas em termos de número de saltos. O protocolo é particularmente adequado para redes grandes e densas empregando a técnica de MPRs que funciona muito bem nesse contexto.

2.3.1.2 Wireless Routing Protocol (WRP)

O WRP é um protocolo baseado em tabela que mantém informações de roteamento entre todos os nós na rede. Este protocolo é baseado no algoritmo distribuído Bellman-Ford (MISRA, 2017). A principal vantagem do WRP é que ele reduz o número de *loops* de roteamento. Com este protocolo, cada nó em uma rede mantém quatro tabelas, da seguinte forma:

- **Tabela de distância:** que contém o destino, o próximo salto, a distância e os antecessores de cada destino e cada vizinho.
- **Tabela de roteamento:** que mantém o endereço de destino, o próximo salto, a distância, o antecessor e um marcador para cada destino, especificando se essa entrada corresponde a um caminho simples.

- **Tabela de custo de enlace:** que fornece o custo de enlace para cada vizinho e também o número de períodos de atualização decorridos desde que o nó recebeu qualquer mensagem sem erros.
- **Tabela de lista de transmissão de mensagens:** que registra quais atualizações em uma mensagem de atualização devem ser retransmitidas e quais vizinhos precisam reconhecer a retransmissão. A tabela fornece o número de sequência da mensagem de atualização, um contador de retransmissão, confirmações e uma lista de atualizações enviadas na mensagem de atualização.

Os nós devem enviar uma mensagem, incluindo a mensagem de atualização ou uma mensagem *HELLO* para seus vizinhos. Se um nó não tiver mensagem para enviar, ele deve enviar uma mensagem *HELLO* para garantir a conectividade. Se o nó de envio for novo, ele será adicionado à tabela de roteamento do nó e o nó atual enviará ao novo nó uma cópia do conteúdo da tabela de roteamento (MISRA, 2017).

Uma vez detectada uma alteração em uma rota, um nó envia a mensagem de atualização para seus vizinhos. Os nós vizinhos, em seguida, alteram as suas entradas e procuram novos caminhos possíveis através de outros nós (MISRA, 2017). Este protocolo evita o problema de contagem ao infinito presente na maioria dos protocolos de rede *ad hoc*. Este problema é resolvido fazendo com que cada nó execute verificações de consistência das informações relatadas por todos os seus vizinhos, a fim de remover o *loop* e fazer uma convergência de rota mais rápida na presença de qualquer enlace ou falha do nó.

2.3.1.3 *Better Approach to Mobile Ad-Hoc Networking (BATMAN)*

O BATMAN é um protocolo de roteamento para WMNs, com base no roteamento de vetor de distância. É um protocolo pró-ativo em que cada nó mantém uma tabela de roteamento contendo todos os possíveis saltos para os outros nós que formam a rede em malha (ANAS et al., 2015).

O protocolo usa a métrica de Qualidade de Transmissão (*Transmission Quality* - TQ) para encontrar um equilíbrio entre uma baixa contagem de saltos e enlaces estáveis. Cada nó transmite mensagens de *HELLO* (também chamadas de Mensagens de Origem (*Originator Messages* - OGM) em intervalos fixos para seus vizinhos (HERMANN; MEYER, 2016). Os nós medem a fração de mensagens de *HELLO* que recebem de um determinado vizinho. Esta fração é chamada de qualidade de recebimento (*Receive Quality* - RQ). Os remanescentes dos vizinhos receberam os OGMs para que os nós a mais de um salto de distância obtenham as informações sobre a existência de um nó. Cada nó apenas reúne OGMs que foram recebidos através do

vizinho com a melhor métrica para o remetente original da mensagem. Os nós medem a fração de seus próprios OGMs que são reenviados pelos vizinhos, conhecido como Qualidade de Eco (*Echo Quality* - EQ). Ao dividir o EQ pelo RQ, um nó pode estimar a fração de suas OGMs que são recebidas corretamente pelo vizinho, conhecido como TQ. Finalmente, as penalidades para enlaces assimétricos e o número de saltos são aplicadas para derivar o valor da métrica TQ (HERRMANN; MEYER, 2016).

Outras características do batman-adv incluem agregação OGM para reduzir a sobrecarga introduzida ao enviar muitos quadros pequenos, otimizações para aproveitar a disponibilidade de múltiplas interfaces e uma implementação de um subconjunto de Protocolo de Mensagens de Controle de Internet (*Internet Control Message Protocol* - ICMP) para camada de enlace.

2.3.2 Reativos

A fim de reduzir a sobrecarga do pacote de controle, foi proposto um protocolo de roteamento reativo. Com o algoritmo de roteamento reativo, um nó não precisa manter rotas para todos os outros nós constantemente, um nó só obtém o caminho quando necessário por meio do processo de descoberta de rotas entre os nós de interesse, buscando a utilização eficiente de recursos como energia e largura de banda. Como exemplos de protocolos reativos têm-se: DSR (*Dynamic Source Routing*), AODV (*Ad-Hoc On-Demand Distance Vector*) e TORA (*Temporally Ordered Routing Algorithm*).

2.3.2.1 Dynamic Source Routing (DSR)

O protocolo DSR é um protocolo de roteamento simples e eficiente projetado especificamente para uso em redes ad hoc sem fio de múltiplos saltos (RIVOIRARD et al., 2017). Utilizando o DSR, a rede é completamente auto-organizável e auto-configurável, não exigindo nenhuma infraestrutura ou administração de rede. Os nós da rede cooperam para encaminhar pacotes e permitir uma comunicação através de múltiplos saltos entre nós que não estão diretamente dentro da mesma faixa de transmissão sem fio. À medida que os nós na rede se movem ou se juntam ou saem da rede, assim como as condições de transmissão sem fio e fontes de interferência, todo o roteamento é determinado e mantido automaticamente pelo protocolo de roteamento DSR. Uma vez que o número ou a sequência do salto intermediário necessário para atingir qualquer destino pode mudar a qualquer momento, a topologia da rede resultante pode ser bastante rica e em rápida mudança.

O DSR foi projetado para ser um protocolo de roteamento que tivesse uma

baixa sobrecarga na rede, mas que conseguisse reagir rapidamente às mudanças na rede. O protocolo DSR fornece um serviço altamente reativo para ajudar a garantir a entrega bem-sucedida de pacotes de dados, apesar do movimento do nó ou outras mudanças nas condições da rede (RIVOIRARD et al., 2017).

O protocolo DSR é composto por dois mecanismos principais que funcionam em conjunto para permitir a descoberta e manutenção de rotas de origem na rede *ad hoc* (RIVOIRARD et al., 2017):

- **Descoberta de Rota:** é o mecanismo pelo qual um nó S que deseja enviar um pacote para um nó de destino D obtém uma rota de origem para D . A descoberta de rota é usada somente quando S tenta enviar um pacote para D e ainda não conhece uma rota para D .
- **A Manutenção da Rota:** é o mecanismo pelo qual um nó S seja capaz de detectar, ao usar uma rota de origem para D , caso a topologia da rede sofra uma mudança, de modo que não possa mais usar sua rota para D porque um enlace ao longo da rota não funciona mais. Quando a manutenção da rota indica que uma rota de origem está quebrada, S pode tentar usar qualquer outra rota que conheça o D , ou pode chamar a descoberta de rota novamente para encontrar uma nova rota para pacotes destinados para D . A manutenção da rota é usada somente quando S está realmente enviando pacotes para D .

No DSR, tanto a descoberta de rota quanto a manutenção da rota operam inteiramente no modo sob demanda. Em particular, o DSR não requer qualquer tipo de pacotes periódicos dentro da rede. Por exemplo, o DSR não usa nenhum anúncio de roteamento periódico, detecção de status do enlace ou pacotes de detecção de vizinhança e não depende dessas funções de quaisquer protocolos subjacentes na rede (ALI; KULKARNI, 2017). Este comportamento totalmente sob demanda e a falta de atividade periódica permitem que o número de pacotes sobrecarregados causados pelo DSR seja reduzido à zero, quando todos os nós estão aproximadamente estacionários um com o outro e todas as rotas necessárias para a comunicação atual já foram descobertas. À medida que os nós começam a se movimentar mais ou à medida que os padrões de comunicação mudam, a sobrecarga do pacote de roteamento do DSR escala automaticamente o que é necessário para rastrear as rotas atualmente em uso. As alterações de topologia de rede que não afetam rotas atualmente em uso são ignoradas e não causam reação do protocolo.

Todo o estado mantido pelo DSR é chamado de **estado suave** (*soft state*), na medida em que ocorra a perda de qualquer estado não interferirá com a operação correta do protocolo. Todo o estado é descoberto conforme necessário e pode ser

redescoberto, de forma fácil e rápida, se necessário após uma falha sem impacto significativo no protocolo. Esse uso de apenas um estado suave permite que o protocolo de roteamento seja muito robusto para problemas como perda ou atraso dos pacotes de roteamento ou falhas de nó (ALI; KULKARNI, 2017). Em particular, um nó no DSR que falha e reinicia pode se juntar facilmente à rede imediatamente após a reinicialização, se o nó falhado estiver envolvido no encaminhamento de pacotes para outros nós como um salto intermediário ao longo de uma ou mais rotas, o nó também pode retomar esse encaminhamento rapidamente após a reinicialização, sem provocar uma interrupção no protocolo de roteamento.

Em resposta a uma descoberta de rota, um nó pode aprender e armazenar várias rotas para qualquer destino. Esse suporte para várias rotas permite que a reação às mudanças de roteamento seja muito mais rápida, já que um nó com múltiplas rotas para um destino pode tentar outra rota armazenada se a rota atual em uso falhar. Este armazenamento de múltiplas rotas também evita a sobrecarga da necessidade de executar uma nova descoberta de rota cada vez que uma rota em uso quebra. O remetente de um pacote seleciona e controla a rota usada para seus próprios pacotes, que, juntamente com suporte para múltiplas rotas, também permite que os recursos como o balanceamento de carga sejam definidos. Além disso, todas as rotas utilizadas são facilmente garantidas sem *loop*, uma vez que o remetente pode evitar saltos duplicados nas rotas selecionadas (ALI; KULKARNI, 2017).

É possível que uma rede DSR interaja com outras redes externas. Tais redes externas podem, por exemplo, ser a Internet ou podem ser outras redes *ad hoc* encaminhadas com um protocolo de roteamento diferente do DSR. E também podem ser outras redes DSR tratadas como redes externas para melhorar a escalabilidade.

2.3.2.2 Ad-Hoc On-Demand Distance Vector (AODV)

O algoritmo AODV permite o dinamismo, auto-partida, roteamento de múltiplos saltos entre os nós que pretendam estabelecer e manter uma rede *ad hoc* (FERRO-NATO; TRENTIN, 2017). O AODV permite que os nós obtenham rotas rapidamente para novos destinos e não exige que os nós mantenham rotas para destinos que não estão em uma comunicação ativa. O AODV permite aos nós responderem às quebras de enlace e mudanças na topologia de rede em tempo ágil. A operação do AODV é livre de *loops* e, evita o problema de contagem ao infinito, como visto na Seção 2.3, pois, oferece convergência rápida quando a topologia da rede *ad hoc* muda. Quando os enlaces são quebrados, o AODV faz com que o conjunto de nós afetados seja notificado para que eles possam invalidar as rotas.

Uma característica particular do AODV é o uso de um número de sequência

do destino para cada entrada de rota (FERRONATO; TRENTIN, 2017). O número de sequência é criado pelo destino para ser incluído juntamente com qualquer outra informação de rota que ele envie aos nós solicitantes. O uso de números de sequência garante a liberdade de *loops* e é facilmente implementável. Dada a escolha entre duas rotas para um destino, um nó solicitante deve selecionar aquele com o maior número de sequência.

As Requisições de Rotas (*Route Requests* - RREQs), Respostas de Rotas (*Route Replies* - RREPs), e os Erros de Rota (*Route Errors* - RERRs) são os tipos de mensagens definidas pelo AODV. Quando uma rota é necessária para um novo destino, o nó transmite um RREQ para encontrar essa nova rota. Uma rota pode ser determinada quando o RREQ atinge o próprio destino, ou um nó intermediário com uma rota recém descoberta para esse destino. Considera-se que uma rota recém descoberta é uma rota válida para o destino se o número de sequência associado é pelo menos tão grande quanto o contido no RREQ (TIWARI; KAUR, 2017). Após atingir o destino, ou um nó intermediário, a rota é disponibilizada enviando um RREP ao nó que originou o RREQ. Cada nó que recebe a requisição armazena o caminho de volta para o nó de origem, de modo que o RREP possa ser enviado diretamente ao longo de um caminho para o nó de origem.

Os nós monitoram constantemente o *status* dos enlaces das rotas que estão ativas. Caso ocorra uma quebra de enlace em uma rota ativa, a falha é detectada, e uma mensagem RERR é usada para notificar os outros nós que ocorreu a perda desse enlace. A mensagem RERR indica que esses destinos não são mais acessíveis por meio do enlace quebrado. A fim de permitir este mecanismo de comunicação, cada nó mantém uma lista precursores, que contém o endereço para cada um dos seus vizinhos que são suscetíveis a serem utilizados como um próximo salto em direção a cada destino.

O protocolo de roteamento AODV trata do gerenciamento da tabela de rotas. As informações das tabelas de roteamento são mantidas até mesmo para as rotas de curta duração, já que são criadas para armazenar temporariamente os caminhos reversos aos nós que deram origem aos RREQs. O AODV usa os seguintes campos com cada entrada da tabela de rota (TIWARI; KAUR, 2017):

- Endereço do destino.
- Número de sequência de destino.
- Indicador de número de sequência válido.
- Outros indicadores de estado e roteamento (por exemplo, válido, inválido, reparável, sendo reparado).

- Interface.
- Número de saltos necessários para chegar ao destino.
- O próximo salto.
- Lista de Precursores.
- Tempo de vida da rota.

Gerenciar o número de sequência é crucial para evitar loops de roteamento, mesmo quando os enlaces são quebrados e um nó não seja mais acessível para fornecer suas próprias informações, como o seu número de sequência. Um destino torna-se inacessível quando um enlace quebra ou está desativado. Quando essas condições ocorrem, a rota é invalidada por operações envolvendo o número de sequência e marcando o estado de entrada da tabela de rota como inválido.

2.3.2.3 Temporally Ordered Routing Algorithm (TORA)

O Algoritmo TORA é um protocolo de roteamento altamente flexível, que foi adaptado para operar em redes MANETs. Essas redes são vistas como um conjunto de roteadores, que são livres para se mover de forma arbitrária (YADAV; GUPTA; SAKET, 2015). O estado dos enlaces de comunicação entre os roteadores, está em função de suas posições, níveis de potência de transmissão, padrões de antena, níveis de interferência, etc. A mobilidade dos roteadores e a variabilidade de outros fatores de conectividade resultam em uma rede com uma topologia potencialmente dinâmica e imprevisível. Os enlaces congestionados também são uma característica esperada dessas redes, pois, os enlaces sem fio possuem uma capacidade significativamente menor que os enlaces cabeados e, portanto, são mais propensos a congestionar. O protocolo TORA baseia-se na noção de que um algoritmo de roteamento adequado para operar neste cenário deve possuir as seguintes propriedades (YADAV; GUPTA; SAKET, 2015):

- Executar de forma distribuída.
- Fornecer rotas sem *loop*.
- Fornecer múltiplas rotas.
- Estabelecer rotas rapidamente.
- Minimizar a sobrecarga para economizar a largura de banda disponível e aumentar a escalabilidade.

O TORA foi projetado para minimizar a reação às mudanças topológicas. O conceito-chave do protocolo é que desacopla a geração de propagação de mensagens de controle potencialmente de grande alcance a partir da taxa de mudanças topológicas (ZIKRIA; NOSHEEN; KIM, 2015). A mensagem de controle normalmente é localizada em um conjunto muito pequeno de nós perto de onde ocorreu a mudança sem ter que recorrer a uma solução de roteamento dinâmico e hierárquico com sua complexidade. O TORA inclui um mecanismo secundário, que permite uma propagação de mensagens de controle de longo alcance como meio de otimização de rotas infrequente e verificação de rota de estado suave. Essa propagação ocorre periodicamente a uma taxa muito baixa e é independente da dinâmica da topologia da rede.

O protocolo TORA é distribuído onde os nós só precisam manter as informações sobre nós adjacentes (ou seja, o conhecimento de um salto). Com isso, garante que todas as rotas estejam livres de loop e geralmente fornece múltiplas rotas para qualquer par de origem / destino que exija uma rota. O TORA cria rapidamente um conjunto de rotas para um determinado destino somente quando desejado (ZIKRIA; NOSHEEN; KIM, 2015). Uma vez que várias rotas são tipicamente estabelecidas e uma única rota é suficiente, muitas mudanças topológicas não requerem nenhuma reação. Após as mudanças topológicas que exigem reação, o protocolo restabelece rapidamente rotas válidas. Esta capacidade de iniciar e reagir com pouca frequência serve para minimizar a sobrecarga de comunicação. Finalmente, no caso de uma partição na rede, o protocolo detecta a partição e apaga todas as rotas inválidas.

2.3.3 Híbridos

Os protocolos pertencentes à categoria dos híbridos possui tanto as características reativas quanto as proativas. Em geral, as características proativas são utilizadas em situações em que as conexões sofrem poucas mudanças. Por outro lado, em áreas com alta mobilidade, aplicam-se as características reativas. Nesse contexto, devido à combinação das duas características a rede pode alcançar um alto desempenho. Como exemplos de protocolos híbridos têm-se: ZRP (*Zone Routing Protocol*), FSR (*Fisheye State Routing*) e HWMP (*Hybrid Wireless Mesh Protocol*).

2.3.3.1 Zone Routing Protocol (ZRP)

O ZRP é uma estrutura de roteamento híbrida adequada para uma grande variedade de redes MANETs. Cada nó mantém as rotas de forma pró-ativa dentro de uma região local (referida como a zona de roteamento) (PRAKASH; SWAROOP, 2016). O conhecimento da topologia da zona de roteamento é alavancado pelo ZRP para melhorar a eficiência de um mecanismo de consulta / resposta de rotas global-

mente reativo. A manutenção pró-ativa das zonas de roteamento também ajuda a melhorar a qualidade das rotas descobertas, tornando-as mais robustas às mudanças na topologia da rede. O ZRP pode ser configurado para uma determinada rede por seleção adequada de um único parâmetro, o raio da zona de roteamento.

O Protocolo ZRP pode se adaptar a uma grande variedade de cenários de rede, ajustando o alcance das zonas de roteamento proativamente atualizadas dos nós. Grandes zonas de roteamento são preferidas quando a demanda por rotas é alta e onde a rede é constituída por muitos nós que se deslocam lentamente (ALI; DULAIMI; MAJEED, 2016). No caso extremo de uma rede com topologia fixa, o raio ideal da zona de roteamento seria infinitamente grande. Por outro lado, zonas de roteamento menores são apropriadas em situações onde a demanda de rotas é baixa e onde a rede é constituída por um pequeno número de nós que se movem rapidamente em relação aos outros.

Quando o ZRP está configurado corretamente para um cenário de rede específico, ele pode executar tão bem quanto seus protocolos constituintes puramente pró-ativos e reativos (KAUR; KAUR; MAHAJAN, 2016). Em situações em que o comportamento da rede varia em diferentes regiões, o desempenho ZRP pode ser ajustado individualmente na zona de roteamento de cada nó.

2.3.3.2 Fisheye State Routing (FSR)

O FSR é um algoritmo de roteamento para redes *ad hoc* que introduz a noção de escopo de vários níveis para reduzir a sobrecarga de atualização de roteamento em grandes redes (GOYAL, 2012). Um nó armazena o estado do enlace para cada destino na rede. Ele periodicamente transmite a atualização do estado do enlace de um destino para seus vizinhos com uma frequência que depende da distância do salto para esse destino (ou seja, o escopo relativo a esse destino). As atualizações de estado correspondentes a destinos distantes são propagadas com menor frequência do que as próximas aos destinos. A partir de atualizações de estado, os nós constroem o mapa da topologia de toda rede e calculam rotas eficientes. A rota na qual o pacote é encaminhado torna-se progressivamente mais precisa à medida que o pacote se aproxima do seu destino (GOYAL, 2012). O FSR se assemelha ao roteamento do estado de enlace, na medida em que propaga as atualizações do estado dos enlaces. No entanto, as atualizações são propagadas como agregados, periodicamente em vez de serem inundadas individualmente de cada fonte. O FSR leva a uma redução na sobrecarga do enlace causado pelas atualizações da tabela de roteamento. Além de melhorar a escalabilidade de grandes redes móveis *ad hoc*.

O protocolo de roteamento FSR é orientado por tabela, adaptado ao ambiente

ad hoc sem fio. Ele fornece uma estrutura de roteamento hierárquica implícita. Através da atualização de informações do estado de enlace com diferentes frequências, dependendo da distância do escopo, o FSR é bem escalável e mantém a sobrecarga baixa sem comprometer a precisão da rota quando o destino está próximo (GOYAL, 2012). A precisão de roteamento do FSR é comparável com um esquema do estado de enlace ideal. Ao reter uma entrada de roteamento para cada destino, o FSR evita o trabalho extra de encontrar o destino e, portanto, mantém uma baixa latência de transmissão de pacote. À medida que a mobilidade aumenta, as rotas para destinos remotos tornam-se menos precisas. No entanto, quando um pacote se aproxima do seu destino, ele encontra instruções de roteamento cada vez mais precisas à medida que entra em setores com uma taxa de atualização maior. Como resultado, o FSR é mais desejável para grandes redes móveis onde a mobilidade é alta e a largura de banda é baixa. Ao escolher o número adequado de níveis de escopo e tamanho de raio, o FSR prova ser uma solução flexível para o desafio de manter rotas precisas em redes *ad hoc*.

As seguintes propriedades do FSR destacam suas vantagens (SIVAKUMAR; CHELLIAH, 2012):

- Simplicidade.
- Uso de rotas mais recentes atualizadas.
- Robustez para acolher a mobilidade.
- Atualização de roteamento parcial do intercâmbio com os vizinhos.
- Tráfego de atualização de roteamento reduzido.

O FSR é o mais adequado para redes móveis *ad hoc* de grande escala, pois, o esquema de atualização do escopo tem maiores vantagens na redução do tamanho do pacote de atualização e na alta taxa de pacote de dados (SIVAKUMAR; CHELLIAH, 2012). Além disso, o fato de que o erro de rota é ponderado pela distância, obviamente, reduz a sensibilidade ao tamanho da rede. Também é adequado para redes sem fio de alta mobilidade. Isso ocorre porque em um ambiente de mobilidade, uma mudança em um enlace muito distante da fonte não causa necessariamente uma alteração na sua tabela de roteamento.

2.3.3.3 Hybrid Wireless Mesh Protocol (HWMP)

Em uma WMN, o protocolo de roteamento padrão é o HWMP. O HWMP é vulnerável a vários ataques de roteamento, como ataques de buraco de minhoca,

ataques de interrupção de roteamento, ataques de inundações, etc (RAMADHANI et al., 2016). Esses ataques são direcionados aos campos mutáveis das mensagens de roteamento trocadas neste protocolo que são alterados em cada nó intermediário e são propensos a modificação por nós maliciosos.

No HWMP, existem mensagens de roteamento que são usadas para encontrar uma rota de origem para destino. Esses quadros requerem mecanismos de segurança para evitar ataques externos e internos. Esquemas de criptografia de ponta a ponta podem ser empregados para prevenir ataques externos. O verdadeiro desafio em um WMN reside na prevenção de ataques internos. Essas mensagens contêm dois tipos de campos: mutáveis e não mutáveis. Os campos mutáveis são aqueles que se modificam em cada salto de sua jornada. Portanto, os campos mutáveis requerem autenticação em cada salto, a fim de evitar ataques de modificação ou eliminação (RAMADHANI et al., 2016). Isso pode ser conseguido empregando um método de autenticação, onde um vizinho de dois saltos verificará se o nó no salto anterior modificou ilegalmente o conteúdo da mensagem. Isso também assegurará que nenhum nó malicioso se represente como um nó legal e seja capaz de modificar o conteúdo da mensagem. Os campos não mutáveis não são modificados em cada salto da viagem. Portanto, uma autenticação de ponta a ponta utilizando um esquema de assinatura deve ser suficiente para evitar ataques externos.

O SHWMP (*Secure Hybrid Wireless Mesh Protocol*) é uma versão segura do HWMP que usa esquemas criptográficos para proteger as mensagens de roteamento fornecendo recursos de segurança de autenticação e integridade (IEEE 802.11s, 2011). Ele usa assinatura baseada em criptografia para proteger os campos não mutáveis e mutáveis do HWMP em uma WMN.

Quando um PREQ é gerado por um nó de origem, os campos não mutáveis do PREQ são assinados usando um esquema de assinatura e essa assinatura é incluída na mensagem (IEEE 802.11s, 2011). Uma vez que os campos não mutáveis não são modificados em cada salto, a autenticação do nó intermediário não é necessária e, portanto, o nó de origem assina os campos não mutáveis do PREQ, como endereços e números de sequência do nó de origem, tempo de vida, sinalizadores e números de salto.

Todo o PREQ é criptografado pelo nó de origem com uma chave compartilhada que é utilizada somente por seus vizinhos para descriptografar. O nó vizinho de um salto decodificará o PREQ gerado pelo nó de origem, incrementa a contagem de saltos, a métrica de atualizações e a métrica do nó anterior, e transmite criptografando o PREQ usando a chave secreta que compartilhou com seus vizinhos (IEEE 802.11s, 2011). Quando o nó atual retransmite o PREQ, ele alcança o vizinho que está há dois saltos do nó de origem. Este vizinho terá o segredo de transmissão conforme a

criptografia de transmissão e assim poderá acessá-lo. Somente o vizinho que está há dois saltos do criador do PREQ será capaz de descriptografar a mensagem.

Quando o nó de destino recebe um PREQ, ele envia o PREP para a fonte porque já conhece a rota para a origem. Caso um nó intermediário já tenha uma rota para o destino devido ao seu encontro anterior com um PREQ ou o PREP a partir do destino, ele pode gerar um PREP para ser enviado para ao nó de origem se o último número de sequência conhecido do destino no PREQ que acabou de receber é menor que o número de sequência do destino que o nó intermediário possui para aquela rota ([IEEE 802.11s, 2011](#)).

No caso de um nó encontrar um enlace quebrado, ele irá gerar uma mensagem de PERR para seu nó precursor informando a perda do enlace. Quando uma estação de malha está gerando e enviando mensagens de Anúncio de Portal (*Gate Announcement* - GANN) anunciando-se como o portal de malha, o anúncio é propagado na rede de forma semelhante a um PREQ. Portanto, o fluxo de mensagem de um GANN e de um Anúncio de Raiz (*Root Announcement* - RANN) é semelhante ao de um PREQ, exceto que não existe um destino definido no GANN / RANN porque é um anúncio para todos os nós de malha. O fluxo de mensagens de uma RANN é muito semelhante ao de uma GANN, exceto que nas mensagens RANN incluem uma métrica do nó anterior ([NATARAJU; MAHESHAPPA; DEVKATTE, 2016](#)).

2.4 Redes em Malha sem Fio Definidas por Software

Normalmente, um *backbone* de uma rede de malha sem fio (WMN) é constituída por nós sem fio dedicados chamados roteadores de malha, que são configurados em um modo ad hoc, com uma ou várias interfaces sem fio baseadas nas tecnologias IEEE 802.11 ([HUANG et al., 2015](#)). Esses roteadores de malha podem ser organizadas livremente em qualquer topologia de rede e se comunicam entre si, usando protocolos como o OLSR, BATMAN, AODV e o HWMP. No entanto, as WMNs tradicionais são difíceis de gerenciar e atualizar porque as configurações são feitas manualmente e são propensas a erros. Normalmente leva semanas ou mesmo meses para fornecer novos serviços, realizar testes e prover a garantia dos serviços. Além disso, os roteadores de malha funcionam de forma auto-organizada sem uma visão global, levando a uma fraca alocação de recursos de rede e um baixo desempenho, especialmente em redes de grande porte.

O SDN é um paradigma de rede promissor que simplifica significativamente o gerenciamento de rede ([HAQUE; ABU-GHAZALEH, 2016](#)). Ao desacoplar o plano de controle e o plano de dados, o SDN permite o controle flexível e a configuração de recursos dinâmicos com uma visão global de toda a rede. Desta forma, as polí-

ticas de rede (por exemplo, balanceamento de carga de tráfego da rede, controle de acesso e tolerância a falhas) podem ser facilmente realizadas, e novos serviços serão implantados de forma rápida e ágil.

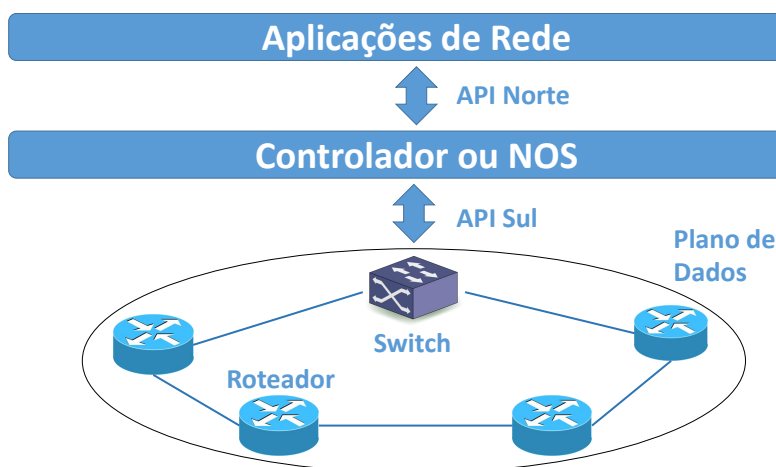
Por conseguinte, os recentes avanços nas SDNs têm viabilizado a programabilidade e a virtualização da rede, permitindo criar novas estratégias para roteamento e de realizar modificações da maneira tradicional em que funcionam as WMNs, como roteamento baseado em fluxos e engenharia de tráfego com políticas administrativas (BRITO, 2016). Dessa forma, a adoção do paradigma SDN no contexto de WMN pode alavancar e potencializar sua flexibilidade, capacidade e aplicabilidade em diversos contextos, como, por exemplo, o gerenciamento de mobilidade. A integração das arquiteturas de SDN e WMN, no entanto, impõe alguns desafios relevantes a serem investigados e tratados nesta seção.

2.4.1 Redes Definidas por Software (SDN)

O SDN foi concebido como o paradigma de rede da próxima geração (HUANG et al., 2015) que desacopla o plano de controle e o plano de dados, de modo que a parte lógica e complexa da rede não fique mais instalada em *switches* ou roteadores, mas em um controlador logicamente centralizado. Cada *switch*/roteador no plano de dados conduz o encaminhamento de dados de acordo com as regras instaladas pelo sistema operacional de rede centralizado. Cada regra pode ser expressa sob a forma de (*Correspondência, Ação*), onde o campo *Correspondência* é usado para coincidir com o cabeçalho do pacote de um fluxo de tráfego. Se uma (*Correspondência: {ip, nw-src = 10.0.0.1, nw-dst = 10.0.0.2}* , *Ação = saída: 3*) regra for correspondida, são executadas as ações especificadas no campo de *Ação*. Por exemplo, uma regra significa que os pacotes de um hospedeiro com endereço 10.0.0.1 para um destino com endereço 10.0.0.2 será encaminhado para a porta de saída 3 do *switch*/roteador.

Diferente da rede convencional, o encaminhamento de pacotes é baseado em fluxos em vez de pacotes. Nas SDNs, a abstração de fluxo é independente e pode acomodar várias tecnologias de hardware na rede. O controlador logicamente centralizado, também chamado de Sistema Operacional de Rede (*Network Operating System - NOS*), executa o gerenciamento e controle de rede, dada uma visão global da rede. As aplicações de rede podem ser escritas em cima do NOS, como mostra a Figura 12, permitindo suportar a programação e alcançar o gerenciamento flexível da rede, além da reconfiguração e a evolução do protocolo. Por exemplo, ao adicionar uma nova funcionalidade de rede requer uma nova aplicação em cima do NOS, evitando a necessidade de instalar um hardware novo e caro para suportar a nova funcionalidade conforme exigido nas redes convencionais.

Figura 12: Arquitetura de Rede Definida por Software.



Fonte: (HAQUE; ABU-GHAZALEH, 2016).

A arquitetura geral das redes baseadas em SDN é representada na Figura 12. Os padrões SDN definem as Interfaces de Programação de Aplicação (*Application Programming Interfaces* - APIs) entre as aplicações de rede, o plano de controle e o plano de dados. Mais especificamente, a API norte é implantada entre as aplicações de rede e o controlador, enquanto que a API sul carrega regras de controle do controlador para as entidades do plano de dados.

OpenFlow é um exemplo de uma interface padrão entre o controle e o plano de dados. É um protocolo aberto que permite a programação das tabelas de encaminhamento de pacotes (tabelas de fluxo) em *switches* compatíveis com OpenFlow para gerenciar os recursos da rede. Um *switch* OpenFlow consiste em uma tabela de fluxo (um conjunto de regras com ações associadas), um canal seguro para se conectar a um controlador associado e o protocolo OpenFlow para configurar e atualizar sua tabela de fluxo pelo controlador.

Os *switches* OpenFlow não possuem funcionalidades de tomada de decisão em pacotes. Em vez disso, essas responsabilidades são assumidas pelo controlador. Esses *switches* realizam tarefas de plano de dados, como encaminhamento ou descarte de pacotes com base na política especificada na tabela de fluxo. Eles podem coexistir com *switches* e roteadores habilitados para o protocolo OpenFlow. Quando um switch habilitado com OpenFlow recebe um pacote, esse pacote é comparado com a tabela de fluxo armazenada para realizar ações como encaminhar (para uma porta específica ou controlador), descartar ou modificar. Se nenhuma correspondência for encontrada, um pacote de controle é enviado ao controlador para as ações apropriadas.

O controlador pode instalar as entradas de fluxo de forma reativa após receber

uma solicitação, proativamente antes de receber qualquer solicitação ou uma combinação de ambos. O controlador reúne informações de estado da rede e topologia dos elementos do plano de dados para tomar uma decisão apropriada. Um canal de controle seguro é estabelecido fora de banda entre os dois planos para realizar esta troca de pacotes de controle. No entanto, o desempenho da arquitetura baseada em OpenFlow depende do tempo de configuração do fluxo. Os controladores baseados em OpenFlow incluem NOX, POX, *Beacon*, *Floodlight* e *OpenDaylight*.

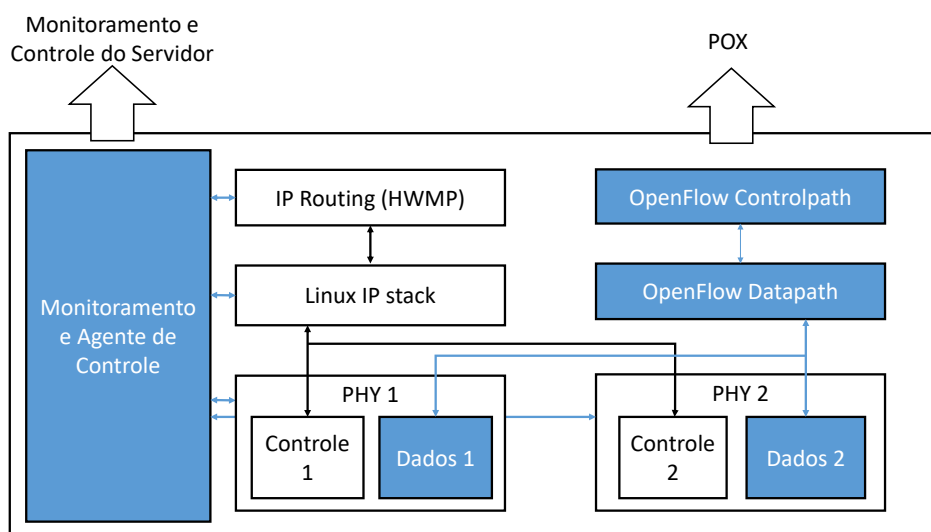
O OpenFlow é uma implementação de código aberto do paradigma de SDN, o protocolo atraiu muita atenção da indústria e da academia. Um grupo de grandes empresas, incluindo o Google, a Microsoft, o Facebook, a Cisco e a AT & T, mostraram um grande interesse no OpenFlow e formaram a *Open Networking Foundation* (ONF) (HUANG et al., 2015) para padronizar os protocolos OpenFlow. Em uma rede OpenFlow, o controlador se comunica periodicamente com todos os *switches* dominados através de canais seguros para obter informações de rede. Com uma visão global da rede, o controlador ajusta dinamicamente as regras de encaminhamento em *switches* para implementar políticas de gerenciamento.

2.4.2 Integração entre Redes em Malha sem Fio e SDN

Por padrão um *switch* ou roteador consiste em vários elementos firmemente interligados que controlam o encaminhamento dos pacotes no plano de dados, como também no controle das tabelas de encaminhamento no plano de controle. Isso torna os comutadores complexos e difíceis de ampliá-los com novas funcionalidades. O OpenFlow resolve esse problema separando o plano de controle e de dados. O plano de controle deixa de fazer parte apenas do comutador e passa a ser implementado parcialmente em um servidor remoto que executa um sistema operacional de rede (AL-SHABIBI, 2017). O plano de dados é abstraído como um fluxo, e para cada tipo de fluxo contém um conjunto de regras para o processamento. Além disso, o OpenFlow define um protocolo e um canal seguro entre o plano de dados e o Sistema Operacional de Rede.

Na arquitetura utilizada neste trabalho, a rede de malha consiste em roteadores de malha sem fio com OpenFlow habilitado (como mostra a Figura 13) e gateway de malha. Cada nó é equipado com duas interfaces de rede sem fio para implementar as redes em malha com múltiplas interfaces e múltiplos canais para aumentar seu desempenho e capacidade (OLIVEIRA; THEOLEYRE; DUDA, 2012). Cada interface sem fio é dividida em duas interfaces virtuais. Uma interface virtual é usada para o tráfego de controle e a outra para o tráfego de dados. A conectividade entre as interfaces virtuais de controle são habilitadas com o protocolo de roteamento em malha HWMP

Figura 13: Arquitetura de um Nó da Rede em Malha OpenFlow.



Fonte: (DELY; KASSLER; BAYER, 2011).

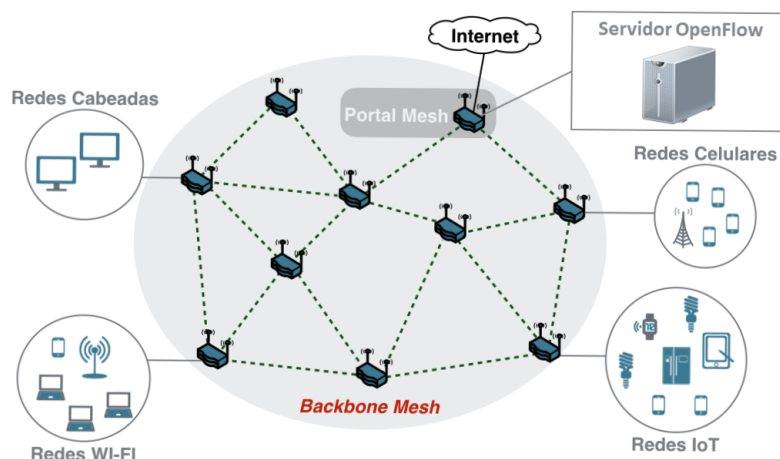
e as interfaces virtuais de dados estão conectadas ao caminho de dados OpenFlow. A conectividade para fora da malha é obtida através de um ou mais *gateways* dentro do alcance de cada nó. Além disso, um agente de monitoração reside em cada nó da malha. Esse agente pode ser consultado para fornecer informações de monitoramento sobre a qualidade da ligação e sobre a utilização do canal.

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 OpenFlow consiste em um servidor controlador e um *backbone* de roteadores em malha que fornece uma grande cobertura, conectividade e robustez à rede. A Figura 14 ilustra uma WMN controlada por OpenFlow, 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 de malha 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 de malha. Vale ressaltar que os roteadores de malha 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 de malha também podem atuar como portais em direção à Internet (Portal da Malha

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).

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



Fonte: Elaborado pelo autor.

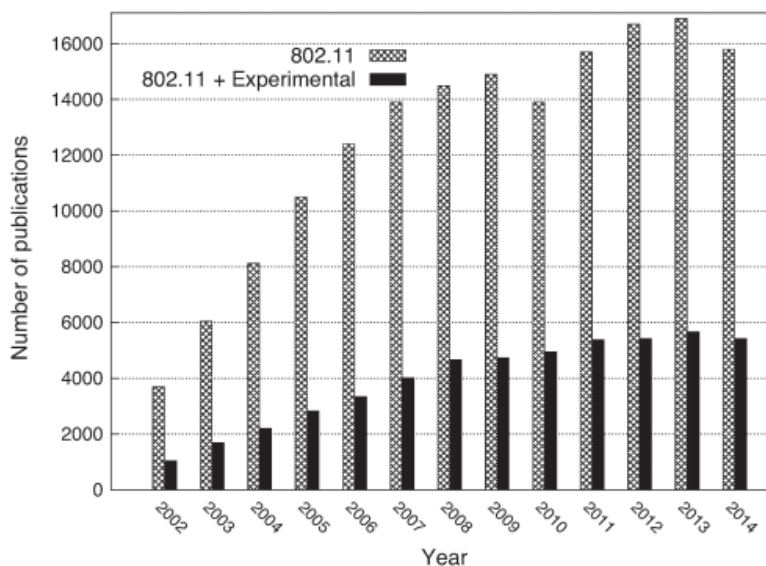
Uma WMN envolve, portanto, um conjunto de características desafiadoras, como a interoperabilidade das diferentes tecnologias de rede (AVELAR et al., 2015; ISLAM et al., 2016). Neste artigo, o foco é nas questões centradas nos roteadores em malha, ou seja, no *backbone* IEEE 802.11. Nele, os dados são 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 uma 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 de malha 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 da Malha. 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.

2.5 Trabalhos Relacionados

A enorme adoção das tecnologias 802.11 desencadeou uma grande quantidade de trabalhos de pesquisa orientados experimentalmente. Esses trabalhos variam de análise de desempenho para aprimoramentos de protocolo, incluindo a proposta de novos aplicativos e serviços. Devido à acessibilidade da tecnologia, a pesquisa experimental de (SERRANO et al., 2015) é tipicamente baseada em dispositivos comercialmente disponíveis (*Commercial off-the-shelf - COTS*) e, dada a taxa em que o 802.11 lança novos padrões (que são adotados em dispositivos novos e acessíveis), é provável que esse campo de estudo continue a produzir novos resultados. Neste trabalho, os autores revisam e categorizam os trabalhos mais relevantes realizados com os dispositivos 802.11 COTS nos últimos 15 anos, para apresentar as áreas que mais atraíram a atenção até agora, através de uma taxonomia que distingue entre estudos de desempenho, melhorias, serviços e metodologia. Desta forma, os autores fornecem uma rápida visão geral dos resultados alcançados pela comunidade de pesquisa que permite identificar áreas de grande potencial para realizar novas pesquisas.

Figura 15: Número de contribuições científicas por ano.



Fonte: (SERRANO et al., 2015).

Uma característica particular da pesquisa de (SERRANO et al., 2015) é a quantidade de trabalhos realizados através da experimentação com dispositivos em ambiente real. Na verdade, dada a ampla disponibilidade desta tecnologia e o pequeno custo dos dispositivos, muitos pesquisadores basearam suas descobertas em dispositivos COTS. Os autores ilustraram isso na Figura 15, com o termo de pesquisa "802.11 + Experimental". De acordo com esses resultados, em média 27% das con-

tribuições científicas foram baseadas na experimentação, mostrando uma tendência semelhante em termos de resultados globais.

Dentre os tipos de redes 802.11 analisadas, destacam-se alguns estudos relevantes em *testbeds* em redes em malha como a RoofNet do Instituto de Tecnologia de Massachusetts (*Massachusetts Institute of Technology* - MIT) (BICKET et al., 2005). Este trabalho avalia a capacidade de uma arquitetura de malha sem fio para fornecer acesso à Internet de alto desempenho enquanto exige um pequeno planejamento de implantação ou gerenciamento operacional. A arquitetura considerada neste trabalho propõe a colocação dos nós de forma não planejada e roteamento de múltiplos saltos. Segundo os autores, essas decisões de projeto contribuem para a facilidade de implantação, um requisito importante para as redes sem fio comunitária. No entanto, esta arquitetura comporta o risco de que a falta de planejamento possa tornar baixo o desempenho da rede. Por exemplo, pode ser necessário colocar os nós cuidadosamente para garantir a conectividade; Ou a ineficiência do encaminhamento de múltiplos saltos pode deixar alguns usuários desconectados efetivamente.

O trabalho proposto por (BICKET et al., 2005), avalia esta arquitetura de malha não planejada com um estudo de caso da rede de malha 802.11b. A Roofnet consiste em 37 nós espalhados por quatro quilômetros quadrados de uma área urbana. A rede fornece aos usuários um desempenho utilizável, apesar da falta de planejamento: a taxa média entre os nós é de 627 kbits / segundo, embora a rota média tenha três saltos. A proposta avalia vários aspectos da arquitetura: o efeito da densidade do nó na conectividade e na taxa de transferência; E as características dos enlaces que o protocolo de roteamento elege para usar.

As WMNs levantaram um grande interesse tanto na academia como na indústria, graças à sua flexibilidade, baixo custo e características de implantação fáceis. O MobiMESH do Politécnico de Milano (CAPONE et al., 2007) é uma implementação WMN que fornece uma estrutura completa para analisar, estudar e testar o comportamento de uma rede de malha em um cenário de ambiente real. O MobiMESH inclui suporte de mobilidade contínua para clientes de malha, roteamento aprimorado com alto desempenho de interface, atribuição de canal, bem como plataformas de provisionamento, gerenciamento, monitoramento e segurança.

As comunicações veiculares estão se tornando uma realidade sob o impulso de maiores requisitos de segurança de transporte e investimentos enormes de vários atores no campo como fabricantes de automóveis e Autoridades de Transportes Públicos. Como consequência, os blocos de construção da grade veicular (Interfaces sem fio, Pontos de Acesso, espectro, padrões, etc.) entrarão em breve permitindo uma ampla gama de aplicações que vão desde sistemas automáticos de segurança, transporte inteligente, entretenimento, detecção urbana E proteção ambiental / mo-

nitoramento. O C-Vet de (CESANA et al., 2010), tem um olhar visionário sobre a grade veicular e argumenta que a cooperação de comunicações ad-hoc de veículo-para-veículo e infraestrutura rodoviária é fundamental para ampliar as aplicações suportadas. O autor descreve ainda as atividades realizadas na UCLA para implantar um banco de teste aberto integrando comunicações ad hoc veículo-para-veículo e um *backbone* de malha sem fio baseado em soluções de hardware / software do Mobi-MESH.

Segundo (SAADE et al., 2007), apesar do Brasil ser o primeiro país da América Latina e o quinto no mundo em números de usuários da Internet, ele é o quarto na América Latina e o sexagésimo segundo no mundo considerando o percentual da população que usa a rede. Entre os motivos desta pouca popularização da rede é o alto custo da última milha, mesmo para acessos discados. O trabalho proposto por (SAADE et al., 2007) usa as redes em malha sem fio como solução para o problema da popularização do acesso à Internet em várias comunidades brasileiras. O projeto ReMesh, é uma solução de redes em malha de baixo custo desenvolvida pela Universidade Federal Fluminense (UFF), utilizando os roteadores WRT54G da Linksys, com tecnologia 802.11g. Em relação ao protocolo de roteamento, o projeto ReMesh utiliza o protocolo pró-ativo OLSR, propondo uma métrica alternativa para calcular a qualidade de um dado caminho com o objetivo de selecionar a rota com a menor probabilidade de perda de pacotes, chamada de OLSR-ML.

Neste trabalho, é realizado um estudo comparativo e uma avaliação de desempenho dos principais protocolos de roteamento para as redes em malha em relação ao paradigma de SDN com o protocolo OpenFlow. A fim de construir uma visão conceitual sobre os algoritmos dos protocolos de roteamento de diferentes tipos e as técnicas de otimização de caminho, alguns estudos de caso estão sendo descritos neste trabalho para uma visão geral sobre os protocolos de roteamento Pró-ativos, Reativos e Híbridos e algumas técnicas de otimização.

Segundo (JANA; SINGHA; SINGHA, 2016), os recursos limitados em MANETs fizeram a concepção de uma estratégia de roteamento eficiente e confiável um problema muito importante. É necessária uma estratégia de roteamento inteligente para usar eficientemente os recursos limitados e, ao mesmo tempo, ser adaptável às condições de rede em mudança, tais como: tamanho da rede, densidade do tráfego e partição da rede. Paralelamente, o protocolo de roteamento pode precisar fornecer diferentes níveis de QoS para diferentes tipos de aplicativos e usuários.

As MANETs permitem a computação ubíqua com ampla disponibilidade de dispositivos móveis inteligentes e aplicativos. No entanto, protocolos robustos e leves ainda não foram implementados para comunicação de múltiplos saltos (SOORIYAA-RACHCHI; FERNANDO; GAMAGE, 2015). O último padrão IEEE 802.11 lançado em

2012 captura o conceito de MANETs em múltiplos saltos nas WMNs e propõe o protocolo híbrido HWMP como o protocolo padrão de seleção de caminho de múltiplos saltos. Estudos anteriores sobre o desempenho do HWMP não abordaram os cenários operacionais da mobilidade em massa (para modelar a mobilidade de usuários), a não disponibilidade de nós raiz (para ausência de modelos de suporte de infraestrutura) e uma ampla extensão de densidades de nós (para modelar diferentes cenários de aplicativos) (SOORIYAARACHCHI; FERNANDO; GAMAGE, 2015). O trabalho proposto analisa a escalabilidade do HWMP em um MANET de estações de malha sem fio padrão IEEE 802.11 que se movem a velocidades de caminhada humanas. O atraso fim-a-fim, a taxa de entrega de pacotes de dados e a sobrecarga de controle de seleção de caminho são avaliados na presença de modelos aleatórios de movimentação em massa para aumentar a densidade dos nós. Os resultados da simulação mostram que não há variações significativas em nenhuma das métricas de desempenho entre movimentos estáticos, movimentos aleatórios e modelos de mobilidade em massa. Além disso, HWMP mostra quase um perfil de controle de seleção de caminho linear para aumentar a densidade de nós enquanto a taxa de entrega de pacotes e o atraso de fim-a-fim atingem um nível constante à medida que a densidade de nós aumenta até cerca de 250 nós.

Também é importante destacar o esforço de diversos estudos práticos da NASA com foco na área de redes em malha sem fio como uma tecnologia-chave para a exploração espacial humana e robótica, já que as WMN permitem o rápido desenvolvimento e cobertura de regiões não desenvolvidas. O trabalho (DECRISTOFARO; LANSLOWNE; SCHLESINGER, 2014) explora várias opções para a construção e implantação de WMN compostas por dispositivos COTS heterogêneos com firmware open-source (i.e. OpenWRT e DD-WRT). É apresentada uma análise de experimentos com roteadores TP-Link WR1043ND em ambientes de múltiplos saltos interno (*indoor*) e externo (*outdoor*). Os roteadores possuíam apenas uma interface configurada em um único canal. Desta forma, houve a necessidade de conectar um par de nós por cabo para compartilhar suas interfaces de rede sem fio e conseguir utilizar os múltiplos canais. Apesar da solução adotar múltiplas antenas, percebeu-se que múltiplas interfaces poderiam melhorar significativamente o desempenho da rede proposta.

Segundo (SEITHER; KÖNIG; HOLLICK, 2011), o desempenho de WMNs em condições realistas não é bem entendido. Devido a grande quantidade de parâmetros para essas redes, avaliações de desempenho abrangentes são inviáveis. Neste trabalho, os autores seguiram uma abordagem prática e realizaram uma pesquisa direta e detalhada do estado atual do protocolo BATMAN em um ambiente de escritório realista, usando o protocolo AODV cuidadosamente estudado como uma linha de base. Em particular, os autores estudaram a acessibilidade, perda de pacotes, atraso e vazão da rede. E identificaram os principais parâmetros que influenciam o desempenho

do roteamento e demonstram os modos de falha dos protocolos estudados.

A WMN propõe uma arquitetura descentralizada para o estabelecimento de comunicações sem fio de múltiplos saltos. A arquitetura descentralizada traz benefícios como facilidade de implantação e manutenção, escalabilidade e confiabilidade. No entanto, as redes de malha sem fio carecem de serviços de alto nível, como controle de transferência e mobilização ou controle de admissão (CHUNG et al., 2013). O OpenFlow é uma interface para controlar remotamente a tabela de fluxo de *switches*, roteadores e pontos de acesso. O protocolo OpenFlow separa o plano de controle e o plano de dados dos dispositivos de rede, propondo uma arquitetura centralizada para controlar o encaminhamento de pacotes de dados. Além disso, oferece uma estrutura para o desenvolvimento de serviços de alto nível através da rede. A combinação desta solução com as características das redes de malha sem fio permite um melhor desempenho, através do uso de serviços de alto nível. No entanto, apresenta desafios em relação à oposição entre o controle centralizado do OpenFlow e a arquitetura distribuída das redes de redes sem fio. O trabalho apresentado por (CHUNG et al., 2013), expõe algumas experiências de implantação de um controlador OpenFlow em uma rede de malha sem fio com base no padrão 802.11s. Como resultado, é proposto aplicações usando o OpenFlow através de uma rede de malha sem fio.

O desacoplamento de dados e planos de controle de *switches* de rede é a principal característica das redes definidas pelo software. O protocolo OpenFlow implementa este conceito e é encontrado hoje em vários equipamentos disponíveis. Apesar de ser amplamente empregado na indústria e na pesquisa, não há avaliação sistemática do desempenho do plano de dados na literatura do OpenFlow (COSTA et al., 2017). O trabalho de (COSTA et al., 2017), avalia o desempenho e a maturidade dos principais recursos do OpenFlow 1.0 em nove *switches*. Os resultados mostram que o desempenho varia significativamente entre as implementações. Por exemplo, os atrasos nos pacotes variam de acordo com uma ordem de grandeza entre os *switches* avaliados, enquanto o tamanho do pacote não afeta o desempenho dos *switches*.

O trabalho de (DELY; KASSLER; BAYER, 2011) propõe uma arquitetura que integra o OpenFlow com WMNs e fornece recursos de roteamento e encaminhamento baseados em fluxo. Para demonstrar a viabilidade da abordagem baseada em OpenFlow, foi implementada uma solução simples para resolver o problema da mobilidade de clientes em um WMN que trata da migração rápida de endereços de cliente (por exemplo, endereços IP) entre pontos de acesso em malha e a interação com o reencaaminhamento sem a necessidade de tunelamento. Medições demonstram a viabilidade da abordagem com base na avaliação do desempenho de encaminhamento, controle de tráfego e tempo de ativação de regra.

O OpenWiMesh apresentando em (BRITO et al., 2014), é um *framework* que

integra SDN, mais precisamente Openflow, em redes em malha sem fio, com sinalização dentro da banda (*in-band*), e que permite experimentar diversas técnicas de engenharia de tráfego para melhorar a utilização da rede. Seus principais componentes e estratégias de controle da WMN, que foram adotadas a fim de construir uma rede flexível e eficiente. A flexibilidade da rede visa viabilizar a adoção de diversas técnicas de roteamento e engenharia de tráfego, dando maior versatilidade e programabilidade à rede. De forma complementar, a eficiência da rede torna factível sua implantação em ambientes reais. Em particular, neste trabalho a eficiência da rede diz respeito ao consumo de recursos (redes paralelas para controle e dados) e desempenho de encaminhamento. Exemplos de aplicações implementadas e avaliadas com emulação demonstram a viabilidade e potencial de uso do *framework*.

Embora existam diversos trabalhos que envolvam análise de protocolos, poucos são realizados em ambientes reais conforme apresentado no trabalho de citeSerano:2015. Neste presente trabalho é apresentado uma análise de desempenho em um cenário real de redes em malha sem fio com múltiplas interfaces e múltiplos canais, com equipamentos de baixo custo (COTS) e software livre instalado. Para os experimentos realizados na rede em malha em estudo, foram selecionados apenas quatro protocolos de roteamento de cada tipo, sendo eles o protocolo pró-ativo B.A.T.M.A.N, o reativo AODV, o híbrido HWMP e o protocolo OpenFlow introduzindo o conceito de SDN. Os resultados dos experimentos são de fundamental importância para entender finamente o comportamento destas redes em determinadas situações e condições, além de contribuir para o futuro das redes sem fio.

3 Proposta

Esta seção descreve a metodologia experimental empregada na avaliação de desempenho da rede em malha, bem como os resultados que foram obtidos. São apresentados os componentes de rede dos cenários de avaliação, bem como as principais entidades de software responsáveis pelo gerenciamento, controle e adaptação da comunicação entre as camadas. O propósito deste trabalho é avaliar e apontar tanto as melhorias de software, como o impacto da escolha do protocolo de roteamento, quanto ao hardware em termos de configuração dos dispositivos. Além de delinear e discutir as peculiaridades de uma WMN de múltiplas interfaces com dispositivos heterogêneos de baixo custo e com software aberto.

Neste trabalho, a avaliação visa mensurar o desempenho dos protocolos de roteamento que podem ser utilizados nas WMNs. Os protocolos utilizados para realizar os experimentos são: O protocolo pró-ativo B.A.T.M.A.N, o protocolo reativo AODV, o híbrido HWMP e a introdução do conceito de SDN com o protocolo OpenFlow (descritos no Capítulo 2).

Para realizar o objetivo do trabalho que é a análise de desempenho dos protocolos de roteamento, os resultados obtidos nos experimentos como vazão, taxa de entrega, *jitter* e o número de pacotes perdidos são levados em consideração na análise de desempenho. Por meio desses resultados (amostras), os pontos dos gráficos são obtidos com os cálculos de média aritmética, intervalo de confiança, variância e desvio padrão de cada um dos resultados listados. As equações utilizadas neste trabalho são descritas a seguir:

- **Média aritmética:** em matemática e estatísticas, a média aritmética é a soma de uma coleção de números dividida pela quantidade de números na coleção. A coleção é muitas vezes um conjunto de resultados de uma experiência ou um conjunto de resultados de uma pesquisa. Neste trabalho, é a média aritmética que mostra o ponto central das amostras obtidas nos experimentos por meio da seguinte equação:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3.1)$$

- **Variância:** na teoria da probabilidade e estatísticas, a variância é a expectativa do desvio quadrático de uma variável aleatória de sua média. Informalmente, ele mede o quão longe um conjunto de números (aleatórios) são espalhados do seu valor médio. Ou seja, é uma medida de dispersão que indica o afastamento das

amostras, em relação à média aritmética, essa medida é descrita pela seguinte equação:

$$s^2(X) = \frac{\sum (x_i - \bar{X})^2}{n - 1} \quad (3.2)$$

- **Desvio padrão:** em estatísticas, o desvio padrão é uma medida que é usada para quantificar a quantidade de variação ou dispersão de um conjunto de valores de dados. Um desvio padrão baixo indica que os pontos de dados tendem a ser próximos da média (também chamado de valor esperado) do conjunto, enquanto um alto desvio padrão indica que os pontos de dados estão espalhados por uma ampla gama de valores. Esta medida pode ser obtida pela seguinte equação:

$$s(x) = \sqrt{s^2(x)} \quad (3.3)$$

- **Intervalo de confiança (IC):** nas estatísticas, um intervalo de confiança é um tipo de estimativa de intervalo que é calculado a partir dos dados observados. O nível de confiança é a frequência (ou seja, a proporção) de possíveis intervalos de confiança que contêm o valor verdadeiro de seu parâmetro correspondente. Em outras palavras, se os intervalos de confiança forem construídos usando um determinado nível de confiança em um número infinito de experimentos independentes, a proporção desses intervalos que contenham o valor verdadeiro do parâmetro corresponderá ao nível de confiança. O nível de confiança desejado é definido pelo pesquisador (Ou seja, não é determinado por dados). Mais comumente, o nível de confiança de 95% é utilizado e será o intervalo adotado neste trabalho. No entanto, outros níveis de confiança podem ser usados, por exemplo, 90% e 99%. Os fatores que afetam a largura do intervalo de confiança incluem o tamanho da amostra, o nível de confiança e a variabilidade na amostra. Um tamanho de amostra maior normalmente levará a uma melhor estimativa do parâmetro da população. O intervalo de confiança é determinado pela seguinte equação:

$$IC = \bar{X} \pm z \left(\frac{s}{\sqrt{n}} \right) \quad (3.4)$$

Com isso, podemos entender as medidas utilizadas para os resultados obtidos na realização deste trabalho. Na seção 3.1, apresenta o Iperf3, uma ferramenta utilizada para gerar tráfego na rede e obter as amostras de dados dos experimentos. A seção 3.2 descreve o OpenWrt, um *firmware open source* adotado nos roteadores

deste trabalho. O ambiente do cenário experimental é relatado na seção 3.3, descrevendo os aspectos do cenário de rede e configuração dos equipamentos. Por fim, na seção 3.4 e 3.5 são comentadas as estratégias de múltiplos canais e múltiplas interfaces para melhoria no desempenho da rede, respectivamente.

3.1 Iperf3

Figura 16: Parâmetros de saída do iPerf3.

```
[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: (iPerf, 2017)

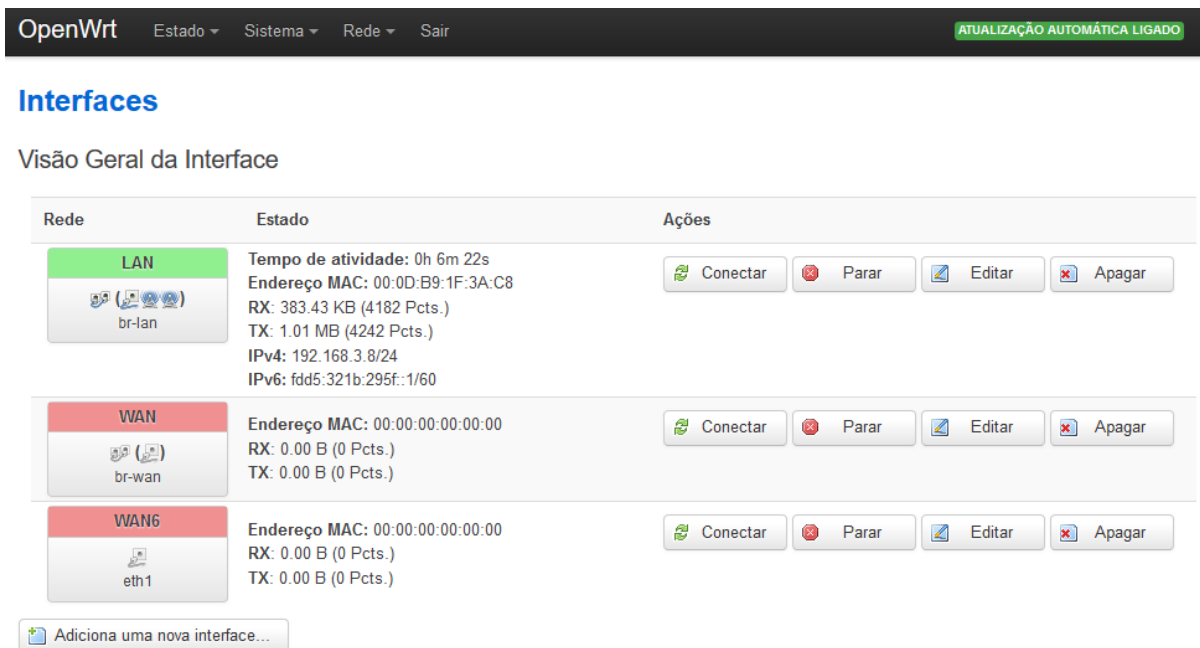
O iPerf3 é uma ferramenta de teste de velocidade muito utilizada em diversos trabalhos de análise de desempenho. Com o Iperf3 é possível realizar testes com o Protocolo de Controle de Transmissão (*Transmission Control Protocol* - TCP) e o Protocolo de Datagrama de Usuário (*User Datagram Protocol* - UDP) (iPerf, 2017). É uma ferramenta para medições ativas de máxima largura de banda possível em redes de baseadas no protocolo de internet (*Internet Protocol* - IP). Ele suporta o ajuste de vários parâmetros relacionados ao cronometro, buffers e protocolos (TCP, UDP, IPv4 e IPv6). Para cada teste, ele relata a largura de banda, taxa de entrega, *jitter*, a perda de pacotes e outros parâmetros. Esta é uma nova implementação que não herdou nenhum código do iPerf original e também não é compatível com versões anteriores. O iPerf foi originalmente desenvolvido pela NLANR / DAST. O iPerf3 é desenvolvido principalmente pela ESnet / *Lawrence Berkeley National Laboratory*. É lançado sob uma licença BSD de três cláusulas. Por meio do iPerf3, é possível obter as amostras e as informações necessárias de cada experimento realizado neste trabalho, como mostrado na Figura 17.

Para utilizar o iPerf3 foi necessário trocar o *firmware* proprietário dos roteadores, visto que a utilização de um sistema fechado impossibilitava até mesmo a criação das WMNs, sendo assim, foi instalado em cada equipamento um *firmware open source*

baseado em Linux, chamado de OpenWrt, que será descrito com maiores detalhes na seção seguinte.

3.2 OpenWrt

Figura 17: Interface Web (LuCI) do sistema embarcado OpenWrt.



The screenshot displays the OpenWrt LuCI web interface. At the top, there is a navigation bar with the text "OpenWrt" and a menu with options: "Estado", "Sistema", "Rede", and "Sair". On the right side of the navigation bar, a green button indicates "ATUALIZAÇÃO AUTOMÁTICA LIGADO". Below the navigation bar, the page title "Interfaces" is shown in blue. Underneath, the section "Visão Geral da Interface" is displayed. The main content area is a table with three columns: "Rede", "Estado", and "Ações".

Rede	Estado	Ações
LAN br-lan	Tempo de atividade: 0h 6m 22s Endereço MAC: 00:0D:B9:1F:3A:C8 RX: 383.43 KB (4182 Pcts.) TX: 1.01 MB (4242 Pcts.) IPv4: 192.168.3.8/24 IPv6: fdd5:321b:295f::1/60	Conectar Parar Editar Apagar
WAN br-wan	Endereço MAC: 00:00:00:00:00:00 RX: 0.00 B (0 Pcts.) TX: 0.00 B (0 Pcts.)	Conectar Parar Editar Apagar
WAN6 eth1	Endereço MAC: 00:00:00:00:00:00 RX: 0.00 B (0 Pcts.) TX: 0.00 B (0 Pcts.)	Conectar Parar Editar Apagar

At the bottom of the interface, there is a button labeled "Adiciona uma nova interface..."

Fonte: (OPENWRT, 2017)

OpenWrt é um projeto de código aberto para sistema operacional incorporado baseado em Linux, usado principalmente em dispositivos para rotear o tráfego de rede (OPENWRT, 2017). Os principais componentes do Linux foram otimizados em termos de tamanho, para serem pequenos o suficiente para se adequarem ao armazenamento e memória limitados disponíveis em roteadores domésticos.

O OpenWrt é configurado usando uma interface de linha de comando (*shell script*) ou uma interface da web (LuCI). Existem cerca de 3500 pacotes de software opcionais disponíveis para instalação através do sistema de gerenciamento de pacotes (OPKG).

O OpenWrt pode ser executado em vários tipos de dispositivos, incluindo roteadores, *gateways* residenciais, *smartphones*, computadores de bolso e *notebooks*. Também é possível executar OpenWrt em computadores pessoais, que são mais comumente baseados na arquitetura x86. Como o OpenWrt é um sistema embarcado aberto, possibilitou a realização dos experimentos deste trabalho. Embora a interface do usuário não esteja completamente desenvolvida, o controle de linha de comando

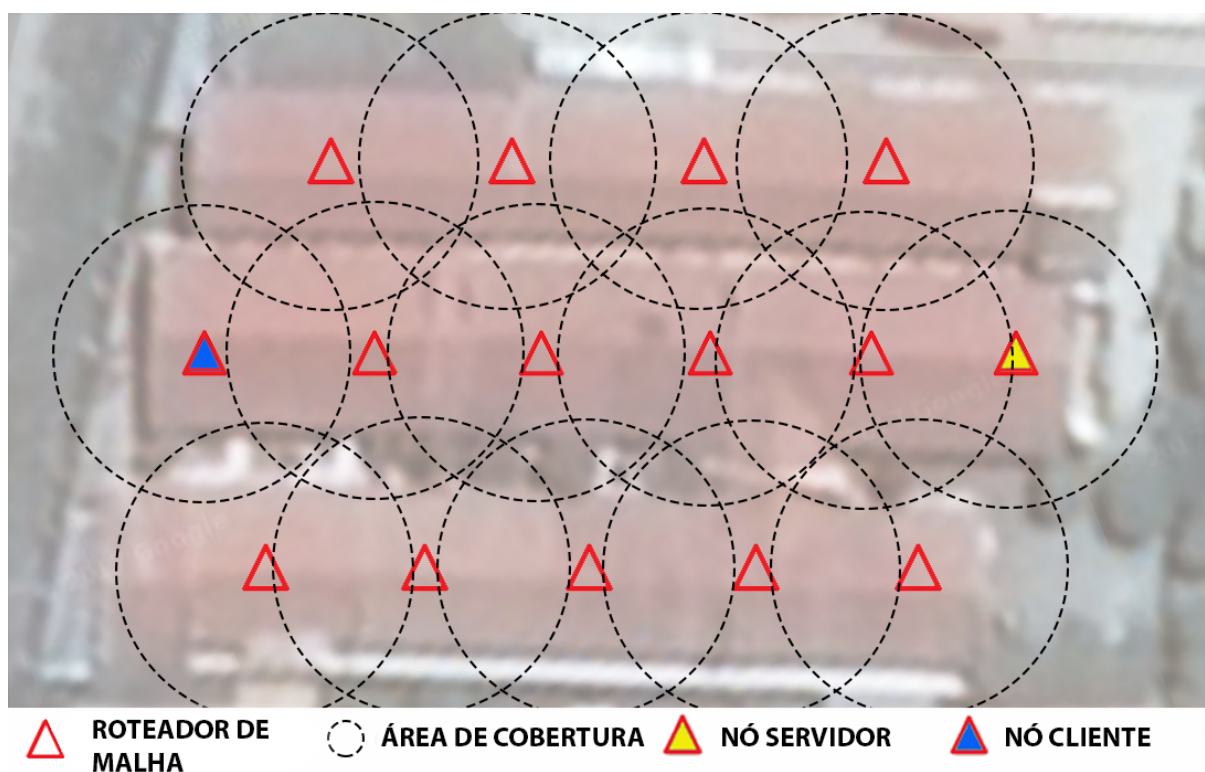
permite que os pacotes de protocolos de roteamento sejam instalados e configurados para a criação das WMNs.

Após instalar o OpenWrt nos roteadores, o cenário experimental foi planejado de acordo com as especificações e capacidade de cada equipamento de rede. A seção seguinte descreve com maiores detalhes o ambiente e as configurações do cenário experimental.

3.3 Cenário Experimental

Nesta proposta, o cenário da rede foi disponibilizado para a comunidade acadêmica do IFCE (Instituto Federal do Ceará) - Campus de Aracati, conforme mostrado na Figura 18. Para os experimentos apresentados neste trabalho os 15 nós da rede foram distribuídos com uma mesma distância de 20 metros entre cada nó, essa distância foi estabelecida de acordo com experimentos realizados que serão apresentados com maiores detalhes no Capítulo 4. Para o cenário experimental, foram selecionados os 6 roteadores centrais da rede como destacado na Figura 19.

Figura 18: Cenário de rede em malha sem fio do IFCE Aracati.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme citado anteriormente, o uso de múltiplas interfaces na rede em malha melhora o seu desempenho, pois, diminui as interferências intra e interfluxo, au-

menta a relação sinal-ruído e, conseqüentemente, melhora a vazão na rede. Assim, neste cenário de rede, os testes de desempenho foram realizados com equipamentos contendo duas interfaces sem fio em cada roteador. No intuito de realizar os experimentos em um ambiente de rede heterogêneo, o cenário de rede é composto por dois equipamentos que possuem diferentes configurações de hardware. Um dos equipamentos usados para montar a rede em malha foram roteadores da *PC Engines* do modelo ALIX3D3. Esse modelo custa no mercado em média R\$ 800,00 e possui um processador AMD Geode LX800 de 500 MHz com 50MB de memória RAM, como mostra a Tabela 4.

Tabela 4: Especificações do roteador PC Engines modelo ALIX3D3.

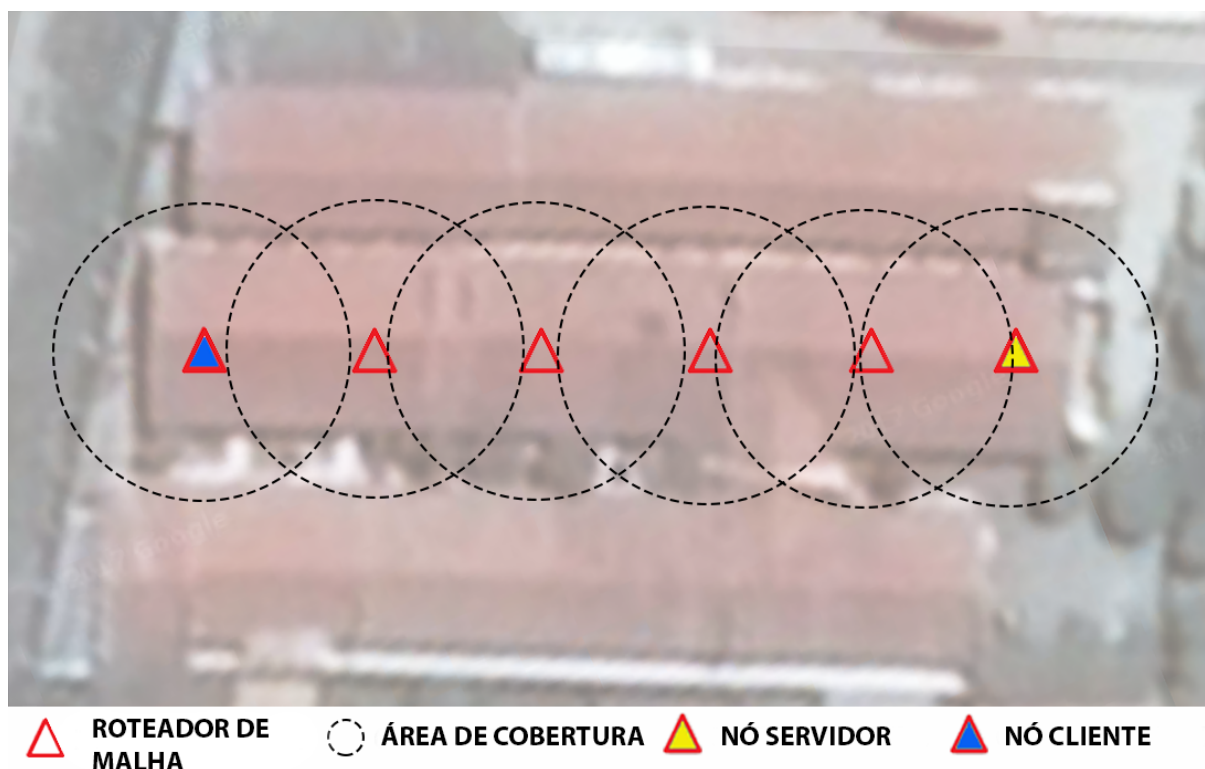
Interfaces:	2 Placas de rede sem fio 1 Porta LAN 10/100Mbps 2 Porta USB 2.0
Antenas:	2 antenas externas destacáveis de 5 dBi (RP-SMA)
Padrões Wireless:	IEEE 802.11n, IEEE 802.11g, IEEE 802.11b, IEEE 802.11ac
Arquitetura:	x86
Velocidade da CPU:	500 MHz
Tamanho da memória flash:	50 MB
Tamanho da memória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

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para realizar uma análise do impacto da heterogeneidade no desempenho da rede, também foram utilizados equipamentos de baixo custo COTS da TP-LINK, modelo TL-WR842ND, com interfaces externas, modelo TL-WN721N, que foram conectadas na porta *Universal Serial Bus* (USB) do roteador para servir como segunda placa de interface de rede (*Network Interface Card* - NIC). Embora existam duas antenas físicas no roteador analisado, ambas estão associadas a apenas uma NIC, como mostrado na Tabela 5. Para detalhar melhor a diferença de custo, um roteador com múltiplas interfaces custa no mercado em média R\$ 1.000,00, enquanto o roteador TL-WR842ND juntamente com a antena externa TL-WN721N totalizam aproximadamente R\$ 300,00.

Os equipamentos utilizados nos experimentos são apresentados na Figura 20, esses roteadores foram configurados para executar no modo em malha através da instalação e configuração da distribuição linux embarcada OpenWRT (OPENWRT, 2017). Em todos os roteadores foram configurados com o padrão IEEE 802.11s, incluindo os protocolos de roteamento B.A.T.M.A.N., AODV, HWMP e OpenFlow, em conjunto com

Figura 19: Cenário de rede em malha selecionado para avaliação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 5: Especificações do roteador TP-LINK modelo TL-WR842ND.

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

Fonte: Elaborado pelo autor.

o IEEE 802.11n na banda ISM 2,4 GHz e 5,0 GHz.

Conforme apresentado na Figura 19, no cenário de rede que foi selecionado para avaliação, existe um nó cliente que será responsável por gerar todo o tráfego de rede na realização dos experimentos. Todo o tráfego gerado é destinado a um nó servidor que recebe as informações geradas e contabiliza os dados. Ao fim de cada experimento, os resultados são salvos em arquivos de texto que posteriormente são

utilizados para plotar os gráficos.

O MIMO (*Multiple-Input Multiple-Output*) é uma tecnologia sem fio que usa múltiplos transmissores e receptores para transferir mais dados ao mesmo tempo. Todos os equipamentos sem fio com o 802.11n suportam o recurso MIMO. A tecnologia ajuda a permitir que o 802.11n alcance velocidades mais altas em relação às outras tecnologias sem fio. No entanto, nos experimentos realizados neste trabalho o MIMO foi desabilitado, devido às conexões de canais na banda 2,4GHz não serem tão eficientes quanto a banda de 5GHz (INTEL, 2017) e, portanto, foi considerado nos experimentos uma velocidade máxima de 150 Mbps, sendo 75 Mbps para *Upload* e 75 Mbps para *Download*. Na seção seguinte, será abordada a estratégia de melhoria de desempenho com múltiplos canais interfaces e interfaces adotado neste trabalho.

Figura 20: Roteadores usados no cenário de teste.

(a) TP-LINK TL-WR842ND.



(b) PC Engines ALIX3D3



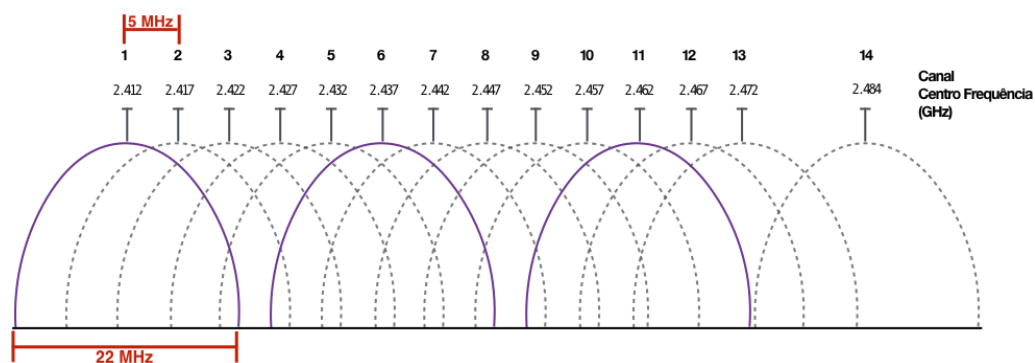
Fonte: Elaborado pelo autor.

3.4 Melhorando o Desempenho com Múltiplos Canais e 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 21, os canais têm uma frequência central de 5 MHz e uma largura de banda total do canal de 22 MHz. O nível de energia 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 21. 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 21, 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 21: 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 camadas físicas (*Physical Layer* - 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 Ad Hoc Veiculares (*Vehicular Ad Hoc Networks* - VANETs)). 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 de malha deve ser capaz de processar mais de um canal e implementar mecanismos específicos de coordenação entre os canais disponíveis. A próxima seção discute sobre as possíveis estratégias de atribuição de canais e interfaces.

3.5 Mecanismo e 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 uma relação de compromisso entre conectividade e interferência: uma medida de interferência é otimizada com a restrição de que seja preservada alguma noção de conectividade. No presente trabalho, essa abordagem é seguida. 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)

4 Resultados

Neste Capítulo, é apresentado e discutido os principais resultados obtidos de extensivos experimentos realizados na rede em malha apresentada na Figura 19. Aqui, foi destacado os resultados mais interessantes que apresentam situações que fundamentam os benefícios do OpenFlow e mostra a maneira correta de utilizar múltiplas interfaces para otimizar o desempenho das redes em malha. Em todas as avaliações, um fluxo de dados foi gerado para cada rodada na ferramenta IPerf (iPerf, 2017). Os resultados foram obtidos a partir da execução de 30 repetições enviando 600 MB de dados em cada caso de teste e com intervalo de confiança de 95%, conforme apresentado no Capítulo 3. Segundo (JAIN, 1990), a estimação de intervalos de confiança de uma população de eventos terá maior confiabilidade se o evento é executado pelo menos 30 vezes. Para todos os experimentos, foi desabilitado o acesso aos usuários para que não houvesse fluxo concorrente na rede e que não prejudicasse a interpretação dos resultados obtidos. No total, os experimentos foram realizados e repetidos durante 2 semanas no turno da manhã das 7:00 AM às 12:00 PM. Os resultados apresentados consistem de uma análise da qualidade dos canais apresentada na seção 4.1, da distância entre os nós discutido na seção 4.2, do impacto da heterogeneidade da rede com múltiplos saltos e múltiplos canais detalhado na seção 4.3, a análise de desempenho do OpenFlow em relação aos tradicionais protocolos de roteamento é abordado na seção 4.4, e por fim uma análise de sobrecarga do tráfego de controle dos protocolos de roteamento na seção 4.5.

4.1 Análise da Qualidade dos Canais na Banda ISM 2,4 GHz e 5,0 GHz

Primeiramente, foi realizada uma análise da qualidade dos canais no cenário avaliado, no intuito de minimizar a interferência nos resultados deste trabalho. O experimento foi realizado através da comunicação de um salto entre dois roteadores de malha ALIX3D3 a uma distância de 1 metro, por motivo de ser o único que equipamento disponível que suporta a banda 5,0 GHz. Este experimento foi repetido todos os dias durante as 2 semanas para obter resultados conclusivos e sempre antes de realizar os demais casos de teste deste trabalho. Conforme a Tabela 6, foram enviados 76800 pacotes de 8 KB com o protocolo UDP.

A Tabela 7 mostra o resultado dessa análise em termos de vazão, SNR e número de retransmissões. Os resultados foram capturados por um único roteador na banda ISM 2,4 GHz para que fosse verificado o impacto das interferências no desem-

Tabela 6: Parâmetros de simulação para análise de canais.

Número de Nós:	2
Distância:	1 Metro
Número de Repetições:	30
Protocolo de Roteamento:	OpenFlow
Topologia da Rede:	Ponto a Ponto
Protocolo de Transporte:	UDP
Número de Pacotes:	76800
Tamanho do Pacote:	8 KB
Número de Fluxos:	1
Especificação PHY:	802.11n

Fonte: Elaborado pelo autor.

penho da rede. Como se observa, o canal 6 está entre os canais com menor SNR (65 dB) e ainda apresenta um elevado número de pacotes perdidos. Isso deve-se ao fato de diversos roteadores da rede sem fio na vizinhança serem pré-configurados neste canal. Por outro lado, o canal 1 e 11 apresentou o melhor resultado o menor número de pacotes transmitidos. Esse experimento foi importante para selecionarmos o canal 1 e 11 na 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 pacotes perdidos, reduzindo também a interferência com canais adjacentes.

Tabela 7: Análise da qualidade dos canais na banda ISM 2,4 GHz no ambiente de avaliação.

Canal	Vazão (Mbps)	SNR (dB)	Nº de Pacotes Perdidos
1	59.3	82	1
2	56.7	78	54
3	54.4	79	75
4	51.6	73	290
5	51.7	71	373
6	52.1	65	1346
7	52.7	73	383
8	53.9	75	251
9	53.5	79	150
10	54.3	80	56
11	57.5	82	4

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 8 mostra os resultados que foram capturados por um único roteador na banda ISM 5,0 GHz, para que fosse verificado o impacto das interferências no desempenho da rede. Como observa-se, a média do SNR (82 dB) é um pouco maior comparado à banda de 2,4 GHz e em todos os canais houve pouquíssimas perdas de pacotes. Isso deve-se ao fato de ter poucos dispositivos operando nessa banda, por-

tanto, a banda ISM 5,0 GHz nesse ambiente de avaliação não apresenta interferência com outros dispositivos.

Tabela 8: Análise da qualidade dos canais na banda ISM 5,0 GHz no ambiente de avaliação.

Canal	Vazão (Mbps)	SNR (dB)	Nº de Pacotes Perdidos
36	62.8	83	15
40	62.7	81	8
44	63.0	81	10
48	62.2	81	13
52	62.0	82	16
56	62.9	81	7
60	61.8	82	8
64	61.9	82	17
100	61.9	83	21
104	62.0	82	12
108	61.9	83	11

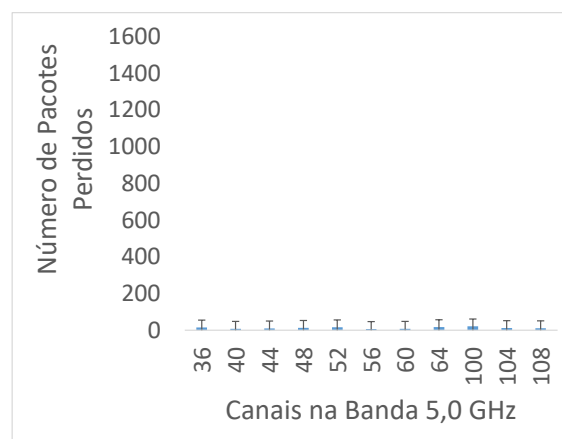
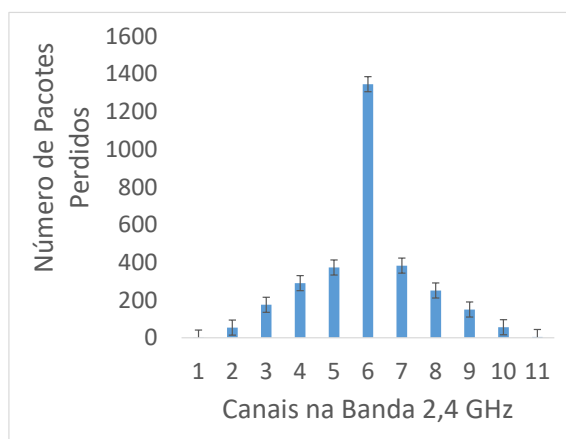
Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 22 mostra com maiores detalhes a diferença do número de pacotes perdidos nas bandas de 2.4 GHz e 5.0 GHz. Estes resultados foram levados em consideração para os demais casos de testes realizados neste trabalho. Por meio da análise da qualidade dos canais foi possível diminuir a interferência causada por outros dispositivos que operam na vizinhança e obter melhores resultados nos experimentos. Na seção seguinte, será investigada o impacto da distância no desempenho da rede, no intuito de determinar a distância ideal entre os nós da rede implementada no IFCE Aracati.

Figura 22: Análise da Qualidade dos Canais na Banda ISM 2,4 GHz e 5,0 GHz

(a) Número de pacotes perdidos em 2,4 GHz.

(b) Número de pacotes perdidos em 5,0 GHz



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2 Análise da Distância Entre os Nós da Rede

A análise do impacto da distância no desempenho da rede foi realizada para avaliar a capacidade de transmissão dos equipamentos de rede disponíveis para os experimentos. O principal objetivo foi estabelecer uma distância ideal para ambos os equipamentos para que os resultados não sejam somente influenciados pelas suas diferentes características físicas. O experimento foi realizado através da comunicação de um salto entre dois roteadores de malha ALIX3D3 e dois roteadores TL-WR842ND, a distância entre os roteadores foi variada entre 1, 25, 50, 75 e 100 metros. Este experimento também foi repetido todos os dias durante as 2 semanas para obter resultados conclusivos. Conforme a Tabela 9, também foram enviados 76800 pacotes de 8 KB com o protocolo de transporte UDP.

Tabela 9: Parâmetros de simulação para análise da distância entre os nós da rede.

Número de Nós:	2 ALIX3D3 2 TL-WR842ND
Distância:	1 a 100 Metros
Número de Repetições:	30
Protocolo de Roteamento:	OpenFlow
Topologia da Rede:	Ponto a Ponto
Protocolo de Transporte:	UDP
Número de Pacotes:	76800
Tamanho do Pacote:	8 KB
Número de Fluxos:	1
Especificação PHY:	802.11n

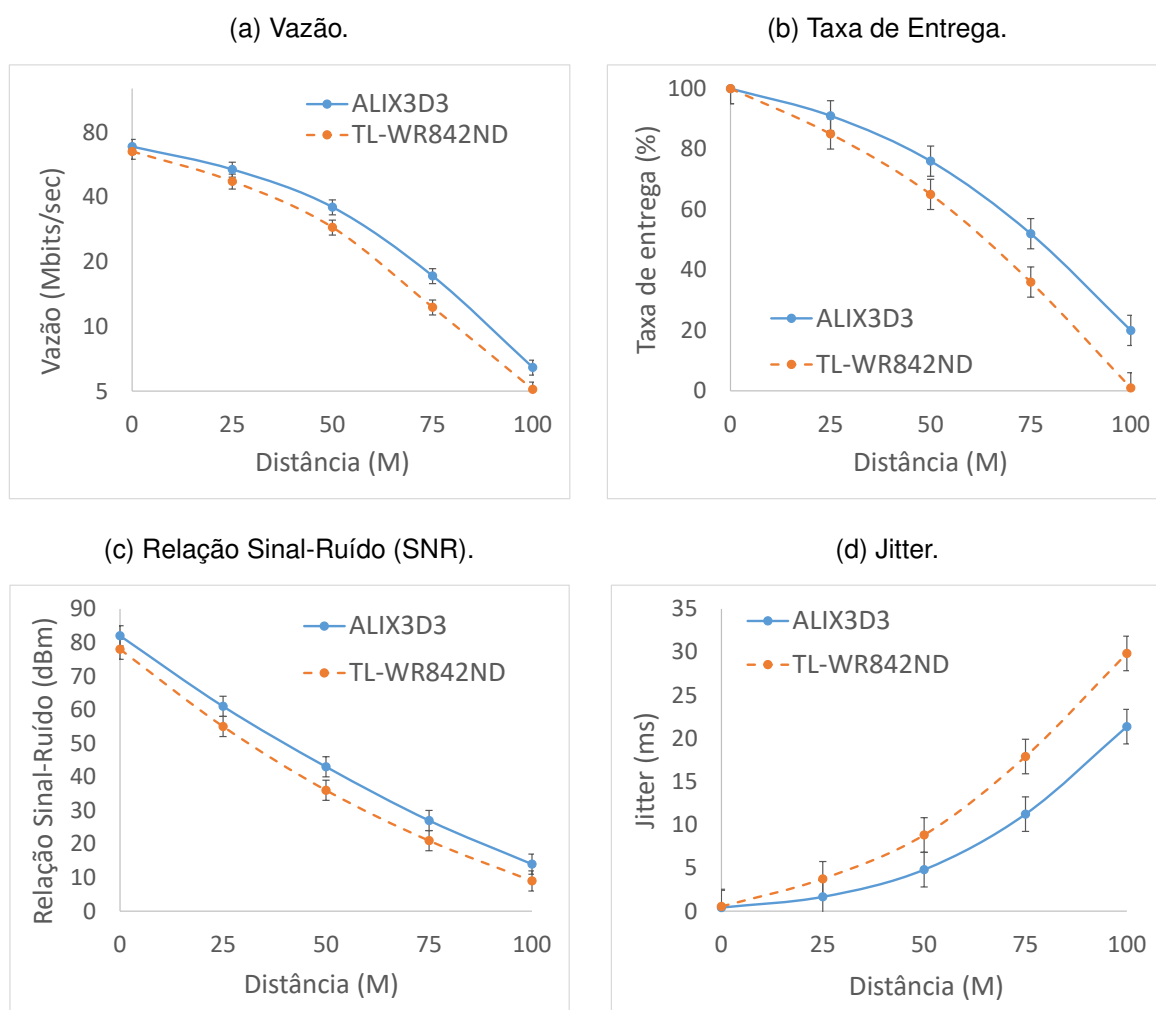
Fonte: Elaborado pelo autor.

No experimento, foi utilizado apenas 2 nós de cada tipo de equipamento disponível, no intuito de analisar somente o impacto no desempenho à medida que estes nós se distanciam. Os demais parâmetros foram mantidos com 30 repetições em cada teste no protocolo de roteamento OpenFlow.

A Figura 23 mostra claramente o comportamento causado na vazão, taxa de entrega, relação sinal-ruído (SNR) e jitter à medida que os nós se distanciam. O experimento teve como objetivo conhecer a capacidade máxima de cada equipamento utilizado na rede em malha, além de poder determinar uma distância ideal para o cenário de rede.

A Figura 23a mostra a vazão da rede onde a distância inicial entre os nós é de 1 metro e a distância final é de 100 metros, variando de 25 em 25 metros em cada teste. A medida que os nós se distanciam a taxa de entrega tende a diminuir. Isso ocorre devido à relação sinal-ruído (SNR) como mostrado na Figura 23c, quanto maior a distância menor é o SNR e, portanto, maior será a taxa de erro de bit (BER).

Figura 23: Análise do impacto da distância entre os diferentes equipamentos da rede.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Em média, em cada ponto, a vazão caiu em torno de 42% para o roteador ALIX3D3 e cerca de 46% para o roteador TL-WR842ND. O mesmo comportamento acontece com a taxa de entrega como mostra a Figura 23b. De acordo com o aumento da distância a taxa de entrega caiu cerca de 29% a cada 25 metros com o roteador ALIX3D3 enquanto o roteador TL-WR842ND caiu em torno de 45%.

A Figura 23d mostra a variação do atraso, conhecido como *jitter*, nota-se um comportamento inversamente proporcional à medida que os nós se distanciam maior será o atraso. Este comportamento ocorre devido ao SNR comentado anteriormente, quanto maior a distância entre os nós maior será o tempo de propagação e atenuação do sinal, conforme discutido no Capítulo 2, o sinal se dispersa ao ar livre, resultando na redução de sua força à medida que aumenta a distância entre emissor e receptor (KUROSE; ROSS, 2016).

Com os resultados obtidos na Figura 23, foi determinado que a distância ideal

para os diferentes dispositivos é entre 15 e 25 metros. Pois, apresentou uma queda de apenas 10% nessa distância. Portanto, a distância ideal entre os roteadores no cenário de rede implementado no IFCE aracati (ver na Figura 18) foi estabelecida em 20 metros. Geralmente, uma rede em malha é composta por diferentes dispositivos conectados transmitindo e recebendo dados, no entanto, o desempenho da rede depende da capacidade de transmissão desses dispositivos. De acordo com as configurações físicas de cada equipamento e a combinação de várias tecnologias de fabricantes diferentes podem afetar o desempenho da rede. Na seção seguinte, será analisado com maiores detalhes o impacto no desempenho da rede causado pela heterogeneidade dos dispositivos.

4.3 O Impacto da Heterogeneidade no Desempenho da Rede

Ao investigar o impacto da heterogeneidade de dispositivos no desempenho da rede em malha, foram utilizadas as técnicas de mono e múltiplos canais com roteadores equipados com múltiplas interfaces, conforme discutido no Capítulo 3. Em todos os casos de teste deste cenário, foram enviados 600 Mb de dados do nó cliente para o nó servidor com 30 repetições cada experimento, no protocolo de roteamento OpenFlow, conforme a Tabela 10 a distância entre os nós foi fixada em 20 metros. O objetivo principal é analisar o impacto dos diferentes tipos de dispositivos no encaminhamento de pacotes em múltiplos saltos na rede. Para esclarecer as terminologias da Figura 24, foi determinado que:

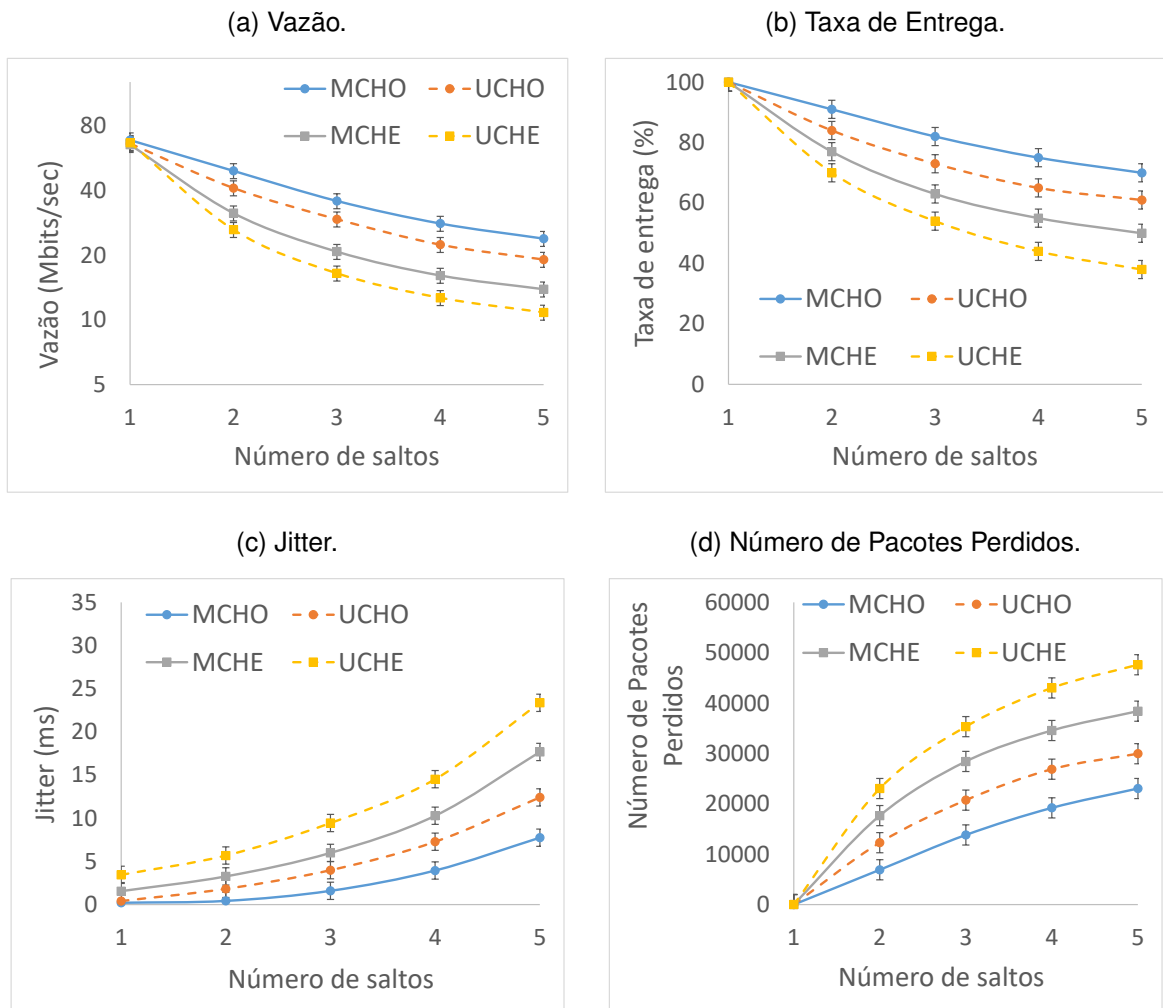
- Cenário *UCHE*: todos os roteadores usam um único canal (*UC*) e as conexões entre os roteadores são estabelecidas entre roteadores heterogêneos (*HE*), dos 6 roteadores do cenário de teste, 3 são roteadores ALIX3D3 e outros 3 são os TL-WR842ND.
- Cenário *MCHE*: todos os roteadores estão configurados com múltiplos canais (*MC*) a cada salto. De forma similar ao primeiro cenário, as conexões estabelecidas entre os roteadores diferentes.
- Cenário *UCHO*: todos os roteadores usam apenas um único canal e as conexões entre os roteadores são estabelecidas entre roteadores homogêneos (*HO*), ou seja, todos os 6 roteadores do cenário de teste são do mesmo tipo.
- Cenário *MCHO*: 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 roteadores iguais.

Tabela 10: Parâmetros de simulação para análise de heterogeneidade dos dispositivos.

Número de Nós:	6
Distância:	20 Metros
Número de Repetições:	30
Protocolo de Roteamento:	OpenFlow
Topologia da Rede:	Linha
Protocolo de Transporte:	UDP
Número de Pacotes:	76800
Tamanho do Pacote:	8 KB
Número de Fluxos:	1
Especificação PHY:	802.11n

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 24: Análise do desempenho da rede com dispositivos heterogêneos em função do número de saltos configurados em mono e multi-canais.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 24a apresenta um resultado interessante que destaca claramente que os cenários com conexões entre os dispositivos homogêneos (*UCHO* e *MCHO*) apresentam uma vazão superior aos cenários com conexões entre os dispositivos heterogêneos (*UCHE* e *MCHE*) para todos os números de saltos. Em especial, *UCHO* sempre apresenta um resultado bem melhor que *MCHE* independente do número de saltos. Ou seja, a heterogeneidade do hardware tem um peso maior que a interferência intra e inter-fluxo no desempenho da rede. Esse comportamento demonstra claramente que a combinação de múltiplas interfaces e múltiplos canais deve ser realizada com atenção.

Ao desconsiderar o hardware, percebe-se que a utilização de Múltiplos Canais (*MC*) alcança um melhor resultado que um Único Canal (*UC*), em números, a adoção dos múltiplos canais melhoram o desempenho da rede em 5%, mesmo com os cenários *MC* utilizando o canal 6 em algum salto da rede em malha. Como é atribuído um canal diferente a cada salto, o canal mesmo com um maior número de pacotes perdidos acaba sendo selecionado. No entanto, isso não afeta negativamente o desempenho da rede, pois, a interferência inter-fluxo demonstrou ser menos degradante na vazão do que a interferência intra-fluxo.

Realizando uma comparação com os resultados obtidos, podemos perceber que, conexões entre os dispositivos de mesmo hardware ou de hardware diferentes podem afetar o desempenho de enlaces em uma rede sem fio. Como visto no gráfico, o desempenho da rede com o cenário heterogêneo apresenta uma queda por saldo de 35% enquanto o cenário homogêneo mostra uma queda de 24% por salto. Devido à heterogeneidade das tecnologias empregadas pelos fabricantes, 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. Podemos ver claramente nos gráficos das Figuras 24a e 24b, um distanciamento significativo na vazão e taxa de entrega, respectivamente, entre as tecnologias implementadas nos experimentos.

Portanto, conclui-se que redes mono e multi-canais configuradas em múltiplas interfaces, através de conexões entre dispositivos do mesmo hardware, conseguem um melhor SNR (como visto na Figura 23c), um menor número de pacotes perdidos (Figura 24d), um menor atraso (Figura 24c) e aumentam a vazão da rede. Em razão disso, o desempenho mostrou-se melhor quando comparado a utilização do mesmo canal em todas as interfaces. Na seção seguinte, será abordado o desempenho do OpenFlow em relação aos demais protocolos desenvolvidos para redes em malha, no intuito de verificar o comportamento do novo paradigma de roteamento comparado ao roteamento tradicional.

4.4 Análise de Desempenho do OpenFlow em relação aos tradicionais protocolos de roteamento

O desacoplamento do plano de dados e de controle de *switches* ou roteadores de rede é a principal característica das redes definidas pelo software. O protocolo OpenFlow implementa esse conceito e hoje é implantado em vários equipamentos disponíveis. Apesar de ser amplamente empregado na indústria e pesquisa, existem poucos trabalhos relacionados a avaliação sistemática do desempenho do plano de dados na literatura (COSTA et al., 2017). Nesta seção, é avaliado o desempenho dos principais recursos do OpenFlow em 6 roteadores em comparação com os tradicionais protocolos de roteamento como o B.A.T.M.A.N, HWMP e AODV. O principal objetivo é apontar os benefícios e mensurar a diferença na adoção do novo paradigma de roteamento com o roteamento tradicional.

O experimento foi realizado através da comunicação de múltiplos saltos com 6 roteadores de malha, a distância entre os roteadores foi mantida em 20 metros, como nos cenários anteriores cada teste foi repetido por 30 vezes. Este experimento também foi realizado todos os dias durante as 2 semanas para obter resultados mais precisos. Conforme a Tabela 11, também foram enviados 76800 pacotes de 8 KB com o protocolo de transporte UDP em todos os protocolos de roteamento selecionados.

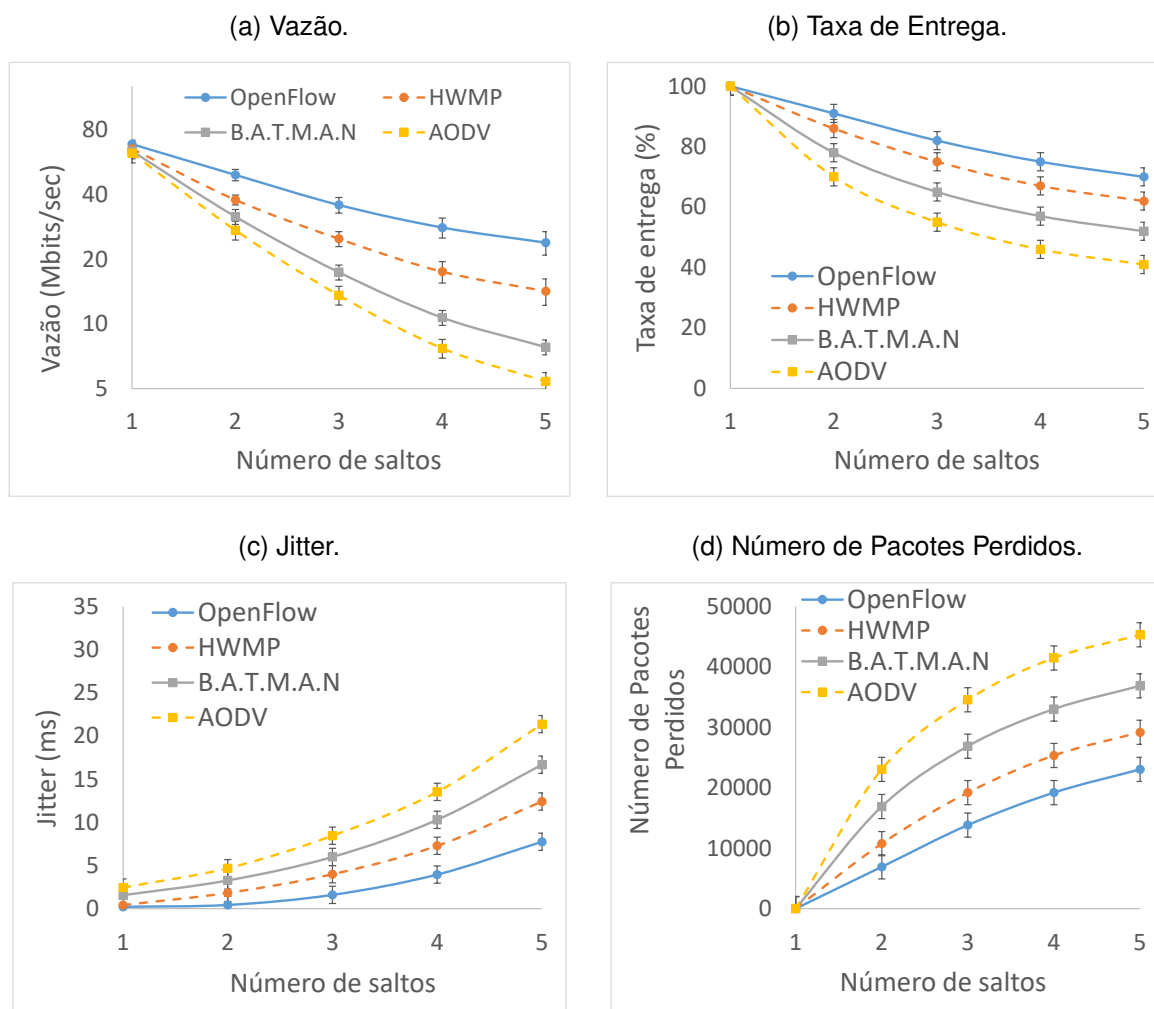
Tabela 11: Parâmetros de simulação para análise do protocolo OpenFlow em relação aos tradicionais protocolos de roteamento para redes em malha.

Número de Nós:	6
Distância:	20 Metros
Número de Repetições:	30
Protocolo de Roteamento:	OpenFlow, HWMP, B.A.T.M.A.N e AODV
Topologia da Rede:	Linha
Protocolo de Transporte:	UDP
Número de Pacotes:	76800
Tamanho do Pacote:	8 KB
Número de Fluxos:	1
Especificação PHY:	802.11n

Fonte: Elaborado pelo autor.

O controlador OpenFlow foi instalado em um computador desktop com o Linux Mint 18.2, com processador Intel Core i7 @ 3,40 GHz e 4 GB de RAM. O software controlador usado foi o POX, que é baseado no controlador NOX e é programado usando apenas Python. Como mencionado no Capítulo 3, o firmware dos roteadores sem fio foi alterado para OpenWRT, uma distribuição Linux bem conhecida para dispositivos incorporados, que suporta protocolos de roteamento para WMN como AODV, B.A.T.M.A.N e 802.11s. Neste trabalho, o OpenWRT foi compilado com um pacote

Figura 25: Análise do desempenho do protocolo OpenFlow em relação aos tradicionais protocolos de roteamento em função do número de saltos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

chamado Pantou, que implementa o protocolo OpenFlow nos roteadores sem fio.

Seguindo a arquitetura proposta (DELY; KASSLER; BAYER, 2011), discutido na seção 2.4.2, o protocolo OpenFlow foi implementado no modo de controle fora da banda, substituindo o protocolo OLSR por 802.11s na rede de controle. Na arquitetura proposta por (DELY; KASSLER; BAYER, 2011), duas redes em malha são criadas, uma para o plano controle e outro para o plano dados. Esta arquitetura foi facilmente implantada devido ambos roteadores TP-Link TL-WR842ND e ALIX3D3 suportarem a configuração de duas interfaces sem fio virtuais sobre a mesma interface de rádio física, conforme abordado na seção 2.4.

Nos resultados obtidos na Figura 25a indicam que a vazão do protocolo OpenFlow é melhor do que o protocolo HWMP, B.A.T.M.A.N e AODV em todos os 5 saltos. Em um salto, a vazão atingida foi de 68,7 Mbps/s no OpenFlow, enquanto que utili-

zando apenas HWMP a vazão obtida foi de 65,4 Mbits/s, já o B.A.T.M.A.N atingiu 63,8 Mbits/s e o AODV conseguiu 62,4 Mbits/s em um salto. Da mesma forma, em dois saltos, foi medido 49,4 Mbits/s usando o OpenFlow, contra 37,8 Mbits/s do cenário com o HWMP, o B.A.T.M.A.N atingiu 31,57 Mbits/s e o AODV com 27,3 Mbits/s. Realizando um comparativo geral, o OpenFlow caiu 25% por salto, enquanto que o HWMP atingiu uma queda de 34%, já o B.A.T.M.A.N chegou a 45% e o AODV com 49% de queda por salto (CHUNG et al., 2013; DECRISTOFARO; LANSDOWNE; SCHLESINGER, 2014; PRATHAMA; HERTIANA et al., 2013). Da Figura 25a, conclui-se que o protocolo OpenFlow apresentou um melhor desempenho, no entanto, a partir do terceiro salto o OpenFlow entra em conflito com o mecanismo de seleção e encaminhamento de malha do protocolo 802.11s, degradando e tornando um pouco instável o seu desempenho (CHUNG et al., 2013).

Como resultado, esta alta vazão atingida no protocolo OpenFlow é devido à centralização da rede, que por conseguinte, diminui a complexidade de roteamento nos roteadores e todo o cálculo de rota passa a ser realizado em um servidor controlador de rede. Ao evitar o recálculo de rotas nos roteadores de forma independente, todos os recursos disponíveis serão destinados apenas para a computação de pacotes, sendo assim, é possível notar claramente um aumento na vazão, na taxa de entrega (ver na Figura 25b) e um menor número de pacotes perdidos (ver na Figura 25d).

Por fim, outro ponto interessante é o atraso causado pelos protocolos de roteamento na Figura 25c. O OpenFlow lidera com o menor atraso em média de 2,7 ms, enquanto os demais protocolos como HWMP atingiu 5,18 ms, o protocolo B.A.T.M.A.N chegou a 7,5 ms e o AODV atingiu 10 ms por salto. A razão do OpenFlow ter o menor atraso é devido ao roteamento baseado em fluxo, para um determinado fluxo de dados o atraso introduzido é apenas o tempo necessário de um único pacote do fluxo de dados de ir e vir do servidor controlador. Quando o servidor retorna a requisição, a regra é aplicada para todo o fluxo de dados, pois, não há necessidade de requisitar novamente. É notável o bom desempenho do OpenFlow nos resultados deste trabalho, no entanto, o protocolo gera um tráfego de controle bem maior do que os demais protocolos abordados. Isto se deve ao fato do roteamento ser baseado em fluxo, logo quanto maior o número de fluxos na rede, maior será a quantidade de requisições ao servidor controlador de rede. Na seção seguinte, será abordado com maiores detalhes uma análise de tráfego de controle gerado pelo protocolo OpenWrt e os demais protocolos de estudo.

4.5 Sobrecarga do Tráfego de Controle

Como mencionado, o OpenFlow cria um maior tráfego de controle quando aumenta o número de fluxos na rede. Nesta seção, é investigado o impacto desse aumento de tráfego de controle no desempenho da rede em malha, foram utilizadas as técnicas de múltiplos canais com roteadores equipados com múltiplas interfaces, conforme os cenários anteriores. Em todos os casos de teste deste cenário, foram enviados 600 Mb de dados do nó cliente para o nó servidor com 30 repetições cada experimento, no protocolo de roteamento OpenFlow. Para realizar o experimento, o número de fluxos gerados pelos nós foi aumentado, conforme descrito na Tabela 12, foram gerados de 1 a 20 fluxos concorrentes em cada um dos nós selecionados de forma aleatória na rede. O objetivo principal é analisar a relação do aumento do número de fluxos com o tráfego de controle. As estatísticas foram obtidas através dos pacotes de controle que os roteadores enviam ao servidor que controla a rede. Foi medida a quantidade de tráfego de controle que é criado ao aumentar o número de fluxos concorrentes em nós aleatórios na rede.

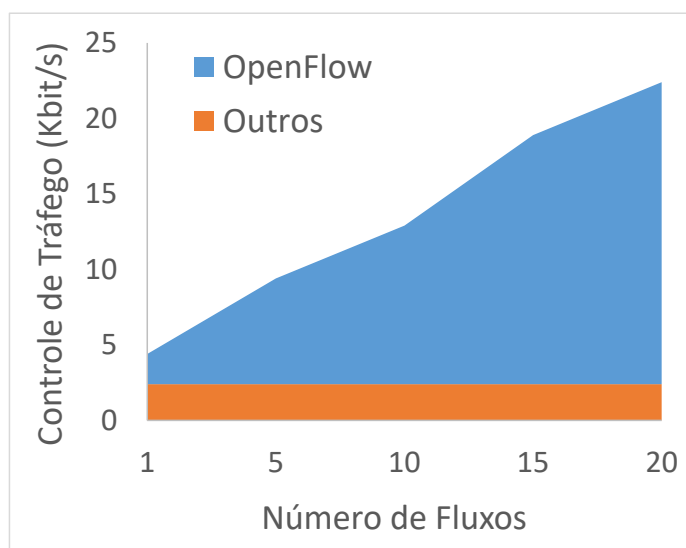
Tabela 12: Parâmetros de simulação para análise do tráfego de controle gerado pelo OpenFlow em relação aos tradicionais protocolos de roteamento para redes em malha.

Número de Nós:	6
Distância:	20 Metros
Número de Repetições:	30
Protocolo de Roteamento:	OpenFlow, HWMP, B.A.T.M.A.N e AODV
Topologia da Rede:	Linha
Protocolo de Transporte:	UDP
Número de Pacotes:	76800
Tamanho do Pacote:	8 KB
Número de Fluxos:	1 a 20 fluxos concorrentes
Especificação PHY:	802.11n

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 26, foi comparado às taxas de tráfego de controle do OpenFlow com o tráfego de controle criado pelo B.A.T.M.A.N, HWMP e AODV. Como esperado, o tráfego de controle do OpenFlow aumenta à medida que o número de fluxo aumenta, enquanto o tráfego nos outros protocolos permanecem constantes. Com 20 fluxos concorrentes, o tráfego de controle adicional do OpenFlow é de cerca de 20 kbit/s e o tráfego total de controle é cerca de 10 vezes maior em comparação com o caso em que apenas B.A.T.M.A.N, HWMP e AODV é usado. No entanto, em comparação com o rendimento alcançado, o tráfego de controle ainda é baixo para certos cenários e, com um balanceamento de carga, taxas mais baixas de tráfego de controle podem ser atingidas. Comparado a uma rede em que se o utiliza somente os protocolos

Figura 26: Tráfego total de controle causado pelo HWMP e OpenFlow.



Fonte: Elaborado pelo autor.

analisados neste trabalho, o OpenFlow adiciona tráfego de controle extra, mas o valor é relativamente pequeno.

A questão da escalabilidade é uma grande preocupação ao usar esquemas centralizados como o OpenFlow. À medida que o tamanho da rede aumenta, mais fluxos de dados são gerados e potencialmente mais tráfego de controle é gerado. Os resultados da pequena rede de teste mostram que a quantidade de tráfego de controle gerada por cada roteador de malha é da ordem de alguns kbit/s, o esperado é que a quantidade de tráfego de controle também deve permanecer moderada para redes maiores realizando um bom balanceamento de carga. Entretanto, as questões de escalabilidade devem ser investigadas mais adiante em trabalhos posteriores. Por exemplo, combinando os fluxos de diferentes nós em um único pacote, seria uma maneira de reduzir o tráfego de controle.

5 Conclusões

Neste trabalho foi demonstrado que, dado o estado da arte atual da tecnologia, as redes de malha podem simplesmente ser implementadas em diversos equipamentos de redes. Embora existam muitos tradicionais protocolos de roteamento para rede em malha, nenhum parece ser tão significativo em seu desenvolvimento do que os outros. Por outro lado, a adoção do paradigma de SDN no contexto de redes em malha abre espaço para novas funcionalidades, como engenharia de tráfego e encaminhamento de pacotes baseado em fluxos. Para os fins desta análise de desempenho, quatro protocolos de roteamento foram escolhidos, o pró-ativo B.A.T.M.A.N, o reativo AODV, o protocolo híbrido HWMP e a introdução do paradigma de SDN com o protocolo OpenFlow. Estes protocolos foram escolhidos porque (1) eles foram os mais convenientes e fáceis de configurar e (2) eles representaram protocolos muito diferentes.

Os resultados mostraram que a tecnologia de baixo (COTS) utilizada neste trabalho foi capaz de transferir 23,9 Mbps/s de dados através de 5 saltos a uma distância de 20 metros entre os nós com uma boa taxa de entrega. A distância e a vazão podem ser significativamente melhoradas por mudanças na camada física, incluindo direcionalidade e potência de transmissão, no entanto, essas melhorias geralmente adicionam tamanho, peso, complexidade e consumo de energia (DECRISTOFARO; LANSLOWNE; SCHLESINGER, 2014). Os importantes problemas atuais com a tecnologia para redes em malha incluem a questão da mobilidade na rede, segurança, QoS, DTN, configuração autônoma, congestionamento de gateway e o número de protocolos concorrentes disponíveis. Segundo (DECRISTOFARO; LANSLOWNE; SCHLESINGER, 2014) uma rede em malha deve ser tratada como uma rede não segura, e a segurança deve ser fornecida por protocolos de camada superior, incluindo segurança de certificados, túneis e pontes, *Secure Shell* (SSH), Protocolo de Transferência de Hipertexto Seguro (*Hyper Text Transfer Protocol Secure* - HTTPS) e outros serviços que forneçam segurança.

Este trabalho analisou o desempenho do protocolo OpenFlow em relação aos principais protocolos de roteamento para redes em malha sem fio, utilizando múltiplas interfaces em um ambiente real de redes em malha sem fio. Particularmente, foram avaliadas e analisadas as implicações de uma abordagem multi-interface e multi-canal efetuando ensaios com diferentes hardwares para realizar um estudo do impacto da heterogeneidade no desempenho da rede, os resultados obtidos mostram que hardwares homogêneos e heterogêneos de diferentes custos e características, diferem em termos de vazão na rede, relação sinal-ruído (SNR), taxa de entrega e nú-

mero de pacotes perdidos. Os resultados obtidos através de extensivos experimentos práticos permitiram uma compreensão e uma análise de desempenho das redes em malha com uso dos protocolos OpenFlow, B.A.T.M.A.N, AODV, HWMP em cenários reais.

A utilização de múltiplas interfaces possibilitou a adoção da arquitetura baseada em OpenFlow proposta por (DELY; KASSLER; BAYER, 2011), discutido na seção 2.4.2. Essa arquitetura permitiu um controle flexível no roteamento de pacotes da rede em malha criada e disponibilizada na instituição IFCE Aracati. A arquitetura combina os benefícios do OpenFlow (encaminhamento de pacotes flexível) e WMNs (auto-organizáveis, auto-configuráveis e auto-curáveis). Por meio dessa arquitetura, o protocolo OpenFlow foi implementado no modo de controle fora da banda, separando o plano de controle do plano de dados. O protocolo OLSR originalmente proposto por (DELY; KASSLER; BAYER, 2011) foi substituído pelo protocolo padrão 802.11s para ser utilizado na rede de controle. As medições realizadas confirmaram que o OpenFlow é uma tecnologia complementar interessante em relação aos protocolos tradicionais de roteamento em malha. Nos resultados obtidos na rede experimental, o OpenFlow atingiu um desempenho de 20% superior aos demais protocolos analisados, levando em consideração as estratégias de atribuição e múltiplas interfaces. Os gráficos apresentados na Figura 25 confirmam a superioridade do OpenFlow em termos de vazão, taxa de entrega, *jitter* e número de pacotes perdidos.

A partir dos resultados obtidos nos experimentos, concluiu-se que uma arquitetura baseada em OpenFlow com plano de controle fora da banda, conforme proposto por (DELY; KASSLER; BAYER, 2011) mostra um desempenho aceitável em comparação com os tradicionais protocolos como B.A.T.M.A.N, AODV e HWMP. Segundo (CHUNG et al., 2013), a abordagem de realizar o plano de controle dentro da banda não é recomendada para implantações do OpenFlow sobre WMNs, devido a problemas com o driver da interface sem fio e a implementação do OpenFlow. Outros benefícios que podem ser consideradas para a implantação do OpenFlow em uma WMN são a confiabilidade, o desempenho e o uso eficiente dos recursos. No entanto, o controlador OpenFlow torna-se um único ponto de falha no sistema, se ocorrer algum problema no servidor toda a rede para de funcionar. A utilização de outros protocolos de roteamento sob o switch ou roteador OpenFlow podem degradar o desempenho da WMN (CHUNG et al., 2013). Por fim, o uso de uma WMN secundária para realizar o controle de tráfego pode levar a um uso ineficiente do espectro e dos recursos sem fio, que podem ser utilizados para transmitir mais dados. Mesmo com essas restrições em mente, neste trabalho é recomendado o uso do OpenFlow como uma solução eficiente e de baixo custo, para realizar diferentes tarefas de comutação e encaminhamento de pacotes na WMN. Por exemplo, o OpenFlow pode ser usado como um sistema de monitoramento, gerenciamento de mobilidade ou controle de admissão de rede.

Para trabalhos futuros é proposto uma pesquisa para o desenvolvimento de novas ferramentas para auxiliar o gerenciamento de redes baseadas em OpenFlow, envolvendo ferramentas para a análise de métricas como a Indicação de Força do Sinal Recebido (*Received Signal Strength Indication* - RSSI) para otimização de redes em malha com dispositivos heterogêneos. É proposto também, um estudo em um cenário real empregando o conceito da futura geração de redes de computadores, conhecida como a Internet das Coisas (*Internet of Things* - IoT). Nesse novo cenário de IoT haverá diversos dispositivos heterogêneos como *desktops*, *notebooks*, *smartphones*, *tablets*, sensores, etc. Todos esses dispositivos estarão conectados e trocando informações entre si. O estudo das redes em malha no contexto de IoT permitirá um estudo mais aprofundado e trará um melhor entendimento das WMNs composta por dispositivos heterogêneos, além de poder contribuir com melhorias para as redes do futuro.

REFERÊNCIAS

- ABUHMIDA, M.; RADHAKRISHNAN, K.; WELLS, I. Performance evaluation of mobile ad hoc routing protocols on wireless sensor networks for environmental monitoring. In: IEEE. *Modelling and Simulation (UKSim), 2015 17th UKSim-AMSS International Conference on*. [S.l.], 2015. p. 544–548. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 32.
- AGARWAL, S.; BANSAL, S.; SIDDIQUI, A. S. Performance analysis of reactive, proactive and hybrid routing protocol used in petroleum tank over network control systems. In: SPRINGER. *Proceeding of International Conference on Intelligent Communication, Control and Devices*. [S.l.], 2017. p. 367–374. Citado na página 43.
- AKYILDIZ, I. F.; WANG, X.; WANG, W. Wireless mesh networks: a survey. *Computer networks*, Elsevier, v. 47, n. 4, p. 445–487, 2005. Citado 6 vezes nas páginas 18, 31, 32, 36, 37 e 39.
- AL-SAAD, A. et al. Routing Protocol for Heterogeneous Wireless Mesh Networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, v. 65, n. 12, Dec 2016. ISSN 0018-9545. Citado na página 15.
- AL-SHABIBI, M. M. A. *POX Wiki - Open Networking Lab - Confluence*. <https://openflow.stanford.edu/display/ONL/POX+Wiki>. Último acesso em: Março, 2017. 2017. Disponível em: <<https://openflow.stanford.edu/display/ONL/POX+Wiki>>. Citado na página 58.
- ALI, A. K. S.; KULKARNI, U. Comparing and analyzing reactive routing protocols (aodv, dsr and tora) in qos of manet. In: IEEE. *Advance Computing Conference (IACC), 2017 IEEE 7th International*. [S.l.], 2017. p. 345–348. Citado 2 vezes nas páginas 47 e 48.
- ALI, T. E.; DULAIMI, L. A. K. al; MAJEED, Y. E. Review and performance comparison of vanet protocols: Aodv, dsr, olsr, dymo, dsdv & zrp. In: IEEE. *Multidisciplinary in IT and Communication Science and Applications (AIC-MITCSA), Al-Sadeq International Conference on*. [S.l.], 2016. p. 1–6. Citado na página 52.
- ANAS, N. M. et al. Performance analysis of outdoor wireless mesh network using batman advanced. In: IEEE. *Software Engineering, Artificial Intelligence, Networking and Parallel/Distributed Computing (SNPD), 2015 16th IEEE/ACIS International Conference on*. [S.l.], 2015. p. 1–4. Citado na página 45.
- AVELAR, E. et al. Interoperability Issues on Heterogeneous Wireless Communication for Smart Cities. *Computer Communications*, v. 58, 2015. ISSN 0140-3664. Citado na página 60.
- 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.
- BRITO, I. et al. Openwimesh: um framework para redes mesh sem fio definidas por software. *32th Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC)*, p. 413–426, 2014. Citado 3 vezes nas páginas 15, 17 e 65.

- BRITO, I. V. da S. Suporte a mobilidade em redes mesh sem fio definidas por software. 2016. Citado na página 56.
- CAMPOS, M. B. Um ambiente flexível para detecção e prevenção flexível de ataques em redes openflow/sdn. Universidade Salvador, 2017. Citado na página 17.
- 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 na página 62.
- CARVALHO, D. F. *AIGA: um ambiente integrado de gerência para redes em malha sem fio IEEE 802.11 s*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2014. Citado na página 34.
- CESANA, M. et al. C-VeT the UCLA campus Vehicular Testbed: Integration of VANET and Mesh networks. In: *Proc. IEEE European Wireless Conference*. [S.l.: s.n.], 2010. Citado na página 63.
- CHUNG, J. et al. Experiences and challenges in deploying openflow over real wireless mesh networks. *IEEE Latin America Transactions*, IEEE, v. 11, n. 3, p. 955–961, 2013. Citado 3 vezes nas páginas 65, 87 e 91.
- CLAUSEN, T.; JACQUET, P. *Optimized link state routing protocol (OLSR)*. [S.l.], 2003. Citado na página 17.
- COMER, D. E. *Redes de Computadores e Internet-6*. [S.l.]: Bookman Editora, 2016. Citado na página 39.
- CONSORTIUM, I. I. W. I. et al. Evolutionary and disruptive visions towards ultra-high capacity networks. *White paper, Version*, v. 1, 2014. Citado na página 18.
- COSTA, L. C. et al. Performance evaluation of openflow data planes. In: IEEE. *Integrated Network and Service Management (IM), 2017 IFIP/IEEE Symposium on*. [S.l.], 2017. p. 470–475. Citado 2 vezes nas páginas 65 e 85.
- DECRISTOFARO, M. A.; LANSLOWNE, 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 3 vezes nas páginas 64, 87 e 90.
- DELY, P.; KASSLER, A.; BAYER, N. Openflow for wireless mesh networks. In: IEEE. *Computer Communications and Networks (ICCCN), 2011 Proceedings of 20th International Conference on*. [S.l.], 2011. p. 1–6. Citado 5 vezes nas páginas 17, 59, 65, 86 e 91.
- DERHAMY, H.; ELIASSON, J.; DELSING, J. lot interoperability-on-demand and low latency transparent multi-protocol translator. *IEEE Internet of Things Journal*, IEEE, 2017. Citado na página 42.
- Devolvo. *dLAN® Powerline - Home network - so simple - devolo AG*. <http://www.devolo.com>. Último acesso em: Agosto, 2017. 2017. Disponível em: <<http://www.devolo.com>>. Citado na página 36.

- FERRONATO, J. J.; TRENTIN, M. A. S. Analysis of routing protocols olsr, aodv and zrp in real urban vehicular scenario with density variation. *IEEE Latin America Transactions*, IEEE, v. 15, n. 9, p. 1727–1734, 2017. Citado 3 vezes nas páginas 43, 48 e 49.
- Fluidmesh. *Wireless Mesh Networks*. <https://www.fluidmesh.com>. Último acesso em: Agosto, 2017. 2017. Disponível em: <<https://www.fluidmesh.com>>. Citado na página 38.
- GOYAL, P. Simulation study of comparative performance of aodv, olsr, fsr & lar, routing protocols in manet in large scale scenarios. In: IEEE. *Information and Communication Technologies (WICT), 2012 World Congress on*. [S.l.], 2012. p. 283–286. Citado 2 vezes nas páginas 52 e 53.
- GROUP, I. . W. et al. 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 6: Wireless access in vehicular environments. *IEEE Std*, v. 802, n. 11, 2010. Citado na página 22.
- GUPTA, B. K. et al. Dynamic routing algorithm in wireless mesh network. *International Journal of Grid and Utility Computing*, Inderscience Publishers (IEL), v. 8, n. 1, p. 53–60, 2017. Citado na página 16.
- HAQUE, I. T.; ABU-GHAZALEH, N. Wireless software defined networking: A survey and taxonomy. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, IEEE, v. 18, n. 4, p. 2713–2737, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 55 e 57.
- HERRMANN, P.; MEYER, U. Batman handover extension for routing nodes in infrastructure wmn. In: IEEE. *Local Computer Networks (LCN), 2016 IEEE 41st Conference on*. [S.l.], 2016. p. 680–687. Citado 2 vezes nas páginas 45 e 46.
- HERTIANA, S. N.; KURNIAWAN, A. et al. Performance analysis of flow-based routing in software-defined networking. In: IEEE. *Communications (APCC), 2016 22nd Asia-Pacific Conference on*. [S.l.], 2016. p. 579–585. Citado na página 17.
- HOU, R.; LUI, K.-S.; LI, J. Routing in multi-radio multi-channel multi-hop wireless mesh networks with bandwidth guarantees. In: IEEE. *Vehicular Technology Conference (VTC Spring), 2011 IEEE 73rd*. [S.l.], 2011. p. 1–5. Citado na página 30.
- HUANG, H. et al. Software-defined wireless mesh networks: architecture and traffic orchestration. *IEEE network*, IEEE, v. 29, n. 4, p. 24–30, 2015. Citado 3 vezes nas páginas 55, 56 e 58.
- HUAWEI. *5G: A technology vision*. <https://www.huawei.com/en/>. Último acesso em: Julho, 2017. 2017. Disponível em: <<https://www.huawei.com/en/>>. Citado na página 18.
- IEEE. *IEEE - The world's largest technical professional organization dedicated to advancing technology for the benefit of humanity.* <https://www.ieee.org/index.html>. Último acesso em: Julho, 2017. 2017. Disponível em: <<https://www.ieee.org/index.html>>. Citado na página 25.

- 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 5 vezes nas páginas 31, 34, 54, 55 e 59.
- INDEX, C. V. N. Global mobile data traffic forecast update, 2015–2020 white paper. link: <http://goo.gl/yITuVx>, 2016. Citado na página 18.
- INTEL. *What to Do If You're Unable to Connect at 300 Mbps with Your 802.11n.* <https://www.intel.co.uk>. Último acesso em: Agosto, 2017. 2017. Disponível em: <<https://www.intel.co.uk>>. Citado na página 74.
- iPerf. *iPerf - The Ultimate Speed Test Tool for TCP, UDP and SCTP.* <http://www.iperf.fr>. Último acesso em: Agosto, 2017. 2017. Disponível em: <<http://www.iperf.fr>>. Citado 2 vezes nas páginas 69 e 77.
- 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 3 vezes nas páginas 16, 60 e 76.
- JAIN, R. *The art of computer systems performance analysis: techniques for experimental design, measurement, simulation, and modeling.* [S.l.]: John Wiley & Sons, 1990. Citado na página 77.
- JANA, S.; SINGHA, S.; SINGHA, J. A simulation based performance analysis of proactive, reactive and hybrid routing protocol. In: IEEE. *Computer, Electrical & Communication Engineering (ICCECE), 2016 International Conference on.* [S.l.], 2016. p. 1–10. Citado na página 63.
- JOHNSON, D.; NTLATLAPA, N.; AICHELE, C. Simple pragmatic approach to mesh routing using batman. 2008. Citado na página 16.
- KAUR, P.; KAUR, D.; MAHAJAN, R. A review and comparison of aodv, dsr and zrp routing protocols on the basis of qualitative metrics. In: IEEE. *Computing for Sustainable Global Development (INDIACom), 2016 3rd International Conference on.* [S.l.], 2016. p. 3262–3266. Citado na página 52.
- KÜHLMORGEN, S.; FESTAG, A.; FETTWEIS, G. Impact of decentralized congestion control on contention-based forwarding in vanets. In: IEEE. *World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM), 2016 IEEE 17th International Symposium on A.* [S.l.], 2016. p. 1–7. Citado na página 38.
- KUROSE, J. F.; ROSS, K. W. *Redes de Computadores—Uma Abordagem Top-Down.* 7. Tese (Doutorado) — ed.[s. L.]: Pearson, 2016. Citado 9 vezes nas páginas 22, 23, 24, 25, 26, 28, 30, 39 e 81.
- LABRAOUI, M.; BOC, M.; FLADENMULLER, A. Self-configuration mechanisms for sdn deployment in wireless mesh networks. In: IEEE. *A World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM), 2017 IEEE 18th International Symposium on.* [S.l.], 2017. p. 1–4. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 32.

- LIN, Y.; WANG, P.; MA, M. Intelligent transportation system (its): Concept, challenge and opportunity. In: IEEE. *Big Data Security on Cloud (BigDataSecurity), IEEE International Conference on High Performance and Smart Computing, (HPSC) and IEEE International Conference on Intelligent Data and Security (IDS), 2017 IEEE 3rd International Conference on*. [S.l.], 2017. p. 167–172. Citado na página 38.
- MAHLER, K. et al. Measurement-based wideband analysis of dynamic multipath propagation in vehicular communication scenarios. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, IEEE, v. 66, n. 6, p. 4657–4667, 2017. Citado na página 24.
- Metering. *Tata Consulting develops smart sensors to save energy | Metering.com*. <https://www.metering.com>. Último acesso em: Agosto, 2017. 2016. Disponível em: <<https://www.metering.com>>. Citado na página 37.
- MISRA, P. *Routing Protocols for Ad Hoc Mobile Wireless Networks*. <https://www.intel.co.uk>. Último acesso em: Agosto, 2017. 2017. Disponível em: <<http://www.cse.wustl.edu>>. Citado 2 vezes nas páginas 44 e 45.
- 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 na página 76.
- NATARAJU, A.; MAHESHAPPA, H.; DEVKATTE, A. Performance analysis of hwmp protocol for wireless mesh networks using ns3. In: IEEE. *Region 10 Conference (TENCON), 2016 IEEE*. [S.l.], 2016. p. 1593–1598. Citado na página 55.
- 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 na página 16.
- 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 3 vezes nas páginas 16, 26 e 58.
- 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 76.
- OLIVEIRA, C. T. de. *Conception et optimisation de performance inter-couches dans les réseaux maillés radio multi-canal multi-interface*. Tese (Doutorado) — Université de Grenoble, 2012. Citado na página 21.
- OPENWRT. *OpenWRT - Wireless Freedom*. <http://www.openwrt.org>. Último acesso em: Agosto, 2017. 2017. Disponível em: <<http://www.openwrt.org>>. Citado 2 vezes nas páginas 70 e 72.
- PERKINS, C.; BELDING-ROYER, E.; DAS, S. *Ad hoc on-demand distance vector (AODV) routing*. [S.l.], 2003. Citado na página 16.
- PRAKASH, S.; SWAROOP, A. A brief survey of blackhole detection and avoidance for zrp protocol in manets. In: IEEE. *Computing, Communication and Automation (ICCCA), 2016 International Conference on*. [S.l.], 2016. p. 651–654. Citado na página 51.

- PRATHAMA, M. P.; HERTIANA, S. N. et al. An analysis comparison of aodv uu and batmand performance for mobile ad-hoc network. In: IEEE. *Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE), 2013 International Conference on*. [S.l.], 2013. p. 260–265. Citado na página 87.
- RAMADHANI, P. E. et al. Performance evaluation of hybrid wireless mesh protocol (hwmp) on vanet using vanetmobisim. In: IEEE. *Computational Intelligence and Cybernetics (CYBERNETICSCOM), 2016 International Conference on*. [S.l.], 2016. p. 41–46. Citado na página 54.
- 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 60.
- RETHFELDT, M. et al. Integration of qos parameters from ieee 802.11 s wlan mesh networks into logical p2p overlays. In: IEEE. *Computer and Information Technology; Ubiquitous Computing and Communications; Dependable, Autonomic and Secure Computing; Pervasive Intelligence and Computing (CIT/IUCC/DASC/PICOM), 2015 IEEE International Conference on*. [S.l.], 2015. p. 1170–1177. Citado na página 33.
- RIVOIRARD, L. et al. Performance evaluation of aodv, dsr, grp and olsr for vanet with real-world trajectories. In: IEEE. *ITS Telecommunications (ITST), 2017 15th International Conference on*. [S.l.], 2017. p. 1–7. Citado 4 vezes nas páginas 43, 44, 46 e 47.
- ROBERTAZZI, T. G. Wireless networks. In: *Introduction to Computer Networking*. [S.l.]: Springer, 2017. p. 35–60. Citado na página 36.
- SAADE, D. et al. Redes em malha: Solução de baixo custo para popularização do acesso à internet no brasil. *XXV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações-SBrT*, p. 1–6, 2007. Citado na página 63.
- 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 na página 15.
- SCHILLER, F. S. B. *Redes em Malha*. <https://www.gta.ufrj.br/grad/felipe>. Último acesso em: Julho, 2017. 2017. Disponível em: <<https://www.gta.ufrj.br/grad/felipe>>. Citado na página 16.
- SEITHER, D.; KÖNIG, A.; HOLLICK, M. Routing performance of wireless mesh networks: A practical evaluation of batman advanced. In: IEEE. *Local Computer Networks (LCN), 2011 IEEE 36th Conference on*. [S.l.], 2011. p. 897–904. Citado na página 64.
- SERRANO, P. et al. Experimenting With Commodity 802.11 Hardware: Overview and Future Directions. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, v. 17, n. 2, 2015. ISSN 1553-877X. Citado na página 61.
- SHARMILA, S.; SHANTHI, T. A survey on wireless ad hoc network: Issues and implementation. In: IEEE. *Emerging Trends in Engineering, Technology and Science (ICETETS), International Conference on*. [S.l.], 2016. p. 1–6. Citado na página 30.

- SHIVAHARE, B. D. et al. Performance metrics for table driven and on demand routing protocols in mobile adhoc network using ns-2. In: IEEE. *Futuristic Trends on Computational Analysis and Knowledge Management (ABLAZE), 2015 International Conference on*. [S.l.], 2015. p. 305–308. Citado 2 vezes nas páginas 42 e 43.
- 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 15.
- SIVAKUMAR, N. R.; CHELLIAH, C. Simulation and evaluation of the performance on probabilistic broadcasting in fsr (fisheye state routing) routing protocol based on random mobility model in manet. In: IEEE. *Computational Intelligence, Communication Systems and Networks (CICSyN), 2012 Fourth International Conference on*. [S.l.], 2012. p. 371–376. Citado na página 53.
- SOORIYAARACHCHI, S. J.; FERNANDO, W.; GAMAGE, C. Evaluation of scalability of hybrid wireless mesh protocol in ieee 802.11. In: IEEE. *Advances in ICT for Emerging Regions (ICTer), 2015 Fifteenth International Conference on*. [S.l.], 2015. p. 152–159. Citado 2 vezes nas páginas 63 e 64.
- TANAB, M. E.; HAMOUDA, W. A scalable overload control algorithm for massive access in machine-to-machine networks. In: IEEE. *Communications (ICC), 2017 IEEE International Conference on*. [S.l.], 2017. p. 1–6. Citado na página 18.
- TANENBAUM, A. S. *Redes de computadores. São Paulo: Ed 5*. [S.l.]: Pearson Prentice Hall, 2011. Citado 3 vezes nas páginas 39, 40 e 41.
- TEIXEIRA, E. R. D. *Wireless Mesh Networks.. www.teleco.com.br. Último acesso em: Julho, 2017*. 2004. Disponível em: <www.teleco.com.br>. Citado na página 33.
- TIWARI, A.; KAUR, I. Performance evaluaron of energy efficient for manet using aodv routing protocol. In: IEEE. *Computational Intelligence & Communication Technology (CICT), 2017 3rd International Conference on*. [S.l.], 2017. p. 1–5. Citado na página 49.
- TRAGOS, E. Z. et al. Automatically configured, optimised and qos aware wireless mesh networks. In: IEEE. *Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), 2010 IEEE 21st International Symposium on*. [S.l.], 2010. p. 2081–2086. Citado na página 32.
- TSOURI, G. R.; ZAMBITO, S. R.; VENKATARAMAN, J. On the benefits of creeping wave antennas in reducing interference between neighboring wireless body area networks. *IEEE transactions on biomedical circuits and systems*, IEEE, v. 11, n. 1, p. 153–160, 2017. Citado na página 23.
- WU, W. et al. Joint node scheduling and radio switching for energy efficiency in multi-radio wlan mesh networks. In: IEEE. *Moile Ad-hoc and Sensor Networks (MSN), 2015 11th International Conference on*. [S.l.], 2015. p. 208–215. Citado na página 33.
- YADAV, M.; GUPTA, S. K.; SAKET, R. Multi-hop wireless ad-hoc network routing protocols-a comparative study of dsdv, tora, dsr and aodv. In: IEEE. *Electrical,*

Electronics, Signals, Communication and Optimization (EESCO), 2015 International Conference on. [S.l.], 2015. p. 1–5. Citado na página 50.

YAQOOB, I. et al. Internet of things architecture: Recent advances, taxonomy, requirements, and open challenges. *IEEE Wireless Communications*, IEEE, v. 24, n. 3, p. 10–16, 2017. Citado na página 15.

YUAN, D.; KANHERE, S. S.; HOLLICK, M. Instrumenting wireless sensor networks—a survey on the metrics that matter. *Pervasive and Mobile Computing*, Elsevier, v. 37, p. 45–62, 2017. Citado na página 16.

ZIKRIA, Y. B.; NOSHEEN, S.; KIM, S. W. Quality of service analysis for multimedia traffic using dsr, aodv and tora over wi-media ultra wide band. In: IEEE. *Applied Sciences and Technology (IBCAST), 2015 12th International Bhurban Conference on.* [S.l.], 2015. p. 539–546. Citado na página 51.