UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

TÁSSIO COSTA DE CARVALHO

MECANISMO DE ROTEAMENTO CROSS-LAYER EM REDES MÓVEIS AD HOC SEM FIO: UM MODELO DE INTELIGÊNCIA COMPUTACIONAL COM EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E SUPORTE A MOBILIDADE E QOE

TD: 10/2016

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2016

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

TÁSSIO COSTA DE CARVALHO

MECANISMO DE ROTEAMENTO CROSS-LAYER EM REDES MÓVEIS AD HOC SEM FIO: UM MODELO DE INTELIGÊNCIA COMPUTACIONAL COM EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E SUPORTE A MOBILIDADE E QOE

Tese submetida à Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica para a obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Elétrica na área de Computação Aplicada

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2016

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFPA

Carvalho, Tássio Costa, 1982-
Mecanismo de roteamento cross-layer em redes móveis ad hoc sem fio: um modelo de inteligência computacional com eficiência energética e suporte a mobilidade e qoe / Tássio Costa Carvalho. - 2016.

Orientador: Carlos Renato Lisboa Francês.
Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Belém, 2016.

1. Sistemas de comunicação sem fio. 2. Redes ad hoc (redes de computadores). 3. Inteligência computacional. I. Título.

CDD 23. ed. 621.38456

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

MECANISMO DE ROTEAMENTO CROSS-LAYER EM REDES MÓVEIS AD HOC SEM FIO: UM MODELO DE INTELIGÊNCIA COMPUTACIONAL COM EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E SUPORTE A MOBILIDADE E QOE

AUTOR: TÁSSIO COSTA DE CARVALHO

TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA À BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, SENDO JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM ENGENHARIA ELÉTRICA NA ÁREA DE COMPUTAÇÃO APLICADA.

APROVADA EM: 18 / 03 / 2016

BANCA EXAMINADORA:

_____
Prof. Dr. Carlos Renato Lisboa Francês
(Orientador – PPGEE/UFPA)

_____
Prof. Dr. Diego Cardoso Lisboa
(Avaliador Interno – PPGEE/UFPA)

_____
Prof. Dr. Gervásio Protásio dos Santos Cavalcante
(Avaliador Interno – PPGEE/UFPA)

_____
Prof. Dr. Marcelino Silva da Silva
(Avaliador Externo – FCT/UFPA)

_____
Prof. Dr. Nandamudi Lankalapalli Vijaykumar
(Avaliador Externo – INPE)

VISTO:

_____
Prof. Dr. Evaldo Gonçalves Pelaes
(Coordenador do PPGEE/ITEC/UFPA)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, a Deus pelo dom da vida, pela saúde e pela oportunidade singular.

Ao meu orientador, o Professor Renato Francês, que sempre me motivou; Mais que um orientador, um amigo com o qual tenho o privilégio de trabalhar; uma referência de profissional e de ser humano.

Aos meus pais, Ediléa e Ipojucan pela motivação, pelo carinho e pelas orações. Por sempre me incentivarem a seguir em frente.

A Ruth pelo amor, companheirismo, pela força, pela motivação e em muitas ocasiões, por entender minhas ausências; meu amor e minha parceira de todas as horas.

Aos meus irmãos Taíssa e Tálles.

Aos meus amigos do Laboratório de Planejamento de Redes de Alto Desempenho, pela amizade e pelo apoio.

Aos meus amigos e colegas, professores e técnicos da Universidade Federal do Pará – Campus Universitário de Cametá e de Salinópolis.

A todas as pessoas me ajudaram de forma direta ou indireta.

Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito. Não sou o que deveria ser, mas graças a Deus, não sou o que era antes.

(Martin Luther King)

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO **1**

1.1 Contextualização **1**

1.2 Motivação **4**
1.2.1 O Desafio do Roteamento 5

1.3 Objetivos **6**
1.3.1 Objetivos Específicos 7

1.4 Estrutura da Tese **7**

CAPÍTULO 2: ESTADO DA ARTE **8**

2.1 Tecnologias de Redes Sem Fio **8**
2.1.1 Wi-Fi 8

2.2 Protocolos de Roteamento **10**
2.2.1 Roteamento Proativo 11
2.2.2 Roteamento Reativo 11
2.2.3 Roteamento Híbrido 12

2.3 Qualidade de Experiência **12**
2.3.1 Avaliação Subjetiva 13
2.3.2 Avaliação Objetiva 14

2.4 Avaliação de Desempenho **16**
2.4.1 Simulação Discreta 16
2.4.2 Network Simulator 17

2.5 Sistemas Fuzzy **18**

2.6 Modelos de Bateria **19**

CAPÍTULO 3: TRABALHOS CORRELATOS **23**

3.1 Introdução **23**

3.2 Novos Protocolos **25**

3.3 Soluções Energéticas **28**

3.4 Análise Comparativa **30**

CAPÍTULO 4. MECANISMO PROPOSTO 33

4.1 Introdução 33

4.2 Modelo Rakhmatov-Vrudhula 34

4.3 Roteamento Cross-Layer 36

4.4 Modelagem da Simulação 40

4.5 Aspectos Gerais da Proposta 46

CAPÍTULO 5: AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO 47

5.1 Ambiente de Simulação 47

5.2 Resultados Exógenos 49

5.3 Resultados Endógenos 50

5.3.1 Métricas de Desempenho de Rede 50

5.3.2 Consumo de Energia 55

5.3.3 Qualidade de Experiência 60

CAPÍTULO 6: CONSIDERAÇÕES FINAIS 68

6.1 Principais Contribuições 69

6.2 Trabalhos Futuros 70

6.3 Dificuldades Encontradas 70

6.4 Publicações 72

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 73

ANEXOS 82

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 - PRINCIPAIS DESAFIOS EM MANETS E REDES CELULARES 2
FIGURA 2 - ANÁLISE E PREVISÃO PARA USUÁRIOS MÓVEIS MULTIMÍDIA 3
FIGURA 3 - REDES MÓVEIS AD HOC 10
FIGURA 4 - SISTEMA FUZZY 18
FIGURA 5 - QUATRO ESTADOS DE OPERAÇÃO DE UMA BATERIA (MA & YANG, 2011) 21
FIGURA 6 - CENÁRIO AD HOC COM NOVAS MÉTRICAS DE DECISÃO 34
FIGURA 7 - DIFERENTES ESTADOS E CONSUMOS DE ENERGIA DA BATERIA 35
FIGURA 8 - ALGORITMO DE RAKHMATOV PARA A ESTIMATIVA DO TEMPO DE VIDA DA BATERIA 36
FIGURA 9 - CONJUNTOS DE ENTRADA DE UM SISTEMA FUZZY E SAÍDAS EM 3D 39
FIGURA 10 - MECANISMO DE ROTEAMENTO CROSS-LAYER E REGRAS FUZZY 40
FIGURA 11 - VISÃO GERAL DO NS-2 E EVALVID USADOS NA TESE 42
FIGURA 12 - MODELAGEM DE SIMULAÇÃO 45
FIGURA 13 - EXEMPLO DE UM CENÁRIO RANDÔMICO MANET 49
FIGURA 14 - VAZÃO MÉDIA DA REDE 51
FIGURA 15 - VAZÃO MÉDIA DOS CENÁRIOS COM 40 E 45 DISPOSITIVOS 52
FIGURA 16 - VAZÃO MÉDIA DOS CENÁRIOS COM GRANDE MOBILIDADE COM O DSDV 53
FIGURA 17 - ATRASO MÉDIO DA REDE 54
FIGURA 18 - ATRASO EM UM CENÁRIO DE BAIXA MOBILIDADE 55
FIGURA 19 - CONSUMO MÉDIO DE ENERGIA DO DISPOSITIVO “10” 56
FIGURA 20 - CONSUMO DE ENERGIA DE CINCO DISPOSITIVOS DIFERENTES 57
FIGURA 21 - CONTRASTE DE CONSUMO DE ENERGIA 59
FIGURA 22 - QUADROS DE BAIXA RESOLUÇÃO USANDO O OLSR 61
FIGURA 23 - OUTRO QUADRO DE BAIXA RESOLUÇÃO USANDO O OLSR 61
FIGURA 24 - QUADROS DE BAIXA RESOLUÇÃO USANDO O AODV 62
FIGURA 25 - OUTRO QUADRO DE BAIXA RESOLUÇÃO USANDO O AODV 62
FIGURA 26 - QUADROS DE BAIXA RESOLUÇÃO USANDO O MECANISMO CROSS-LAYER 63
FIGURA 27 - QUADRO DE BAIXA RESOLUÇÃO USANDO O MECANISMO CROSS-LAYER 63
FIGURA 28 - QUADRO DE UM VÍDEO EM HD SOBRE O AODV 64
FIGURA 29 - QUADRO DIFERENTE DE UM VÍDEO EM HD SOBRE O AODV 65
FIGURA 30 - QUADRO DE UM VÍDEO EM HD SOBRE O MECANISMO CROSS-LAYER 65
FIGURA 31 - QUADRO DIFERENTE DE UM VÍDEO EM HD SOBRE O MECANISMO CROSS-LAYER 66

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - MOS 14
TABELA 2 - CONVERSÃO DE MOS PARA O PSNR 15
TABELA 3 - PRINCIPAIS EQUAÇÕES ENCONTRADAS NA LITERATURA 25
TABELA 4 - COMPARAÇÃO DOS TRABALHOS CORRELATOS COM A TESE 31
TABELA 5 - PARÂMETROS DE CONFIGURAÇÃO DO SIMULADOR 48
TABELA 6 - CORRENTE E POTÊNCIA ELÉTRICA DAS INTERFACES SEM FIO 48
TABELA 7 - MÉDIA DE CONSUMO DE ENERGIA 60
TABELA 8 - COMPARAÇÃO DAS MÉTRICAS DE QOE 64
TABELA 9 - COMPARAÇÃO DAS MÉTRICAS DE QOE (HD) 67

LISTA DE SIGLAS

AODV	(Ad hoc On-demand Distance Vector)
AP	(Access Point)
BS	(Base Station)
DSR	(Dynamic Source Routing)
FANET	(Flying Ad-Hoc Network)
FI	(Future Internet)
GSM	(Global System Mobile)
GPRS	(General Packet Radio Service)
GPSR	(Greedy Perimeter Stateless Routing)
IP	(Internet Protocol)
LTE	(Long Term Equivalent)
MANET	(Mobile Ad hoc Network)
NGWN	(Next Generation Wireless Network)
MPEG	(Moving Picture Experts Group)
MOS	(Mean Opnion Score)
MSE	(Mean Squared Error)
PSNR	(Peak Signal to Noise Ratio)
OLSR	(Optimized Link State Routing)
QoE	(Quality of Experience)
QoS	(Quality of Service)
RSSF	(Redes de sensores sem fio)
RTAGENT	(Routing Table Agent)
SPR	(Stable Path Routing)
SSIM	(Structural Similarity)
SVH	(Sistema Visual Humano)
VANET	(Vehicular Ad-Hoc Network)
VQEG	(Video Quality Experts Group)
VQM	(Video Quality Metric)
UMTS	(Universal Mobile Telecommunication System)
WI-FI	(Wireless Fidelity)
WIMAX	(Worldwide Interoperability for Microwave Access)

WLAN	(Wireless Local Area Network)
WMAN	(Wireless Metropolitan Area Network)
WPAN	(Wireless Personal Area Network)
WSN	(Wireless Sensor Network)

RESUMO

A evolução das tecnologias de comunicações sem fio levou à necessidade de fornecer suporte de rede para dados e aplicações de vídeo e, assim, promover o desenvolvimento de novos tipos de configurações de rede adaptadas a estas novas exigências. Redes móveis Ad hoc é um importante tipo de operação de redes que emprega mecanismos que podem permitir uma autoconfiguração dinâmica, o que exige uma maior eficiência dos seus protocolos de roteamento. Esses protocolos também podem ser desafiados devido às falhas de energia que estão se tornando cada vez mais graves em relação às falhas de redes de computadores convencionais. Além disso, a qualidade do fluxo multimídia corresponde a uma premissa fundamental para as redes da próxima geração sem fio e para a Internet do futuro. Esta tese propõe um novo mecanismo de roteamento baseado no paradigma cross-layer para aprimorar os principais protocolos de roteamento, através da inserção de novas métricas em um processo de decisão de inteligência computacional baseado em sistemas Fuzzy, provendo eficiência energética, suporte a gerencia de mobilidade e qualidade de experiência aos dispositivos, escolhendo a melhor rota para o fluxo das redes de computadores. A proposta é avaliada em um simulador de redes, demonstrando sua eficiência através de resultados de rede, de qualidade de experiência e da maximização do tempo de vida da comunicação.

PALAVRAS-CHAVES: Ad hoc, roteamento, energia, multimídia, cross-layer, Fuzzy.

ABSTRACT

The evolution of wireless communications technologies has led to the need to provide network support for data and video applications and thus promote the development of new types of network configurations adapted to these new requirements. MANET is an important type of operation networks that employs mechanisms that can enable dynamic auto-configuration, which requires a higher efficiency of its routing protocols. These protocols can also be challenged due to energy failures that are becoming increasingly severe in relation to the common networks failure; furthermore, the quality of the multimedia stream corresponds to a fundamental premise to the next generation wireless networks and the future Internet. This thesis proposes a new routing mechanism based on cross-layer paradigm to enhance the main routing protocols, by inserting new metrics in a computational intelligence decision making based on fuzzy systems, providing energy efficiency, support to manage mobility and quality experience to the devices, choosing the best route for the flow of computer networks. The proposal is evaluated in network simulator, demonstrating its efficiency through network results, quality of experience metrics and maximizing the communication's lifetime.

KEYWORDS: Ad hoc, routing, energy, multimedia, cross-layer, Fuzzy.

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO

Este capítulo descreve a introdução a esta tese de Doutorado analisando a contextualização dos assuntos relacionados a esta tese, explicando os problemas atuais, a motivação envolvida para a execução da mesma, as metas e os principais objetivos.

1.1 Contextualização

Nos últimos anos, os equipamentos elétricos e eletrônicos vêm evoluindo em grande escala simultaneamente com o surgimento de novos hardwares, softwares e, consequentemente, novos dispositivos computacionais (e.g. computadores, celulares, smartphones, tablets, dispositivos de jogos, etc.).

Com a evolução tecnológica dos hardwares e softwares, os dispositivos computacionais também se desenvolveram em grande velocidade, com equipamentos cada vez mais robustos e mais rápidos. Simultaneamente, as telecomunicações e os meios de transmissão também evoluíram, culminando em um grande avanço das redes de computadores, das redes celulares e de telefonia móvel com o surgimento de novas tecnologias de acesso e arquiteturas de redes com e sem fio e de comunicações cada vez mais abrangentes na prestação de serviços.

Redes sem fio, fixas ou móveis, têm se tornado parte indispensável das infraestruturas de telecomunicação dos dias atuais. Aplicações voltadas a elas abrangem desde baixas taxas de transmissão de WSN (Wireless Sensor Network – Redes de sensores sem fio), redes tolerantes a atrasos e desconexões, algumas redes marítimas (ou submarinas) até elevadas taxas de transmissão de redes de tempo real tais como sistemas de monitoramento temporal, redes aéreas, sistemas de tempo real em broadcast para eventos esportivos e transferências multimídia dos mais variados tipos (CAO & SUN, 2013) (JIANCHAO, et. al., 2012) (RUQIANG et. al., 2013).

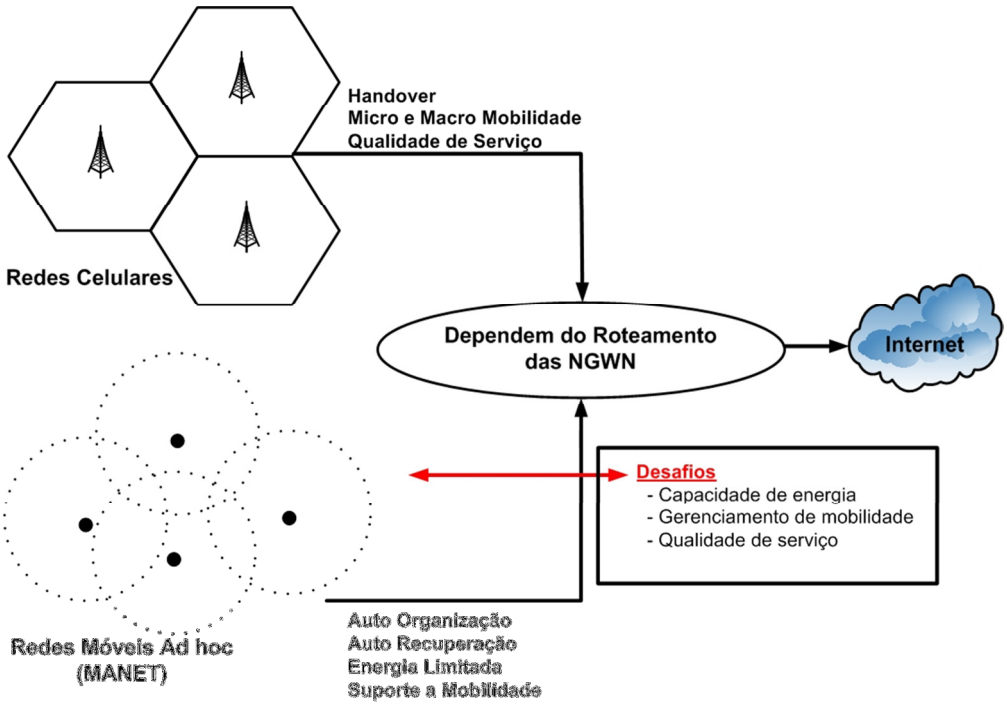
Nos dias atuais, a maioria dos dispositivos móveis sem fio possui duas ou mais interfaces de rede, as quais são baseadas nas tecnologias de transmissão ponto a ponto. Tecnologias como GSM (Global System for Mobile), UMTS (Universal Mobile Telecommunication System), GPRS (General Packets Radio Service) e outras são exemplos de arquiteturas que são baseadas na comunicação de dispositivos móveis diretamente com pontos centrais e controladores e tecnologias como WiFi (*Wireless Fidelity* – Fidelidade Sem Fio), WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave*

Access – Interoperabilidade Mundial por Acesso em Micro-ondas), LTE (*Long Term Evolution* – Evolução de Longo Prazo) são exemplos de arquiteturas que também são baseadas nas tecnologias de transmissão ponto a ponto, mas também são utilizadas como ponto para multiponto.

Algumas vezes, existem redes que não dependem de uma conectividade centralizada ou de um ponto de acesso controlador e estas são conhecidas como MANET (Mobile Ad hoc Network – Redes Móveis Ad hoc); um tipo de configuração de rede sem fio que possui dispositivos móveis sem nenhuma infraestrutura fixa e sem dispositivos centralizadores (BENMOSHE & DVIR, 2013).

No entanto, esse tipo de redes possui dois principais desafios para NGWN (Next Generation Wireless Network – Redes sem fio da Próxima Geração): 1- Problemas decorrentes do esgotamento energético dos dispositivos móveis, devido à limitada capacidade de energia das baterias e a ausência de uma infraestrutura física para recarregar as mesmas (Quanto maior a quantidade de energia, maior será a conectividade à rede); 2- Problemas decorrentes dos defasados protocolos de roteamento para os cenários das NGWN e FI, adaptados as novas necessidades de logística de rede, de mobilidade e de QoS (CONTI & GIORDANO, 2014) (HAN & ANSARI, 2014) (DO et. al., 2014). A Figura 1 ilustra esses desafios.

Figura 1 - Principais desafios em MANETs e redes celulares



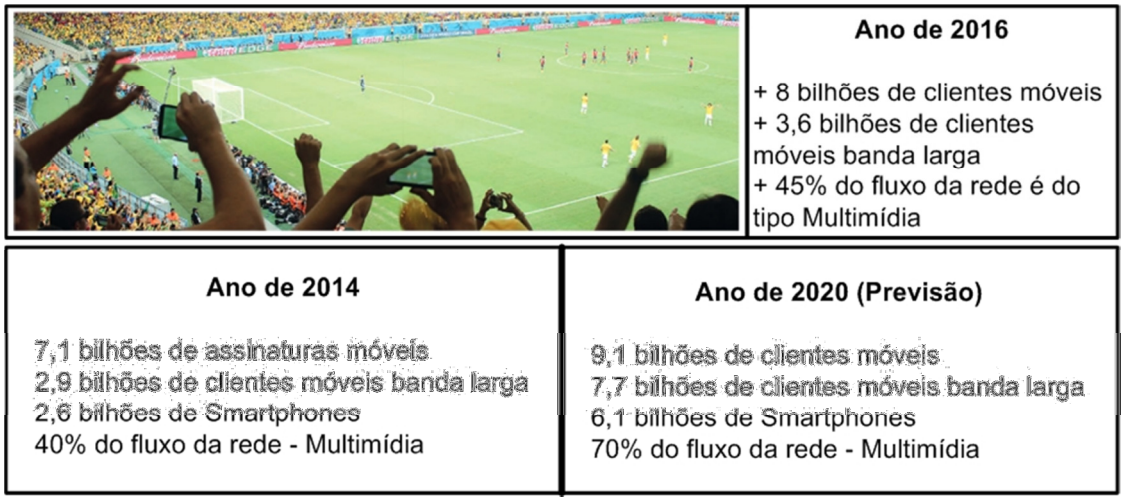
O esgotamento energético de um dispositivo móvel em uma rede ad hoc pode interromper a comunicação nas redes de telecomunicações devido ao consumo total da

energia de um dispositivo prematuramente, inviabilizando um enlace sem fio como possível rota para a rede. A falta de comunicação é o fator que precede o problema de esgotamento energético numa rede. Isto sugere que a energia é um fator essencial e decisivo para maximizar o tempo de vida de uma rede.

A aceleração do desenvolvimento dos dispositivos computacionais e das redes desencadeou em um novo processo evolutivo: a busca pela melhoria dos serviços de rede prestados pelas operadoras de telecomunicações, à necessidade do aumento da largura de banda com acesso de alta velocidade e a demanda por novos serviços de conectividade que buscam conectar os usuários a qualquer momento e em qualquer lugar, sempre com o melhor serviço seguindo os preceitos das NGWN e cientes da necessidade de qualidade para o tráfego multimídia (GHAZEL & SAIDANE, 2014).

No início do ano de 2014, a quantidade de usuários móveis de banda larga ultrapassou a quantidade de usuários fixos (dispositivos móveis em relação a Desktops), sobrepondo a marca de mais de 2,3 bilhões de usuários conectados ao redor do mundo, aproximadamente 30% da população mundial. No final de 2015, a marca alcançou aproximadamente 3,2 bilhões de usuários, quase 50% da população mundial. Até 2020, serão mais de 9,1 bilhões de assinaturas ao redor do planeta. A Figura 2 ilustra esses valores. Para maiores informações, consultar (ERICSSON REPORT, 2015).

Figura 2 - Análise e previsão para usuários móveis multimídia



Atualmente, os smartphones são o segundo dispositivo mais utilizado para as buscas e pesquisas através da Internet, onde cerca de 80% dos usuários utilizam-se do dispositivo para suas pesquisas e mais de 45% do fluxo da rede dos dispositivos móveis é do tipo multimídia, com transmissão de voz e vídeo através da Internet.

As novas redes de computadores e tecnologias de telecomunicações vêm requisitando cada vez mais por melhorias no desempenho e técnicas de tolerância a falhas, necessitando de novas análises, pois as aplicações dos serviços multimídia da FI (Future Internet – Internet do Futuro) terão que ser eficientes e de qualidade, sendo comercialmente sustentáveis e provendo qualidade para os clientes móveis, balanceando necessidades físicas de transmissão sem fio, necessidades comerciais e necessidades humanas, provendo qualidade e satisfação ao usuário (PRISCOLI, 2012).

1.2 Motivação

Muitas previsões têm sido feitas pelos grandes pesquisadores da área da computação e das telecomunicações sobre o futuro destas nos próximos anos, premeditando o que estava por vir. Uma grande quantidade de tecnologias foram criadas e um número ainda maior de ideias foram propostas.

As *smart cities* (cidades inteligentes) correspondem a um futuro próximo. As redes 4G existem há poucos anos e as redes 5G já estão em desenvolvimento. Sistemas de busca pelo melhor serviço já são uma realidade, conectando o usuário sempre ao melhor serviço e existem trabalhos que sugerem que as redes do futuro buscarão pela melhor rede celular e que os usuários não ficarão mais presos a contratos com operadoras. As redes móveis são uma realidade na terra, no ar e no mar. (BELLAVISTA, 2013).

Ao mesmo tempo, as redes de comunicações têm crescido bastante possibilitando e mantendo o crescimento de complexos sistemas de informação, que gerenciam a vida das sociedades nos mais diversos países deste planeta. Governos, universidades, grandes empresas e outros tipos de organizações estão cada vez mais dependentes destes sistemas, confiando no bom funcionamento destes todos os dias.

A Internet também se desenvolveu bastante nos últimos anos e alcança proporções globais atingindo uma quantidade cada vez maior de lares e pessoas, além de pequenas e grandes empresas, alcançando a todos, em quase todos os lugares. No entanto, o sistema pensado para o uso da Internet, os mecanismos de funcionamento e os protocolos de roteamento baseados muitas vezes em um melhor esforço são obsoletos e não foram desenvolvidos para o uso atual, ficando presas ao passado.

O conceito de computação ubíqua cresceu muito ultimamente. Os novos sistemas de computação e as novas tecnologias de redes de comunicação o buscam cada vez mais, fazendo os usuários mais despercebidos quanto ao uso da mesma. No entanto,

a mobilidade das redes móveis é um grande desafio para este conceito. A gerência da mobilidade se faz necessária, uma vez que, tais fatores podem dificultar a comunicação das redes de telecomunicações atuais.

As novas aplicações de comércio eletrônico, Internet banking e outras aplicações online desafiam a ubiquidade da computação devido à dinamicidade que atinge diferentes níveis de comunicação, onde os cenários das redes celulares e as redes MANET se encontram. Além disso, a mobilidade traz outros dois grandes desafios: A capacidade de energia limitada e os protocolos de roteamento que não foram adaptados a novas necessidades da rede para melhores desempenhos, além das necessidades da experiência do usuário para as transmissões multimídia.

A falta de energia ou a má utilização dela pode degradar a comunicação sem fio através do esgotamento energético dos dispositivos, degradando o desempenho da comunicação ou atrasando a entrega dos dados transmitidos, o que pode levar a outro patamar de problemas e estragar comunicações de tempo real sensíveis a perdas de sinal e perdas de enlaces de transmissão (KANAKARIS, 2012).

Devido a isso, é necessário que os novos protocolos de roteamento da FI e NGWN, sejam sensíveis a estes problemas e adaptados aos conceitos da computação verde, onde as necessidades de consumo de energia devem ser regras primárias nas novas comunicações simultaneamente a ubiquidade dos novos sistemas de redes de computadores, com gerenciamento de mobilidade e qualidade final para os usuários móveis, sobretudo em fluxos de vídeo de tempo real.

1.2.1 O Desafio do Roteamento

Os problemas envolvendo o roteamento remontam o surgimento das redes de computadores na década de 60 e são intensificados através dos anos com o crescimento exponencial da mesma. Na época, a Internet fora utilizada para a transferência de datagramas simples através de redes arbitrárias, transmitindo assim a informação. Com a necessidade atual vinculada apenas as camadas mais baixas, logo se precisou criar novas camadas na abstração das redes, com uma camada de Internet (Camada de Rede) e um protocolo para maximizar a interoperabilidade e minimizar o número de interfaces de serviço – IP (Internet Protocol – Protocolo de Internet). Posteriormente outros protocolos (incluindo os protocolos de roteamento) foram criados e a Internet foi sendo emendada até os dias atuais.

Diante da simplicidade inicial e de muitos princípios básicos, as telecomunicações evoluíram, as tecnologias de computação também, as aplicações, mas os protocolos seguiram seus funcionamentos, o que pode levar a alguns dos principais problemas encontrados atualmente, entre eles, os de roteamento, que mesmo depois de longos anos, continuam levando em consideração a menor distância (baseado na quantidade de saltos) entre dispositivos, como sendo o melhor caminho, o que pode levar a resultados imprecisos, e, consequentemente, uma tomada de decisão inadequada.

No entanto, após um estudo minucioso e alguns experimentos, como inclusive pode ser encontrado na literatura, está provado que a evolução das redes de computadores, das aplicações e da Internet necessita também de uma evolução dos protocolos que roteamento que atualmente não são adequados para as aplicações atuais. Os novos protocolos de roteamento precisam ser sensíveis às características encontradas nas novas aplicações e por isso precisam ser analisados e evoluídos a novas versões e/ou atualizados com aprimoramentos (CHAKCHOUK, 2015).

Essa evolução se faz necessária em todos os protocolos de roteamento, com métricas importantes para as novas aplicações encontradas nas redes de computadores e de telecomunicações usadas nos dias atuais. Protocolos padrões encontrados em (DUGAEV et. al., 2015) (PATEL et. al., 2014) (MICHOUD et. al., 2012) (PANTAZIS et. al., 2012) normalmente não utilizam métricas adicionais além da quantidade de saltos, do número de sequência dos pacotes ou de informações de localização.

1.3 Objetivos

O objetivo principal desta tese é avaliar os principais protocolos de roteamento adequados ao cenário das MANET, identificando os principais problemas encontrados nos contextos das redes e desenvolvendo um mecanismo eficiente e eficaz aos cenários atuais, onde há necessidade de conectividade constante, a qualquer momento e em qualquer lugar, com eficiência energética e qualidade adequada aos fluxos multimídia.

Com base nessas avaliações, esta tese objetiva desenvolver uma estratégia de roteamento energeticamente eficiente voltada para os conceitos da computação verde com base em parâmetros de QoS (Quality of Service – Qualidade de Serviço) e QoE (Quality of Experience – Qualidade de Experiência) e no paradigma cross-layer das camadas redes de computadores, aprimorando o processo de roteamento dos principais protocolos atuais, a partir de um mecanismo adaptado a arquiteturas dinâmicas.

O mecanismo de roteamento cross-layer é inserido neste contexto, uma vez que sejam avaliados de forma qualitativa e quantitativa as medidas de rede e as medidas de experiência do usuário sobre os fluxos multimídia, valores consignados de consumo de energia e valores de mobilidade, fornecendo um mecanismo inteligente para a tomada de decisão do melhor caminho da transmissão.

O processo de melhoria utilizado no desenvolvimento desta tese foca-se na inserção de novas métricas no processo de decisão dos algoritmos através de uma técnica de inteligência computacional adaptada aos principais protocolos de roteamento atuais, fornecendo um aumento de acurácia do roteamento.

1.3.1 Objetivos Específicos

- Realizar um levantamento sobre o estado da arte dos principais problemas de redes móveis, aprofundando sobre o gerenciamento de mobilidade, os modelos de bateria e a QoS/QoE em redes móveis voltadas aos conceitos das NGWN;
- Pesquisar sobre os principais protocolos de roteamento utilizados atualmente;
- Desenvolver uma técnica de inteligência computacional para tomada de decisão em cenários dinâmicos, como redes Ad hoc;
- Demonstrar os resultados encontrados através do simulador de redes ns-2 validando e consolidando os objetivos propostos pela tese.

1.4 Estrutura da Tese

O capítulo atual iniciou uma contextualização geral sobre os assuntos desta tese explanando a respeito das motivações e os principais objetivos da mesma. O capítulo dois a seguir dissertará sobre o estado da arte dos principais assuntos que envolvem esta tese, revendo alguns conceitos básicos pertinentes. O capítulo três revisará os principais trabalhos correlatos encontrados na literatura que auxiliaram nesta tese. O capítulo quatro descreverá o mecanismo proposto, detalhando a técnica de inteligência computacional utilizada, a modelagem e a implementação no simulador.

O capítulo cinco apresenta os principais resultados obtidos, seguido pelo sexto com as conclusões desta tese, as contribuições, as dificuldades e trabalhos futuros. A seguir encontram-se as referências utilizadas por este trabalho e os anexos com trechos de código do simulador utilizado.

CAPÍTULO 2: ESTADO DA ARTE

Este capítulo dissertará a respeito dos princípios e fundamentos utilizados nesta tese, documentando os principais assuntos relacionados ao tema deste trabalho, as tecnologias sem fio, redes móveis Ad hoc, os protocolos de roteamento, qualidade de experiência, avaliação de desempenho e sistemas Fuzzy.

2.1 Tecnologias de Redes Sem Fio

Atualmente, existem muitas tecnologias sem fio disponíveis no mercado das redes de telecomunicações. Entre estas, destacam-se atualmente quatro tecnologias que podem funcionar no modo Ad hoc: O Wi-Fi (Wireless Fidelity), uma tecnologia para as WLANs (*Wireless Local Area Networks* – Redes Locais Sem Fio) definido pelo padrão IEEE 802.11, o WiMAX, uma tecnologia para as WMANs (*Wireless Metropolitan Area Networks* – Redes Metropolitanas Sem Fio) definido pelo padrão IEEE 802.16, a tecnologia LTE utilizado em muitos países como o padrão de redes 4G e o Bluetooth, um padrão para as WPANs (*Wireless Personal Area Netowork* – Redes Pessoais Sem Fio) definido pelo padrão IEEE 802.15.

2.1.1 Wi-Fi

Dentre os padrões sem fio, uma das tecnologias mais utilizadas e um dos propulsores para as redes de comunicação sem fio, bastante difundida no dia a dia e encontrada em muitas residências, universidades e estabelecimentos comerciais e empresariais é o *Wireless Fidelity*, popularmente conhecido como Wi-Fi ou *wireless*; É a tecnologia escolhida para os experimentos desta tese.

O Wi-Fi é um tipo de rede sem fio com área de cobertura de até 100 metros e taxas de transmissão que podem variar de 11 até 54 Mbps nas emendas IEEE 802.11b e IEEE 802.11g popularmente difundidas. No entanto as velocidades e os alcances podem ser maiores em emendas mais modernas, como por exemplo, no padrão IEEE 802.11n, com taxas prometidas de até 600 Mbps e alcance de até 270 metros em áreas abertas e com poucas barreiras físicas.

Muitos dos equipamentos elétricos e eletrônicos vendidos nos dias atuais apresentam uma interface de rede voltada para esta tecnologia. Notebooks, celulares, smartphones, palmtops, tablets, televisores e diversos outros equipamentos já

apresentam pelo menos uma interface Wi-Fi, quando não apresentam esta e outras interfaces de tecnologias (DO et. al., 2014).

2.1.2 Redes Móveis Ad Hoc

MANET é um tipo de rede formado por dispositivos computacionais móveis que não possuem infraestrutura. Ele é formada por vários nós móveis que podem funcionar tanto como roteadores quanto como transmissores e receptores, e fornecer uma maior abrangência à rede, estendendo e maximizando sua cobertura e se tornando uma maneira eficiente e escalável de encaminhar pacotes e dados através das comunicações.

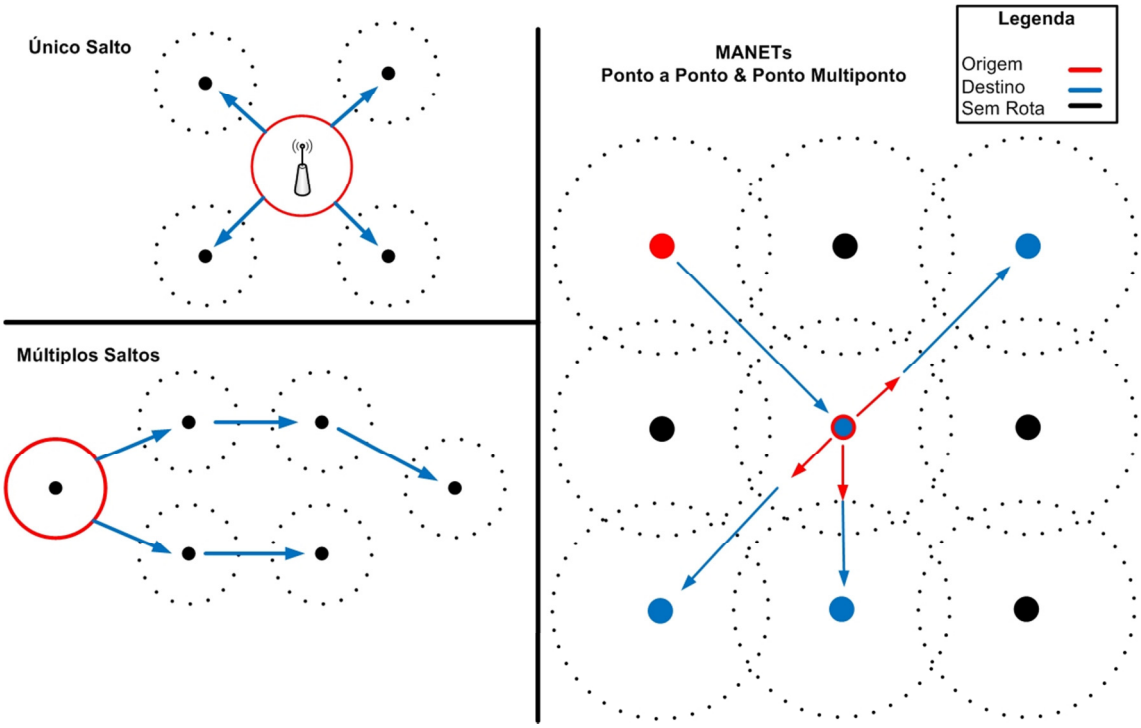
Esse tipo de configuração de rede possui peculiaridades como a auto-organização e auto recuperação e é capaz de balancear o tráfego, sendo utilizado em muitos tipos de cenários como: monitoramento climático, ambiental, redes de sensores submarinas, redes para cenários intermitentes como em guerras e operações de resgate, entre outros (BENMOSHE & DVIR, 2013), além de redes celulares.

Suas peculiaridades permitem uma grande flexibilidade, principalmente devido ao fato de não possuírem uma estrutura física, permitindo seu uso em lugares hostis e de difícil acesso, funcionando eficientemente em cenários com grandes mudanças topológicas, o que pode ocorrer constantemente nesses ambientes, pois os dispositivos computacionais estão constantemente em movimento e eventualmente se desconectando da rede e formando novas redes.

Neste tipo de redes, o termo nó é normalmente vinculado aos AP (Access Point) ou BS (Base Station) que são roteadores de acesso com uma interface compatível com a tecnologia que está sendo utilizada, podendo ser fixos ou móveis assim como os seus clientes que de acordo com as mudanças topológicas e as características apresentadas momentaneamente pela rede podem receber dados advindas de diferentes rotas.

Existem basicamente dois tipos de redes MANETs: as redes *single hop* (saltos simples) que explicitam que a distância máxima de um nó a qualquer outro dispositivo da rede é de apenas um único salto e as redes *multi hop* (múltiplos saltos) nas quais se o nó destino encontra-se nas proximidades do nó origem tenta enviar seus pacotes desejados através dos conceitos do *single hop*, caso contrário, utiliza-se de nós intermediários e múltiplos saltos para encontrar o nó destino e assim entregar seus dados (VIJAYAVANI, 2012) (UMAMAHESWARAN et. al., 2014) (NATKANIEC et. al., 2013). A Figura 3 exemplifica os dois conceitos.

Figura 3 - Redes móveis Ad hoc



Para os testes de validação deste trabalho será usado o modo de múltiplos saltos das redes Ad hoc móveis na tecnologia de rede sem fio citada anteriormente – Wi-Fi, funcionando de forma independente e em conjunto com um cenário híbrido, integrando dispositivos móveis e formalizando a arquitetura proposta.

2.2 Protocolos de Roteamento

Para que os dispositivos de uma rede MANET se conectem de forma dinâmica e arbitrária, os mesmos devem se comportar como roteadores e assumirem o trabalho de sinalização e, consequentemente, o de descoberta e manutenção de rotas para os demais clientes que compõem a rede. Esse trabalho é realizado pelo protocolo de roteamento, que tem como objetivo planejar um modo para transferir os pacotes de um nó para o outro, modo este implantado pelos algoritmos que pode ser planejado com base em diversos critérios, como a quantidade de saltos, a largura de banda, entre outros.

Diferentemente das outras redes sem fio, as MANETs são dinâmicas e suas topologias podem ser modificadas ao longo do tempo passando a assumir formatos diferentes e fornecer novas rotas ou diminuir quantidade de rotas possíveis existentes e os protocolos de roteamento tradicionais, como o RIP (*Routing Information Protocol*) e OSPF (*Open Shortest Path First*) apresentam problemas para convergir nestas redes, pois são adequadas para redes estruturadas em que a topologia geralmente é estática.

O roteamento de pacotes em redes Ad hoc pode ocorrer em diferentes modalidades: unicast, multicast e broadcast. No roteamento unicast, objeto modalidade utilizada nesta tese, o encaminhamento dos dados ocorre ponto-a-ponto, entre uma origem e um destino e é ideal para redes em que as topologias mudam constantemente, onde os recursos são limitados; No roteamento multicast, os pacotes são encaminhados para múltiplos destinos simultaneamente; E no roteamento em broadcast, o encaminhamento ocorre para todos os pontos de uma rede (JAYAKUMAR, 2015).

Para a execução desta tese, muitos protocolos de roteamento foram estudados, desde os principais aos alternativos utilizados em cenários particulares. De uma forma geral, os protocolos de roteamento podem apresentar diversas classificações conforme descrito por (JUNHAI et. al., 2009), mas são classificados nesta tese como: proativos, reativos ou híbridos (LEDY et. al., 2015).

2.2.1 Roteamento Proativo

O roteamento orientado por tabela, como também é conhecido o roteamento proativo caracteriza-se por checar e realizar continuamente as possibilidades de rotas, independente da necessidade da mesma. Ele utiliza-se de tabelas de roteamento para armazenar e manter as rotas atualizadas, disponibilizando sempre rotas imediatas e reduzindo o atraso inicial de transmissão dos pacotes. No entanto, devido à mobilidade, pode haver intervalos elevados de perda de conectividade durante a descoberta de uma nova rota, além de gerar uma carga maior de mensagens de sinalização e roteamento, fator crítico em um ambiente com restrições de largura de banda.

O OLSR (Optimized Link State Routing) é um protocolo que armazena informações de topologia e roteamento da rede em tabelas, atualizadas através de mensagens pré-definidas enviadas periodicamente. Trata-se de uma otimização dos protocolos de estado de enlace puros, adotando um mecanismo de redução de transmissões redundantes em operações que requerem mensagens de controle em *broadcast*, diminuindo muito a utilização de banda pelo protocolo, evitando, dessa forma, uma possível sobrecarga.

2.2.2 Roteamento Reativo

O roteamento sobre demanda, como também é conhecido o roteamento reativo caracteriza-se por buscar e manter as rotas somente quando necessário, ou seja, quando requisitado por um determinado dispositivo. Tal característica otimiza o uso dos

recursos da rede, evitando transmissões desnecessárias de informações de roteamento. No entanto, esses protocolos impõem certo atraso inicial no processo de roteamento e transmissão de pacotes para um destino, porque a rota inicialmente pode não estar disponível. Além disso, a mobilidade dos nós pode implicar em pequenos intervalos de perda de conectividade, pois quando uma rota fica indisponível, a abordagem deste tipo de roteamento ativa rapidamente a criação de uma nova rota.

O AODV (Ad hoc On-demand Distance Vector) é um protocolo de roteamento reativo que utiliza, para cada nó, uma tabela de roteamento tradicional, em que existe apenas uma entrada para cada destino referente ao menor caminho. Dessa forma, o dispositivo registra o próximo salto no caminho para se chegar ao destino e a distância (quantidade total do número de saltos). Cada dispositivo possui sua tabela de roteamento que contem as seguintes informações: destino, próximo salto, número de saltos, número de sequência do destino, nós vizinhos ativos para rota e tempo de duração para a rota. Um número de sequência crescente é usado com o objetivo de evitar laços e verificar se uma informação de rota é recente.

2.2.3 Roteamento Híbrido

Os protocolos de roteamento conhecidos como híbridos combinam as características proativas e reativas em um único protocolo.

Nesses protocolos, cada dispositivo define uma área de serviço conhecida como zona, considerando sua potência para transmissão. A partir daí, os nós trabalham de forma proativa dentro de sua zona mantendo a troca de tabelas com os nós vizinhos para uma melhor visão de sua área. No momento em que uma rota não é encontrada na tabela de roteamento, inicia-se então o processo de descoberta fora da zona ou interzona, que é efetuada de forma reativa, ou seja, apenas quando se torna necessária.

Como vantagem desse tipo de roteamento, pode-se citar a velocidade com que ocorre o roteamento dos nós que se encontram na mesma zona, uma vez que já se possui o caminho para esses dispositivos, além das mudanças de topologia serem rapidamente reconhecidas.

2.3 Qualidade de Experiência

Diferentemente da QoS que leva em consideração medidas do ponto de vista da rede, a QoE vem sendo considerada como uma forma emergente de avaliação de qualidade do ponto de vista do usuário através da percepção do usuário com o sistema

visual humano (SVH), pois são destinadas a avaliação o grau de satisfação dos clientes, o nível de qualidade fim-a-fim, assegurado através de modelos de controle de QoE em união a QoS (NATKANIEC et. al., 2013) (ENGELKE et. al., 2011).

O ponto de vista do usuário e a sensibilidade humana estão diretamente relacionados durante a avaliação de tais características, pois estão suscetíveis a oscilações decorrentes do estado e de momentos do avaliador, podendo uma determinada imagem ou vídeo ser agradável para uns e indiferente para outros.

Embora a QoE esteja relacionada a QoS, difere da mesma pois expressa a satisfação do usuário, tanto de forma objetiva quanto subjetiva, avaliando informações visuais do cérebro humano e extraindo características como: cor, luminosidade, brilho e contraste e suprindo as avaliações das métricas de QoS como vazão e atraso, passando a avaliar a sensibilidade humana, que em fluxos multimídia é fundamental e fornece um suporte fundamental às arquiteturas e protocolos de redes, melhorando a qualidade das aplicações nas NGWNs.

Esses resultados se aproximam ao SVH, melhorando a eficácia das operações de controle de QoS e garantindo transmissões de áudio e vídeo através das redes baseadas em IP, ou seja, quase todas as redes de telecomunicações atuais (CHEN et. al., 2014) (KADAM & WAGH, 2013) (BELLAVISTA et. al., 2012) (ITU-T P.800, 1996).

2.3.1 Avaliação Subjetiva

A avaliação subjetiva quantifica e qualifica a qualidade das aplicações multimídia levando em consideração a opinião do usuário de acordo com sua experiência diante das mesmas, verificada através de uma nota atribuída.

A qualidade percebida por um usuário é por definição um conceito subjetivo, por isso, os mecanismos utilizados para avalia-los denominam-se testes subjetivos e utilizam pessoas que avaliam os vídeos de acordo com suas noções pessoais de qualidade. No entanto, esses testes consomem tempo e são considerados de custo elevado pela dificuldade de serem reproduzidos e repetidos com frequência.

A métrica subjetiva mais popularmente conhecida é o MOS (*Mean Option Score*) cuja sua escala é obtida através de testes e metodologias aplicadas em um conjunto de pessoas que mensuram o nível de qualidade de uma sequência de vídeo mapeando uma escala de 1 a 5, onde 5 representa o maior valor possível e consequentemente a maior qualidade e 1 a menor qualidade, no sentido inversamente proporcional (CHHAGAN et. al., 2013) (KADAM & WAGH, 2013).

A Tabela 1 a seguir mostra a qualificação das notas do MOS em relação a qualidade e aos possíveis problemas visualizados pelos usuários finais diante da execução de um fluxo de vídeo.

Tabela 1 - MOS

MOS	QUALIDADE	PROBLEMA
5	Excelente	Imperceptível
4	Bom	Perceptível
3	Regular	Leve Incomodo
2	Ruim	Incomodo
1	Péssimo	Baixa Visibilidade

2.3.2 Avaliação Objetiva

Os métodos de avaliação objetiva são calculados através de algoritmos e equações matemáticas que analisam parâmetros multimídia e a partir desta análise, estimam a qualidade de um fluxo de vídeo. Tais estimativas aproximam-se do resultado obtido pela avaliação dos testes subjetivos e com base em comparações, são utilizados no mapeamento dos valores de métricas objetivas. Sendo assim, torna-se possível criar um modelo de qualidade da percepção humana.

Além de poder mensurar e quantificar a qualidade dos vídeos, esses métodos também são de grande importância para o gerenciamento e monitoramento de serviços, como, por exemplo, a otimização e seleção do *codec* de complexidade e velocidade do vídeo, tamanho do GOP (*Group of Picture*), desenvolvimento de terminais e de redes (OROSZ et. al., 2014) (GOUDARZI & HOSSEINPOUR, 2010).

As métricas objetivas propõem diferentes formas para comparar o fluxo recebido com o fluxo multimídia originalmente enviado, avaliando e comparando as diferenças entre ambos. As principais métricas objetivas relacionadas com o QoE são: PSNR (Peak Signal to Noise Ratio), SSIM (Structural Similarity Index) e VQM (Video Quality Metric), sendo o primeiro, o mais comum, mais simples e mais comum na literatura (SONG & TJONDRONEGORO, 2014).

O PSNR baseia-se no uso do MSE (*Mean Squared Error*) de modo que ocorre uma análise quadro-a-quadro do vídeo recebido pelo usuário com o vídeo original enviado, sendo calculado em dB (decibel) e obtido através do quadro original e o quadro recebido da forma apresentada pela Equação (1) a seguir.

$$MSE = \frac{1}{MxN} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} ||Ys(i,j) - Yd(i,j)||^2 \quad (1)$$

Onde cada quadro tem *MxN* pixels; as funções *Ys(i,j)* e *Yd(i,j)* correspondem as posições (linha – *i*, coluna – *j*) dos pixels dos quadros originais e dos quadros recebidos respectivamente. Desta forma, o PSNR é a taxa logarítmica entre o valor do sinal da luminosidade máxima (grau de luminosidade/escuridão) e o ruído ambiente (MSE). O PSNR é calculado pela Equação (2).

$$PSNR = 20 \log_{10} \left(\frac{255}{MSE} \right) \quad (2)$$

Portanto, esta métrica considera apenas a indicação de diferença de sinal, ignorando os demais aspectos importantes que podem também influenciar o nível de qualidade do vídeo, como, por exemplo, o SVH. A Tabela 2 apresenta o mapeamento da métrica PSNR para os valores de MOS.

Tabela 2 - Conversão de MOS para o PSNR

PSNR (Decibéis)	MOS
> 37	5 (Excelente)
31 – 37	4 (Bom)
25 – 31	3 (Regular)
20 – 25	2 (Ruim)
< 20	1 (Péssimo)

A métrica SSIM melhora o PSNR tradicional e o MSE aproximando seus resultados das características do SVH passando a se basear na avaliação quadro a quadro de três características de um vídeo: a cor, a luminosidade e a estrutura, combinando-os em um único valor, denominado como índice. A escala de avaliação desta métrica varia de 0 a 1, onde quanto mais próximo o valor resultante for de 1, maior será a qualidade do vídeo e quanto mais próximo for de 0, pior será a qualidade.

A métrica VQM é a mais completa das métricas e define um conjunto de modelos computacionais que buscam avaliar um vídeo com os seguintes parâmetros: distorção de cores, distorção de pixels, ruído e quantificar o quanto um vídeo está borrado, levando em conta o vídeo original e comparando-o com o vídeo processado, verificando o nível de qualidade do fluxo multimídia. Os resultados do VQM variam entre os valores de 0 a 5, onde 0 é o melhor valor possível para um vídeo (CHHAGAN et. al., 2013) (KADAM & WAGH, 2013) (ENGELKE & ZEPERNICK, 2007).

2.4 Avaliação de Desempenho

Sempre que uma rede de computadores é projetada, uma das principais dificuldades encontradas é o atendimento das características de desempenho desejadas. Quando um projeto é executado, é fundamental realizar testes comprobatórios que validem, qualifiquem e ensaiem cenários de operação para observar o comportamento através dos resultados obtidos.

Em redes de computadores, a avaliação de desempenho normalmente é realizada através da inserção de tráfego na rede e a observação da resposta da mesma quanto ao comportamento do tráfego inserido, que pode ser simples ou obedecer a padrões complexos. Vários parâmetros de desempenho podem ser aferidos como a vazão, a largura de banda máxima, o atraso, a variação do mesmo, as perdas de pacotes, a taxa de bloqueio, entre outros (PAPADOPOULOS et. al., 2016).

Redes com características particulares, como cenários de tempo real que utilizam fluxo de dados do tipo multimídia, por exemplo, devem ser analisadas com testes concisos, pois os mesmos possuem grande sensibilidade às variações de desempenho e as redes das NGWNs devem garantir que os serviços não sejam afetados mesmo quando diante de condições de maior imposição (CASTELLANOS et. al., 2016).

Através destes parâmetros, esta tese busca avaliar o desempenho dos protocolos de roteamento e da arquitetura proposta comprovando os resultados encontrados, através dos quais, pretende-se mensurar a qualidade real das melhorias propostas, comparando os protocolos.

2.4.1 Simulação Discreta

Em geral, simulação é um processo pelo qual existe uma imitação de uma operação relevante e funcional do mundo real, envolvendo a criação artificial de um sistema similar ao real para prover uma análise de suas características e, com isso, estudar, testar e comprovar resultados semelhantes.

O comportamento de um sistema ou de uma rede, geralmente utiliza diversos parâmetros para operar o sistema, que uma vez desenvolvido, o modelo de simulação pode ser usado para investigar uma grande variedade de questões sobre o comportamento de um cenário real. Dessa forma, a simulação pode ser usada para estudar sistemas de redes ainda na fase de concepção, como uma ferramenta de predição

de efeitos, verificando possíveis mudanças e validando testes de sistemas reais, servindo como uma ferramenta de projeto para avaliar e validar propostas.

Simulações discretas correspondem a um modelo de simulação dinâmico, que considera somente os eventos onde há alteração do sistema, ou seja, o tempo decorrido entre alterações do estado do sistema não é relevante para a obtenção dos resultados da simulação, embora o tempo nunca pare. Esse tipo de simulação enfatiza que estado discreto se refere apenas à ocorrência dos eventos ao longo do tempo.

As técnicas de simulação discreta, objeto de estudo desta tese, se aplicam a sistemas cujos estados possam ser considerados discretos, ou seja, que variem de forma discreta ao longo do intervalo de valores da variável independente. Outros modelos de simulação como modelos estáticos, determinísticos e estocásticos podem ser encontrados em (ROSSETI, 2015).

2.4.2 Network Simulator

O ns-2 ou *network simulator version 2* é um simulador de redes de computadores muito popular nos meios acadêmicos e institucionais que possui código fonte aberto e é utilizado em inúmeras pesquisas sobre redes, desenvolvida inicialmente em 1989 pela universidade de Berkeley.

O ns-2 é um simulador de eventos discretos resultante de um projeto conhecido como VINT (*Virtual InterNetwork Testbed*) e que permite ao usuário fazer os ajustes necessários devido ao seu código fonte ser aberto. O simulador oferece inúmeros recursos e oferece suporte a simulação de uma grande variedade de tecnologias de rede, estruturadas ou sem fio, em diferentes cenários baseados nos protocolos TCP e UDP, com políticas de fila, caracterização de tráfego e com diversas distribuições estatísticas, além de muito mais (FALL & VARADHAN, 2016).

O simulador consiste em um interpretador de scripts que usa as bibliotecas desenvolvidas em C++ para simular e imitar eventos de redes reais, modelando elementos do mundo real como processamento, memória, transmissão e simulando eventos como em uma linha de tempo discreta, mantendo uma lista encadeada dos mesmos onde cada evento acontece em um determinado instante de tempo.

Atualmente, o ns-2 é capaz de simular uma infinidade de cenários de redes, inclusive a rede Wi-Fi utilizada para esta tese, sendo utilizada em modo de operação Ad hoc, onde cenários inicialmente formulados serão testados, e através do qual, pretende-

se implementar a arquitetura de provisionamento, para posteriormente mensurar e avaliar os resultados do mecanismo proposto (NETWORK SIMULATOR, 2016).

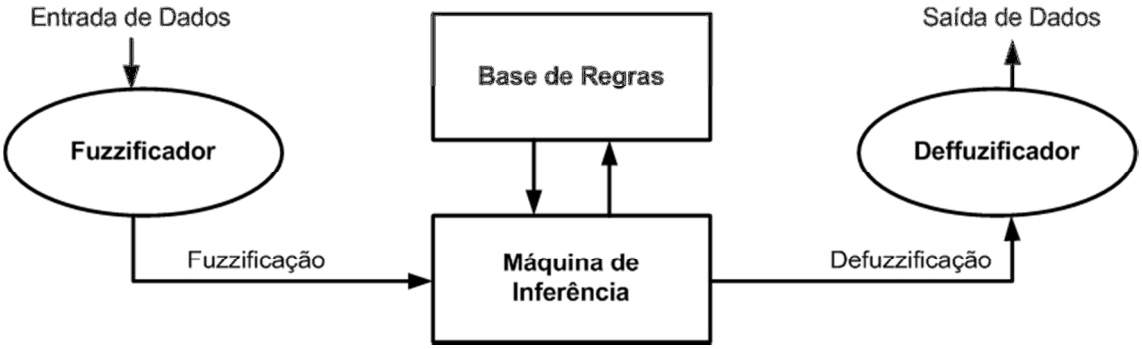
2.5 Sistemas Fuzzy

Diferentemente da lógica tradicional usada frequentemente e da lógica booleana, que considera apenas os valores booleanos (verdadeiro ou falso; 0 ou 1, sim ou não), a lógica fuzzy ou lógica difusa ou lógica nebulosa compreende os valores entre [0 e 1], variando de acordo com o grau de pertinência destes números. Dessa forma, é possível ter valores intermediários, parcialmente falsos e parcialmente verdadeiros, permitindo certo nível de incerteza.

O sistema fuzzy é uma técnica de inteligência computacional que utiliza a lógica Fuzzy para capturar informações ambíguas, resultantes de medições ou observações, descritas em linguagem natural, processá-las e converter seus resultados em um formato numérico, de fácil manipulação e com saídas precisas.

Um sistema fuzzy é formado por quatro blocos fundamentais: 1- o fuzzificador, que mapeia os dados precisos dos conjuntos de entrada fuzzy relevantes; 2- a base de regras, que são fornecidas por especialistas humanos ou através da extração de dados numéricos, em forma de sentenças linguísticas do tipo *se... então* e ativadas durante o processo de fuzzificação do fuzzificador; 3- a máquina de inferência, onde ocorrem as operações juntamente com a base de regras e os conjuntos fuzzy entrados no fuzzificador combinando os *antecedentes* e *implicações* do sistema para a geração de um *consequente*; 4- o defuzzificador, que efetua a interpretação dos conjuntos de entrada, da base de regras e das operações da máquina de inferência e gera uma saída precisa (EBERHART & YUHUI, 2007). A Figura 4 ilustra esses blocos.

Figura 4 - Sistema Fuzzy



Existem diversas técnicas de defuzzificação disponíveis na literatura; os mais comumente utilizados são: o centro de gravidade e a média dos máximos. No primeiro,

a saída é o valor que divide a área sob a curva da função de pertinência em duas partes iguais e no segundo a saída é obtida considerando-se a média entre os dois elementos mais extremos que correspondem aos dois maiores valores da função de pertinência.

O sistema fuzzy tem uma função de pertinência associada que define cada elemento de um conjunto universo a um grau de pertinência que pode variar dentro do intervalo real [0, 1]. O grau de pertinência obtido pela função de pertinência demonstra o quanto um dado elemento pertence a um determinado conjunto de uma variável linguística, podendo o mesmo pertencer a mais de um conjunto.

A principal função de um sistema fuzzy é converter os valores reais de entrada convertidos através de variáveis linguísticas em graus de pertinência em relação aos conjuntos fuzzy, para que sejam tratados pela máquina de inferência simultaneamente por um conjunto de regras fuzzy. O fuzzificador ativa o conjunto de regras fuzzy da base de regras, que de acordo com a máquina de inferências e as operações correspondentes, calcula o grau de pertinência de um valor real de uma variável e define uma saída precisa resultante dessa técnica, mostrada através do defuzzificador.

Esta técnica de inteligência computacional possui inúmeras vantagens, como por exemplo, a facilidade de entendimento, a flexibilidade, a capacidade de modelar funções não lineares baseadas em linguagens naturais, além de ser facilmente adaptada para cenários dinâmicos, com novas informações constantes. Maiores informações podem ser encontradas em (EBERHART & YUHUI, 2007).

2.6 Modelos de Bateria

Uma bateria normalmente consiste de uma matriz de uma ou mais células eletroquímicas alocadas, onde cada célula é constituída por dois elétrodos (condutor elétrico metálico por onde a corrente elétrica entra e sai de um sistema): um ânodo de polaridade negativa e um cátodo de polaridade positiva, separados por um eletrólito (condutor eléctrico). As reações eletroquímicas que ocorrem na bateria dão origem às espécies eletroativas, que são libertadas pelo ânodo para fornecer corrente eléctrica a um circuito externo. Esse princípio é conhecido como fase de descarga de bateria conforme descrito pelos trabalhos de (JONGERDEN & HAVERKORT, 2008) (RAKHMATOV & VRUDHULA, 2001).

De forma geral, existem dois modelos de representação de consumo de bateria/energia: o modelo linear e modelo não linear. O modelo linear é a forma mais simples e mais amplamente utilizada pelos trabalhos relacionados a esta temática, mas

não considera os efeitos e as flutuações de energia gerando uma estimativa linear, puramente especulativa (É utilizado pela maioria dos simuladores de rede, como ns-2 e pela maioria dos trabalhos publicados nos últimos anos) (CHEGETANAI & O'REILLY, 2015) (KUMAR et. al., 2012). O modelo não linear (modelo realístico) é menos utilizado, no entanto, leva em consideração os efeitos realísticos da bateria, com as taxas de flutuação, relaxamento e os efeitos de descarga que ocorrem em diferentes tipos de bateria de lítio e que são encontrados na maioria dos equipamentos elétricos e eletrônicos atuais. A equação (5) demonstra o modelo linear.

$$C = C' - I\,.td \tag{5}$$

C = Capacidade de bateria remanescente

C' = Capacidade no início da operação

I = Constante de descarga de corrente elétrica

td = Duração do tempo de operação

No entanto, este modelo de bateria pode levar a interpretações errôneas na análise dos protocolos, uma vez que um cálculo incorreto pode conduzir a uma falsa estimativa do consumo de energia por influenciar diretamente no tempo de vida da rede e, portanto, o processo de tomada de decisão (KUMAR et. al., 2012).

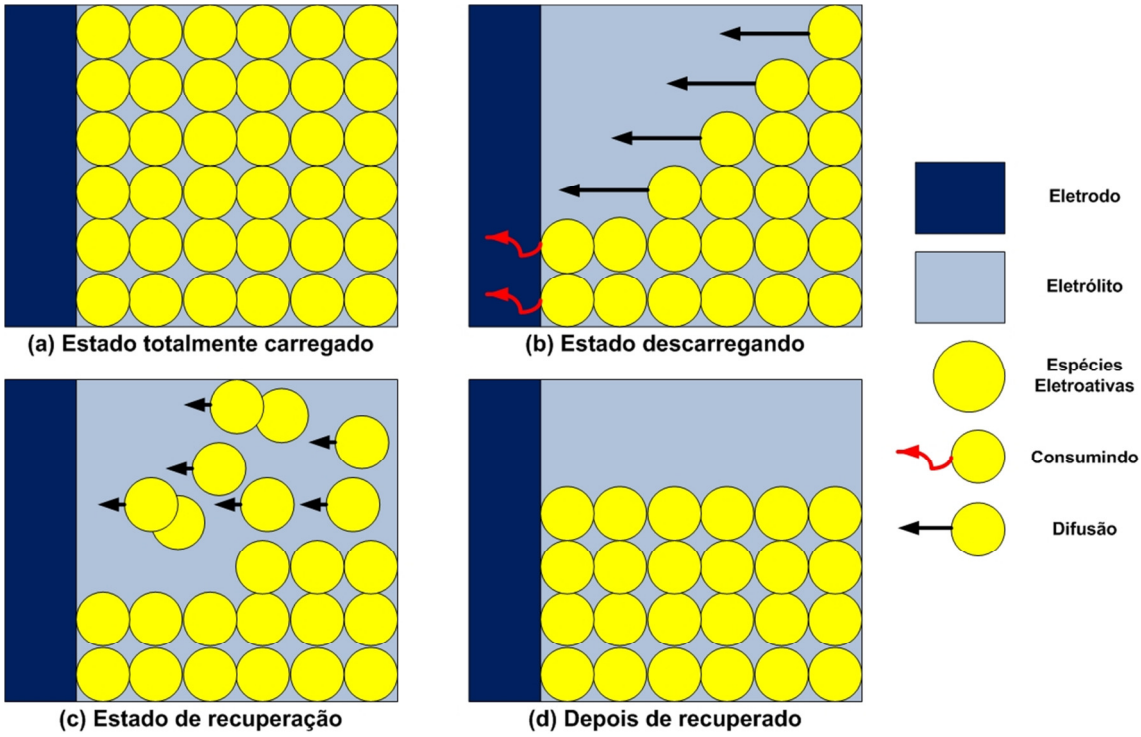
Em um modelo de bateria não linear (modelo de bateria realístico), é considerada as diferentes oscilações que uma bateria (tipo – alcalina, lítio, etc.) pode possuir, com oscilações de taxa de capacidade, taxa de descarga, taxa de relaxamento e outros fatores que variam de acordo com o tipo de bateria.

Neste modelo, a bateria tem dois grandes efeitos químicos: a) efeito da taxa de capacidade: onde quanto maior a corrente de descarga, menor será a capacidade da bateria disponível, geralmente medida em *mA-h* ou *mA-ms*; b) efeito da capacidade de recuperação (taxa de relaxamento): onde a bateria recupera uma parte de sua capacidade energética quando ela está em períodos de relaxamento ou ociosos, quando a corrente fornecida pela bateria é significativamente reduzida; Isso prolonga a vida da bateria e, portanto, prolonga sua vida útil em uma rede móvel Ad hoc.

Na Figura 5 a seguir existem quatro possíveis estados de bateria em um dispositivo móvel: a) estado totalmente carregado, onde a bateria está com sua capacidade de energia no máximo; b) estado descarregando, onde a bateria está em uso, transmitindo ou recebendo dados e, assim, reduzindo a sua capacidade energética e encurtando sua vida útil; c) estado de recuperação, conectado diretamente a taxa de relaxamento, onde o dispositivo móvel entra em um estado inativo e, devido ao

processo eletroquímico da bateria, recupera algumas partes de sua energia e, assim, prolonga sua vida útil; e (d) estado pós-recuperação, onde, após um breve período de repouso, a capacidade de energia é realocada e recuperada parcialmente, maximizando o tempo de vida da rede (MA & YANG, 2011) (SPOHN et. al., 2008) (RAKHMATOV & VRUDHULA, 2003) (RAKHMATOV & VRUDHULA, 2001).

Figura 5 - Quatro estados de operação de uma bateria (MA & YANG, 2011)



A Figura 5 ilustrou os quatros estados de operação de uma bateria de íon-lítio conforme seu estado atual durante uma transmissão de dados em uma rede Ad hoc móvel. A figura ilustra o que acontece com a matriz de células da bateria durante uma transmissão, recepção e/ou o estado de ociosidade da mesma, onde acontece o estado de recuperação/relaxamento, onde os dispositivos móveis recuperam parte de sua bateria e, assim, maximizam seu tempo de vida na comunicação sem fio.

Este modelo estima o tempo de vida de uma bateria de íon de lítio, a partir da equação (6) abaixo, utilizando dois parâmetros específicos: O parâmetro α (alfa), o qual é definido pela capacidade da bateria e o parâmetro β (beta), o qual é definido pelo comportamento não linear da bateria durante os períodos de carga e descarga. Nesta equação, o símbolo n representa o número de vezes que a equação é realizada a um K diferente. O l_{k-1} é a corrente de descarga elétrica durante o período de K-1. A função A calcula o impacto do comportamento não linear na descarga da bateria; L é o tempo de vida da bateria; t_k é o tempo de duração do período k e t_{k-1} é o período de tempo no

período de k-1. (RAKHMATOV & VRUDHULA, 2001) fornecem uma descrição mais detalhada da equação.

$$(6) \quad \alpha = \sum_{k=1}^{n} 2\, I_{k-1} A(L, t_k, t_{k-1}, \beta)$$

Onde,

I_{k-1} = corrente de descarga durante o período $k-1$

A = calcula a descarga da bacteria do modelo não linear

L = tempo de vida da bateria

t_k= tempo de duração do período k

t_{k-1}= tempo de duração do período *k-1*

A taxa de relaxamento/recuperação é um parâmetro importante para permitir uma análise mais ampla e precisa de um modelo energético, uma vez que proporciona resultados mais concisos e realistas para os dispositivos móveis atuais utilizados em redes de computadores e de telecomunicações para a transmissão de dados celulares.

CAPÍTULO 3: TRABALHOS CORRELATOS

Este capítulo descreverá os principais trabalhos relacionados envolvendo os dois principais assuntos relacionados ao tema desta tese: o roteamento e seus protocolos, sobre redes Ad hoc sem fio; e a capacidade de energia das baterias e mecanismos energeticamente eficientes para se aproximar dos conceitos da computação verde.

3.1 Introdução

Nos últimos anos, tem havido uma ampla discussão sobre o que deve ser feito sobre os protocolos de roteamento. Muitos novos protocolos foram propostos e analisados, especialmente no que diz respeito à energia. Alguns autores têm estabelecido novos protocolos e técnicas que dependem da potência de transmissão como uma métrica decisão, enquanto outros estão preocupados com fatores como a capacidade de energia do dispositivo móvel ou prever a vida útil esperada.

Para fins desta tese, resolveu-se separar todos os trabalhos correlatos pesquisados em duas subseções discutidas a seguir: os trabalhos que propõem novos protocolos (subseção 3.2) e os trabalhos que fornecem novas soluções e mecanismos para auxiliar os protocolos atuais (subseção 3.3).

Um dos principais desafios de uma estrutura de redes sem fio é o problema de roteamento, o que é ainda mais complexo quando se baseia em MANETs. O problema da escolha de rotas é um grande desafio neste tipo de redes móveis, especialmente quando se deseja levar em consideração o prolongamento do tempo de vida dos dispositivos móveis, ou seja, um prolongamento da utilização de sua energia, seguindo os conceitos da computação verde e das redes verdes.

O tempo de vida das redes móveis sem fio é limitado pela capacidade de energia de dispositivos sem fio e esgotamento energético dos dispositivos móveis pode interromper a comunicação, levando a rede a dividir-se em grupos menores e, portanto, interromper possíveis conexões que existem entre nós importantes na comunicação fim a fim. Assim, a eficiência energética é um fator crucial para a concepção dos protocolos e para assegurar a manutenção contínua da rede.

Nos últimos anos, diferentes métricas de roteamento relacionados com a energia e protocolos de roteamento conscientes da utilização energética foram propostos para alcançar a conservação máxima da energia e aumentar a vida útil da rede. Estes incluem novas métricas relacionadas à energia nos protocolos de roteamento utilizados, como

forma de auxílio na escolha do melhor caminho de forma eficaz.

Diante da grande gama de trabalhos envolvendo a criação de novos protocolos e melhorias e analisando a discussão do artigo (CAO et. al., 2007), pode-se concluir, de forma geral, os trabalhos referenciados pelos autores são divididos em quatro grandes grupos de formulações matemáticas para a tomada de decisão dos protocolos de roteamento: (1) os que utilizam a potência de transmissão, (2) os que utilizam a capacidade remanescentes de energia, (3) os que previnem o tempo de vida útil de um dispositivo móvel e (4) uma combinação híbrida de todos estes grupos.

Os trabalhos do grupo (1) examinam a potência de transmissão e a intensidade do sinal recebido (o que diminui proporcionalmente conforme a distância de transmissão aumenta). Na tentativa de economizar energia, os autores regulam a potência de transmissão dos dispositivos móveis de origem para transmissões de longo alcance, para que possam reduzir o consumo de energia e poupar a bateria. Os autores propõem funções de custo, tendo a potência de transmissão como a métrica principal, como mostrado na equação (1) da tabela 3 a seguir.

Os trabalhos do grupo (2) utilizam a capacidade de energia remanescente dos dispositivos móveis como uma métrica de decisão. Estes estudos definem peculiaridades e funções para diferentes cenários e usam a capacidade de energia restante como uma métrica chave e grande pertinência para decidir qual é o melhor caminho, os autores empregam a capacidade de energia remanescente com base no mapeamento de zonas e áreas de pré-determinadas para um cenário. A utilização desta métrica é mostrada através das equações (2) na Tabela 3 a seguir.

Os trabalhos do grupo (3) utilizam um modelo de transmissão que recebe a intensidade do sinal e a capacidade remanescente de energia em uma formulação matemática que busca prever o tempo de vida de um dispositivo móvel (a intensidade do sinal pode influenciar no consumo energético) usando o parâmetro que eles nomeiam como “taxa de dreno”. Este valor define a velocidade com a qual a energia é consumida e pode, portanto, prever o tempo de vida de um dispositivo. Essa métrica fornece a oportunidade de prever e, com isso, evitar a depleção energética do dispositivo. A utilização desta métrica é mostrada através das equações (3) na Tabela 3 a seguir.

Os trabalhos do grupo (4) utilizam uma categoria híbrida para o roteamento energético. Eles integram as categorias anteriores em uma única métrica híbrida e que é capaz de reduzir o consumo de energia por pacote e maximizar o tempo de vida da rede. Esses trabalhos mapeiam toda a rede e são capazes de encontrar todos os caminhos

possíveis durante a fase de descoberta e colocá-los na tabela de roteamento. A equação (4) esboça os trabalhos deste grupo de trabalho na Tabela 3.

A Tabela 3 a seguir, resume as equações matemáticas apresentadas pelos quatro grupos de trabalho brevemente discutidos acima. Para maiores informações, consultar o artigo, que apresenta seus principais elementos e faz uma discussão mais profunda.

Tabela 3 - Principais equações encontradas na literatura

Grupo	Equação	Onde,
(1)	$Cr = \sum_{i=0}^{k-1} Pt(i)$	$Cr = Custo\ do\ Roteamento$ $Pt(i) = Potência\ de\ transmissão\ do\ nó$
(2)	$Cr = \sum_{i=1}^{k-1} f(E_r^i(t))$ $f(E_r^i(t)) = \frac{1}{E_r^i(t)}$	$E_r^i(t) = Energia\ remanescente\ do\ nó$
(3)	$Cr = min\ T_r^i(t)$ $T_r^i(t) = \frac{E_r^i(t)}{DR_i(t)}$	$T_r^i(t) = Tempo\ remanescente\ estimado$ $E_r^i(t) = Capacidade\ de\ energia\ remanescente$ $DR_i(t) = Taxa\ de\ dreno\ do\ nó$
(4)	$C_R = \sum_{i=0}^{k-1} \frac{P_t(i)}{(min\ \ E_r^i(t), E_r^{i+1}(t))}$	$P_t(i) = Potência\ de\ transmissão\ do\ nó$ $E_r^i(t) = Capacidade\ de\ energia\ remanescente$ $E_r^{i+1}(t) = Capacid.de\ energia\ remanescente$

3.2 Novos Protocolos

Muitos dos estudos atualmente encontrados na literatura procuram criar novos protocolos na busca de eficiência energética das redes ad hoc e tentam obter resultados satisfatórios em seus experimentos. Em (HASHIM et. al., 2013), por exemplo, os autores consideram duas métricas principais que estão envolvidas na tomada de decisão: a quantidade de saltos e o "grau dos nós", que mede a intensidade do dispositivo móvel para uma possível rota. Os autores avaliam o novo protocolo e comparam com AODV, que é um ponto de referência entre os protocolos baseados em vetores distância.

O foco principal dos autores (HASHIM et. al., 2013) está em VANETs, que são redes onde os dispositivos móveis normalmente têm uma ampla gama de variações em altas velocidades. Ao descobrir e determinar as rotas dos dispositivos próximos, os autores criam um protocolo que pode alcançar resultados satisfatórios no que diz respeito ao atraso final e a taxa média de entrega, que são dois importantes resultados em cenários de alta mobilidade.

Os autores de (HE et. al., 2015) também propõem um novo protocolo chamado AODV-L, que é uma extensão do AODV convencional e que inclui novas informações

sobre a tomada de decisão como direção, posição, velocidade e o mapeamento digital das rodovias, também em cenários de redes Ad hoc veiculares. O AODV-L obtém resultados satisfatórios quanto a confiabilidade de entrega e aumento da largura de banda durante as transmissões em MANETs.

Os autores de (SHAFIEE et. al., 2011) criam um novo protocolo de roteamento heterogêneo entre duas tecnologias, WLAN-WiMAX para encaminhar as transmissões de pacotes em redes de veiculares. O novo protocolo é adaptado para mudanças de topologia que podem estar presentes em VANETs heterogêneas e são características semelhantes às encontradas em redes móveis ad hoc convencionais, onde a mobilidade e o esgotamento energético dos dispositivos móveis podem criar novas rotas ou excluir outros possíveis caminhos para o fluxo de rede. O novo protocolo melhora a taxa de entrega de atraso e de pacotes.

Em (SARKAR et. al., 2012), os autores propõem um protocolo baseado em confiabilidade para o roteamento eficiente da energia para MANETs. Eles introduzem um modelo de consumo de energia, onde o conceito de fator de energia (entrada de energia inicial) é a taxa residual de energia para a capacidade energética inicial de um dispositivo. Por meio destes dados, os autores criam um sistema eficiente energeticamente que leva em consideração a confiabilidade deste fator na tomada de decisão. Os resultados demonstram que tanto o atraso, quanto a sobrecarga são reduzidas, aumentando a taxa de entrega de pacotes e reduzindo o consumo de energia geral da rede.

Em (OTHMEN et. al., 2014), os autores equilibram o consumo de energia e o atraso fim-a-fim através da criação de um protocolo baseado no protocolo SPR (Stable Path Routing). Isso envolve empregar parâmetros que atendam as necessidades e requisitos de QoS, tais como atraso fim-a-fim, largura de banda, níveis de energia e outros fatores, e acima de tudo, considerando o atraso e energia necessária para a tomada de decisão sobre o melhor caminho, obtendo resultados satisfatórios (que são testados através de um simulador de redes).

Os autores (CHENG & CAO, 2008) afirmam que os protocolos de roteamento para redes ad hoc podem ser classificados em duas formas: como roteamento topológico e roteamento geográfica. Eles afirmam que os protocolos de roteamento híbridos tiram proveito de ambos as classificações.

Os autores realizaram um estudo sistemático destes protocolos e analisam três tipos de informações de roteamento híbrido: a) informação topológica, b) informação

geográfica e de c) informação hierárquica. Com base em uma revisão sobre os tipos em questão, eles construíram um projeto com três alternativas para representar os protocolos de roteamento híbridos que compartilham o alcance da área de roteamento, informação geográfica e estrutura de roteamento.

Eles propuseram uma estrutura para um projeto de roteamento tridimensional que pode acomodar todos os protocolos de roteamento híbridos existentes e incentivar a criação de um novo protocolo de roteamento híbrido eficiente que combina os principais elementos de ambas as referências topológicas e geográficas. Em geral, os autores refinam os protocolos de roteamento híbrido existentes, fornecendo novos recursos, mas ainda negligenciado características importantes de redes NGWN, tais como garantias de QoE em fluxos de multimídia e consumo de energia.

Os pesquisadores em (SAEED et. al., 2012) oferecem várias estruturas para os protocolos usados por MANETs que também podem ser implantados em VANETs. Alguns dos muitos protocolos de roteamento foram classificados e categorizados para encontrar a melhor e mais apropriada rota entre um nó de origem e destino, e, assim, torná-lo possível compreender, comparar e avaliar os protocolos de roteamento.

Os autores dividiram os protocolos em quatro categorias e os classificaram com base em suas características semelhantes, (geralmente no que respeita à informação utilizada para roteamento) e foram, portanto, capazes de criar um novo tipo de classificação com base nas métricas de roteamento da rede. A avaliação realizada pelos autores sugere que a invenção de novos protocolos não é a melhor solução, pois já há um grande número de protocolos disponíveis.

De maneira geral, os autores (SAEED et. al., 2012) confirmam o que já havia sido investigado inicialmente, que a criação de um número crescente de novos protocolos não vai levar a uma melhoria significativa. Isto é porque os protocolos diferem de acordo com o modo como os cenários convergem, e, dependendo do número de nós ou em alguns casos com os fatores de mobilidade. Assim, uma melhoria de um protocolo de roteamento que é adequado para uma ampla gama de cenários é um fator poderoso, porque valida as novas exigências e aumenta a amplitude e âmbito do protocolo que foi estabelecido anteriormente.

Como resultado, tem havido um aumento na eficiência e desempenho de rede que aumenta a velocidade das várias rotas e métricas de qualidade têm sido empregadas para assegurar a formação de um melhor protocolo de roteamento.

3.3 Soluções Energéticas

Ao contrário de muitos dos novos protocolos criados pelos autores citados na subseção anterior, os estudos a seguir se preocupam em provisionar ou melhorar os protocolos existentes atualmente e utilizados amplamente nos principais trabalhos e pesquisas relacionadas ao assunto. Em alguns casos eles criam sistemas melhorados para roteamento nos sistemas de telecomunicações e computadores de redes atuais.

Os autores (RAJKUMAR et. al., 2012) melhoraram o desempenho de sua rede e seu fluxo, reduzindo a carga de roteamento e a variação de atraso entre os dispositivos. Para tornar isso possível, eles restringiram o uso de protocolos de roteamento proativos (pois estes procuram constantemente atualizar suas tabelas de roteamento e isso resulta em um atraso maior e, consequentemente, um maior consumo de bateria). Os autores usam apenas os protocolos reativos como o DSR (Dynamic Source Routing) e AODV com estratégias que assegurem que o caminho pode ser pré-determinado a partir de um dispositivo de origem para o destino e, assim, minimizam a instabilidade.

Os autores compararam os protocolos DSR com AODV em um ambiente onde há um grande número de dispositivos móveis e uma relação sinal-ruído com o ambiente e concluem que o protocolo de roteamento AODV consome muito menos energia do que o DSR e tem instabilidade reduzida.

Mesmo quando o número de dispositivos móveis aumenta gradualmente ou se houver um aumento na mobilidade dos dispositivos, os autores também afirmam que há eficácia e eficiência no desempenho da rede do ponto de vista do protocolo AODV. De acordo com os autores de (RAJKUMAR et. al., 2012), o protocolo tem um melhor fluxo, bem como um menor atraso e o consumo de energia.

No artigo (AGRAWAL et. al., 2015), os autores realizam uma interessante discussão sobre os diferentes protocolos de roteamento eficientes energeticamente. Eles citam os protocolos EPAR, EPLAR, QEPAR, LRPH e EMRGA e fornecem alguns detalhes sobre suas características e capacidades. Além disso, eles realizam uma análise comparativa com base na eficiência energética da bateria, que envolve a comparação de uma variedade de protocolos no que diz respeito ao atraso, a sobrecarga e o consumo da bateria. O objetivo é melhorar a qualidade operacional do ponto de vista da rede e das métricas de qualidade de serviço.

Em (SHIVASHANKAR et. al., 2013) e (VAZIFEHDAN et. al, 2013), os autores sugerem uma série de melhorias para protocolos de roteamento existentes. Em

(SHIVASHANKAR et. al., 2013), os autores fazem uso de valores de QoS como atraso, vazão, largura de banda, etc., como uma forma alternativa para poupar energia.

Em (VAZIFEHDAN et. al, 2013), os autores empregam dois algoritmos de roteamento cientes da energia para redes sem fio Ad hoc chamados RMECR e RMER (custo mínimo de energia confiável e roteamento mínimo de energia confiável). Os algoritmos de (VAZIFEHDAN et. al, 2013) melhoram significativamente o consumo de energia, confiabilidade e tempo de vida das redes sem fio.

Ao contrário de outros estudos apresentados até o momento, os autores (RODRIGUE et. al., 2012) propõem um modelo matemático para analisar o consumo de energia dos protocolos de roteamento em redes sem fio. Eles incluem este modelo em seus cenários para redes Ad hoc sem fio e no subtipo baseado em WSNs levando em consideração os seguintes parâmetros: informações do protocolo, as características de tráfego de rede padrão definidas pelas propriedades do canal, o comportamento dinâmico da topologia, o diâmetro e a densidade da rede do dispositivo móvel.

Além disso, este trabalho permite que os protocolos de roteamento sejam classificados e a relação entre os requisitos de aplicações e recursos possam ser explorados.

Ao aplicar este modelo, os autores analisaram os testes de simulação examinando os principais protocolos de roteamento atuais, como AODV, OLSR e o protocolo de roteamento baseado em localizações como GPSR (Greedy Perimeter Stateless Routing). Eles realizam um roteamento aleatório de acordo com os recursos da rede e os requisitos de aplicação. Com o emprego de um modelo matemático, os autores mostraram que a modelagem dos protocolos de roteamento é uma boa forma de economizar a energia, o que reforça a importância desta tese.

Em (QASSEM et. al., 2009), os autores realizaram uma extensa pesquisa sobre o nível de satisfação sobre a procura do acesso à Internet e sobre serviços multimídia de alta velocidade e serviços, como resultado da expansão desta área nos últimos anos e o seu desenvolvimento sobre redes metropolitanas como o WiMAX. Desta forma, os autores propõem um sistema de agendamento centralizado para reduzir o consumo de energia através do encaminhamento e filas centralizadas, introduzindo o conceito de camada cross-layer entre a camada MAC e as camadas de rede.

Os autores mostraram que poderiam melhorar o desempenho da rede e a eficiência de escalonamento centralizado, assegurando uma operação sem colisões de baixo nível, especialmente em redes maiores, onde há um maior número de saltos. No

entanto, eles não conseguem resolver questões igualmente importantes, tais como mobilidade e QoE.

3.4 Análise Comparativa

Há uma série de outros estudos (BOUDHIR et. al., 2012) (MATHAD et. al., 2014) (SU et. al., 2015) que criam novos protocolos e outros que sugerem soluções e aprimoramentos para melhorar o processo de roteamento (TAVLI & HEINZELMEN, 2011) (HUANG et. al., 2014) (JAIN & SURYAVANSHI, 2014) (DAS et. al., 2015).

Após uma profunda análise destes trabalhos, é evidente que a utilização das métricas utilizadas pelos autores anteriormente mencionados nas subseções 3.2 e 3.3 podem ser eficientes formas de poupar energia. No entanto, acredita-se que a solução deste problema de roteamento possa conduzir a outros problemas diferentes e às vezes maiores dos que os que já existem.

Em muitos dos trabalhos citados, protocolos e mecanismos criados podem melhorar a eficiência energética das redes, mas não conseguem resolver os problemas de roteamento, uma vez que são incapazes de escolher a melhor rota para um sistema como um todo e são limitados a cenários específicos, com características particulares.

Desta forma, acredita-se que a criação de novos protocolos não é a forma mais eficiente de tratar este problema, uma vez que os novos protocolos são dedicados apenas para resolver um problema particular, sem fornecer uma solução mais completa.

Além disso, os protocolos defasados pelo tempo apresentam modelos eficazes de encontrar um bom caminho e apenas não foram atualizados para os novos tipos de redes de telecomunicações e as novas necessidades das aplicações multimídia das NGWN e FI, fazendo-se crer, que estes protocolos de roteamento devam ser aprimorados, introduzindo em seus funcionamentos padrões novos sistemas de decisão que se unem as duas principais métricas utilizadas: a quantidade de saltos e o número de sequência de transmissão de dados.

Através da análise dos grupos supracitados, pode-se concluir que eles possuem inúmeras falhas do ponto de vista do roteamento e da eficiência energética das tomadas de decisão. Os trabalhos que usam a potência de transmissão como métrica, eventualmente selecionarão caminhos com um maior número de saltos; poupando energia, mas eventualmente obtendo rotas piores e mais distantes.

Os estudos que tentam prever a capacidade de energia remanescente de um dispositivo utilizam a métrica capacidade de energia como métrica possuem a tendência

de usá-la com maior frequência o que leva a um maior esgotamento energético das baterias.

Os trabalhos que buscam prever o tempo de vida de um dispositivo móvel através do cálculo da taxa de drenagem são incapazes fazê-lo com precisão dentro dos cenários dinâmicos fornecidos pelo modo de operação de redes ad hoc. A razão para isto é que, dependendo do protocolo usado, o tempo de vida não pode ser previsto com sucesso e tem de ser recalculado, porque ele não irá condizer com a realidade, podendo não ser caminho ativo devido à dinamicidade constante (KADAM e WAGH, 2013). A Tabela 4 faz uma breve comparação de alguns dos trabalhos desta seção, comparando-os quanto ao uso de determinadas medidas de mobilidade, energia e de QoE para fluxos multimídia ou de tempo real e medidas de QoS (sobrecarga, vazão, atraso, etc.).

Tabela 4 - Comparação dos trabalhos correlatos com a tese

Subseções	Trabalhos Correlatos	Mobilidade	Energia	QoE	QoS
Novos Protocolos	(HASHIM et. al., 2013)	✓			✓
	(HE et. al., 2015)				✓
	(SHAFIEE et. al., 2011)				✓
	(SARKAR et. al., 2012)		✓		✓
	(OTHMEN et. al., 2014)		✓		✓
	(CHENG & CAO, 2008)				✓
	(SAEED et. al., 2012)	✓	✓		✓
	(BOUDHIR et. al., 2012)	✓			
	(MATHAD et. al., 2014)		✓		✓
	(SU et. al., 2015)				✓
Soluções Energéticas	(RAJKUMAR et. al., 2012)		✓		✓
	(AGRAWAL et. al., 2015)		✓		
	(SHIVASHANKAR et. al., 2013)		✓		✓
	(VAZIFEHDAN et. al, 2013)		✓		
	(RODRIGUE et. al., 2012)		✓		
	(QASSEM et. al., 2009)		✓		✓
	(TAVLI & HEINZELMEN, 2011)		✓	✓	
	(HUANG et. al., 2014)	✓	✓		✓
	(JAIN & SURYAVANSHI, 2014)		✓		✓
	(DAS et. al., 2015)		✓		
	(KADAM & WAGH, 2013)		✓	✓	✓

Mesmo que as diferentes categorias estejam ligadas e sejam promissoras, muitas das propostas citadas não fornecem um esquema completo, especialmente quando eles estão preocupados com as tecnologias de redes atuais, como MANETs. Neste caso, torna-se ainda mais grave quando existem necessidades por serviços do tipo multimídia

onde as redes devem ser sensíveis as necessidades de QoS, fornecendo suporte à mobilidade em redes Ad hoc dinâmicas e devem levar em consideração as necessidades de energia. Além disso, é necessário tomar medidas de QoE satisfatórias para assegurar um fluxo multimídia satisfatório ao usuário (CHAKCHOUK, 2015).

Vários trabalhos acadêmicos como (HASHIM et. al., 2013), por exemplo, propuseram a criação de novos protocolos de roteamento. Os resultados obtidos pelos autores dos artigos parecem satisfatórios em determinados cenários, mas quando estes aumentam a mobilidade, diminuem ou tentam levar em consideração outros parâmetros fundamentais nas redes e tecnologias atuais e suas aplicações, os resultados não são mais os mesmos. Um novo protocolo é apenas uma solução temporária adaptada a um determinado tipo de cenário que pode ser completamente impraticável em outros.

CAPÍTULO 4. MECANISMO PROPOSTO

Esse capítulo descreve o mecanismo de roteamento cross-layer proposto por esta tese, dissertando sobre o mesmo e os elementos que o envolvem como: a utilização do modelo realístico de bateria, a técnica de inteligência computacional baseado em Fuzzy e uma discussão a respeito dos aspectos gerais e dificuldades encontradas.

4.1 Introdução

MANET é um tipo de configuração de rede que ilustra a modernidade das redes de computadores e de telecomunicações. Dessa forma, espera-se que os protocolos de roteamento atuais sejam adaptados aos novos recursos de modo a permitir maior confiabilidade nas redes e aplicações atuais, proporcionando melhor qualidade de serviço para os usuários finais.

Com base nesta premissa e na necessidade atual dos conceitos da computação verde e nas formas de economizar energia, a Internet do futuro e as NGWN devem empregar métodos de gestão de comunicação eficiente e, neste contexto, esta tese visa criar um novo mecanismo de roteamento para aprimorar os protocolos atualmente utilizados, tornando-os mais adaptados as atuais e novas tecnologias de acesso de redes de telecomunicações.

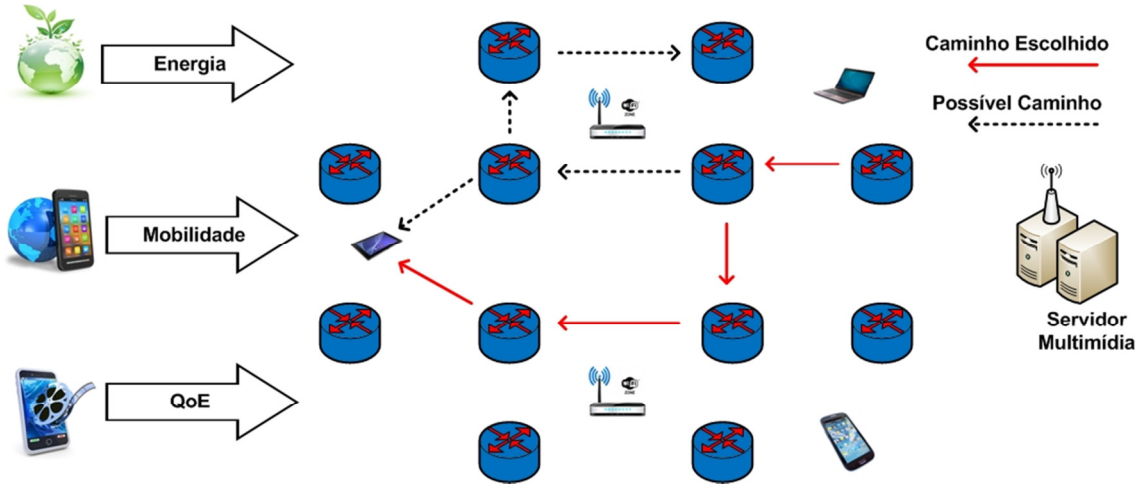
O novo mecanismo irá prover aos dispositivos móveis e suas aplicações com QoE, suporte a mobilidade e gerenciamento de energia, viabilizando uma dispersão alternativa de tráfego para que a rede possa alcançar mais usuários, maiores taxas de transmissão, menores perdas de conectividade e maior tempo de vida útil da rede.

O “mecanismo de roteamento cross-layer” é um aperfeiçoamento dos protocolos de roteamento tradicionais. Na maioria dos casos, estes protocolos de roteamento utilizam duas métricas básicas: a) o número de saltos e b) número de sequência de pacotes de dados, que são necessários para decidir o menor e/ou o melhor caminho para a via de transmissão de dados entre a origem e o destino. A proposta visa proporcionar inteligência dinâmica acompanhada por soluções rápidas e dinâmicas para o processo de tomada de decisão.

O mecanismo proposto inclui novas medidas a tomada de decisão, das quais se espera que influenciem positivamente sobre o processo de tomada de decisão dos protocolos, uma vez que eles levam em conta os parâmetros de QoE para aspectos de tráfego multimídia e de mobilidade. Ele também visa economizar energia para os

dispositivos móveis com o objetivo de maximizar o tempo de vida da rede e fornecer conectividade constante e um serviço contínuo por períodos mais longos. A Figura 5 ilustra um possível exemplo.

Figura 6 - Cenário Ad hoc com novas métricas de decisão



O mecanismo proposto por esta tese acrescenta um modelo de energia confiável e realista ao mecanismo de roteamento cross-layer. Concomitantemente a técnica de inteligência computacional, o mecanismo proposto seleciona o melhor caminho e evita que os dispositivos móveis com baixa quantidade de energia ou com um elevado consumo momentâneo sejam utilizados, evitando, desta forma, perdas de pacotes elevadas resultantes do esgotamento energético de dispositivos, que impossibilitam uma transmissão adequada através da rede (dispositivos com baixa quantidade de energia ainda podem ser utilizados, embora sejam evitados).

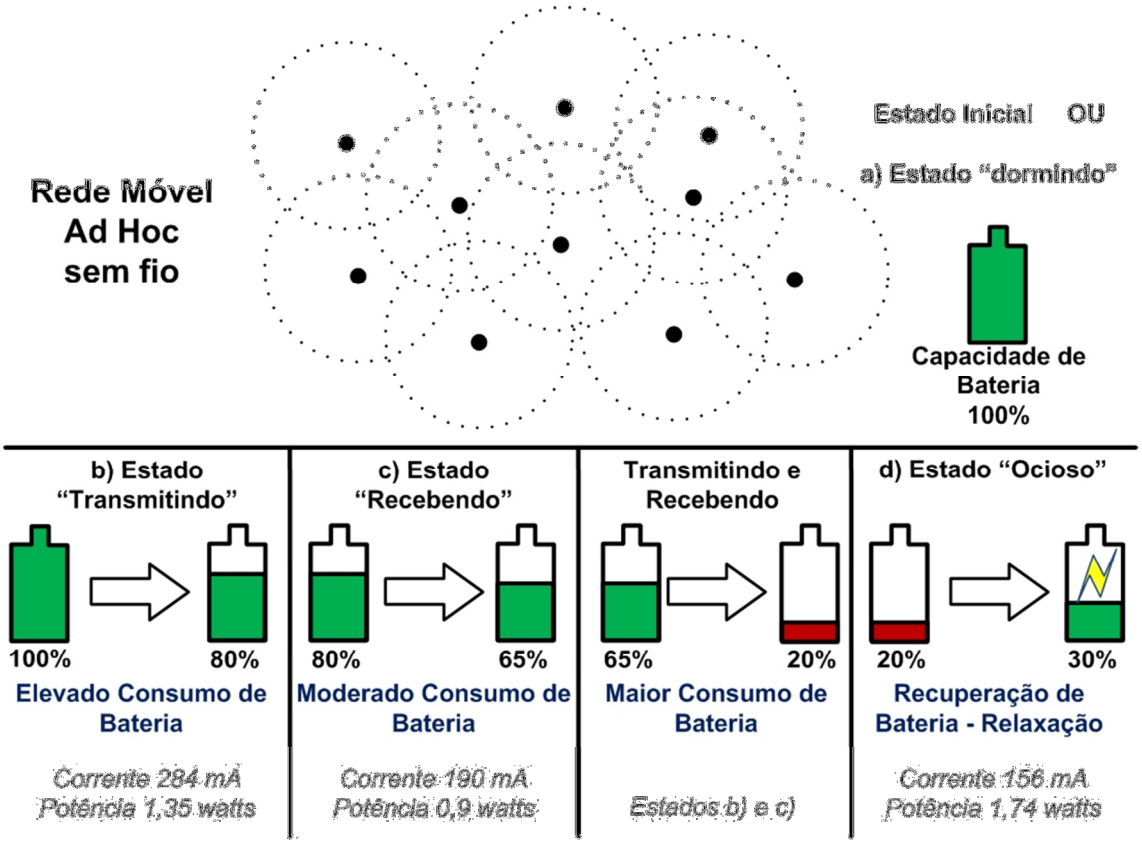
4.2 Modelo Rakhmatov-Vrudhula

Considerando os efeitos de descarga e de recuperação de uma bateria, é de fundamental importância que o mecanismo proposto possa levar em consideração tais conhecimentos para prover um modelo confiável de tomada de decisão para os dispositivos móveis de uma rede sem fio.

É essencial também permitir que o mecanismo de tomada de decisão possa gerar novas possibilidades de rotas com base em um conhecimento prévio dos diferentes parâmetros e medições de consumo de energia. Desta forma, o mecanismo deve prever a quantidade de energia disponível em um dispositivo (estimativa real) e escolher (ou impedir) o mesmo para uma transmissão/recepção de dados, reduzindo o risco de alguns caminhos tornarem-se inexistentes devido ao esgotamento energético.

A Figura 7 a seguir resume de forma prática o funcionamento de uma bateria realística baseada no modelo matemático proposto por (RAKHMATOV & VRUDHULA, 2001), ilustrando quatro possíveis estados de uma bateria, suas potências e suas correntes elétricas durante uma transmissão e recepção de dados.

Figura 7 - Diferentes estados e consumos de energia da bateria



O ns-2 já trás em sua configuração base um modelo de energia linear, que não considera as oscilações de energia de uma bateria, nem os diferentes estados de consumo para mensurar o gasto energético de seus dispositivos móveis. Para isso, este tese teve de alterar o modelo de energia padrão (utilizado incorretamente por muitos dos trabalhos acadêmicos atuais) para um novo modelo de energia, construindo as medidas de oscilações e adaptado o modelo matemático proposto por (RAKHMATOV & VRUDHULA, 2001) para o simulador de redes.

O modelo descrito por (RAKHMATOV & VRUDHULA, 2001) define que toda bateria possui dois eletrodos, um catodo e um anodo, que são separados por eletrólitos. Durante a descarga da bateria, o anodo libera elétrons para um circuito externo e o catodo aceita estes elétrons do circuito. Desta forma, a perda de elétrons (oxidação) no anodo ocorre juntamente com o ganho de elétrons (redução) no catodo. Os autores assumem em seu modelo matemático que a redução no anodo e a oxidação no catodo

são desprezíveis. Assim, as reações do eletrodo envolvem V elétrons, espécies oxidadas O e espécies reduzidas R, onde $O + V^- \rightarrow R$; $R \rightarrow O + V^-$.

Para a execução desta tese, foi necessário adaptar a equação descrita por Rakhmatov no código base do simulador de redes ns-2, inserindo as constantes, variações e diferentes parâmetros previstos pela equação (6) descrita na subseção 2.6 desta tese. Desde que esta equação apresenta uma complexa para L, (RAKHMATOV & VRUDHULA, 2001) apresentam um algoritmo para calcular o tempo de vida da bateria de um perfil de carga específico.

Os parâmetros de entrada do algoritmo de estimativa de vida são um conjunto de valores de carga S^l e seus respectivos tempos S^t e os parâmetros específicos da bateria α e β. A saída da função é um conjunto de dois elementos em que o primeiro elemento é o tempo até a falha. O segundo elemento indica as diferenças a soma do n-termo e o α na equação (6). A Figura 8 a seguir descreve o algoritmo. Maiores informações em (RAKHMATOV & VRUDHULA, 2001) e (HANDY & TIMMERMANN, 2003).

Figura 8 - Algoritmo para a estimar o tempo de vida da bateria (RAKHMATOV & VRUDHULA, 2001)

lifetime estimation(S_I, S_t, α, β)

IF $\alpha < 2I_0 A(t_1, t_1, 0, \beta)$ **THEN**

Find the smallest $t \in [0, t_1]$ such that:

$$\alpha < 2I_0 A(t, t, 0, \beta)$$

RETURN $\{t, 0\}$

Find the smallest integer $u \in \{2, 3, \ldots, n\}$ such that:

$$\alpha < \sum_{k=1}^{u} 2I_{k-1} A(t_u, t_k, t_{k-1}, \beta)$$

IF u is not found **THEN**

RETURN

$$\{\infty, \alpha - \sum_{k=1}^{n} 2I_{k-1} A(t_n, t_k, t_{k-1}, \beta)\}$$

Find the smallest $t \in [t_{u-1}, t_u]$ such that:

$$\alpha < \sum_{k=1}^{u-1} 2I_{k-1} A(t_u, t_k, t_{k-1}, \beta) + 2I_{u-1} A(t, t, t_{u-1}, \beta)$$

RETURN $\{t, 0\}$

END *lifetime estimation*

4.3 Roteamento Cross-Layer

Como já explanado anteriormente, quase todos os protocolos de roteamento operam funções de tomada de decisão baseadas em algoritmos que incluem em suas regras de programação apenas uma única métrica (normalmente a quantidade de saltos) no processo de tomada de decisão para determinar a melhor rota.

Quando se refere ao conceito de MANET, deve notar-se que a autoconfiguração e redes dinâmicas proporcionam um mecanismo de mobilidade dinâmico, que proporciona cenários também dinâmicos, impactando sobre muitos dos protocolos de roteamento. Por esse motivo, decidiu-se fazer uso do sistema Fuzzy; pois esta é uma técnica de inteligência computacional que pode ser adaptado para cenários altamente dinâmicos.

O mecanismo é implementado usando um conjunto de regras para interpretar três possíveis entradas de variáveis linguísticas: a qualidade de experiência do usuário final sobre um fluxo multimídia (taxa de QoE), o grau de mobilidade de um dispositivo móvel sem fio e capacidade remanescente de energia de um dispositivo móvel (HAFEEZ et. al., 2013) (EBERHART & YUHUI, 2007).

Para avaliar o grau de QoE e inseri-lo no sistema de inferência do conjunto de regras Fuzzy, foi necessário avaliar o conjunto de qualidade de experiência através da captura do tipo de pacote recebido pelo dispositivo móvel, verificando e quantificando a quantidade de bytes de quadros que foram recebidos (PKT_RCV (tipo)) pelo usuário.

A quantidade de bytes recebidos do pacote é crucial para a qualidade da experiência. Ao receber um pacote, o dispositivo móvel checa se esta é uma aplicação do tipo multimídia (o serviço de aplicação é identificado no pacote de dados). O número de quadros recebidos é essencial para determinar a qualidade do vídeo (quanto menor for a perda, maior será a qualidade).

O padrão Moving Picture Experts Group (MPEG) define três tipos de quadros: “Quadro I” (codificação “Intra”), “Quadro P” (codificação “Preditiva”) e Quadro B (codificação “preditiva bidirecional”). A taxa percentual de perda de quadros I, P ou B, é utilizado por métricas objetivas de QoE para determinar a qualidade do vídeo e este índice é compilado durante a transmissão de vídeo.

Outro fator importante que influencia diretamente a composição do vídeo é o Group of Pictures (GoP), que estabelece o número de quadros sucessivos de dois quadros I. Há uma ordem de importância para quadros I, P, B, respectivamente. Assim, durante a transmissão, é importante para garantir que um dispositivo possa receber o número máximo possível de quadros do tipo I (GOUDARZI & HOSSEINPOUR, 2010).

Seguindo este raciocínio, a qualidade dos fluxos multimídia recebidos é interpretada em tempo real e gerada uma entrada no sistema de Fuzzy, que descreve a qualidade atual do fluxo multimídia e inclui na máquina de inferência. Este conjunto pode ser medido através de três valores de entrada: a) “QoE Elevado”, descrevendo

bons valores para o vídeo (grau de QoE a partir de 30 dB); b) “QoE Moderado”, para valores moderados de qualidade do vídeo (grau de QoE de 22 dB a 31 dB) e; c) “QoE Baixo”, para valores ruins de qualidade final de vídeo (grau de QoE máximo igual a 25 dB).

Outra métrica importante é a taxa de mobilidade que é obtida através de um dispositivo móvel e uma análise pode ser realizada para determinar os diferentes aspectos da variação da mobilidade.

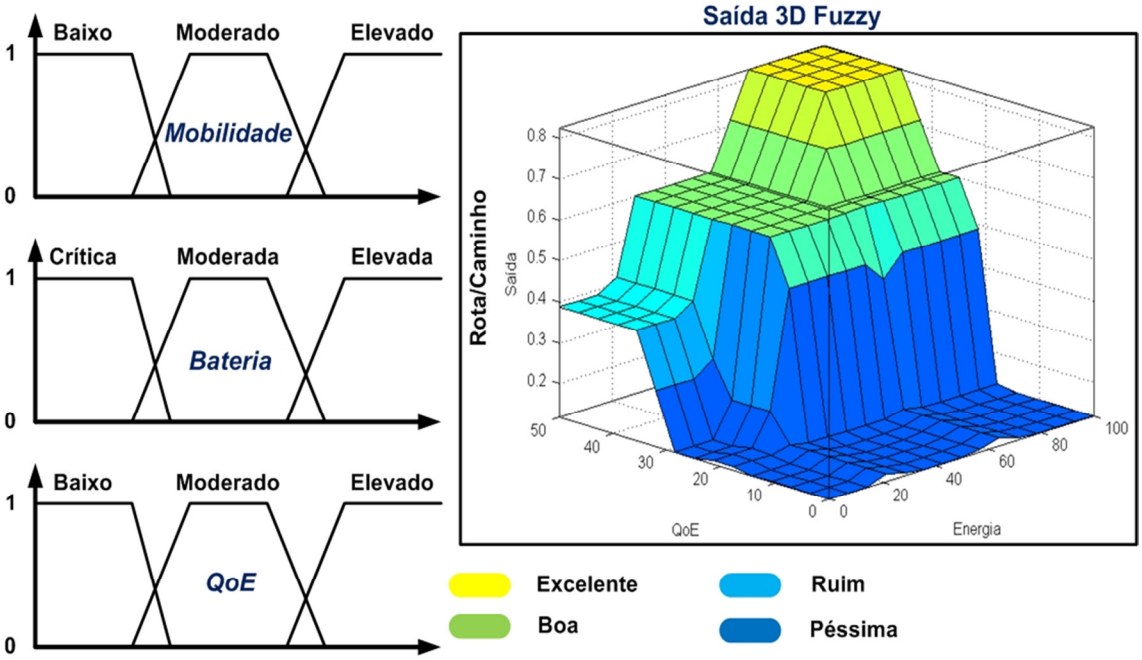
Como a taxa de mobilidade dos dispositivos móveis mudam, a máquina de inferência interpreta as novas decisões reais feitas pelo sistema e insere os resultados na função de inferência que será representada no sistema Fuzzy e medido com três valores de entrada: a) “Mobilidade Elevada”, para dispositivos com mais de 10 m/s de velocidade; “Mobilidade Moderada”, por nós com mais de 5 m/s e até 12 m/s e; c) “Mobilidade Baixa”, para dispositivos, com um máximo de 6 m/s de velocidade.

O último ponto a ser considerado é a capacidade energética de um dispositivo. Por analogia e levando em consideração muitos dos dispositivos eletrônicos de hoje, foi decidido classificar a energia em três conjuntos: a) “Energia Elevada”, onde o dispositivo móvel tem pelo menos 60% de sua capacidade de bateria, b) “Energia Moderada”, onde o dispositivo móvel tem uma capacidade de bateria superior ou igual a 18% e menor ou igual a 70%) e; c) “Energia Baixa”, onde o dispositivo móvel tem capacidade de bateria igual ou inferior 20%).

Com a ajuda do sistema Fuzzy e o conjunto de regras utilizado (23 regras), os resultados do sistema são decisivos no que respeito a fazer ou não a atualização na tabela de roteamento e, assim, fazer uso de um possível caminho. A saída do sistema Fuzzy tem quatro possíveis respostas: a) “Rota Péssima”, onde a tabela de roteamento não é atualizada; b) “Rota Ruim”, onde a tabela de roteamento é atualizada, mas com um valor de prioridade mais baixo; c) “Rota Boa”, onde a tabela de roteamento é atualizada e tem uma prioridade boa e d) “Rota Excelente”, onde a tabela de roteamento é atualizada com a mais alta prioridade.

As variáveis linguísticas, a valoração dos conjuntos e os valores de pertinência utilizados para o grau de QoE, para a mobilidade e para a quantidade de energia foram selecionados para esta tese com base na opinião de especialistas e trabalhos relacionados aos assuntos. A Figura 9 ilustra a resultante do sistema Fuzzy em um gráfico em 3D; A máquina de inferência é do tipo Mandani.

Figura 9 - Conjuntos de entrada de um sistema Fuzzy e saídas em 3D

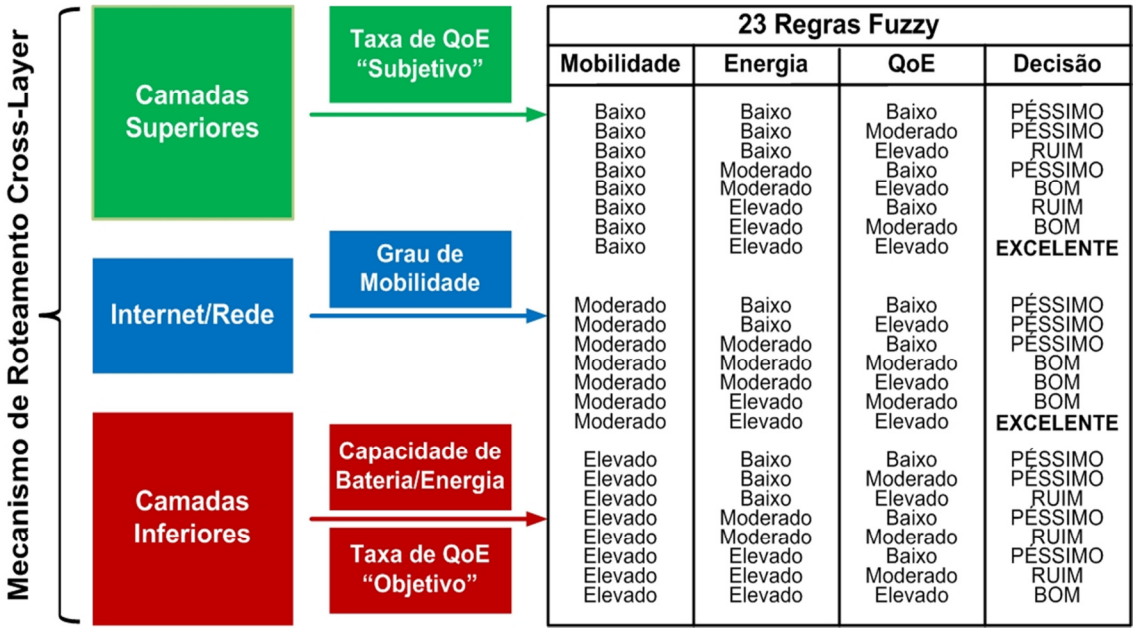


As áreas em azul escuro correspondem a saídas péssimas. As áreas em azul claro correspondem às saídas ruins e possuem a menor prioridade de atualização da tabela de roteamento. As áreas em verde correspondem a saídas boas e possuem prioridade moderada. As áreas em amarelo possuem a maior prioridade e correspondem a saídas excelentes.

Estes três métricas foram selecionados para a abordagem de inteligência computacional baseada no sistema Fuzzy, porque eles representam os melhores dados que podem ser utilizados pelos protocolos futuros para as redes da próxima geração na escolha do melhor caminho. Espera-se, que as NGWN terão uma vida útil mais longa, capaz de lidar com alterações na mobilidade (necessária para todas as tecnologias de rede atuais e futuras) e proporcionar igualdade para o fluxo multimídia dos usuários.

Este mecanismo de decisão baseado em sistema Fuzzy depende de informações de todas as camadas de rede, tais como: grau de QoE experimentado pela camada de aplicação (feedback do pacote do usuário junto métricas de QoE), contagens de saltos e de informação sobre mobilidade transferidos pela camada de rede, informações sobre números de sequência em uma camada de rede e da camada de enlace, a informação sobre a energia usada pelos nós móveis com o apoio da camada física, além do protocolo utilizado pela camada de transporte. A Figura 10 ilustra o mecanismo cross-layer, as camadas de rede, as informações repassadas à inteligência computacional, o sistema Fuzzy e as 23 regras utilizadas e suas respectivas saídas.

Figura 10 - Mecanismo de Roteamento Cross-Layer e regras Fuzzy



23 Regras Fuzzy

Mobilidade	Energia	QoE	Decisão
Baixo	Baixo	Baixo	PÉSSIMO
Baixo	Baixo	Moderado	PÉSSIMO
Baixo	Baixo	Elevado	RUIM
Baixo	Moderado	Baixo	PÉSSIMO
Baixo	Moderado	Elevado	BOM
Baixo	Elevado	Baixo	RUIM
Baixo	Elevado	Moderado	BOM
Baixo	Elevado	Elevado	**EXCELENTE**
Moderado	Baixo	Baixo	PÉSSIMO
Moderado	Baixo	Elevado	PÉSSIMO
Moderado	Moderado	Baixo	PÉSSIMO
Moderado	Moderado	Moderado	BOM
Moderado	Moderado	Elevado	BOM
Moderado	Elevado	Moderado	BOM
Moderado	Elevado	Elevado	**EXCELENTE**
Elevado	Baixo	Baixo	PÉSSIMO
Elevado	Baixo	Moderado	PÉSSIMO
Elevado	Baixo	Elevado	RUIM
Elevado	Moderado	Baixo	PÉSSIMO
Elevado	Moderado	Moderado	RUIM
Elevado	Elevado	Baixo	PÉSSIMO
Elevado	Elevado	Moderado	RUIM
Elevado	Elevado	Elevado	BOM

Com o apoio do novo roteamento cross-layer, este trabalho visa obter resultados satisfatórios em NGWN usando a consciência energética como fator determinante em todas as manipulações de redes de computadores e de telecomunicações; isto é, um novo mecanismo transversal de camadas capaz de rotear o tráfego da rede através de rotas energeticamente eficientes.

4.4 Modelagem da Simulação

Os autores (HANDY & TIMMERMANN, 2003) produziram um algoritmo para uma estimativa de tempo de execução do tempo de vida da bateria de células de íon de lítio, integrando o modelo (RAKHMATOV & VRUDHULA, 2001) em ambientes de simulação para redes sem fio, que estima a vida útil dos dispositivos, levando em consideração efeitos não lineares da bateria.

O simulador de rede já tem implementado um modelo de energia em sua base de classe no código C++. Este modelo (onde a fórmula é localizada e modificada a partir do modelo linear para o modelo não linear de (RAKHMATOV & VRUDHULA, 2001)) monitora os estados dos nós (dispositivos móveis). Isto é realizado de acordo com o estado que existe em um determinado momento (transmitindo, recebendo, ocioso ou dormindo).

O modelo de energia passa as informações sobre as descargas e os valores da taxa de recuperação (taxa de relaxamento) de energia, de modo que eles podem ser

calculados na fórmula dada pelo modelo não linear. O modelo energético irá calcular o estado e o período em que ele será e determinar o consumo de energia.

Para este trabalho, adaptou-se o algoritmo proposto por (HANDY & TIMMERMANN, 2003) com (RAKHMATOV & VRUDHULA, 2001) para ns-2, usando os valores de $\alpha = 35220$ e $p = 0{,}637$ na equação (6), que foi usado antes para baterias de íon de lítio, que pode ser encontrada na maioria dos dispositivos móveis atuais, como notebooks, telefones celulares, smartphones, etc.

Este ambiente simula cenários de redes de computadores e telecomunicações em tempo real em muitas tecnologias e modos de operação, incluindo as MANETs, fornecendo informações como vazão, atraso, variação de atraso, probabilidade de bloqueio, taxa de entrega de pacotes e perdas (medidas de rede). Estes resultados são armazenados em um arquivo trace com toda a informação relevante, que é interpretado e repassado para construir os gráficos resultantes.

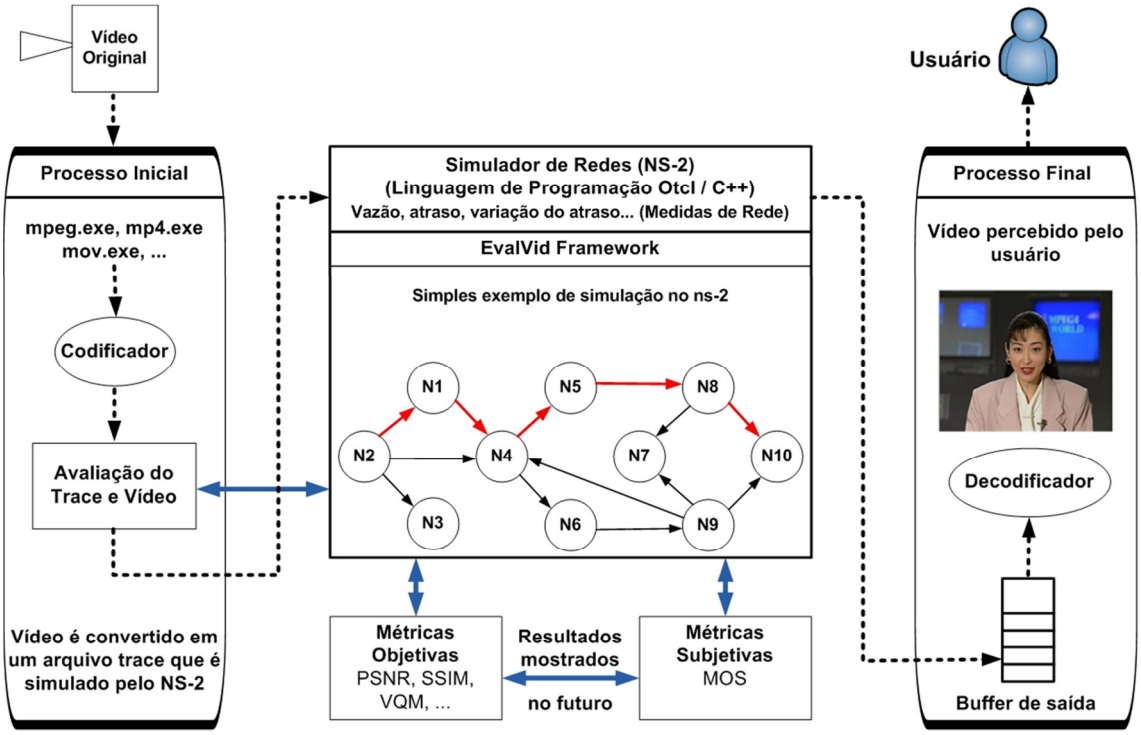
Junto com o NS-2, foi utilizado o framework EvalVid para avaliar a qualidade do vídeo transmitido através de uma simulação ou comunicação de rede real com o apoio de diferentes padrões de vídeo para avaliação, tais como MPEG-4, H.264, H.263, AAC, etc. Esta extensão também é utilizada na comunidade científica pelos pesquisadores que procuram avaliar a qualidade final de um fluxo de vídeo do ponto de vista do usuário através de implementações e mudanças estruturais ou tecnológicas na rede (KLAUE et. al., 2016).

Este framework já tem algumas métricas objetivas padrão para avaliar a qualidade do vídeo, como PSNR, SSIM e VQM. Na realização de uma avaliação subjetiva, foi utilizado o MOS, que mapeia os resultados de PSNR e compara os quadros recebidos com os quadros originais do vídeo, calculando os resultados consistentes de avaliações subjetivas para medir e classificar o vídeo resultante.

A Figura 11 a seguir ilustra a estrutura do EvalVid juntamente com o ns-2 e mostra as interações entre o framework e o simulador e os fluxos de dados utilizados pela simulação para os experimentos deste trabalho.

A figura fornece uma visão geral das interações que estabelecem a partir do processo inicial onde um vídeo fonte original é codificado e convertido em um arquivo “trace” pelo ns-2/EvalVid e simulado na arquitetura de rede específica (uma importante aplicação para os fins deste trabalho). A figura a seguir mostra um simples esboço da ideia geral funcional com 10 dispositivos (N1 a N10, que poderiam ser sistemas, computadores móveis, smartphones, etc.).

Figura 11 - Visão geral do ns-2 e Evalvid usados na tese



Este arquivo trace (que tem os frames do vídeo e mostra o período de tempo em que foi transmitido) é executado através de um cenário e é continuamente avaliado através de métricas objetivas (PSNR, SSIM e VQM) e subjetivas (MOS) de qualidade. Em seguida, é comparado com o vídeo original e a qualidade percebida do ponto de vista do usuário através do número de quadros recebidos pelo dispositivo móvel final (garantia de QoE).

Para tornar a implementação possível, foi necessário modificar a classe RTAgent (Routing Table Agent – Aplicação) dentro da configuração do dispositivo móvel do ns-2. Essa classe usa a tabela de roteamento para tomar decisões de acordo com o protocolo de roteamento. Em geral, os principais protocolos de roteamento fazem uso de apenas duas unidades de medida em seu processo de tomada de decisão do melhor caminho: o número de sequência e a quantidade de saltos, baseados basicamente em regras similares a apresentada abaixo (regra geral padrão):

if ((rq->rq_src_seqno > rt0->rt_seqno) || ((rq->rq_src_seqno == rt0->rt_seqno) && (rq->rq_hop_count < rt0->rt_hops))

As alterações feitas na RTAgent foram colocadas nos protocolos de roteamento de forma geral no cabeçalho dos pacotes de requisição de rota (ROUTE_REQ_PKT ()) e resposta de rota (ROUTE_REP_PKT ()) e incluiu dois novos campos que foram inseridos no pacote original de dados (estes campos conduziram a uma ligeira alteração

no tamanho do pacote, mas como trata-se de campos demasiadamente pequenos, os mesmos não geraram uma sobrecarga significante e não prejudicaram a comunicação.

Estes dois novos campos são o índice de mobilidade e a informação de energia e cada dispositivo móvel deve incluir essa informação nos pacotes de modo que os nós vizinhos (os próximos dispositivos móveis – possíveis caminhos) podem descobrir mais sobre sua situação atual. Depois de receber esta informação a partir dos dispositivos vizinhos, o dispositivo de origem tem que decidir se deve ou não atualizar a tabela de roteamento baseado nas suas regras do protocolo/algoritmo de roteamento.

De acordo com a literatura, alguns trabalhos relacionados discutidos na seção específica anterior e outras pesquisas no domínio das redes móveis Ad hoc sem fio e na opinião de especialistas da área de redes de computadores/telecomunicações, fora decidido usar para esta proposta três variáveis linguísticas de entrada que podem ser interpretadas por três conjuntos Fuzzy: índice de mobilidade, capacidade de energia e grau de QoE, adaptado as NGWN e FI.

A qualidade de experiência é definida pela satisfação que o usuário tem com uma aplicação multimídia (por exemplo, vídeo). O tipo de aplicação é classificado no pacote de dados (PKT_RCV (tipo)), bem como o número de sequência dos quadros. O número de pacotes recebidos afeta diretamente a qualidade final do vídeo e má comunicação pode gerar perdas de pacotes ou mudar a ordem dos pacotes.

Através do número de pacotes recebidos torna-se possível estimar as métricas de QoE (PSNR, SSIM e VQM), que são empregados para analisar a experiência do usuário com recursos, tais como cor, brilho, contraste, luminosidade, ruídos, quadro-a-quadro de comparação, etc.; Ao contrário das tradicionais métricas de QoS (métricas que avaliam fatores no desempenho da rede, tais como o vazão, atraso, variação do atraso, etc.). Embora a metodologia de perda de pacotes seja a mesma, a avaliação é diferente.

Por esta razão, a avaliação de vídeo é muito importante para o sistema Fuzzy, juntamente com a mobilidade e a energia, uma vez que estas variações podem causar perdas e, portanto, prejudicar a qualidade final da transmissão. O grau de QoE é obtido através da medição da quantidade de dados recebidos no pacote de dados, como mostrado no fragmento de código em C ++:

```
bytes_ += hdr_cmn::access(pkt)->size();
```

A energia é obtida para cada dispositivo móvel e repassada para os dispositivos vizinhos de modo que ela possa ser interpretada pelo sistema Fuzzy. Para garantir que os resultados obtidos sejam precisos, foi necessário criar e adaptar um novo modelo de

energia no ns-2 baseado na proposta de (RAKHMATOV & VRUDHULA, 2001), que passou a interpretar valores realistas e comportamentos de bateria não lineares, viabilizando um mecanismo/processo de tomada de decisão realista e eficiente. A energia é obtida através do seguinte fragmento de código em C ++:

iEnergy inode -> energy ();

O terceiro ponto de fundamental importância na manutenção das rotas por um período de tempo maior é o gerenciamento de mobilidade e os fatores que convergem na durabilidade da mesma. Quanto maior for a mobilidade dos dispositivos móveis, maior será a mudança da topologia da rede e pior é a decisão da tabela de roteamento. O índice de mobilidade é obtido através do seguinte trecho de código em C++:

*mobility = (MobileNode *)->speed();*

A necessidade de atualizar a tabela de roteamento é baseada no número de saltos, o número de sequência de pacotes de dados, o índice de mobilidade (quanto menor, melhor, porque a rota permanecerá ativa por mais tempo), o índice de energia (quanto maior, melhor, porque o dispositivo terá maior vida útil) e o índice/grau de QoE (quanto menor o valor de grau de QoE no sistema Fuzzy, melhor será a qualidade da conexão e a menor a quantidade de perdas).

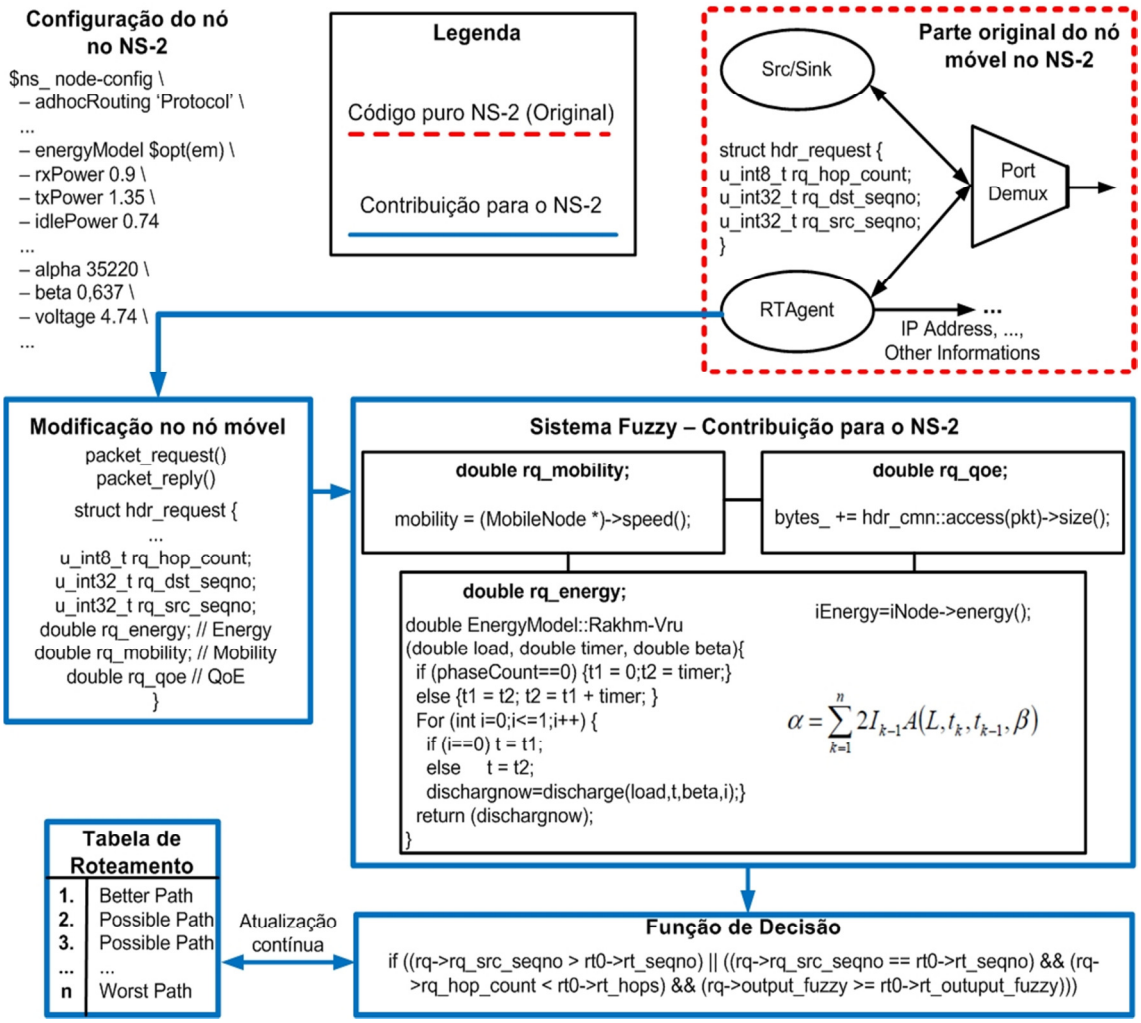
A informação foi adicionada ao pacote de dados e cada dispositivo móvel é capaz de calcular a sua tabela de roteamento. A saída do sistema Fuzzy (quatro resultados possíveis – sempre dá prioridade aos "excelentes", "bons" e "ruins" caminhos – nessa ordem respectivamente). A tomada de decisão final ainda leva uma regra geral que se baseia no antigo processo de decisão geral, levando em consideração o número de sequência e a quantidade de saltos.

O processo de decisão final se preocupa unicamente em atualizar ou não a tabela de roteamento do dispositivo móvel e deve ser atualizada para formalizar uma nova base de regra resultante, após a saída do sistema Fuzzy, como no seguinte código C ++:

if ((rq->rq_src_seqno > rt0->rt_seqno) || ((rq->rq_src_seqno == rt0->rt_seqno) && (rq->rq_hop_count < rt0->rt_hops) && (rq->output_fuzzy >= rt0->rt_outuput_fuzzy)))

Conforme ilustra a Figura 12 a seguir, a modelagem de simulação do "Mecanismo de Roteamento Cross-Layer", onde se pode observar a abordagem e modelagem da implementação do mecanismo proposto.

Figura 12 - Modelagem de simulação



Na Figura 12 acima, pode-se observar as duas principais características/contribuições gerais desta tese: a) Abordagem de inteligência computacional baseado no sistema Fuzzy para a tomada de decisão, que é projetado para selecionar o melhor caminho voltado as NGWN e FI e a b) adaptação de um modelo de bateria realista para fornecer medições precisas sobre o consumo de energia dos dispositivos móveis, auxiliando a tomada de decisão com consciência energética.

A construção do modelo de energia e a utilização da técnica de inteligência computacional fornece um processo de decisão com maior acurácia e eficiência. A figura mostra duas grandes regiões: tracejado em vermelho com modelagem original no ns-2 e a linha azul sólida com os principais dados da modelagem, mudanças e contribuições deste trabalho.

Mais informações sobre a parte original do nó móvel podem ser encontradas no "Manual do ns-2" (NETWORK SIMULATOR, 2016).

4.5 Aspectos Gerais da Proposta

O mecanismo de roteamento cross-layer difundiu diversas áreas de conhecimento para a criação do provisionamento aos protocolos de roteamento atualmente utilizados nas redes móveis Ad hoc sem fio. O mecanismo pode ser construído e utilizado sobre muitos dos protocolos atualmente encontrados na literatura.

O custo desta implementação, do ponto de vista da inserção dos dois novos campos citados nas seções anteriores e do sistema Fuzzy para a tomada de decisão é desprezível, uma vez que o atraso máximo em relação aos protocolos convencionais aumenta em no máximo um milionésimo de segundos.

Para tornar isso possível, é necessário criar um sistema embarcado nos dispositivos móveis sem fio ou nos roteadores que possam ser usados no modo Ad hoc e aprimorar os protocolos de roteamento para que possam dar essas novas informações em seus cabeçalhos de pacotes, nos campos disponíveis para novas informações, viabilizando que os sistemas embarcados nos dispositivos móveis possam ler essas informações e tomar suas decisões baseadas no sistema inteligente proposto por esta tese de Doutorado.

Os dois novos campos no cabeçalho do pacote que trazem as informações sobre os pacotes e são usados para mensurar a qualidade final do fluxo multimídia se unem as informações de energia que podem ser repassadas pelos dispositivos móveis (uma grande gama dos dispositivos atuais já possui essas informações, bastando apenas enviá-las ao sistema embarcado dos dispositivos) e as informações de mobilidade que também podem ser repassadas através do posicionamento dos nós ou da rede que triangulam a informação, repassando todas essas informações ao modelo de inteligência computacional baseado em Fuzzy.

Além disso, é importante também que os dispositivos móveis sejam configurados como roteadores e que possam ser utilizados como tais, para que o cenário MANET possa ser utilizado e para que os dados possam ser trafegados através das interfaces dos dispositivos, repassando as informações para os próximos nós que compõem a rede.

CAPÍTULO 5: AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO

O ns-2, simulador de redes de computadores amplamente difundido no meio acadêmico, foi empregado para esta pesquisa e tese, para ajudar na busca dos protocolos comumente usados hoje. Os experimentos foram realizados cem vezes com mobilidade aleatória dos dispositivos móveis (*random waypoint model* – modelo do simulador em que os dispositivos escolhem seus destinos) em velocidades e direções variáveis (uma alternativa que também pode ser definida no simulador) (o que levou a uma gama de cem cenários distintos), cada vez com uma mudança para a topologia da rede. Os dispositivos móveis foram configurados em modo híbrido, de modo que estes podem ser usados tanto como clientes receptores, como roteadores.

Para viabilizar o mecanismo proposto, foi necessário experimentar uma grande gama de protocolos de roteamento, mas decidiu-se apresentar aqui apenas os principais e mais amplamente utilizados na literatura: OLSR (Optimized Link State Routing), AODV (Ad Hoc On-Demand Vector Distância), DSDV (Destination-Sequenced Distance Vector) e HWMP (Hybrid Wireless Mesh Protocol). Estes foram usados porque eles são protocolos padrão, inicialmente implementados pelo simulador e os mais comumente usados na literatura. O protocolo HWMP foi utilizado nesta tese como um exemplo representativo que funciona de forma híbrida e isso foi incorporado no simulador através de um patch de extensão (NG & YAU, 2015) (TRAN et. al., 2015) (TOUTOUH et. al., 2012).

Uma análise em larga escala foi conduzida dos protocolos descritos nesta seção para confirmar os resultados encontrados pelo mecanismo proposto e os protocolos que foram incorporados pelo mesmo, com uma análise mais aprofundada dos resultados para provar sua eficiência. Os resultados apresentados a seguir correspondem aos cenários aleatórios com o número de dispositivos móveis variando de 20 a 45.

5.1 Ambiente de Simulação

O modelo de transmissão utilizado no ns-2 é baseado nas características da interface sem fio que opera no padrão IEEE 802.11 na frequência de 2,4 GHz, a taxa de transmissão nominal de 54 Mbps, alcance de rádio de 250 metros e com antenas omnidirecionais. O modelo de propagação do rádio baseou-se no modelo *two-ray-ground-reflection*, em que a intensidade do sinal diminui de acordo com o quadrado da distância percorrida.

Tanto a interface de rede quanto o modelo de propagação, são padrões do ns-2 (NETWORK SIMULATOR, 2016). Os parâmetros de simulação são apresentados conforme os valores indicados na Tabela 5 a seguir.

Tabela 5 - Parâmetros de configuração do simulador

Tecnologia padrão	IEEE 802.11
Taxa de transmissão	54 Mbps
Área de simulação	1000 m² x 1000 m²
Tempo de simulação	100 segundos
Quantidade de simulações	100 simulações
Intervalo de confiança	95%
Taxa constante de bits	500 Kbps
Fila	Drop Tail (atraso de 40 ms)
Resolução de vídeo	352 x 288 (baixa resolução) 1080 x 720 (alta resolução)
Taxa de quadros	30 quadros por segundo

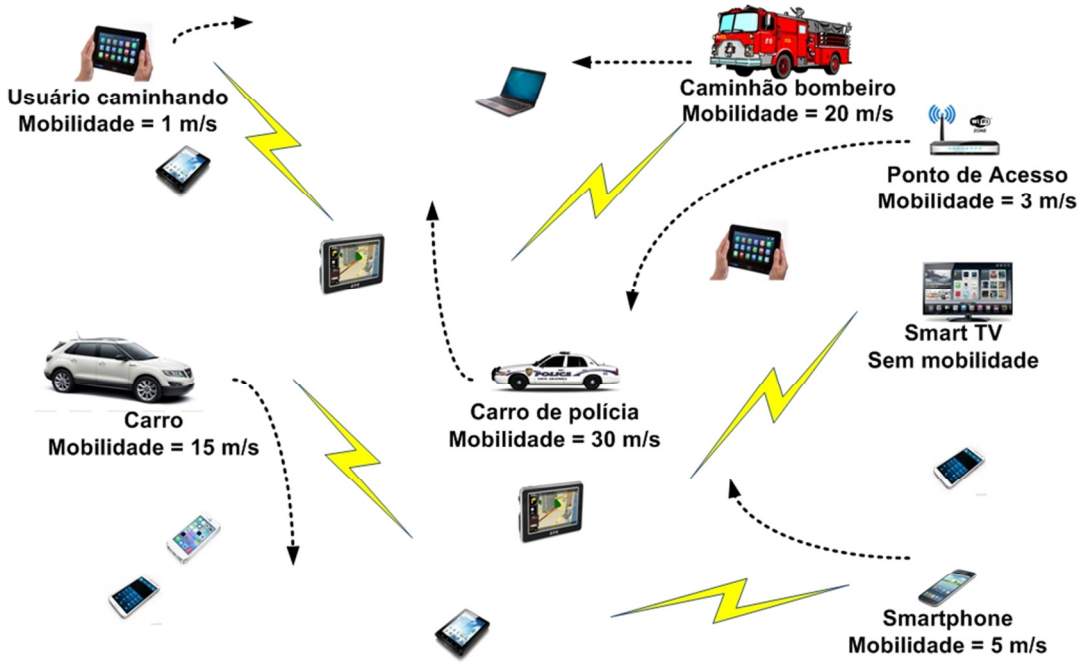
O consumo de energia dos dispositivos varia de acordo com o estado em que os mesmos se encontram: transmitindo, recebendo, ocioso ou dormindo. Esta tese usa valores de descarga de corrente elétrica e potência elétrica a partir da Tabela 6, usados para configurar o consumo de energia dos dispositivos de rede sem fio, usando uma tensão de 4,74 Volts. Os dispositivos têm uma energia inicial igual a 40 Joules (MA & YANG, 2011) (SPOHN et. al., 2008) (HANDY & TIMMERMANN, 2003).

Tabela 6 - Corrente e potência elétrica das interfaces sem fio

Estado	**Corrente**	**Potência**
Transmitindo	284 mA	1,35 w
Recebendo	190 mA	0,9 w
Ocioso	156 mA	0,74 w

O cenário escolhido para colher os resultados do mecanismo proposto por esta tese em comparação aos demais protocolos supracitados é ilustrado pela Figura 13 a seguir. É importante observar que se trata se um esboço de cenário, uma vez que estes variam bastante de topologia e de quantidade de dispositivos móveis (20 a 45), velocidades e possibilidades de rotas conforme descrito anteriormente. Devido a esses fatores dinâmicos constantes, as rotas mudam constantemente entre a origem e o destino. O tipo de dados transmitido é do tipo CBR (Constant Bit Rate) e vídeos através da ferramenta de Evalvid (EVALVID, 2016) (KLAUE et. al., 2013).

Figura 13 - Exemplo de um cenário randômico MANET



O cenário ilustra diversos dispositivos sem fio em uma determinada área. Esses dispositivos podem ser dispositivos de telecomunicações comumente encontrados atualmente, como smartphones, celulares, notebooks, sistemas multimídia de veículos, entre outros, e podem estar estáticos dentro de ambientes residenciais, comerciais, industriais ou móveis em rodovias, ônibus, carros e outros meios, podendo fornecer uma comunicação contínua através dos múltiplos saltos que agem como roteadores.

5.2 Resultados Exógenos

Esta subseção avalia os resultados exógenos obtidos a partir de experimentos realizados fora do simulador de redes, ou seja, que não foram gerados pelos arquivos de trace e interpretados por medidas e/ou métricas.

Os experimentos deste trabalho foram realizados em cinco dispositivos computacionais com 2,2 GHz de processamento, dois núcleos físicos, 2 Mb de memória cache e 8 Gb de memória RAM.

A carga computacional (seguindo o ponto de vista do tempo de processamento) para cada simulação foi de aproximadamente 15 horas (tempo real) para testar um cenário randômico e dinâmico em 100 segundos de simulação no ns-2, utilizando-se do modelo de energia não linear construído para esta tese e com o uso da fórmula e das variações propostas por (RAKHMATOV & VRUDHULA, 2001). Para os experimentos realizados sobre o modelo de energia linear, a carga computacional foi de aproximadamente 10 minutos, para os mesmos cenários.

Além da carga computacional, pode-se notar que também houve um aumento considerável no tamanho dos arquivos trace quanto às informações repassadas e salvas pelo simulador. Sem a ativação de quaisquer filtros, o tamanho dos arquivos chegou próximo dos 150 MB de informação do tipo texto básico (pelo menos 500% maior do que os arquivos sem o modelo).

5.3 Resultados Endógenos

Esta seção apresenta os resultados endógenos obtidos através dos experimentos realizados no simulador. As próximas subseções avaliarão os resultados de qualidade das a) medidas de rede, voltadas as medidas do ponto de vista da QoS, como vazão e atraso; b) medidas de consumo de energia, com gasto energético da bateria dos dispositivos e; c) resultados obtidos pela qualidade de experiência e ponto de vista dos fluxos multimídia experimentados nos cenários apresentados.

5.3.1 Métricas de Desempenho de Rede

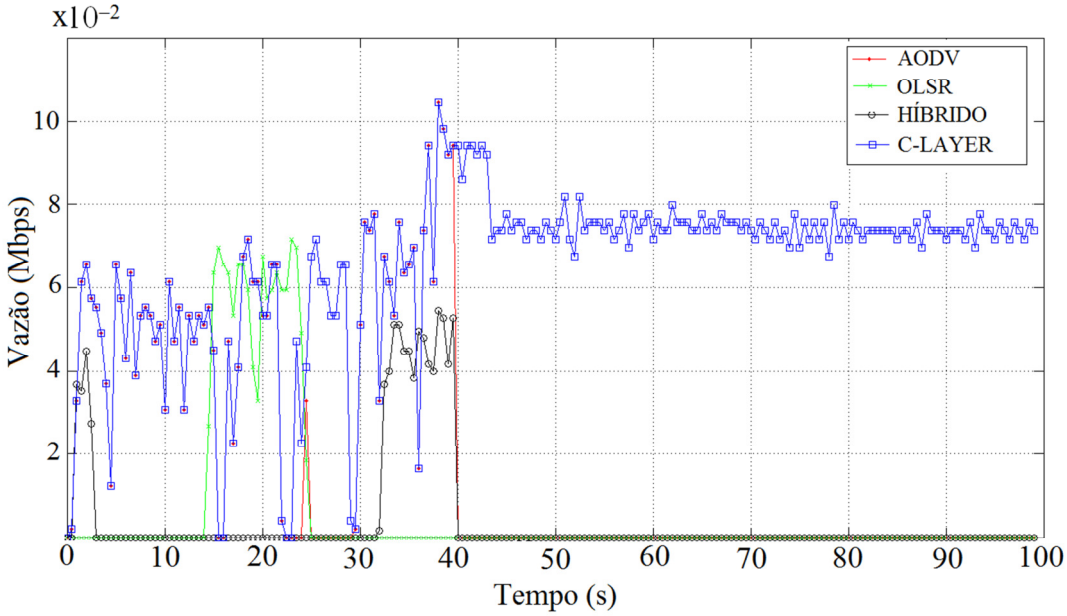
O conceito de carga computacional pode variar na literatura, podendo ter muitos significados que vão desde o tempo de processamento, grau de complexidade algorítmica até a sobrecarga de uma implementação ou execução de um experimento.

Na seção anterior, foi utilizado para a carga computacional o tempo de processamento, como o tempo para aferir os experimentos, sendo uma medida exógena. Esta subseção apresenta outra vertente da carga computacional com um valor aferido de forma endógena através da sobrecarga, que representa o custo computacional provocado pela inclusão dos dois novos campos no cabeçalho dos pacotes (modelo não linear de bateria) simultaneamente ao sistema Fuzzy para a tomada de decisão. Essa carga variou de acordo com o protocolo utilizado, mas atingiu uma sobrecarga máxima de $1x10^{-4}$ segundos, sendo considerada uma sobrecarga ínfima e não tendo influências sobre os resultados de desempenho que serão apresentados a seguir.

Os resultados de desempenho foram analisados e comparados através de quatro diferentes protocolos em comparação ao mecanismo de roteamento cross-layer (construído sobre o AODV, mas podendo ser adaptados a outros). Os protocolos utilizados são: AODV (representando um protocolo reativo), OLSR e DSDV (representando os protocolos proativos), HWMP (representando os protocolos híbridos) e o mecanismo proposto representado pela pelo nome “C-LAYER”.

Conforme se pode observar na Figura 14, é evidente que a vazão do mecanismo proposto é superior a vazão dos demais protocolos apresentados. Isto acontece porque o protocolo com o mecanismo proposto tende a procurar os nós com baixa mobilidade e maior vida útil da bateria (maior quantidade de energia remanescente) e estando, desta forma, consciente de quantidade de energia remanescente nos dispositivos móveis vizinhos, escolhendo caminhos mais longos eventualmente, mas mantendo-se ativo por um período de tempo mais longo e mantendo a conectividade.

Figura 14 - Vazão média da rede



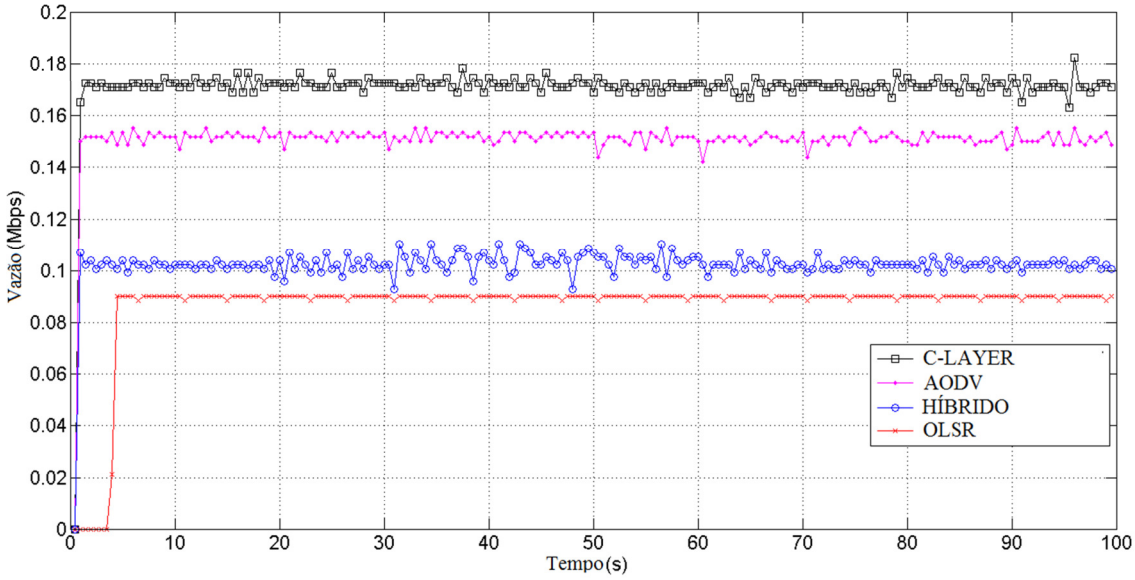
O mecanismo proposto tende a estabilizar o fluxo de dados ao longo do tempo, porque leva em consideração as medições de energia, de QoE e índices de mobilidade, que neste caso foram significativos na escolha do melhor caminho.

Outros protocolos parecem inicialmente competir com o mecanismo proposto, mas depois de 40 segundos, é evidente que eles não são tão eficientes. A vazão média para o mecanismo proposto é aproximadamente 0,076 Mbps (7.6x10-2 Mbps) (após 40 segundos). Os demais protocolos não conseguem encontrar uma rota devido à dinamicidade e mobilidade aleatória dos dispositivos, ficando sem transmissão, e, consequentemente, sem vazão neste gráfico (depois dos 40 segundos).

A Figura 15 a seguir mostra que a taxa de transferência do mecanismo cross-layer é maior do que nos outros protocolos utilizados. A protocolo melhorado pelo mecanismo proposto busca dispositivos móveis com baixa mobilidade, taxa de QoE satisfatória e elevada quantidade de energia remanescente em sua bateria. O mecanismo cross-layer e os outros protocolos estabilizam o fluxo de dados ao longo do tempo,

embora o mecanismo seja mais eficiente, porque considera os índices de mobilidade e escolhe rotas mais estáveis. O mecanismo obteve vazão média de 0,17 Mbps, AODV teve 0,15 Mbps, HYBRID teve 0,11 Mbps e OLSR teve 0,09 Mbps. Este resultado não tem nenhuma relação com o anterior, pois leva em consideração uma média das simulações com maior quantidade de dispositivos.

Figura 15 - Vazão média dos cenários com 40 e 45 dispositivos



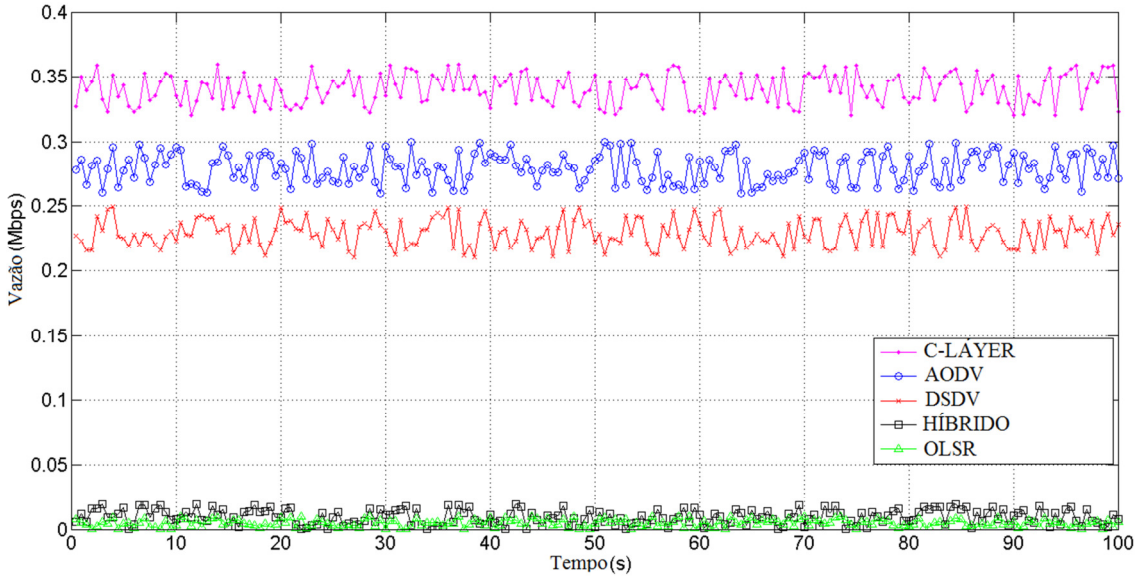
A Figura 15 a seguir apresenta a vazão da rede sobre um novo experimento, dessa vez com a inclusão do protocolo DSDV, devido ao mesmo possuir um comportamento semelhante ao protocolo AODV (que obteve os resultados mais próximos ao mecanismo proposto) e porque também é baseado em algoritmos de vetor de distância (embora o AODV seja reativo e o DSDV proativo).

A Figura 16 mostra que o mecanismo de roteamento cross-layer novamente demonstra eficiência, pois é capaz de manter um fluxo de dados e uma vazão média superior aos demais protocolos. Neste novo cenário, há grande variação de mobilidade, e o protocolo DSDV obtém resultados próximos aos do AODV.

A vazão média do mecanismo energeticamente eficiente atinge uma taxa de aproximadamente 0,33 Mbps, AODV com aproximadamente 0,27 Mbps e o DSDV com aproximadamente 0,23 Mbps. Os outros dois protocolos (híbrido e OLSR) obtiveram péssimos resultados vazão com vazões médias de 0,02 e 0,01 Mbps respectivamente. O AODV é um protocolo reativo e obtém resultados melhores do que o DSDV, que embora seja baseado em vetor de distâncias também, é proativo e demora mais para obter rotas satisfatórias. Embora este resultado não se compare com os anteriores, é

importante mencionar que as taxas de transferência aumentaram devido a uma melhor disposição de possíveis rotas próximas ao dispositivo de origem, fazendo a rota escolhida aproveitar de uma melhor forma a largura de banda disponível.

Figura 16 - Vazão média dos cenários com grande mobilidade com o DSDV

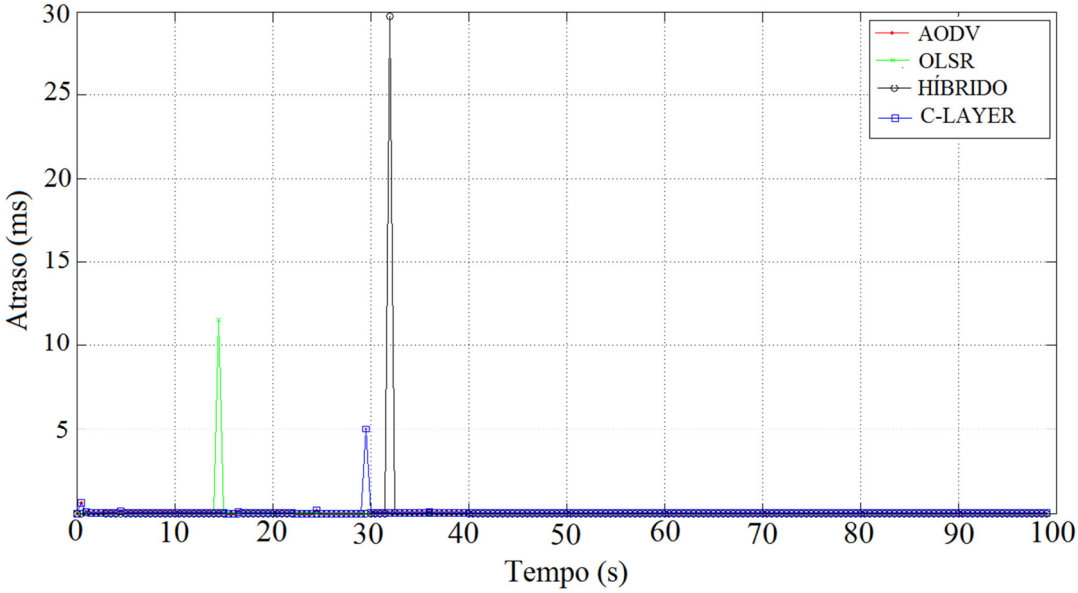


Os resultados de atraso também são pertinentes para uma avaliação do mecanismo em comparação aos demais protocolos do ponto de vista de medidas de rede. Conforme ilustrado pela Figura 17 (mesmo cenário da Figura 14), nos primeiros 40 segundos de simulação, o protocolo OLSR teve um pequeno período de atraso para configurar uma nova tabela de roteamento de aproximadamente 12,4 milissegundos. O protocolo AODV teve picos insignificantes (menos 0,01 milissegundos).

O mecanismo proposto teve um atraso de aproximadamente 5 milisegundos devido a uma rearrumação da topologia e uma nova configuração de tabela de roteamento e HWMP obteve o pior atraso de todos, em um grande pico de cerca de 29,8 milissegundos, uma vez que é um protocolo que é mais útil em cenários com menor mobilidade.

Após os 40 segundos, os protocolos AODV, OLSR e HWMP tem atrasos iguais a zero segundos, uma vez que nenhum dado está sendo transferido, pois não encontraram rotas satisfatórias. Esses protocolos não consegue encontrar um novo caminho para continuar a sua transmissão de dados e, portanto, não tinham vazão ou atraso (como mostrado pelas Figuras 14 e 17, respectivamente). No entanto, o mecanismo de roteamento cross-layer consegue.

Figura 17 - Atraso médio da rede



Mesmo com picos médios insignificantes (aproximadamente 0,02 milissegundos), o mecanismo proposto conseguiu fazer uma transmissão de dados eficiente, de consciente do uso da energia, poupando-a.

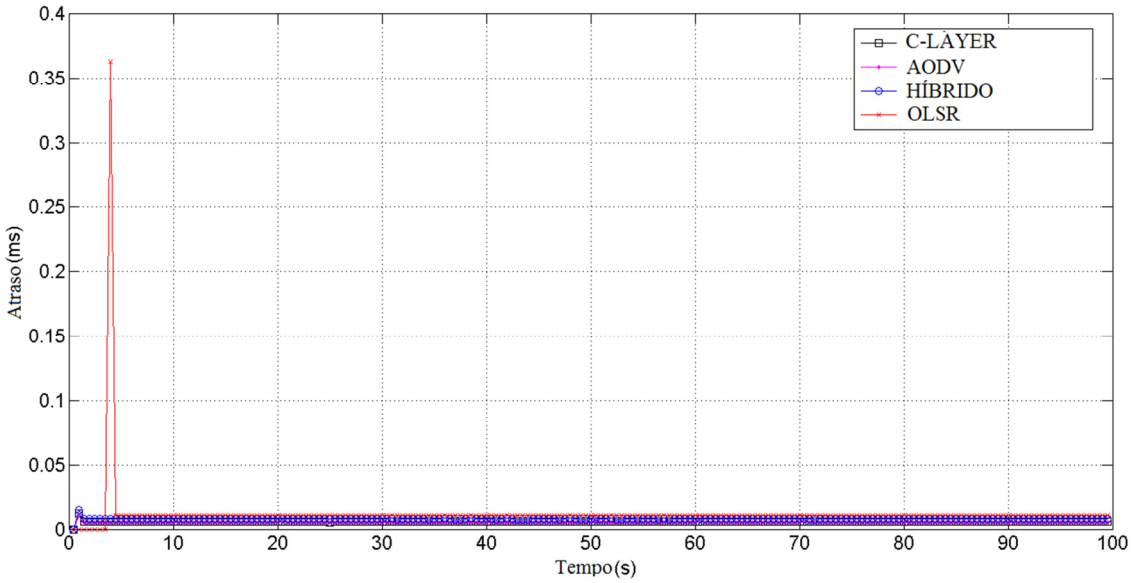
O ponto chave não é que a vazão será sempre maior, mas o caminho será mantido sempre por mais tempo, pois o caminho escolhido é melhor e mais estável devido ao mecanismo cross-layer considerar parâmetros da energia dos dispositivos móveis, prevendo o esgotamente energético dos mesmos; os parâmetros de mobilidade que podem alternar as rotas e as topologias; e a qualidade de experiência que ajuda a prever a qualidade final de um vídeo.

A Figura 18 mostra os resultados de atraso em um cenário aleatório e compara o mecanismo energeticamente eficiente proposto com outros protocolos. O atraso é um resultado importante, uma vez que pode degradar a transmissão de dados e, portanto, perturbar a rede de comunicação. O mecanismo energeticamente eficiente e os outros protocolos (exceção ao protocolo OLSR) obtiveram atrasos insignificantes (até 0,02 milissegundos) ao formar o encaminhamento tabela.

Quando o protocolo OLSR foi criar sua tabela de roteamento, houve um grande pico de atraso devido à elevada mobilidade dos dispositivos móveis (cenário típico MANET) alcançando aproximadamente 0,37 milissegundos. Esse atraso degrada sua transmissão e consequentemente atrasa a criação de uma tabela de roteamento para o protocolo seguir com sua transmissão de dados. Esse atraso de transmissão de dados

atrapalha a comunicação, pois quando este começa sua transmissão, o cenário não é mais o mesmo.

Figura 18 - Atraso em um cenário de baixa mobilidade



5.3.2 Consumo de Energia

Esta subseção analisa o comportamento da bateria e o consumo de energia da rede e de seus dispositivos móveis.

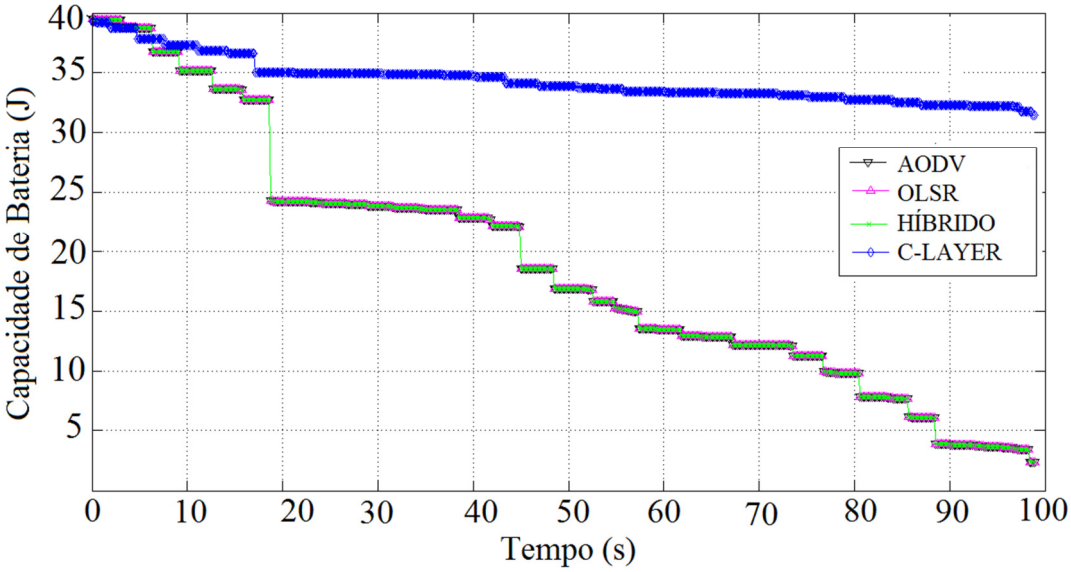
Quando o comportamento da rede foi analisado, verificando o comportamento detalhado de cada dispositivo móvel envolvido na comunicação e na formação da topologia, considerando que esta em questão possuía 40 dispositivos computacionais, observou-se que "dispositivo número 10" (numeração dada ao nó no ns-2) foi utilizado com maior frequência ao longo do tempo de simulação; tornando-se um caminho ativo por aproximadamente 80% do tempo de simulação (79,6 segundos).

Por esse motivo, fora escolhido como referência de comparação para análise da figura a seguir em relação aos protocolos que utilizam o modelo de energia linear e não realístico e o mecanismo proposto, energeticamente eficiente através do modelo de energia não linear proposto por (RAKHMATOV & VRUDHULA, 2001).

A Figura 19 mostra o consumo médio de energia de três protocolos (AODV, OLSR e HYBRID) utilizando o modelo de energia linear construído e presente na no código básico do ns-2, em que a energia final deste dispositivo móvel é de aproximadamente 2,5 joules ou aproximadamente 6,3% de capacidade de bateria remanescente.

No entanto, o consumo médio de energia do mecanismo energeticamente eficiente é de aproximadamente 7,6 joules, tendo uma energia final de 32,4 joules ou 81% de capacidade de energia/bateria remanescente.

Figura 19 - Consumo médio de energia do dispositivo “10”



Os resultados mostram que o modelo linear (amplamente utilizado por muitos trabalhos acadêmicos e utilizadores deste simulador de redes – ns-2, pois já vem com este modelo de energia por padrão) omite muitos parâmetros importantes de consumo de energia, levando a resultados imprecisos e decisões que dependam deste fator, a respostas duvidosas e irreais.

Se a simulação fosse mais longa, o dispositivo móvel “número 10” utilizando qualquer um dos protocolos testados e o modelo linear disponibilizado pelo ns-2 iria ter um esgotamento energético total e consequentemente “morrer”; Levando ao fim do tempo de vida da rede (Define-se que uma rede finaliza seu tempo de vida a partir do momento em que o primeiro nó fica sem energia).

Além disso, a autoconfiguração da rede perderia um caminho possível, causando novos problemas de roteamento, atualizações de rotas e mudanças repentinas, levando a atrasos, perdas de pacotes e falhas de entregas, além de possíveis retransmissões.

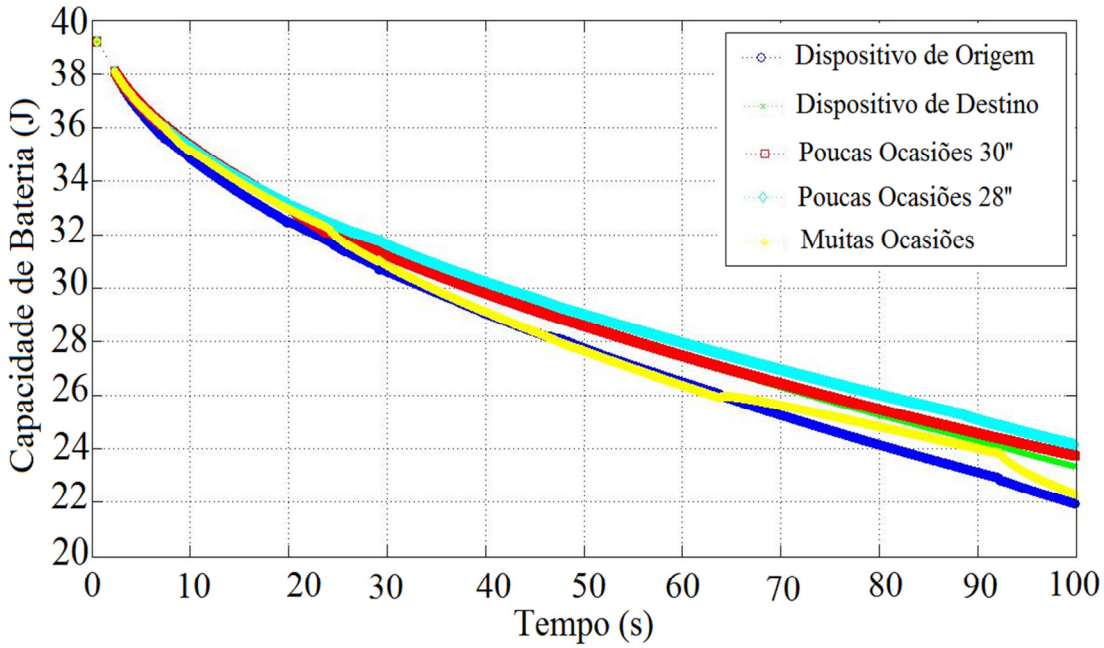
Por estas e por outras razões, se faz necessário do uso de modelos de energia realísticos, não lineares, como proposto por (RAKHMATOV & VRUDHULA, 2001), construído para esta tese conforme mostrado na figura supracitada, além de fornecer medidas precisas ao sistema de decisão, entende os conceitos da computação verde, provando a eficiência energética do mecanismo de roteamento cross-layer.

O consumo de energia de uma bateria também deve ser avaliado separando o modelo de energia não linear e verificando os diferentes estados que uma bateria de íon-lítio pode ter, afinal, de acordo com a forma em que os dispositivos se comportam (se transmitem ou recebem dados), elas possuem diferentes consumos de energia.

O próximo resultado, apresentado na Figura 20 a seguir, ilustrará um cenário aleatório com 45 dispositivos móveis. Através da análise da literatura, espera-se que os dispositivos que passem maior tempo transmitindo, possuam um maior consumo de energia, conforme explicado anteriormente na seção 3. Sendo assim, o dispositivo que transmite por maior tempo será sempre o dispositivo de origem. O dispositivo de destino também sempre estará ativo recebendo dados, mas possuirá um consumo diferente.

Existem também dispositivos móveis que intermediam a comunicação dos dados através da rede, sendo rotas permanentes, temporárias ou não sendo rotas. Entre as rotas temporárias, o tempo em que os dispositivos são uma rota ativa e consequentemente transmitem dados interfere diretamente no consumo destes dispositivos, de acordo com os estados em que se encontram e se fazem ou não uso do estado de ociosidade, em que a bateria recupera parte de sua energia (Figura 20).

Figura 20 - Consumo de energia de cinco dispositivos diferentes



Entre os 45 dispositivos utilizados no cenário ilustrado pela Figura 19 acima, existiram aqueles que foram rotas ativas por um maior intervalo de tempo, como no

caso o dispositivo representado pela linha “amarela” que ficou recebendo e transmitindo os dados por aproximadamente 60 segundos do tempo de simulação.

Outros dois dispositivos separados para serem representados a seguir foram representados pela linha “vermelha” e “azul clara” que ficaram recebendo e transmitindo dados de forma intermitente, mas que totalizaram um tempo final de transmissão e recepção igual a aproximadamente 30 segundos e 28 segundos respectivamente, possuindo os consumos mais baixos conforme ilustra a Figura 20.

Os dispositivos representados pela linha “azul escuro” e “verde” são respectivamente os dispositivos de origem e destino do fluxo de transmissão.

A Figura 20 mostra que o modelo não linear incluiu as diferentes taxas e estados de uma comunicação de dados, levando em consideração as oscilações energéticas e fornecendo diferentes consumos de energia para os diferentes tipos de dispositivos, levando em consideração o estado de ociosidade, onde parte da energia é recuperada pelo dispositivo móvel.

Os resultados mostram que o consumo energético do dispositivo de origem, representado pela linha “azul escura”, foi de aproximadamente 18,1 joules, tendo aproximadamente 54,7% de energia remanescente ao final da simulação. O consumo energético do dispositivo de destino, representado pela linha “verde”, foi de aproximadamente 16,46 joules, tendo aproximadamente 58,8% de energia remanescente ao final da simulação.

Os dispositivos representados respectivamente pelas linhas “amarela”, “vermelha” e “azul clara” tiveram um consumo energético de aproximadamente 17,7 joules (55,7% de energia remanescente), 16,2 joules (59,5% de energia remanescente) e 15,8 joules (60,5% de energia remanescente) respectivamente.

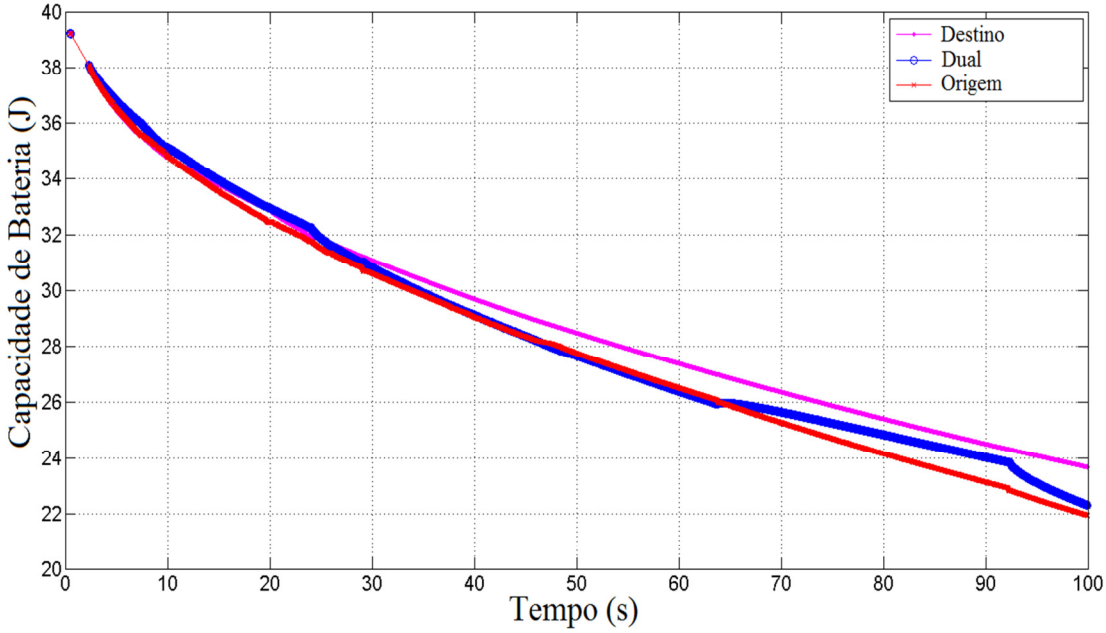
A taxa de recuperação/relaxamento e as oscilações podem ser observadas principalmente através do contraste entre as linhas “amarela” e “azul escura”. Pode-se observar que a linha amarela que representa um dispositivo que transmitiu e recebeu por mais tempo durante a transmissão (exceção aos nós de origem e destino) chega a consumir mais energia do que qualquer outro dispositivo no intervalo de tempo de 46 segundos de simulação, chegando inclusive a ultrapassar o consumo do dispositivo de origem.

No intervalo de tempo de aproximadamente 63,4 segundos o dispositivo representado pela linha amarela entra em um estado de ociosidade e recupera parte de sua energia, conforme esboça sua linha de representação. Neste intervalo de tempo, o

dispositivo móvel de origem, representado pela linha “azul escura” ultrapassa novamente o consumo energético do dispositivo da linha “amarela”, uma vez que o dispositivo de fonte nunca entra em um estado de ociosidade.

A Figura 21 a seguir deixa explícito o contraste entre os dispositivos de origem, destino e o dispositivo que tanto transmite, quanto recebe dados durante um longo período de tempo. Esses dispositivos são representados respectivamente pelas linhas de cores “vermelha”, “rosa” e “azul”.

Figura 21 - Contraste de consumo de energia



A Tabela 7 a seguir mostra o percentual do consumo médio de energia dos protocolos de roteamento (AODV e OLSR) através do modelo de energia linear (L) incluído por padrão no ns-2 e o modelo da bateria não linear (N-L), construído para a execução deste trabalho juntamente ao mecanismo energeticamente eficiente proposto.

A média do consumo de energia foi estimada pelo cálculo do número de nós nos diferentes cenários dinâmicos e aleatórios (separados para a tabela em três tipos de grupos de cenários – cenários com 25 dispositivos móveis, cenários com 35 dispositivos móveis e cenários com 45 dispositivos móveis).

A Tabela 7 também mostra o ganho médio aproximado do mecanismo de roteamento cross-layer energeticamente eficiente em comparação com o modelo linear já disponibilizado pelo simulador de redes.

Tabela 7 - Média de consumo de energia

Grupos de Cenários	AODV		OLSR		Roteamento Cross-Layer	
	L (%)	N-L (%)	L (%)	N-L (%)	N-L (%)	Ganho Médio
25 dispositivos	97.1	48	98.9	51.5	44.1	**53.9%**
35 dispositivos	96.9	48.7	99.3	54.3	44.5	**53.6%**
45 dispositivos	97.6	48.3	99.6	55.7	45.2	**53.4%**

Como pode ser observado, o modelo de energia linear (L), tem um maior consumo de energia e um maior grau de imprecisão em qualquer tipo de cenário e pode conduzir a rede a um esgotamento total de sua energia ou levar analistas e gerentes de rede a tomarem decisões baseadas em informações imprecisas.

O modelo de energia não linear (N-L) alcança resultados mais confiáveis e precisos, em especial com a utilização do mecanismo proposto nesta tese. O menor ganho energético obtido alcança pelo menos 34,5% e até 72,3% aproximadamente, dependendo, claro, do tipo de cenário utilizado, dos índices de mobilidade dos dispositivos móveis, as diferentes velocidades, da dinamicidade com a qual estes mudam suas rotas e toda a dinâmica constante encontrada neste tipo de redes móveis.

A tabela também mostra o ganho médio global em comparação com a porcentagem média do consumo de energia dos protocolos (AODV e OLSR), tanto no modelo preciso, quanto impreciso. O ganho médio total é de aproximadamente 53,9% em cenários com 25 dispositivos, 53,6% em cenários com 35 dispositivos e 53,4% em cenários com 45 dispositivos. O ganho médio corresponde a diferença do roteamento cross-layer (N-L) em relação a média do consumo (L) do AODV e OLSR.

5.3.3 Qualidade de Experiência

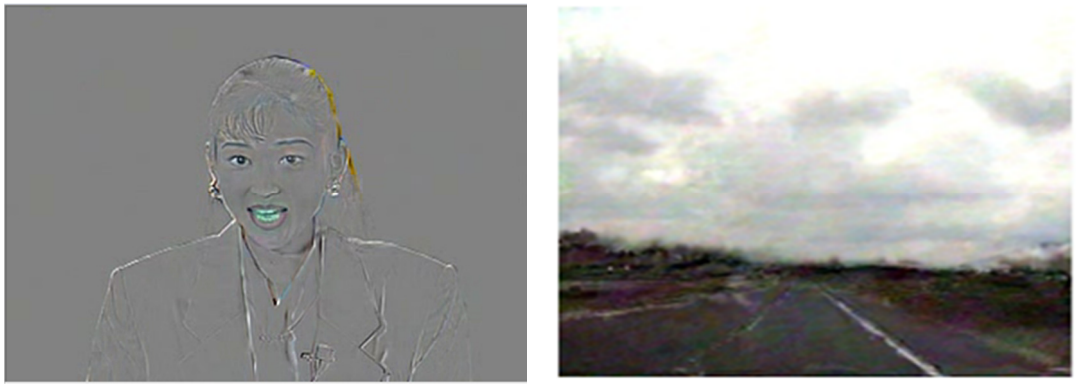
Os benefícios do mecanismo de roteamento cross-layer também podem ser mensurados através das métricas objetivas (de forma quantitativa) e subjetivas (de forma qualitativa) de QoE e da observação direta e pessoal de cada indivíduo sobre a qualidade final dos vídeos apresentados a seguir.

Serão apresentados três vídeos de baixa resolução (352 x 288) transmitidos através dos protocolos AODV, OLSR e do mecanismo proposto para esta tese, onde

cada pessoa pode fazer uma comparação pessoal sobre a qualidade destes vídeos. Para efeitos deste trabalho, utiliza-se do MOS (explicado na seção 3), para avaliar a qualidade final do ponto de vista do usuário e subjetivo a este fluxo multimídia.

A Figura 22 mostra dois quadros de dois vídeos diferentes transmitidos sobre o protocolo OLSR e fica clara a baixa qualidade do mesmo, com muitas distorções, sombras e atrasos nas imagens em um momento de atualização de tabela de roteamento, causadas em muitas vezes pelo alto índice de mobilidade e dinamicidade destes tipos de cenários de redes. O vídeo (a) da Figura 22 chega a perder detalhas da imagem transmitida, passando pouca informação ao dispositivo e a pessoa que o assiste.

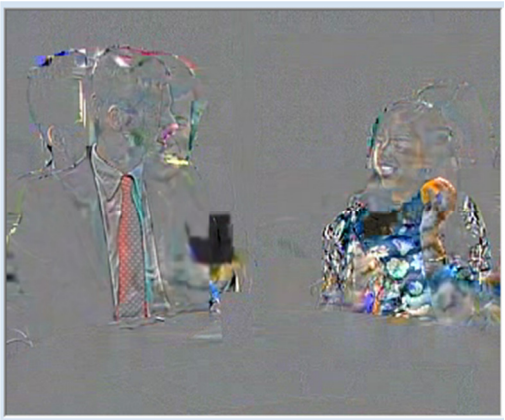
Figura 22 - Quadros de baixa resolução usando o OLSR



(a) (b)

Na Figura 23, pode-se observar novamente o mesmo tipo de distorção quando incidente sobre o protocolo OLSR. O terceiro vídeo apresenta muitas distorções, áreas em cinza semelhantes á Figura 22 (a), mas ainda pior, com algumas sobreposições de imagens. Pouco se pode notar no quadro do vídeo.

Figura 23 - Outro quadro de baixa resolução usando o OLSR



Observando a Figura 24, pode-se notar que o mesmo frame sobre o protocolo AODV apresenta resultados bem melhores e satisfatórios. Apesar dos vídeos terem melhorado significativamente (comparação a Figura 22), neste quadro do vídeo, ainda é

possível encontrar alguns pequenos defeitos na imagem. No vídeo da Figura 24(a), existe ume pequena sobreposição da mulher, principalmente sobre os olhos da mesma, tendo um quadro relativamente atrasado, embora pouco perceptível. Na Figura 24(b), o quadro também pode ser considerado satisfatório, mas existem algumas perdas e distorções sobre o veículo mostrado no respectivo quadro.

Figura 24 - Quadros de baixa resolução usando o AODV

(a) (b)

Analisando novamente o terceiro vídeo apresentado anteriormente, desta vez sobre o protocolo AODV, pode-se observar através da Figura 25, que novamente o resultado final de qualidade do quadro transmitido é satisfatório e de boa qualidade.

Na figura em questão, observa-se que a imagem inteira tem boa qualidade, com exceção do rosto da mulher, das mãos e de parte da roupa. O rosto do homem, embora nítido, está atrasado em relação à imagem real. Essas falhas correspondem a quadros mal transmitidos durante uma atualização de tabela de rotas ou novo roteamento durante uma transmissão de dados.

Figura 25 - Outro quadro de baixa resolução usando o AODV

Posteriormente, os fluxos multimídia apresentados foram novamente testados e simulados, desta vez sobre o mecanismo proposto por esta tese. Conforme ilustra a

Figura 26, os quadros dos vídeos tiveram uma significativa melhora em relação a execução feita sobre a Figura 22 e razoáveis melhoras em relação a Figura 24, apresentando erros e distorções desprezíveis e pouco notadas. A qualidade dos mesmos pode ser classificada como excelente.

Figura 26 - Quadros de baixa resolução usando o mecanismo cross-layer

(a) (b)

Repetindo os testes sobre os vídeos apresentados pelas Figuras 23 e 25, dessa vez sobre o mecanismo de roteamento cross-layer, pode-se observar através da Figura 27 que os resultados foram excelentes novamente, embora mais satisfatórios do que os vídeos apresentados pela Figura 25 anterior (em relação aos vídeos que se compararam com ela), pois dessa vez, a imagem ficou bem nítida, não apresentando distorções visíveis, nem problemas de sobreposição. A imagem do quadro do vídeo é clara.

Figura 27 - Quadro de baixa resolução usando o mecanismo cross-layer

A Tabela 8 a seguir mostra o nível de qualidade dos vídeos apresentados anteriormente do ponto de vista das métricas objetivas descritas na seção 3: PSNR, SSIM e VQM. Essas métricas analisam características objetivas somo luminosidade, ruído, distorção, contraste, cor, etc., validando ou não a qualidade apresentada pelos quadros das figuras supracitadas e ilustradas anteriormente.

Tabela 8 - Comparação das métricas de QoE

Métrica de QoE	Protocolo OLSR	Protocolo AODV	Roteamento Cross-Layer
PSNR	19	40	45
SSIM	0,9	0,85	0,87
VQM	3	0,79	0,41

Depois de obter os resultados mostrados acima para os três diferentes vídeos de baixa qualidade, os testes foram reconduzidos em uma nova rodada de experimentos, desta vez com vídeos em HD (High Definition – Alta definição) (Resolução 720 x 1080), sobre os mesmos cenários testados nos vídeos anteriores.

Por serem vídeos de maior qualidade e maior complexidade de imagem, além de uma maior necessidade de largura de banda para transmitir esses dados mais pesados e completos, os resultados iniciais do protocolo OLSR se mostram ainda piores do que os resultados demonstrados nos quadros anteriores, e esse motivo, não serão comparados. Serão comparados em alta definição apenas os protocolos AODV e o mecanismo energeticamente eficiente proposto.

As Figuras 28 e 29 mostram dois quadros de um vídeo em HD sobre o protocolo AODV. Um dos quadros tem boa qualidade (Figura 28). Vídeos em HD são mais complexos, necessitando de maior largura de banda disponível para serem transmitidos de forma satisfatória.

Figura 28 - Quadro de um vídeo em HD sobre o AODV

Figura 29 - Quadro diferente de um vídeo em HD sobre o AODV

Conforme se pode observar, os quadros apresentam pequenas falhas e sobreposição de imagens (principalmente na Figura 29), semelhante aos resultados de baixa resolução demonstrados anteriormente. Além disso, existe certo atraso do quadro do vídeo em relação ao quadro original. No entanto, pode-se avaliar este vídeo, como sendo de boa qualidade, pois é um vídeo claro, nítido e de fácil compreensão.

Quando se observa o mesmo vídeo sendo transmitido através do protocolo melhorado pelo mecanismo cross-layer, nota-se a grande diferença em relação ao vídeo transmitido pelo protocolo AODV. As Figuras 30 e 31 comprovam tais diferenças.

Figura 30 - Quadro de um vídeo em HD sobre o mecanismo cross-layer

Figura 31 - Quadro diferente de um vídeo em HD sobre o mecanismo cross-layer

É bastante claro nas Figuras 30 e 31 que o mecanismo de roteamento cross-layer se mostra igualmente eficiente em transmissões multimídia de alta definição que apresentam maiores necessidades de largura de banda do que transmissões multimídia convencionais, pois fornecem mecanismos inteligentes de escolha do melhor caminho e conseguem uma qualidade de transmissão de vídeo final melhor.

Esses resultados são obtidos, pois o mecanismo proposto leva em consideração parâmetros de mobilidade, que poderiam influenciar nas transmissões de dados devido às dinâmicas peculiaridades e autoconfiguração das MANETs; parâmetros de energia, que poderiam levar a exaustão energética dos dispositivos, levando a falhas de transmissão e perdas de dados; e principalmente, neste caso, parâmetros de QoE, que consideram os pacotes recebidos para prever a qualidade do fluxo multimídia transmitido e assim escolher os melhores caminhos levando em consideração a qualidade final do fluxo multimídia.

Os resultados apresentados pelas Figuras 28, 29, 30 e 31, avaliados previamente segundo o MOS e as opiniões subjetivas de cada visualizador destas, também são avaliados do ponto de vista objetivo pelas métricas utilizadas anteriormente pelos vídeos de baixa resolução.

A Tabela 9 a seguir quantifica os níveis de qualidade dos vídeos em alta definição apresentados do ponto de vista das métricas objetivas de qualidade de experiência, comprovando os resultados obtidos subjetivamente pelas observações dos quadros dos vídeos apresentados anteriormente. É nítido tanto objetivamente quando subjetivamente, que o mecanismo de roteamento cross-layer obtém resultados

significativos nas três vertentes oferecidas pelo mecanismo inteligente: a) melhores resultados de desempenho de rede através da vazão de dados; b) consciência energética, reduzindo o consumo dos dispositivos móveis e aumentando o tempo de vida da rede; c) suporte a QoE com excelente qualidade sobre os fluxos multimídia, cada vez mais presentes nas transmissões móveis sem fio.

Tabela 9 - Comparação das métricas de QoE (HD)

Métrica de QoE	**Protocolo OLSR**	**Protocolo AODV**	**Roteamento Cross-Layer**
PSNR	9	40	45
SSIM	0,96	0,85	0,87
VQM	4,2	0,79	0,41

CAPÍTULO 6: CONSIDERAÇÕES FINAIS

O mecanismo de roteamento cross-lauer obteve um desempenho melhor do que os demais protocolos de roteamento tradicionais examinados nesta tese. Devido ao mecanismo proposto, os clientes móveis foram capazes de obter o seguinte: a) melhores rotas, b) menos interrupções, c) maior taxa de transferência de dados, d) maior qualidade do serviço aos usuários finais, e) melhores resultados na qualidade de experiência dos usuários quanto ao fluxo multimídia, f) economia de energia dos dispositivos móveis e das redes e g) menor degradação ambiental nos preceitos da computação verde e da consciência ecológica.

O mecanismo baseado na técnica de inteligência computacional e que leva em consideração informações de diferentes camadas das redes de computadores e telecomunicações melhora claramente a maneira como as redes móveis operam através do uso de novas métricas e uma máquina de inferência inteligente capaz de tomar decisões rápidas e adaptadas a cenários de grande dinamicidade.

Além disso, é capaz de alcançar e viabilizar um mecanismo energeticamente eficiente, uma vez que maximiza a vida útil da comunicação e fornece uma melhor qualidade para os recursos da rede, especialmente para os fluxos de multimídia. Isto é conseguido através da utilização de um modelo de bateria realístico que leva informações consistentes ao sistema de decisão, sobre o comportamento da bateria de acordo com o seu estado e encaminha o tráfego da rede de uma maneira que resolve as necessidades de energia e garante o melhor serviço possível.

Como resultado dos testes realizados neste trabalho, em uma centena de cenários aleatórios com quantidades variáveis de dispositivos móveis, os resultados revelaram que o mecanismo proposto mostrou um ganho máximo de aproximadamente 72% e um ganho mínimo de aproximadamente 34% no consumo de energia. Estes resultados foram obtidos por comparação com o modelo linear.

Um ganho de 22,5% foi conseguido no consumo de energia da rede em comparação com outros protocolos de roteamento que empregam um modelo não linear e um ganho médio global de pelo menos 53% do mecanismo proposto com um modelo não linear em comparação com o obtido por um modelo linear. Além disso, houve um ganho de pelo menos 17,6% na vazão da rede e na qualidade da experiência dos vídeos, tando através das métricas objetivas, quanto subjetivas.

6.1 Principais Contribuições

O novo mecanismo de roteamento cross-layer obteve resultados favoráveis do ponto de vista das simulações obtidas, quantificando qualidades ao modelo proposto. A melhoria do processo de roteamento trouxe consigo inúmeras vantagens, não apenas as tecnolgias de redes sem fio e as redes Ad hoc, mas para todas as redes de comunicações atuais e futuras. Devido a isso, pode-se dizer que as principais contribuições desta proposta até o momento são:

i. Estender e aprimorar os protocolos de roteamento defasados e que remontam o surgimento das redes de computadores, aperfeiçoamento seus processos de tomada de decisão para a modernidade e evolução das aplicações atuais;
ii. Fornecer suporte a QoE com um sistema inteligente que leve em consideração os valores da experiência do usuário na tomada de decisão do melhor caminho, adequado ao fluxo multimídia;
iii. Mecanismo de dinâmico de monitoramento e estimativa de qualidade de experiência adaptado ao sistema Fuzzy;
iv. Mecanismo de adaptação e seleção seletiva de quadros do GoP no MPEG, verificando a importância de cada quadro;
v. Avaliação e gerenciamento da mobilidade nas redes móveis sem fio, inserindo esse importante fator no modelo de inteligência de tomada de decisão inteligente;
vi. Construção e utilização de um modelo de energia não linear, incluindo informações realísticas quanto ao comportamento de baterias, considerando os diferentes estados e seus diferentes consumos de energia;
vii. Maximização do tempo de vida da rede e dos dispositivos móveis através de uma melhor distribuição do consumo de energia, fornecendo uma solução energeticamente e ecologicamente correta;
viii. Mecanismo de suporte a aplicações de tempo real, com garantias de qualidade e prioridade para aplicações de maiores necessidades, viabilizando melhor qualidade do enlace sem fio, menor perda de dados e atrasos; maximização das medidas de vazão e de entrega de pacotes e futuramente maior sustentabilidade a vários tipos de aplicações.

6.2 Trabalhos Futuros

Em trabalhos futuros, pretende-se aumentar a gama deste trabalho a diferentes tecnologias de rede sem fio como Wimax, Bluetooth, redes 3G e 4G, aumentando a quantidade de usuários móveis e as faixas de variação de velocidade, fornecendo resultados mais precisos às diversas vertentes e variabilidades de cenários de redes Ad hoc móveis sem fio, como em VANETs e FANETs, WSNs, Redes Mesh, etc.

Além disso, em trabalhos futuros, pretende-se disponibilizar comunicações através de hadover vertical, além de liberar a utilizarão de duas ou mais interfaces de rede para alguns tipos de dispositivos móveis, que podem oferecer a eles duas ou mais possibilidades de rotas para a Internet, através de dois ou mais caminhos de um mesmo dispositivo ao mesmo tempo.

Serão consideradas também como vertentes futuras para a continuidade desta tese, os seguintes pontos:

- Estudar e utilizar outras técnicas de inteligência computacional para decisões dinâmicas e compará-las com a técnica utilizada, averiguando seu overhead e o desempenho do ponto de vista da rede e das medidas de consumo de energia;
- Expandir os testes a diferentes cenários, inclusive com sobreposição destes em cenários heterogêneos com múltiplas interfaces, múltiplas tecnologias e múltiplas opções de rota a partir de um único dispositivo;
- Buscar e experimentar outros modelos realistas de energia/bateria, que possam ser adaptados a outros tipos de bateria diferentes das de íon lítio utilizadas;
- Criar um modelo de avaliação de qualidade de experiência subjetiva, que possam aprimorar as entradas do sistema Fuzzy ou de outra técnica de inteligência computacional no futuro, fornecendo um resultado mais preciso;
- Realizar um estudo aprofundado sobre modelos de propagação, inserí-los no mecanismo proposto e averiguar a profundidade e pertinência dos resultados encontrados, comparando-os.

6.3 Dificuldades Encontradas

Esta tese de Doutorado envolveu diversas linhas de pesquisa que necessitaram de um estudo detalhado sobre os inúmeros tipos de redes de telecomunicações, arquiteturas de redes, tecnologias de acesso e técnicas de inteligência computacional,

além do aprendizado de um simulador de redes baseados em eventos discretos. Entre as principais dificuldades, pode-se citar:

- A tese envolveu um estudo aprofundado sobre o Wi-Fi, para a utilização do mesmo no ns-2, uma vez que não fora possível adquirir equipamentos para testes práticos;
- Um estudo aprofundado das linguagens de programação C++ e Otcl, necessárias para a utilização da ferramenta de simulação de eventos discretos, o ns-2;
- O estudo de modelos de bateria realísticos, dos modelos matemáticos que os envolvem e sua inserção no simulador;
- Um estudo aprofundado sobre a mobilidade em redes móveis Ad hoc, sobre a gerência da mesma para criar cenários realísticos;
- A grande quantidade de simulações e o tempo necessário para executá-las sobre o mecanismo proposto por esta tese.

O trabalho foi muito complexo para o autor desta tese, pois uniu diversas áreas relacionadas à engenharia da computação, matemática, a engenharia elétrica e diversas subáreas, as quais foram estudadas de forma aprofundadas para tornar este trabalho possível.

Um estudo aprofundado do simulador também apresentou grande dificuldade, pelos diversos elementos que fazem parte do mesmo, desde um sistema com problemas de códigos, dificuldades para encontrar um material de fácil acesso e a própria complexidade do mesmo.

Os modelos de bateria e o modelo proposto por Rakhmatov fora igualmente complexo para o entendimento e as teorias a respeito dos modelos de mobilidade das redes móveis sem fio apresentam muitos detalhes importantes que necessitaram de um tempo maior de dedicação razoável para mensurar os valores adequados para o sistema de inteligência computacional.

Para solucionar um problema crítico dos protocolos de roteamento atualmente utilizados nas redes móveis Ad hoc, assim como em diversas tecnologias de acesso sem fio, fora necessário fazer uma profunda pesquisa na literatura sobre os problemas citados e as possíveis soluções, para elaborar a proposta desta tese e construir o mecanismo cross-layer proposto, desenvolvendo-o e gerando os resultados encontrados, de forma significante e eficiente.

6.4 Publicações

Esta seção apresenta na Tabela 9 as principais publicações obtidas direta ou indiretamente relacionadas a esta tese até o momento:

Tabela 9 – Principais Publicações

Artigo	Livro/Jornal/Revista	Ano
A New Cross-Layer Routing with Energy Awareness in Hybrid Mobile Ad Hoc Networks: A Fuzzy-based Mechanism	Simulation Modeling Practice and Theory	2016
Reliable Energy-Efficient Multilayer Mechanism with Realistic Battery Model and QoE Support in Wireless MANETs	Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications	2016
A Quality of Experience Handover Architecture for Heterogeneous Mobile Wireless Multimedia Networks	IEEE International Communication Magazine	2013
Mobile WiMAX Mesh Networks with Routing Techniques and Quality of Service Mechanisms	WiMAX/Book - Intech	2013
Arquitetura com Suporte à Predição de QoE e Mobilidade para Aplicações de Vídeo em Redes Sem Fio Heterogêneas	XI Workshop em Desempenho de Sistemas Computacionais e de Comunicação (WPerformance)	2012
Eleição de Cluster-Head ideal em RSSF heterogêneas utilizando Lógica Fuzzy	Congresso Sul Brasileiro de Computação	2012

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agrawal, H. Johri, P. e Kumar, A. “Emerging Trends in Energy Efficient Routing Protocol,” pp. 523-528, International Conference on Computing, Communication and Automation, 2015.

Bellavista, P. Cardone, G. Corradi, A. e Foschini, L. “Convergence of MANET and WSN in IoT Urban Scenarios”, IEEE Sensors Journal, pp. 3558-3567, 2013.

Bellavista, G. Corradi, A. e Foschini, L. “Self-Organization Seamless Multimedia Streaming in Dense Manets”, IEEE Pervasive Computing, Vol. 12, Nº. 1, pp. 68-78, 2012.

Benmoshe, B. e Dvir, E. B. A. “Performance monitoring framework for Wi-Fi MANET”, IEEE Wireless Communications and Network Conference, pp. 4463-4468, 2013.

Boudhir, A. Bouhorma, M. Ben Ahmed, M. e Elbrak, S. “New routing protocol ‘Dicho-AODV’ for energy optimization in MANETs”. International Conference on Multimedia Computing and Systems, pp. 444-447, 2012.

Cao, Y. and Sun, Z. “Routing in Delay/Disruption Tolerant Networks: A Taxonomy, Survey and Challenges”, IEEE Communications Survey & Tutorials, Vol. 15, No. 2, pp. 654-677, May, 2013.

Cao, L. Dahlberg, T. e Wang, Y. “Performance Evaluation of Energy Efficient Ad Hoc Routing Protocols,” pp. 306-313, IEEE IPCCC 2007, United States, Apr, 2007.

Castellanos, W. Guerri, J. C. e Arce, P. “Performance Evaluation of Scalable Video Streaming in Mobile Ad hoc Networks”. IEEE Latin America Transactions, Vol. 14, No. 1, pp. 122-129, 2016.

Chakchouk, N. “A Survey of Opportunistic Routing in Wireless Communication Network”, IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol. 17, Nº 4, pp.2214-2241, 2015.

Cheng, H. and Cao, J. “A Design Framework and Taxonomy Hybrid Routing Protocols in Mobile Ad-Hoc Networks”, IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol. 10, No. 3, pp. 62-73, Sep, 2008.

Chegetanai, G. and O’Reilly, G. B. “Survey on Simulation tools for Wireless Mobile Ad Hoc Networks”, IEEE International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies, pp. 1-7, Mar, 2015.

Chen, Y. Wu, K. e Zhang, Q. “From QoS to QoE: A Tutorial on Video Quality Assement”. IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol. 17, No. 2, pp. 1126-1165, 2014.

Chhagan, L. Laxmi, V. Gaur, M. S. “Video streaming over MANETs: Testing and analysis using real-time emulation”, Asia-Pacific Conference on Communications, pp. 190-195, 2013.

Conti, M. and Giordano, S. “Mobile Ad Hoc Networking: Milestones, Challenges and New Research Directions”, IEEE Communication Magazine, pp. 85-96, Jan, 2014.

Das, S. K. “Fuzzy based energy efficient multicast routing for Ad hoc network”. Third International Conference on Computer, Communication, Control and Information Technology, pp. 1-5, 2015.

Do, N. M. Hsu, C. H. Venkatasubramanian, N. “Video dissemination over Hybrid Cellular and Ad hoc Netoworks,” Vol. 13, No. 2, pp. 274-286, IEEE Trans. on Mobile Computing, 2014.

Duagev, D. Zinov, S. Siemens, E. e Shuvalov, V. “A survey and performance evaluation of ad-hoc multi-hop routing protocols for static outdoor networks”. International Siberian Conference on Control and Communication, pp. 1-11, 2015.

Eberhart, R. and Yuhui, S. “Computational Intelligence: Concepts to Implementation”, Imprint: Morgan Kaufmann, Elsevier, ISBN 9781558607590, Print, pp. 269-372, 2007.

Engelke, Ulrich and Zepernick, Hans-Jurgen. Perceptual-based Quality Metrics for Image and Video Services: A Survey. In: Next Generation Internet Networks, 3rd EuroNGI Conference on, p.190-197, 2007.

Engelke, U. Kaprykowsky, H. Zepernick, H. J. Ndjiki-Nya, P. “Visual Attention in Quality Assessment”, IEEE Signal Processing Magazine, Vol. 28, Nº 6, pp. 50-59, 2011.

Fall, K. e Varadhan, K. “The ns Manual (Formely ns Notes and Documentation)”. The VINT Project, UC Berkley, 2007.

Ericsson, “Ericsson Mobility Report: on the pulse of the network society,” Jun, 2015.

Ghazel, C. e Saïdine, L. “A Novel QoS-Aware Method Based on Resource Control and Management in NGN Networks”. 22nd Euromicro International Conference on Paralell, Distributed and Network Based Processing, pp. 288-291, 2014.

Goudarzi, P. and Hosseinpour, M. “Video Transmission over MANETs with enhance quality of experience”, IEEE Transactions on Consumer Electronics, Vol. 56, No. 4, Pp. 2217-2225, Jan, 2011.

Handy, M. and Timmermann, D. “Simulation with mobile wireless networks with accurate modelling of non-linear battery effects”, Proceedings of International Conference on Applied Simulation and Modeling , pp. 532-537, Sep, 2003.

Huang, Z. Yamamoto, R. e Tanaka, Y. “A Multipath energy-efficient probability routing protocol in ad hoc networks”. International Conference on Advance Communication Technology, pp. 244-250, 2014.

Jain, P. e Suryavanshi, A. “Energy efficient Local Route Repair multicast AODV routing schemes in Wireless Ad hoc Network”. International Conference on Advanced Communication Control and Computing Technologies, pp. 1168-1173, 2014.

Jayakumar, M. Ramya, N. S. R. Bharathi, B. “A comparative study on RIP and OSPF protocols”, International Conference on Innovations in Information, Embedded and Communications Systems, pp. 1-5, 2015.

Jianchao, D. Song, X. Lei, Q. e Zhigang, S. “A real-time streaming media transmission protocol for multihop wireless networks”, Asia-Pacific Signal & Information Processing Association, pp. 1-4, 2012.

Jongerden, M. R. and Haverkort, B. R. “Which battery model to use?”, IET Software, Vol. 3, No. 6, pp. 445-457, Dec, 2009.

Junhai, L. Danxia, Y. Liu, X. e Mingyu, F. “A survey of multicasting routing protocols for mobile Ad-hoc networks”. IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol. 11, No. 1, pp. 78-91, 2009.

Kadam, A. D. e Wagh, S. S. “Evaluating MANET routing protocols under multimedia traffic”, Fourth International Conference on Computing, Communications and Networking Technologies, pp. 1-5, 2013.

Kanakaris, V. “Energy Aware Routing Protocols in Ad hoc Wireless Networks”. The University of Portsmouth, School of Engineering, Ph. D. Thesis, 2012.

Klaue, J. Rathke, B. and Woliz, A. “EvalVid – A Framework for Video Transmission and Quality Evaluation”, 13th International Conference on Modelling Techniques and Tools for Computer Performance Evaluation. Telecommunication Networks Group. Evalvid: http://www.tkn.tu-berlin.de. Access in 2015.

Kumar, A. Kaushik, S. K. Sharma, R. and Raj, P. “Simulators for Wireless Networks: A Comparative Study”, International Conference on Computing Sciences (ICCS), pp. 338-342, Sep, 2012.

Ledy, J. Hilt, B. Boeglen, H. Poussard, A. M. Drouhin, F. Vauzelle, R. e Lorenz, P. “Impact of Realistic Simulation on the Evaluation of Mobile Ad hoc Routing Protocols”. IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing, Vol. 3, No. 3, pp. 317-334, 2015.

Hafeez, K. A. Zhao, L. Mark, J. W. Shen, X. Niu, Z. “Distributed Multichannel and Mobility-Aware Cluster-Based MAC Protocol for Vehicular Ad Hoc Network”, IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 62, No. 8, pp. 3886-3902, Oct, 2013.

Han, T. and Ansari, N. (2014) “Powering mobile networks with Green energy”, IEEE Wireless Communications, Vol. 21, No. 1, pp. 90-96, Feb, 2014.

Hashim, W. N. W. Shariff, A. R. M. and Fadilah, S. I. “A new hop-count and node-degree based routing protocol for Vehicular Ad-Hoc Networks (VANETs)”, IEEE Malaysia International Conference on Communications, pp. 310-315, Nov, 2013.

He, Y. Xu, W. e Lin, X. “A Stable Routing Protocol for Highway Mobility over Vehicular Ad hoc Networks,” pp. 1-5, IEEE Vehicular Technology Conference, 2015.

ITU-T. International Telecommunication Union - Telecommunication Standardization Sector. Series P: Telephone Transmission Quality. Methods for objective and subjective assessment of quality. Recommendation P.800: Methods for Subjective Determination of Transmission Quality, *1996.*

Ma, C. and Yang, Y. “A Battery-Aware Scheme for Routing in Wireless Ad Hoc Network”, IEEE Transactions on Vehicular Technology, pp. 3919-3932, Oct, 2011.

Mathad, C. Paramesha. Rao, D. S. “Design of new fault tolerant multipath routing protocol for mobile ad hoc network”. International Conference on Circuits, Communications, Control and Computing, pp. 219-224, 2014.

Michoud, R. Orozco, A. M. e Llano, G. “Mobile ad-hoc routing protocols survey for the design of VANET applications”. IEEE Colombian Intelligent Transportation System Symposium, pp. 1-6, 2012.

Natkaniec, M. Kosek-Szott, K. Szott, S. e Bianchi, G. “A survey of medium access mechanism for providing QoS Ad-Hoc Networks”. IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol. 15, No. 2, pp. 592-620, 2013.

Ng, M. A. and Yau, L. A. “An Energy Efficient Hybrid Wireless Mesh Protocol (HWMP) for IEEE 802.11s Mesh Networks”, IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering, pp. 17-21, Dec, 2013.

Orosz, P. Skópko, T. Nagy, Z. Varga, P. e Gyimóthi, L. “A case study on correlating vídeo QoS and QoE”. IEEE Network Operations and Management Symposium, pp. 1-5, 2014.

Othmen, S. Belghith, A. Zarai, F. e Obaidat, M. S. “Power and Delay Aware Routing Protocol for Ad hoc Networks,” pp. 59-64, IEEE International Conference on Computer and Information Technology, 2014.

Pantazis, N. A. Nikolidakis, S. A. e Vergados, D. D. “Energy-Efficient Routing Protocols in Wireless Sensor Networks: A Survey”. IEEE Communication Surveys & Tutorials, Vol. 15, No. 2, pp. 551-591.

Papadopoulos, G. Z. Kritsis, K. Gallais, A. Chatzimisios, P. e Noel T. “Performance evaluation methods in ad hoc and wireless sensor networks: a literature study”. IEEE Communication Magazine, Vol. 54, No. 1, pp. 122-128, 2016.

Patel, D. N. Patel, S. B. Kothadiya, H. R. Jethwa, P. D. e Jhaveri, R. H. “A survey of reactive routing protocols in MANET”. International conference on Information Communication and Embedded Systems, pp. 1-6, 2014.

Priscoli, F. D. Suraci, D. Pietrabissa, A. e Iannone, M. “Modelling quality of experience in future internet networks”, Future Network & Mobile Summit, pp.1-9, 2012.

Qassem, Y. A. Al-Hemyari, A. Chee Kyun, N. e Noordin, N. K. “Cross-Layer Routing and Scheduling for IEEE 802.16 Mesh Network”, IEEE 9th Malaysia International Conference on Communications, pp. 670-673, Dec, 2009.

Rajkumar, G. Kasiram, R. e Parthiban, D. “Optimizing Throughput with Reduction in Power Consumption and Performance Comparison of DSR and AODV Routing Protocols,” pp. *943-947*, ICCEET, India, Mar, 2012.

Rakhmatov, D. N. and Vrudhula, S. K. “An analytical high-level battery model for use in energy management of portable electronic systems”, IEEE/ACM International Conference on Computer-aided design, pp. 488-493, Nov, 2001.

Rodrigue, D.K. Amadou, I. Chelius, G. e Valois F. “Routing Protocols: When to use it in terms of Energy”, IEEE Wireless Communications and Networking Conference, pp. 2763-2768, Apr, 2012.

Rosseti, M. D. “Simulation Modeling and Arena”. Chapter 1, Simulation Modeling, Editora Wiley, Segunda edição, ISBN: 978-1-118-60791-6, 2015.

Ruqiang, Y. Hanghang, S. and Yuning, Q. “Energy-Aware Sensor Node Design with Its Application in Wireless Sensor Networks”, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 62, No. 5, pp. 1183-1191, Apr, 2013.

Saeed, N. H. Abbod, M. F. and Al-Raweshidy, H. S. “MANET Routing Protocols Taxonomy”, IEEE International Conference on Future Communications Networks, pp. 123-128, Apr, 2012.

Sarkar, S. e Datta, R. “A trust bases protocol for energy-efficient routing in self-organized MANETs,” pp. 1084-1089, IEEE India Conference, 2012.

Shafiee, K. Attar, A. e Leung, V. C. M. “WLAN-WiMAX Double-Technology Routing for Vehicular Networks,” pp. *1-6*, IEEE VTC Fall, United States, Sep, 2011.

Shivashankar, G. Varaprasad, H. Suresh, N. e G. Devaraju. “Implementing a power aware QoS constraints routing protocol in MANETs,” pp. 1-7, Fourth International Conference on Computing, Communications and Network Technologies, 2013.

Song, W. e Tjondronegoro, D. W. “Acceptability-Based QoE Models for Mobile Video”. IEEE Transactions on Multimedia, Vol. 16, No. 3, pp. 738-750, 2014.

Spohn, A. Sausen, S. Salvadori, F. and Campos, M. “Simulation of Blind Flooding over Wireless Sensor Networks based on a Realistic Battery Model”. 7th International Conference on Networking, pp.545-550, Apr, 2008.

Su, B. Yang, J. e Guo, C. “New Multi-level Routing Protocols MLRP of Car MANET”. International Conference on Intelligent Transportation, Big Data and Smart City, pp. 535-537, 2015.

Tavli, B. e Heinzelman, W. “Energy-Efficient Real-Time Multicast Routing in Mobile Ad hoc Networks”. IEEE Transactions on Computers, Vol. 60, No. 5, pp. 707-722, 2011.

The Network Simulator – Version 2, Network Simulator: http://www.isi.edu/nsnam/ns/ns-documentation.html. Access in 2016.

Toutouh, J. García-Nieto, J. and Alba, E. “Intelligent OLSR Routing Protocol Optimization for VANETs”, IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 61, No. 4, May, 2012.

Tran the Son, Hoa L. M. Sexton, G. and Aslam, N. “Self-adaptive Proactive routing scheme for mobile ad-hoc networks”, IEEE IET Networks, pp. 128-136, Mar, 2015.

Umamaheswaran, S. Kumar, N. e Biswas, P. K. “A survey of routing protocol design patterns for mobile ad hoc networks”. 2nd International Conference on Emerging Technology Trends in Electronics, Communication and Networking, pp. 1-6, 2014.

Vijayavani, G. R. Prema, G. “Performance comparison of MANET routing protocols with mobility model derived based on realistic mobility pattern of mobile nodes”, IEEE International Conference on Advanced Communication Control and Computing Technologies, pp. 32-36, 2012.

Vazifehdan, J. Prasad R. V. e Niemegeers, I. “Energy-efficient reliable considering residual energy in Wireless Ad hoc Networks,” Vol. 13, No. 2, pp. 434-447, IEEE Transactions on Mobile Computing, 2013.

ANEXOS

TCL RANDOW 50

```
if {$argc != 1} {
      puts ""
      puts "Wrong Number of Arguments! No arguments in this
topology"
      puts "ns wifi_wimax.tcl seed gd_threshold shutdown"
      puts ""
      exit (1)
}

set MeshEdge 175.0
set MeshNumberOfEdge 5

#
==================================================================
======
# Define options
#
==================================================================
======
set val(chan)           Channel/WirelessChannel    ;# channel
type
set val(prop)           Propagation/TwoRayGround   ;# radio-
propagation model
set val(netif)          Phy/WirelessPhy            ;# network
interface type
set val(mac)          Mac/802_11      ;# MAC type
set val(ifq)          Queue/DropTail/PriQueue    ;# interface
queue type
set val(ll)           LL              ;# link layer type
set val(an)           Antenna/OmniAntenna   ;# antenna model
set val(ifqlen)       5000            ;# max packet in ifq
set val(nn)           [expr
($MeshNumberOfEdge*$MeshNumberOfEdge)]
# number of mobilenodes
#set val(rp)          AODV            ;# routing protocol
set val(rp)           [lindex $argv 0]      ;# routing protocol
set val(x)      1000            ;# routing protocol
set val(y)      1000            ;# routing protocol
set val(nn)           16              ;# routing protocol
set val(energymodel)    EnergyModel     ;#
set val(initialenergy)  40            ;# Initial energy in
Joules
#
==================================================================
======
# Main Program
#
==================================================================
======
```

```
#
# Initialize Global Variables
#
#Propogation/Shadowing set pathlossExp_ 2.0

set ns_         [new Simulator]
set tracefd     [open tracefile.tr w]
set f0 [open vazao-aodv.tr w]
set f1 [open delay-aodv.tr w]
set f2 [open perda-aodv.tr w]
$ns_ trace-all $tracefd

# set up topography object
set topo       [new Topography]

$topo load_flatgrid $val(x) $val(y)

set namtrace [open namout.nam w]           ;# for nam tracing
$ns_ namtrace-all-wireless $namtrace $val(x) $val(y)

#
# Create God
#
create-god $val(nn)

        $ns_ node-config -adhocRouting $val(rp) \
                 -llType $val(ll) \
                 -macType $val(mac) \
                 -ifqType $val(ifq) \
                 -ifqLen $val(ifqlen) \
                 -antType $val(an) \
                 -propType $val(prop) \
                 -phyType $val(netif) \
                 -channelType $val(chan) \
                 -topoInstance $topo \
                 -agentTrace ON \
                 -routerTrace ON \
                 -macTrace OFF \
                 -movementTrace ON \
                         -energyModel $val(energymodel) \
                   -idlePower 0.740 \
                 -rxPower 0.9 \
                -txPower 1.350 \
                -sleepPower 0.001 \
                -transitionPower 0.2 \
                -transitionTime 0.005 \
                -initialEnergy $val(initialenergy)

# The following strings organize a square mesh network:
for {set i 0} {$i < 50 } {incr i} {


           set node_($i) [$ns_ node]
           $node_($i) random-motion 0
```

```
}


$node_(0) set X_ 95.108574205680
$node_(0) set Y_ 89.659473544259
$node_(0) set Z_ 0.000000000000
$node_(1) set X_ 496.253827638178
$node_(1) set Y_ 263.689366599402
$node_(1) set Z_ 0.000000000000
$node_(2) set X_ 885.052073768068
$node_(2) set Y_ 149.380787292310
$node_(2) set Z_ 0.000000000000
$node_(3) set X_ 427.428865317536
$node_(3) set Y_ 474.976732347896
$node_(3) set Z_ 0.000000000000
$node_(4) set X_ 431.568060481492
$node_(4) set Y_ 861.622124262480
$node_(4) set Z_ 0.000000000000
$node_(5) set X_ 795.647467368905
$node_(5) set Y_ 545.258161941007
$node_(5) set Z_ 0.000000000000
$node_(6) set X_ 645.241992829911
$node_(6) set Y_ 167.246948878133
$node_(6) set Z_ 0.000000000000
$node_(7) set X_ 627.057399700382
$node_(7) set Y_ 13.121081453093
$node_(7) set Z_ 0.000000000000
$node_(8) set X_ 850.571440281081
$node_(8) set Y_ 111.977443865339
$node_(8) set Z_ 0.000000000000
$node_(9) set X_ 365.525764652844
$node_(9) set Y_ 694.725854439423
$node_(9) set Z_ 0.000000000000
$node_(10) set X_ 123.015233452238
$node_(10) set Y_ 708.626282027519
$node_(10) set Z_ 0.000000000000
$node_(11) set X_ 350.010601059116
$node_(11) set Y_ 790.429163120982
$node_(11) set Z_ 0.000000000000
$node_(12) set X_ 356.299886738504
$node_(12) set Y_ 964.549820317506
$node_(12) set Z_ 0.000000000000
$node_(13) set X_ 52.568542290073
$node_(13) set Y_ 72.822015068256
$node_(13) set Z_ 0.000000000000
$node_(14) set X_ 385.365564179615
$node_(14) set Y_ 327.313507926001
$node_(14) set Z_ 0.000000000000
$node_(15) set X_ 261.492803085247
$node_(15) set Y_ 889.558507136109
$node_(15) set Z_ 0.000000000000
$node_(16) set X_ 158.593549623028
$node_(16) set Y_ 829.725162960318
$node_(16) set Z_ 0.000000000000
$node_(17) set X_ 50.469685228936
$node_(17) set Y_ 892.730799198152
```

```
$node_(17) set Z_ 0.000000000000
$node_(18) set X_ 351.884206801633
$node_(18) set Y_ 477.432462690853
$node_(18) set Z_ 0.000000000000
$node_(19) set X_ 941.484700615708
$node_(19) set Y_ 710.334612231143
$node_(19) set Z_ 0.000000000000
$node_(20) set X_ 164.018231471021
$node_(20) set Y_ 782.290545459006
$node_(20) set Z_ 0.000000000000
$node_(21) set X_ 925.137630996440
$node_(21) set Y_ 260.747330783737
$node_(21) set Z_ 0.000000000000
$node_(22) set X_ 936.625976073137
$node_(22) set Y_ 186.664885102375
$node_(22) set Z_ 0.000000000000
$node_(23) set X_ 775.867672260030
$node_(23) set Y_ 979.959075765565
$node_(23) set Z_ 0.000000000000
$node_(24) set X_ 723.214105569882
$node_(24) set Y_ 89.332701773663
$node_(24) set Z_ 0.000000000000
$node_(25) set X_ 199.910500455039
$node_(25) set Y_ 257.355128072637
$node_(25) set Z_ 0.000000000000
$node_(26) set X_ 550.840892730026
$node_(26) set Y_ 378.308863073644
$node_(26) set Z_ 0.000000000000
$node_(27) set X_ 912.019237340428
$node_(27) set Y_ 123.135348458810
$node_(27) set Z_ 0.000000000000
$node_(28) set X_ 659.085162703347
$node_(28) set Y_ 417.672247829807
$node_(28) set Z_ 0.000000000000
$node_(29) set X_ 47.690528659064
$node_(29) set Y_ 756.967973301499
$node_(29) set Z_ 0.000000000000
$node_(30) set X_ 226.503500275483
$node_(30) set Y_ 179.182263386881
$node_(30) set Z_ 0.000000000000
$node_(31) set X_ 253.193170918194
$node_(31) set Y_ 632.884543770921
$node_(31) set Z_ 0.000000000000
$node_(32) set X_ 107.851011313733
$node_(32) set Y_ 527.509055268458
$node_(32) set Z_ 0.000000000000
$node_(33) set X_ 223.942673667352
$node_(33) set Y_ 178.791439903113
$node_(33) set Z_ 0.000000000000
$node_(34) set X_ 7.990078456219
$node_(34) set Y_ 299.988137417830
$node_(34) set Z_ 0.000000000000
$node_(35) set X_ 664.361524439230
$node_(35) set Y_ 135.166303281344
$node_(35) set Z_ 0.000000000000
$node_(36) set X_ 243.174163526908
```

```
$node_(36) set Y_ 690.866343374411
$node_(36) set Z_ 0.000000000000
$node_(37) set X_ 611.988958505379
$node_(37) set Y_ 263.064255406467
$node_(37) set Z_ 0.000000000000
$node_(38) set X_ 912.008107336631
$node_(38) set Y_ 690.774107277630
$node_(38) set Z_ 0.000000000000
$node_(39) set X_ 913.818638789066
$node_(39) set Y_ 599.236344369398
$node_(39) set Z_ 0.000000000000
$node_(40) set X_ 475.877824701040
$node_(40) set Y_ 823.462918931685
$node_(40) set Z_ 0.000000000000
$node_(41) set X_ 907.152403073316
$node_(41) set Y_ 29.014585780686
$node_(41) set Z_ 0.000000000000
$node_(42) set X_ 319.875707508565
$node_(42) set Y_ 74.917837181806
$node_(42) set Z_ 0.000000000000
$node_(43) set X_ 446.413774707836
$node_(43) set Y_ 958.706189741122
$node_(43) set Z_ 0.000000000000
$node_(44) set X_ 417.952776871197
$node_(44) set Y_ 583.059260686004
$node_(44) set Z_ 0.000000000000
$node_(45) set X_ 305.940818189571
$node_(45) set Y_ 561.501645434728
$node_(45) set Z_ 0.000000000000
$node_(46) set X_ 217.329758499886
$node_(46) set Y_ 875.387710770742
$node_(46) set Z_ 0.000000000000
$node_(47) set X_ 788.046425654007
$node_(47) set Y_ 129.452099307914
$node_(47) set Z_ 0.000000000000
$node_(48) set X_ 131.620877510203
$node_(48) set Y_ 249.481501498295
$node_(48) set Z_ 0.000000000000
$node_(49) set X_ 785.939797171270
$node_(49) set Y_ 956.323272994543
$node_(49) set Z_ 0.000000000000
$ns_ at 0.000000000000 "$node_(0) setdest 784.211788586353
906.980357983130 7.805797262025"
$ns_ at 0.000000000000 "$node_(1) setdest 305.425738107542
187.482667154724 12.006443544137"
$ns_ at 0.000000000000 "$node_(2) setdest 629.182045317689
427.744535955336 7.167597558317"
$ns_ at 0.000000000000 "$node_(3) setdest 275.358185235994
578.272255668563 6.309916772522"
$ns_ at 0.000000000000 "$node_(4) setdest 166.162255118077
716.059148530546 4.602984581241"
$ns_ at 0.000000000000 "$node_(5) setdest 355.199170271267
355.821435575108 2.137555854537"
$ns_ at 0.000000000000 "$node_(6) setdest 553.593590424272
304.848610052958 2.037243915663"
```

```
$ns_ at 0.000000000000 "$node_(7) setdest 684.566315587096
42.308662273037 8.897706573997"
$ns_ at 0.000000000000 "$node_(8) setdest 940.219145399887
728.134001244761 7.585417802624"
$ns_ at 0.000000000000 "$node_(9) setdest 451.427559344315
819.516245615524 7.176996233597"
$ns_ at 0.000000000000 "$node_(10) setdest 504.652695024330
135.801444586064 2.337070884674"
$ns_ at 0.000000000000 "$node_(11) setdest 151.608603898107
107.181101872974 3.960475215404"
$ns_ at 0.000000000000 "$node_(12) setdest 61.275407146962
286.233088359349 5.658869227871"
$ns_ at 0.000000000000 "$node_(13) setdest 828.419830024085
701.660542037662 3.305335340209"
$ns_ at 0.000000000000 "$node_(14) setdest 217.121338974973
188.844040334122 9.217607654692"
$ns_ at 0.000000000000 "$node_(15) setdest 493.871359556271
105.014282242155 1.141010759475"
$ns_ at 0.000000000000 "$node_(16) setdest 792.114238897283
75.947012006533 7.001519519676"
$ns_ at 0.000000000000 "$node_(17) setdest 379.740288710683
535.850861449023 5.179086814693"
$ns_ at 0.000000000000 "$node_(18) setdest 456.922065010245
187.722264334148 6.139519604859"
$ns_ at 0.000000000000 "$node_(19) setdest 570.472513013120
890.452077196453 2.420969024664"
$ns_ at 0.000000000000 "$node_(20) setdest 630.038378538560
8.130976159881 2.426885161268"
$ns_ at 0.000000000000 "$node_(21) setdest 350.806436261101
778.827334054766 1.091454694751"
$ns_ at 0.000000000000 "$node_(22) setdest 582.106362347986
322.591539262571 13.927721774896"
$ns_ at 0.000000000000 "$node_(23) setdest 352.930973612155
74.583041368349 8.250549732734"
$ns_ at 0.000000000000 "$node_(24) setdest 347.537832401662
156.866267236924 5.189031486474"
$ns_ at 0.000000000000 "$node_(25) setdest 338.733218250915
675.933120444903 2.411702080777"
$ns_ at 0.000000000000 "$node_(26) setdest 334.446189823748
454.807967552929 2.175599330693"
$ns_ at 0.000000000000 "$node_(27) setdest 129.578757088720
692.976932772249 3.208733636517"
$ns_ at 0.000000000000 "$node_(28) setdest 475.281894639748
258.749197428076 5.516713089188"
$ns_ at 0.000000000000 "$node_(29) setdest 735.689992090575
411.018297423563 15.610687266575"
$ns_ at 0.000000000000 "$node_(30) setdest 447.016928573028
946.656716266786 2.592142459975"
$ns_ at 0.000000000000 "$node_(31) setdest 609.776555521769
235.560299129352 4.310155182265"
$ns_ at 0.000000000000 "$node_(32) setdest 28.707256766760
521.785003489647 7.599748725478"
$ns_ at 0.000000000000 "$node_(33) setdest 28.146488325314
39.764102844273 1.344658332339"
$ns_ at 0.000000000000 "$node_(34) setdest 990.430789070577
81.775439905303 15.620118677845"
```

```
$ns_ at 0.000000000000 "$node_(35) setdest 513.315177468946
650.092354561018 4.235940755130"
$ns_ at 0.000000000000 "$node_(36) setdest 68.663926860806
50.649195335580 12.824264882237"
$ns_ at 0.000000000000 "$node_(37) setdest 56.060829353671
179.804167570376 1.023705015176"
$ns_ at 0.000000000000 "$node_(38) setdest 340.655595030720
20.384087748800 12.246893576196"
$ns_ at 0.000000000000 "$node_(39) setdest 978.331093325482
746.664541146305 1.434861472680"
$ns_ at 0.000000000000 "$node_(40) setdest 931.285171468583
400.617072668008 3.312575510474"
$ns_ at 0.000000000000 "$node_(41) setdest 297.084437635160
60.737469846707 15.817025954589"
$ns_ at 0.000000000000 "$node_(42) setdest 652.281296829346
359.031803831136 6.811749856650"
$ns_ at 0.000000000000 "$node_(43) setdest 483.477917398188
160.838163796425 1.700504808618"
$ns_ at 0.000000000000 "$node_(44) setdest 339.176605816170
832.981277783426 11.975649837855"
$ns_ at 0.000000000000 "$node_(45) setdest 279.757457596611
527.380293629854 16.096311381793"
$ns_ at 0.000000000000 "$node_(46) setdest 77.767469029788
782.202700548377 8.923399066335"
$ns_ at 0.000000000000 "$node_(47) setdest 131.640958921360
788.707907323550 9.550016913890"
$ns_ at 0.000000000000 "$node_(48) setdest 816.938568587234
698.024137920938 11.807395594646"
$ns_ at 0.000000000000 "$node_(49) setdest 718.175293267812
821.551762493971 1.242082027335"

############################
############################
#Create a UDP agent and attach it to wl_node$j
set udp [new Agent/UDP]
$udp set packetSize_ 100
$ns_ attach-agent $node_(41) $udp

# Create a CBR traffic source and attach it to udp4
set cbr [new Application/Traffic/CBR]

     $cbr set packetSize_ 100 ;#600x8/0.005=960k
     $cbr set interval_ 0.005
     $cbr set rate_ 0.5Mb
     $cbr attach-agent $udp

# Create the Null agent to sink traffic
set sink0 [new Agent/LossMonitor]
$ns_ attach-agent $node_(12) $sink0

# Attach the 2 agents
$ns_ connect $udp $sink0
$udp set fid_ 2
#Schedule start/stop of traffic
$ns_ at 0.5 "$cbr start"
```

```
##############################################################
###

#for {set i 4} {$i < 9} {incr i} {
#set source_($i) [new Agent/UDP]
#$source_($i) set packetSize_ 100
#$ns_ attach-agent $node_($i) $source_($i)

#set cbr_($i) [new Application/Traffic/CBR]
#$cbr_($i) set packetSize_ 100
#$cbr_($i) set interval_ 0.005
#$cbr_($i) set rate_ 1Mb
#$cbr_($i) attach-agent $source_($i)

#set sink_($i) [new Agent/LossMonitor]
#$ns_ attach-agent $node_(15) $sink_($i)
#$ns_ connect $source_($i) $sink_($i)

#$ns_ at 0.5 "$cbr_($i) start"

#}


#################################################


$ns_ at 0.5 "record"

set holdtime 0
set holdseq 0
set perda 0

proc record {} {
        global sink0 sink1 f0 f1 f2 holdseq holdtime perda
        #Get an instance of the simulator
        set ns_ [Simulator instance]
        #Set the time after which the procedure should be called
again
        set time 0.5
        #How many bytes have been received by the traffic sinks?
        set bw0 [$sink0 set bytes_]
      set bw1 [$sink0 set lastPktTime_]
      set bw2 [$sink0 set npkts_]
      set bw3 [$sink0 set nlost_]

      #Get the current time
        set now [$ns_ now]
        #Calculate the bandwidth (in MBit/s) and write it to the
files
        puts $f0 "$now [expr $bw0/$time*8/1000000]"

      # Record Packet Delay in File
      if { $bw2 > $holdseq } {
          puts $f1 "$now [expr ($bw1 - $holdtime)/($bw2 -
$holdseq)]"
      } else {
```

```
          puts $f1 "$now [expr ($bw2 - $holdseq)]"
      }


       puts $f2 "[expr $bw3/$time]"


      #Reset the bytes_ values on the traffic sinks
         $sink0 set bytes_ 0
         $sink0 set nlost_ 0

      set holdtime $bw1
      set holdseq $bw2
              #Re-schedule the procedure
           $ns_ at [expr $now+$time] "record"
}


# Tell nodes when the simulation ends
for {set i 0} {$i < 50 } {incr i} {
    $ns_ at 100.0 "$node_($i) reset";
}
$ns_ at 100.0 "stop"
$ns_ at 100.01 "puts \"Finishing Simulation...\" ; $ns_ halt"
proc stop {} {
     global ns_ tracefd namtrace f0 f1 f2
    $ns_ flush-trace
    close $tracefd
    close $f0
    close $f1
     close $f2
    close $namtrace
#    exec xgraph speed.tr -geometry 800x400 &
    exit 0
}

puts "Starting Simulation..."
$ns_ run
```

TCL SIMPAT

```
if {$argc != 1} {
     puts ""
     puts "Wrong Number of Arguments! No arguments in this
topology"
     puts "ns wifi_wimax.tcl seed gd_threshold shutdown"
     puts ""
     exit (1)
}

set MeshEdge 175.0
set MeshNumberOfEdge 5
```

```
#
==================================================================
======
# Define options
#
==================================================================
======
set val(chan)           Channel/WirelessChannel    ;# channel
type
set val(prop)           Propagation/TwoRayGround   ;# radio-
propagation model
set val(netif)          Phy/WirelessPhy            ;# network
interface type
set val(mac)          Mac/802_11      ;# MAC type
set val(ifq)          Queue/DropTail/PriQueue    ;# interface
queue type
set val(ll)           LL              ;# link layer type
set val(an)           Antenna/OmniAntenna  ;# antenna model
set val(ifqlen)       5000            ;# max packet in ifq
set val(nn)           [expr
($MeshNumberOfEdge*$MeshNumberOfEdge)]
# number of mobilenodes
#set val(rp)          AODV            ;# routing protocol
set val(rp)           [lindex $argv 0]     ;# routing protocol
set val(x)      1000            ;# routing protocol
set val(y)      1000            ;# routing protocol
set val(nn)           16              ;# routing protocol
set val(energymodel)    EnergyModel     ;#
set val(initialenergy)  40            ;# Initial energy in
Joules
#
==================================================================
======
# Main Program
#
==================================================================
======


#
# Initialize Global Variables
#
#Propogation/Shadowing set pathlossExp_ 2.0

set ns_         [new Simulator]
set tracefd     [open tracefile.tr w]
set f0 [open vazao-aodv.tr w]
set f1 [open delay-aodv.tr w]
set f2 [open perda-aodv.tr w]
$ns_ trace-all $tracefd

# set up topography object
set topo       [new Topography]

$topo load_flatgrid $val(x) $val(y)
```

```
set namtrace [open namout.nam w]           ;# for nam tracing
$ns_ namtrace-all-wireless $namtrace $val(x) $val(y)

#
# Create God
#
create-god $val(nn)

        $ns_ node-config -adhocRouting $val(rp) \
                 -llType $val(ll) \
                 -macType $val(mac) \
                 -ifqType $val(ifq) \
                 -ifqLen $val(ifqlen) \
                 -antType $val(an) \
                 -propType $val(prop) \
                 -phyType $val(netif) \
                 -channelType $val(chan) \
                 -topoInstance $topo \
                 -agentTrace ON \
                 -routerTrace ON \
                 -macTrace OFF \
                 -movementTrace ON \
                         -energyModel $val(energymodel) \
                  -idlePower 0.740 \
                 -rxPower 0.9 \
                -txPower 1.350 \
                -sleepPower 0.001 \
                -transitionPower 0.2 \
                -transitionTime 0.005 \
                -initialEnergy $val(initialenergy)

# The following strings organize a square mesh network:
for {set i 0} {$i < 30 } {incr i} {


           set node_($i) [$ns_ node]
           $node_($i) random-motion 0


}

$node_(0) set X_ 95.108574205680
$node_(0) set Y_ 89.659473544259
$node_(0) set Z_ 0.000000000000
$node_(1) set X_ 496.253827638178
$node_(1) set Y_ 263.689366599402
$node_(1) set Z_ 0.000000000000
$node_(2) set X_ 885.052073768068
$node_(2) set Y_ 149.380787292310
$node_(2) set Z_ 0.000000000000
$node_(3) set X_ 427.428865317536
$node_(3) set Y_ 474.976732347896
$node_(3) set Z_ 0.000000000000
$node_(4) set X_ 431.568060481492
$node_(4) set Y_ 861.622124262480
$node_(4) set Z_ 0.000000000000
```

```
$node_(5) set X_ 795.647467368905
$node_(5) set Y_ 545.258161941007
$node_(5) set Z_ 0.000000000000
$node_(6) set X_ 645.241992829911
$node_(6) set Y_ 167.246948878133
$node_(6) set Z_ 0.000000000000
$node_(7) set X_ 627.057399700382
$node_(7) set Y_ 13.121081453093
$node_(7) set Z_ 0.000000000000
$node_(8) set X_ 850.571440281081
$node_(8) set Y_ 111.977443865339
$node_(8) set Z_ 0.000000000000
$node_(9) set X_ 365.525764652844
$node_(9) set Y_ 694.725854439423
$node_(9) set Z_ 0.000000000000
$node_(10) set X_ 123.015233452238
$node_(10) set Y_ 708.626282027519
$node_(10) set Z_ 0.000000000000
$node_(11) set X_ 350.010601059116
$node_(11) set Y_ 790.429163120982
$node_(11) set Z_ 0.000000000000
$node_(12) set X_ 356.299886738504
$node_(12) set Y_ 964.549820317506
$node_(12) set Z_ 0.000000000000
$node_(13) set X_ 52.568542290073
$node_(13) set Y_ 72.822015068256
$node_(13) set Z_ 0.000000000000
$node_(14) set X_ 385.365564179615
$node_(14) set Y_ 327.313507926001
$node_(14) set Z_ 0.000000000000
$node_(15) set X_ 261.492803085247
$node_(15) set Y_ 889.558507136109
$node_(15) set Z_ 0.000000000000
$node_(16) set X_ 158.593549623028
$node_(16) set Y_ 829.725162960318
$node_(16) set Z_ 0.000000000000
$node_(17) set X_ 50.469685228936
$node_(17) set Y_ 892.730799198152
$node_(17) set Z_ 0.000000000000
$node_(18) set X_ 351.884206801633
$node_(18) set Y_ 477.432462690853
$node_(18) set Z_ 0.000000000000
$node_(19) set X_ 941.484700615708
$node_(19) set Y_ 710.334612231143
$node_(19) set Z_ 0.000000000000
$node_(20) set X_ 164.018231471021
$node_(20) set Y_ 782.290545459006
$node_(20) set Z_ 0.000000000000
$node_(21) set X_ 925.137630996440
$node_(21) set Y_ 260.747330783737
$node_(21) set Z_ 0.000000000000
$node_(22) set X_ 936.625976073137
$node_(22) set Y_ 186.664885102375
$node_(22) set Z_ 0.000000000000
$node_(23) set X_ 775.867672260030
$node_(23) set Y_ 979.959075765565
```

```
$node_(23) set Z_ 0.000000000000
$node_(24) set X_ 723.214105569882
$node_(24) set Y_ 89.332701773663
$node_(24) set Z_ 0.000000000000
$node_(25) set X_ 199.910500455039
$node_(25) set Y_ 257.355128072637
$node_(25) set Z_ 0.000000000000
$node_(26) set X_ 550.840892730026
$node_(26) set Y_ 378.308863073644
$node_(26) set Z_ 0.000000000000
$node_(27) set X_ 912.019237340428
$node_(27) set Y_ 123.135348458810
$node_(27) set Z_ 0.000000000000
$node_(28) set X_ 659.085162703347
$node_(28) set Y_ 417.672247829807
$node_(28) set Z_ 0.000000000000
$node_(29) set X_ 47.690528659064
$node_(29) set Y_ 756.967973301499
$node_(29) set Z_ 0.000000000000

$ns_ at 0.000000000000 "$node_(0) setdest 784.211788586353
906.980357983130 7.805797262025"
$ns_ at 0.000000000000 "$node_(1) setdest 305.425738107542
187.482667154724 12.006443544137"
$ns_ at 0.000000000000 "$node_(2) setdest 629.182045317689
427.744535955336 7.167597558317"
$ns_ at 0.000000000000 "$node_(3) setdest 275.358185235994
578.272255668563 6.309916772522"
$ns_ at 0.000000000000 "$node_(4) setdest 166.162255118077
716.059148530546 4.602984581241"
$ns_ at 0.000000000000 "$node_(5) setdest 355.199170271267
355.821435575108 2.137555854537"
$ns_ at 0.000000000000 "$node_(6) setdest 553.593590424272
304.848610052958 2.037243915663"
$ns_ at 0.000000000000 "$node_(7) setdest 684.566315587096
42.308662273037 8.897706573997"
$ns_ at 0.000000000000 "$node_(8) setdest 940.219145399887
728.134001244761 7.585417802624"
$ns_ at 0.000000000000 "$node_(9) setdest 451.427559344315
819.516245615524 7.176996233597"
$ns_ at 0.000000000000 "$node_(10) setdest 504.652695024330
135.801444586064 2.337070884674"
$ns_ at 0.000000000000 "$node_(11) setdest 151.608603898107
107.181101872974 3.960475215404"
$ns_ at 0.000000000000 "$node_(12) setdest 61.275407146962
286.233088359349 5.658869227871"
$ns_ at 0.000000000000 "$node_(13) setdest 828.419830024085
701.660542037662 3.305335340209"
$ns_ at 0.000000000000 "$node_(14) setdest 217.121338974973
188.844040334122 9.217607654692"
$ns_ at 0.000000000000 "$node_(15) setdest 493.871359556271
105.014282242155 1.141010759475"
$ns_ at 0.000000000000 "$node_(16) setdest 792.114238897283
75.947012006533 7.001519519676"
$ns_ at 0.000000000000 "$node_(17) setdest 379.740288710683
535.850861449023 5.179086814693"
```

```
$ns_ at 0.000000000000 "$node_(18) setdest 456.922065010245
187.722264334148 6.139519604859"
$ns_ at 0.000000000000 "$node_(19) setdest 570.472513013120
890.452077196453 2.420969024664"
$ns_ at 0.000000000000 "$node_(20) setdest 630.038378538560
8.130976159881 2.426885161268"
$ns_ at 0.000000000000 "$node_(21) setdest 350.806436261101
778.827334054766 1.091454694751"
$ns_ at 0.000000000000 "$node_(22) setdest 582.106362347986
322.591539262571 13.927721774896"
$ns_ at 0.000000000000 "$node_(23) setdest 352.930973612155
74.583041368349 8.250549732734"
$ns_ at 0.000000000000 "$node_(24) setdest 347.537832401662
156.866267236924 5.189031486474"
$ns_ at 0.000000000000 "$node_(25) setdest 338.733218250915
675.933120444903 2.411702080777"
$ns_ at 0.000000000000 "$node_(26) setdest 334.446189823748
454.807967552929 2.175599330693"
$ns_ at 0.000000000000 "$node_(27) setdest 129.578757088720
692.976932772249 3.208733636517"
$ns_ at 0.000000000000 "$node_(28) setdest 475.281894639748
258.749197428076 5.516713089188"
$ns_ at 0.000000000000 "$node_(29) setdest 735.689992090575
411.018297423563 15.610687266575"



############################
############################
#Create a UDP agent and attach it to wl_node$j
set udp [new Agent/UDP]
$udp set packetSize_ 100
$ns_ attach-agent $node_(12) $udp

# Create a CBR traffic source and attach it to udp4
set cbr [new Application/Traffic/CBR]

     $cbr set packetSize_ 100 ;#600x8/0.005=960k
     $cbr set interval_ 0.005
     $cbr set rate_ 0.5Mb
     $cbr attach-agent $udp

# Create the Null agent to sink traffic
set sink0 [new Agent/LossMonitor]
$ns_ attach-agent $node_(17) $sink0

# Attach the 2 agents
$ns_ connect $udp $sink0
$udp set fid_ 2
#Schedule start/stop of traffic
$ns_ at 0.5 "$cbr start"
################################################################
###

#for {set i 4} {$i < 9} {incr i} {
#set source_($i) [new Agent/UDP]
```

```
#$source_($i) set packetSize_ 100
#$ns_ attach-agent $node_($i) $source_($i)

#set cbr_($i) [new Application/Traffic/CBR]
#$cbr_($i) set packetSize_ 100
#$cbr_($i) set interval_ 0.005
#$cbr_($i) set rate_ 1Mb
#$cbr_($i) attach-agent $source_($i)

#set sink_($i) [new Agent/LossMonitor]
#$ns_ attach-agent $node_(15) $sink_($i)
#$ns_ connect $source_($i) $sink_($i)

#$ns_ at 0.5 "$cbr_($i) start"

#}


#####################################################


$ns_ at 0.5 "record"

set holdtime 0
set holdseq 0
set perda 0

proc record {} {
        global sink0 sink1 f0 f1 f2 holdseq holdtime perda
        #Get an instance of the simulator
        set ns_ [Simulator instance]
        #Set the time after which the procedure should be called
again
        set time 0.5
        #How many bytes have been received by the traffic sinks?
        set bw0 [$sink0 set bytes_]
      set bw1 [$sink0 set lastPktTime_]
      set bw2 [$sink0 set npkts_]
      set bw3 [$sink0 set nlost_]

      #Get the current time
        set now [$ns_ now]
        #Calculate the bandwidth (in MBit/s) and write it to the
files
        puts $f0 "$now [expr $bw0/$time*8/1000000]"

      # Record Packet Delay in File
      if { $bw2 > $holdseq } {
          puts $f1 "$now [expr ($bw1 - $holdtime)/($bw2 -
$holdseq)]"
      } else {
          puts $f1 "$now [expr ($bw2 - $holdseq)]"
      }


       puts $f2 "[expr $bw3/$time]"
```

```
      #Reset the bytes_ values on the traffic sinks
         $sink0 set bytes_ 0
         $sink0 set nlost_ 0

      set holdtime $bw1
      set holdseq $bw2
              #Re-schedule the procedure
           $ns_ at [expr $now+$time] "record"
}


# Tell nodes when the simulation ends
for {set i 0} {$i < 30 } {incr i} {
    $ns_ at 100.0 "$node_($i) reset";
}
$ns_ at 100.0 "stop"
$ns_ at 100.01 "puts \"Finishing Simulation...\" ; $ns_ halt"
proc stop {} {
     global ns_ tracefd namtrace f0 f1 f2
    $ns_ flush-trace
    close $tracefd
    close $f0
    close $f1
     close $f2
    close $namtrace
#    exec xgraph speed.tr -geometry 800x400 &
    exit 0
}

puts "Starting Simulation..."
$ns_ run
```