

VITOR GOMES RAMALHO

**UMA COMPARAÇÃO ENTRE OS PROTOCOLOS DE
ROTEAMENTOS MR-LQSR E AODV**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

**VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2014**

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

R165c
2014 Ramalho, Vítor Gomes, 1984-
Uma comparação entre os protocolos de rodeamentos
MR-LQSR e AODV / Vítor Gomes Ramalho. – Viçosa, MG,
2014.
ix, 59f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Carlos de Castro Goulart.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.
Referências bibliográficas: f.57-59.

1. Roteadores (Rede de Computador). 2. Rádio Cognitivo.
3. MR-LQSR. 4. AODV. I. Universidade Federal de Viçosa.
Departamento de Informática. Programa de Pós-graduação em
Ciência da Computação. II. Título.

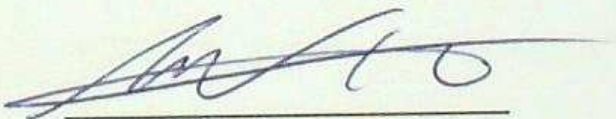
CDD 22. ed. 004.6

VITOR GOMES RAMALHO

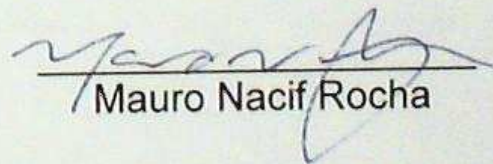
**UMA COMPARAÇÃO ENTRE OS PROTOCOLOS DE
ROTEAMENTOS MR-LQSR E AODV**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

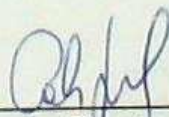
APROVADA: 20 de janeiro de 2014.



André Gomes Torres



Mauro Nacif Rocha



Carlos de Castro Goulart
(Orientador)

Aos meus pais, Marinelson e Marlene, pelo apoio incondicional e incentivo para vencer mais essa batalha.

Ao orientador, Carlos Goulart, pela sabedoria e ensino que foi doado durante o mestrado.

À Lorena, pelo carinho e companheirismo.

À minha irmã, Nair, pela compreensão e amizade.

SUMÁRIO

Lista de Figuras	v
Lista de Tabelas	vii
RESUMO.....	viii
ABSTRACT	ix
1. Introdução	1
1.1 O Problema e Sua Importância	1
1.2 Hipótese	2
1.3 Objetivos	2
1.4 Organização do Texto	2
2. Redes Sem Fio	4
2.1 Variações das Redes Sem Fio	4
2.1.1 WPAN – Wireless Personal Area Network	5
2.1.2 WLAN – Wireless Local Area Network.....	7
2.1.3 WMAN – Wireless Metropolitan Area Network	8
2.1.4 WWAN – Wireless Wide Area Network	9
2.2 Redes Locais Sem Fio.....	10
2.2.1 A Família IEEE 802.11	11
2.3 Rede de Rádio Cognitivo.....	15
2.3.1 Rádio Cognitivo	15
2.3.2 Redes Cognitivas.....	16

3. Os Protocolos AODV, DSR E MR-LQSR	25
3.1 Protocolo AODV	26
3.1.1 Descoberta de Rotas	27
3.1.2 Manutenção de Rotas	29
3.2 Protocolo DSR	29
3.2.1 Descoberta de Rotas	30
3.2.2 Manutenção de Rotas	32
3.3 Protocolo MR-LQSR	33
3.3.1 Cálculo da Métrica	34
4. Simulação e Resultados	39
4.1 Contextualização	39
4.2 Ambiente de Simulação	41
4.3 Cenário 1: Estação Experimental Remota	43
4.3.1 Resultados Obtidos.....	45
4.4 Cenário 2: Infraestrutura Para Aplicações Móveis	47
4.4.1 Resultados Obtidos – TCP.	50
4.4.2 Resultados Obtidos – UDP.....	52
5. Conclusões e Trabalhos Futuros	55
Referências Bibliográficas	57

LISTA DE FIGURAS

2.1	Tipos de redes sem fio	5
2.2	Exemplo de Scatternet	6
2.3	Tipos de comunicação em rede sem fio.....	8
2.4	Alcance dos rádios em uma rede ad hoc.....	8
2.5	Uso do espectro de frequência	17
2.6	Exemplo da topologia 802.22	18
2.7	Diagrama simplificado de agregação de canais.....	21
2.8	Estrutura geral do Super Quadro.....	23
2.9	Métodos de detecção rápida e detecção fina.....	24
3.1	Exemplo de comunicação em rede <i>ad hoc</i>	25
3.2	Descoberta de Rota no Protocolo AODV	28
3.3	Descoberta de Rota no Protocolo DSR.....	32
3.4	Exemplo de escolha do caminho no WCETT.....	38
4.1	Distribuição de Rede via Wi-Fi no Campus Viçosa.....	40
4.2	Arquitetura do Simulador CRCN	42
4.3	Cenário 1	43
4.4	Total de Pacotes Transmitidos.....	46
4.5	Porcentagem de Pacotes Entregues.....	46
4.6	Campus da UFV em Viçosa	47

4.7	Cenário 2 – 20 nós	48
4.8	Cenário 2 – 50 nós	49
4.9	Total de Pacotes Transmitidos – TCP	50
4.10	Pacotes de Controle – TCP	51
4.11	Percentagem de Pacotes Entregues – TCP	52
4.12	Percentagem de Pacotes Entregues – UDP	53
4.13	Pacotes de Controle – UDP	53

LISTA DE TABELAS

2.1	Especificações de capacidade e cobertura da WRAN	19
4.1	Área Física da UFV	39
4.2	Características da Simulação do Cenário 1.....	44
4.3	Características da Simulação do Cenário 2.....	49

RESUMO

RAMALHO, Vitor Gomes, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, janeiro de 2014.
Uma comparação entre os protocolos de roteamentos MR-LQSR e AODV.
Orientador: Carlos de Castro Goulart.

Este trabalho descreve uma comparação entre o protocolo de roteamento, com e sem a utilização de rádio cognitivo, MR-LQSR (*Multi-Radio Link-Quality Source Routing*), indicado para redes de rádio cognitivo e o protocolo de roteamento AODV (*Ad Hoc On-Demand Distance Vector*), utilizado em redes sem fio padrão IEEE 802.11. A comparação foi feita através de simulações, em diferentes cenários, verificando o quão melhor um protocolo é em relação ao outro. A comparação foi feita utilizando o simulador CRCN (*Cognitive Radio Cognitive Network*) que é baseado no NS-2 (Network Simulator 2). Os cenários foram especificados baseando-se em situações reais da Universidade Federal de Viçosa. Os resultados mostraram a superioridade do protocolo MR-LQSR em relação ao AODV, para os cenários estudados, principalmente quando a rede possui um maior número de nós.

ABSTRACT

RAMALHO, Vitor Gomes, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, January, 2014. **A comparison between routing protocols MR-LQSR e AODV.** Adviser: Carlos de Castro Goulart.

This work describes a comparison between the routing protocol MR-LQSR (*Multi-Radio Link-Quality Source Routing*), indicated for cognitive radio networks, and the routing protocol AODV (Ad Hoc On-Demand Distance Vector), used in wireless networks IEEE 802.11 standard. The comparison was done through simulations in different scenarios, checking how much better one protocol is in regard to the other. The comparison was made using the simulator CRCN (Cognitive Cognitive Radio Network) which is based on NS-2 (Network Simulator 2). The scenarios were specified based on real situations observed in the Federal University of Viçosa. The results show the superiority of the protocol MR-LQSR with respect to AODV for the investigated scenarios, especially when the network has a greater number of nodes.

1. Introdução

A rede mundial de computadores ocupa um espaço cada vez maior no dia-a-dia pessoal e profissional dos seres humanos, sendo inquestionáveis os benefícios da sua utilização na sociedade atual. A partir de um dispositivo com acesso à Internet, podem ser realizadas diversas atividades, tais como, pagamentos de contas, compras, geração de extrato bancário, envio e recepção de e-mail, comunicação entre usuários on-line, entre outras. Além disso, a Internet é um instrumento valioso para manter-se informado e atualizado em todas as áreas do conhecimento. A quantidade imensurável de informação disponível tem implicações sociais, políticas e educacionais. Por esses benefícios, entre outros, o acesso à Internet se torna essencial para toda a população.

1.1 O Problema e Sua Importância

Apesar de sua grande importância, o acesso à Internet banda larga não está disponível para todos. Cidades do interior, regiões rurais e locais afastados dos centros das grandes e médias cidades não possuem Internet banda larga. A baixa taxa demográfica e a falta de incentivos governamentais inviabilizam os investimentos das empresas fornecedoras de acesso à Internet. Um contraste perceptível é em relação aos grandes centros, onde a Internet é rápida e com custo acessível.

Para fazer frente a esse problema, e levar Internet banda larga de baixo custo a regiões remotas como fazendas e vilas rurais, pode-se fazer uso das redes sem fio e redes de rádio cognitivo. As redes cognitivas são capazes de otimizar a utilização do espectro de frequência, além de conseguirem cobrir uma maior área com o sinal de Internet. O padrão 802.22 (*WRAN – Wireless Regional Area Network*), publicado como padrão oficial IEEE em 01 de Julho de 2011, é um exemplo de rede de rádio cognitivo,

que possui um grupo de trabalho onde as informações gerais podem ser obtidas [IEEE, 2011a]. A Rede Sem Fio Regional ou Rural opera em uma faixa de frequência que permite abranger, tipicamente, uma área circular de 20 a 40 quilômetros da base de transmissão, podendo atingir uma distância de até 100 quilômetros em casos extremos. Atualmente a tecnologia escolhida pela maioria dos provedores para levar Internet a locais distantes, onde é inviável a utilização de cabos, é o 802.11 (*Wi-Fi*), tecnologia que não foi criada com esse objetivo.

1.2 Hipótese

As redes de rádio cognitivo podem tornar mais eficiente a disseminação de Internet em locais distantes, do que o padrão 802.11, atualmente utilizado.

1.3 Objetivos

O trabalho possui como objetivo geral, fazer uma comparação entre uma rede de rádio cognitivo que utiliza o protocolo de roteamento MR-LQSR (*Multi-Radio Link-Quality Source Routing*) e uma rede sem fio não cognitiva que utiliza o protocolo de roteamento AODV (*Ad Hoc On-Demand Distance Vector*).

O objetivos específicos são verificar, através de simulações, para diferentes cenários, o quão melhor uma rede usando protocolo de roteamento para rádio cognitivo é em relação a outra utilizando o protocolo de roteamento convencional para redes sem fio, além de descobrir, em quais cenários se justifica a utilização de um determinado tipo de rede em relação ao outro.

1.4 Organização do Texto

Este trabalho está organizado da seguinte forma: no Capítulo 2, são apresentados os conceitos sobre as redes sem fio e suas variações, a família do padrão IEEE 802.11, redes de rádio cognitivo, em especial o padrão IEEE 802.22 que são as redes sem fio regionais, além do rádio cognitivo; o Capítulo 3 aborda os protocolos de roteamento estudados e utilizados no trabalho; o Capítulo 4 são apresentadas as características das simulações, dos cenários definidos, do simulador utilizado e os resultados obtidos; e, finalmente, no Capítulo 5 são apresentadas as conclusões desse trabalho e algumas possibilidades de trabalhos futuros.

2. Redes Sem Fio

As redes sem fio são redes de computadores onde não se utiliza um meio físico para transportar os dados. Utiliza-se propagação de radiação eletromagnética, como radiofrequência ou infravermelho, para transportar os dados entre os computadores e/ou roteadores.

A primeira rede local sem fio, que obteve sucesso, foi desenvolvida por Abramson e seus colegas na Universidade do Havai, recebendo o nome de sistema ALOHA [Abramson, 1970]. Esta rede, surgiu da necessidade de se interligar computadores espalhados em algumas ilhas com o computador central na ilha de Oahu. O sistema ALOHA foi capaz de resolver o problema de alocação de canais, o que até então era umas das grandes dificuldades dos pesquisadores. Embora o trabalho de Abramson, usasse radiofrequência, a ideia básica do sistema ALOHA pode ser aplicada em qualquer sistema em que usuários descoordenados estão competindo pelo uso de um único canal compartilhado. O CSMA (*Carrier Sense Multiple Access*), criado por Abramson, foi a primeira versão do protocolo de controle de acesso ao meio, que visa diminuir a probabilidade de colisões em redes baseadas na transmissão de pacotes e que compartilha o mesmo meio físico de transmissão. O sistema ALOHA serviu como inspiração para os engenheiros do *Xerox Parc* desenvolver o padrão Ethernet.

2.1 Variações das Redes Sem Fio

As redes sem fio são classificadas de acordo com sua área de abrangência. São basicamente quatro classificações: redes pessoais ou de curta distância WPAN (*Wireless Personal Area Network*), redes locais sem fio WLAN (*Wireless Local Area Network*), redes metropolitanas sem fio WMAN (*Wireless Metropolitan Area Network*) e redes

geograficamente distribuídas ou de longa distância sem fio WWAN (*Wireless Wide Area Network*).

Na Figura 2.1 pode-se observar a variação da cobertura geográfica dos diferentes tipos de redes apresentados até o momento.

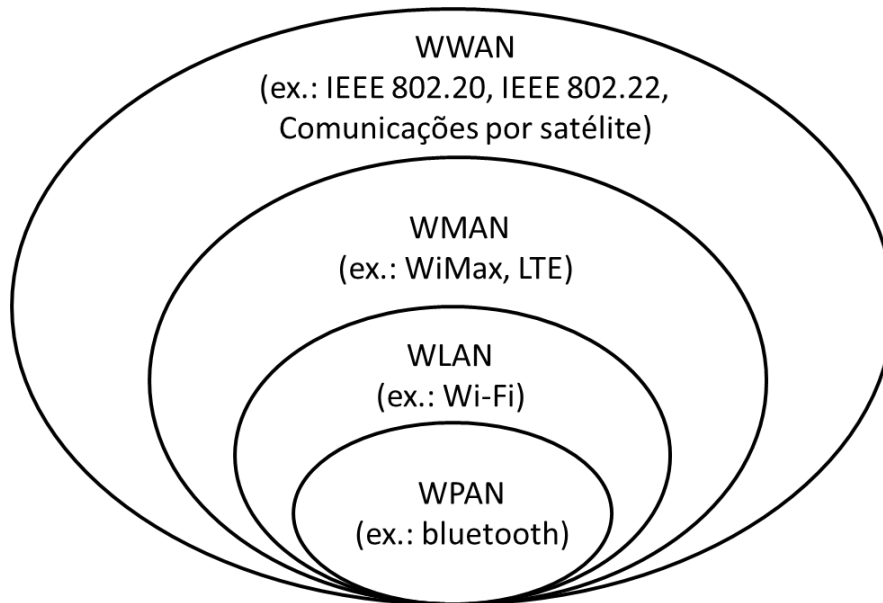


Figura 2.1: Tipos de redes sem fio. Fonte (adaptado): (Selada, 2008)

2.1.1 WPAN – Wireless Personal Area Network

Uma rede pessoal sem fio atinge normalmente até 10 metros de distância. Servem principalmente para interligar periféricos com a tecnologia *bluetooth*. Existem outras tecnologias que se enquadram nas redes sem fio pessoal, como o *ZigBee* e a comunicação por infravermelho. O protocolo de comunicação *bluetooth* foi criada com o objetivo de eliminar os fios que interligam os periféricos, como computador, impressora e teclado. A velocidade de comunicação pode atingir até 2 Mbps. Com o objetivo de padronizar a tecnologia e fazer com que todos os aparelhos que utilizem o *bluetooth* se comuniquem, um grupo de trabalho foi criado para esse fim pelo IEEE, denominado IEEE 802.15.1 [IEEE, 2011e]. O *bluetooth* surgiu de um consórcio, formado por cinco empresas (L. M. Ericsson, IBM, Intel, Nokia e Toshiba), em 1994, para o desenvolvimento de uma tecnologia capaz de interligar telefones móveis a outros

telefones e periféricos. Em 2002, o grupo de trabalho IEEE aprovou a primeira versão do padrão *bluetooth*, IEEE 802.15.1 tendo como base a documentação gerada pelo consorcio [Tanenbaum and Wetherall, 2011].

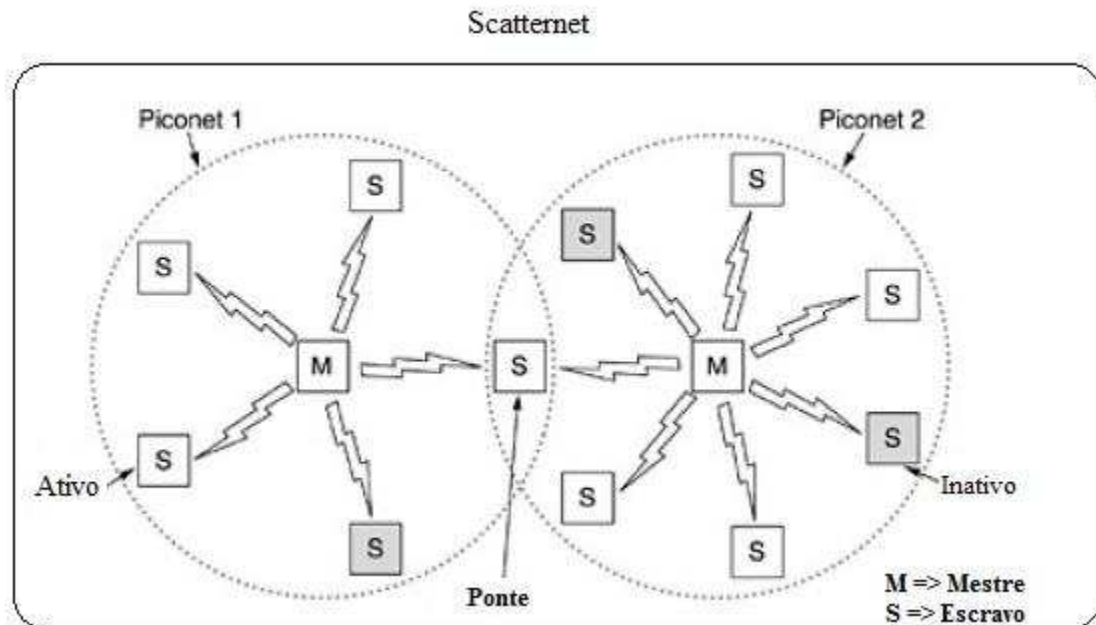


Figura 2.2: Exemplo de *Scatternet*.
Fonte (adaptado): (Tanenbaum and Wetherall, 2011)

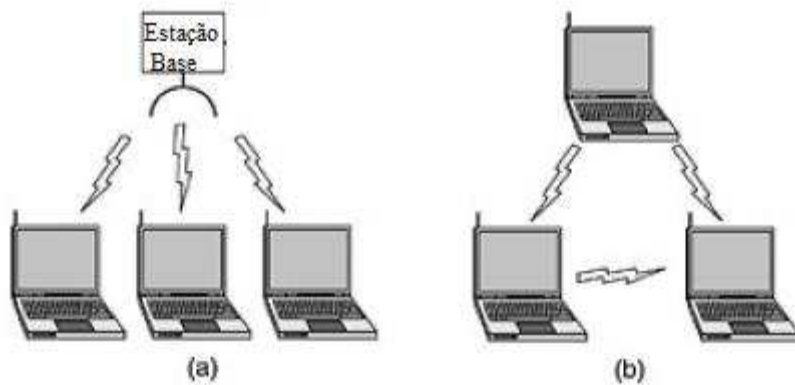
A comunicação utilizando o protocolo bluetooth é feita utilizando o conceito de Mestre/Escravo. O escravo é um dispositivo que apenas responde às solicitações do mestre, enquanto que o mestre é o dispositivo responsável por gerenciar a rede, onde toda a comunicação entre os escravos, obrigatoriamente passa pelo mestre. Um mestre pode ter até 7 nós escravos ativos em sua rede ou *Piconet*, e até 255 nós inativos. Os nós ou escravos inativos são enviados pelo mestre para um estado de baixa energia, com o intuito de diminuir o consumo da bateria. No estado inativo, o nó apenas responde a alguma solicitação do mestre, sendo incapaz de tomar qualquer iniciativa de comunicação. Um nó escravo pode está em duas *Piconets* ao mesmo tempo. A união de duas ou mais *Piconets* é chamado de *Scatternet*, como pode ser observado na Figura 2.2 [Tanenbaum and Wetherall, 2011].

2.1.2 WLAN – Wireless Local Area Network

O surgimento dos notebooks no final da década de 1980 e a evolução dos mesmos, principalmente na década de 1990, fez com que se aprimorassem as redes sem fio. Atualmente, dispositivos móveis com acesso às redes sem fio, tais como *tablets* e *smartphones*, são uma realidade. Com objetivo de evoluir as redes locais sem fio e permitir que a comunicação ocorresse entre produtos de fabricantes diferentes, a padronização se fez necessária. Em 1990, foi criado um comitê (*The Working Group for WLAN Standards*) com o objetivo de padronizar as redes sem fio. Para o avanço das redes sem fio, o novo padrão proposto teria que ser compatível com o padrão Ethernet [IEEE, 2011d], já existente no mercado, e em 1997 o comitê publicou o padrão 802.11 (WLAN – *Wireless Local Area Network*) [IEEE, 2011c], contribuindo assim para o sucesso total das redes sem fio.

As redes locais sem fio atingem uma área de cobertura maior que a WPAN, normalmente de 30 a 500 metros. A velocidade nominal de comunicação comumente utilizada é de 54Mbps para o padrão IEEE 802.11g. O padrão IEEE 802.11 (*wi-fi*) [IEEE, 2011c] é um exemplo desse tipo de rede.

A comunicação do padrão 802.11 pode ocorrer de duas maneiras. A primeira utiliza uma estação base ou ponto de acesso para gerenciar o tráfego da rede. Todos os pacotes gerados na rede passam pela estação base, que tem a responsabilidade de encaminhar os pacotes para seus destinatários. A segunda maneira, denominada de rede *ad hoc*, não utiliza uma estação base, ou seja, todos os computadores na rede podem transmitir diretamente ao seu destinatário, quando este se encontra na área de alcance do sinal de rádio ou com o auxílio de outros computadores intermediários, como pode ser observado na Figura 2.3. Outra diferença na comunicação do padrão 802.11 se refere ao alcance do rádio. Na comunicação onde se utiliza uma estação base, todos os computadores devem estar no raio de cobertura da estação base, para conseguir se comunicar. Enquanto que nas redes *ad hoc* essa exigência não se faz necessária, pois se o computador A, como é mostrado na Figura 2.4, quiser se comunicar com o computador C, que não está no seu raio de cobertura, mas existe o computador B, que consegue se comunicar com A e C. Logo o computador A pode utilizar o computador B para encaminhar seus pacotes até o computador C [Tanenbaum and Wetherall, 2011].



(a) Rede sem fio com uma estação base. (b) Rede ad hoc.

Figura 2.3: Tipos de comunicação em rede sem fio.

Fonte: (Tanenbaum and Wetherall, 2011)

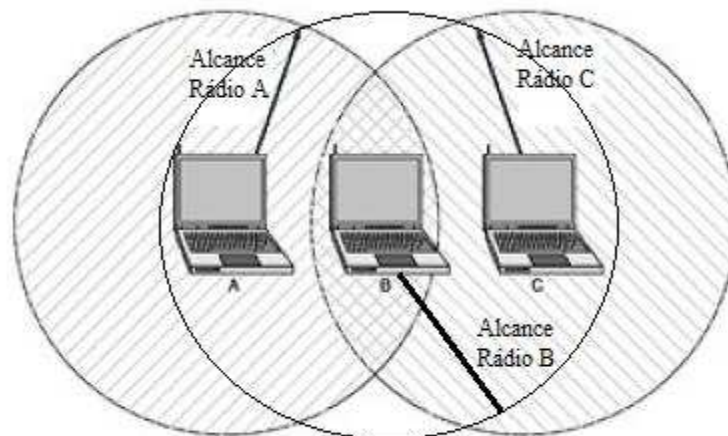


Figura 2.4: Alcance dos rádios em uma rede ad hoc.

Fonte (adaptado): (Tanenbaum and Wetherall, 2011).

Na seção 2.2 se aprofundará mais sobre os conceitos do padrão IEEE 802.11, além de apresentar suas principais derivações.

2.1.3 WMAN – Wireless Metropolitan Area Network

Uma rede metropolitana sem fio geralmente agrega várias redes locais atingindo grandes distâncias na cidade. Redes metropolitanas sem fio são utilizadas principalmente para fornecer Internet de banda larga a usuários que não têm acesso a outro tipo de serviço de Internet de banda larga, ou mesmo por opção.

O *Long Term Evolution* (LTE), também conhecida como rede de quarta geração (4G), é um exemplo de rede WMAN. No Brasil tem sido divulgada a chegada das redes de quarta geração, no entanto, o que realmente se tem é a implementação da versão 8 da tecnologia LTE. LTE versão 8 é muito eficiente e permite um aumento considerável quando se comparado às redes de terceira geração (3G), porém não atinge a velocidade de 1Gbps, requisito necessário para ser considerada rede 4G (LTE *advanced*) [Carriel, 2013].

No Brasil, o LTE versão 8 opera na faixa de frequência de 2,5 GHz enquanto que na Europa e nos Estados Unidos utiliza a faixa dos 700 MHz, o que provoca uma incompatibilidade no uso, aqui no Brasil, dos aparelhos importados desses lugares. Outra questão é o custo de implantação da rede, na frequência dos 2,5 GHz o número de antenas utilizadas para cobrir certa área deverá ser maior do que se utilizasse a frequência dos 700 MHz, devido ao comprimento da onda gerado pela antena. Frequências menores geram ondas maiores que conseguem cobrir uma área maior. A velocidade de transmissão teórica de dados gira em torno de 100 Mbps de download e 50 Mbps de upload.

O Brasil conseguiu um grande feito. O CPqD que é uma instituição independente com foco em inovação, desenvolveu e padronizou o LTE na faixa de 450 MHz, sendo um padrão oficial do 3GPP (3rd Generation Partnership Project) [CPqD, 2013], organismo responsável pela padronização do sistema de comunicação móvel celular no mundo. A solução inédita permitirá que a internet banda larga móvel seja levada também para zonas rurais e áreas suburbanas. Enquanto o LTE operando em 2.5 GHz tem alcance de 2 km de raio, operando na faixa dos 450 MHz o alcance sobe para 30 km de raio [CPqD, 2013].

2.1.4 WWAN – Wireless Wide Area Network

Uma rede de longa distância sem fio pode interligar as outras redes de menor alcance. As comunicações por satélites que interligam outros tipos de redes é um exemplo de WWAN.

O primeiro satélite utilizado para criar um sistema operacional de comunicação foi a lua. A Marinha dos Estados Unidos percebeu que a lua era um satélite natural e criou um sistema de comunicação entre um navio e uma base que utilizava a lua em suas transmissões [Tanenbaum and Wetherall, 2011]. A principal diferença entre um satélite natural e um artificial está na retransmissão do sinal recebido. O satélite artificial amplifica o sinal antes de transmiti-lo de volta, utilizando uma frequência diferente do sinal de entrada, para evitar interferência. No satélite natural, a amplificação do sinal e a utilização de outra frequência na retransmissão não ocorrem.

Outro bom exemplo de WWAN é o padrão IEEE 802.20. Publicada em 12 de Junho de 2008 e denominada por *Mobile Broadband Wireless Access* (MBWA). Esta norma tem como objetivo padronizar uma interface sem fio para sistemas de acesso à banda larga sem fio com mobilidade veicular. Opera em faixas de frequência licenciadas abaixo dos 3,5 GHz, transporta dados por IP (*Internet Protocol*) com velocidade superior a 1 Mbps em células de até 15 km ou mais, além de suportar várias classes de serviço com mobilidade veicular de até 250 Km/h. Suporta um número usuários ativos significativamente superior aos atingidos pelas tecnologias concorrentes, como o padrão IEEE 802.16e.

2.2 Redes Locais Sem Fio

Uma abordagem mais aprofundada sobre redes locais sem fio se faz necessário devido ao objetivo do trabalho, que é uma comparação de dois protocolos de roteamento, o AODV (*Ad Hoc On-Demand Distance Vector*), voltado para rede local sem fio não cognitiva e o MR-LQSR (*Multi-Radio Link-Quality Source Routing*), voltado para rede de rádio cognitivo.

O padrão 802.11, popularmente conhecidas como Wi-Fi, foi publicado em 1997 [IEEE, 2011b]. Novas versões do padrão 802.11 surgiram mais tarde, fazendo com que

a versão original passasse a ser conhecida como 802.11 - 1997 ou 802.11 *legacy*. Essa versão opera na faixa de frequência de 2,4 GHz e sua taxa de transmissão de dados é de 1Mbps ou 2Mbps.

O padrão 802.11 define três tipos de camada física: espalhamento de espectro por sequência direta (Frequency Hopping Spread Spectrum – FHSS), espalhamento do espectro por salto em frequência (*Direct Sequence Spread Spectrum – DSSS*) e infravermelho.

As duas primeiras técnicas permitem utilizar vários canais dentro de uma frequência de transmissão, porém, a DSSS cria vários segmentos da informação transmitida e os envia aos canais simultaneamente. A outra técnica, FHSS, faz uso do salto de frequência, onde, para se transmitir uma informação são utilizadas frequências diferentes em períodos distintos. Essa característica faz com que a técnica FHSS tenha uma velocidade de transmissão de dados menor, mas em compensação, é menos suscetível às interferências, uma vez que a frequência utilizada muda constantemente. O DSSS por fazer uso de todos os canais ao mesmo tempo acaba sendo mais rápido, contudo pode sofrer maior interferência.

A terceira técnica teve seu projeto voltado para operação com transmissão não direcionada em ambientes fechados, com alcance máximo de aproximadamente 10 metros, considerando a não existência de fontes de calor ou luz solar interferindo ou de 20 metros utilizando receptores mais sensíveis.

2.2.1 A Família IEEE 802.11

A disseminação das redes locais sem fio se deu principalmente pela necessidade de mobilidade demandada pelo usuário, baixo preço das infraestruturas, a fácil implementação e a fácil integração com outras redes. As suas evidentes vantagens geraram uma procura enorme deste tipo de dispositivo, fazendo com que seu preço caísse significativamente. Um dos grandes responsáveis desta tendência foi o crescimento na utilização de computadores portáteis, pré-equipados com placas para acessar as redes *Wi-Fi*. Locais públicos, como câmpus universitários, cafés, hotéis e

centros comerciais, aproveitaram a tendência oferecendo acesso à redes sem fio, muitas vezes gratuitamente.

O uso compartilhado do meio de transmissão é considerado um grande problema para as redes sem fio, apesar de todas as vantagens descritas anteriormente. Existe uma considerável perda de desempenho da rede com o aumento do número de estações clientes, pois com o aumento no número dessas estações a largura de banda percebida individualmente cai drasticamente, não só pela partilha do meio, como também pelo tráfego adicional gerado pela concorrência ao uso de meio de transmissão.

A segurança das informações trafegadas nas redes sem fio é uma questão preocupante, pois como a informação está sendo transmitida pelo ar qualquer pessoa pode monitorar uma rede alheia, mesmo a longas distâncias quando se utilizam equipamentos adequados para esse fim. Com o objetivo de dar segurança às redes sem fio foram desenvolvidos alguns algoritmos de criptografia como o *Wired Equivalent Privacy* (WEP) ou o *Wi-Fi Protected Access* (WPA) cujas vulnerabilidades são conhecidas e o seu uso desaconselhado para ligações pretensiosamente seguras. O *Wi-Fi Protected Access 2* (WPA2) é o algoritmo de criptografia utilizado como método de segurança confiável.

A confiança em uma rede sem fio é outro problema a ser considerado ao implantá-lo para um determinado serviço. O meio de transmissão é vulnerável a inúmeros tipos de interferências, podendo vir de outras comunicações na mesma banda eletromagnética ou mesmo de aparelhos como fornos micro-ondas, na banda dos 2,4 GHz, e de aparelhos mecânicos que produzam ruídos eletromagnéticos nessa mesma faixa de frequência. Por esse motivo o acesso a serviços de alta importância não devem ser disponibilizados exclusivamente por redes *Wi-Fi*.

Com o avanço nas pesquisas e necessidades diferentes dos usuários, novas versões do padrão original IEEE 802.11 se fizeram necessária. As principais derivações são os padrões IEEE 802.11a, IEEE 802.11b, IEEE 802.11g, IEEE 802.11n, IEEE 802.11y e IEEE 802.11i.

O padrão IEEE 802.11a opera na faixa de frequência de 5 GHz, com uma taxa de transmissão máxima de 54 Mbps. O alcance típico em ambiente interno é de 35 metros e em ambiente externo é de 120 metros. Sendo a segunda versão a ser lançada no

mercado, e, apesar da sua superioridade em alguns pontos em relação à primeira versão (IEEE 802.11b), esse padrão não obteve muito sucesso por basicamente três motivos. O primeiro foi pelo atraso em seu lançamento no mercado. Quando foi lançado, o padrão IEEE 802.11b já tinha dominado o mercado, e os dois padrões não são compatíveis. O segundo motivo foi o preço dos dispositivos, que eram superiores aos que já estavam no mercado, devido à indisponibilidade imediata da matéria-prima necessária para a fabricação. O terceiro motivo, não menos importante, foi a pouca adaptação em ambientes interno, devido à sua dificuldade de atravessar obstáculos, como paredes, por exemplo. Isso se deve por operar em uma faixa de frequência maior [Networking, 2006].

O padrão IEEE 802.11b foi ratificado em 1999 e se caracteriza por usar a modulação *Direct Sequence Spread spectrum* (DSSS) e operar em na faixa de frequência de 2,4 GHz, com uma transmissão de até 11 Mbps. O alcance típico em ambiente interno é de 38 metros e em ambiente externo é de 140 metros, contando com a travessia de uma parede, à taxa de transmissão mínima. Essa versão foi a primeira atualização relevante ocorrido no padrão original 802.11.

O padrão IEEE 802.11g reúne as melhores características das duas versões anteriores. Opera na faixa de frequência de 2,4 GHz, com uma taxa de transmissão de até 54 Mbps. A largura de banda, 54 Mbps, pode diminuir para 48, 36, 24, 18, 12 e 9 Mbps quando as condições de transmissão de sinal assim o exigir [Networking, 2006]. Em condições normais, a taxa de transmissão real é de aproximadamente 24,7 Mbps. A cobertura típica é a mesma do padrão 802.11b. Um problema desse padrão e do padrão 802.11b é possuir apenas três canais não sobrepostos na banda livre dos 2,4 GHz. Contudo, o fato de partilharem a mesma frequência permite que a norma IEEE 802.11g seja compatível com a IEEE 802.11b.

O padrão IEEE 802.11n é considerada a evolução do padrão IEEE 802.11g. Pode operar nas faixas de frequências de 2,4 GHz ou 5 GHz, com uma taxa de transmissão teórica de 288,9 Mbps ou 600 Mbps respectivamente. O aumento na taxa de transmissão ocorreu porque ao padrão 802.11n introduziu a possibilidade de utilização de canais maiores. O padrão permitiu que 2 canais adjacentes (sem superposição) de 20 MHz sejam combinados para formar um único canal de 40 MHz. Desta forma, os canais do padrão 802.11n podem ser configurados como 20 MHz, 40

MHz ou conversão automática de 40/20 MHz. Os canais com conversão automática operam em 40 MHz, mas podem automaticamente retornar para 20 MHz, na presença de interferências. A cobertura é o dobro do alcance da norma 802.11g [Networking, 2006]. Outras características que possibilitaram essa evolução foram: O melhoramento da modulação *Orthogonal Frequency-Division Multiplexing* (OFDM), que utiliza 52 ao invés dos 48 subcanais da emenda anterior; A tecnologia conhecida por *Multiple Input Multiple Output* (MIMO) que utiliza de várias antenas para melhorar a transmissão. O transmissor divide o sinal em múltiplas partes e transmite cada parte através de antenas separadas. A norma utiliza de duas a quatro antenas para transmitir, podendo o receptor ter apenas uma antena; A técnica *Reduced Inter-frame Spacing* (RIFS) que possibilitou a redução no tempo de espera entre as transmissões de quadros.

O padrão IEEE 802.11y prioriza a comunicação em ambiente externo de longa distância. Opera entre as faixas de frequência de 3650 MHz e 3700 MHz, permitindo um alcance de até 5 quilômetros na comunicação em ambiente externo e de no máximo 50 metros na comunicação em ambiente interno, sem obstáculos [Selada, 2008].

O padrão IEEE 802.11i foi desenvolvido devido às falhas de segurança nas redes sem fio. O algoritmo WEP, que era o algoritmo de segurança utilizado, já não era mais confiável. Tinha se descoberto formas de quebrar a segurança do algoritmo, tendo assim acesso aos pacotes de dados transmitidos na rede. Alterações no modo de operação da camada MAC (*Medium Access Control*) e a compatibilidade com o algoritmo anteriormente utilizado (WEP) foram as demandas no desenvolvimento do novo padrão. A certificadora *Wi-Fi Alliance*, devido aos problemas de segurança apresentado pelo WEP, se viu obrigada a lançar uma nova forma de segurança que já estava sendo desenvolvida, mas não concluída. Parte do padrão IEEE 802.11i foi lançado antes da sua conclusão, para amenizar o problema. Conhecido com WPA (*Wi-Fi Protected Access*) também apresentou falhas na segurança, sendo considerado inseguro. O problema de segurança foi resolvido com a conclusão e lançamento completo do padrão 802.11i, chamado de WPA2 (*Wi-Fi Protected Access2*) ou RSN (*Robust Security Network*), consideração seguro até os dias atuais [Chen et al, 2005].

Como foi falado na subseção 2.1.2, o padrão IEEE 802.11 pode trabalhar tanto no modo estruturado, onde se utiliza de uma estação base para controlar todo o fluxo de dados da rede, ou como em modo *ad hoc*, onde todos os computadores na rede podem

transmitir direto ao destinatário, estando este em seu raio de alcance, ou fazendo uso de computadores intermediários.

2.3 Rede de Rádio Cognitivo

2.3.1 Rádio Cognitivo

Rádios cognitivos (CR – *Cognitive Radio*) são capazes de verificar a ocupação da banda espectral de uma determinada faixa de frequência, definindo quais os canais livres disponíveis para o uso. Eles também são capazes de se reconfigurar, escolhendo outro canal livre, caso algum outro dispositivo com maior prioridade comece a utilizar o canal que estava sendo utilizado. As redes que fazem uso dessa tecnologia são chamadas de redes cognitivas. Estas redes utilizam um ciclo de cognição, que inclui rádio análise de cenas do ambiente, estimação do estado do canal, modelagem preditiva para tentar se antecipar às possíveis falhas, controle de potência de transmissão e os comandos de gestão do espectro.

Uma área específica do campo de rádio cognitivo é a área de acesso ao espectro dinâmico. Consiste em uma rede de rádio cognitivo que, dinamicamente, identifica e utiliza porções do espectro que não estão sendo utilizados por outros sistemas. Estas partes não utilizadas do espectro são muitas vezes referidas na literatura, como espaço em branco. O espaço em branco pode consistir em frequências não utilizadas ou não utilizadas em intervalos de tempo em um determinado local [Niyato et al, 2009].

O padrão 802.22 faz o uso dos espaços em branco da faixa de transmissão da TV, que tem a prioridade de transmissão. A rede deve se adaptar rapidamente, caso esteja fazendo uso de um canal que foi requisitado, de modo a não causar interferência prejudicial a transmissores licenciados. O objetivo é proteger os transmissores licenciados como a TV e os microfones sem fio.

Existem vários métodos que podem ser usados por uma rede de rádio cognitivo para estar ciente de seu ambiente espectral. Os dois métodos utilizados no padrão 802.22 para ter conhecimento do espectro são a localização/Informação (*geo-*

location/database) e sensoriamento de espectro. No primeiro método, o conhecimento da localização dos dispositivos de rádios cognitivos é combinado com um banco de dados dos transmissores licenciados, para determinar quais canais estão disponíveis em um determinado local, podendo ser reutilizado os espaços em branco pela rede de rádio cognitivo. Sensoriamento do espectro consiste em observar o espectro e identificar quais os canais estão ocupados por transmissores licenciados [Stevenson et al, 2009].

As redes cognitivas surgem como uma possível solução à escassez de canais no espectro de frequência. O espectro de frequência sendo um recurso natural finito, com o aumento considerável de aparelhos que o utilizam como meio de transmissão e a ineficiência no uso do espectro está limitando novos usuários e novas aplicações devido à inexistência de faixas de frequência disponíveis no espectro.

2.3.2 Redes Cognitivas

As redes cognitivas fazem uso dos Rádios Cognitivos (CR – Cognitive Radio). Os rádios cognitivos são capazes de verificar a ocupação da banda espectral de uma determinada faixa de frequência, definindo quais são os canais livres disponíveis para uso. Eles também são capazes de se reconfigurar, escolhendo outro canal livre, caso algum outro dispositivo com maior prioridade comece a utilizar o canal que estava sendo utilizado. Estas redes utilizam um ciclo de cognição, que inclui rádio análise de cenários do ambiente, estimação do estado do canal, modelagem preditiva para tentar se antecipar às possíveis falhas, controle de potência de transmissão e os comandos de gestão do espectro.

A principal motivação de estudos para o desenvolvimento das redes cognitivas é a escassez do espectro de frequência. O espectro de frequência é um recurso natural e finito. A utilização do espectro é regulamentado por órgãos governamentais, fazendo concessão de partes fixas do espectro aos detentores por longos anos. As redes cognitivas surgiram com o intuito de reutilizar boa parte do espectro que fica ocioso, como pode ser observado na Figura 2.6, onde é mostrada a utilização do espectro de frequência. Observa-se que a utilização é concentrada em certas partes do espectro, enquanto que uma quantidade significativa permanece inutilizada. Outro fato relevante

a ser observado é a posição geográfica, pois o espectro de frequência é mais utilizado em regiões metropolitanas do que cidades do interior.

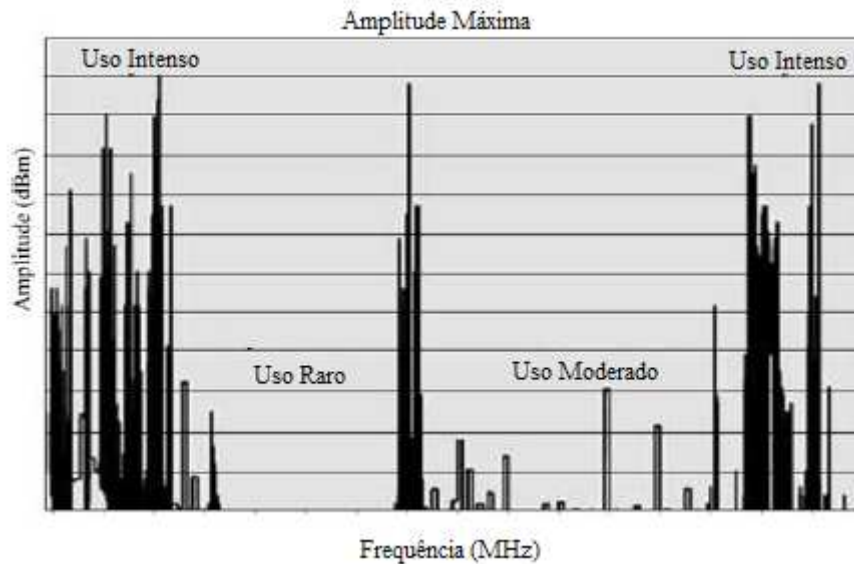


Figura 2.5: Uso do espectro de frequência. Fonte: (Akyildiz et al., 2006).

Um exemplo de rede que faz o uso da tecnologia de rádios cognitivos são as redes sem fio regionais, conhecidas também como padrão IEEE 802.22.

2.3.2.1 Redes Sem Fio Regionais

Em 2004, foi aprovado um grupo de trabalho para desenvolvimento da norma IEEE 802.22, com o objetivo de fomentar a criação de redes regionais sem fio (WRAN – *Wireless Regional Area Networks*). Alguns anos depois, em 1 de Julho de 2011 o padrão foi publicado pelo IEEE [IEEE, 2011a].

O padrão IEEE 802.22 considera dois tipos de usuários: primário e secundário. O usuário primário são os aparelhos licenciados como TV digital, TV analógica, microfone sem fio, serviços de telefonia móvel, entre outros. Enquanto que o usuário secundário são os rádios que fazem a comunicação das redes sem fio regionais, sendo que o usuário primário tem prioridade do uso do canal de frequência. A WRAN

especifica que o usuário secundário deve fazer uso do espectro de forma oportuna, sem causar interferência aos usuários primários. O tempo de resposta para desocupar um canal quando esse é requerido por um usuário primário é definido por parâmetros de tempo *Dynamic Frequency Selection* (DFS). Os parâmetros mais críticos, ou seja, a detecção do canal e movimento é da ordem de 2 segundos, de acordo com o protocolo IEEE 802.22.

Em uma rede sem fio rural, o tamanho da célula da estação base (*Base Station – BS*) deverá abranger tipicamente uma área circundante num raio de 20 a 40 km, conseguindo em casos extremos servir usuários (*Consumer Premise Equipment – CPE*) que estejam até 100 km de distância. Em um caso de cobertura num raio de 33 km poderá servir aproximadamente 1.25 pontos por km². A faixa de frequência adotada é de 54 a 862 MHz, utilizando canais de 6, 7 e 8 MHz para ser compatível com os vários tipos de canais de TV internacional [Cordeiro et al, 2006]. A Figura 2.7 ilustra a topologia de uma rede WRAN.

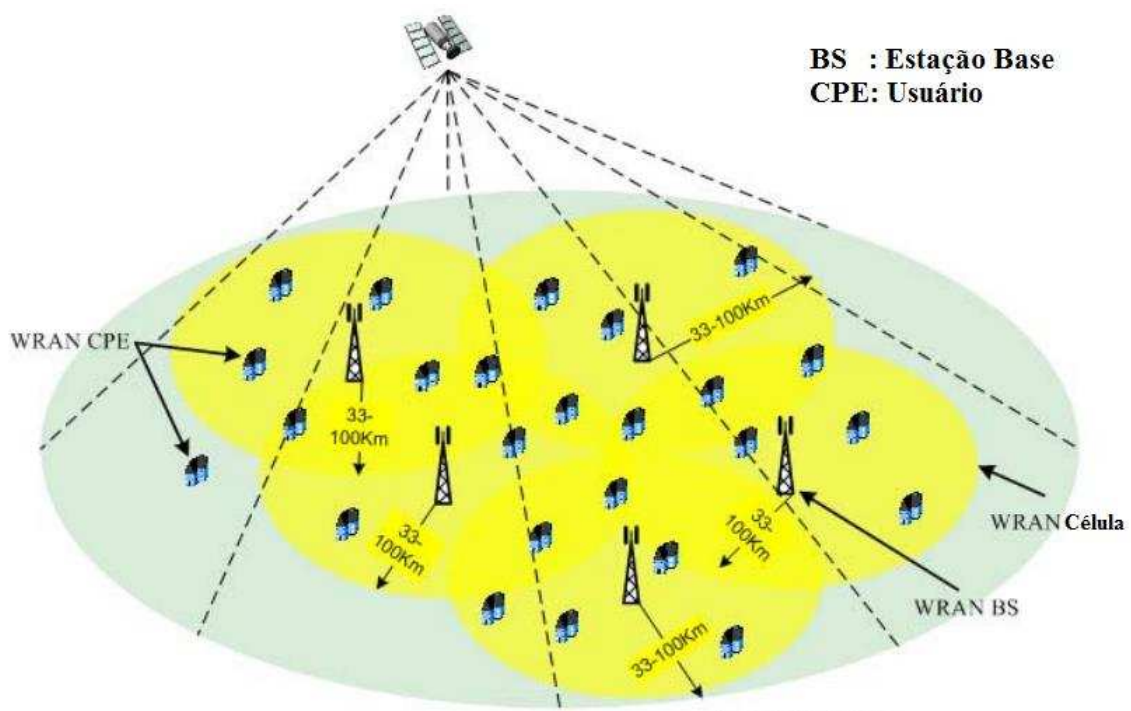


Figura 2.6. Exemplo da topologia 802.22.
Fonte: (Cordeiro et al., 2006)

Em cada CPE poderá existir um *gateway* fazendo interface com uma rede cabeada (*Ethernet*) ou sem fio (*wi-fi*) aumentando de maneira significativa o número de pessoas atendidas por km².

A Tabela 2.1 apresenta alguns dados interessantes sobre o protocolo IEEE 802.22, destacando suas principais características.

Tabela 2.1. Especificações de capacidade e cobertura da WRAN.
Fonte (adaptado): (Akyildiz et al., 2006)

Largura do Canal	6 MHz
Eficiência média do espectro	3 Bit/s/Hz
Capacidade do canal	18 Mbit/s
Capacidade por assinante (usuário baixando)	1,5 Mbit/s
Capacidade por assinante (usuário enviando)	384 Kbit/s
Relação (baixar/enviar)	3,9
Número potencial de assinantes	1800 Pessoas
Número hipotético de pessoas por domicílio	2,5 Pessoas
Número total de pessoas por área de cobertura	4500 Pessoas
Potência da Estação Base	98,3 Watts
Raio de cobertura	30,7 km
Densidade da população atendida	1,5 Pontos/km ²

2.3.2.1.1 Visão Geral da Topologia WRAN

O padrão IEEE 802.22 visa a comunicação ponto-multiponto (P-MP) entre uma estação base (BS – *Base Station*) e os equipamentos dos clientes chamados de CPE (*Customer Premise Equipment*) com antenas direcionais localizadas 10 metros acima do nível do solo em uma área regional, operando nas frequências não utilizadas das bandas de transmissão de TV VHF (*Very High Frequency*) e UHF (*Ultra High Frequency*), especificamente.

O padrão IEEE 802.22 utiliza de técnicas de rádio cognitivo para permitir o compartilhamento dos espectros geograficamente não utilizados, que são alocados para o serviço de transmissão de televisão, para levar o acesso banda larga a lugares remotos

e de baixa densidade populacional, cenário típico de ambientes rurais. Portanto, esse padrão tem o potencial para uma ampla aplicabilidade em todo o mundo. As WRANs são projetadas para operar nas bandas de transmissão de TV, e ao mesmo tempo assegurar que nenhuma interferência ocorrerá na transmissão da TV digital ou analógica e dispositivos de baixa potência, como microfones sem fio que são licenciados.

A taxa de transferência de pico mínimos entregue ao CPE na borda da cobertura será equivalente a uma taxa de 1,5 Mbps no *downstream* (da BS para o CPE) e 384 kbps no *upstream* (do CPE para a BS), permitindo um serviço de videoconferência, por exemplo [Stevenson et al, 2009].

O controle de acesso ao meio (MAC) é feito pelo BS, coordenando um número de unidades CPE. Esse controle fornece mecanismo flexível e eficiente para a transmissão de dados, suporta a coexistência da rede WRAN e TV ao mesmo tempo sem interferência em nenhuma das duas, além de poder existir outras redes 802.22 na mesma área e ao mesmo tempo. O padrão IEEE 802.22 é aplicável a qualquer região do mundo e não necessita de especificações especiais para cada país.

2.3.2.1.2 Camada Física

De acordo com [Akyildiz et al, 2006], as redes WRAN devem fornecer aos usuários quatro tipos de serviços principais: determinar quais canais do espectro estão disponíveis e detectar a presença de usuários primários; selecionar o melhor canal disponível; gerenciar o acesso ao canal escolhido com usuários secundários, e; desocupar o canal quando um usuário primário for detectado.

Pensando nessas características, a interface física do WRAN, segundo [Cordeiro et al, 2006], deve ser de baixa complexidade e ao mesmo tempo ter um alto desempenho, além de possuir eficiência ao explorar o espectro de frequência para atender aos dois primeiros serviços descritos no parágrafo anterior. Para atender aos dois últimos, a flexibilidade em trocar de canal sem erros é fundamental. Clientes CPEs não podem ser perdidos ao ocorrer uma troca de canal. O ajuste dinâmico na largura de

banda, sistemas de codificação e modulação são propiciados a partir dessa flexibilidade em trocar de canal.

A flexibilidade de adaptação rápida é permitido por utilizar o OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access*) que é uma versão para múltiplos usuário do OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*). O sistema OFDMA divide o espectro disponível em sub-portadoras ortogonais e os agrupam em sub-canais, funcionando como um gerente de múltiplos acessos através da atribuição de diferentes usuários em diferentes sub-canais, o que possibilita a comunicação de vários usuários ao mesmo tempo sem que haja interferência [López-Pérez et al, 2009].

Outro requisito da interface física do WRAN é ter a capacidade de lidar com longos atrasos de propagação de 25 ms a 50 ms, que podem prejudicar a comunicação. Portanto, a camada deve se ajustar dinamicamente a largura de banda, modulação e codificação.

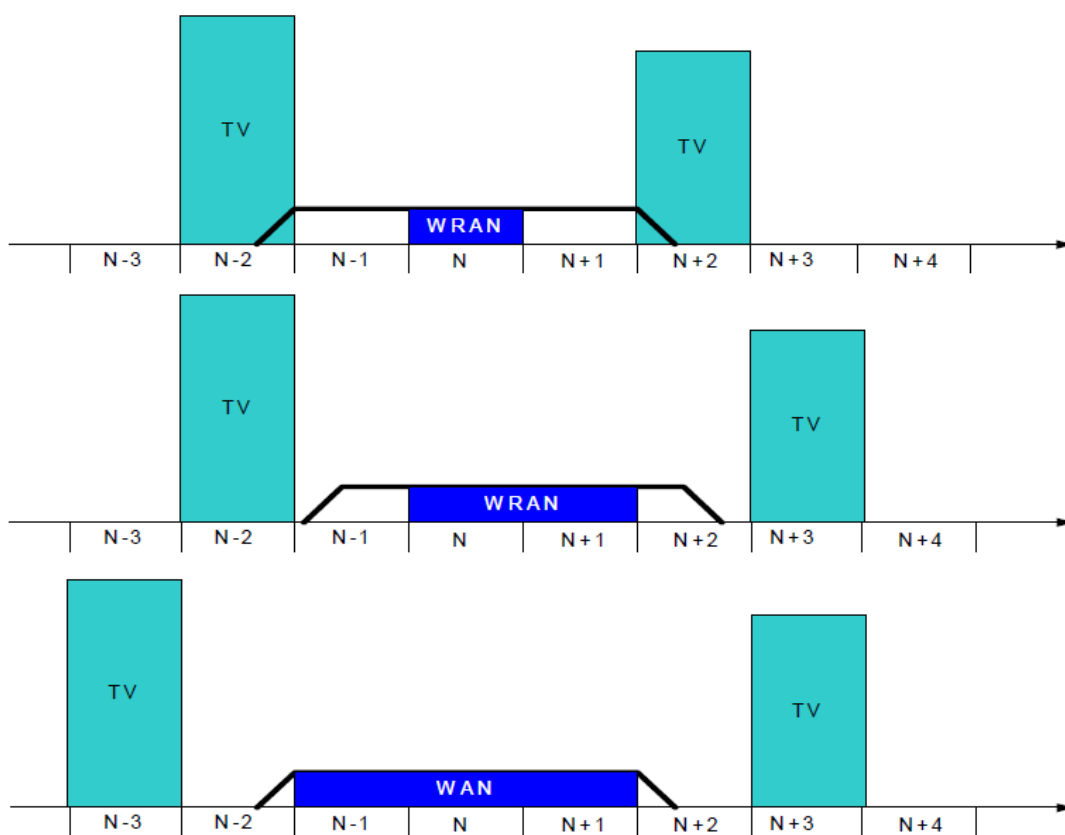


Figura 2.7. Diagrama simplificado de agregação de canais.

Fonte: (Cordeiro et al., 2006)

Outra característica é a possibilidade de agregar canais. A princípio deveria se oferecer uma velocidade de 19 Mbps, utilizando apenas um canal de TV, para um cliente a 30 km de distância da BS. Para garantir esse requisito, a camada física permite agregar canais livres adjacentes para a transmissão e recepção. Existindo lacunas entre dois canais de TV, eles serão agregados, transformando até três canais livres em um único canal de transmissão de até 18 MHz, considerando o canal de TV de 6 MHz. Essa junção de canais adjacentes é conhecida como canais agregados contíguos, exemplo na Figura 2.8. O padrão IEEE 802.22 também detalha a operação sobre canais agregados não contíguos [Cordeiro et al, 2006].

2.3.2.1.3 Camada MAC

O Controle de Acesso ao Meio (MAC) é baseado na tecnologia de Rádio Cognitivo, devendo ser altamente dinâmico, devido às mudanças e agregação de canais [Cordeiro et al, 2006]. Quadro e Super Quadro são as duas estruturas que compõem a camada MAC. O Super quadro, com estrutura representada na Figura 2.9, terá um SCH (*Superframe Controle Header*) e um preâmbulo. Eles serão enviados pela Estação Base em cada canal que é possível transmitir sem causar interferências. Ao se ativar um CPE, o mesmo faz uma varredura no espectro de frequência verificando em quais canais a BS está transmitindo. CPEs capazes de sintonizar em qualquer um desses canais, sincronizar e receber o SCH, são capazes de obter todas as informações de que necessita para associa-se com a BS.

Interferências a usuários primários são evitadas nas redes WRAN com realizações periódicas de medições do espectro. Ao se associar à BS, o CPE recebe instruções de fazer medições constantes, podendo ser *in-band* ou *out-band*. A medição *in-band* refere-se à análise do canal utilizado na comunicação da BS e o próprio CPE. Enquanto que a medição *out-band* consiste na análise dos demais canais na faixa do espectro.

Detecção rápida e detecção fina são os tipos de detecção feitos nas medições. A fase de detecção rápida é composta de um ou mais períodos de detecção rápida,

conforme ilustrado na Figura 2.10. A BS silencia a comunicação em pequenos períodos de tempo para detectar, por exemplo, uma simples alteração de energia, que pode indicar outro serviço querendo usar o canal. Essa verificação é muito rápida (menos de 1 ms/canal) e por isso é considerado altamente eficiente. O resultado das medições feitas por todos os CPE's e a BS são reunidos e analisados pela BS, decidindo a necessidade ou não da próxima fase de detecção. Por exemplo, após a análise dos resultados da fase de detecção rápida a BS pode concluir que é desnecessário os próximos agendamentos de detecções finas.

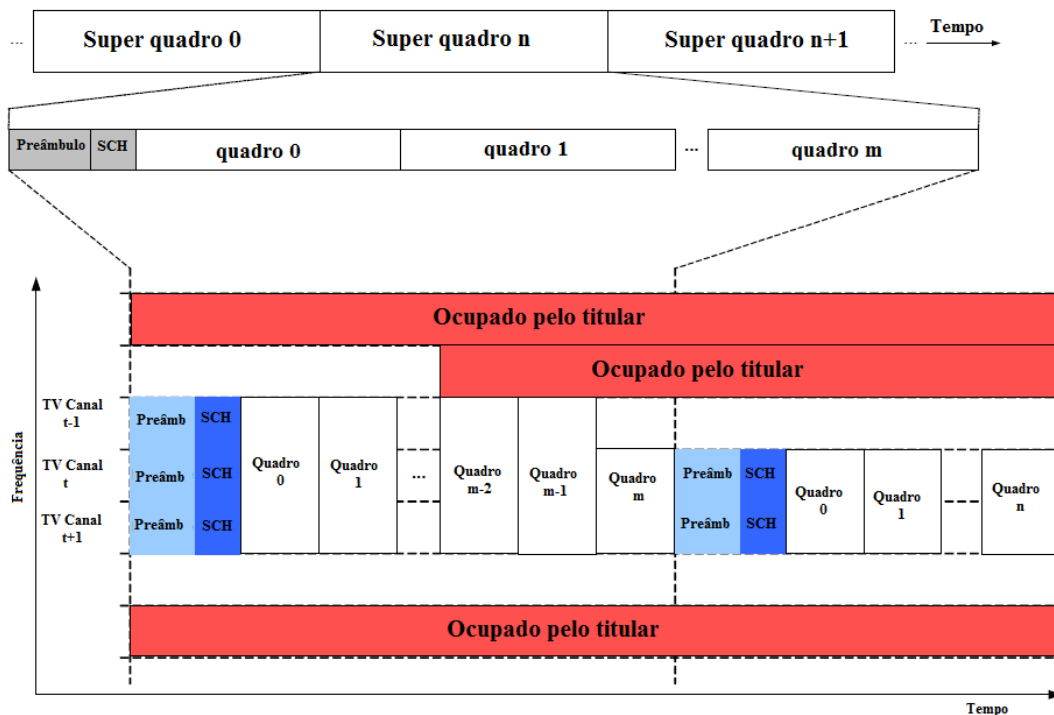


Figura 2.8. Estrutura geral do Super Quadro. Fonte: (Cordeiro et al., 2006)

A fase de detecção fina é dinamicamente determinada pelo BS com base no resultado da fase de detecção rápida. Durante esta fase são analisados detalhadamente os canais alvos, por isso a duração da análise leva cerca de 25 ms ou mais por canal, mais demorada do que a fase de detecção rápida.

Esses mecanismos de detecção são utilizados principalmente para identificar se existe uma transmissão acontecendo, e se há necessidade de evitar a interferência com essa transmissão. Para possibilitar a coexistência de várias redes WRAN foi desenvolvido um algoritmo que é capaz de dinamicamente sincronizar várias células

sobrepostas, fazendo com que as fases de detecção ocorram ao mesmo tempo, como se observa na Figura 2.10.

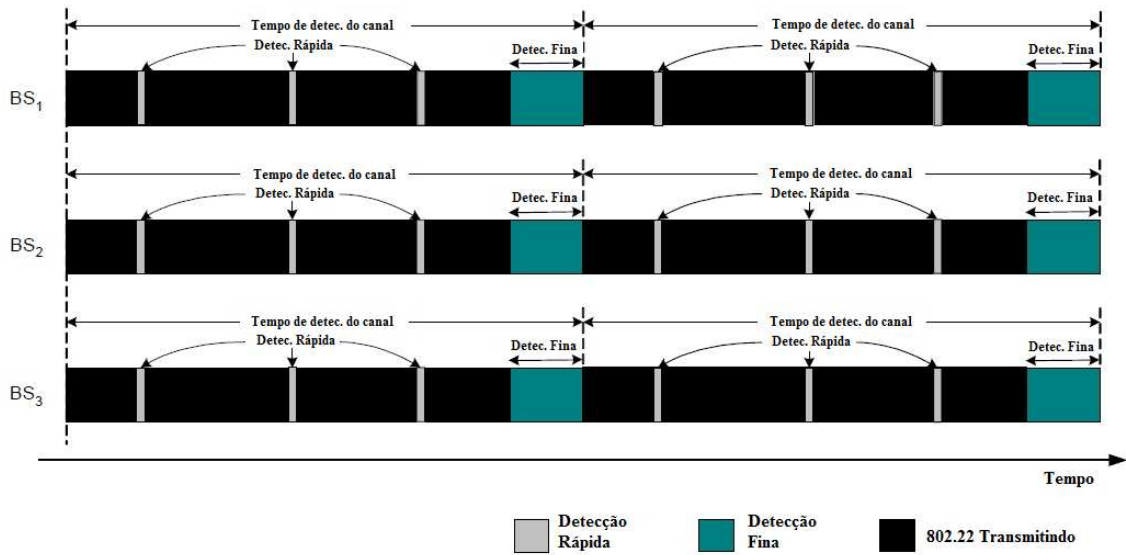


Figura 2.9. Métodos de detecção rápida e detecção fina.
 Fonte: (Cordeiro et al., 2006)

3. Os Protocolos AODV, DSR E MR-LQSR

Os protocolos de roteamento são responsáveis por construir as tabelas de roteamento em cada nó, ou seja, são eles que ditam a forma como a tabela é montada e de quais informações ela é composta, em função de informações trocadas entre nós vizinhos.

Em redes sem fio, o uso dos protocolos de roteamento é principalmente observado em redes *ad hoc*. Nas redes *ad hoc* não existe um nó que centraliza e redireciona toda a comunicação. Todos os nós são capazes de receber, enviar e encaminhar pacotes de dados. O envio de pacotes para um determinado destino, utilizando outros nós intermediários para encaminhar os pacotes e alcançar esse destino, é uma característica desse tipo de redes. Na Figura 3.1 pode ser observado um exemplo de comunicação em redes *ad hoc*, onde para o nó A enviar pacotes de dados ao nó C, necessariamente terá que se utilizar dos nós intermediários da rede para atingir seu objetivo, que é de se comunicar com o nó C.

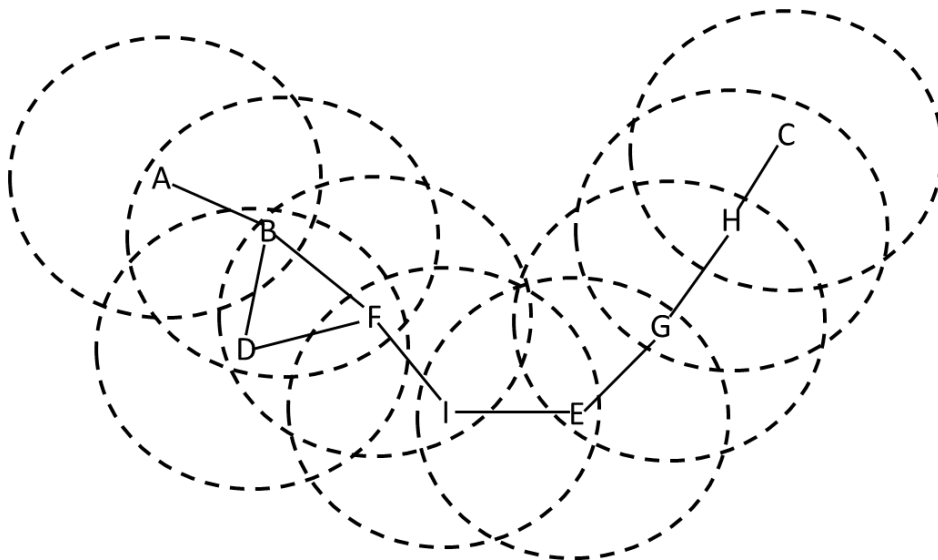


Figura 3.1: Exemplo de comunicação em rede *ad hoc*.

Empresas e a comunidade científica têm se interessado por estudar uma forma de utilizar dessa tecnologia, a fim de fornecer acesso à Internet banda larga para comunidades rurais e lugares de pesquisas onde não existe esse tipo de acesso. Nesse tipo de rede, a maioria dos nós são estacionários ou se movem muito pouco e a fonte de energia é considerada infinita. Assim, o contexto desse trabalho será investigar aspectos relacionados com a melhoria da qualidade do serviço para dois diferentes protocolos de roteamento. Não serão consideradas questões relacionadas com a mobilidade ou para otimizar o uso de bateria.

Para tanto, foram utilizados dois protocolos de roteamento nas simulações, o AODV (*Ad Hoc On-Demand Distance Vector*) utilizado em redes sem fio padrão IEEE 802.11 e o MR-LQSR (*Multi-Radio Link-Quality Source Routing*) indicado para redes de rádio cognitivo. A seguir, alguns protocolos de roteamento serão apresentados, entre eles o DSR (*Dynamic Source Routing*) que se faz necessário por ser o protocolo baseado para desenvolver o protocolo MR-LQSR, no entanto, o DSR não será simulado.

3.1 Protocolo AODV

O protocolo *Ad Hoc On-Demand Distance Vector* (AODV) é um protocolo reativo, ou seja, a rota para um determinado nó só é descoberta quando se deseja enviar um pacote de dados para esse nó destino. O roteamento dinâmico, onde a rota do pacote previamente estabelecida pode ser alterada durante o deslocamento caso a rota utilizada esteja indisponível temporariamente, é outra característica do protocolo AODV.

O AODV é um protocolo baseado no protocolo *Destination-Sequenced Distance-Vector* (DSDV) [Perkins and Royer, 1997]. Foi desenvolvido com o objetivo de eliminar os erros do DSDV, como o problema de contagem ao infinito, que pode fazer com que os pacotes entrem em *loop*, e não cheguem ao seu destino.

O AODV é um protocolo que utiliza para cada nó uma tabela de roteamento tradicional, em que há somente uma entrada para cada destino, referente sempre ao menor caminho. Assim, o nó registra a distância total em número de saltos e o próximo

salto para se chegar ao destino. Um número de sequência crescente é usado com o objetivo de evitar laços e verificar se uma informação de rota é recente ou não.

A tabela de roteamento é atualizada frequentemente, e para isso o protocolo AODV utiliza dois mecanismos, um de descoberta de rotas e outro de manutenção das rotas.

3.1.1 Descoberta de Rotas

A descoberta de rotas se inicia da necessidade de um nó fonte se comunicar com um nó destino, no entanto, o caminho para este nó destino não se encontra na tabela de roteamento do nó fonte. O mecanismo de descoberta consiste no envio de mensagens *Route Request* (RREQ) via difusão (*broadcast*) para todos os nós vizinhos, informando sobre a necessidade de uma rota até o destino desejado. Cada pacote RREQ possui campos como o identificador da solicitação, endereço da fonte e do destino, número de sequência da fonte e do destino, além de um contador de saltos.

O identificador da solicitação é incrementado toda vez que o nó fonte envia uma nova mensagem RREQ. Isso ocorre para que nós intermediários entre o nó fonte e o nó destinatário possam descartar, a partir do segundo pacote RREQ recebido com o mesmo identificador de *broadcast* e endereço da fonte. Enquanto a rota para o destino não for encontrada, os pacotes RREQ são propagados, novamente via difusão para os vizinhos, sempre incrementando o contador de saltos e guardando entradas temporárias em suas tabelas. O processo continua até que o nó destino seja encontrado ou que algum nó tenha uma rota válida pra ele. Utiliza-se para verificar o quão recente são as informações da rota reversa o número de sequência da fonte, enquanto que o número de sequência do destino revela o quão recentes as informações da rota do nó fonte para o destino.

Caso um nó intermediário tenha uma rota até o destino para um pacote RREQ, se inicia uma verificação se a rota é mais atual, comparando o número de sequência de destino carregado pelo RREQ com o número de sequência de destino existente no nó. Se o número de sequência de destino do RREQ for maior, então a rota contida no nó

intermediário não será usada e o RREQ é retransmitido para os vizinhos. Senão, um pacote *Route Reply* (RREP) via *unicast* é enviado de volta para a fonte seguindo a rota reversa. Quando o próprio nó destino é encontrado, ocorre o mesmo processo descrito por último [Perkins and Royer, 1997].

O pacote RREP, como o pacote RREQ, também possui uma série de informações como: endereço de fonte e destino, número de sequência do destino, contador de saltos e o tempo de duração da rota. Cada nó, por onde o RREP passa, guarda em sua tabela uma entrada com o próximo salto e a quantidade destes até o destino, além de atualizar informações do tempo de duração da rota e o último número de sequência para o destino. Apenas uma entrada na tabela para cada destino é registrada.

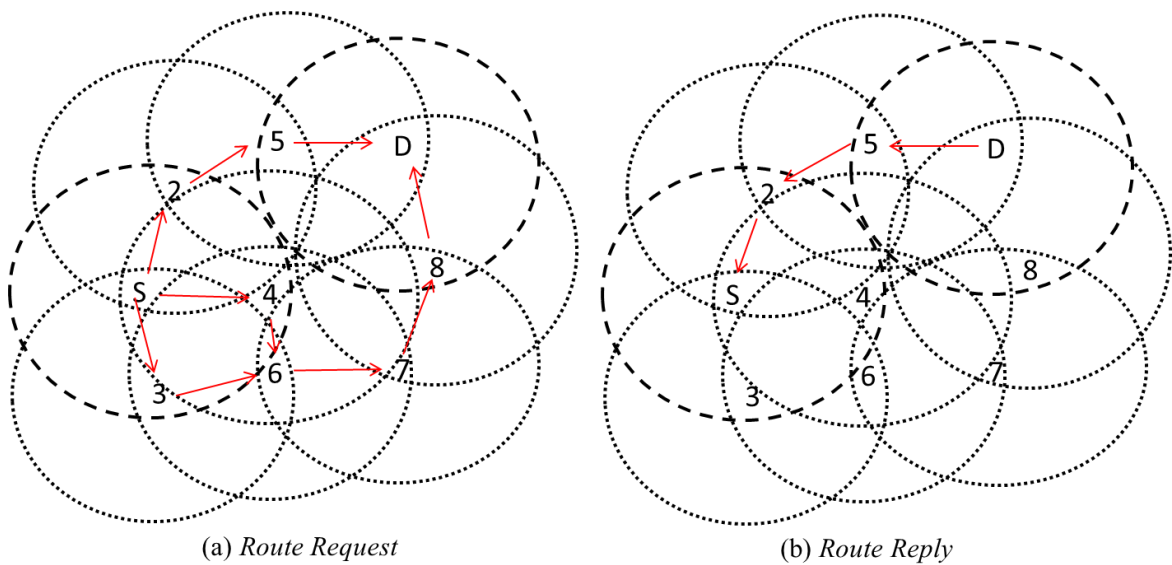


Figura 3.2. Descoberta de Rota no Protocolo AODV.

A Figura 3.2 ilustra a descoberta de um caminho no protocolo AODV, onde a Figura 3.2(a) mostra o nó fonte *S* enviando para seus vizinhos, que estejam em seu raio de cobertura, um pacote RREQ. Os vizinhos do nó fonte *S*, ao receber o pacote RREQ, o encaminha, por difusão, para seus vizinhos que estiverem em seu raio de cobertura, e assim sucessivamente até chegar ao nó desejado ou a algum nó que possua uma rota recente para o nó destino *D*. O mesmo pacote RREQ, já difundido pelo nó, ao chegar

novamente, será descartado. Quando o pacote RREQ, enviado pelo nó fonte, atinge o nó *D* ou algum nó que saiba um caminho recente para o destino, é enviado para o nó fonte via *unicasting* um pacote *route reply* (RREP), ilustrado na Figura 3.2(b). Na tabela de roteamento do nó *S* será registrada a rota para *D*, sendo o nó 2 o próximo salto.

3.1.2 Manutenção de Rotas

A manutenção de rotas se faz necessária devido a quebras constantes de enlaces, devido à mobilidade dos nós. As tabelas de roteamentos ficam inválidas com as quebras de enlaces. Para solucionar o problema de validade nas tabelas de roteamentos, o protocolo AODV dispõe de um mecanismo de manutenção das rotas, que verifica a validade dessas rotas.

Na manutenção das rotas são utilizadas mensagens *HELLO* que são enviadas periodicamente para seus vizinhos via difusão. Os nós vizinhos, por sua vez, respondem a mensagem recebida com outra mensagem *HELLO*. As mensagens *HELLO* contêm um identificador e o número de sequência da fonte. Se um nó não recebe a mensagem *HELLO* de confirmação do vizinho, considera-se uma quebra de enlace, invalidando a rota. Um pacote *Route Error* (RERR), informando a queda do enlace, é enviado para todos os nós que usam este enlace em alguma rota recente de sua tabela. Então, essas rotas são invalidadas e removidas da tabela conforme seus números de sequência.

Ao mesmo tempo em que a manutenção periódica das rotas ativas é uma vantagem para o protocolo AODV, se torna também uma desvantagem. Pois, o envio de mensagens *HELLO* aumenta consideravelmente a carga na rede e isso faz com que possam ocorrer um número maior de colisões, principalmente quando o número de nós na rede aumenta.

3.2 Protocolo DSR

O protocolo Dynamic Source Routing (DSR) [Poonia et al, 2011], como o AODV, também é um protocolo reativo.

No DSR ao se enviar um pacote, o nó origem constrói uma rota no cabeçalho do pacote, determinando desde o início por quais nós o pacote irá passar até chegar ao seu destino. Quando um nó recebe pacote, e esse nó não sendo o destino final do pacote, ele simplesmente o encaminha para o próximo salto identificado na rota de origem, que consta no cabeçalho do pacote. Enquanto o DSR determina todo o caminho que o pacote deve percorrer até seu destino desde o início, o AODV apenas determina o próximo salto do pacote, em cada nó, até atingir o destino final.

Cada nó participante da rede mantém armazenado em sua memória *cache* as rotas que ele aprendeu. Se a rota armazenada não for utilizada em um determinado tempo, será excluída da memória do nó. Quando um nó origem quiser enviar um pacote para um determinado nó destino, primeiro verifica na memória *cache* se existe uma rota para aquele destino. Caso exista uma rota ela será utilizada. Caso existam duas ou mais, será utilizada a rota que possuir o menor número de saltos. E se não encontrado nenhuma rota, o remetente pode tentar descobrir uma rota, utilizando a função descoberta de rota do protocolo. O armazenamento de mais de uma rota para um mesmo destino possibilita a utilização de outra caso uma falhe, isso implica na diminuição no número de pacotes de controle gerado na rede, pois não teria a necessidade de utilizar a função descoberta de rota [Johnson and Maltz, 1996].

Enquanto o nó emissor aguarda o processo de descoberta da rota para enviar o pacote desejado, ele pode continuar operando normalmente, podendo enviar, receber e encaminhar pacotes com outros nós na rede, para os quais já conhece uma rota válida.

3.2.1 Descoberta de Rotas

No DSR, o nó fonte inicia a descoberta de rotas enviando, via difusão, mensagens *Route Request* (RREQ) para todos os seus vizinhos que estejam em seu raio de alcance. O pacote RREQ contém as informações de endereço da origem e do destino, o identificador determinado pela origem e uma lista dos nós por onde o pacote passou

até o momento. O identificador determinado pela origem e o endereço de origem/destino, servem para identificar requisições duplicadas, descartando as últimas requisições duplicadas que chegam ao nó. Para isso, cada nó mantém uma lista com essas informações do RREQ [Johnson and Maltz, 1996].

O nó ao receber um RREQ verifica se é ele o destinatário. Se for, é enviado para o nó origem um pacote *Route Reply* (RREP), com a lista da sequência de todos os nós acumulados pelo RREQ até o destino. O RREP é enviado via *unicast* seguido a rota reversa do RREQ. Se não for o destinatário da mensagem, o nó confere se a requisição de rota foi recebida anteriormente e, sendo verdade, o pacote é descartado. Caso não seja verdade, o nó verifica se existe em sua memória *cache* uma rota para o destino. Caso exista, um pacote RREP é enviado até a origem, contendo o caminho válido construído a partir da concatenação da rota existente na memória com a rota acumulada no pacote RREQ.

Por fim, se o nó intermediário não conhecer uma rota válida para o destino, ele acrescenta seu endereço e repete o processo reenviando o pacote RREQ, até que a requisição de rota seja recebida pelo nó destino ou por um nó intermediário que conheça uma rota válida.

O nó destino, ao receber mais de uma requisição de rota com o mesmo identificador e mesmo endereço de origem, não se exclui a última como ocorre com os nós intermediários. Todas as solicitações RREQ são respondidas com pacotes RREP à origem. Assegurando que o nó origem tenha rotas alternativas para o destino, caso alguma rota falhe. Uma vez que o nó fonte possui uma rota para o destino, os pacotes de dados são enviados seguindo o caminho especificado.

Na Figura 3.3(a) pode se observar o percurso feito pelo pacote RREQ ao se tentar descobrir uma rota no DSR, partindo do nó fonte *S* para o nó destino *D*. Cada nó por onde o pacote RREQ passa, adiciona ao cabeçalho do pacote o seu endereço, até chegar ao destino final. Um nó, como é o caso do nó 6 da Figura 3.3a, ao receber o mesmo pacote RREQ, retransmite o primeiro recebido e faz o descarte dos demais. Já a Figura 3.3(b) representa o caminho percorrido pelo pacote RREP, após o destino ser alcançado pelo pacote RREQ. As duas rotas descobertas, *S-2-5-D* e *S-3-6-7-8-D*, são

enviadas à origem para serem arquivadas na memória *cache*. No entanto, o nó *S* sempre optará pela rota mais curta.

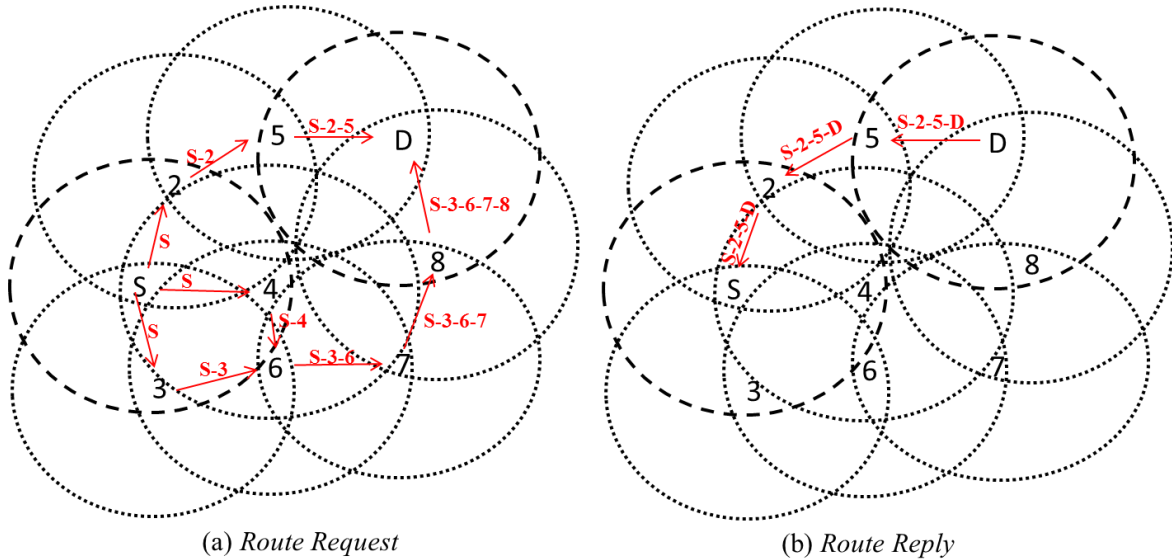


Figura 3.3. Descoberta de Rota no Protocolo DSR.

3.2.2 Manutenção de Rotas

Como o AODV, o DSR também dispõe de um mecanismo de manutenção de rotas. No entanto, o DSR não utiliza de mensagens *Hello* como ocorre no AODV. O DSR, para monitorar a conectividade dos nós, utiliza procedimentos que monitoram a operação da rota, onde cada nó fica responsável por verificar o recebimento de pacotes do vizinho. A verificação é feita pelas confirmações recebidas pela camada de enlace. Caso o nó seguinte não envie a confirmação de recebimento de pacote, é identificada queda de enlace. Com isso, um pacote *Route Error* (RERR) é enviado ao nó fonte pelo caminho reverso, contendo o endereço do nó que causou o erro e do nó que receberia o pacote. Ao receber o pacote de erro, o nó fonte remove de sua cache todas as rotas que passam por aquele enlace defeituoso [Johnson and Maltz, 1996].

Uma vantagem do DSR é a possibilidade que os nós têm de observarem os pacotes que estão trafegando pela rede e acumularem na memória *cache* os caminhos

que estão contidos neles, sem a necessidade de executar o processo de descoberta de rotas.

3.3 Protocolo MR-LQSR

Em 2004, [Draves et al, 2004], tendo como objetivo melhorar o encaminhamento de pacotes em uma rede sem fio de múltiplos saltos e múltiplos rádios, desenvolveu a métrica de roteamento *Weighted Cumulative Expected Transmission Time* (WCETT), que foi incorporada ao protocolo de roteamento chamado *Link-Quality Source Routing* (LQSR). A união da métrica de roteamento WCETT, que tem como função escolher o caminho com maior vazão entre a origem e o destino, com o protocolo LQSR, formou um novo protocolo de roteamento voltado para as redes sem fio de múltiplos saltos e múltiplos rádios, chamado de *Multi-Radio Link-Quality Source Routing* (MR-LQSR). LQSR é um protocolo baseado em estado de enlace com roteamento na origem que se derivou do *Dynamic Source Routing* (DSR), apresentado na seção anterior.

Todo protocolo de roteamento baseado em estado de enlace, como é o MR-LQSR é composto por quatro componentes: um componente que descobre os vizinhos de um nó; um componente que atribui pesos para os links que um nó tem com seus vizinhos; um componente para propagar as informações para outros nós na rede; e um componente que usa os pesos dos links para encontrar o melhor caminho para um determinado destino na rede. Ou seja, os pesos são combinados pela métrica para calcular o melhor caminho.

A semelhança do MR-LQSR com o DSR se dá no primeiro e terceiro componentes, enquanto que o segundo e quarto são bem distintos. O DSR atribui peso igual a todos os links da rede, fazendo a soma dos pesos dos links ao longo do caminho entre a origem e o destino, escolhendo o menor caminho. Assim, o *Dynamic Source Routing* implementa o roteamento de menor caminho. Em vez de utilizar o caminho mais curto, MR-LQSR usa a métrica que escolhe um caminho de maior vazão entre o nó origem e o nó destino. Para essa escolha, o MR-LQSR leva em consideração o uso

de diferentes canais de operação, a largura de banda, e a taxa de perda dos links entre as estações.

3.3.1 Cálculo da Métrica

A métrica *Weighted Cumulative Expected Transmission Time* (WCETT) é uma evolução da métrica *Expected Transmission Time* (ETT) [Aguirre et al, 2013]. A diferença entre as duas, é que o WCETT foi um aprimoramento do ETT, pois leva em consideração a existência de múltiplos canais operando em múltiplas interfaces de rádios. O ETT deriva-se do *Expected Transmission Count* (ETX) que calcula o número esperado de transmissões que um nó leva para enviar com sucesso pacote de teste na taxa básica da rede em um dado enlace. O ETT, além de levar em conta o número esperado de transmissões, considera também o tamanho do pacote e a taxa de transmissão. Isso ocorre porque a maioria dos pacotes de dados, que são enviados em taxas que podem variar de acordo com as condições do meio, possui um tamanho superior ao de um pacote de teste [Campista et al. 2007].

A métrica ETX, proposta por [D. Colte et al, 2003], se propõe a medir o número esperado ou médio de transmissões, inclusive retransmissões, necessários para enviar um pacote via *unicast* através de um enlace. A obtenção do ETX se inicia com o cálculo da probabilidade de perda de pacotes em ambas as direções do enlace. Sejam pf a probabilidade de perdas de pacotes na direção emissor/receptor, pr a probabilidade de perdas de pacotes na direção receptor/emissor e p a probabilidade que a transmissão de pacotes de x para y não seja bem sucedida. Onde para se ter uma transmissão bem sucedida os pacotes devem ser reconhecidos com sucesso. Temos:

$$p = 1 - (1 - pf) * (1 - pr) \quad (1)$$

O MAC do protocolo 802.11 irá retransmitir os pacotes cuja transmissão não foi bem sucedida. Seja $s(k)$ a probabilidade dos pacotes serem entregues com sucesso de x para y após k tentativas:

$$s(k) = p^{k-1} * (1 - p) \quad (2)$$

E, finalmente, o número esperado de transmissões necessário para entregar com sucesso um pacote de x para y é denotado por ETX:

$$ETX = \sum_{k=1}^{\infty} k * s(k) = \frac{1}{1-p} \quad (3)$$

Segundo [Draves et al, 2004], a métrica do percurso é a soma dos valores para cada link ETX no caminho. A equação (3) assume que a probabilidade de um determinado pacote ser perdido na transmissão é independente do seu tamanho e identicamente distribuída. A equação também implica que a métrica ETX é bidirecional, sendo a mesma tanto de x para y, quanto de y para x.

A métrica ETX tem várias características importantes, tais como: se basear em relações de entrega que afetam diretamente o rendimento; detecta assimetria e se adequa através da incorporação dos índices de perda em cada direção; pode usar medições precisas de perdas nos enlaces para fazer decisões de granulação fina entre rotas; penaliza rotas com um número maior de saltos e por isso tem menor rendimento devido à interferência entre os diferentes saltos; e tende a minimizar o uso do espectro, que deve maximizar a capacidade geral do sistema [D. Colte et al, 2003].

A métrica ETT é um aprimoramento da métrica ETX, pois leva em consideração para o cálculo a largura de banda do enlace e o tamanho do pacote. Seja S o tamanho do pacote e B a largura de banda, então:

$$ETT = ETX * \frac{S}{B} \quad (4)$$

Para calcular o ETT de acordo com as equações (4) e (3), faz-se necessário saber as taxas de perdas de pacotes em ambas as direções (*pf* e *pr*) do link e a largura de banda de cada ligação. Os valores de *pf* e *pr* podem ser aproximados utilizando uma técnica descrita por [D. Colte et al, 2003], que utiliza pacotes de sondagem para quantificar esses valores. Cada nó, uma vez por segundo, envia pacotes de sondagem para todos os seus vizinhos, e também controla o número de pacotes de sondagem recebidos à partir de cada vizinho durante uma janela de tempo de dez segundos, incluindo as informações do número de pacotes recebido de cada vizinho em seus próprios pacotes de sondagem. Com isso as estações podem calcular *pr* diretamente a partir do número de sondagens que receberam de um vizinho na janela de tempo e podem utilizar as informações que elas receberam na última sondagem de um determinado vizinho para calcular o *pf*.

A estimativa da largura de banda pode ser feita utilizando a técnica de pares de pacotes. Cada nó envia dois pacotes de teste para cada um dos seus vizinhos a cada minuto. O primeiro pacote é pequeno, 137 bytes, enquanto que o segundo pacote de teste é grande, 1137 bytes. O vizinho mede a diferença de tempo entre a recepção do primeiro e do segundo pacote e comunica o valor ao remetente, que considera um mínimo de dez amostras consecutivas. Em seguida, calcula-se a largura de banda dividindo o tamanho do segundo pacote enviado pelo mínimo de amostras. A estimativa da largura de banda não é muito precisa, uma vez que vários fatores ignorados pela técnica afetam o tempo de entrega de pacotes. No entanto, a estimativa é suficientemente capaz de distinguir enlace de larguras de banda diferentes [Draves et al, 2004].

O cálculo do WCETT se dá pela combinação e somatório dos ETTs dos enlaces ao longo do caminho de um determinado pacote. Seja ETT_i o ETT de um determinado enlace i entre dois nós x e y .

O somatório dos ETTs dos enlaces no percurso de um pacote representa o atraso que um pacote sofre ao sair do nó emissor e chegar ao nó receptor. Assim, considerando um caminho de n saltos, tem-se:

$$WCETT = \sum_{i=1}^n ETT_i \quad (5)$$

Entretanto, o WCETT deve considerar a existência de múltiplos canais e múltiplos rádios, uma vez que apenas o somatório dos ETTs ao longo do caminho não o faz. Para isso se faz necessário adicionar um novo termo à fórmula. Considerando um caminho de n saltos, e assumindo que o sistema tem um total de k canais, define-se X_j como:

$$X_j = \sum_{\text{Salto } i \text{ está no canal } j} ETT_i; \quad 1 \leq j \leq k \quad (6)$$

Onde X_j representa a soma dos tempos de transmissão dos saltos do canal j , sendo o maior X_j o canal de gargalo da vazão total do caminho. Logo, pode-se usar a seguinte definição para WCETT:

$$WCETT = \max_{1 \leq j \leq k} X_j \quad (7)$$

É perceptível o favorecimento, pela métrica, de caminhos com maior diversidade de canais. Contudo, o valor da métrica nem sempre vai aumentar à medida que mais saltos sejam adicionados, pois saltos adicionais usando canais não gargalos não afetam o valor da métrica.

Ao se combinar as propriedades das duas métricas descritas nas equações (5) e (7), tem-se:

$$WCETT = \underbrace{(1 - \beta) * \sum_{i=1}^n ETT_i}_{\text{}} + \underbrace{\beta * \max_{1 \leq j \leq k} X_j}_{\text{}} \quad (8)$$

Onde β é um fator de compromisso que está entre $0 \leq \beta \leq 1$, servi para fazer uma média ponderada entre as duas partes da equação.

A equação (8) pode ser interpretada de duas maneiras. Primeiro, pode-se ver a equação como um compromisso entre benefício global e o egoísmo. A primeira parte é a soma dos tempos de transmissão ao longo de todos os saltos no caminho da trajetória do pacote na rede. Isso reflete o consumo total de recursos ao longo do caminho, onde o tempo é o recurso a ser consumido. A segunda parte reflete o conjunto de saltos que terão o maior impacto sobre o rendimento do caminho. A média ponderada pode ser vista como uma tentativa de equilibrar as duas partes da equação. Note que a média implicitamente assume que a rede não está fortemente carregada. Se cada canal está sendo totalmente utilizado, então pode se ajustar o $\beta = 0$ para minimizar o consumo total de recursos. Alternativamente, a equação (8) pode ser interpretada como um compromisso entre rendimento e atraso. A primeira parte pode ser considerada como uma medida de latência do caminho. A segunda parte, uma vez que representa o impacto do gargalo dos saltos, pode ser visto como uma medida da taxa de vazão do caminho. A média ponderada, novamente, é utilizada como uma tentativa de encontrar um equilíbrio entre as duas partes da equação [Draves et al, 2004].

A Figura 3.4 retrata as opções dos caminhos. Imagine uma rede na qual cada nó possui dois rádios sintonizados em canais distintos um do outro. Um rádio sintonizado no canal 1 e o outro no canal 2, sem interferência entre os canais, com diferentes alcances e diferentes larguras de banda. Consideram-se quatro caminhos possíveis entre

a fonte S e o destino D. O valor do ETT nos saltos e os valores WCETT para $\beta = 0,9$ e $\beta = 0,1$ são mostrados na Figura 3.4.

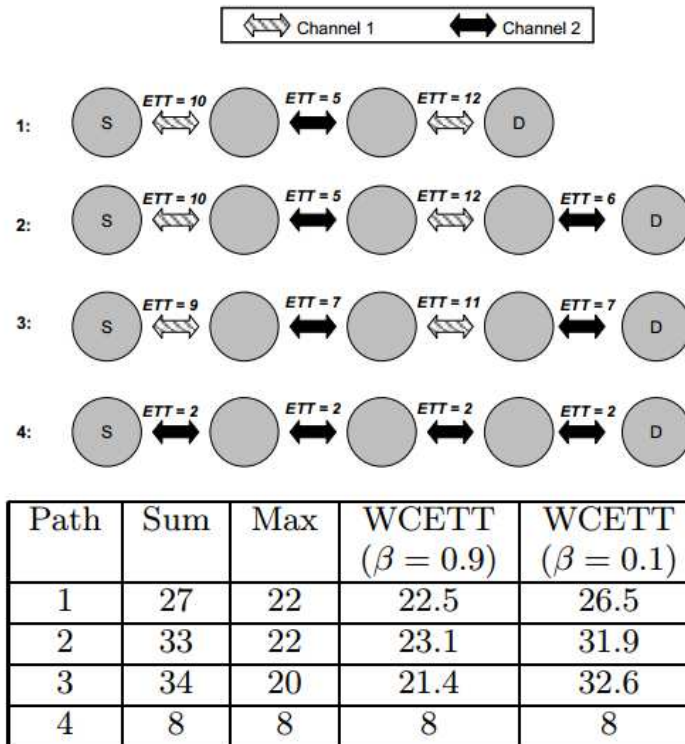


Figura 3.4: Exemplo de escolha do caminho no WCETT.
Fonte: (Draves et al., 2004).

No caminho 1, os gargalos são os saltos do canal 1. O caminho 2 é semelhante ao caminho 1, com exceção de um salto extra no canal 2. No entanto, os saltos no canal 1 ainda são o gargalo. Contudo, o caminho 2 é pior do que o caminho 1 por ter um salto a mais. Esse detalhe reflete no cálculo do WCETT. Entretanto, o grau para que o caminho 1 pareça ser melhor que o caminho 2 dependerá do valor de β . De fato, se atribuir $\beta = 1$, o caminho 1 e 2 terá valores iguais para WCETT, mas o caminho 2 nunca terá um valor de WCETT menor que o caminho 1. Nos caminhos 2 e 3, o gargalo em ambos são o salto no canal 1. É difícil decidir qual caminho é melhor, pois para diferentes valores de β um ou outro caminho pode parecer melhor. Por fim, considere o caminho 4. Apesar do caminho não apresentar diversidade de canais, contendo apenas o canal 2, o caminho 4 é claramente melhor que os três primeiros, o que se reflete corretamente no cálculo do WCETT [Draves et al, 2004].

4. Simulação e Resultados

4.1 Contextualização

A Universidade Federal de Viçosa (UFV), campus Viçosa, utiliza-se da tecnologia *Wi-Fi* (IEEE 802.11) para levar Internet banda larga a alguns lugares distantes da Diretoria de Tecnologia da Informação (DTI), setor responsável por toda a infraestrutura e serviço de rede de computadores da instituição. Como pode ser observado na tabela 4.1, o campus de Viçosa é muito grande, conta com 2.609,59 hectares de área física e 358.588,35 m² de área construída, e fornecer acesso à rede de dados a todos os departamentos e estações experimentais é um grande desafio.

Tabela 4.1. Área Física da UFV. Fonte: (UFV, 2012)

Localização	Área Física (ha)	Área Construída (m ²)
TOTAL CAMPUS I, II e III	4.474,73	391.930,31
CAMPUS I – VIÇOSA	2.609,59	358.588,35
<i>Campus Sede – Viçosa</i>	1.601,01	331.347,52
Fazendas	524,26	12.081,30
Sementeira	92,33	1.990,00
Gramma	51,11	592,00
Mata do Paraíso	186,62	150,00
Cachoeirinha	70,28	500,00
Casquinha	24,78	524,30
Canãa	9,68	0,00
Boa Vista	89,46	8.325,00
Estações Experimentais	270,31	7.659,53
São João	34,73	452,82
Araponga	74,11	395,00
Ponte Nova	61,47	1.259,00
CEPET - Capinópolis	100,00	5.552,71
Centev	214,00	7.500,00
CAMPUS II – FLORESTAL	1.674,08	25.941,00
CAMPUS III – RIO PARANAÍBA	191,07	7.400,96
Área Urbanizada	275,00	

A figura 4.1 ilustra a posição das antenas de transmissão e recepção da rede sem fio no campus Viçosa da UFV. Os pontos em azul são os locais onde o sinal de Internet chega, enquanto que os pontos em vermelho, equideocultura, horta velha, melhoramento de aves e a Mata do Paraíso, são locais onde foram requisitados o acesso à rede, mas a DTI possui dificuldades em fornecer o acesso com a tecnologia atualmente utilizada.

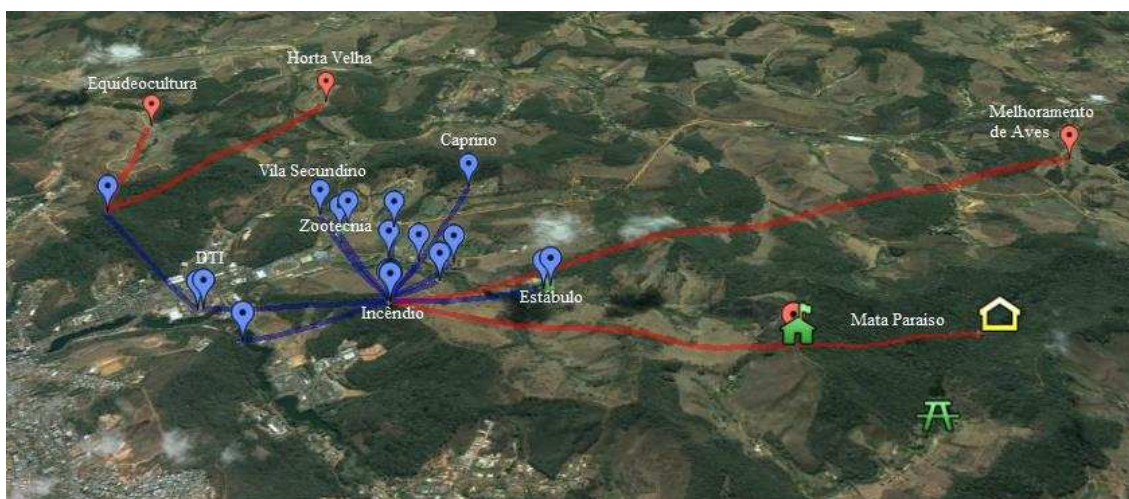


Figura 4.1. Distribuição de Rede via Wi-Fi no Campus Viçosa.
Fonte (adaptado): (Google Earth, 2013)

A Mata do Paraíso exemplifica muito bem a dificuldade que a DTI enfrenta em fornecer acesso à Rede com tecnologia de fibra ótica nos diversos locais de pesquisa. A Mata do Paraíso, onde ocorrem vários experimentos, tem 186,62 hectares de área física, se localiza em uma das extremidades do campus da UFV e possui uma sede com infraestrutura básica para os pesquisadores como água encanada, energia elétrica e banheiros. A DTI utiliza uma torre de observatório de incêndio, localizada em um ponto intermediário, como retransmissor do sinal. Ao observar que não existe visada da torre de observatório de incêndio para a sede na Mata do Paraíso, representada pela casa em amarelo, por ficar bem no meio do vale, a alternativa seria a utilização de outros pontos de retransmissão do sinal. Um deles seria na torre em verde já existente, que tem visada para a torre de observatório de incêndio. Outro problema é que na torre em verde não tem visada devido ao relevo para a sede da Mata do Paraíso, exigindo assim mais pontos de retransmissão do sinal entre esses dois locais.

As redes de rádio cognitivo surgem como uma alternativa de levar internet a lugares distantes dos centros de distribuição. O problema enfrentado pela DTI na Mata do Paraíso se resolveria de forma mais fácil utilizando a tecnologia WRAN. Como foi falado na subseção 2.3.1, as redes sem fio regional podem atender usuários a uma distância de 20 a 40 km de raio a partir da estação base. Com essa tecnologia a DTI poderia atender, não apenas a Mata do Paraíso, mas, todas as requisições de rede que até o momento não foram atendidas na UFV.

As simulações para este trabalho foram feitas para dois diferentes cenários, mapeando dois cenários reais existentes no campus: O primeiro cenário representa a transmissão de uma estação remota para a análise dos dados colhidos na central de processamento, DTI. O segundo cenário modela serviços para dispositivos móveis na área central do campus da UFV.

4.2 Ambiente de Simulação

O uso de simulação se tornou imprescindível em pesquisas na área de computação. A simulação viabiliza experimentos, que até então, eram inviáveis devido a seu alto custo financeiro. Mesmo quando se tem o recurso financeiro, antes de fazer a parte experimental, se faz a simulação para observar os pontos críticos do experimento, e com isso, obter maior chance de sucesso na sua realização. A facilidade em alterar a configuração dos cenários, aceitação da comunidade científica, facilidade na apuração dos resultados e o baixo custo, como foi dito anteriormente, são algumas justificativas para o uso de simuladores em pesquisas científicas.

O simulador utilizado foi o CRCN (*Cognitive Radio Cognitive Network*) [CRCN, 2011], o qual tem como base o simulador de rede NS-2 (*Network Simulator 2*). O simulador NS-2 é modularizado, construído em C\C++ e utiliza Tcl para gerar o script de simulação. Possui licença GPL (*General Public License*) [GNU GPL, 2011] e tem sido largamente utilizado em diversos projetos, tornando-o quase um padrão em simulações de redes de computadores. O NS-2 é um simulador de eventos discretos e é

capaz de realizar simulações de diversos tipos de redes, inclusive redes do padrão IEEE 802.11.

O simulador CRCN suporta avaliações de desempenho para a alocação dinâmica de recursos do espectro, os algoritmos de controle de potência e adaptações nos protocolos de rede dos Rádios Cognitivos, incluindo o MAC CR e os protocolos de roteamento CR. Este simulador utiliza o NS-2 para gerar tráfegos realistas e padrões de topologia. Para cada nó nesse simulador, um rádio reconfigurável multi-canal na camada física está disponível, personalizando os parâmetros do espectro, como potência de transmissão e propagação. A figura 4.2 apresenta a arquitetura do simulador CRCN.

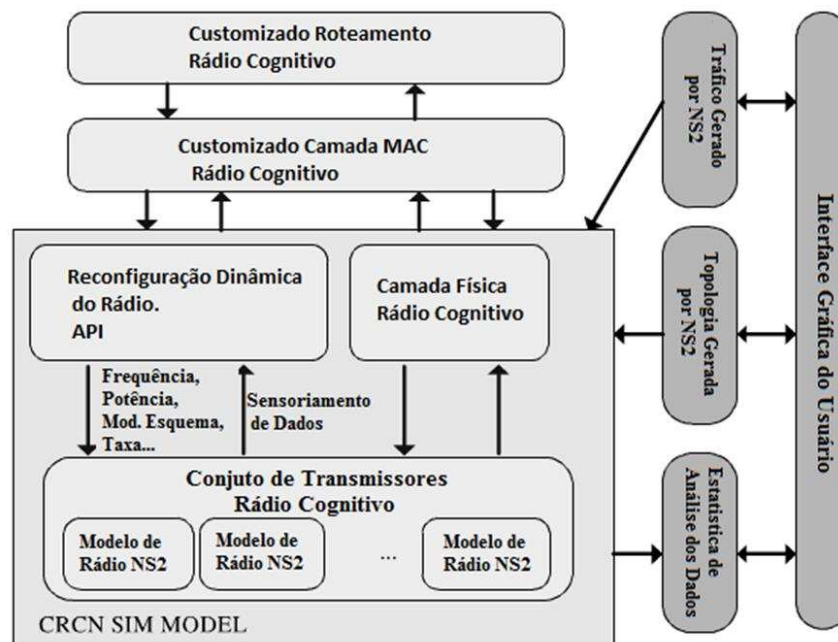


Figura 4.2. Arquitetura do Simulador CRCN. Fonte: (CRCN, 2011)

O simulador CRCN permite a transmissão de parâmetros de interface entre as diferentes camadas, como mostra as setas entre os blocos. Para fazer uso do simulador, os usuários precisam apenas substituir os algoritmos de roteamento de acordo com o NS2.

As simulações, neste trabalho, foram feitas em um máquina com processador *Intel Core i5 3.10 GHz*, 3 GB de memória RAM, sobre uma plataforma *Linux Ubuntu*

10.04. Foram feitas 30 simulações para cada variação dos cenários, de modo a obter os resultados com intervalo de confiança de 95%. Em cada simulação foi gerada uma semente de inicialização aleatória.

4.3 Cenário 1: Estação Experimental Remota

Tendo como base o desafio da Diretoria de Tecnologia da Informação (DTI) em prover acesso à Internet a todos os departamentos e estações experimentais da Universidade Federal de Viçosa (UFV), foi definido um primeiro cenário observando a realidade da universidade com o objetivo de propor uma alternativa para superar essas dificuldades. O primeiro cenário modela a transmissão de dados de duas estações remotas, como a localizada na Mata do Paraíso, para a DTI. As duas estações remotas geram tráfego na rede, que são transportados pelas estações intermediárias até a chegada a DTI.

O Cenário 1 é composto por 13 nós, onde dois nós são as fontes de dados representando as estações remotas geradoras de tráfego, 10 nós intermediários representando as estações intermediárias responsáveis por transportar as informações, e o último nó que é o receptor representado a DTI, como pode ser observado na Figura 4.3.

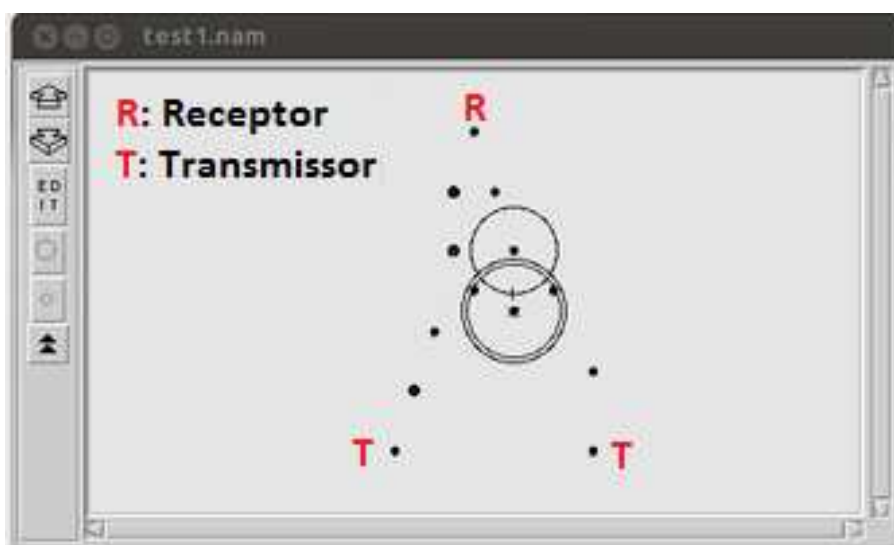


Figura 4.3. Cenário 1.

O cenário 1 foi simulado mantendo fixo o número e posicionamento dos nós e variando o protocolo de roteamento, MR-LQSR e AODV. Para cada protocolo de roteamento foram feitas simulações utilizando os protocolos de transporte TCP e UDP separadamente.

Juntamente com o protocolo de transporte UDP foram usados: uma fonte de dados CBR (*Constant Bit Rate*), que transmite a taxa de bits constante; pacotes com 1500 bytes e; uma taxa de fluxo de dados constante de 100 kbps, fornecido pelo CBR. Essa variação do cenário 1 tenta modelar a utilização da rede por um possível sistema de prevenção de incêndio, onde o monitoramento e descoberta do princípio de incêndio seria feito através da análise de vídeo monitoramento da Mata do Paraíso.

Tabela 4.2. Características da Simulação do Cenário 1

Descrição	Valor
Número de Nós	13
Propagação	Two Ray Ground
Phy	WirelessPhy
Antena	Omnidirecional
Protocolo de Roteamento	MR-LQSR; AODV
Protocolo de Transporte	TCP; UDP
Mac	802.11
Tempo de Simulação	60s
Área de Simulação	1000 x 1000 m ²
Início Transmissão	2s
Termino Transmissão	55s

Enquanto que, junto com o protocolo de transporte TCP foram utilizados: uma fonte de dados FTP (*File Transfer Protocol*), que é uma forma rápida e versátil de transferir arquivos; pacotes com 1500 bytes e; uma janela de 32 pacotes. Essa variação do cenário 1 modela a transferência de arquivos gerados pelos aplicativos dos pesquisadores na sede da Mata do Paraíso, para os servidores localizados na DTI.

O tempo de simulação foi de 60 segundos. Um nó transmissor iniciou a transmissão no 2º segundo e o outro no 5º segundo. Os dois nós concorrem pelo canal de transmissão a partir do 5º segundo, até pararem de transmitir no 55º segundo. A tabela 4.2 apresenta as características e configurações das simulações para o cenário 1.

4.3.1 Resultados Obtidos

Para o protocolo de transporte UDP, tanto o protocolo de roteamento MR-LQSR quanto o AODV transmitem um número médio de 1718 pacotes de dados. Enquanto que a percentagem de pacotes entregues no MR-LQSR foi de 74,43% o AODV foi de 70,72%, sendo o MR-LQSR 5,24% superior, na entrega de pacotes, em relação ao AODV para esse cenário. Uma justificativa, para a alta perda de pacotes de dados é a transmissão ao mesmo tempo dos dois nós, fontes de dados. O nó receptor, ao receber muitos pacotes de dados ao longo de toda a simulação, não dava conta de processar todos os pacotes de dados na fila de espera. A fila comportava apenas 50 pacotes de dados, e pacotes que excedessem o tamanho da fila eram descartados.

No protocolo de transporte TCP, o número médio de pacotes transportados no conjunto de 30 simulações realizadas utilizando o protocolo de roteamento MR-LQSR foi de 374,6 pacotes de dados, com uma taxa média de entrega de 91,99%. No protocolo de roteamento AODV o número médio de pacotes transportados foi de 600,2 pacotes de dados, com 90,22% de taxa média de entrega. O número de pacotes de dados transmitidos no AODV foi superior ao MR-LQSR e as taxas médias de entrega de pacotes em ambos, bem próximas. Nesse caso, o protocolo de roteamento AODV se mostrou superior ao MR-LQSR, quando observado o número de pacotes de dados transmitidos. Uma possível justificativa é a topologia e o baixo número de nós na rede. O protocolo MR-LQSR tem um custo elevado no cálculo da métrica de roteamento WCETT, conforme visto na subseção 3.3.1, não sendo viável seu uso para esse tipo de cenário. O AODV apesar de ter um alto custo na descoberta e manutenção das rotas, teve melhor resultado devido ao pequeno número de nós na rede.

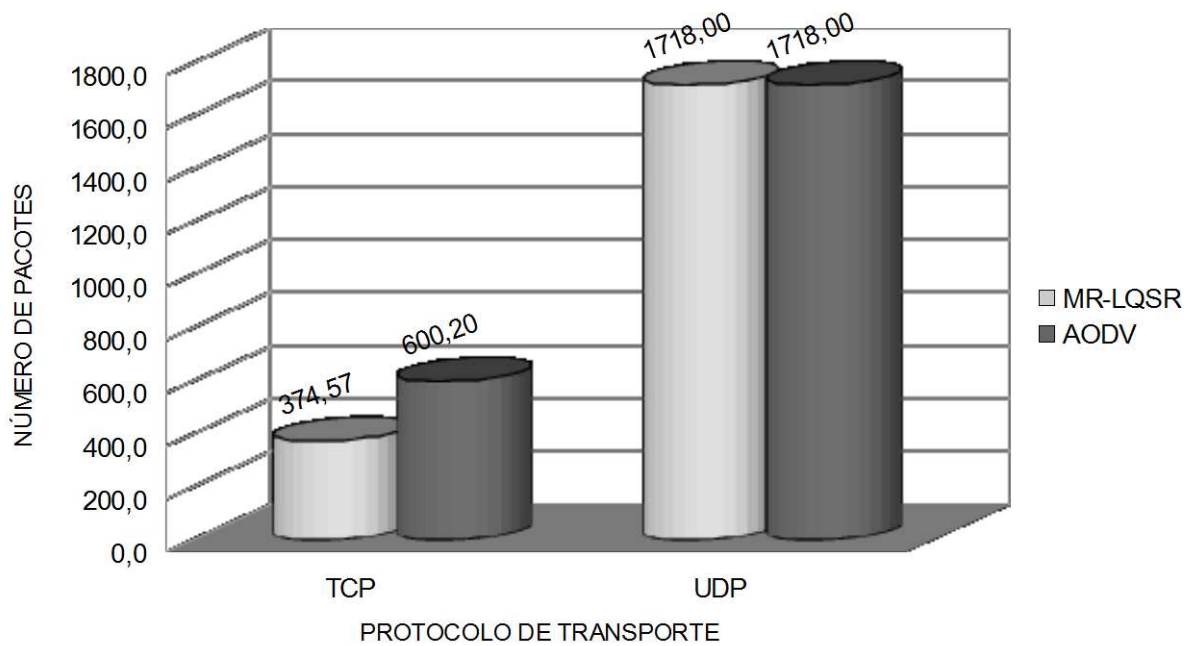


Figura 4.4. Total de Pacotes Transmitidos.

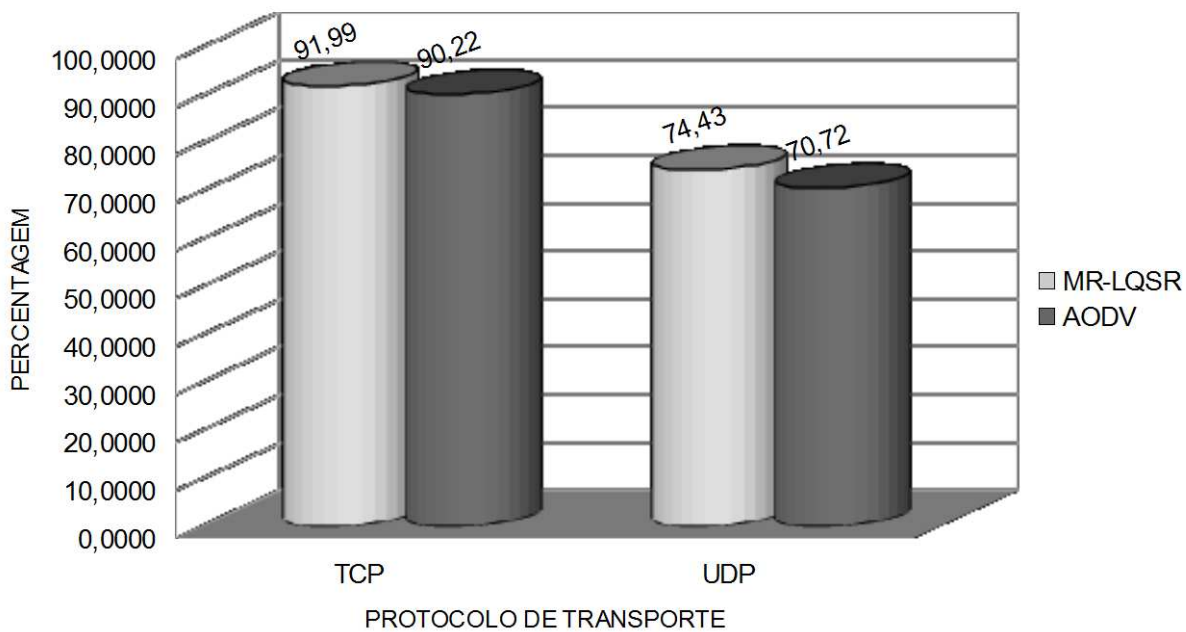


Figura 4.5. Percentagem de Pacotes Entregues.

Na Figura 4.4 é apresentado graficamente, o total de pacotes de dados transmitidos, enquanto que na Figura 4.5 é ilustrado o percentual de pacotes de dados entregues. Os resultados similares para os dois diferentes protocolos de roteamento,

considerando o mesmo protocolo de transporte, se devem ao pequeno número de rotas alternativas para o cenário considerado.

4.4 Cenário 2: Infraestrutura Para Aplicações Móveis

O cenário 2 foi proposto pensando em uma disponibilização de infraestrutura de rede sem fio na área central do campus da Universidade Federal de Viçosa (UFV) em Viçosa. A ideia é que a UFV possa fornecer serviço de acesso à rede de dados, para usuários móveis, em suas principais ruas do campus, onde deverão estar disponíveis aplicações específicas para a comunidade universitária, como por exemplo, os sistemas acadêmicos Sapiens e PVAnet. O Sapiens é uma ferramenta que possibilita ao estudante gerenciar toda sua vida acadêmica, fazer renovação de matrícula, cancelar disciplinas, entre outras atividades. O PVAnet é uma ferramenta usada pelos professores para disponibilizar material referente a sua disciplina, divulgar datas de provas, entre outras atividades. Na Figura 4.6, pode-se observar como é o campus da UFV em Viçosa.

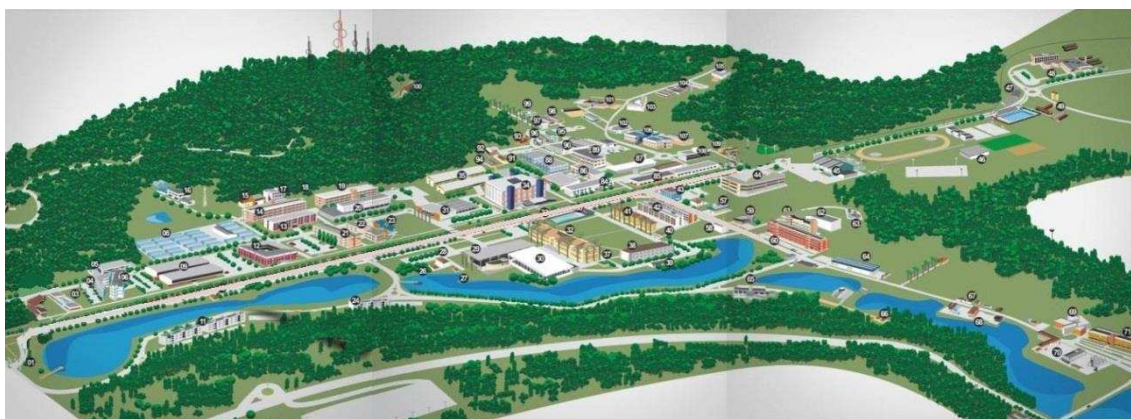


Figura 4.6. Campus da UFV em Viçosa.

O cenário 2 simula a avenida principal do campus, tendo nós representando os usuários que geram tráfego de dados ao longo de toda a área de interesse (coberta pelo sinal), outros que apenas retransmitem os dados representando nós fixos localizados nos prédios próximos à avenida principal e um nó sorvedouro para onde todo o tráfego converge representando o nó localizado na DTI.

As simulações no cenário 2 tentam prever a variação no número de nós na rede. Por isso, foram feitas simulações com 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 e 50 nós. Para cada variação no número de nós, foram feitas simulações variando o protocolo de roteamento, MR-LQSR e AODV. E para cada protocolo de roteamento, foram feitas simulações variando o protocolo de transporte, TCP e UDP separadamente.

Juntamente com o protocolo de transporte UDP foram usados: uma fonte de dados CBR em cada nó transmissor; intervalo entre os pacotes de dados de 5ms; pacotes com tamanho de 1500 bytes e; uma taxa de fluxo de dados constante de 100 kbps, fornecido pelo CBR. Essa variação do cenário 2 tenta modelar transmissões de vídeos que os usuários possam fazer. Assim, o usuário pode transmitir ao vivo, pela rede, algum acontecimento que esteja ocorrendo no campus.

Enquanto que, junto com o protocolo de transporte TCP foram utilizados: uma fonte de dados FTP em cada nó transmissor; pacotes com tamanho de 1500 bytes e; uma janela de 32 pacotes. Essa variação do cenário 2 modela transferências de arquivos dos usuários do sistema PVAnet, como por exemplo a entrega, pelos estudantes, de arquivos de trabalhos acadêmico pelo sistema PVAnet.

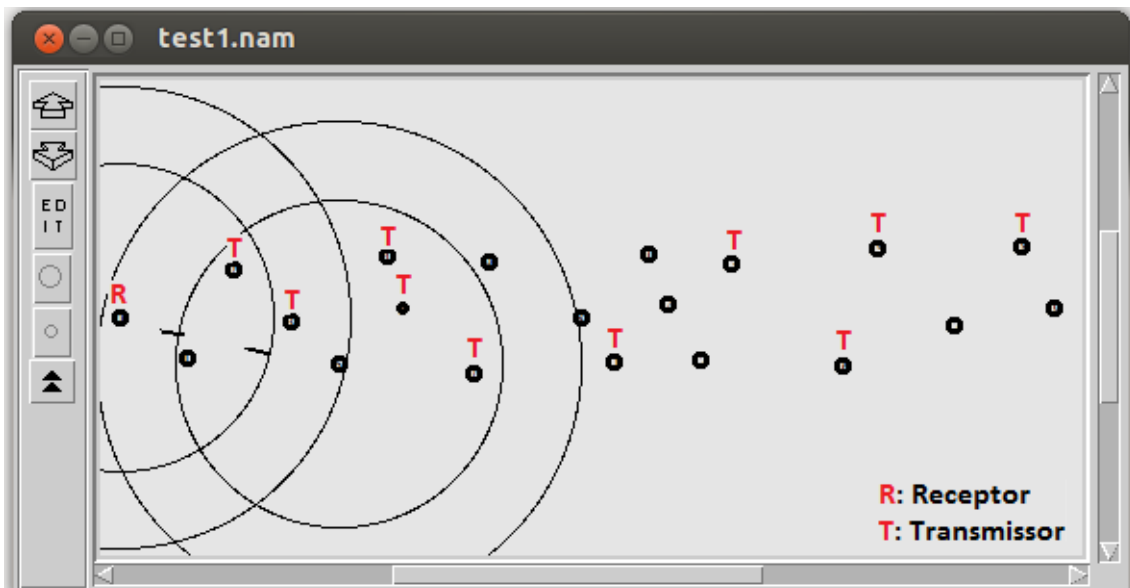


Figura 4.7. Cenário 2 – 20 nós.

Em cada variação no número de nós, 10 nós servem como fonte de dados representando os usuários que geram tráfego na rede, 1 nó como o receptor ou sorvedouro representando a DTI, e os outros nós, como transportadores representando não só a infraestrutura da rede sem fio, mas também, usuários que estão ativos mas não geram tráfego naquele momento. Os nós transmissores e o nó receptor não são alterados com a variação no número de nós, nem mesmo, suas posições. As Figuras 4.7 e 4.8 representam os cenários com 20 e 50 nós, respectivamente.

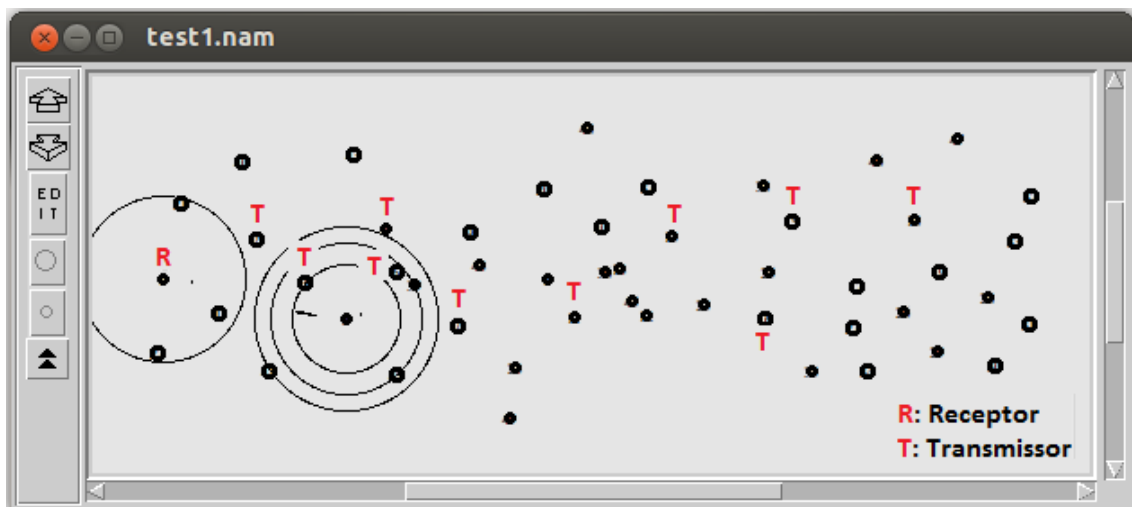


Figura 4.8. Cenário 2 – 50 nós.

Tabela 4.3. Características da Simulação do Cenário 2

Descrição	Valor
Número de Nós	15; 20; 25; 30; 35; 40; 45 e 50
Propagação	Two Ray Ground
Phy	WirelessPhy
Antena	Omnidirecional
Protocolo de Roteamento	MR-LQSR; AODV
Protocolo de Transporte	TCP; UDP
Mac	802.11
Tempo de Simulação	60s
Área de Simulação	1000 x 1000 m ²
Início Transmissão	5s
Termino Transmissão	55s

O tempo de simulação foi de 60 segundos, iniciando a transmissão no 5º segundo e parando no 55º segundo. Cada nó fonte de dados transmite durante 5 segundos e não ocorrem transmissões simultâneas, cada um transmite em tempos distintos. A definição desses parâmetros mencionados anteriormente foi feita através do script do simulador. A tabela 4.3 mostra as configurações da simulação para o cenário 2.

Os resultados obtidos serão apresentados em duas partes. A primeira parte apresenta os resultados para o protocolo de transporte TCP, com a variação no número de nós e a variação no protocolo de roteamento. A segunda parte exibe os resultados para o protocolo de transporte UDP, também, com a variação no número de nós e a variação no protocolo de roteamento.

4.4.1 Resultados Obtidos – TCP.

A Figura 4.9 apresenta um gráfico com o total de pacotes de dados transmitidos. Observa-se que usando o protocolo de roteamento MR-LQSR são transmitidos acima de 1400 pacotes para todas as variações no número de nós, enquanto que usando o protocolo de roteamento AODV, cai consideravelmente o número de pacotes transmitidos, quando se aumenta o número de nós na rede, passando de um número médio de 1329,1 pacotes, com 15 nós, para apenas 175,4 pacotes, com 50 nós.

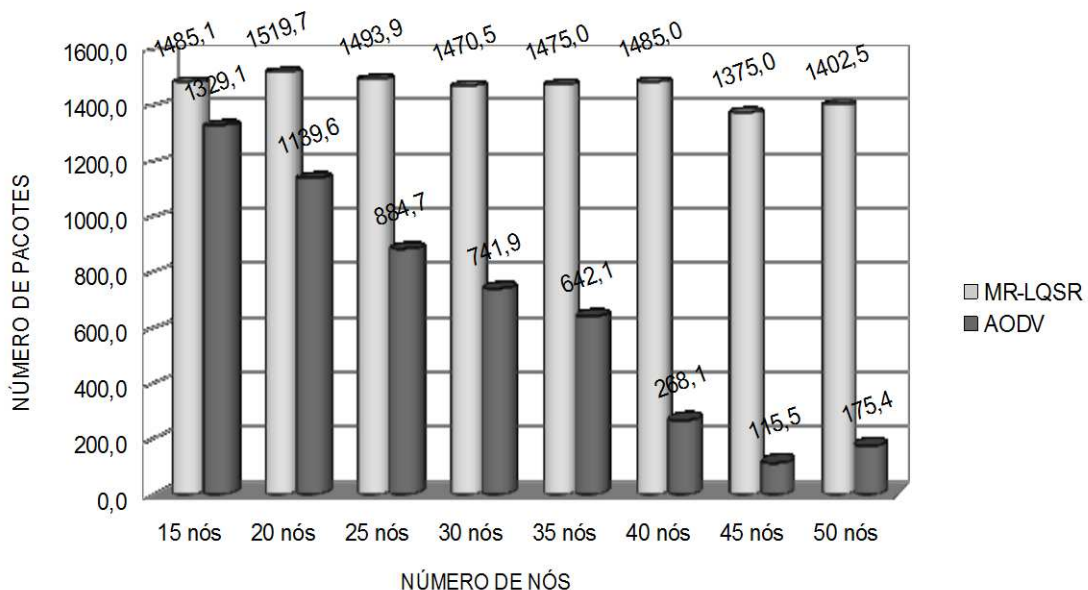


Figura 4.9. Total de Pacotes Transmitidos – TCP.

Uma justificativa para a drástica redução no número de pacotes transmitidos, com o aumento no número de nós, é o aumento considerável do número de pacotes de controle no protocolo AODV. Esse aumento faz com que ocorra um maior número de colisões. O TCP por ser um protocolo que faz um controle de congestionamento, acaba por diminuir a taxa de transmissão com o intuito de diminuir a taxa de erro. A Figura 4.10 ilustra a quantidade de pacotes de controle para cada variação no número de nós. Observe que o número de pacotes de controle no AODV é bem superior ao MR-LQSR para todas as variações. Nas variações de 15 e 50 nós o AODV gerou, em média, 38.452,9 e 258.678,3 pacotes de controle, respectivamente, enquanto que o MR-LQSR gerou, em média, 15.142,0 e 120.059,0 pacotes de controle, também respectivamente.

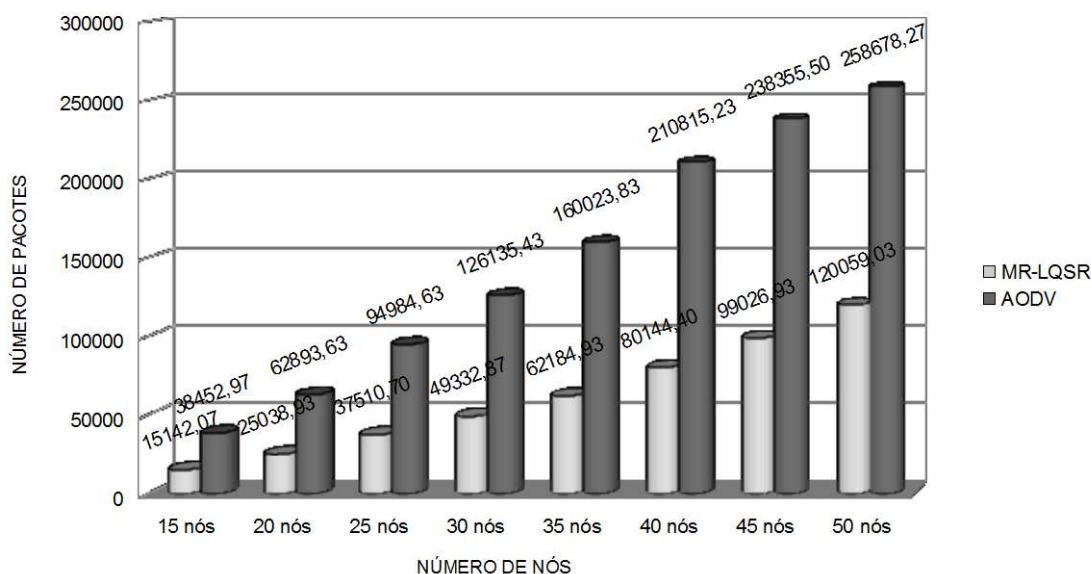


Figura 4.10. Pacotes de Controle – TCP.

A Figura 4.11 apresenta a percentagem de pacotes entregues corretamente ao destinatário. Observando o gráfico, percebe-se que o protocolo de roteamento MR-LQSR nas variações de 15 nós e 50 nós, teve uma taxa média de entrega de 99,48%, enquanto que a taxa média de entrega, nas mesmas variações de 15 nós e 50 nós, no protocolo de roteamento AODV foi de 99,28% e 92,09% respectivamente. Considerando apenas os números apresentados na Figura 4.11, a diferença na taxa de

entrega entre os dois protocolos é pouco significativa com densidade de até 35 nós e aumentando ligeiramente depois disso. Mas ao se levar em consideração o total médio de pacotes transmitidos, dados apresentados na Figura 4.9, e considerando o protocolo mais eficiente o que entregou ao destinatário um maior número de pacotes de dados, a diferença na eficiência entre os dois protocolos fica evidente.

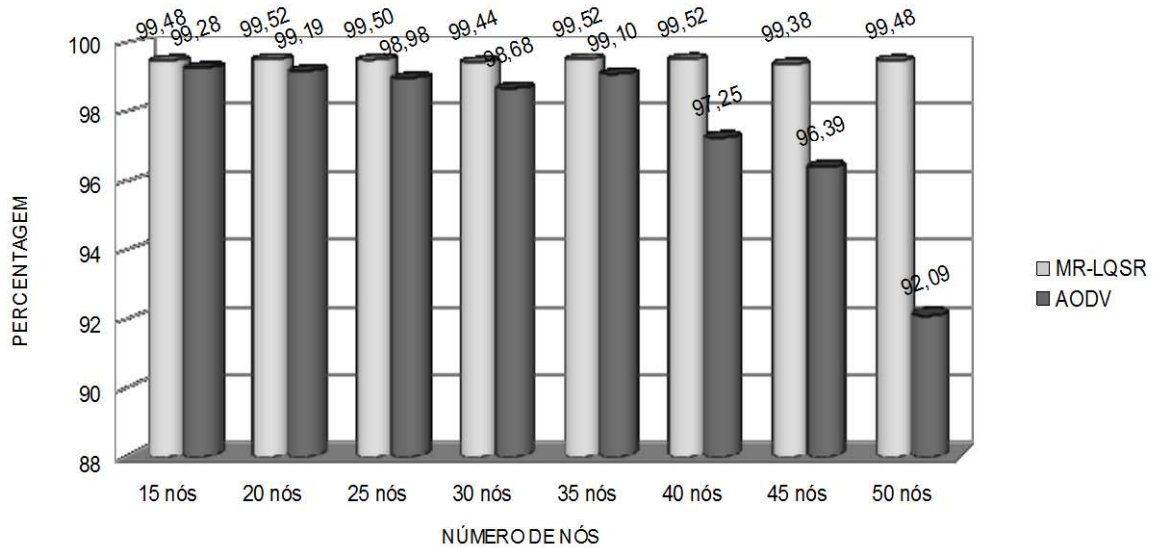


Figura 4.11. Percentagem de Pacotes Entregues – TCP.

4.4.2 Resultados Obtidos – UDP.

No cenário 2, para o protocolo de transporte UDP, utilizou-se nessa simulação uma fonte de dado CBR (*Constant Bit Rate*) que transmite a uma taxa de bits constante. Com isso o número de pacotes transmitido, para os dois protocolos de roteamento e em todas as variações do número de nós, foram de 840 pacotes.

A taxa média de entrega de cada protocolo de roteamento pela variação no número de nós é mostrada na Figura 4.12. Observe a diferença dos protocolos nas variações de 15 e 50 nós, a taxa de entrega no protocolo de roteamento MR-LQSR passa de 99,86% para 99,90%, enquanto que a taxa de entrega no protocolo de roteamento AODV passa de 99,69% para apenas 18,82%.

O número médio de pacotes de controle, para o protocolo de transporte UDP, é representado na Figura 4.13. Observando o gráfico, percebe-se que o número de pacotes de controle no protocolo de roteamento AODV é bem superior ao número de pacotes de controle no protocolo de roteamento MR-LQSR, e isso, pode ser uma justificativa para a alta taxa de perda de pacotes no protocolo AODV, ao se aumentar o número de nós na simulação.

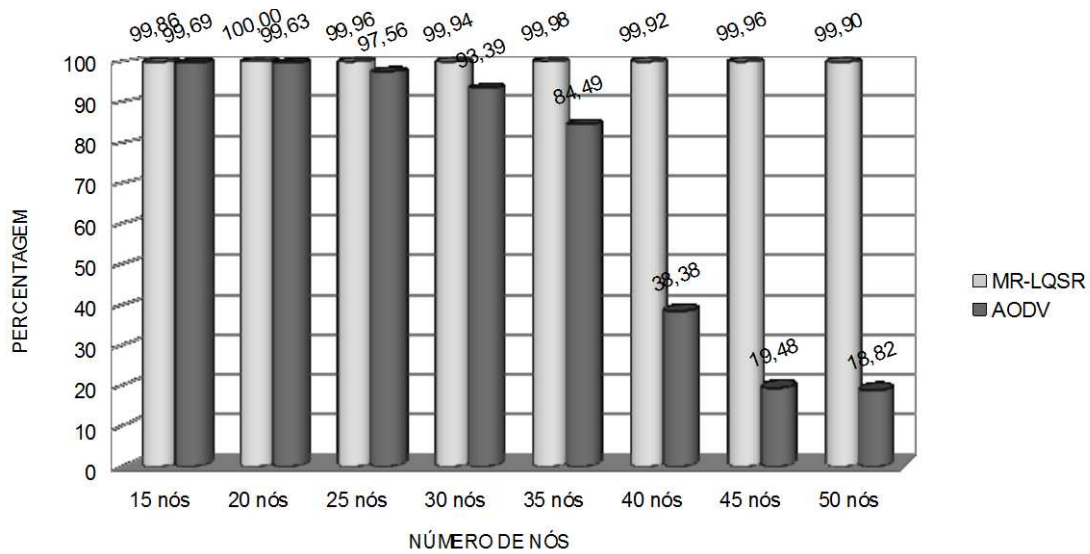


Figura 4.12. Percentagem de Pacotes Entregues – UDP.

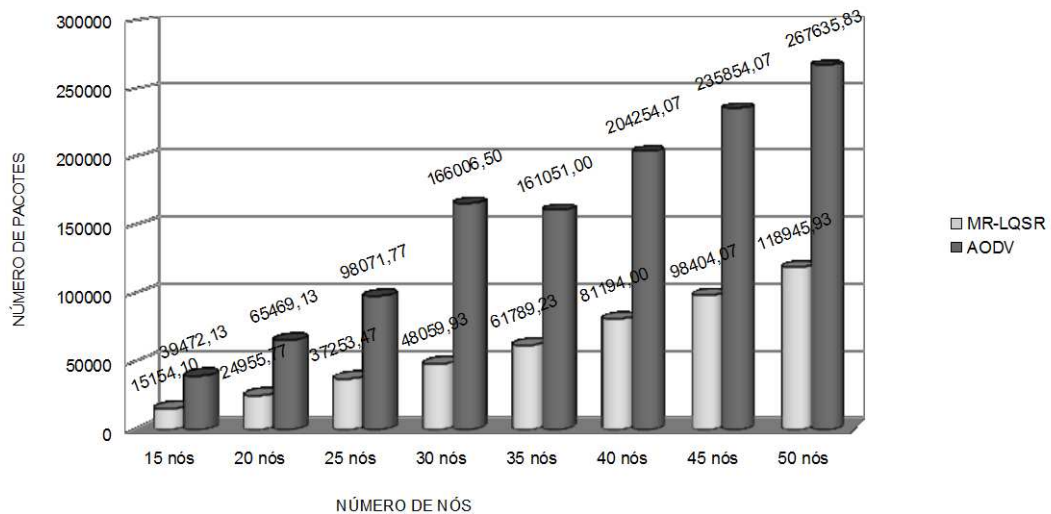


Figura 4.13. Pacotes de Controle – UDP.

Os resultados tão diferentes com o aumento do número de nós, para os dois diferentes protocolos de roteamento se devem ao grande número de rotas alternativas. Consequentemente, esse alto número de rotas alternativas geram um grande número de pacotes de controle, ficando evidente a superioridade do protocolo de roteamento que gera um menor número de pacotes de controle na rede.

5. Conclusões e Trabalhos Futuros

Neste trabalho foi feita uma comparação, através de simulações, entre o protocolo de roteamento AODV, voltado para Redes Sem Fio padrão IEEE 802.11 e o protocolo de roteamento MR-LQSR, voltado para Redes de Rádio Cognitivos. Rede Cognitiva é um possível padrão para futuros serviços que usa espectro de frequência que estão sendo liberados com a migração das TVs analógicas para digitais. Dois cenários foram definidos. O primeiro mapeia a transmissão de dados de estações experimentais remotas para processamento na Diretoria de Tecnologia de Informação (DTI), chamado de cenário 1. O segundo é uma rede de antenas fixas distribuídas na região central do campus da UFV para servir de infraestrutura para aplicações móveis para a comunidade acadêmica, batizado de cenário 2.

Os resultados das simulações para o cenário 1, apresentaram um ganho do protocolo de roteamento AODV em relação ao protocolo de roteamento MR-LQSR, quando se observa o protocolo de transporte TCP e uma pequena perda quando se observa o protocolo de transporte UDP.

Os resultados das simulações para o cenário 2, onde foram considerados diferentes densidades de nós, utilizando o protocolo de transporte TCP, mostram uma superioridade do protocolo de roteamento MR-LQSR em relação ao protocolo de roteamento AODV. A mesma conclusão pode-se tirar quando observado o cenário 2 utilizando o protocolo de transporte UDP. Em todas as variações do número de nós, para o cenário 2, o protocolo MR-LQSR teve resultados melhores do que o protocolo AODV.

Com os resultados obtidos pode concluir que o protocolo de roteamento AODV é mais indicado para cenários de baixo número de nós, como é o caso do cenário 1. Enquanto que o protocolo de roteamento MR-LQSR é mais indicado para cenários com

maior número de nós, como é o caso do cenário 2. O MR-LQSR mostra uma tendência de ser mais eficiente em relação ao AODV com o aumento no número de nós na rede.

As redes de radio cognitivo se mostram como uma boa alternativa para solucionar o problema de deficiência de acesso à rede mundial de computadores, em regiões rurais e distantes da central de distribuição.

Como um possível trabalho futuro, sugere-se a realização de novas simulações para verificar o comportamento da rede em situações com maior densidade no número de nós, tendo em vista o elevado número de estudantes que podem fazer o uso da rede ao mesmo tempo no campus da Universidade Federal de Viçosa.

Outra sugestão de trabalho futuro consiste na realização de novas simulações utilizando nós móveis. Desta forma poderia ser verificado a eficiências dos protocolos para outros tipos de cenários. Onde a mobilidade dos nós seria mais um desafio a ser superado pelos protocolos.

Outra sugestão é simular o padrão IEEE 802.22 e fazer uma comparação com o padrão IEEE 802.11, observando se primeiro é mais eficiente do que o segundo, no fornecimento de Internet a lugares distantes dos centros de distribuição.

Uma evolução deste trabalho poderia ser a elaboração de uma rede protótipo para testar a eficiência real das redes de rádios cognitivos na disseminação de Internet no campus da UFV.

Referências Bibliográficas

- Akyildiz, I. F., Lee, W. Y., Vuran, M. C., & Mohanty, S. (2006). NeXt generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: a survey. *Computer Networks*, 50(13), 2127-2159.
- Abramson, N. (1970). The ALOHA System – Another alternative for computer communications. In: *Proc. AFIPS Fall Joint Comput. Conf.*, v. 37, pp. 281-285.
- Aguirre, Edgar Alirio, Luis Fernando Pedraza Martínez, and Gabriel Puerta (2013). "Evaluación del establecimiento de la métrica de enrutamiento WCETT en una red de radio cognitiva." *Revista Tecnura* 17.35 : 55-62.
- Campista, Miguel Elias M., Luis Henrique MK Costa, and Otto Carlos MB Duarte (2007). "Um Algoritmo Eficiente de Disseminação dos Estados de Enlace para Redes em Malha Sem Fio." *25º Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistema Distribuídos*.
- Carriel, V. S. (2013). A Evolução do LTE até o padrão 4G de 1 Gbits/s. *Revista de Tecnologia da Informação e Comunicação-RTIC*, 3, 30-33.
- Chen, J. C., Jiang, M. C., and Liu, Y. W. (2005). Wireless LAN security and IEEE 802.11 i. *Wireless Communications, IEEE*, 12(1), 27-36.
- Cordeiro, C., Challapali, K., Birru, D. and Shankar S. N. (2006) "IEEE 802.22: An Introduction to the First Wireless Standard based on Cognitive Radios". *Journal of Communications*, vol. 1.
- CPqD (2013) "Tecnologia LTE em 450 MHz desenvolvida no CPqD ganha padronização global". <http://www.cpqd.com.br/midia-eventos/release/tecnologia-lte-em-450-mhz-desenvolvida-no-cpqd-ganha-padronizacao-global>, acessado em 06 de fevereiro de 2014.

- CRCN (2011) “Cognitive Radio Cognitive Network Simulator”. <http://stuweb.ee.mtu.edu/~ljialian/>, acessado em: 30 de outubro de 2013.
- Draves, R., Padhye, J., & Zill, B. (2004). Routing in multi-radio, multi-hop wireless mesh networks. In Proceedings of the 10th annual international conference on Mobile computing and networking (pp. 114-128). ACM.
- Eklund, C., Marks, R. B., Stanwood, K. L., & Wang, S. (2002). IEEE standard 802.16: A Technical Overview of the Wireless Man Air Interface for Broadband Wireless Access. *Communications Magazine, IEEE*,40(6), 98-107.
- GNU GPL (2011). The GNU General Public License - GNU Project - Free Software Foundation (FSF), February. <http://www.gnu.org/licenses/gpl.html> , acessado em: 30 de outubro de 2013.
- IEEE (2011a). *Working Group on Wireless Regional Area*. <<http://www.ieee802.org/22/>>, acessado em: 10 de outubro de 2013.
- IEEE (2011b). *Wireless Local Area Networks*. <<http://www.ieee802.org/11/>>, acessado em: 13 de outubro de 2013.
- IEEE (2011c) *Wireless Local Area Networks*. Disponível em: <<http://www.ieee802.org/11/>>, acesso em: 15 de outubro de 2013.
- IEEE (2011d) *Ethernet*, April 2008. Disponível em <<http://www.ieee802.org/3/>>, acesso em: 30 de outubro de 2013.
- IEEE (2011e). IEEE Approves IEEE 802.15.1 Standard For Wireless Personal Area Networks Adapted From The Bluetooth® Specification . Disponível em: <http://grouper.ieee.org/groups/802/15/pub/2002/May02/02168r1P802-15_TG1-Press-Release.pdf >, acesso em: 27 de agosto de 2013.
- Johnson, D. B. and Maltz, D. A. (1996) “Dynamic Source Routing in Ad-Hoc Wireless Networks,” *Mobile Computing*, T. Imielinski and H. Korth, Eds., Kluwer, pp. 153–81

- Intel (2005) "Deploying License-Exempt WiMAX solution", Disponível em: <<http://ecee.colorado.edu/~ecen4242/marko/WiMax/WiMax/WiMAXSolutions.pdf>> , acesso em: 27 de agosto de 2013.
- López-Pérez, D., Valcarce, A., De La Roche, G., & Zhang, J. (2009). OFDMA femtocells: A roadmap on interference avoidance. *Communications Magazine, IEEE*, 47(9), 41-48.
- Networking, ProCurve (2006) " Planning a Wireless Network ", Disponível em: <www.hp.com/rnd/pdfs/802.11technicalbrief.pdf >, acesso em: 27 de maio de 2013.
- Niyato, D., Hossain, E.; Han, Z. (2009). "Dynamic Spectrum Access In Ieee 802.22-Based Cognitive Wireless Networks: A Game Theoretic Model For Competitive Spectrum Bidding And Pricing", *IEEE Wireless Communications*, Abril de 2009.
- Perkins, C. and Royer, E. (1997). Ad-hoc on-demand distance vector routing. In *Proceedings of the 2nd IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications*, pages 90–100.
- Poonia, R., Sanghi, A. K., and Singh, D. (2011). DSR Routing Protocol in Wireless Ad-hoc Networks: Drop Analysis. *International Journal of Computer*. Published by Foundation of Computer Science.
- Selada, R.S.C. (2008) *Redes Wireless de Banda Larga*; Universidade De Trás-Os-Montes E Alto Douro, Vila Rica – Portugal. 236 p. *Disertação de Mestrado*.
- Stevenson, C., Chouinard, G., Zhongding Lei, Wendong Hu, Shellhammer, S. and Caldwell, W. (2009) "IEEE 802.22: The First Cognitive Radio Wireless Regional Area Network Standard", *IEEE Communications Magazine*, 47(1), 130-138.
- Tanenbaum, A. S., Wetherall, D. J. (2011). *Redes de Computadores*. 5ª edição. Editora Pearson Education.
- UFV (2012). Relatório de Atividades 2012. http://www.ufv.br/proplan/ufvnumeros/RA_2012_Completo.pdf, acessado em: 20 de outubro de 2012.