

**Mestrado em Engenharia Informática**

Dissertação

Relatório Final

# Avaliação de protocolos de encaminhamento em redes móveis ad-hoc

**Maria Clara Tomás Marto**

mmarto@student.dei.uc.pt

Orientadora:

**Marília Pascoal Curado**

Data: 24 de julho de 2012



**FCTUC** DEPARTAMENTO  
**DE ENGENHARIA INFORMÁTICA**  
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE COIMBRA



# **Avaliação de protocolos de encaminhamento em redes móveis ad-hoc**

Autora: Maria Clara Tomás Marto

Orientadora: Marília Pascoal Curado

24 de julho de 2012



## **Agradecimentos**

À minha orientadora Professora Marília Curado por todo o apoio, disponibilidade e confiança que depositou em mim, assim como pelo otimismo transmitido durante a realização da dissertação.

Ao David Palma toda a disponibilidade e apoio dado durante a realização deste trabalho.

A todos os meus amigos que estiveram sempre presentes e que me deram ânimo ao longo de todo este processo.

À minha família pelo apoio, carinho e compreensão dado ao longo de toda a vida.



## Resumo

As redes ad-hoc são redes de dispositivos móveis que comunicam por meio de ligações sem-fios sem utilizar qualquer infraestrutura. Em áreas onde não existe infraestrutura é possível criar uma rede móvel ad-hoc, de forma a garantir conectividade entre dispositivos móveis. Uma das principais características destas redes é a mobilidade, permitindo que o utilizador se mova em liberdade. No entanto, dada a mobilidade aleatória dos nós, surge o problema de manter a conectividade, o que requer uma adaptação permanente e a reconfiguração das rotas. Vários protocolos de encaminhamento para redes móveis ad-hoc foram desenvolvidos, para lidar com o problema da mobilidade e escalabilidade da rede.

Este trabalho avalia o desempenho de protocolos de encaminhamento em redes móveis ad-hoc. Numa primeira fase é feita a avaliação da escalabilidade dos protocolos OLSR (*Optimized Link State Routing Protocol*) e AODV (*Ad-hoc On-Demand Distance Vector Routing*), considerando cenários de redes estáticas com diferentes níveis de carga. O desempenho do protocolo OLSR é avaliado relativamente à mobilidade e escalabilidade, através da comparação dos resultados obtidos nos simuladores NS-3 e OPNET. Numa segunda fase do trabalho, é efetuado o estudo de modelos de mobilidade em redes móveis ad-hoc, e a avaliação de desempenho dos protocolos de encaminhamento AODV e OLSR em diferentes cenários de rede, avaliando o impacto dos modelos de mobilidade nos mesmos.

## Palavras-Chave

Avaliação de desempenho, MANET, NS-3, protocolos de encaminhamento, redes móveis ad-hoc.





# Tabela de Conteúdos

Agradecimentos.....	i
Resumo.....	iii
Palavras-Chave .....	iii
Lista de Figuras.....	vii
Lista de Tabelas .....	ix
Acrónimos.....	xi
1. Introdução .....	1
1.1. Motivação .....	1
1.2. Objetivos .....	1
1.3. Contribuições.....	2
1.4. Estrutura da Dissertação .....	2
2. Encaminhamento em redes ad-hoc.....	5
2.1. Mobile Ad-Hoc Network (MANET) .....	5
2.2. Protocolos de encaminhamento .....	6
2.2.1. Protocolos Proativos.....	7
2.2.2. Protocolos Reativos .....	9
2.2.3. Protocolos Híbridos.....	10
2.2.4. Protocolos Geográficos.....	12
2.3. Avaliação de MANETs e Protocolos encaminhamento .....	13
2.4. Modelos de Mobilidade.....	17
2.5. Resumo dos modelos de mobilidade .....	21
3. Comparação dos protocolos AODV/OLSR .....	23
3.1. Objetivos .....	23
3.2. Hipótese.....	23
3.3. Metodologia .....	23
3.4. Escalabilidade.....	25
3.5. Mobilidade.....	29
3.6. Sumário .....	33
4. Comparação dos protocolos AODV/OLSR usando vários modelos de mobilidade.....	35
4.1. Objetivos.....	35
4.2. Hipóteses.....	35
4.3. Metodologias .....	35

4.4. Comparação dos protocolos AODV/OLSR .....	38
4.5. Resumo.....	51
4.6. Aplicação de MANET em situações reais.....	53
4.7. Sumário .....	54
5. Plano de Trabalho e Implicações .....	55
6. Conclusões e Trabalhos Futuros .....	57
Referências.....	59
Anexos.....	65
Anexo A – Avaliação em cenários estáticos .....	65
Anexo B – Avaliação em cenários móveis.....	67
Anexo C – Avaliação com vários modelos de mobilidade .....	68
Anexo C – Artigo publicado na Conferência de Redes de Computadores, 2011 .....	75

# Lista de Figuras

Figura 2.1: Protocolo OLSR, com e sem utilização de MPRs. Adaptada de [13] .....	8
Figura 2.2: Classificação dos modelos de mobilidade referidos.....	18
Figura 2.3: Movimento do nó utilizando o modelo de mobilidade Random Waypoint[20] .	18
Figura 2.4: Movimento do nó no modelo de mobilidade Random Walk 2D[20] .....	19
Figura 2.5: Movimento de um nó utilizando o modelo de mobilidade Random Direction[20].....	20
Figura 2.6: Movimento de um nó utilizando o modelo de mobilidade Gauss-Markov[20] ..	21
Figura 2.7: Movimento dos nós no modelo de mobilidade Manhattan Grid.....	21
Figura 3.1: Hierarquia de classes do NS-3 [22].....	24
Figura 3.2: Média das Perdas do tráfego para 2 Fluxos .....	25
Figura 3.3: Média das Perdas do tráfego para 4 Fluxos .....	26
Figura 3.4: Média das Perdas do tráfego para 16 Fluxos .....	27
Figura 3.5: Média do Atraso do tráfego em segundos para 2 Fluxos.....	28
Figura 3.6: Média do Atraso do tráfego em segundos para 4 Fluxos.....	28
Figura 3.7: Média do Atraso do tráfego em segundos para 16 Fluxos .....	29
Figura 3.8: Média das Perdas do tráfego (OPNET) .....	30
Figura 3.9: Média das Perdas do tráfego (NS-3) .....	31
Figura 3.10: Média do Atraso do tráfego em segundos (OPNET) .....	31
Figura 3.11: Média do Atraso do tráfego em segundos (NS-3) .....	32
Figura 4.1: Média das Perdas do tráfego (em %) para 1 Fluxo - AODV .....	39
Figura 4.2: Média das Perdas do tráfego (em %) para 4 Fluxos - AODV .....	40
Figura 4.3: Média das Perdas do tráfego (em %) para 1 Fluxo - OLSR.....	42
Figura 4.4: Média das Perdas do tráfego (em %) para 4 Fluxos - OLSR.....	43
Figura 4.5: Média do Atraso do tráfego em milissegundos para 1 Fluxo - AODV .....	44
Figura 4.6: Média do Atraso do tráfego em milissegundos para 4 Fluxos - AODV .....	45
Figura 4.7: Média do Atraso do tráfego em milissegundos para 1 Fluxo - OLSR.....	47
Figura 4.8: Média do Atraso do tráfego em milissegundos para 4 Fluxos - OLSR .....	48
Figura 4.9: Média do número de mensagens de controlo de tráfego para 1 Fluxo – AODV	49
Figura 4.10: Média do número de mensagens de controlo de tráfego para 4 Fluxos - AODV .....	50
Figura 4.11: Média do número de mensagens de controlo de tráfego para 1 Fluxo - OLSR	50
Figura 4.12: Média do número de mensagens de controlo de tráfego para 4 Fluxos - OLSR	51

Figura 5.1: Plano de trabalho inicial.....	55
Figura 5.2: Plano de trabalho - primeiro ano.....	55
Figura 5.3: Plano de trabalho final .....	56

## Lista de Tabelas

Tabela 2.1: Protocolos, modelos de mobilidade, número de nós, número de fluxos e métricas utilizadas na avaliação de MANET .....	16
Tabela 4.1: Configuração dos parâmetros de entrada específicos dos modelos de mobilidade.....	37
Tabela 4.2: Características dos modelos de mobilidade .....	38
Tabela 4.3: Média das perdas nas diferentes velocidades (em %) para 1 Fluxo - AODV .....	39
Tabela 4.4: Média das perdas nas diferentes velocidades (em %) para 4 Fluxos - AODV....	41
Tabela 4.5: Média das perdas nas diferentes velocidades (em %) para 1 Fluxo - OLSR .....	42
Tabela 4.6: Média das perdas nas diferentes velocidades (em %) para 4 Fluxos - OLSR.....	43
Tabela 4.7: Média do atraso nas diferentes velocidades em milissegundos para 1 Fluxo - AODV .....	45
Tabela 4.8: Média do atraso nas diferentes velocidades em milissegundos para 4 Fluxos - AODV .....	46
Tabela 4.9: Média do atraso nas diferentes velocidades em milissegundos para 1 Fluxo - OLSR .....	47
Tabela 4.10: Média do atraso nas diferentes velocidades em milissegundos para 4 Fluxos - OLSR.....	49
Tabela A.1: Média de Perdas (em %) do tráfego para 2 Fluxos.....	65
Tabela A.2: Média de Perdas (em %) do tráfego para 4 Fluxos.....	65
Tabela A.3: Média de Perdas (em %) do tráfego para 16 Fluxos .....	66
Tabela A.4: Média do Atraso do tráfego em segundos para 2 Fluxos .....	66
Tabela A.5: Média do Atraso do tráfego em segundos para 4 Fluxos .....	66
Tabela A.6: Média do Atraso do tráfego em segundos para 16 Fluxos.....	67
Tabela B.1: Média de Perdas (em %) do tráfego para 16 Fluxos.....	67
Tabela B.2: Média do Atraso do tráfego em segundos para 16 Fluxos .....	68
Tabela C.1: Média de Perdas (em %) do tráfego para 1 Fluxo - RWP .....	68
Tabela C.2: Média do Atraso do tráfego em milissegundos para 1 Fluxo - RWP.....	68
Tabela C.3: Média do número de mensagens de controlo de tráfego para 1 Fluxo - RWP ..	69
Tabela C.4: Média de Perdas (em %) do tráfego para 4 Fluxos - RWP.....	69
Tabela C.5: Média do Atraso do tráfego em milissegundos para 4 Fluxos - RWP.....	69
Tabela C.6: Média do número de mensagens de controlo de tráfego para 4 Fluxos - RWP.	69
Tabela C.7: Média de Perdas (em %) do tráfego para 1 Fluxo - RWP .....	69

Tabela C.8: Média do Atraso do tráfego em milissegundos para 1 Fluxo - RWP.....	70
Tabela C.9: Média do número de mensagens de controlo de tráfego para 1 Fluxo - RWP ..	70
Tabela C.10: Média de Perdas (em %) do tráfego para 4 Fluxos - RWP .....	70
Tabela C.11: Média do Atraso do tráfego em milissegundos para 4 Fluxos - RWP.....	70
Tabela C.12: Média do número de mensagens de controlo de tráfego para 4 Fluxos - RWP	70
Tabela C.13: Média de Perdas (em %) do tráfego para 1 Fluxo - GM .....	71
Tabela C.14: Média do Atraso do tráfego em milissegundos para 1 Fluxo - GM.....	71
Tabela C.15: Média do número de mensagens de controlo de tráfego para 1 Fluxo - GM ..	71
Tabela C.16: Média de Perdas (em %) do tráfego para 4 Fluxos - GM.....	71
Tabela C.17: Média do Atraso do tráfego em milissegundos para 4 Fluxos - GM.....	71
Tabela C.18: Média do número de mensagens de controlo de tráfego para 4 Fluxos - GM.	72
Tabela C.19: Média de Perdas (em %) do tráfego para 1 Fluxo - GM .....	72
Tabela C.20: Média do Atraso do tráfego em milissegundos para 1 Fluxo - GM.....	72
Tabela C.21: Média do número de mensagens de controlo de tráfego para 1 Fluxo - GM ..	72
Tabela C.22: Média de Perdas (em %) do tráfego para 4 Fluxos - GM.....	72
Tabela C.23: Média do Atraso do tráfego em milissegundos para 4 Fluxos - GM.....	73
Tabela C.24: Média do número de mensagens de controlo de tráfego para 4 Fluxos - GM.	73
Tabela C.25: Média de Perdas (em %) do tráfego para 1 Fluxo - MG .....	73
Tabela C.26: Média do Atraso do tráfego em milissegundos para 1 Fluxo - MG.....	73
Tabela C.27: Média do número de mensagens de controlo de tráfego para 1 Fluxo - MG ..	73
Tabela C.28: Média de Perdas (em %) do tráfego para 4 Fluxos - MG.....	74
Tabela C.29: Média do Atraso do tráfego em milissegundos para 4 Fluxos - MG.....	74
Tabela C. 30: Média do número de mensagens de controlo de tráfego para 4 Fluxos - MG	74
Tabela C.31: Média de Perdas (em %) do tráfego para 1 Fluxo - MG .....	74
Tabela C.32: Média do Atraso do tráfego em milissegundos para 1 Fluxo - MG.....	74
Tabela C.33: Média das mensagens de controlo de tráfego para 1 Fluxo - MG .....	75
Tabela C.34: Média de Perdas (em %) do tráfego para 4 Fluxos - MG.....	75
Tabela C.35: Média do Atraso do tráfego em milissegundos para 4 Fluxos - MG.....	75
Tabela C.36: Média das mensagens de controlo de tráfego para 4 Fluxos - MG.....	75

## Acrónimos

<b>AODV</b>	<i>Ad-hoc On-Demand Distance Vector Routing</i>
<b>BRP</b>	<i>Bordercast Resolution Protocol</i>
<b>CBR</b>	<i>Constant Bit Rate</i>
<b>DARPA</b>	<i>Defense Advanced Research Projects Agency</i>
<b>DSDV</b>	<i>Destination-Sequenced Distance-Vector</i>
<b>DSR</b>	<i>Dynamic Source Routing</i>
<b>FSR</b>	<i>Fisheye State Routing</i>
<b>GloMoSim</b>	<i>Global Mobile Information System Simulator</i>
<b>GPS</b>	<i>Global Positioning System</i>
<b>GSR</b>	<i>Global State Routing</i>
<b>IAMANET</b>	<i>Intrinsically Assurable Mobile Ad-Hoc NetWork</i>
<b>IARP</b>	<i>Intrazone Routing Protocol</i>
<b>IEEE</b>	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
<b>IERP</b>	<i>Interzone Routing Protocol</i>
<b>LACMQR</b>	<i>Location-Aware Cluster Multicast QoS Routing</i>
<b>LAR</b>	<i>Location-Aided Routing</i>
<b>MAC</b>	<i>Medium Access Control</i>
<b>MANET</b>	<i>Mobile ad-hoc network</i>
<b>MPR</b>	<i>Multipoint Relay</i>
<b>NS-2</b>	<i>Network Simulator 2</i>
<b>NS-3</b>	<i>Network Simulator 3</i>
<b>NTDR</b>	<i>Near Term Digital Radio</i>
<b>OLSR</b>	<i>Optimized Link State Routing</i>
<b>OPNET</b>	<i>Optimized Network Engineering Tool</i>
<b>RERR</b>	<i>Route Error</i>
<b>RREQ</b>	<i>Route Request</i>
<b>RREP</b>	<i>Route Reply</i>
<b>SBR</b>	<i>Statistic-Based Routing</i>
<b>TTL</b>	<i>Time-To-Live</i>
<b>UDP</b>	<i>User Datagram Protocol</i>

<b>VBR</b>	<i>Variable Bit Rate</i>
<b>TC</b>	Controlo de topologia
<b>ZRP</b>	<i>Zone Routing Protocol</i>



# 1. Introdução

---

Neste capítulo é apresentada a motivação para o trabalho realizado, os seus objetivos, contribuições e estrutura da dissertação.

## 1.1. Motivação

As tecnologias de comunicações sem fios têm tido, nos últimos anos, um desenvolvimento muito rápido, permitindo a sua aplicação nas mais diversas áreas. No entanto, nem sempre estão disponíveis serviços de comunicação de infraestrutura. Surgiram assim, no domínio das redes móveis, as redes móveis não estruturadas (MANET) que podem ser utilizadas nas mais diversas aplicações, desde redes militares a redes de emergência.

Nas redes móveis ad-hoc os nós podem mover-se de forma aleatória. Assim, a topologia está constantemente a mudar, não permitindo aplicar as técnicas de encaminhamento utilizadas nas redes fixas [4]. A conectividade entre os nós móveis muda constantemente, o que requer uma adaptação permanente e a reconfiguração das rotas.

A simulação é uma técnica fundamental na avaliação de desempenho de redes de computadores, pois permite o estudo e a avaliação de sistemas a custos reduzidos e em larga escala.

A utilização de simuladores tem vindo a aumentar de forma significativa, existindo diversas ferramentas de simulação disponíveis, umas mais utilizadas a nível académico e outras mais a nível comercial. As principais características que separam estas ferramentas de simulação são: velocidade, precisão, facilidade e custo de utilização [31].

## 1.2. Objetivos

Pretende-se neste trabalho avaliar protocolos de encaminhamento em redes móveis ad-hoc. Devido à mobilidade dos nós, as redes ad-hoc apresentam uma topologia dinâmica, influenciando fortemente as características da rede, tornando, assim, importante o estudo dos protocolos de encaminhamento em redes móveis ad-hoc, uma vez que é através destes que a conectividade da rede é mantida. Os protocolos de encaminhamento devem conseguir estabelecer um caminho ótimo (caminho com um número mínimo de etapas) entre o nó origem e o nó destino, permitindo que o pacote seja entregue em tempo útil. Assim, inicialmente irá estudar-se a escalabilidade de um protocolo de encaminhamento proativo (*Optimized Link State Routing Protocol* - OLSR) [2] e reativo (*Ad-hoc On-Demand Distance Vector Routing* - AODV) [1] em redes estáticas, com diferentes níveis de carga.

A avaliação de desempenho do protocolo OLSR, relativamente à mobilidade e escalabilidade, será também realizada através da comparação dos resultados obtidos nos simuladores NS-3 [22] e OPNET [26]. Numa segunda fase, realiza-se a especificação do estudo de simulação para avaliação do desempenho de protocolos de encaminhamento proativos e reativos com diferentes modelos de mobilidade e padrões de tráfego e respetivo estudo de simulação. Na realização das simulações decidiu-se utilizar o simulador NS-3, por ser um simulador de eventos discretos, ser uma ferramenta Open Source distribuído sob a licença de GNU GPLv2. É escrito em linguagem C++, com interface em Python opcional, e tem como objetivo servir de plataforma para a investigação e educação. Os principais conceitos por trás do NS-3 são a modularidade, reutilização e extensibilidade [22]. Este simulador pretende ser uma alternativa ao NS-2 [34].

### 1.3. Contribuições

Este trabalho é relevante porque permite uma nova avaliação dos protocolos de encaminhamento em redes móveis ad-hoc, utilizando o simulador de eventos discretos NS-3, que se encontra em desenvolvimento. Destacam-se as seguintes contribuições:

- Análise de protocolos de encaminhamento em redes móveis ad-hoc.
- Construção de modelos de simulação com e sem mobilidade.
- Realização de estudos de simulação.
- Validação dos protocolos AODV e OLSR no simulador NS-3.
- Avaliação do impacto dos modelos de mobilidade *Random Waypoint*, *Gauss-Markov* e *Manhattan Grid* no desempenho dos protocolos AODV e OLSR no simulador NS-3.
- Comparação de resultados obtidos nos simuladores NS-3 e OPNET.
- Publicação de um artigo na Conferência de Redes de Computadores, 2011.

Os resultados apresentados poderão auxiliar pesquisadores no desenvolvimento dos protocolos de encaminhamento, modelos de simulação e estudo de modelos de mobilidade, assim como, permitir melhorar o simulador utilizado.

Não tendo sido encontrado nenhum trabalho que compare, em simultâneo, o impacto dos modelos de mobilidade *Random Waypoint*, *Gauss-Markov* e *Manhattan Grid* no desempenho dos protocolos de encaminhamento utilizados, a realização deste trabalho vem colmatar essa lacuna.

### 1.4. Estrutura da Dissertação

O trabalho está estruturado em vários capítulos que abrangem conteúdos da seguinte forma: o capítulo seguinte apresenta a descrição dos protocolos de

encaminhamento para redes ad-hoc existentes na literatura. No capítulo três é feita a descrição dos cenários de simulação e os resultados obtidos nas simulações são analisados, assim como, a descrição de alguns modelos de mobilidade individual. No capítulo quatro são descritos os cenários de simulação utilizando vários modelos de mobilidade e apresentados e analisados os resultados obtidos. O capítulo cinco descreve o plano de trabalhos e suas implicações, e por fim, no capítulo seis, são apresentadas considerações finais sobre o trabalho, assim como sugestões de trabalhos futuros.



## 2. Encaminhamento em redes ad-hoc

---

Nesta secção descreve-se as redes ad-hoc sem fios e os protocolos de encaminhamento. Dentro dos protocolos de encaminhamento são analisados alguns protocolos proativos, reativos, híbridos e geográficos existentes. A análise de protocolos incide sobre os mais utilizados na literatura consultada para cada um dos grupos. É também efetuada a avaliação de protocolos de encaminhamento em MANET, relativamente à literatura consultada, e são apresentados alguns modelos de mobilidade.

### 2.1. Mobile Ad-Hoc Network (MANET)

As redes ad-hoc sem fios (MANET) são constituídas por um conjunto de nós móveis. Estas redes devem ter a capacidade de se auto-organizarem e auto-configurarem, devido à sua estrutura estar em constante mudança. Dado que os nós móveis têm um alcance limitado, quando pretendem enviar uma mensagem para um nó destino, devem utilizar outros nós como encaminhadores.

Os nós móveis devem encontrar-se em modo ad-hoc para receber mensagens de toda a rede e podem enviar mensagens por difusão para a rede. Numa rede ad-hoc todos os nós existentes são encaminhadores, devendo participar na descoberta de rotas e na manutenção de rotas para outros nós [6].

Uma das principais características das MANET é a mobilidade, dando a possibilidade ao utilizador de se mover com liberdade. Esta mobilidade, assim como o modo de comunicação sem fios geram novas características que são específicas destas redes, como a desconexão frequente, o fluxo de comunicação e fontes de energia limitada. O grande desafio deste tipo de redes é oferecer os mesmos serviços em termos de rapidez, fiabilidade e performance do que as redes com infraestrutura [7].

Estas redes não precisam do apoio de nenhuma infraestrutura para o envio de pacotes de dados entre dois nós. Os nós são livres para se moverem de forma independente uns dos outros e a topologia da rede muda de forma dinâmica, tornando o encaminhamento difícil. Os protocolos de encaminhamento devem ser dinâmicos para que possam responder de forma rápida às mudanças topológicas [9].

Em áreas onde não existe infraestrutura é possível criar uma rede ad-hoc sem fios, porque, nestas redes, os nós móveis funcionam como anfitriões e como encaminhadores. Cada nó móvel participa num protocolo de encaminhamento ad-hoc, o qual permite descobrir caminhos de etapas múltiplas através da rede para outros nós. Para resolver o problema das etapas múltiplas (*multi-hop*) nas redes ad-hoc têm sido apresentados diferentes protocolos, baseados em diferentes pressupostos e instituições.

## 2.2. Protocolos de encaminhamento

Os protocolos de encaminhamento de uma rede ad-hoc sem fios têm como principal desafio lidar com a mobilidade dos nós. Devem também conseguir lidar com um elevado número de nós com recursos limitados, como energia e a largura de banda. É essencial para estes protocolos reduzir a carga de mensagens de encaminhamento apesar do número de nós e da sua mobilidade, assim como manter a tabela de encaminhamento pequena, porque o aumento desta tabela vai afectar o controlo dos pacotes enviados na rede. Os protocolos de encaminhamento têm de conseguir dar resposta rápida às mudanças de topologia da rede [6].

Dependendo do modo como adquirem a rota para um destino, os protocolos de encaminhamento podem ser divididos em várias classes: proativos, reativos, híbridos e geográficos. Se as rotas para todos os destinos se encontram sempre disponíveis em cada nó, diz-se que o protocolo é proativo. Se por outro lado, as rotas só são adquiridas quando um nó precisa enviar um pacote para um destino, diz-se que o protocolo é reativo. Diz-se um protocolo híbrido, se combinar as características dos protocolos reativos e proativos para utilizar vantagens de ambos. Os protocolos geográficos são baseados na localização.

Os protocolos proativos possuem tabelas de encaminhamento com informação válida de rotas. Para que as tabelas tenham informações actualizadas, os nós da rede comunicam entre eles com frequência, dando origem à existência de elevado *overhead* na rede. Por outro lado, as rotas encontram-se sempre disponíveis quando necessário. Nestes protocolos, o nó transmite a lista dos seus vizinhos [4][6][11].

Os protocolos reativos estabelecem uma rota para um destino apenas quando esta é necessária e utilizam o algoritmo *Distance vector* (um nó envia para os seus vizinhos uma tabela com indicação dos nós aos quais pode chegar e qual a distância que o nó pode alcançar) para encontrar o caminho mais curto para o destino. Nestes protocolos as informações de encaminhamento são recolhidas apenas quando são necessárias e a determinação da rota depende do envio de consultas para toda a rede. A principal vantagem deste tipo de encaminhamento, é o facto de a rede não estar sujeita a *overhead* de encaminhamento de dados para rotas que poderão nunca ser utilizadas. No entanto, devido a não existir uma manutenção constante das tabelas de encaminhamento, pode-se verificar um atraso considerável na descoberta de rota. Estes protocolos são adequados para tráfego em tempo real ou cenários com elevado tráfego com um grande número de nós. Um nó para enviar dados exige, como informação mínima, saber a próxima etapa na rota. Quando essa informação não se encontra disponível no nó, é enviada uma mensagem de *flooding* a solicitar a rota desejada. Todos os nós que recebem essa mensagem e têm informação de encaminhamento respondem à mensagem. O nó origem irá depois seleccionar a rota entre as mensagens recebidas. Se a rota não for conhecida, é necessário determiná-la, podendo ocorrer um atraso na configuração [4][6][7].

Os protocolos proativos e reativos são os mais conhecidos, no entanto, existem mais dois grupos de protocolos de encaminhamento para MANET, os protocolos híbridos e os protocolos geográficos.

Os protocolos híbridos combinam as características dos protocolos reativos e proativos para utilizar vantagens de ambos. Parte destes protocolos funciona como reativo e outra parte como proativo.

Os protocolos geográficos utilizam informações de localização dos nós móveis. As informações de localização podem ser obtidas utilizando o sistema de posicionamento global (GPS).

### 2.2.1. Protocolos Proativos

Nos protocolos proativos as rotas para os destinos são determinadas no início da execução do protocolo e mantidas com atualizações periódicas. Assim, quando houver necessidade do envio de um pacote de dados, a rota já deverá estar disponível. Cada nó mantém informações de encaminhamento sobre todos os nós da rede. As informações de encaminhamento são armazenadas em tabelas que são atualizadas periodicamente e quando ocorrem mudanças na topologia da rede. Os protocolos OLSR [2] e DSDV (*Destination-Sequenced Distance-Vector*) [18] são exemplos de protocolos proativos.

#### Protocolo OLSR (*Optimized Link State Routing Protocol*)

O protocolo OLSR sendo proativo, disponibiliza as rotas quando estas são necessárias. Todos os nós da rede mantêm uma tabela com informação da topologia da rede. Cada registo da tabela é constituído por (T\_dest\_addr, T\_last\_addr, T\_seq, T\_time), onde T\_dest\_addr armazena o endereço principal de um nó que pode ser alcançado com uma etapa através do nó representado pelo seu endereço principal T\_last\_addr. T\_last\_addr é geralmente um MPR (*Multipoint Relay*) de T\_dest\_addr. T\_seq é um número sequencial e T\_time especifica o tempo de validade do registo, ao expirar o registo deve ser removido da tabela. Para que as tabelas tenham informação atualizada é necessário que os nós comuniquem entre eles com frequência, o que dá origem à existência de elevado *overhead* na rede [2][4].

Quando se verificam alterações na topologia da rede existe um aumento do fluxo de mensagens, para informar os nós disponíveis das alterações ocorridas na rede. Para reduzir o *overhead* o protocolo OLSR utiliza a técnica chamada de MPR. A utilização desta técnica tem como objetivo reduzir o número de nós a difundir informações através da rede. Para manter o protocolo mais eficiente o conjunto de MPRs é mantido pequeno.

São utilizados dois tipos de mensagens de controlo pelo protocolo: mensagens HELLO e mensagens de controlo de topologia (TC). O protocolo utiliza as mensagens HELLO para saber informações dos seus vizinhos e do estado das ligações. São também utilizadas para seleccionar os nós que vão constituir o MPR. As mensagens HELLO são transmitidas apenas a uma etapa de distância e as mensagens TC são transmitidas por *broadcast*. Apenas os nós que funcionam como MPR podem transmitir mensagens TC, as quais são transmitidas periodicamente para toda a rede [6].

Para determinar o conjunto de MPRs são utilizadas informações sobre simetria a uma e duas etapas dos vizinhos. Cada nó seleciona um conjunto de nós vizinhos como MPR, entre os vizinhos a uma etapa com ligação simétrica, cobrindo todos os vizinhos a duas etapas e registra na tabela de seletores MPR. Se existir alterações na topologia dos vizinhos a uma ou duas etapas o MPR é recalculado [9].

Existem vários algoritmos propostos na literatura para determinar o conjunto de MPRs do protocolo OLSR. O algoritmo proposto em [8] para determinar o conjunto de MPR encontra-se descrito a seguir:

- Selecionar como nó MPR, o nó que contém maior número de ligações no conjunto de vizinhos a duas etapas;
- Remover o nó MPR do conjunto de vizinhos e dos nós vizinhos deste MPR que pertençam ao conjunto de vizinhos que se encontrem a duas etapas;
- Repetir os passos anteriores, até que o conjunto de vizinhos a duas etapas esteja vazio.

A Figura 2.1 mostra, na primeira imagem como é efetuado o *broadcast* usando *flooding*, sem aplicação de MPR, e na segunda imagem, com a aplicação de MPR.

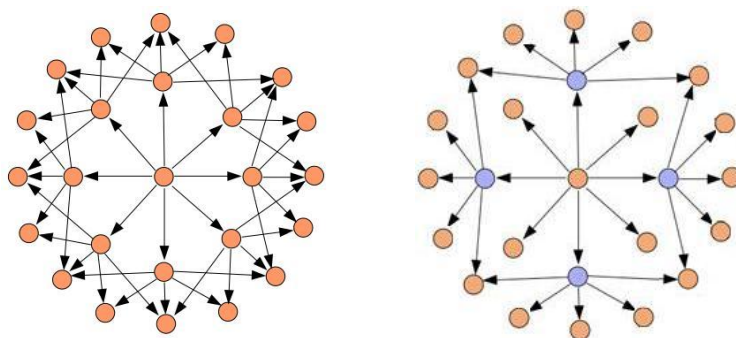


Figura 2.1: Protocolo OLSR, com e sem utilização de MPRs. Adaptada de [13]

Cada nó MPR determina o caminho ideal (relativamente ao número de etapas) para qualquer destino através de informações disponíveis de topologia e armazena essa informação na tabela de encaminhamento.

Os nós que não fazem parte do conjunto de MPRs podem ler e processar informação mas não podem retransmitir [4].

## Protocolo DSDV (Destination-Sequenced Distance-Vector)

O protocolo DSDV é baseado no algoritmo *Distance vector*. Cada nó possui uma tabela de encaminhamento com informação sobre todos os nós. Para evitar a formação de ciclos, cada entrada na tabela de encaminhamento é identificado com um número de sequência, atribuído pelo destino. Devido à topologia da rede estar em constante mudança e para manter consistente a tabela de encaminhamento dos dados, as atualizações das tabelas são transmitidas por *broadcast* periodicamente aos vizinhos ou quando novas informações estão disponíveis [9].



Quando os nós detetam alterações na topologia de rede, cada nó envia informações de encaminhamento por *broadcasting* ou *multicasting* para atualizar a tabela de encaminhamento. O pacote de atualização que começa com uma métrica de um, é enviado aos vizinhos que se encontram a uma etapa. Quando recebem o pacote, os nós atualizam a sua tabela de encaminhamento incrementando a métrica de um e enviam o pacote aos nós vizinhos. O processo é repetido até que todos os nós da rede ad-hoc tenham recebido uma cópia atualizada do pacote com a métrica correspondente.

Quando um nó recebe uma atualização de outro nó, o número de sequência deve ser igual ou superior ao número de sequência desse nó na tabela de encaminhamento, ou então o pacote contém informações inválidas e deve ser eliminado. Se o número de sequência é igual então as métricas serão comparadas e será utilizada a rota com a métrica de menor valor [18].

### 2.2.2. Protocolos Reativos

Os protocolos reativos determinam as rotas quando estas são solicitadas pelo nó emissor, através de um processo de descoberta. Os nós da rede só precisam de uma rota para o destino, quando precisam de enviar dados para o destino. Como exemplo de protocolos reativos temos o AODV [1] e DSR (*Dynamic Source Routing*) [9].

#### Protocolo AODV (*Ad-Hoc On-Demand Distance Vector*)

O protocolo de encaminhamento AODV é um protocolo reativo. Os principais objetivos deste protocolo são: a utilização de mensagens *broadcast* para descoberta de rotas apenas quando necessário, distinção entre gestão de conectividade local e manutenção geral da topologia e divulgação das alterações da conectividade local aos nós vizinhos apenas quando estes precisam dessa informação [4].

O protocolo AODV utiliza vários tipos de mensagens: *Route Request* (RREQ), *Route Reply* (RREP), *Route Error* (RERR) e mensagens HELLO, para manter a conectividade entre os nós da rede. Neste protocolo a descoberta de rotas realiza-se através do envio de mensagens RREQ e de mensagens RREP, sempre que um nó deseja enviar um pacote para um destino. Para manter as rotas ativas entre os nós, são enviadas periodicamente mensagens HELLO, entre os vizinhos. Se um nó não recebe uma mensagem de resposta durante um determinado período de tempo, de um vizinho, a ligação entre eles não é estabelecida.

O AODV reage de forma relativamente rápida às mudanças de topologia de rede e atualiza apenas os nós que foram afectados por essas mudanças, através de mensagens RERR.

O número de mensagens RREQ que um nó pode enviar por segundo é limitado. Cada RREQ possui um TTL (*time to live*), valor que indica o número de vezes que uma

mensagem pode ser retransmitida. As retransmissões ocorrem se não forem recebidas mensagens de resposta.

O protocolo AODV tem como principal característica a utilização do número de sequência para cada entrada de rota na tabela de encaminhamento. O número de sequência funciona como uma espécie de carimbo, impedindo o protocolo de entrar em ciclo e evitar o problema da contagem para o infinito. Esta característica permite manter a consistência nas informações de encaminhamento e a utilização de rotas mais recentes. Os números de sequência não são alterados pelo envio de mensagens HELLO.

Nas redes onde os nós não se deslocam existem ruturas de ligações. Quando um nó não recebe uma mensagem HELLO, dos seus vizinhos, durante um período de tempo específico, a entrada do vizinho para a tabela de encaminhamento será definida como inválida e serão geradas mensagens RERR, para informar os outros nós da existência de rutura de ligação [3][7][10].

## **Protocolo DSR (*Dynamic Source Routing*)**

O DSR é um protocolo simples e eficiente. Foi desenvolvido para ser utilizado em camadas múltiplas das redes ad-hoc. O protocolo é composto por dois mecanismos principais *Route Discovery* e *Route Maintenance*, que trabalham em conjunto permitindo que os nós descubram e mantenham as rotas para os destinos arbitrários da rede.

O protocolo não utiliza mensagens periódicas de encaminhamento, reduzindo *overhead* de largura de banda e evita que se realizem muitas atualizações de encaminhamento.

A principal característica do DSR é a utilização de encaminhamento na fonte, permitindo que o nó de origem do pacote conheça toda a rota para o destino. As rotas são armazenadas em *cache*. Os pacotes de dados carregam a rota da fonte no cabeçalho do pacote.

Quando um nó tenta enviar pacotes de dados para um destino e não sabe a rota, utiliza o mecanismo *Route Discovery* para determinar a rota dinamicamente. Se existe uma rutura de ligação numa rota, o nó origem é notificado através de uma mensagem *Route Error* (RERR). O nó origem remove todas as rotas que utilizam essa ligação da sua *cache*, sendo iniciado um novo processo de descoberta de rota pela origem [9][19].

### **2.2.3. Protocolos Híbridos**

Os protocolos híbridos combinam as características dos protocolos reativos e proativos para utilizar vantagens de ambos. O seu principal objetivo é aumentar a escalabilidade, fazendo com que os nós que estejam próximos trabalhem em conjunto. Os protocolos ZRP (*Zone Routing Protocol*) [14] e FSR (*Fishbeye State Routing*) [4] são exemplos de protocolos híbridos.

## Protocolo ZRP (Zone Routing Protocol)

O protocolo ZRP baseia-se no conceito de zonas, ou seja, para cada nó da rede é definida uma zona de encaminhamento, sobrepondo-se as zonas dos nós vizinhos. A utilização de zonas torna o encaminhamento mais fácil, permitindo diminuir a quantidade de informação de encaminhamento que nunca é utilizada.

No protocolo distinguem-se duas zonas de encaminhamento. A zona de encaminhamento local proativa, denominada protocolo de encaminhamento proativo intrazona (IARP), mantém informações de encaminhamento para os nós que fazem parte da zona de um nó. A zona de encaminhamento global reativa, designada por protocolo de encaminhamento interzona (IERP), oferece a melhor rota e os serviços de manutenção de rotas com base na conectividade local monitorizada pelo IARP.

Para o encaminhamento de pacotes, o ZRP verifica se o destino do mesmo se encontra dentro da sua zona local, utilizando as informações fornecidas pelo IARP, podendo o pacote ser encaminhado proativamente. Se o destino do pacote se encontra fora da sua zona, é utilizado o encaminhamento reativo.

O ZRP utiliza o serviço de distribuição de mensagens chamado *bordercasting*. Este conceito utiliza informações de topologia fornecidas pelo IARP, para efetuar consultas diretas para a fronteira da zona. O serviço de entrega de pacotes *bordercast* é fornecido pelo protocolo *Bordercast Resolution* (BRP).

O encaminhamento reativo processa-se em duas fases: *route request* e *route reply*. Na fase *route request*, a fonte envia um pacote *route request* para os seus nós periféricos utilizando o BRP. Se um nó que recebe um pacote sabe o destino, responde enviando um pacote *route reply* para a fonte. Caso contrário, continua o processo utilizando o conceito *bordercasting*. Assim, o pacote *route request* fica a ser conhecido por toda a rede. Se um nó recebe várias cópias do pedido da mesma rota, estas são consideradas redundantes e são excluídas. Um pacote *route reply* é enviado para a fonte por qualquer nó da rede que possa fornecer uma rota para o destino.

Uma propriedade importante para o protocolo é o raio da zona. Dependendo da dimensão do raio, é utilizado o encaminhamento reativo (quando a dimensão do raio é menor) ou o encaminhamento proativo (quando a dimensão do raio se aproxima do infinito) [14][15].

## Protocolo FSR (Fisheye State Routing)

O protocolo de encaminhamento FSR [4] é um melhoramento do protocolo *Global State Routing* (GSR) [33]. O protocolo utiliza a técnica *fisheye*. Esta técnica permite ao FSR manter a distância exata e informações válidas com detalhe sobre a rota para os vizinhos de um nó, à medida que a distância aumenta os detalhes das informações vão diminuindo. Com o aumento da mobilidade das redes, as rotas para destinos mais longos são menos

precisas. No entanto, quando a mensagem se aproxima do destino encontra informações de encaminhamento cada vez mais precisas.

Através da técnica *fisheye*, o protocolo reduz o tamanho da mensagem de atualização que não contém informações sobre todos os nós da rede, mas apenas informações dos vizinhos, que são identificados pelo número de etapas, não afetando o encaminhamento da mensagem.

O FSR é adequado para redes grandes com elevada mobilidade pois a informação de controlo fica restrita ao número de etapas entre os nós [4].

## 2.2.4. Protocolos Geográficos

Os protocolos geográficos utilizam a informação da posição dos nós para definir as rotas. Como exemplo de protocolos híbridos temos o LAR (*Location-Aided Routing*) [17] e LACMQR (*Location-Aware Cluster Multicast QoS Routing*) [16].

### Protocolo LAR (*Location-Aided Routing*)

O protocolo LAR utiliza informações de localização, que podem ser fornecidas pelo sistema de posicionamento global, para reduzir o espaço de procura para a rota desejada. Ao limitar o espaço de procura vão existir menos mensagens de descoberta de rotas.

A descoberta de rotas, utilizando *flooding*, é semelhante ao que se verifica nos protocolos DSR e AODV. Quando o nó fonte deseja determinar a rota para o nó destino, o nó fonte envia uma mensagem *route request* por *broadcast* para todos os seus vizinhos. Quando um nó recebe uma mensagem confirma o *route request*. Se a mensagem não se destinar a esse nó, a mensagem é enviada por *broadcast* para os seus vizinhos, apenas uma vez, para evitar transmissões redundantes. Quando o nó destino recebe a mensagem, deve enviar uma mensagem *route reply* para o nó fonte. Esta mensagem deve seguir o caminho inverso ao obtido através da mensagem *route request*.

Um nó pode não receber a mensagem de solicitação *route request*, devido, por exemplo, a erros de transmissão. Neste caso, o nó fonte precisa de reiniciar a descoberta de rota. Quando a descoberta de rota é iniciada, o nó fonte define um tempo limite para essa descoberta. Se durante esse tempo o nó não receber nenhuma mensagem *route reply*, é iniciada uma nova descoberta de rota. Quando um nó da rede deteta uma rutura de ligação é enviada uma mensagem *route error*, dando início à descoberta de rota o nó que recebe essa mensagem [17].

## Protocolo LACMQR (*Location-Aware Cluster Multicast QoS Routing*)

Toda a rede durante a utilização do protocolo LACMQR é dividida em regiões quadradas, chamadas zonas ou *clusters*. As informações sobre o posicionamento dos nós na rede são fornecidas pelo sistema de posicionamento global (GPS).

Os *clusters* são formados por um *cluster head*, que corresponde ao nó mais próximo do centro do *cluster* e nós *gateway* responsáveis por transmitir pacotes quando os *clusters head* não podem efetuar a transmissão.

Quando o nó fonte precisa de transmitir pacotes e a rota não está disponível, é iniciada a descoberta de rota para determinar um caminho. Se o destino do pacote estiver dentro do mesmo *cluster*, o *cluster head* envia o pacote diretamente. Caso contrário, o pacote é encaminhado para os nós *gateway*. Após a recepção do pacote, os nós *gateways* enviam-no para os vizinhos *clusters heads*. O processo é repetido até que o nó destino ou um nó intermediário com um caminho válido seja alcançado.

Quando um nó encontra uma rutura de ligação durante a transmissão dos dados, deve enviar imediatamente para a fonte um pacote RERR. Após a recepção deste pacote a fonte apaga a sua entrada na tabela de encaminhamento e inicia uma descoberta de rota para construir um novo caminho [16].

### 2.3. Avaliação de MANETs e Protocolos encaminhamento

Na literatura existente tem sido avaliado o desempenho de protocolos de encaminhamento em MANET. Os protocolos AODV e OLSR têm recebido particular atenção por serem considerados protocolos de referência para MANET e apresentarem problemas de escalabilidade. Na avaliação dos protocolos têm sido utilizados diversos simuladores como o NS-2, OPNET, QualNet entre outros. As métricas utilizadas na avaliação de desempenho dos protocolos são variadas, sendo as mais utilizadas a perda de pacotes, o atraso e o *overhead*.

Em [4] foi considerada uma rede de 60 nós (uma fonte e um destino) distribuídos aleatoriamente numa área de 1,5x1,5km. É utilizado o modelo de mobilidade *Random Waypoint* e a fonte de tráfego implementada utiliza uma *Constant Bit Rate*, enviando 1 pacote/segundo. As simulações realizadas correram apenas 180 segundos e a taxa de dados utilizada é de 2Mbit/s, valor que não é frequente nos dispositivos existentes. Um aspeto importante deste trabalho é permitir ver como o aumento do tempo de pausa e do número de nós influência o desempenho dos protocolos avaliados, no entanto, é limitado pela utilização de apenas uma fonte de tráfego.

Em [5] são construídos dois cenários (A e B) numa área de simulação de 0,8x0,5km. Nos cenários é utilizada uma rede de 50 nós e o modelo *Random Waypoint* com velocidade a variar entre 1-15m/s. No cenário A cada nó seleciona um destino de modo uniforme no início da simulação, enquanto, no cenário B um único nó é selecionado aleatoriamente por todos os outros nós como destino no início da simulação. Um aspeto importante deste

trabalho é permitir comparar o desempenho dos protocolos em cenários com fluxos diferentes, no entanto, fica limitado por utilizar apenas uma rede, serem realizadas apenas 20 simulações em cada cenário e não ser definido tempo de pausa para o modelo *Random Waypoint*, verificando-se um comportamento inadequado deste modelo nos dois cenários.

Os resultados apresentados em [10] tem por base uma área de simulação de 0,8x0,5km onde os nós da rede são colocados inicialmente ao centro, o que não é característico nas redes MANET. É utilizado o modelo *Random Waypoint* com uma velocidade máxima de 20m/s, são definidos vários tempos de pausa (100s, 200s, ..., 500s) e o número de fontes de tráfego é fixo (20 fontes), gerado por CBR. A relevância deste trabalho prende-se com o facto de permitir comparar o desempenho de protocolos, variando o tempo de pausa e o número de nós, a sua limitação prende-se com o facto de avaliar apenas redes de baixa densidade (5 a 25 nós).

Em [41] são construídos vários cenários de redes. Cada cenário é formado por 50 e 100 nós, os nós movem-se à velocidade máxima de 5m/s e 50m/s e são definidos para fontes de tráfego 20% desses nós. É utilizada uma área de simulação de 1x1km, tráfego CBR enviando 4 pacotes/segundo e uma taxa de dados de 2Mbit/s. O tempo da simulação é de 1500 segundos. Neste estudo são utilizados dois modelos de mobilidade. O modelo *Random Waypoint*, utilizando vários tempos de pausa (0s, 1s, 10s, 100s e 1500s) e o modelo *Gauss-Markov*. A relevância deste trabalho prende-se com o facto de estudar o impacto de dois modelos de mobilidade no desempenho do protocolo utilizado.

O trabalho apresentado em [42], além de apresentar a implementação do protocolo de encaminhamento DSDV, compara o mesmo com os protocolos AODV e OLSR. Na comparação é utilizada uma rede constituída por 50 nós, com velocidade a variar entre 0m/s e 20m/s, que se encontram distribuídos numa área de simulação de 1x0,3km. A rede contém 10 fontes de tráfego, gerado por CBR e envia 4 pacotes/segundo. São realizadas em média, apenas 10 simulações com duração de 1000 segundos, para cada cenário. O modelo *Random Waypoint* é utilizado com tempo de pausa igual a zero, verificando-se um comportamento inadequado deste modelo. A relevância deste trabalho está relacionado com o facto de utilizar o simulador NS-3.

O estudo efetuado em [45] considera uma área de simulação de 1x1km. Nessa área são colocados aleatoriamente diferentes números de nós (10, 20, 40, 50 e 100) e são utilizadas diversas velocidades (2m/s, 20m/s e 40m/s). São gerado vários pares de fluxos de tráfego UDP (5, 10, 20, 25 e 50), enviando um pacote/segundo. Utilizada a taxa de dados de 2Mbit/s, valor não muito frequente nos dispositivos existentes e cada simulação tem a duração de apenas 100 segundos. A importância deste trabalho prende-se com o facto de permitir comparar vários protocolos utilizando diversos cenários, mas fica limitado por utilizar o modelo de mobilidade *Random Waypoint* sem definir tempo de pausa para o mesmo, verificando-se um comportamento inadequado para o modelo.

Em [46] são construídos vários cenários de redes numa área de simulação de 0,5x0,5km, sendo utilizados 49 ou 50 nós, dependendo do facto de avaliar o desempenho do protocolo AODV utilizando modelos de mobilidade individual e modelos de mobilidade em grupo. Quando são utilizados os modelos de mobilidade individual apenas é

utilizada uma rede, na qual são gerados 12 fluxos de tráfego CBR, enviando 4 pacotes por segundo. É considerado um tempo de pausa de 0,1 segundos. A velocidade dos nós em cada cenário varia entre 5m/s e 80m/s e o tempo de simulação de 600 segundos. A limitação deste trabalho está relacionada com o número de simulações realizadas para avaliação dos resultados, apenas 5 simulações em cada cenário, no entanto, este trabalho é relevante na medida em que avalia o protocolo utilizando vários modelos de mobilidade individual e em grupo.

Na Tabela 2.1 encontra-se assinalado quais os protocolos, modelos de mobilidade e métricas que os artigos avaliados têm em comum com o trabalho realizado nesta dissertação. É ainda, assinalado relativamente à rede ou redes avaliadas qual o número de nós e de fluxos utilizados nas mesmas.

Tabela 2.1: Protocolos, modelos de mobilidade, número de nós, número de fluxos e métricas utilizadas na avaliação de MANET

Referência	AODV	OLSR	RWP <sup>1</sup>	GM <sup>2</sup>	MG <sup>3</sup>	Nº Nós	Nº de Fluxos	Perdas	Atraso	<i>Overhead</i>
[4]	✓	✓	✓	×	×	60	1	✓	✓	×
[5]	✓	✓	✓	×	×	50	49,50	×	×	✓
[10]	✓	✓	✓	×	×	5-25	20	✓	✓	✓
[41]	✓	×	✓	✓	×	50,100	10,20	×	✓	✓
[42]	✓	✓	✓	×	×	50	10	✓	✓	✓
[45]	✓	×	✓	×	×	10,20,40,50,100	5,10,20,25,50	✓	✓	✓
[46]	✓	×	✓	✓	✓	49	12	✓	×	✓

<sup>1</sup> *Random Waypoint*

<sup>2</sup> *Gauss-Markov*

<sup>3</sup> *Manhattan Grid*



Analisando a tabela verificamos que não existe nenhum trabalho que estude, em simultâneo, o impacto dos modelos de mobilidade *Random Waypoint*, *Gauss-Markov* e *Manhattan Grid* no desempenho dos protocolos AODV e OLSR, utilizando as métricas perdas, atraso e *overhead*. Assim, o trabalho realizado nesta dissertação vem colmatar essa lacuna.

## 2.4. Modelos de Mobilidade

Na avaliação do desempenho de um protocolo para uma rede ad-hoc é importante a escolha que se faz relativamente ao modelo de mobilidade. Um modelo de mobilidade deve tentar imitar os movimentos reais dos nós móveis, assim, as mudanças na velocidade e direção dos nós devem ocorrer em intervalos de tempo razoáveis, ou seja, intervalos de tempo que permitam ao nó um certo grau de realismo, não permitindo ao nó viajar sempre em linha reta ou com velocidade constante. Os modelos de mobilidade são utilizados na simulação de redes para avaliar o desempenho de aplicações e sistemas de comunicação, permitindo analisar o impacto dos modelos de mobilidade no seu funcionamento.

Os modelos de mobilidade podem agrupar-se em dois grupos: modelo de mobilidade individual e o modelo de mobilidade em grupo.

Os modelos de mobilidade individual são os mais utilizados na simulação de redes móveis ad-hoc. Estes modelos têm como premissa que a movimentação de cada nó é independente do movimento dos outros nós da rede, o que permite uma modelação simples e de fácil implementação. Os modelos de mobilidade individual podem dividir-se em modelos onde os nós se deslocam com e sem restrições. Do grupo de modelos onde os nós se deslocam sem restrições fazem parte os modelos de mobilidade *Random Waypoint*, *Random Walk* e *Random Direction* [20]. Por vezes, no estudo de desempenho de redes ad-hoc, é necessário avaliar o seu funcionamento existindo algumas restrição na movimentação dos nós. Como modelos de mobilidade que apresentam algumas restrições, na movimentação dos nós, podemos referir os modelos *Gauss-Markov* [39] e *Manhattan Grid* [38] utilizados neste trabalho. No modelo *Gauss-Markov*, a velocidade e direcção atual de um nó dependem da velocidade e direcção anterior do mesmo, ou seja, a velocidade e direcção de um nó no instante  $t$  é determinado com base na velocidade e direcção no instante  $t-1$ , razão pela qual este modelo é considerado um modelo de mobilidade com memória. No modelo *Manhattan Grid*, os nós movimentam-se apenas na horizontal e vertical representando o movimento nas ruas de uma cidade, tendo como obstáculos os prédios.

Os modelos de mobilidade em grupo representam nós móveis cujos movimentos dependem uns dos outros. Como exemplo deste tipo de modelos temos os modelos de mobilidades *Column* e *Nomadic Community*. Nos modelos de mobilidade em grupo a modelação é complexa e de difícil implementação [20]. Os modelos de mobilidade em grupo estão fora do contexto deste trabalho, dado que o objetivo é avaliar o impacto dos modelos de mobilidade individual *Random Waypoint*, *Gauss-Markov* e *Manhattan Grid* no desempenho dos protocolos.

A Figura 2.2 apresenta a taxonomia dos modelos de mobilidade, de acordo com os modelos referidos nesta secção.

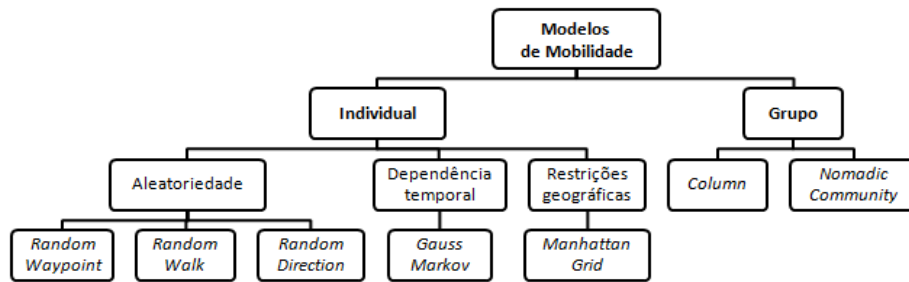


Figura 2.2: Classificação dos modelos de mobilidade referidos

A seguir será efetuada uma descrição dos modelos de mobilidade individual mencionados, sendo também, os mais utilizados na literatura no estudo de MANET, principalmente os modelos de mobilidade aleatória.

### ***Random Waypoint (RWP)***

O modelo de mobilidade *Random Waypoint* inclui tempos de pausa entre a mudança de direção e/ou velocidade. Inicialmente o nó móvel é posicionado numa posição durante um determinado período de tempo (tempo de pausa). Após esse tempo (expiração do tempo de pausa) o nó escolhe um destino aleatório na área de simulação e uma velocidade uniformemente distribuída entre  $[V_{min}, V_{max}]$ . O nó percorre o caminho para o destino escolhido na velocidade selecionada. Após alcançar o destino, o nó pára durante um determinado período de tempo (tempo de pausa), até iniciar de novo o processo. Na Figura 2.3 é possível visualizar um percurso de um nó, utilizando o modelo de mobilidade *Random Waypoint* [20][21].

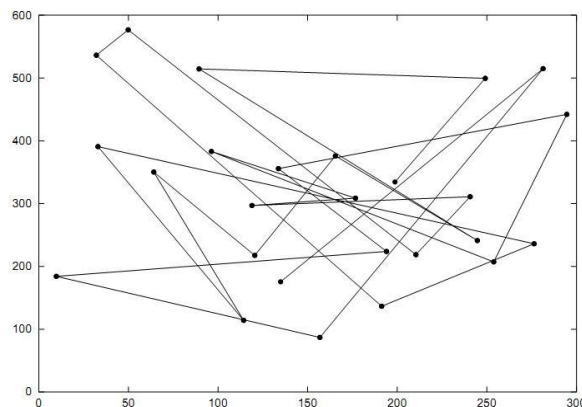


Figura 2.3: Movimento do nó utilizando o modelo de mobilidade *Random Waypoint*[20]

### ***Random Walk (RW)***

O modelo *Random Walk* é o modelo de mobilidade mais simples, gerando padrões de movimento completamente aleatórios. Inicialmente os nós são colocados aleatoriamente

na área de simulação. Os nós deslocam-se da sua posição atual para uma nova posição escolhendo aleatoriamente uma direção e uma velocidade para se deslocarem. A velocidade e direção são escolhidas aleatoriamente entre  $[V_{min}, V_{max}]$  e  $[0, 2\pi]$ , respectivamente. Cada movimento do nó ocorre num intervalo de tempo constante  $t$  ou distância constante  $d$ , no fim dos quais uma nova direção e velocidade são calculados e repetido o processo.

O modelo de mobilidade *Random Walk* é um padrão de mobilidade sem memória, não retendo nenhum conhecimento sobre os locais passados e os valores da velocidade. Assim, a velocidade e direção atual de um nó é independente da direção e velocidade anteriores. Através desta característica este modelo pode gerar movimentos não realistas, como mudanças subitas de direção, paragens bruscas e curvas fechadas. A Figura 2.4 ilustra o movimento do nó, utilizando o modelo de mobilidade *Random Walk* 2D [20][21].

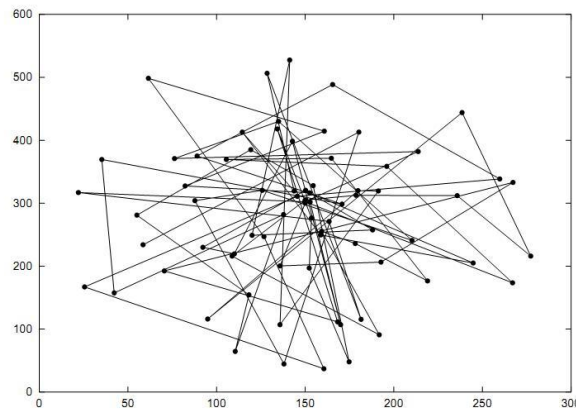


Figura 2.4: Movimento do nó no modelo de mobilidade *Random Walk* 2D [20]

### ***Random Direction (RD)***

O modelo de mobilidade *Random Direction* foi criado para superar uma falha existente no modelo de mobilidade *Random Waypoint*. No modelo de mobilidade *Random Waypoint* os nós escolhem novos destinos e a probabilidade de um nó escolher um destino que está situado no centro da área de simulação ou escolher um destino que requer a passagem do nó pelo meio da área de simulação é elevada.

No modelo de mobilidade *Random Direction* o nó escolhe uma direção aleatória para se deslocar. Após a escolha da direção aleatória, o nó desloca-se para a fronteira da área de simulação. Assim que atinge a fronteira, o nó para durante um determinado espaço de tempo (tempo de pausa), escolhe uma nova direção (entre 0 e 180 graus), e continua o processo. A Figura 2.5 ilustra o movimento de um nó que utiliza o modelo de mobilidade *Random Direction*, começando a sua deslocação no centro da área de simulação [20][21].

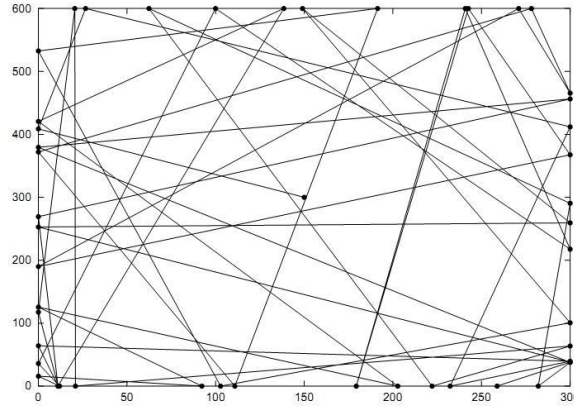


Figura 2.5: Movimento de um nó utilizando o modelo de mobilidade *Random Direction*[20]

### ***Gauss-Markov (GM)***

No modelo de mobilidade *Gauss-Markov* cada nó recebe inicialmente uma velocidade e direção. Em intervalos fixos de tempo ocorre a atualização da velocidade e direção dependente da velocidade e direção atual do nó, ou seja, o novo valor da velocidade e direção do nó é fornecido pelas equações:

$$S_n = \alpha S_{n-1} + (1-\alpha)\bar{S} + \sqrt{1-\alpha^2} Sx_{n-1} \quad (1)$$

$$d_n = \alpha d_{n-1} + (1-\alpha)\bar{d} + \sqrt{1-\alpha^2} dx_{n-1} \quad (2)$$

As coordenadas (x,y) de cada nó, em cada intervalo de tempo, são determinados através das equações:

$$x_n = x_{n-1} + S_{n-1} \cos d_{n-1} \quad (3)$$

$$y_n = y_{n-1} + S_{n-1} \sin d_{n-1} \quad (4)$$

Nas equações (1) e (2),  $S_n$  e  $d_n$  são, respetivamente, a velocidade e direção do nó no intervalo de tempo  $n$ . A constante  $\alpha$  é o parâmetro de memória, varia entre 0 a 1 e serve para variar a aleatoriedade,  $\bar{S}$  e  $\bar{d}$  são constantes representando o valor médio da velocidade e direção quando  $n \rightarrow \infty$ ,  $Sx_{n-1}$  e  $dx_{n-1}$  são variáveis aleatórias que seguem uma distribuição Gaussiana [20][39].

O modelo de *Gauss-Markov*, pretende eliminar as mudanças subitas de direção, paragens bruscas e curvas fechadas que existem nos modelos de mobilidade *Random Walk* e *Random Waypoint* mantendo um certo grau de aleatoriedade. O Movimento de um nó utilizando o modelo de mobilidade *Gauss-Markov* é ilustrado na Figura 2.6.

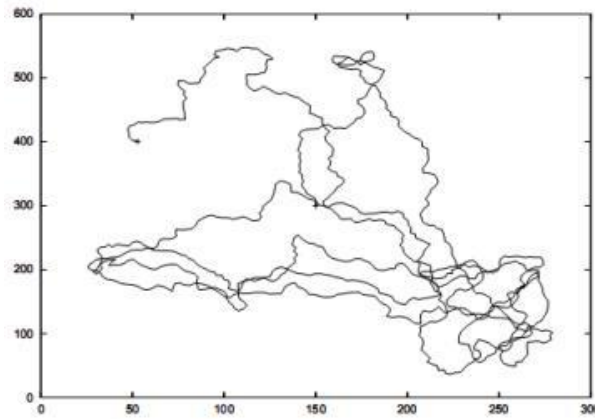


Figura 2.6: Movimento de um nó utilizando o modelo de mobilidade *Gauss-Markov*[20]

### ***Manhattan Grid (MG)***

Este modelo de mobilidade é utilizado para emular o movimento padrão de nós móveis nas ruas, Figura 2.7. Os cenários são constituídos por ruas verticais e horizontais, onde cada rua possui duas faixas para cada direção (norte e sul para as ruas verticais e leste e oeste para as ruas horizontais). Os nós só podem deslocar-se ao longo as ruas horizontais e verticais. Na interseção das ruas os nós podem mudar de direção, segundo uma determinada probabilidade. A probabilidade de o nó manter a mesma direção é de 50% e a probabilidade de o nó virar à esquerda ou à direita é de 25% [38][39].

Neste modelo de mobilidade os nós movem-se seguindo caminhos específicos (ruas), sendo mais apropriado para modelar o movimento de pedestres e/ou veículos numa cidade.

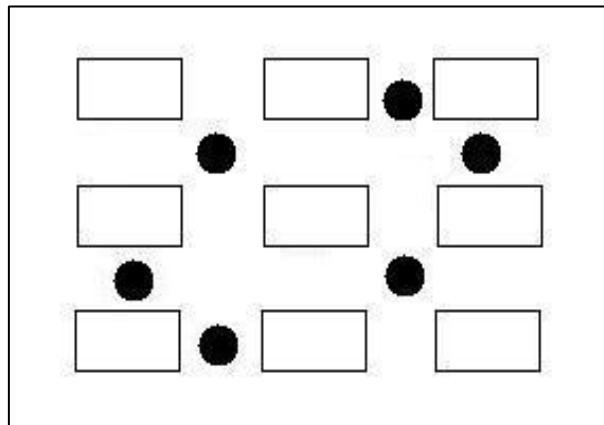


Figura 2.7: Movimento dos nós no modelo de mobilidade *Manhattan Grid*

## **2.5. Resumo dos modelos de mobilidade**

Os modelos de mobilidade individual são os mais utilizados na avaliação de desempenho de MANET, devido à sua modelação simples e fácil implementação. O *Random Waypoint* continua a ser o modelo mais utilizado na literatura devido a fornecer uma forma genérica de mobilidade sem estar preso a aplicações específicas. Por vezes é utilizado de forma simplificada, por exemplo em [5], [42] e [45], o modelo é utilizado sem definir um

valor para o tempo de pausa. Ao não ser definido tempo de pausa, o modelo passa a ter um comportamento inadequado, uma vez que, o tempo de pausa serve para superar inícios bruscos e paragens bruscas que existiam no *Random Walk*.

O modelo *Gauss-Markov* foi criado para superar as falhas que existiam no *Random Waypoint* e *Random Walk*. O modelo permite diferentes níveis de aleatoriedade definindo apenas um valor para um parâmetro, chamado parâmetro  $\alpha$ , onde  $0 \leq \alpha \leq 1$ . Quando o valor de  $\alpha$  é pequeno, próximo de zero, o modelo permite fazer curvas aleatórias, escolhe a direção e velocidade atual do nó sem dar grande importância à direção e velocidade anterior. Quando o valor do parâmetro é mais elevado, próximo de um, o modelo dá maior importância à velocidade e direção atual para escolher a futura velocidade e direção, neste caso a dependência temporal do modelo é mais elevada [44].

Quando um utilizador móvel se desloca, tem geralmente em mente um determinado destino, a velocidade e direção futura estão correlacionadas com a velocidade e direção atual. Para estes comportamentos os modelos *Random Walk*, *Random Waypoint* e *Random Direction* não são adequados devido a não terem memória. O modelo *Gauss-Markov* é mais adequado para este tipo de comportamento, fornece ao utilizador móvel movimentos mais próximos do real, uma vez que possui dependência temporal.

Os modelos aleatórios *Random Walk*, *Random Waypoint* e *Random Direction* são mais adequados para cenários onde o utilizador móvel se desloca (a pé ou de carro) numa determinada área sem restrições, podendo apresentar alguns movimentos que não são característicos de utilizadores móveis reais, como paragens bruscas e mudanças súbitas de direção.

O modelo *Manhattan Grid* é utilizado quando se pretende simular o movimento de utilizadores móveis nas ruas de uma cidade, havendo no cenário obstáculos como por exemplo prédios. Os utilizadores móveis podem apenas deslocar-se na horizontal ou vertical, podendo nos pontos de interseção das ruas mudar ou manter a direção atual. Este modelo apresenta restrições geográficas ao movimento do nó.

### 3. Comparação dos protocolos AODV/OLSR

---

Neste capítulo é apresentada a metodologia utilizada no trabalho e é feita a análise e justificação dos resultados obtidos para redes estáticas relativamente à escalabilidade e para redes móveis relativamente à mobilidade e escalabilidade.

#### 3.1. Objetivos

Os objetivos do trabalho apresentado neste capítulo são a comparação e avaliação da escalabilidade dos protocolos OLSR e AODV, em redes estáticas. É também avaliado o desempenho do protocolo OLSR, relativamente à mobilidade e escalabilidade, utilizando o modelo de mobilidade *Random Waypoint*. Para avaliar o desempenho do protocolo OLSR são comparados os resultados obtidos nos simuladores NS-3 e OPNET [26]. As métricas utilizadas para avaliar o desempenho dos protocolos são o atraso e perda de pacotes.

#### 3.2. Hipótese

Da análise efetuada, na literatura existente, relativamente ao desempenho dos protocolos de encaminhamento OLSR e AODV, os protocolos devem apresentar, o seguinte resultado:

- Em redes estáticas, o desempenho do protocolo AODV deverá ser melhor que o protocolo OLSR quando o número de fluxos é pequeno, porque sendo um protocolo reativo, os nós só determinam a rota para os vários destinos quando precisam de enviar um pacote.

A hipótese apresentada será analisada com base nos resultados obtidos no estudo de simulação.

#### 3.3. Metodologia

Existem vários simuladores de redes de comunicação disponíveis no mercado, entre os mais conhecidos encontram-se o NS-2 [34], NS-3 [22], GloMoSim [35], QualNet [36] e OPNET [26]. O simulador mais utilizado em trabalhos que envolvem MANET é o NS-2 [23], no entanto, neste trabalho a ferramenta selecionada para simulação dos cenários e avaliação de desempenho dos protocolos foi o NS-3. Apesar de se encontrar em desenvolvimento e existirem ainda recursos que não se encontram disponíveis, o simulador encontra-se bem organizado e pretende ser mais estável que o simulador NS-2, razão pela qual foi escolhido.

O *Network Simulator* – versão 3 (NS-3) é um novo simulador de redes baseado em eventos que pretende ser uma alternativa ao simulador NS-2. O NS-3 é uma ferramenta *Open Source*, distribuído sob licença de GNU GPLv2. O seu desenvolvimento teve início em 2006, é implementado em linguagem C++, com interface em Python opcional e tem como objetivo servir de plataforma para a investigação e educação. Os principais conceitos por trás do NS-3 são a modularidade, extensibilidade e reutilização. A hierarquia de classes do simulador é apresentada na Figura 3.1.

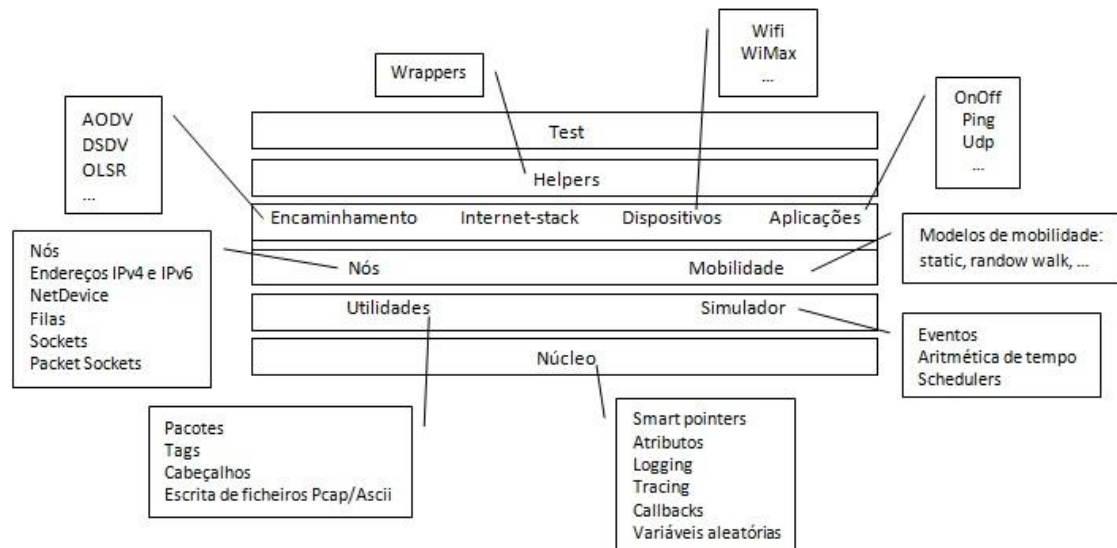


Figura 3.1: Hierarquia de classes do NS-3 [22]

No estudo efetuado, usando o simulador NS-3, foram utilizadas redes com vários números de nós (10, ..., 90), permitindo simular redes com diferentes densidades. Em cada uma das redes foi aplicado um conjunto de fluxos de tráfego (2, 4 e 16) gerados entre cada par origem-destino, com o destino a ser escolhido aleatoriamente e com padrão de tráfego UDP do tipo CBR (*Constant Bit Rate*) de 4 kbit/s. O gerador de tráfego CBR foi utilizado porque ao fornecer um fluxo constante de pacotes durante toda a simulação a carga na rede tende a tornar-se mais estável. A aplicação de diferentes fluxos de tráfego nas redes vai permitir avaliar o comportamento dos protocolos em redes com diferentes níveis de carga e densidade.

Para cada cenário são realizadas 30 simulações com valores diferentes de semente, numa área de simulação de 1x1km. Na realização de uma simulação é importante a escolha do tempo de duração da mesma. Esta escolha deve estar relacionada com o tipo de rede e com a carga da mesma. Neste trabalho, a duração de cada simulação é de 600 segundos, tempo considerado suficiente para permitir que as diferentes redes utilizadas estabilizem e forneçam dados mais confiáveis.

A camada MAC do protocolo IEEE 802.11b [37] é utilizada em todas as simulações com uma taxa de dados de 11Mbit/s, porque a probabilidade de esta taxa de dados ser encontrada nos dispositivos existentes é muito elevada.

Os nós existentes em cada um dos cenários seguem o modelo de mobilidade *Random Waypoint* [24], com tempo de pausa de 50 segundos, o qual pode corresponder, por exemplo, à paragem de um veículo num *stop*, num semáforo ou numa passadeira. A escolha



do modelo de mobilidade *Random Waypoint* deve-se ao fato de este modelo ser o mais utilizado na literatura no estudo de MANET e ser considerado o modelo de mobilidade padrão para este tipo de redes.

### 3.4. Escalabilidade

Neste trabalho pretende-se avaliar o desempenho dos protocolos OLSR e AODV relativamente à escalabilidade, em redes estáticas. A escalabilidade é uma característica desejável em todas as redes, indicando que a rede está preparada para manipular uma quantidade crescente de trabalho de maneira uniforme, ou está preparada para o crescimento do mesmo [25].

Para avaliar a escalabilidade dos protocolos AODV e OLSR, são usadas as métricas que se encontram descritas a seguir:

- **Atraso:** representa o atraso médio no envio de pacotes, tendo em conta o número de pacotes recebidos correctamente.
- **Perda de pacotes:** corresponde ao número de pacotes perdidos durante a transmissão.

Os resultados obtidos, no simulador NS-3, para os protocolos em estudo encontram-se nas tabelas presentes no Anexo A. Para análise dos resultados obtidos, dos protocolos OLSR e AODV, no simulador NS-3 relativamente às métricas em estudo, foram construídos gráficos, cujos resultados mostram um intervalo de confiança de 95%.

#### Análise das Perdas

Nesta secção será efetuada a análise das perdas dos protocolos envolvidos na simulação, com base nos resultados obtidos.

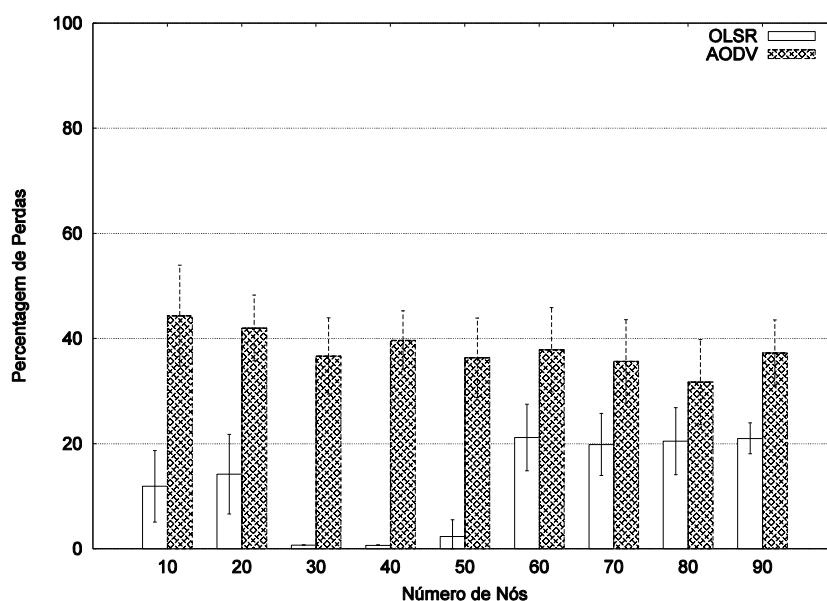


Figura 3.2: Média das Perdas do tráfego para 2 Fluxos

Os resultados apresentados na Figura 3.2, relativamente à percentagem de tráfego perdido, nas redes com dois fluxos, mostram que o número de perdas no protocolo AODV vai diminuindo com o aumento do número de nós na rede, devido a existir uma maior conectividade entre os nós. Nas redes de 10 para 20 nós, no protocolo OLSR, existe um aumento do número de perdas pelo facto de os nós se encontrarem mais dispersos e existir pouca conectividade entre eles, contudo, com o aumento do número de nós na rede o desempenho do protocolo aumenta. No entanto, a partir dos 50 nós o seu desempenho diminui devido a existir uma maior carga protocolar e interferências no meio sem-fios.

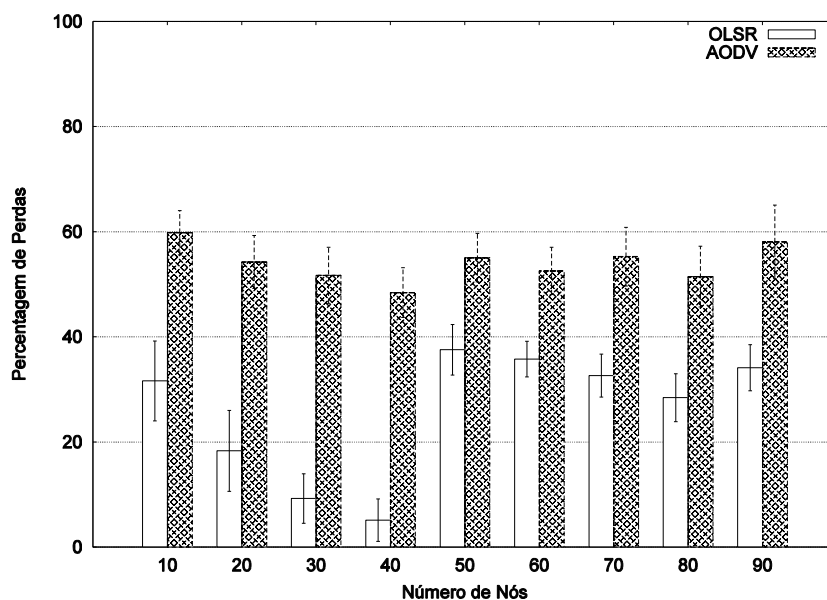


Figura 3.3: Média das Perdas do tráfego para 4 Fluxos

De acordo com os resultados apresentados na Figura 3.3, relativamente à percentagem de tráfego perdido, nas redes com quatro fluxos verificamos que com o aumento do número de nós na rede, o protocolo OLSR apresenta melhor desempenho por existir um aumento da conectividade entre os nós, mas, para redes com mais de 40 nós o seu desempenho diminui devido a existir um aumento de *overhead* na rede e interferências no meio sem-fios. O número de perdas no protocolo AODV apresenta algumas flutuações, com o aumento do número de nós, devido à existência de mensagens de *flooding*.

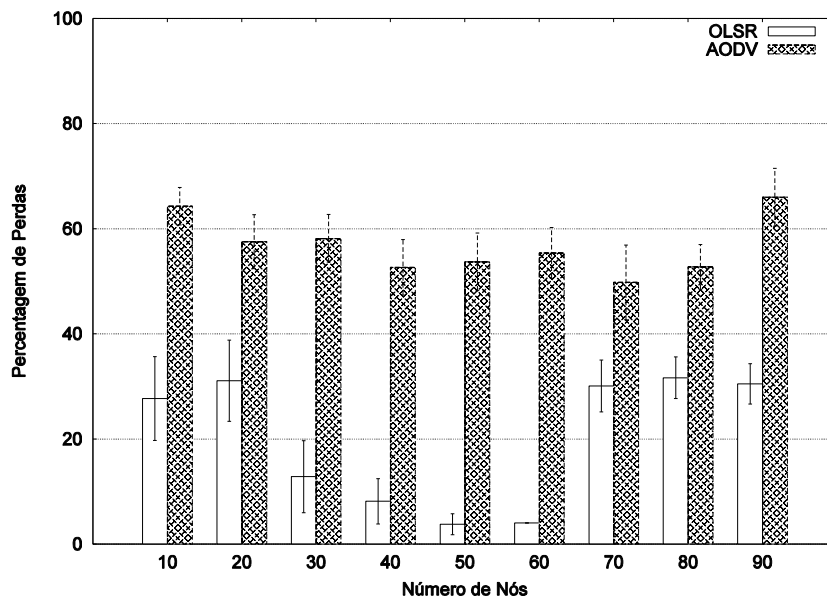


Figura 3.4: Média das Perdas do tráfego para 16 Fluxos

Relativamente à percentagem de tráfego perdido, nas redes com dezasseis fluxos, de acordo com os resultados apresentados na Figura 3.4, para o protocolo AODV o número de perdas diminui com o aumento do número de nós, mas a partir dos 80 nós o seu desempenho diminui devido à existência de um número mais elevado de mensagens de *flooding*. Para o protocolo OLSR, verificamos que nas redes até 20 nós, no protocolo OLSR, o número de perdas aumenta devido a existir menor conectividade entre os nós por se encontrarem mais afastados uns dos outros. Com o aumento do número de nós na rede, o protocolo apresenta melhor desempenho porque aumenta a conectividade entre os nós, mas, para redes com mais de 60 nós o seu desempenho diminui devido ao aumento do *overhead* e carga protocolar e interferências do meio sem-fios.

Os resultados obtidos, em termos de percentagem de tráfego perdido, mostram que o protocolo OLSR apresenta melhor desempenho que o protocolo AODV, no entanto, o número de perdas é mais consistente no protocolo AODV que no protocolo OLSR, com o aumento de número de nós na rede, devido à forma como os nós adquirem as rotas para os vários destinos, ou seja, através do envio de mensagens de *flooding*. Com o aumento do número de fluxos aumenta também o número de perdas nos dois protocolos devido ao aumento de tráfego no envio de mensagens.

Relativamente à percentagem de tráfego perdido, nas redes com dois e quatro fluxos, verificamos que os resultados obtidos contrariam a primeira hipótese apresentada em 2.4. O protocolo AODV determina a rota apenas quando precisa de enviar um pacote, mas, pelo facto de utilizar mensagens de *flooding* na descoberta de rota o número de perdas aumenta.

### Análise do Atraso

Nesta secção será efetuada a análise do atraso dos protocolos envolvidos na simulação, com base nos resultados obtidos.

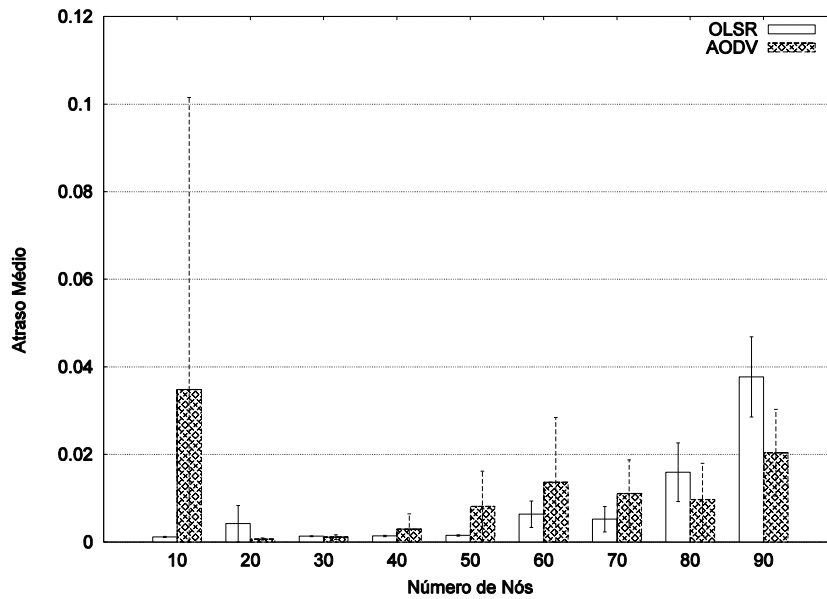


Figura 3.5: Média do Atraso do tráfego em segundos para 2 Fluxos

Ao analisarmos a Figura 3.5, relativamente ao atraso de tráfego nas redes com dois fluxos, verificamos que para o protocolo AODV, nas redes com 10 nós, o valor do atraso é elevado, assim como, o valor obtido para o seu intervalo de confiança. Este resultado mostra que o valor obtido para o atraso não é consistente. Nas redes com mais de 10 nós, observamos que, com o aumento do número de nós existe um aumento do valor do atraso para os dois protocolos. Verifica-se também que o valor do atraso é maior, independentemente do protocolo, nas redes onde o seu intervalo de confiança é mais elevado, mostrando que o valor obtido para o atraso nestas redes não é consistente.

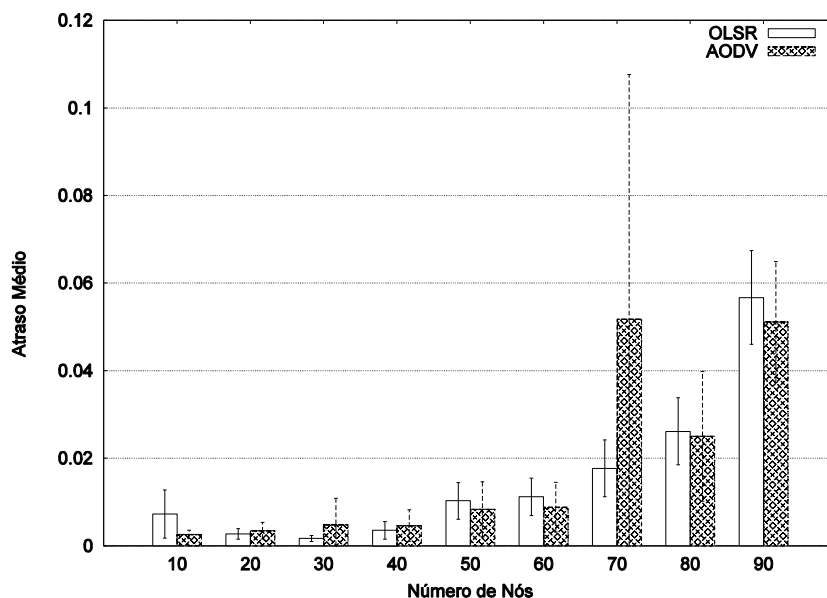


Figura 3.6: Média do Atraso do tráfego em segundos para 4 Fluxos

Relativamente ao atraso de tráfego nas redes com quatro fluxos, de acordo com os resultados apresentados na Figura 3.6, verificamos que o valor do atraso é muito semelhante para os dois protocolos, com o aumento do número de nós o atraso aumenta, no entanto, nas redes com mais de 70 nós, o valor do atraso é mais elevado por existirem caminhos com mais congestão devido aos nós estarem mais próximos.

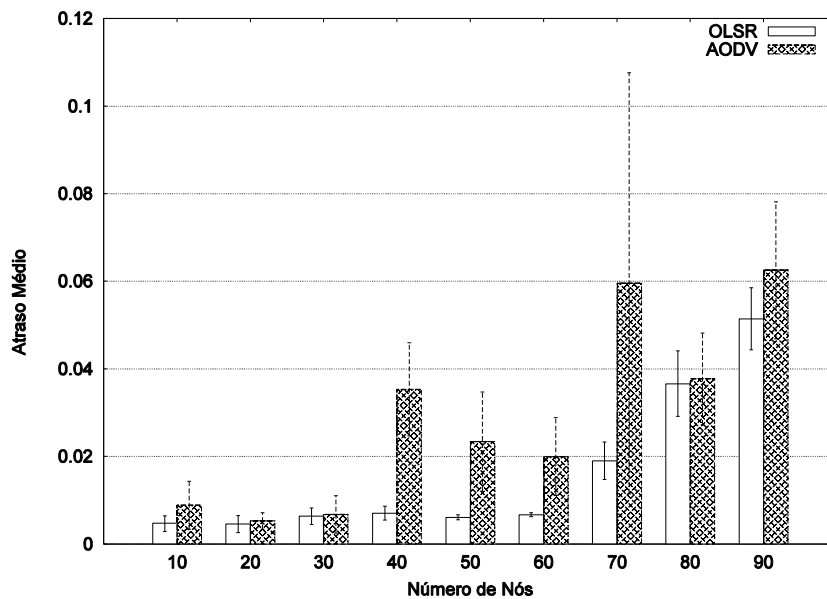


Figura 3.7: Média do Atraso do tráfego em segundos para 16 Fluxos

De acordo com os resultados apresentados na Figura 3.7, relativamente ao atraso de tráfego nas redes com dezasseis fluxos, o protocolo OLSR apresenta um bom desempenho nas redes até aos 60 nós, assim como, o protocolo AODV nas redes até aos 30 nós. Nas redes com nós superiores a esses valores o desempenho dos protocolos diminui devido a existirem rotas mais longas e caminhos com mais congestionamento pelo facto de os nós se encontrarem mais próximos.

O protocolo OLSR oferece melhor desempenho que o protocolo AODV em termos de atraso de tráfego para todas as redes analisadas. Este resultado contraria a primeira hipótese apresentada na secção 3.2, para redes com um número reduzido de fluxos. No protocolo OLSR, todos os nós conhecem as rotas para os vários destinos, o que leva a que exista um menor atraso na determinação da rota, enquanto, no protocolo AODV as rotas são determinadas apenas quando são necessárias, podendo provocar um atraso maior na obtenção da rota.

### 3.5. Mobilidade

Para avaliar a mobilidade e escalabilidade do protocolo OLSR são utilizadas redes com diferente número de nós (10, ..., 90), quatro velocidades (0, 3, 30 e 120Km/h) que representam pessoas a andar e veículos com diferentes velocidades. O protocolo OLSR foi escolhido por apresentar mais problemas de escalabilidade que o protocolo AODV, uma vez que, sendo um protocolo proativo mantém as suas tabelas de encaminhamento atualizadas, o que obriga a trocar periodicamente informações da rede com todos os nós. Considera-se que as redes têm níveis de carga moderada, assim, são utilizados 16 fluxos em cada cenário de rede construído.

A mobilidade do protocolo OLSR é avaliada comparando os resultados obtidos nos simuladores NS-3 e OPNET, através da utilização das métricas atraso e perdas, descritas em 3.3. O desempenho do protocolo OLSR, utilizando o simulador OPNET, já foi

avaliado em [27]. Neste trabalho vamos avaliar o desempenho do OLSR utilizando o simulador NS-3 e comparar os resultados obtidos neste simulador com os obtidos no OPNET.

Os resultados obtidos, no simulador NS-3, para o protocolo OLSR encontram-se nas tabelas presentes no Anexo B. Para análise dos resultados obtidos, do protocolo OLSR, nos simuladores NS-3 e OPNET, relativamente às métricas em estudo, foram construídos gráficos, cujos resultados mostram um intervalo de confiança de 95%.

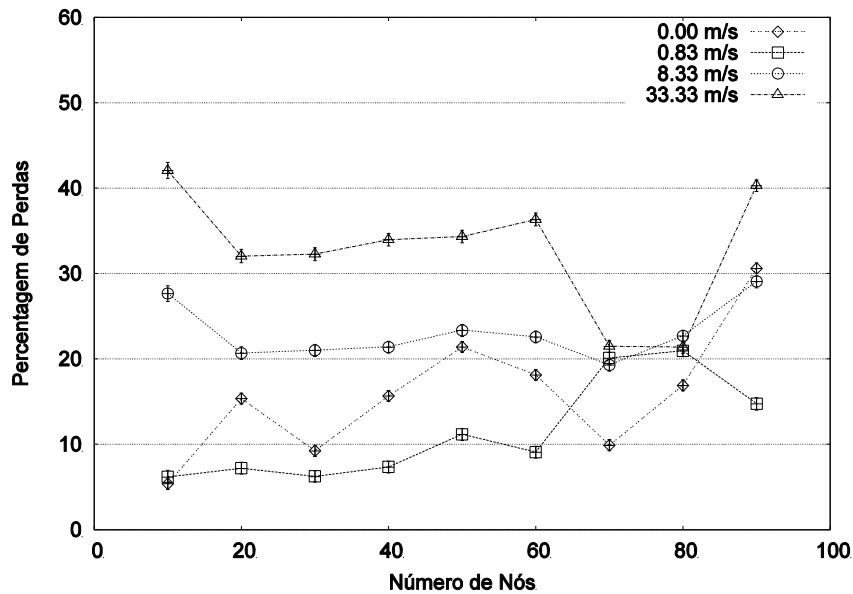


Figura 3.8: Média das Perdas do tráfego (OPNET)

Ao analisarmos a Figura 3.8 relativamente à percentagem de tráfego perdido nas redes, utilizando o simulador OPNET, verificamos que o número de perdas é maior para velocidades mais elevadas, independentemente do número de nós, com exceção do cenário com 70 nós à velocidade de 120km/h, onde se verifica uma diminuição do número de perdas, relacionada com algum comportamento específico da rede e do modelo de mobilidade *Random Waypoint*.

A rede que apresenta melhores resultados é aquela onde os nós se deslocam à velocidade de 3km/h, devido ao facto de existirem menos nós inacessíveis, uma vez que estes se deslocam a uma velocidade moderada [27].

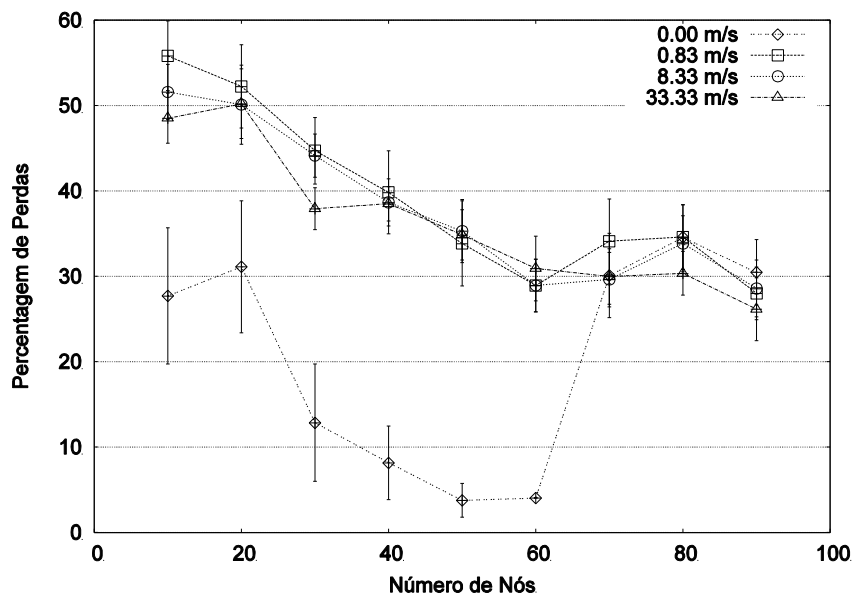


Figura 3.9: Média das Perdas do tráfego (NS-3)

De acordo com os resultados apresentados na Figura 3.9, relativamente à percentagem de tráfego perdido nas redes utilizando o simulador NS-3, verificamos que nos cenários móveis as perdas vão diminuindo à medida que aumenta o número de nós, devido a existir uma maior conectividade entre os nós. Verificamos, também, que nos cenários móveis as diferentes velocidades não têm um impacto significativo entre elas nos diferentes cenários, o que se deve, possivelmente, às características do modelo de mobilidade utilizado.

A rede estática apresenta melhor desempenho relativamente às redes móveis. Com o aumento do número de nós, na rede estática, aumenta a conectividade entre os nós mas, a partir dos 60 nós verificamos que o seu desempenho diminui devido à carga do protocolo e interferências no meio sem-fios.

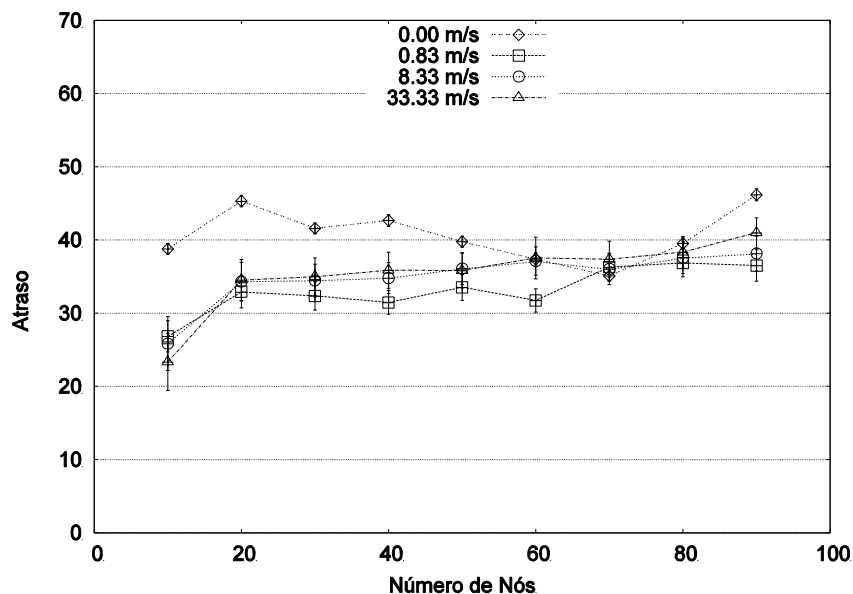


Figura 3.10: Média do Atraso do tráfego em segundos (OPNET)

De acordo com os resultados obtidos na Figura 3.10, através do simulador OPNET, as redes estáticas apresentam um atraso maior relativamente às redes com alguma mobilidade, especialmente nas redes onde o número de nós é reduzido.

Existe um aumento significativo do atraso em todas as redes de 10 para 20 nós, sendo depois o atraso mantido apesar do aumento do número de nós.

A partir dos 20 nós o valor do atraso mantém-se nas redes móveis, havendo apenas algumas flutuações, com o aumento do número de nós na rede [27].

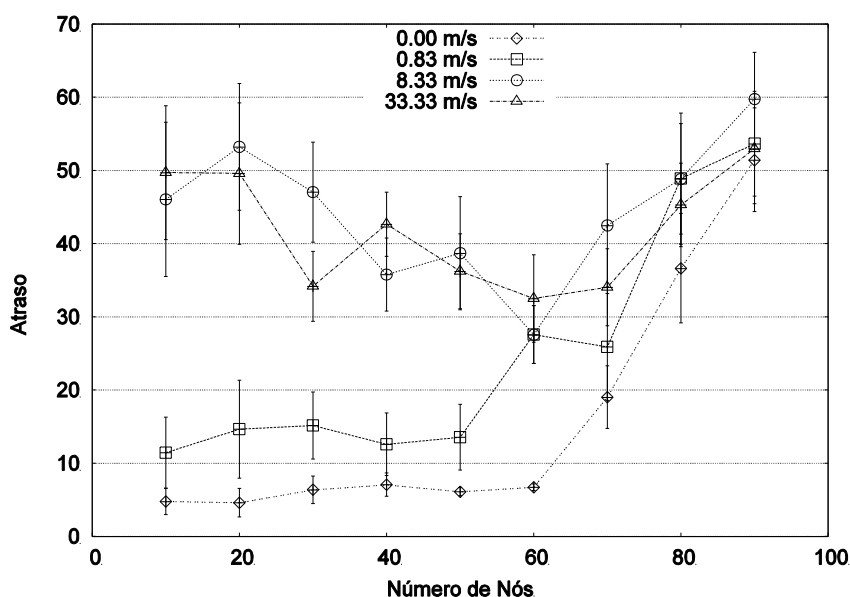


Figura 3.11: Média do Atraso do tráfego em segundos (NS-3)

Os resultados obtidos para o atraso do tráfego nas redes, apresentados na Figura 3.11 (simulador NS-3), mostram que as redes estáticas apresentam um melhor desempenho, até 60 nós, relativamente às redes com mobilidade, devido ao facto de os nós não precisarem de atualizar constantemente as rotas para os vários destinos. Assim, as tabelas de encaminhamento são mais estáveis o que leva a que o *overhead* seja menor.

Para redes com velocidade moderada o aumento do atraso é mais elevado a partir dos 50 nós. Por outro lado, nas redes com velocidade superior o atraso é maior, o que poderá dever-se a caminhos mais longos, rotas menos eficientes ou existirem interferências mais elevadas pelo facto de os nós estarem muito próximos em grupos muito grandes.

Através da análise do atraso podemos dizer que o protocolo OLSR apresenta uma adaptação adequada para redes de baixa e média densidade, relativamente a redes estáticas e redes com velocidade moderada.

Comparando os resultados obtidos através dos simuladores OPNET e NS-3, para o protocolo OLSR, relativamente às duas métricas em estudo, verificamos que relativamente à métrica perdas, no simulador OPNET é evidente a diferença entre as velocidades, não se verificando o mesmo no simulador NS-3, o que mostra que o modelo de mobilidade *Random Waypoint* apresenta problemas. Este modelo de mobilidade tem sido amplamente utilizado na literatura e, embora alguns trabalhos tenham mostrado algumas desvantagens



em usá-lo [28], ainda é amplamente utilizado em trabalhos recentes [29][30], porque fornece uma forma genérica de mobilidade sem estar preso a aplicações específicas.

No OPNET não existe uma relação direta entre a velocidade e o número de nós, enquanto no NS-3 com o aumento do número de nós diminui o número de perdas. As redes com 70 e 80 nós têm um comportamento que foge ao padrão.

Nos cenários estáticos o número de perdas é semelhante nos dois simuladores quando aumenta o número de nós no cenário.

Relativamente à métrica atraso, no simulador OPNET não existe para os diferentes cenários, muita diferença em relação ao atraso quando é aumentado o número de nós e a velocidade. No NS-3, os cenários com velocidade mais elevada e os cenários com menos velocidade apresentam um valor semelhante para o atraso, o que pode ser devido à existência de grupos e rotas maiores.

### **3.6. Sumário**

A escalabilidade é um dos principais requisitos ao desenvolvimento de protocolos de encaminhamento em redes móveis ad-hoc. Os resultados obtidos no simulador NS-3 mostram que os protocolos OLSR e AODV, para redes estáticas, apresentam capacidade adequada da escalabilidade para redes com densidades não muito elevadas. O protocolo OLSR apresenta melhor desempenho relativamente ao protocolo AODV, nas redes com dois ou mais fluxos.

Os resultados obtidos nos simuladores NS-3 e OPNET, para o protocolo OLSR, mostram que o protocolo tem problemas de escalabilidade e que é mais adequado para redes não muito grandes e com velocidade moderada. Quando o número de nós aumenta até aos 60 nós, o protocolo é beneficiado o que não se verifica quando o número de nós é superior. Os resultados mostram, também, que existem diferenças relativamente ao modelo de mobilidade, no simulador NS-3 o impacto do número de nós relativamente à velocidade é mais sensível.

Com base nos resultados obtidos nos simuladores NS-3 e OPNET, para o protocolo OLSR, não é possível dizer qual dos simuladores de redes é melhor, pois existem muitos parâmetros com diferentes variações, assim como diferentes cenários de redes. Os resultados obtidos podem estar relacionados com características específicas de cada um dos simuladores.



## 4. Comparação dos protocolos AODV/OLSR usando vários modelos de mobilidade

---

Neste capítulo é feita a avaliação de desempenho dos protocolos OLSR e AODV utilizando os modelos de mobilidade *Random Waypoint*, *Gauss-Markov* e *Manhattan Grid*.

### 4.1. Objetivos

O estudo efetuado neste capítulo tem como objetivo avaliar o impacto modelos de mobilidade *Random Waypoint*, *Gauss-Markov* e *Manhattan-Grid* no desempenho dos protocolos AODV e OLSR, considerando diferentes cenários de rede. As métricas utilizadas na avaliação são o atraso, a perda de pacotes e o *overhead*.

### 4.2. Hipóteses

Da análise efetuada, na literatura existente, relativamente ao desempenho dos protocolos de encaminhamento OLSR e AODV, os protocolos devem apresentar, os seguintes resultados:

- O protocolo OLSR deve apresentar melhor desempenho que o protocolo AODV relativamente à métrica atraso, quando aumentado o número de nós e a mobilidade na rede devido à existência de tabelas de encaminhamento com todas as rotas disponíveis.
- Nas redes onde os nós se deslocam a velocidades mais elevadas, o protocolo OLSR deverá apresentar melhor desempenho que o protocolo AODV, relativamente à métrica *overhead*, porque a existência de um maior número de ruturas de ligações de rota, implica a descoberta repetida de rotas e o envio de mensagens de erro na rede.

As hipóteses apresentadas serão analisadas com base nos resultados obtidos no estudo de simulação.

### 4.3. Metodologias

Para avaliar o impacto dos modelos de mobilidade no desempenho dos protocolos AODV e OLSR, foi utilizado o simulador de rede NS-3. Este simulador é baseado em eventos discretos, ou seja, consiste em analisar o estado de uma rede apenas em determinado tempo, podendo ignorar os outros estados sem que isso interfira no resultado

da análise. Os protocolos são utilizados de acordo com o especificado nos RFC's (*Request for Comments*).

Na avaliação foram utilizadas redes com 20, 40 e 60 nós, permitindo simular redes de baixa e média densidade uma vez que já foi observado que os protocolos são adequados para este tipo de redes. Não são avaliadas redes com densidade superior a 60 nós porque os protocolos em estudo apresentam problemas de escalabilidade para as redes com mais de 60 nós. São utilizadas quatro velocidades (0, 3, 30 e 120km/h), as quais representam pessoas a andar e veículos com diferentes velocidades e um tempo de pausa de 50 segundos, correspondente, por exemplo, à paragem de um veículo num semáforo, num *stop* ou numa passeadeira. Considera-se que as redes têm diferentes níveis de carga, sendo utilizado para o efeito um e quatro fluxos em cada cenário de rede construído. Cada fluxo de tráfego é gerado entre cada par origem-destino, sendo o destino escolhido aleatoriamente. O alcance de transmissão de cada nó é 270m. Foi escolhido o padrão de tráfego UDP do tipo CBR (*Constant Bit Rate*) de 4 kbit/s. Este tipo de tráfego permite fornecer um fluxo constante de pacotes durante toda a simulação, mantendo a carga na rede mais estável razão pela qual foi escolhido.

Cada cenário é uma rede móvel *ad-hoc* onde os nós se deslocam numa área de simulação de 1x1km. Como o tráfego de dados leva algum tempo a alcançar uma taxa estável é importante determinar o tempo de simulação, assim, foi utilizado em cada simulação 600 segundos, tempo considerado suficiente para que o tráfego de dados na rede estabilize. O número de simulações realizadas para cada cenário é 30, considerando sempre valores de semente diferentes em cada simulação. É utilizada em todas as simulações a camada MAC do protocolo IEEE 802.11b [37] com uma taxa de dados de 11Mbit/s. Foi considerada esta taxa de dados porque a probabilidade de esta ser encontrada nos dispositivos existentes é muito elevada.

As métricas utilizadas na avaliação são o **atraso**, as **perdas** e o **overhead**, de acordo com a descrição apresentada:

- **Atraso:** representa o atraso médio no envio de pacotes, tendo em conta o número de pacotes recebidos corretamente.
- **Perda de pacotes:** corresponde ao número de pacotes perdidos durante a transmissão.
- **Overhead:** número de mensagens de encaminhamento enviadas para descoberta e manutenção de rota.

Na construção dos cenários de simulação um dos modelos utilizados foi o modelo de mobilidade *Random Waypoint* de acordo com a sua implementação no simulador NS-3. Neste modelo são consideradas quatro velocidades (0, 3, 30 e 120Km/h) e um tempo de pausa de 50 segundos.

Para construir os cenários de simulação utilizando os modelos de mobilidade *Gauss-Markov* e *Manhattan Grid* é utilizada a ferramenta de geração de cenários BonnMotion [32]. Esta ferramenta permite gerar diferentes cenários de mobilidade os quais podem ser exportados para diferentes simuladores de redes, como por exemplo o NS-3.

Na execução da ferramenta BonnMotion para cada um dos modelos de mobilidade referidos é utilizada a linha de comandos:

```
bm -f <cenário> <modelo de mobilidade> < parâmetros do modelo de mobilidade>
```

como resultado são gerados dois ficheiros: um ficheiro com extensão “.params” que contém os parâmetros da simulação e o ficheiro com extensão “.movements.gz” contendo o movimento gerado pelos nós.

Para que a saída gerada pelo BonnMotion seja interpretada pelo simulador NS-3, é necessário executar a linha de comando:

```
bm NSFile -f <cenário>
```

a qual vai gerar dois ficheiros: um com extensão “.ns\_params” que contém algumas variáveis necessárias para definir a simulação e outro com extensão “.ns\_movements” que contém o movimento gerado pelos nós.

A saída gerada pode também ser interpretada pelo Visplot utilizando a linha de comandos:

```
bm Visplot -f <cenário>
```

Esta saída gera um ficheiro com extensão “.visplot”, o qual pode ser interpretado pelo Gnuplot permitindo a visualização do movimento dos nós no cenário.

Na execução da ferramenta BonnMotion para os modelos *Gauss-Markov* e *Manhattan Grid* foram definidos apenas alguns valores para os parâmetros específicos dos modelos, apresentados na Tabela 4.1, sendo os restantes valores considerados por omissão.

Tabela 4.1: Configuração dos parâmetros de entrada específicos dos modelos de mobilidade

Parâmetros	<i>Gauss-Markov</i>	<i>Manhattan-Grid</i>
Tempo de pausa (s)		50
Velocidade mínima (Km/h)	0, 3, 30, 120	
Velocidade máxima (Km/h)	0, 3, 30, 120	
Velocidade média (Km/h)		0, 3, 30, 120
Número de linhas		5
Número de colunas		5

Os modelos de mobilidade individual são os mais utilizados na literatura, devido às suas características de modelação mais simples e fácil implementação. A escolha dos modelos de mobilidade *Random Waypoint*, *Gauss-Markov* e *Manhattan Grid* deve-se ao facto destes serem representativos dos modelos de mobilidade individual e por não serem encontrados trabalhos que comparem os três modelos de mobilidade, em simultâneo, na avaliação de desempenho dos protocolos AODV e OLSR. O modelo *Random Waypoint* fornece uma forma genérica de mobilidade sem estar preso a aplicações específicas sendo por essa razão o modelo mais utilizado na literatura. É um modelo flexível que permite criar padrões de mobilidade realistas para a maneira como as pessoas se podem mover, por exemplo, num museu. O modelo *Gauss-Markov* oferece padrões de movimento que podem ser esperados no mundo real, o movimento do nó tem dependência temporal. O modelo *Manhattan Grid* permite simular o movimento de um nó numa área urbana. Este modelo apresenta

restrições geográficas no movimento do nó, dando no entanto alguma liberdade ao nó para alterar a sua direção.

Algumas das características mais representativas destes modelos encontram-se descritas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Características dos modelos de mobilidade

Modelo de Mobilidade	Características
<i>Random Waypoint</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Utilização de tempo de pausa entre mudanças de velocidade e direção.</li> <li>▪ A velocidade e destino de cada nó são selecionados aleatoriamente.</li> <li>▪ Durante a simulação os nós tendem a deslocar-se para o centro do cenário.</li> <li>▪ Modelo sem memória.</li> </ul>
<i>Gauss-Markov</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ A aleatoriedade do modelo depende do valor definido para o parâmetro de memória <math>\alpha</math>: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Se <math>\alpha=0</math>, o modelo não tem memória, ou seja, velocidade no instante <math>t</math> é independente da velocidade no instante <math>t-1</math>.</li> <li>• Se <math>\alpha=1</math>, a mobilidade do modelo é determinística, ou seja, a velocidade no instante <math>t</math> é igual à velocidade no instante <math>t-1</math>.</li> <li>• Se <math>0&lt;\alpha&lt;1</math>, a velocidade e direção no instante <math>t</math> depende da velocidade e direção no instante <math>t-1</math>. Essa dependência é mais elevada quando o valor de <math>\alpha</math> se aproxima de 1.</li> </ul> </li> <li>▪ Durante a simulação os nós encontram-se distribuídos por todo o cenário, não ocorrendo no seu movimento curvas fechadas ou paragens bruscas.</li> </ul>
<i>Manhattan Grid</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Devido à existência de obstáculos, os nós não se podem movimentar por todo o cenário de simulação. O movimento ocorre em caminhos específicos (na horizontal ou vertical), como por exemplo, ruas, avenidas,...</li> <li>▪ O nó tem apenas três possibilidades de mudança de direção: virar à esquerda (25%), virar à direita (25%) ou continuar o mesmo percurso (50%).</li> <li>▪ A velocidade de um nó no instante <math>t</math> depende da velocidade do nó no instante <math>t-1</math>, sendo também limitada pela velocidade do nó que se movimentava anteriormente nessa rua, na mesma direção.</li> </ul>

#### 4.4. Comparação dos protocolos AODV/OLSR

Os resultados obtidos, no simulador NS-3, para os protocolos AODV e OLSR encontram-se nas tabelas presentes no Anexo C. Para análise dos resultados obtidos, relativamente às métricas em estudo, foram construídos gráficos, cujos resultados mostram um intervalo de confiança de 95%.

##### Análise das Perdas

Nesta secção é analisado o desempenho dos protocolos AODV e OLSR, com base nos resultados obtidos para as perdas.

Na Figura 4.1, são apresentados os resultados obtidos relativamente à percentagem de tráfego perdido nas redes com um fluxo de tráfego, para o AODV.

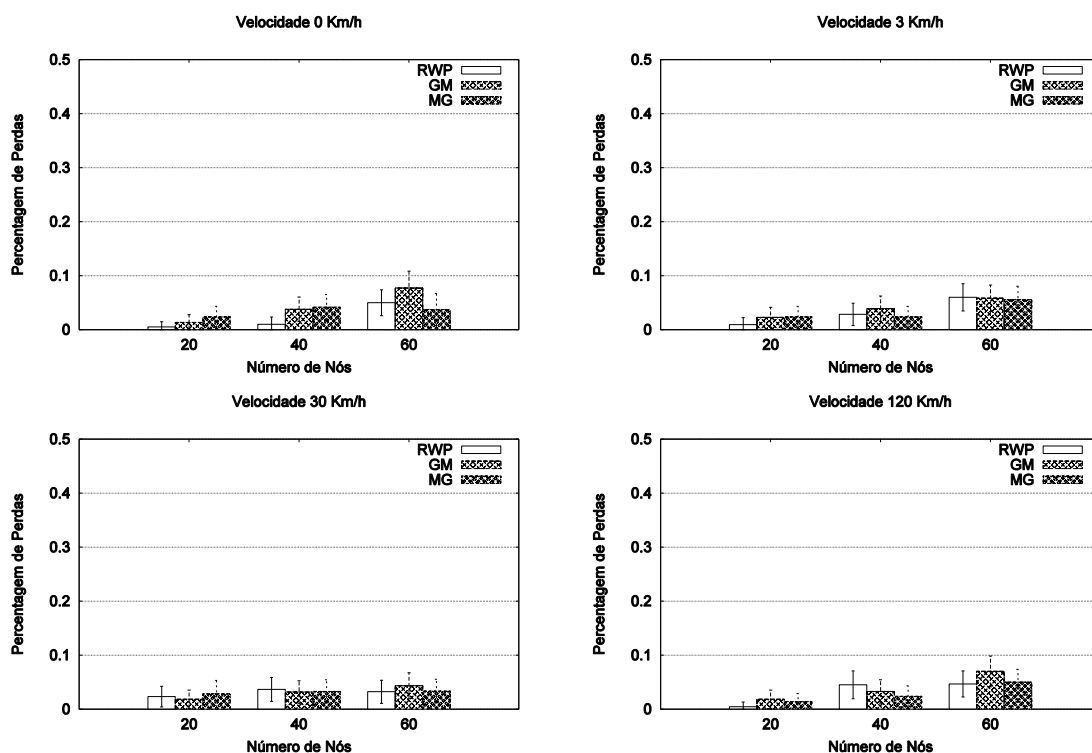


Figura 4.1: Média das Perdas do tráfego (em %) para 1 Fluxo - AODV

Analisando os resultados, verificamos que as diferentes velocidades não têm um impacto significativo no número de perdas obtidas. O protocolo AODV devido à sua natureza reativa reage de forma relativamente rápida às mudanças de topologia que ocorram na rede, informando apenas os nós que foram afetados por essas mudanças através de mensagens RERR.

Com o aumento de número de nós na rede, nos diferentes cenários apresentados, verificamos que o desempenho do protocolo diminui devido ao aumento de mensagens de *flooding*.

Relativamente aos modelos de mobilidade aplicados nos cenários apresentados na Figura 4.1, o protocolo AODV apresenta um desempenho semelhante para todos os cenários estudados.

A Tabela 4.3 apresenta a média de todas as velocidades para os cenários apresentados.

Tabela 4.3: Média das perdas nas diferentes velocidades (em %) para 1 Fluxo - AODV

Nós	RWP	Int. Conf.	GM	Int. Conf.	MG	Int. Conf.
20	0,01056	0,01261	0,01819	0,01680	0,02250	0,01979
40	0,03000	0,02055	0,03528	0,02224	0,03056	0,02100
60	0,04722	0,02363	0,06222	0,02704	0,04403	0,02513

Analisando os resultados presentes na tabela, concluímos que para a métrica das perdas, nos cenários com 20 nós o protocolo obtém pior desempenho com a utilização do

modelo de mobilidade *Manhattan Grid*, devido aos nós se encontrarem mais dispersos e por estarem limitados no seu movimento. Nos cenários com 40 e 60 nós, o desempenho do AODV é semelhante em todos os modelos de mobilidade.

Os resultados apresentados na Figura 4.2 são relativos à percentagem de tráfego perdido nas redes com quatro fluxos, para o protocolo AODV.

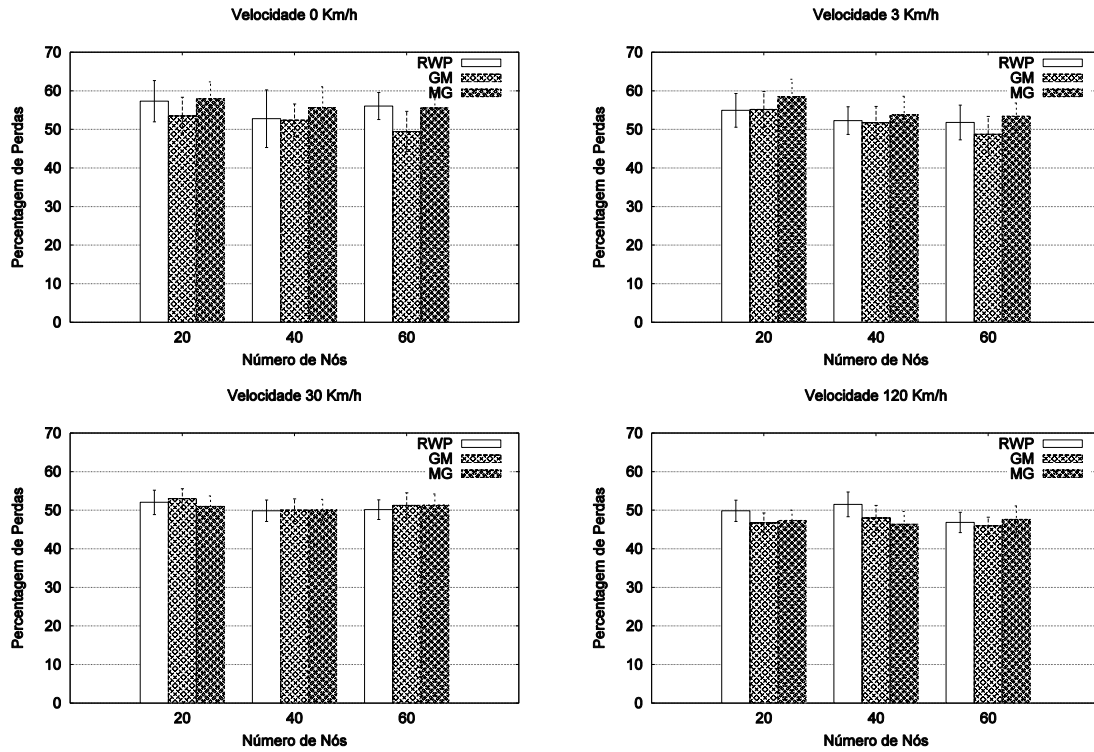


Figura 4.2: Média das Perdas do tráfego (em %) para 4 Fluxos - AODV

Os valores mostram que a aplicação de diferentes velocidades nos cenários não interfere significativamente nos resultados obtidos. O protocolo permite que os nós móveis possam obter rotas rapidamente para novos destinos, e não requer que os nós mantenham rotas para destinos com os quais não estão em comunicação ativa. Os nós móveis respondem a quebras de ligação e reagem a mudanças de topologia de rede de forma rápida, permitindo que se adaptem facilmente à mobilidade.

Aumentando o número de nós nos cenários, verificamos que o desempenho do protocolo para a métrica perdas é consistente. Em [43] são utilizadas vários cenários de rede (nós a variar entre 5 e 45), para avaliar o desempenho do protocolo AODV. Nos cenários com 20 e 40 nós os resultados obtidos, para a métrica perdas, são semelhantes aos encontrados.

Para determinar qual dos modelos de mobilidade aplicados nos cenários, permite que o protocolo obtenha um desempenho mais elevado relativamente à métrica perdas, analisamos os gráficos presentes na Figura 4.2. Dessa análise podemos concluir que o desempenho do protocolo é mais favorecido utilizando o modelo *Gauss-Markov*, o que vai de encontro aos valores apresentados na Tabela 4.4.



Tabela 4.4: Média das perdas nas diferentes velocidades (em %) para 4 Fluxos - AODV

Nós	RWP	Int. Conf.	GM	Int. Conf.	MG	Int. Conf.
20	53,52809	3,90601	52,10372	3,65573	53,68382	3,57563
40	51,60823	4,26042	50,53663	3,64313	51,47118	4,05211
60	49,72420	3,06187	48,83788	3,84843	51,96563	3,60417

Estes valores são resultado do cálculo das médias das perdas nas diferentes velocidades analisadas para os diferentes números de nós. Os resultados obtidos pelo protocolo com a utilização do modelo de mobilidade *Gauss-Markov* deve-se às características da rede e ao fato de os nós apenas sofrerem algumas alterações relativamente à direção. O valor do parâmetro de aleatoriedade é utilizado por omissão e não sendo este muito elevado, aproximadamente 0.4, o modelo não dá muita importância à direção anterior para escolher a direção futura, favorecendo o movimento do nó.

Comparando os resultados obtidos, relativamente à métrica perdas, para o AODV nas redes com um e quatro fluxos, houve um aumento significativo das perdas nos cenários com quatro fluxos. Este aumento tem várias causas:

- Na rede, a escolha da origem ser fixa e o destino aleatório, podendo em algumas simulações a origem ser também um destino. Nas simulações onde estas situações acontecem o número de perdas é superior àquelas onde a origem e destino são sempre diferentes.
- O aumento da carga na rede provoca maior congestionamento, dando origem a um número mais elevado de perdas.

Ainda, relativamente à métrica perdas para o protocolo AODV, nos cenários construídos com um e quatro fluxos, verificamos que o protocolo apresenta comportamentos semelhantes independentemente do modelo de mobilidade utilizado. Por isso é adequado dizer que os modelos de mobilidade não têm um impacto significativo no desempenho do protocolo, para os cenários de rede estudados.

A Figura 4.3 apresenta os gráficos com os resultados obtidos nas redes com um fluxo, relativamente ao tráfego perdido, para o protocolo OLSR.

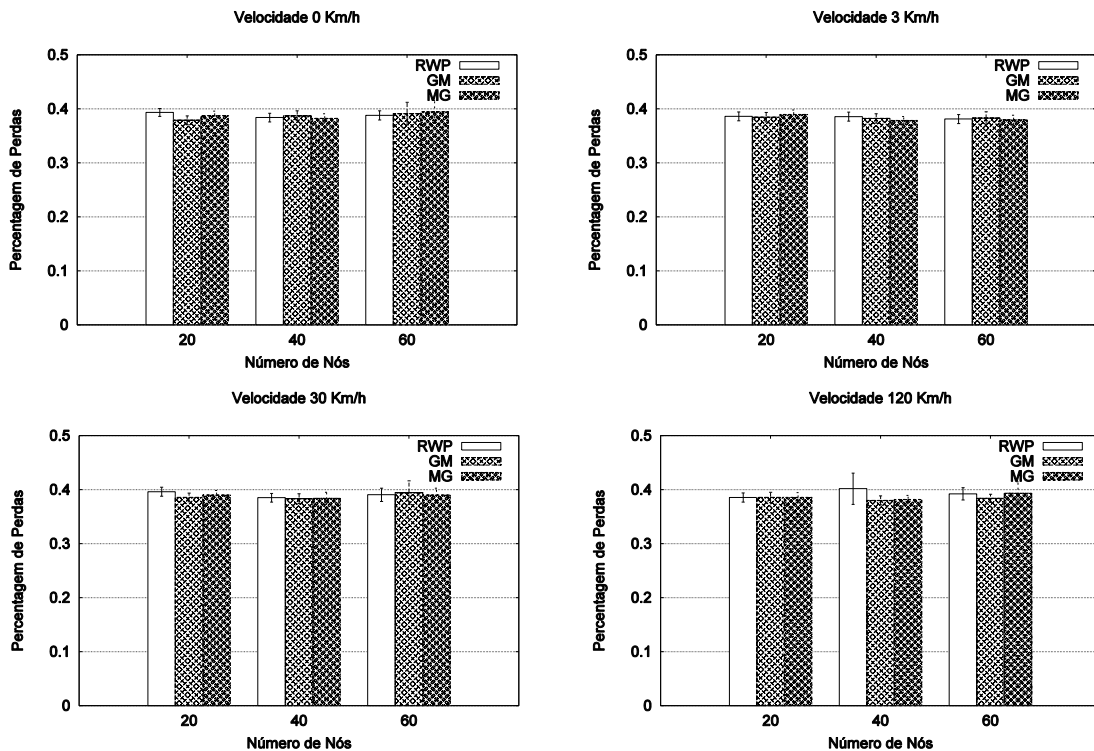


Figura 4.3: Média das Perdas do tráfego (em %) para 1 Fluxo - OLSR

Da análise dos gráficos, podemos concluir que a aplicação de diferentes velocidades não tem impacto significativo entre elas nos diferentes cenários, uma vez que, os resultados obtidos são semelhantes, independentemente da velocidade utilizada.

Com o aumento do número de nós nas redes, o desempenho do protocolo é semelhante. Estes resultados estão relacionados com as características da rede (uma origem e um destino) e pelo facto de as transmissões de dados na rede só terem início depois de todos os nós possuírem informação disponível sobre a rota para o destino, ou seja, depois de todos os nós possuírem a sua tabela de encaminhamento.

Relativamente aos modelos de mobilidade aplicados, Figura 4.3, podemos concluir que o desempenho do protocolo OLSR é semelhante, não dependendo do modelo de mobilidade utilizado.

Analisando a media das perdas de todas as velocidades analisadas, em cada um dos cenários, na Tabela 4.5, verificamos que o desempenho do protocolo é muito semelhante independentemente do modelo de mobilidade utilizado. Assim, dos resultados analisados podemos dizer que o protocolo se adapta bem aos modelos de mobilidade, para os cenários de rede apresentados.

Tabela 4.5: Média das perdas nas diferentes velocidades (em %) para 1 Fluxo - OLSR

Nós	RWP	Int. Conf.	GM	Int. Conf.	MG	Int. Conf.
20	0,39028	0,00809	0,38361	0,00864	0,38806	0,00863
40	0,38903	0,01338	0,38319	0,00879	0,38153	0,00876
60	0,38792	0,01013	0,38806	0,01559	0,38931	0,01600

Os resultados apresentados na Figura 4.4, são relativos à percentagem de tráfego perdido nas redes com 4 fluxos, no protocolo OLSR.

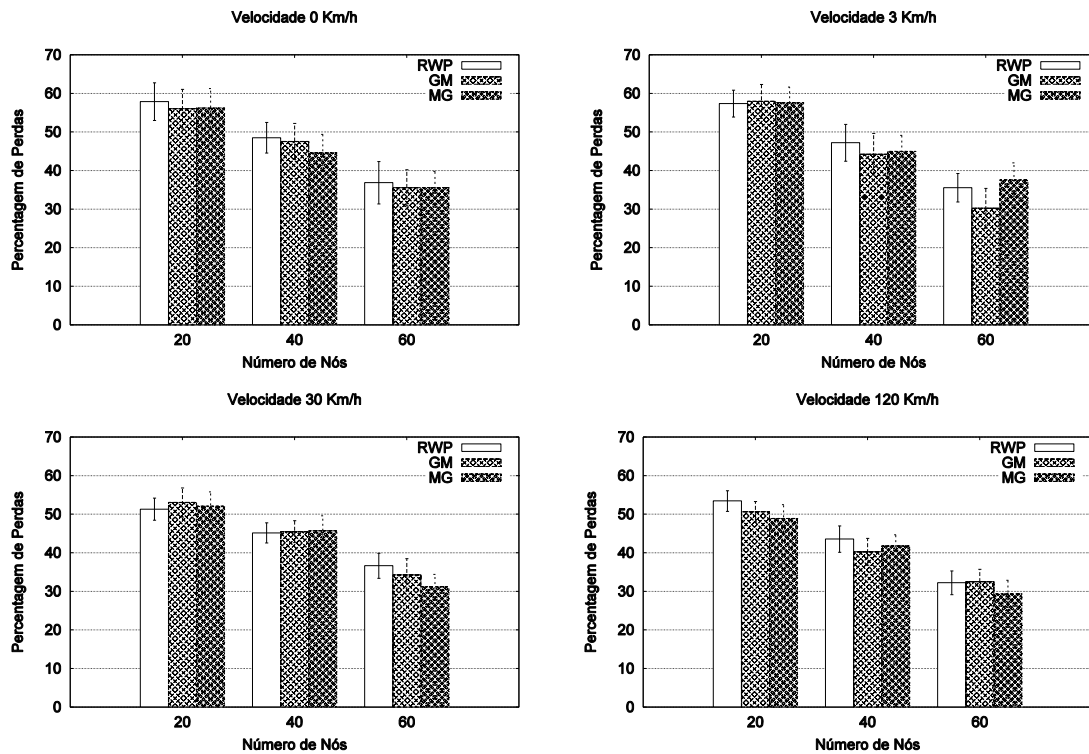


Figura 4.4: Média das Perdas do tráfego (em %) para 4 Fluxos - OLSR

Os resultados mostram que a aplicação de diferentes velocidades nos cenários estudados não origina grande discrepância nos resultados obtidos devido às rotas para os vários destinos já serem conhecidos. Sendo o protocolo proativo cada nó mantém uma tabela de encaminhamento com informações atualizadas das rotas, para todos os nós que fazem parte da rede. Sempre que são detetadas alterações na topologia de rede a tabela de encaminhamento de cada nó é atualizada.

Analisando o aumento do número de nós na rede, verificamos que o número de perdas diminui com o aumento da densidade da rede devido aos nós se encontrarem mais próximos e existir maior conectividade entre eles. Estes resultados são semelhantes aos obtidos em [42], onde com o aumento do número de nós na rede as perdas diminuem.

Os resultados da Figura 4.4 mostram que o desempenho do protocolo é semelhante independentemente do modelo de mobilidade utilizado, os modelos não influenciam, para os cenários de rede apresentados, o desempenho do protocolo OLSR.

Analisando a Tabela 4.6, verificamos que através da utilização do modelo de mobilidade *Random Waypoint*, o protocolo obtém o pior desempenho em todos os cenários, relativamente à métrica perdas. Este facto pode estar relacionado com as características do modelo de mobilidade, uma vez que os nós tendem a concentrar-se no centro de cenário permitindo que o número de etapas aumente.

Tabela 4.6: Média das perdas nas diferentes velocidades (em %) para 4 Fluxos - OLSR

Nós	RWP	Int. Conf.	GM	Int. Conf.	MG	Int. Conf.
20	54,98467	3,47657	54,41274	3,94870	53,69104	4,09529
40	46,09861	3,69851	44,36851	4,10351	44,25111	3,93798
60	35,31184	3,87943	33,13597	4,31329	33,42528	3,83930

Analizamos agora os resultados obtidos para o protocolo OLSR nos cenários com um e quatro fluxos, relativamente à métrica perdas.

Da análise efetuada, concluímos que os valores obtidos nos diferentes cenários, nas redes com um fluxo são muito próximos, independentemente da velocidade e do número de nós, o que não acontece nos cenários com quatro fluxos.

Com o aumento do número de nós, nos cenários com quatro fluxos, existe uma diminuição do número de perdas. Estes resultados devem-se ao facto de existir com o aumento do número de nós maior conectividade entre eles.

Os resultados obtidos para os cenários com um e quatro fluxos, mostram que o desempenho do protocolo OLSR é semelhante, relativamente à métrica perdas, para os modelos de mobilidade utilizados. Assim, o protocolo é adequado para os diferentes modelos de mobilidade nos cenários apresentados.

### Análise do atraso

Nesta secção é analisado o desempenho dos protocolos AODV e OLSR, com base nos resultados obtidos para a métrica atraso.

Os gráficos da Figura 4.5 são relativos ao atraso nas redes com um fluxo, utilizando o protocolo AODV.

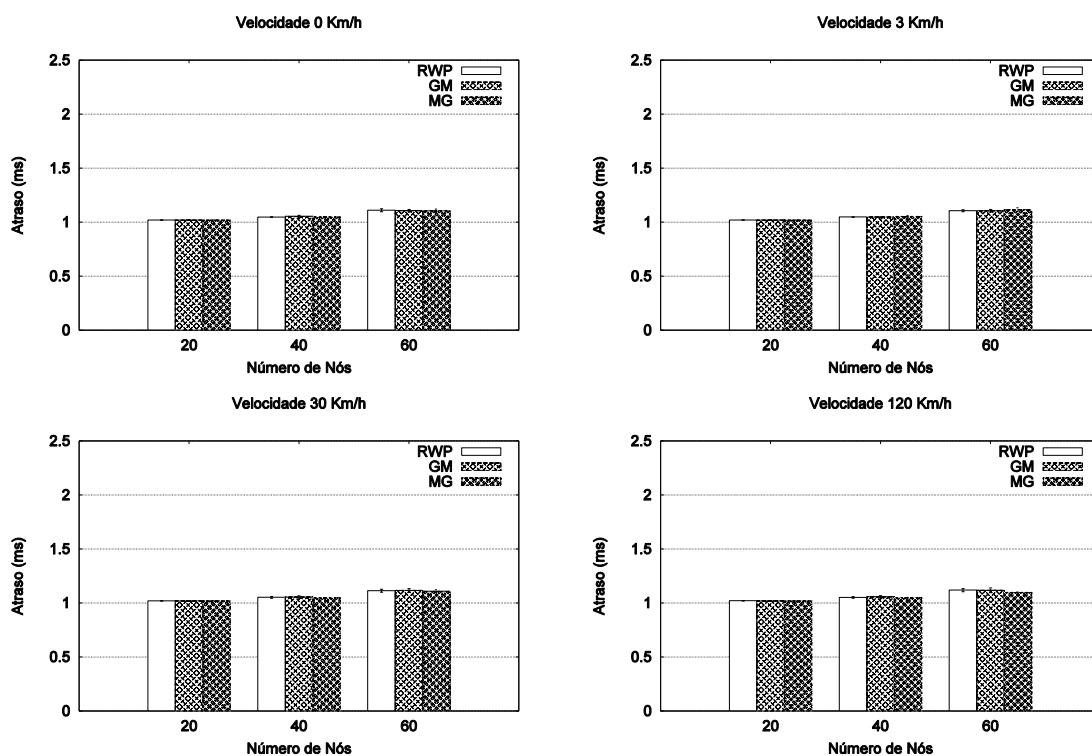


Figura 4.5: Média do Atraso do tráfego em milissegundos para 1 Fluxo - AODV

Analisando os gráficos verificamos que o atraso não sofre alterações com o aumento da velocidade. O protocolo tenta minimizar o atraso quando novas rotas são requisitadas, forçando os nós a estabelecerem dinamicamente tabelas de encaminhamento

locais para cada destino. Assim, cada nó sabe sempre qual o próximo a chegar ao destino e qual a distância em número de etapas.

Com o aumento da densidade na rede o atraso é mais elevado por existirem caminhos mais congestionados devido aos nós se encontrarem mais próximos.

Analisando a Figura 4.5 e a Tabela 4.7, verificamos que os modelos de mobilidade não tem impacto significativo no desempenho do protocolo. O protocolo apresenta desempenho semelhante, nos diferentes cenários, com a aplicação dos vários modelos de mobilidade.

Tabela 4.7: Média do atraso nas diferentes velocidades em milissegundos para 1 Fluxo - AODV

Nós	RWP	Int. Conf.	GM	Int. Conf.	MG	Int. Conf.
20	1,01996	0,00147	1,01948	0,00083	1,01937	0,00076
40	1,04964	0,00310	1,05308	0,00841	1,04928	0,00372
60	1,11217	0,01290	1,11139	0,01552	1,10687	0,01264

A Figura 4.6 apresenta os resultados da média do atraso de tráfego, para o protocolo AODV, nos cenários com quatro fluxos.

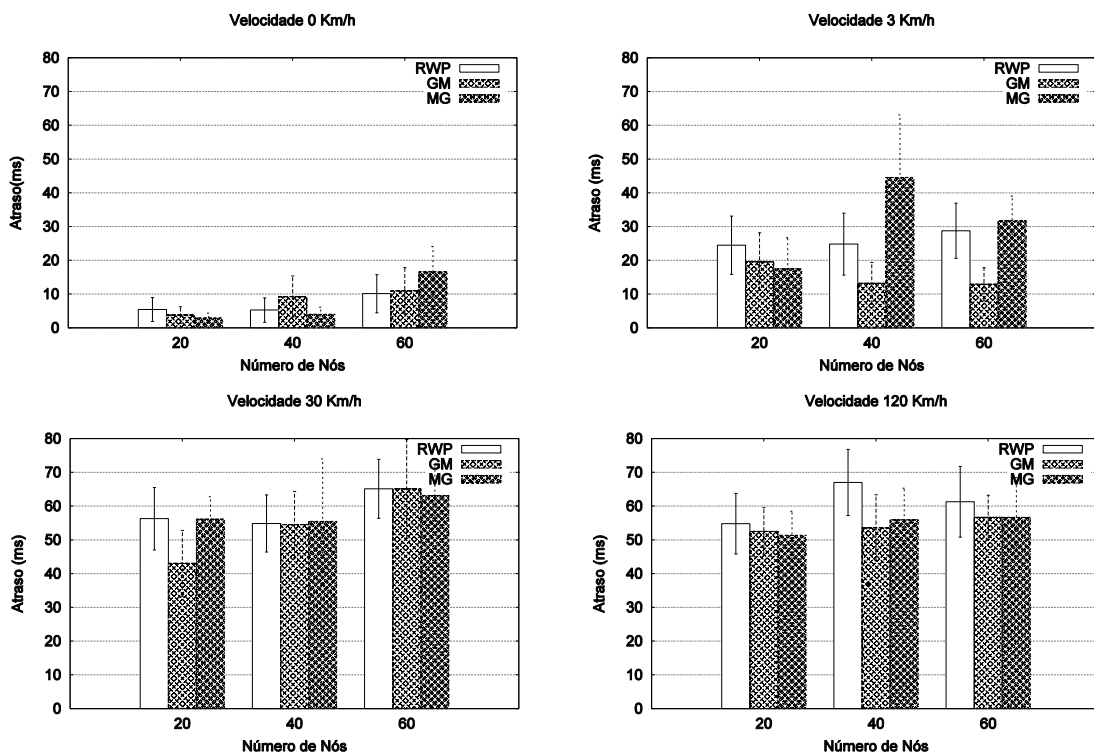


Figura 4.6: Média do Atraso do tráfego em milissegundos para 4 Fluxos - AODV

Analisando os gráficos da Figura 4.6 observamos que nas redes com velocidade moderada (0km/h e 3km/h), os valores do atraso são menores quando comparados com os cenários com velocidades mais elevadas. Nestas redes as rotas são mais estáveis, permitindo que o atraso seja menor. Nas redes com mobilidade superior, o valor do atraso tende a aumentar por existir com maior frequência descoberta e manutenção de rotas. Os valores obtidos vão de encontro aos resultados alcançados em [41], onde nos cenários com velocidades mais baixas o valor obtido pelo protocolo para atraso é menor, enquanto nos cenários com velocidade mais elevada o valor do atraso é maior.

Nos cenários apresentados, com o aumento da densidade das redes o atraso é mais elevado porque existem caminhos com mais congestão, por outro lado, os intervalos de confiança são mais elevados porque o protocolo envia mensagens de *flooding* para o estabelecimento de rotas, o que torna importante a distribuição dos nós na rede, acabando por gerar valores díspares.

Analizamos agora, a influência dos modelos de mobilidade no desempenho do protocolo AODV, através da análise da média do atraso de todas as velocidades analisadas na Tabela 4.8.

Tabela 4.8: Média do atraso nas diferentes velocidades em milissegundos para 4 Fluxos - AODV

Nós	RWP	Int. Conf.	GM	Int. Conf.	MG	Int. Conf.
20	35,23228	7,59494	29,73169	6,94623	31,95937	6,11787
40	37,97888	7,76108	32,63238	7,97426	39,98646	12,11328
60	55,06805	9,02829	36,41334	8,24687	42,03077	8,95545

Verificamos que o desempenho do protocolo é melhor quando é utilizado o modelo de mobilidade *Gauss-Markov*. Neste modelo, de acordo com os resultados obtidos em [41], o valor do parâmetro de aleatoriedade não tem efeito no atraso. Assim, os nós sofrem apenas pequenas alterações na direção ( $V_{min}=V_{max}$  em cada cenário) permitindo ao protocolo obter melhor desempenho com este modelo de mobilidade.

Ao analisar os resultados obtidos para os cenários com um e quatro fluxos, relativamente à métrica atraso, para o protocolo AODV, conclui-se que existe um aumento significativo do atraso nas redes de um fluxo para as redes de quatro fluxos. Ao aumentar o número de fluxos aumenta a carga na rede o que contribui para o seu congestionamento, dando origem a uma atraso mais elevado.

Os valores apresentados nas Figuras 4.5 e 4.6 e nas Tabelas 4.7 e 4.8, mostram que o protocolo AODV apresenta desempenho diferente para a métrica atraso, nas redes a com um e quatro fluxos, de acordo com o modelo de mobilidade utilizado. Nas redes com um fluxo, o desempenho do protocolo é semelhante com a utilização dos três modelos de mobilidade. Para as redes com quatro fluxos, o protocolo tem melhor desempenho com a utilização do modelo de mobilidade *Gauss-Markov*.

A Figura 4.7 apresenta os gráficos com os valores obtidos para o atraso nas redes com um fluxo, para o protocolo OLSR.

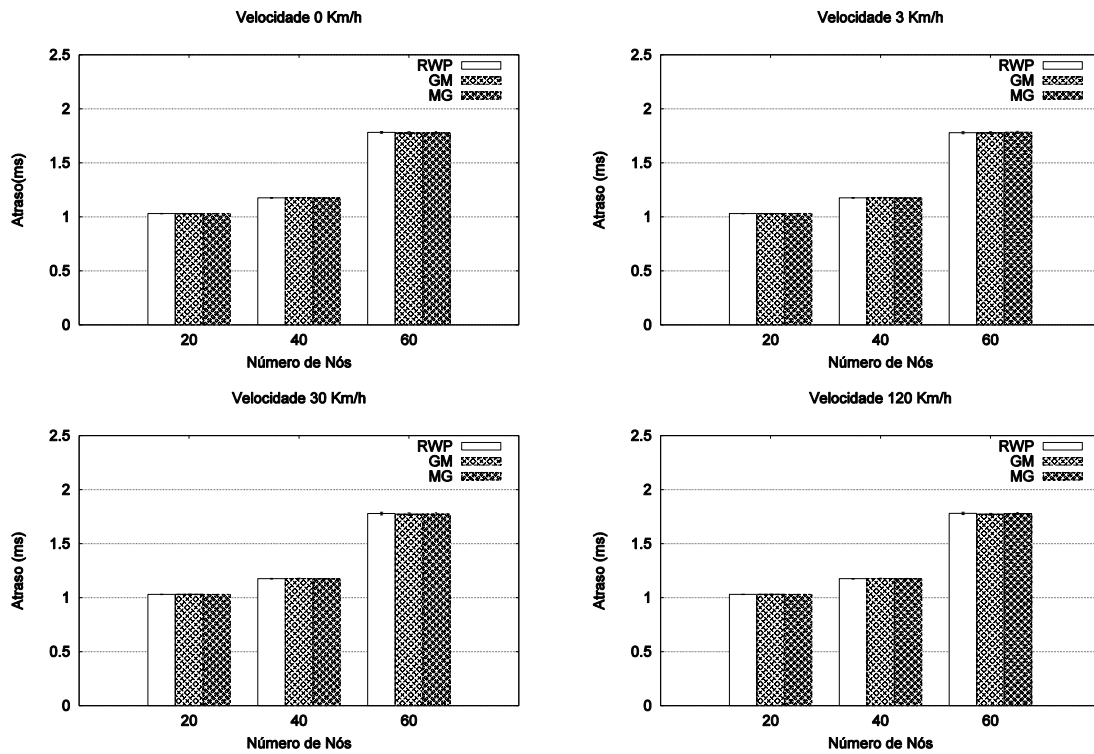


Figura 4.7: Média do Atraso do tráfego em milissegundos para 1 Fluxo - OLSR

Verificamos ao analisar os gráficos que a aplicação de diferentes velocidades não têm impacto significativo nos diferentes cenários. As rotas já são conhecidas, existindo apenas atualizações das mesmas na tabela de encaminhamento.

Com o aumento do número de nós na rede existem caminhos com mais congestionamento, dando origem a um aumento do atraso na rede.

Comparamos agora o desempenho do protocolo OLSR, utilizando os modelos de mobilidade, para os diferentes cenários construídos com um fluxo na Figura 4.7.

Ao utilizar os diferentes modelos de mobilidade nos cenários, o desempenho do protocolo é semelhante. O mesmo se verifica, ao analisarmos os valores apresentados na Tabela 4.9, relativa à média das velocidades do atraso. O protocolo OLSR apresenta um desempenho idêntico com a utilização dos três modelos de mobilidade.

Tabela 4.9: Média do atraso nas diferentes velocidades em milissegundos para 1 Fluxo - OLSR

Nós	RWP	Int. Conf.	GM	Int. Conf.	MG	Int. Conf.
20	1,03003	0,00126	1,03013	0,00110	1,02995	0,00110
40	1,17530	0,00256	1,17679	0,00249	1,17541	0,00249
60	1,78097	0,01004	1,77486	0,01012	1,77831	0,01048

Os resultados apresentados nos gráficos da Figura 4.8, são relativos à média do atraso obtido nas redes com quatro fluxos, pelo protocolo OLSR.

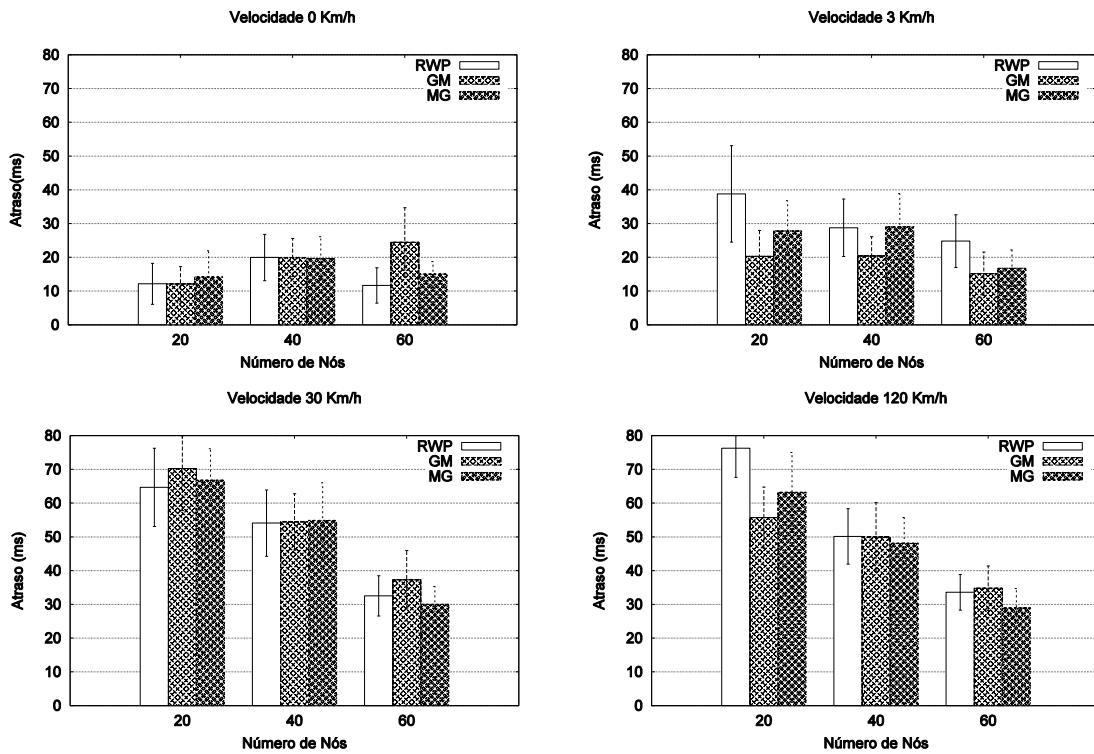


Figura 4.8: Média do Atraso do tráfego em milissegundos para 4 Fluxos - OLSR

Nos cenários com velocidade mais moderada (0km/h e 3km/h) o atraso é menor relativamente às redes com velocidade mais elevada porque a tabela de encaminhamento é mais estável. Os nós não precisam de atualizar com tanta frequência as rotas para os vários destinos.

Nas redes com velocidade mais elevada existe a necessidade de atualizar com mais frequência as rotas para os diferentes destinos, de modo a manter a tabela de encaminhamento com informações válidas, originando um atraso maior.

Nas redes com mobilidade verificamos que com o aumento do número de nós existe uma diminuição do valor do atraso. Quando os nós se encontram mais afastados os caminhos tendem a ser mais longos e o atraso mais elevado, mas com o aumento do número de nós na rede, os caminhos tendem a ser mais curtos e o atraso menor.

Nas redes estáticas, o aumento do número de nós não influencia significativamente o valor obtido para o atraso porque sendo o protocolo proativo os caminhos são conhecidos desde o início.

Através dos resultados apresentados na Figura 4.8 e na Tabela 4.10, o protocolo tem um desempenho semelhante para os diferentes modelos de mobilidade quando a quantidade de nós aumenta, isto ocorre porque a densidade de rede aumenta, assim, o atraso tende a diminuir, pois a probabilidade de encontrar um nó nas proximidades é mais elevada.



Tabela 4.10: Média do atraso nas diferentes velocidades em milissegundos para 4 Fluxos - OLSR

Nós	RWP	Int. Conf.	GM	Int. Conf.	MG	Int. Conf.
20	47,95932	10,13216	39,59113	8,57186	42,99203	9,47229
40	38,23449	8,34730	36,20812	7,47194	37,92103	8,78310
60	25,64647	6,07799	27,93016	7,96969	22,69867	5,06164

A seguir é comparado o desempenho do protocolo nos cenários com um e quatro fluxos, para a métrica atraso, relativamente aos valores apresentados nas Figuras 4.7 e 4.8 e nas Tabelas 4.9 e 4.10.

Para os diferentes cenários, as velocidades não têm influência significativa sobre o protocolo. Nos cenários com quatro fluxos verificamos que o atraso aumenta substancialmente relativamente ao obtido nos cenários com um fluxo. Com o aumento do número de fluxos aumenta a carga na rede contribuindo para o congestionamento da rede e para o atraso.

Os resultados apresentados relativos à métrica atraso, para o protocolo OLSR, mostram que os valores obtidos são idênticos para todos os modelos de mobilidade. Por isso, o protocolo é adequado para qualquer um dos modelos nos cenários apresentados.

### Análise do *overhead*

Analizamos, nesta secção, o desempenho dos protocolos AODV e OLSR, com base nos resultados obtidos para a métrica *overhead*, nos diferentes cenários construídos.

A Figura 4.9 contém as tabelas com os resultados obtidos nas redes com um fluxo de tráfego, pelo protocolo AODV, relativos à métrica *overhead*.

Velocidade 0 Km/h				Velocidade 3 Km/h			
Nós	RWP	GM	MG	Nós	RWP	GM	MG
20	228036,2	228045,5	228026,3	20	228022,0	228031,3	228027,3
40	932071,1	932398,4	932320,7	40	932107,3	932344,5	932263,1
60	2094746,6	2097820,3	2097290,3	60	2096110,1	2097918,8	2097662,6

Velocidade 30 Km/h				Velocidade 120 Km/h			
Nós	RWP	GM	MG	Nós	RWP	GM	MG
20	228035,7	228029,4	228028,2	20	228035,5	228013,8	228012,0
40	932079,5	932491,5	932214,9	40	932085,3	932147,4	932317,6
60	2094481,3	2097617,3	2097845,8	60	2095422,6	2097549,4	2097571,7

Figura 4.9: Média do número de mensagens de controlo de tráfego para 1 Fluxo – AODV

Com o aumento do número de nós na rede, existe um número mais elevado de nós a trocar mensagens para criação e manutenção de rotas, originando um aumento do *overhead* na rede.

As tabelas da Figura 4.10 apresentam o valor do *overhead* obtido pelo protocolo AODV, nas redes com quatro fluxos.

Velocidade 0 Km/h				Velocidade 3 Km/h			
Nós	RWP	GM	MG	Nós	RWP	GM	MG
20	227858,0	227848,3	227876,6	20	227870,6	227850,2	227896,1
40	930986,2	930832,2	930887,4	40	931022,1	931008,3	930901,1
60	2090830,9	2091555,9	2092823,8	60	2091473,8	2091228,1	2091720,7

Velocidade 30 Km/h				Velocidade 120 Km/h			
Nós	RWP	GM	MG	Nós	RWP	GM	MG
20	227846,7	227876,6	227844,3	20	227818,4	227818,4	227806,6
40	930806,8	930859,7	930962,0	40	930806,8	930914,5	930696,2
60	2090830,9	2091693,2	2091799,5	60	2090362,5	2091079,2	2091414,2

Figura 4.10: Média do número de mensagens de controlo de tráfego para 4 Fluxos - AODV

Devido à natureza reativa do protocolo, com o aumentando o número de nós na rede, o *overhead* é mais elevado. Este aumento está relacionado com o envio de mensagens de *flooding*.

O aumento da velocidade não tem impacto significativo no valor obtido para o *overhead*, nas redes com um e quatro fluxos. Apesar de em [46] não variarem o número de nós e de fluxos na rede os resultados apresentados vão de encontro aos obtidos neste estudo. Quando é aumentada a velocidade nos cenários o *overhead* produzido pelo protocolo é semelhante.

Os cenários criados com um e quatro fluxos, para o protocolo AODV, apresentam valores muito semelhantes para o *overhead*, o que pode estar relacionado como a forma como o cenário de quatro fluxos é construído. Existem origens diferentes a enviar para o mesmo destino, o que significa que o número de rotas a descobrir e atualizar é menor, originando menos *overhead* na rede.

A Figura 4.11 apresenta as tabelas com os valores obtidos para o *overhead*, pelo protocolo OLSR, nos cenários com um fluxo.

Velocidade 0 Km/h				Velocidade 3 Km/h			
Nós	RWP	GM	MG	Nós	RWP	GM	MG
20	113967,8	113965,0	113968,2	20	113972,1	113965,2	113968,0
40	467060,0	467040,0	467065,9	40	467060,6	467098,6	467044,4
60	1050157,3	1050540,1	1049986,0	60	1050193,1	1049987,7	1050265,3

Velocidade 30 Km/h				Velocidade 120 Km/h			
Nós	RWP	GM	MG	Nós	RWP	GM	MG
20	113965,2	113967,1	113966,2	20	113968,4	113969,9	113964,0
40	467022,7	467103,8	467065,5	40	467004,9	467107,2	467061,8
60	<b>1050566,3</b>	1050279,3	1050346,7	60	1050226,0	1050455,0	1050130,0

Figura 4.11: Média do número de mensagens de controlo de tráfego para 1 Fluxo - OLSR

Aumento o número de nós nos cenários, aumenta o *overhead* na rede devido ao aumento das tabelas de encaminhamento e das rotas que nunca são utilizadas.

Os valores obtidos para o *overhead*, nos cenários construídos com quatro fluxos para o protocolo OLSR são apresentados nas tabelas da Figura 4.12.

Velocidade 0 Km/h				Velocidade 3 Km/h			
Nós	RWP	GM	MG	Nós	RWP	GM	MG
20	113935,2	113945,0	113938,2	20	113971,1	113936,9	113948,7
40	466648,1	466681,1	466540,4	40	466668,3	466677,8	466561,0
60	1047284,8	1046454,9	1047116,7	60	1047336,6	1046134,8	1047513,6

Velocidade 30 Km/h				Velocidade 120 Km/h			
Nós	RWP	GM	MG	Nós	RWP	GM	MG
20	113924,6	113924,9	113925,0	20	113933,1	227818,4	113910,8
40	466664,5	466676,8	466661,8	40	466620,3	466674,1	466575,6
60	1047242,2	1046917,4	1046856,6	60	1046839,1	1047005,6	1046647,4

Figura 4.12: Média do número de mensagens de controlo de tráfego para 4 Fluxos - OLSR

Com o aumento do número de nós nos diferentes cenários, o *overhead* é mais elevado porque existe um aumento das tabelas de encaminhamento, assim como do número de rotas que nunca são utilizadas.

Com o aumento da velocidade verifica-se que os valores obtidos, nas redes com um e quatro fluxos, são semelhantes porque o protocolo consegue manter através da tabela de encaminhamento rotas mais estáveis.

Para os cenários construídos com um e quatro fluxos, o OLSR apresenta valores semelhantes para o *overhead*. Este resultado pode estar relacionado com a forma como a rede de quatro fluxos é construída, uma vez que, podendo existir uma diminuição de destinos relativamente às origens, a tabela de encaminhamento é menor e existem menos atualizações de rotas.

Com base nos resultados apresentados nas tabelas das Figuras 4.9 a 4.12, verificamos que os protocolos apresentam valores semelhantes para a métrica *overhead* nos modelos de mobilidade aplicados. A seguir foi calculado a médias das velocidades relativamente ao número de mensagens de controlo de tráfego, para os vários cenários apresentados com um e quatro fluxos, para os protocolos AODV e OLSR. Os resultados mostram que o protocolo AODV gera um número de mensagens de controlo muito semelhante em todos os modelos de mobilidade e velocidades, para um e quatro fluxos, assim como o protocolo OLSR. Podemos assim concluir que os protocolos apresentam um desempenho idêntico com a utilização dos três modelos de mobilidade.

## 4.5. Resumo

Comparando os cenários com um fluxo para os dois protocolos, relativamente à métrica perdas, o protocolo AODV apresenta melhor desempenho. O OLSR precisa de atualizar constantemente a rota para o destino, para manter a tabela de encaminhamento com informações válidas, enquanto, o AODV reage de forma rápida às mudanças de topologia e só determina a rota quando esta é necessária, o que favorece o protocolo neste tipo de topologia.

No atraso, o AODV apresenta também melhor desempenho que o protocolo OLSR. Com o aumento do número de nós na rede, aumenta o atraso para os dois protocolos devido a existirem rotas mais longas e caminhos com mais congestão.

Na avaliação da métrica *overhead*, o protocolo OLSR apresenta melhor desempenho que o protocolo AODV. Com o aumento da densidade na rede, aumenta o envio de mensagens de *flooding* no AODV, assim como, no OLSR aumenta a tabela de encaminhamento e o número de *broadcast*. No entanto, o protocolo OLSR consegue reduzir o *overhead*, relativamente ao protocolo AODV através da utilização da técnica chamada *Multipoint Relay*. Esta técnica tem como objetivo reduzir o fluxo de mensagens na rede, através da redução do número de *broadcast* e a obtenção do caminho mais curto.

Os resultados obtidos para os cenários construídos com um fluxo, mostram que os modelos de mobilidade utilizados não têm impacto significativo no desempenho dos protocolos para as métricas em estudo. Os protocolos têm desempenho idêntico em todos os modelos. Podemos assim concluir que o modelo de mobilidade utilizado não influencia o desempenho dos protocolos para este tipo de rede.

No cenário com quatro fluxos, para os dois protocolos em estudo, o número de perdas aumenta consideravelmente, relativamente aos cenários com um fluxo. O aumento do número de perdas deve-se ao aumento de tráfego no envio de mensagens. Com o aumento do número de nós, no OLSR, existe uma redução do número das perdas devido ao aumento da conectividade entre os nós. Com o aumento do número de nós no AODV, o desempenho do protocolo mantém-se consistente. A velocidade não tem impacto significativo nos valores obtidos, para as perdas, nos diferentes cenários.

Nos cenários com velocidade moderada (0km/h e 3km/h) o valor do atraso é menor para os dois protocolos. Nos cenários com velocidades superiores, com o aumento do número de nós o atraso aumenta devido ao tempo consumido na descoberta de rota, no caso do AODV. Para o protocolo proativo, com o aumento do número de nós na rede o atraso diminui porque os nós utilizam rotas já existentes, o que vai de encontro à primeira hipótese colocada na secção 4.2.

O protocolo OLSR apresenta melhor desempenho relativamente à métrica *overhead* quando comparado com o protocolo AODV, estando de acordo com a segunda hipótese colocada na secção 4.2. O desempenho do OLSR que está relacionado com a utilização da técnica *Multipoint Relay* por parte do protocolo.

De acordo com os resultados obtidos para a médias das velocidades, relativamente às métricas perdas e atraso, Tabelas 4.4 e 4.8, para o protocolo AODV, nas redes com quatro fluxos, o modelo de mobilidade *Gauss-Markov* permite ao protocolo obter melhor desempenho. Nos cenários construídos consideramos que a velocidade mínima do nó é igual à velocidade máxima, assim, os nós sofrem apenas pequenas alterações na direção permitindo um melhor desempenho do protocolo. Relativamente à métrica *overhead*, o protocolo apresentam desempenho semelhante para os diversos modelos de mobilidade, pois o mesmo número de mensagens geradas em todos os modelos de mobilidade é semelhante.

## 4.6. Aplicação de MANET em situações reais

As redes móveis ad-hoc podem ser utilizadas em vários cenários, como operações de resgate de emergência (incêndios, furacões, inundações), comunicações militares entre outros.

Devido a problemas de encaminhamento, taxa de erros elevada quando comparadas com as redes com a infraestrutura e largura de banda não são conhecidas muitas aplicações reais destas redes. Segundo [47] a rede *Near Term Digital Radio* (NTDR) é usada pelo exército dos Estados Unidos sendo a única e “verdadeira” rede ad-hoc em utilização.

A aplicação das redes ad-hoc dentro do campo militar baseia-se na mobilidade, sobrevivência e auto-organização. Os campos de batalha são caracterizados por forças altamente móveis e o facto de a rede não conseguir manter a comunicação a alta velocidade pode ser desastroso. No campo militar as redes ad-hoc foram utilizadas na guerra do Golfo e na Chechênia.

Devido à importância destas redes no campo militar, a agência *Defense Advanced Research Projects* (DARPA), em 2008, investiu no programa *Intrinsically Assurable Mobile Ad-Hoc NetWork* (IAMANET) que tem como objetivo melhorar o funcionamento das MANET, relativamente à integridade, disponibilidade, confiabilidade, confidencialidade, segurança e não-repúdio na comunicação de dados no futuro.

A aplicação das redes ad-hoc ocorre também com frequência em contexto de emergência. As catástrofes naturais ou as catástrofes causadas pelo homem podem fazer com que a rede de infraestrutura deixe de estar disponível ou não seja confiável, podendo nessa situação ser utilizada uma rede ad-hoc. Neste contexto, as redes ad-hoc foram utilizadas durante o trabalho de socorro às vítimas do desastre no *World Trade Center* em Nova Iorque, em setembro de 2001, e às vítimas das inundações provocadas pelo furacão Katrina em *New Orleans*, em 2005 [48].

O caso mais simples de utilização de uma MANET é quando aplicada a tecnologia *Bluetooth*, por exemplo, quando se faz a transferência de ficheiros via *Bluetooth* entre dois telemóveis. Neste tipo de comunicação é utilizada apenas uma etapa. O protocolo mais adequado para o encaminhamento dos dados é o AODV, devido à sua natureza reativa. O projeto BEDnet [49] permite criar uma MANET *Bluetooth* utilizando vários dispositivos (telemóveis, impressoras, portáteis, etc.), podendo utilizar como protocolos de encaminhamento o AODV ou o DSDV. Para MANET *Bluetooth* de pequenas dimensões o DSDV mostrou-se mais eficiente por requerer menos tempo de processamento no encaminhamento dos pacotes entre os dispositivos que o AODV. Mas, para MANET *Bluetooth* de maiores dimensões o protocolo AODV é preferível devido a descobrir o caminho entre os dispositivos apenas quando precisa de enviar informação [50].

A rede *mesh* sem fios podem ser vista como um tipo especial de MANET. Uma rede *mesh* é composta por vários nós encaminhadores formando uma rede e possibilitando ao utilizador a sua conexão a qualquer um desses nós. Os nós têm a função de repetidores, tendo cada nó uma conexão a um ou mais nós, havendo a possibilidade de existirem vários caminhos entre eles.

Nas redes *mesh* comunitárias os nós encaminhadores sem fio são geralmente instalados no topo dos edifícios e comunicam-se entre si utilizando o protocolo OLSR em modo ad-hoc através de etapas múltiplas, de maneira a encaminhar os pacotes de dados aos seus destinatários. Como exemplos de aplicações reais de redes mesh comunitárias temos a rede *Freifunk*, criada na Alemanha e constituída por mais de 400 nós e a rede *Openwireless* criada na Suíça [50].

## 4.7. Sumário

O estudo apresentado tem como objetivo avaliar o desempenho dos protocolos de encaminhamento AODV e OLSR, utilizando os modelos de mobilidade *Random Waypoint*, *Gauss-Markov* e *Manhattan Grid*. Foram considerados vários cenários de redes com diferentes velocidades e densidades.

O protocolo AODV, nas redes com um fluxo, apresenta melhor desempenho que o protocolo OLSR, nas métricas perdas e atraso, mas na métrica overhead, o OLSR supera o AODV, através da utilização da técnica *Multipoint Relay*. Para este tipo de redes os modelos de mobilidade aplicados mostraram não ter influência no desempenho dos protocolos.

Nas redes com quatro fluxos o protocolo OLSR apresenta melhor desempenho que o AODV, para todas as métricas exceto, nas redes com 20 nós para a métrica perdas e atraso, onde os protocolos apresentam valores semelhantes. Relativamente aos modelos de mobilidade e analisando os resultados obtidos para os diferentes cenários e média das velocidades, para as métricas perdas e atraso, podemos concluir que o modelo *Gauss-Markov* permite obter aos protocolos, para estas redes, um melhor desempenho. Para a métrica *overhead*, os protocolos originam sensivelmente o mesmo número de mensagens em todos os modelos de mobilidade.

## 5. Plano de Trabalho e Implicações

Para a concretização do trabalho proposto “Avaliação de protocolos de encaminhamento em redes móveis ad-hoc” foram definidas várias tarefas e tempo de execução, de acordo com a Figura 5.1.



Figura 5.1: Plano de trabalho inicial

Na impossibilidade de concretizar as tarefas apresentadas no tempo definido inicialmente pelo facto de ser trabalhadora estudante, o plano apresentado na Figura 5.1 foi alterado, sendo concretizadas no primeiro ano as tarefas apresentadas na Figura 5.2, relativas ao primeiro semestre.

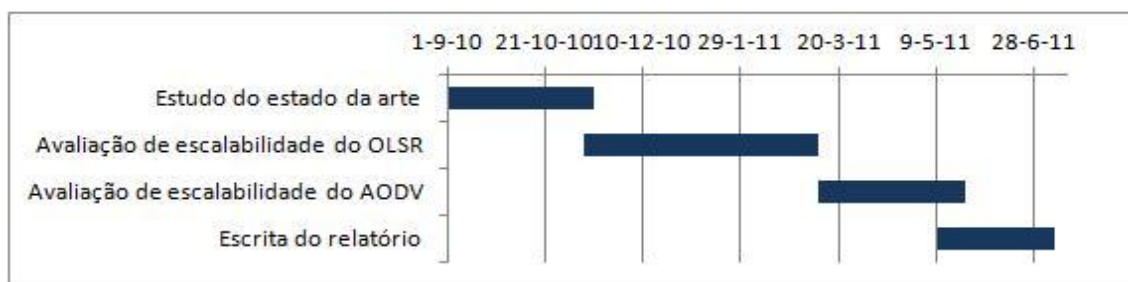


Figura 5.2: Plano de trabalho - primeiro ano

No primeiro ano começou por ser feito um estudo sobre o estado da arte em encaminhamento em MANET. Após este estudo, foi analisado o simulador NS-3, que seria utilizado na realização de simulações, construção da topologia de uma rede móvel *ad-hoc* que permitisse avaliar a escalabilidade do protocolo OLSR, em redes estáticas, e respectivas simulações. Foram também, construídas topologia de redes que permitissem avaliar a mobilidade do protocolo em redes com níveis de carga moderada (16 fluxos). Os resultados obtidos no simulador NS-3 foram comparados com os obtidos no simulador OPNET publicados em [27]. Seguidamente, foi construída a topologia de uma rede móvel *ad-hoc* para avaliar a escalabilidade do protocolo AODV, em redes estáticas, e respectivas simulações. Para concluir as tarefas definidas para o primeiro ano, foi feita a análise dos resultados obtidos para os protocolos nas simulações realizadas e elaborado o presente relatório.

Com base na comparação dos resultados obtidos, para o protocolo OLSR, nos simuladores NS-3 e OPNET, foi elaborado um artigo de título “Encaminhamento em

redes móveis ad-hoc: NS-3 versus OPNET”, submetido à conferência de Redes de Computadores e aprovado, sendo apresentado a 17 de Novembro de 2011.

As tarefas definidas no plano de trabalho inicial, relativas ao segundo semestre, passaram a ser concretizadas no ano lectivo de 2011/2012. Assim, o plano de trabalho inicial é substituído pelo apresentado na Figura 5.3.

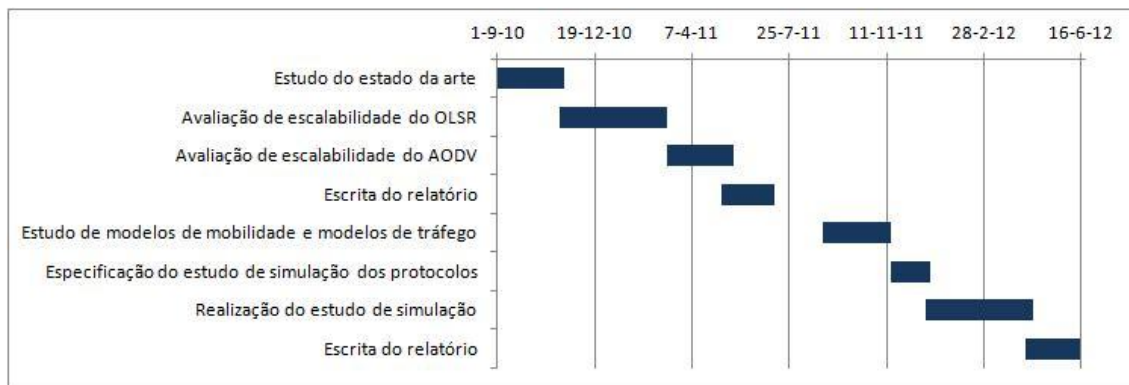


Figura 5.3: Plano de trabalho final

As tarefas definidas, para o ano lectivo de 2011/2012, incluem o estudo dos modelos de mobilidade e de tráfego para MANET. Estando neste trabalho a avaliar protocolos de encaminhamento para redes móveis *ad-hoc* e tendo a mobilidade um impacto significativo no desempenho dos protocolos nestas redes, fazendo com que determinados protocolos tenham melhor desempenho para determinados modelos de mobilidade, é importante fazer o estudo dos modelos de mobilidade e verificar o impacto dos mesmos nos protocolos em estudo. Assim, após a conclusão da tarefa anterior, será feita a especificação do estudo de simulação para avaliação dos protocolos de encaminhamento AODV e OLSR com diferentes modelos de mobilidade, implementados na ferramenta BonnMotion [32], e modelos de tráfego, definidos na tarefa anterior, aos quais se seguirá o estudo de simulação e análise dos resultados obtidos. Para concluir o trabalho será escrito o relatório final.



## 6. Conclusões e Trabalhos Futuros

---

Neste trabalho, foi estudado o comportamento do parâmetro de escalabilidade dos protocolos OLSR e AODV para redes estáticas. Através da análise da métrica perda de pacotes e atraso, foi observado que os protocolos são adequados para redes de baixa e média densidade. Os protocolos devido à sua natureza proativa e reativa apresentam problemas de escalabilidade quando as redes apresentam densidade mais elevada.

Foi também estudada a mobilidade e escalabilidade do protocolo OLSR, através dos resultados obtidos nos simuladores NS-3 e OPNET, para redes com carga moderada. Os resultados obtidos mostram que o protocolo OLSR apresenta problemas de escalabilidade para redes com um número de nós mais elevado.

Relativamente ao estudo da mobilidade no protocolo, os resultados mostram que o modelo de mobilidade utilizado, *Random Waypoint*, apresenta problemas, no entanto, este modelo continua a ser muito utilizado na literatura devido a ser considerado um modelo de mobilidade de "referência" para avaliar os protocolos de encaminhamento em MANET, devido à sua simplicidade e grande disponibilidade. Em alguns trabalhos, como por exemplo em [5], o modelo é utilizado sem definir um valor para o tempo de pausa, dando origem a que o modelo tenha um comportamento inadequado.

O trabalho envolveu também, o estudo de diferentes modelos de mobilidade e a construção de cenários utilizando esses modelos, para avaliar o desempenho dos protocolos OLSR e AODV, relativamente à mobilidade e escalabilidade, através de resultados obtidos no simulador NS-3. Sendo também avaliado o desempenho dos protocolos relativamente à métrica *overhead*.

No estudo efetuado verificamos que os protocolos apresentam desempenhos diferentes para os vários cenários construídos de acordo com os níveis de carga na rede.

Nos cenários onde foi utilizado um fluxo verificamos que o protocolo AODV apresenta melhor desempenho relativamente à métrica perdas e atraso que o protocolo OLSR, devido à sua natureza reativa. No entanto, relativamente à métrica *overhead* é o protocolo OLSR que apresenta melhor desempenho. Este desempenho deve-se à utilização da técnica chamada de *Multipoint Relay*. Esta técnica permite ao protocolo reduzir o número de nós a difundir informações através da rede.

Dos resultados obtidos para os cenários construídos com um fluxo verificamos que os modelos de mobilidade utilizados não têm impacto significativo no desempenho dos protocolos para as métricas em estudo, uma vez que, o desempenho dos protocolos é idêntico em todos os modelos.

Nos cenários com quatro fluxos verificamos que houve um aumento significativo do número de perdas, relativamente aos cenários construídos com um fluxo, para os protocolos em estudo. Tendo como uma das causas o congestionamento da rede provocado pelo aumento da carga na rede.

Nestes cenários o protocolo OLSR apresenta melhor desempenho que o protocolo AODV, relativamente à métrica perdas. Este resultado vai de encontro ao resultado obtido em [42], com o aumento do número de nós na rede verifica-se uma diminuição do número de perdas devido a existir uma maior conectividade entre os nós. Nos cenários com velocidade mais elevadas, verificamos que o protocolo OLSR apresenta melhor desempenho para a métrica atraso que o protocolo AODV. No protocolo OLSR com o aumento do número de nós o atraso diminui. Para a métrica *overhead*, de acordo com os valores obtidos, o protocolo OLSR apresenta melhor desempenho que o protocolo AODV.

Para o protocolo OLSR os modelos de mobilidade mostram não ter influência no seu desempenho para todas as métricas em estudo, enquanto, para o protocolo AODV os resultados obtidos mostram que o modelo de mobilidade *Gauss-Markov* permite obter melhor desempenho ao protocolo, relativamente às métricas perdas e atraso. Na métrica *overhead* os modelos de mobilidade não têm impacto significativo no desempenho do protocolo.

Trabalhos futuros a serem realizados com base neste trabalho envolvem a utilização de mais fluxos de tráfego, métricas adicionais, tais como o comprimento do caminho e o *Jitter*. No modelo de mobilidade *Gauss-Markov* utilizar vários valores para o parâmetro de aleatoriedade e analisar o seu efeito sobre o desempenho dos protocolos.

## Referências

---

1. Charles Perkins, Elizabeth Belding-Royer and S. Das (2003). Ad-hoc on-demand distance vector (aodv) routing. RFC 3561, IETF Network Working Group, July 2003.
2. T. Clausen and P. Jacquet (2003). Optimized Link State Routing (OLSR). RFC 3626, IETF Networking Group, Outubro 2003.
3. Georgy Sklyarenko (2003). AODV Routing Protocol. Seminar Technische Informatik, Freie Universitat Berlin, Germany.
4. Preetam Suman, Dhananjay Bisen, Poonam Tomar, Vikas Seiwar and Rajesh Shukla (2009). Comparative study of Routing Protocols for Mobile Ad-hoc Networks. Bhopal, India.
5. Alexander Klein (2008). Performance Comparison and Evolution of AODV, OLSR, and SBR in Mobile Ad.Hoc Networks. Innovation Works, EADS Deutschland GmbH, Munich.
6. Aleksandr Huhtonen (2004). Comparing AODV and OLSR Routing Protocols. Helsinki University of Technology, Telecommunication Software and Multimedia Laboratory.
7. R. Aoudjit, M. Lalam, M. Belkadi and M. Daoui (2004). Impact of Mobility on the Ad-hoc On-Demand Distance Vector Routing Protocol. Département d'Informatique.
8. Ioannis Glaropoulos, Athanasios Makris and Babak Tighnavard (2007). Performance Analysis of OLSR and Comparison with OSPF and AODV. KTH Royal Institute of Technology.
9. Arun Kumar B. R., Lokanatha C. Reddy and Prakash S. Hiremath (2008). Performance Comparison of Wireless Mobile Ad-hoc Network Routing Protocols. IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security, VOL. 8 N°6, June 2008, pp. 337-343.
10. S. Gowrishankar, T. G. Basavaraju, M. Singh Kumar Sarkar (2007). Scenario based Performance Analysis of AODV and OLSR in Mobile Ad hoc Networks. Proceedings of the 24th South East Asia Regional Computer Conference, Bangkok, Thailand.

11. Anis Laouti, Paul Muhlethaler, Abdellah Najid and Epiphane Plakoo (2002). Simulation Results of the OLSR Routing Protocol for Wireless Network. INRIA Rocquencourt.
12. Thomas Heide Clausen, Gitte Hansen, Lars Christensen and Gerd Behrmann (2001). The Optimized Link State Routing Protocol Evaluation through Experiments and Simulation. Mindpass Center for Distributed Systems, Aalborg University.
13. Andreas Tonnesen (2011). Mobile Ad-Hoc Networks homepage.  
<http://www.olsr.org/docs/wos3-olsr.pdf>
14. Nicklas Beijar (2008). Zone Routing Protocol (ZRP). Networking Laboratory, Helsinki University of Tecnology.
15. Prince Samar, Marc R. Pearlman, Zygmunt J. Haas (2004). Independent Zone Routing: An Adaptive Hybrid Routing Framework for Ad Hoc Wireless Networks. IEEE/ACM Transactions on Networking, Vol. 12, N°4, August 2004, pp. 595-606.
16. Tzay-Farn Shih, Chao-Cheng Shih, Chin-Ling Chen (2008). Location-Based Multicast Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks. Department of Computer Science and Information Engineering, Chaoyang University of Tecnology.
17. Young-Bae, Nitin H. Vaidya (2000). Location-Aided Routing (LAR) in mobile ad hoc networks. Wireless Networks 6, 2000, pp. 307–321.
18. Guoyou He (2010). Destination-Sequenced Distance Vector (DSDV) Protocol. Networking Laboratory, Helsinki University of Technology.
19. Samir R. Das, Charles E. Perkins, Elizabeth M. Royer (2007). Performance Comparison of Two On-demand Routing Protocols for Ad Hoc Networks. Division of Computer Science - The University of Texas, Networking and Security Center - Sun Microsystems Laboratories, Department of Electrical and Computer Engineering - University of California.
20. Tracy Camp, Jeff Boleng, Vanessa Davies (2002). A Survey of Mobility Models for Ad Hoc Network Research. Dept. of Math. and Computer Sciences, Colorado School of Mines, Golden.
21. Mohd Izuan Mohd Saad, Zuriati Ahmad Zukarnain (2009). Performance Analysis of Random-Based Mobility Models in MANET Routing Protocol. European Journal of Scientific Research, Vol.32, No.4, 2009, pp.444-454.
22. NS3 (2011). The NS3 website. <http://www.nsnam.org/>
23. Kurkowski, S., Camp, T., Colagrosso, M. (2005). Manet simulation studies: the incredible. In: SIGMOBILE Mob. Comput. Commun. Rev. Volume 9, New York, NY, USA, ACM (2005), pp.50–61.

24. William Navidi and Tracy Camp (2003). Stationary Distributions for the Random Waypoint Mobility Model. Department of Mathematical and Computer Sciences, Colorado School of Mines, Golden, Colorado 80401.
25. A. B. Bondi (2000). Characteristics of scalability and their impact on performance. In WOSP 00: Proceedings of the 2nd international workshop on Software and performance. New York, NY, USA: ACM Press, 2000, pp. 195–203.
26. OPNET (2011). The OPNET website. <http://www.opnet.com/>
27. David Palma and Marilia Curado (2009). Inside-out OLSR Scalability Analysis. Department of Informatics Engineering, Centre for Informatics and Systems University of Coimbra.
28. Majid Shakeri, Ebrahim Hosseini (2010). Simulation and evaluation of routing protocols in wireless mobile Ad Hoc network. Islamic Azad University, Natanz Branch, Iran.
29. Shan Zhou and Lei Ying (2009). On Delay Constrained Multicast Capacity of Large-Scale Mobile Ad-Hoc Networks. Electrical and Computer Engineering.
30. Min Qin and Roger Zimmermann (2010). An Adaptive Strategy for Mobile Ad Hoc Media Streaming. Senior Member, IEEE.
31. Gilberto Flores Lucio, Marcos Paredes-Farrera, Emmanuel Jammeh, Martin Fleury, Martin J. Reed (2003). OPNET Modeler and Ns-2: Comparing the Accuracy Of Network Simulators for Packet-Level Analysis using a Network Testbed. Electronic Systems Engineering Department, University of Essex, United Kingdom.
32. Bonnmotion (2011). The Bonnmotion website.  
<http://net.cs.uni-bonn.de/wg/cs/applications/bonnmotion/>
33. Tsu-Wei Chen and Mario Gerla (1998). Global State Routing: A New Routing Scheme for Ad-hoc Wireless Networks. Computer Science Department, University of California, Los Angeles.
34. NS2 (2011). The NS2 website. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>
35. GloMoSim (2011). The GloMoSim website.  
<http://pcl.cs.ucla.edu/projects/glomosim/>
36. QualNet (2011). The QualNet website. <http://www.qualnet.com/content/>
37. G. Anastasi, M. Conti, E. Gregori (2003). IEEE 802.11 Ad Hoc Networks: Protocols, Performance and Open Issues. In Mobile Ad hoc networking, S. Basagni, M. Conti, S. Giordano, I. Stojmenovic (Editors), IEEE Press and John Wiley and Sons, Inc., New York.

38. Bhavyesh Divecha, Ajith Abraham, Crina Grosan, Sugata Sanyal (2007). Impact of Node Mobility on MANET Routing Protocols Models. Mumbai University, India.
39. Valentina Timcenko, Mirjanas Stojanovic, Slavica Bostjancic Raras (2009). MANET Routing Protocols vs. Mobility Models: Performance Analysis and Comparison. Institute Mihailo Pupin, Belgrade, Serbia.
40. B. Liang and Z. J. Haas (1999). Predictive distance-based mobility management for pcs networks. In Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM), New York, NY.
41. J. Ariyakhajorn, P. Wannawilai and C. Sathitwiriawong (2006). A Comparative Study on Random Waypoint and Gauss-Markov Mobility Models in the Performance Evaluation of MANET. Proceedings of the International Symposium on Communications and Information Technologies, September 2006, pp. 894-899.
42. H. Narra, Y. Cheng, E. K. Çetinkaya, J. P. Rohrer and J. P. G. Sterbenz (2011). Destination-Sequenced Distance Vector (DSDV) Routing Protocol Implementation in ns-3. Information and Telecommunication Technology Center, University of Kansas, USA.
43. S.Karthik, S.Kannan, V.P.Arunachalam, T.Ravichandran, M.L.Valarmathi (2010). An Investigation about Performance Comparison of Multi-Hop Wireless Ad-Hoc Network Routing Protocols in MANET. IJCSI International Journal of Computer Science Issues, Vol. 7, Issue 3, No 6, May 2010, pp. 35-41.
44. Natarajan Meghanathan (2010). Impact of the Gauss-Markov Mobility Model on Network Connectivity, Lifetime and Hop Count of Routes for Mobile Ad hoc Networks. Journal of Networks, Vol. 5, N° 5, May 2010, pp. 509-516.
45. Y. K. Hassan, M. H. A. El-Aziz, A. S. A. El-Radi (2010). Performance Evolution of Mobility Speed over MANET Routing Protocols. Department of Information Systems, Faculty of Computer & Information Systems, Ain Shams University, Egypt.
46. Preetha Prabhakaran and Ravi Sankar (2006). Impact of Realistic Mobility Models on Wireless Networks Performance. Department of Electrical Engineering. University of South Florida, USA.
47. M. Kumar and R. Mishra (2012). An Overview of MANET: History, Challenges and Applications. Indian Journal of Computer Science and Engineering (IJCSE), Vol. 3, No. 1, Feb-Mar 2012, pp. 121-125.
48. Dawoud D.S., Richard L. Gordon, Ashraph Suliman and Kasmir Raja S.V. (2011). Trust Establishment in Mobile Ad Hoc Networks: Key Management. In the Mobile Ad-Hoc Networks: Applications. Xin Wang, Publisher: InTech, pp: 151-190.

- <http://www.intechopen.com/books/mobile-ad-hoc-networks-applications>
49. Collaborative-bluetooth-EduMANET (2012). The collaborative-bluetooth-EduMANET website.  
<http://ows.edb.utexas.edu/site/collaborative-bluetooth-edumanet>
50. J. Breno (2010). Construindo Redes Ad hoc 802.11 e Bluetooth com Linux.  
<http://pt.scribd.com/doc/46013190/Redes-AdHoc-e-Mesh>.





## Anexos

---

### Anexo A – Avaliação em cenários estáticos

Este anexo apresenta as tabelas com os resultados dos testes apresentados no capítulo 3.3, relativos aos protocolos OLSR e AODV.

**Tabela A.1:** Média de Perdas (em %) do tráfego para 2 Fluxos

Nós	OLSR		AODV	
	Média	Intervalo Confiança	Média	Intervalo Confiança
10	11,89444	6,807425	44,32778	9,61464
20	14,21056	7,578203	42,00611	6,261099
30	0,693333	0,019584	36,66611	7,236738
40	0,660833	0,021929	39,66722	5,596025
50	2,312222	3,236566	36,34417	7,540094
60	21,15667	6,320602	37,865	8,008984
70	19,83	5,902266	35,65917	7,940795
80	20,45611	6,380451	31,74483	8,1091
90	20,98806	2,932552	37,26417	6,320234

**Tabela A.2:** Média de Perdas (em %) do tráfego para 4 Fluxos

Nós	OLSR		AODV	
	Média	Intervalo Confiança	Média	Intervalo Confiança
10	31,62181	7,60356	59,81875	4,217752
20	18,33514	7,708434	54,25167	5,026756
30	9,249167	4,70958	51,71181	5,337949
40	5,115	4,046913	48,41972	4,746073
50	37,53806	4,806318	55,05458	4,600163
60	35,78264	3,396713	52,57236	4,489431
70	32,62778	4,094659	55,28014	5,588228
80	28,42764	4,548442	51,475	5,788025
90	34,12139	4,395803	58,08889	6,997506

**Tabela A.3:** Média de Perdas (em %) do tráfego para 16 Fluxos

Nós	OLSR		AODV	
	Média	Intervalo Confiança	Média	Intervalo Confiança
10	27,70024	7,978174	64,29497	3,550809
20	31,11063	7,724427	57,54608	5,126114
30	12,84344	6,864394	58,15431	4,524539
40	8,159132	4,314177	52,66403	5,283121
50	3,769132	1,981461	53,7251	5,480548
60	4,045174	4,59E-07	55,41028	4,835001
70	30,09104	4,933535	49,81667	7,100325
80	31,64587	3,968606	52,75885	4,257333
90	30,47955	3,839605	66,00656	5,50709

**Tabela A.4:** Média do Atraso do tráfego em segundos para 2 Fluxos

Nós	OLSR		AODV	
	Média	Intervalo Confiança	Média	Intervalo Confiança
10	0,001194	0,000105	0,034845	0,066658
20	0,004219	0,004162	0,00073	0,000231
30	0,001369	0,000098	0,001158	0,000536
40	0,001433	0,000152	0,002967	0,003485
50	0,00155	0,000157	0,008153	0,008
60	0,006409	0,003018	0,01367	0,01477
70	0,005231	0,002902	0,011126	0,007732
80	0,015937	0,006689	0,009742	0,008265
90	0,037717	0,009154	0,02042	0,009889

**Tabela A.5:** Média do Atraso do tráfego em segundos para 4 Fluxos

Nós	OLSR		AODV	
	Média	Intervalo Confiança	Média	Intervalo Confiança
10	0,007302	0,005503	0,002612	0,000944
20	0,002774	0,001196	0,003485	0,001869
30	0,001738	0,00069	0,004837	0,006023
40	0,003617	0,001995	0,004635	0,003583
50	0,010339	0,004191	0,008368	0,006285
60	0,011224	0,00427	0,008859	0,00567
70	0,017719	0,006474	0,051755	0,055869
80	0,026163	0,00765	0,025058	0,014803
90	0,056682	0,010687	0,051153	0,013804

**Tabela A.6:** Média do Atraso do tráfego em segundos para 16 Fluxos

Nós	OLSR		AODV	
	Média	Intervalo Confiança	Média	Intervalo Confiança
10	0,004772	0,001806	0,008908	0,005485
20	0,004604	0,001944	0,005304	0,001891
30	0,00638	0,00188	0,006789	0,004265
40	0,007075	0,001595	0,035344	0,010656
50	0,006101	0,000571	0,023433	0,011334
60	0,006718	0,00044	0,01997	0,00887
70	0,019	0,004269	0,059575	0,048074
80	0,03661	0,007477	0,037764	0,010475
90	0,051402	0,007083	0,062582	0,015634

## Anexo B – Avaliação em cenários móveis

Este anexo apresenta as tabelas com os resultados dos testes apresentados no capítulo 3.4, relativos ao protocolo OLSR.

**Tabela B.1:** Média de Perdas (em %) do tráfego para 16 Fluxos

Nós	Velocidade	0m/s	0,83m/s	8,33m/s	33,33m/s
10	Média	27,70024	55,80014	51,57087	48,50622
	Desvio padrão	22,29544	11,3843	9,044024	8,188886
20	Média	31,11063	52,21861	50,09028	50,1941
	Desvio padrão	21,58633	13,6055	12,92026	11,38285
30	Média	12,84344	44,70889	44,1324	37,90563
	Desvio padrão	19,18292	10,89995	7,073803	6,8607
40	Média	8,159132	39,81545	38,64396	38,49438
	Desvio padrão	12,0562	13,57662	7,721398	5,616311
50	Média	3,769132	33,83455	35,28451	34,84479
	Desvio padrão	5,537299	13,92097	10,3138	8,237318
60	Média	4,045174	28,91875	28,91875	30,90823
	Desvio padrão	1,28E-06	8,614105	8,614105	10,58073
70	Média	30,09104	34,09479	29,61528	29,96712
	Desvio padrão	13,78703	13,87535	8,917901	9,076075
80	Média	31,64587	34,58042	33,81413	30,33722
	Desvio padrão	11,09048	10,59035	9,166216	7,169671
90	Média	30,47955	27,99538	28,56247	26,14319
	Desvio padrão	10,72998	8,591971	9,306424	10,28981

**Tabela B.2:** Média do Atraso do tráfego em segundos para 16 Fluxos

Nós	Velocidade	0m/s	0,83m/s	8,33m/s	33,33m/s
10	Média	0,004772	0,011437	0,046028	0,049695
	Desvio padrão	0,005046	0,013614	0,029446	0,025522
20	Média	0,004604	0,014651	0,053212	0,049568
	Desvio padrão	0,005433	0,018728	0,024182	0,026993
30	Média	0,00638	0,01516	0,04703	0,034171
	Desvio padrão	0,005255	0,012804	0,019073	0,013363
40	Média	0,007075	0,012585	0,035763	0,042644
	Desvio padrão	0,004456	0,011927	0,013936	0,012244
50	Média	0,006101	0,013545	0,038688	0,036212
	Desvio padrão	0,001554	0,012557	0,021593	0,014305
60	Média	0,006718	0,027567	0,027567	0,032487
	Desvio padrão	0,001231	0,011035	0,011035	0,016685
70	Média	0,019	0,025899	0,042474	0,034035
	Desvio padrão	0,011929	0,020416	0,023522	0,014687
80	Média	0,03661	0,048897	0,048841	0,045282
	Desvio padrão	0,020896	0,025053	0,021095	0,01596
90	Média	0,051402	0,053644	0,059748	0,052957
	Desvio padrão	0,019794	0,01997	0,017852	0,021007

## Anexo C – Avaliação com vários modelos de mobilidade

Este anexo apresenta as tabelas com os resultados dos testes apresentados no capítulo 4, para os protocolos AODV e OLSR utilizando vários modelos de mobilidade.

### Random Waypoint - AODV

**Tabela C.1:** Média de Perdas (em %) do tráfego para 1 Fluxo - RWP

Nós	Velocidade	0m/s	0,83m/s	8,33m/s	33,33m/s
20	Média	0,005	0,009444	0,023333	0,004444
	Desvio padrão	0,027386	0,036009	0,053175	0,024343
40	Média	0,0098	0,012885	0,019028	0,008711
	Desvio padrão	0,01	0,028333	0,036667	0,045
60	Média	0,038056	0,05776	0,06196	0,071939
	Desvio padrão	0,013618	0,020669	0,022172	0,025743

**Tabela C.2:** Média do Atraso do tráfego em milissegundos para 1 Fluxo - RWP

Nós	Velocidade	0m/s	0,83m/s	8,33m/s	33,33m/s
20	Média	0,393333	0,386111	0,396111	0,385556
	Desvio padrão	0,020342	0,022778	0,023441	0,023866
40	Média	0,007279	0,008151	0,008388	0,00854
	Desvio padrão	0,383889	0,385556	0,385	0,401667
60	Média	0,022524	0,023462	0,022468	0,081102
	Desvio padrão	0,00806	0,008395	0,00804	0,029022

**Tabela C.3:** Média do número de mensagens de controlo de tráfego para 1 Fluxo - RWP

Nós	Velocidade	0m/s	0,83m/s	8,33m/s	33,33m/s
20	Média	228036,2	228022	228035,7	228035,5
	Desvio padrão	150,1059	164,6096	152,1927	158,4661
40	Média	932071,1	932107,3	932079,5	932085,3
	Desvio padrão	2174,914	2086,44	2207,638	2114,804
60	Média	2094747	2096110	2094481	2095423
	Desvio padrão	228036,2	228022	228035,7	228035,5

**Tabela C.4:** Média de Perdas (em %) do tráfego para 4 Fluxos - RWP

Nós	Velocidade	0m/s	0,83m/s	8,33m/s	33,33m/s
20	Média	57,29972	54,93458	52,03681	49,84125
	Desvio padrão	14,94359	12,19275	8,868035	7,657853
40	Média	52,78042	52,27292	49,86361	51,51597
	Desvio padrão	20,84937	10,01447	7,743947	9,016077
60	Média	56,05333	51,80625	50,1275	46,83556
	Desvio padrão	9,797252	12,59629	7,126881	7,376199

**Tabela C.5:** Média do Atraso do tráfego em milissegundos para 4 Fluxos - RWP

Nós	Velocidade	0m/s	0,83m/s	8,33m/s	33,33m/s
20	Média	5,402283	24,46742	56,26587	54,79357
	Desvio padrão	9,911504	24,08332	25,79522	25,10789
40	Média	5,253806	24,79892	54,8496	67,01319
	Desvio padrão	10,11148	25,63244	23,65723	27,35392
60	Média	10,09988	28,75625	65,10773	61,30049
	Desvio padrão	15,79479	22,84225	24,40573	29,26649

**Tabela C.6:** Média do número de mensagens de controlo de tráfego para 4 Fluxos - RWP

Nós	Velocidade	0m/s	0,83m/s	8,33m/s	33,33m/s
20	Média	227858	227870,6	227846,7	227818,4
	Desvio padrão	199,9377	179,7737	209,5024	210,2441
40	Média	930986,2	931022,1	930806,8	930806,8
	Desvio padrão	2197,159	2224,753	2167,185	2167,185
60	Média	786,2287	796,103	775,5031	775,5031
	Desvio padrão	2091847	2091474	2090831	2090363

## Random Waypoint - OLSR

**Tabela C.7:** Média de Perdas (em %) do tráfego para 1 Fluxo - RWP

Nós	Velocidade	0m/s	0,83m/s	8,33m/s	33,33m/s
20	Média	0,393333	0,386111	0,396111	0,385556
	Desvio padrão	0,020342	0,022778	0,023441	0,023866
40	Média	0,007279	0,008151	0,008388	0,00854
	Desvio padrão	0,383889	0,385556	0,385	0,401667
60	Média	0,022524	0,023462	0,022468	0,081102
	Desvio padrão	0,00806	0,008395	0,00804	0,029022

**Tabela C.8:** Média do Atraso do tráfego em milissegundos para 1 Fluxo - RWP

Nós	Velocidade	0m/s	0,83m/s	8,33m/s	33,33m/s
20	Média	1,029864	1,030103	1,030103	1,030056
	Desvio padrão	0,00345	0,003526	0,003438	0,003656
40	Média	0,001234	0,001262	0,00123	0,001308
	Desvio padrão	1,175469	1,175473	1,175113	1,175135
60	Média	0,006637	0,008373	0,007593	0,006054
	Desvio padrão	0,002375	0,002996	0,002717	0,002166

**Tabela C.9:** Média do número de mensagens de controle de tráfego para 1 Fluxo - RWP

Nós	Velocidade	0m/s	0,83m/s	8,33m/s	33,33m/s
20	Média	113967,8	113972,1	113965,2	113968,4
	Desvio padrão	18,89061	20,78851	25,11502	24,90063
40	Média	467060	467060,6	467022,7	467004,9
	Desvio padrão	205,2086	207,041	190,9945	211,9404
60	Média	1050157	1050193	1050566	1050226
	Desvio padrão	678,2281	758,352	774,1256	664,3211

**Tabela C.10:** Média de Perdas (em %) do tráfego para 4 Fluxos - RWP

Nós	Velocidade	0m/s	0,83m/s	8,33m/s	33,33m/s
20	Média	57,85633	57,35514	51,29847	53,42875
	Desvio padrão	13,64045	9,760137	7,978335	7,482881
40	Média	4,881081	3,492556	2,854958	2,677666
	Desvio padrão	48,49153	47,20278	45,15167	43,54847
60	Média	11,09055	13,33312	7,343167	9,575868
	Desvio padrão	3,968631	4,771106	2,62767	3,426617

**Tabela C.11:** Média do Atraso do tráfego em milissegundos para 4 Fluxos - RWP

Nós	Velocidade	0m/s	0,83m/s	8,33m/s	33,33m/s
20	Média	12,13399	38,79855	64,65652	76,24823
	Desvio padrão	16,9227	39,86959	32,39995	24,06724
40	Média	19,94931	28,76771	54,08219	50,13873
	Desvio padrão	19,13677	23,74685	27,45267	22,97162
60	Média	11,66824	24,81024	32,50732	33,60008
	Desvio padrão	14,67986	21,77862	16,66475	14,8179

**Tabela C.12:** Média do número de mensagens de controle de tráfego para 4 Fluxos - RWP

Nós	Velocidade	0m/s	0,83m/s	8,33m/s	33,33m/s
20	Média	113935,2	113971,1	113924,6	113933,1
	Desvio padrão	34,56796	143,2155	42,53962	38,40559
40	Média	12,36976	51,24807	15,22233	13,74301
	Desvio padrão	466648,1	466668,3	466664,5	466620,3
60	Média	220,8265	277,4466	213,8034	322,3421
	Desvio padrão	79,02029	99,28117	76,50717	115,3465

## Gauss-Markov - AODV

**Tabela C.13:** Média de Perdas (em %) do tráfego para 1 Fluxo - GM

Nós	Velocidade	0m/s	0,83m/s	8,33m/s	33,33m/s
20	Média	0,013333	0,022778	0,018333	0,018333
	Desvio padrão	0,040684	0,051877	0,047616	0,047616
40	Média	0,037778	0,038889	0,031667	0,032778
	Desvio padrão	0,063868	0,065702	0,058452	0,060566
60	Média	0,077222	0,058333	0,043333	0,07
	Desvio padrão	0,087152	0,068053	0,067466	0,079558

**Tabela C.14:** Média do Atraso do tráfego em milissegundos para 1 Fluxo - GM

Nós	Velocidade	0m/s	0,83m/s	8,33m/s	33,33m/s
20	Média	1,019771	1,019705	1,019269	1,020695
	Desvio padrão	0,002343	0,002791	0,002252	0,006325
40	Média	1,0537	1,047137	1,054982	1,056486
	Desvio padrão	0,026665	0,004772	0,032004	0,030622
60	Média	1,106891	1,105868	1,116081	1,116738
	Desvio padrão	0,02927	0,033999	0,048445	0,061804

**Tabela C.15:** Média do número de mensagens de controlo de tráfego para 1 Fluxo - GM

Nós	Velocidade	0m/s	0,83m/s	8,33m/s	33,33m/s
20	Média	228045,5	228031,3	228029,4	228013,8
	Desvio padrão	112,6296	129,2226	143,3196	141,5069
40	Média	40,30325	46,24086	51,28533	50,63668
	Desvio padrão	932398,4	932344,5	932491,5	932147,4
60	Média	1793,24	1727,286	1306,746	1760,037
	Desvio padrão	641,691	618,09	467,6046	629,8097

**Tabela C.16:** Média de Perdas (em %) do tráfego para 4 Fluxos - GM

Nós	Velocidade	0m/s	0,83m/s	8,33m/s	33,33m/s
20	Média	53,5	55,16764	53,01514	46,73208
	Desvio padrão	13,51642	13,02422	7,172784	7,151118
40	Média	52,38431	51,75694	50,01389	47,99139
	Desvio padrão	11,73926	11,74557	8,1712	9,06766
60	Média	49,43931	48,72389	51,23333	45,955
	Desvio padrão	14,58101	12,93737	9,214821	6,285433

**Tabela C.17:** Média do Atraso do tráfego em milissegundos para 4 Fluxos - GM

Nós	Velocidade	0m/s	0,83m/s	8,33m/s	33,33m/s
20	Média	3,772857	19,62257	43,04096	52,49037
	Desvio padrão	6,939861	23,81569	27,24987	19,6411
40	Média	9,227826	13,18313	54,52282	53,59574
	Desvio padrão	17,06204	17,33721	27,45847	27,28029
60	Média	10,95874	12,91784	65,11968	56,6571
	Desvio padrão	19,14913	13,77194	40,9815	18,28275

**Tabela C.18:** Média do número de mensagens de controlo de tráfego para 4 Fluxos - GM

Nós	Velocidade	0m/s	0,83m/s	8,33m/s	33,33m/s
20	Média	227848,3	227850,2	227876,6	227818,4
	Desvio padrão	163,6325	188,7311	145,5384	210,2441
40	Média	930849,5	931008,3	930859,7	930914,5
	Desvio padrão	1854,768	2092,629	1978,193	1870,468
60	Média	2091556	2091228	2091693	2091079
	Desvio padrão	7739,049	8112,485	8178,62	8287,53

## Gauss-Markov - OLSR

**Tabela C.19:** Média de Perdas (em %) do tráfego para 1 Fluxo - GM

Nós	Velocidade	0m/s	0,83m/s	8,33m/s	33,33m/s
20	Média	0,378889	0,384444	0,385556	0,385556
	Desvio padrão	0,022715	0,024734	0,022203	0,026886
40	Média	0,387222	0,382222	0,383333	0,38
	Desvio padrão	0,025402	0,024343	0,025143	0,023325
60	Média	0,391111	0,382778	0,394444	0,383889
	Desvio padrão	0,058842	0,032602	0,06164	0,02121

**Tabela C.20:** Média do Atraso do tráfego em milissegundos para 1 Fluxo - GM

Nós	Velocidade	0m/s	0,83m/s	8,33m/s	33,33m/s
20	Média	1,029919	1,030051	1,030287	1,030245
	Desvio padrão	0,002941	0,003078	0,003007	0,003216
40	Média	1,177054	1,176505	1,176696	1,176886
	Desvio padrão	0,00574	0,008163	0,007111	0,006782
60	Média	1,776353	1,77861	1,772305	1,772156
	Desvio padrão	0,030398	0,024419	0,033402	0,024929

**Tabela C.21:** Média do número de mensagens de controlo de tráfego para 1 Fluxo - GM

Nós	Velocidade	0m/s	0,83m/s	8,33m/s	33,33m/s
20	Média	113965	113965,2	113967,1	113969,9
	Desvio padrão	23,51669	18,14007	20,31261	19,58949
40	Média	467040	467098,6	467103,8	467107,2
	Desvio padrão	157,6485	221,7289	154,9751	162,5419
60	Média	1050540	1049988	1050279	1050455
	Desvio padrão	821,6554	750,0076	855,0167	925,4264

**Tabela C.22:** Média de Perdas (em %) do tráfego para 4 Fluxos - GM

Nós	Velocidade	0m/s	0,83m/s	8,33m/s	33,33m/s
20	Média	56,03028	57,92694	53,04708	50,64667
	Desvio padrão	14,02744	12,24778	10,54443	7,319784
40	Média	47,53292	44,21597	45,47139	40,25375
	Desvio padrão	13,08145	15,14397	7,977882	9,666613
60	Média	35,53625	30,23125	34,27389	32,5025
	Desvio padrão	13,12936	14,4274	11,67095	8,987151



**Tabela C.23:** Média do Atraso do tráfego em milissegundos para 4 Fluxos - GM

Nós	Velocidade	0m/s	0,83m/s	8,33m/s	33,33m/s
20	Média	12,11774	20,29245	70,23321	55,72113
	Desvio padrão	14,3383	21,44974	34,73195	25,2981
40	Média	19,93274	20,42475	54,45786	50,01712
	Desvio padrão	15,8214	15,96576	23,31452	28,42126
60	Média	24,46841	15,15076	37,29367	34,80782
	Desvio padrão	28,57735	17,94283	24,16958	18,39722

**Tabela C.24:** Média do número de mensagens de controlo de tráfego para 4 Fluxos - GM

Nós	Velocidade	0m/s	0,83m/s	8,33m/s	33,33m/s
20	Média	113945	113936,9	113924,9	113924,9
	Desvio padrão	37,09771	35,92687	32,80657	32,80657
40	Média	466681,1	466677,8	466676,8	466674,1
	Desvio padrão	302,6527	301,023	205,9694	211,6268
60	Média	1046455	1046135	1046917	1047006
	Desvio padrão	1569,351	1763,998	1289,496	1109,166

## Manhattan Grid - AODV

**Tabela C.25:** Média de Perdas (em %) do tráfego para 1 Fluxo - MG

Nós	Velocidade	0m/s	0,83m/s	8,33m/s	33,33m/s
20	Média	0,023889	0,023889	0,028333	0,013889
	Desvio padrão	0,054436	0,054436	0,069914	0,042454
40	Média	0,041667	0,023889	0,032778	0,023889
	Desvio padrão	0,065324	0,054436	0,060566	0,054436
60	Média	0,037222	0,055556	0,033333	0,05
	Desvio padrão	0,083009	0,069389	0,061588	0,066953

**Tabela C.26:** Média do Atraso do tráfego em milissegundos para 1 Fluxo - MG

Nós	Velocidade	0m/s	0,83m/s	8,33m/s	33,33m/s
20	Média	1,019083	1,019471	1,019589	1,019328
	Desvio padrão	0,001772	0,002267	0,002077	0,002408
40	Média	1,048503	1,052217	1,047628	1,04877
	Desvio padrão	0,005792	0,023782	0,004912	0,007046
60	Média	1,105813	1,1155	1,10895	1,097233
	Desvio padrão	0,041432	0,048541	0,039023	0,012246

**Tabela C.27:** Média do número de mensagens de controlo de tráfego para 1 Fluxo - MG

Nós	Velocidade	0m/s	0,83m/s	8,33m/s	33,33m/s
20	Média	228026,3	228027,3	228028,2	228012
	Desvio padrão	136,2125	117,474	124,0145	125,955
40	Média	932320,7	932263,1	932214,9	932317,6
	Desvio padrão	1882,793	1816,437	1756,404	1755,192
60	Média	2097290	2097663	2097846	2097572
	Desvio padrão	6960,882	6415,342	6876,553	6959,011

**Tabela C.28:** Média de Perdas (em %) do tráfego para 4 Fluxos - MG

Nós	Velocidade	0m/s	0,83m/s	8,33m/s	33,33m/s
20	Média	57,92403	58,48181	50,98903	47,34042
	Desvio padrão	12,2558	12,6095	7,634765	7,469116
40	Média	4,3856	4,512168	2,732015	2,67274
	Desvio padrão	55,64931	53,81486	50,05292	46,36764
60	Média	55,57403	53,39319	51,28836	47,60694
	Desvio padrão	12,69151	9,700059	8,161178	9,735473

**Tabela C.29:** Média do Atraso do tráfego em milissegundos para 4 Fluxos - MG

Nós	Velocidade	0m/s	0,83m/s	8,33m/s	33,33m/s
20	Média	2,885147	17,46517	56,13951	51,34764
	Desvio padrão	4,068	25,86954	18,54596	19,90339
40	Média	3,978508	44,55916	55,45747	55,95072
	Desvio padrão	5,887177	51,71677	28,55447	26,08411
60	Média	16,59272	31,74763	63,13803	56,64472
	Desvio padrão	21,00457	20,33676	25,80521	32,95947

**Tabela C. 30:** Média do número de mensagens de controlo de tráfego para 4 Fluxos - MG

Nós	Velocidade	0m/s	0,83m/s	8,33m/s	33,33m/s
20	Média	227876,6	227896,1	227844,3	227806,6
	Desvio padrão	160,8322	140,1651	190,1742	190,8619
40	Média	930887,4	930901,1	930962	930696,2
	Desvio padrão	2192,408	2246,803	1781,551	1724,568
60	Média	2092824	2091721	2091799	2091414
	Desvio padrão	7799,167	7493,611	7159,713	8218,215

## Manhattan Grid - OLSR

**Tabela C.31:** Média de Perdas (em %) do tráfego para 1 Fluxo - MG

Nós	Velocidade	0m/s	0,83m/s	8,33m/s	33,33m/s
20	Média	0,387222	0,389444	0,39	0,385556
	Desvio padrão	0,023846	0,023359	0,023813	0,025421
40	Média	0,382222	0,378333	0,383889	0,381667
	Desvio padrão	0,024343	0,020599	0,031405	0,021598
60	Média	0,394444	0,379444	0,39	0,393333
	Desvio padrão	0,059586	0,024637	0,035179	0,059468

**Tabela C.32:** Média do Atraso do tráfego em milissegundos para 1 Fluxo - MG

Nós	Velocidade	0m/s	0,83m/s	8,33m/s	33,33m/s
20	Média	1,029995	1,030093	1,029765	1,029953
	Desvio padrão	0,003023	0,003101	0,002954	0,003173
40	Média	1,174949	1,175172	1,175224	1,176304
	Desvio padrão	0,007194	0,006845	0,006777	0,007056
60	Média	1,778382	1,782647	1,774101	1,77809
	Desvio padrão	0,031948	0,027499	0,03133	0,026344

**Tabela C.33:** Média das mensagens de controle de tráfego para 1 Fluxo - MG

Nós	Velocidade	0m/s	0,83m/s	8,33m/s	33,33m/s
20	Média	113968,2	113968	113966,2	113964
	Desvio padrão	19,24449	16,59456	20,47216	22,8405
40	Média	467065,9	467044,4	467065,5	467061,8
	Desvio padrão	157,4591	219,9703	164,9904	148,8562
60	Média	1049986	1050265	1050347	1050130
	Desvio padrão	806,7855	955,4994	1096,221	787,6023

**Tabela C.34:** Média de Perdas (em %) do tráfego para 4 Fluxos - MG

Nós	Velocidade	0m/s	0,83m/s	8,33m/s	33,33m/s
20	Média	56,19083	57,60583	52,08292	48,88458
	Desvio padrão	14,17829	11,25977	10,3247	10,01531
40	Média	44,59736	44,94778	45,69708	41,76222
	Desvio padrão	13,38408	11,66884	10,85794	8,108736
60	Média	35,56222	37,57736	31,21042	29,35111
	Desvio padrão	11,76243	12,3225	8,958162	9,873462

**Tabela C.35:** Média do Atraso do tráfego em milissegundos para 4 Fluxos - MG

Nós	Velocidade	0m/s	0,83m/s	8,33m/s	33,33m/s
20	Média	14,17727	27,80439	66,79006	63,1964
	Desvio padrão	21,76929	25,06616	26,04102	33,00686
40	Média	19,63342	29,06775	54,87172	48,11121
	Desvio padrão	18,12666	27,43733	31,22926	21,3862
60	Média	15,03823	16,76582	30,01923	28,9714
	Desvio padrão	10,45132	15,15865	14,9138	16,05629

**Tabela C.36:** Média das mensagens de controle de tráfego para 4 Fluxos - MG

Nós	Velocidade	0m/s	0,83m/s	8,33m/s	33,33m/s
20	Média	113938,2	113948,7	113925	113910,8
	Desvio padrão	40,97189	30,94506	42,20924	49,31677
40	Média	466540,4	466561	466661,8	466575,6
	Desvio padrão	395,2164	260,7048	248,901	236,1979
60	Média	1047117	1047514	1046857	1046647
	Desvio padrão	1130,759	1501,661	1465,655	1348,996

## Anexo C – Artigo publicado na Conferência de Redes de Computadores, 2011

Este anexo apresenta o artigo submetido e aceite durante a realização da dissertação.

# Encaminhamento em redes móveis ad-hoc: NS-3 versus OPNET

Clara Marto, David Palma, Marília Curado

*Departamento de Engenharia Informática, Universidade de Coimbra*

*Pólo II - Pinhal de Marrocos*

*3030-290 Coimbra - Portugal*

*mmarto@student.dei.uc.pt*

*palma@dei.uc.pt*

*marilia@dei.uc.pt*

**Abstract**— Em áreas onde não existe infra-estrutura é possível criar uma rede móvel ad-hoc, de forma a garantir conectividade entre dispositivos móveis. No entanto, dada a mobilidade aleatória dos nós, surge o problema de manter a conectividade entre os nós, o que requer uma adaptação permanente e a reconfiguração das rotas. Vários protocolos de encaminhamento para redes móveis ad-hoc foram desenvolvidos, para lidar com o problema da mobilidade e escalabilidade dos nós. Neste artigo, pretende-se avaliar o desempenho do protocolo de encaminhamento OLSR relativamente à mobilidade e escalabilidade. Vamos avaliar os resultados obtidos para o protocolo através da utilização dos simuladores, NS-3 e OPNET Modeler, e comparar os resultados obtidos. As diferenças, nos resultados obtidos para o protocolo OLSR, podem estar relacionadas com características específicas de cada um dos simuladores.

**Keywords**— Mobile Ad-hoc Network (MANET), Protocolos de encaminhamento, OLSR, AODV, NS-3, OPNET Modeler.

## I. INTRODUÇÃO

As tecnologias de comunicações sem fios têm tido, nos últimos anos, um desenvolvimento muito rápido, permitindo a sua aplicação nas mais diversas áreas. No entanto, nem sempre estão disponíveis serviços de comunicação de infra-estrutura. Surgiram assim, no domínio das redes móveis, as redes móveis não estruturadas (MOBILE AD-HOC NETWORK - MANET) que podem ser utilizadas nas mais diversas aplicações, desde redes militares a redes de emergência.

Nas redes móveis ad-hoc os nós podem mover-se de forma aleatória. Assim, a topologia está constantemente a mudar, não permitindo aplicar as técnicas de encaminhamento utilizadas nas redes fixas [2]. A conectividade entre os nós móveis muda constantemente, o que requer uma adaptação permanente e a reconfiguração das rotas.

Este trabalho compara o desempenho dos simuladores OPNET Modeler [11] e NS-3[10] para tráfego em MANET, utilizando o protocolo *Optimized Link State Protocol*(OLSR)[1]. Não se pretende com este trabalho definir

qual dos simuladores de redes é melhor, pois existem muitos parâmetros com diferentes variações, assim como diferentes cenários de redes.

Na avaliação de desempenho de redes de computadores a simulação é uma técnica fundamental, pois permite o estudo e a avaliação de sistemas a custos reduzidos.

A utilização de simuladores tem vindo a aumentar de forma significativa, existindo diversas ferramentas de simulação disponíveis no mercado, umas mais utilizadas a nível académico e outras mais a nível comercial. As principais características que separam estas ferramentas de simulação são: velocidade, precisão, facilidade e custo de utilização.

Destacam-se três vantagens importantes para a utilização dos simuladores: permitem testar o comportamento dos protocolos em diversas redes e ambientes; facilitam a realização de testes em ambientes controlados; permitem a utilização dos protocolos em múltiplos cenários [14].

As várias secções deste artigo apresentam-se divididas da seguinte forma: na secção II é apresentado o estado da arte referente a MANET, protocolos de encaminhamento e uma breve descrição do protocolo de encaminhamento OLSR. A secção III, Avaliação, apresenta os objectivos e metodologias utilizadas, os simuladores NS-3 e OPNET Modeler, assim como os resultados obtidos. Finalmente na secção IV são apresentadas as conclusões e sugestões de trabalhos futuros.

## II. ENCAMINHAMENTO EM MANET

As redes móveis ad-hoc (MANET) são geradas de forma espontânea numa determinada área e são constituídas por um conjunto de nós móveis autónomos, que comunicam uns com os outros sem controlo centralizado ou infra-estrutura estabelecida. Estas redes devem ter a capacidade de se auto-organizarem e auto-configurarem, devido à estrutura da sua topologia estar em constante mudança. Porque os nós móveis têm um alcance limitado, quando pretendem enviar uma mensagem para um nó destino, devem utilizar outros nós como encaminhadores para entregar a mensagem em qualquer ponto da rede. Os nós são livres de se juntarem ou afastarem da rede, tornando a rede dinâmica.

Os nós móveis devem encontrar-se em modo ad-hoc para receber todas as mensagens que lhe são enviadas e encaminhar as mensagens para os nós vizinhos. Numa rede ad-hoc todos os nós existentes são encaminhadores, devendo participar na descoberta de rotas e na manutenção de rotas para outros nós [4][6][7].

Uma das principais características das MANET é a mobilidade, dando a possibilidade ao utilizador de se mover com liberdade. Por outro lado, a mobilidade influencia a conectividade entre os nós. A mobilidade e o modo de comunicação sem fios geram novas características que são específicas destas redes, como a desconexão frequente, o fluxo de comunicação e fontes de energia limitada. O grande desafio deste tipo de redes é oferecer os mesmos serviços, em termos de rapidez, fiabilidade e desempenho do que as redes com infra-estrutura [9].

Os protocolos de encaminhamento devem ser dinâmicos para que possam responder de forma rápida às mudanças topológicas [5].

Em áreas onde não existe infra-estrutura é possível criar uma rede ad-hoc sem fios, porque, nestas redes os nós móveis funcionam como anfitriões e como encaminhadores. Cada nó móvel participa de um protocolo de encaminhamento ad-hoc, o qual permite descobrir caminhos de etapas múltiplas através da rede para outros nós. Para resolver o problema das etapas múltiplas (*multi-hop*) nas redes ad-hoc, têm sido apresentados diferentes protocolos, baseados em diferentes pressupostos e instituições.

Os protocolos de encaminhamento, de uma rede ad-hoc sem fios, têm como principal desafio lidar com a mobilidade dos nós. Estes protocolos devem também conseguir lidar com um elevado número de nós com recursos limitados, como a energia e a largura de banda. É essencial reduzir a carga de encaminhamento de mensagens apesar do número de nós e da sua mobilidade, assim como manter a tabela de encaminhamento pequena, porque o aumento desta vai afectar o controlo dos pacotes enviados na rede. Os protocolos de encaminhamento têm de conseguir dar resposta rápida às mudanças de topologia da rede [4].

Dependendo do modo como adquirem a rota para um destino, os protocolos de encaminhamento podem ser divididos em quatro grupos: proativo, reativo, híbrido e *location-based*. Se as rotas para todos os destinos se encontram sempre disponíveis em cada nó, diz-se que o protocolo é proativo. Se por outro lado, as rotas só são adquiridas quando um nó precisa enviar um pacote para um destino, diz-se que o protocolo é reativo. Diz-se que um protocolo é híbrido, se combinar as características dos protocolos reativos e proativos para utilizar vantagens de ambos. Os protocolos *location-based* são baseados na localização.

Os protocolos proativos possuem tabelas de encaminhamento sempre com informação válida de rotas. Para que as tabelas tenham informações actualizadas os nós da rede comunicam entre eles com frequência, dando origem à existência de elevado *overhead* na rede. Por outro lado, as

rotas encontram-se sempre disponíveis quando necessário. Nestes protocolos, o nó transmite através da rede a lista dos seus vizinhos [2][4][7].

Os protocolos reativos, estabelecem uma rota para um destino apenas quando esta é necessária e utilizam o algoritmo vetor distância para encontrar o caminho mais curto para o destino. Nestes protocolos as informações de encaminhamento são recolhidas apenas quando são necessárias e a determinação da rota depende do envio de consultas para toda a rede. A principal vantagem deste tipo de encaminhamento, é o facto de a rede não estar sujeita a *overhead* de encaminhamento de dados, para rotas que poderão nunca ser utilizadas. No entanto, devido a não existir uma manutenção constante das tabelas de encaminhamento, pode-se verificar um atraso considerável na descoberta de rotas por parte destes protocolos. Estes protocolos são adequados para tráfego em tempo real ou cenários com elevado tráfego entre um grande número de nós. Um nó para enviar dados exige, como informação mínima, saber o próximo hop na rota. Quando essa informação não se encontra disponível no nó, é enviada uma mensagem *flooding* a solicitar a rota desejada. Todos os nós que recebem essa mensagem e têm informação de encaminhamento respondem à mensagem. O nó origem irá depois seleccionar a rota entre as mensagens recebidas. Se a rota não for conhecida, é necessário determiná-la, podendo ocorrer um atraso na configuração [2][4][9].

Os protocolos proativos e reativos são os mais conhecidos, no entanto, existem mais dois grupos de protocolos de encaminhamento para MANET. De um desses grupos fazem parte os protocolos híbridos. Estes protocolos combinam os sistemas de encaminhamento proativos e reativos, tipicamente em conjunto com algoritmos de agrupamento. O outro grupo de protocolos de encaminhamento baseia-se na posição dos nós, quer para a formação de *cluster* quer para o encaminhamento chegar ao destino desejado. Estes protocolos normalmente requerem a utilização do uso de dispositivos de GPS, os quais nem sempre se encontram disponíveis [3][8].

O protocolo OLSR foi desenvolvido como protocolo de encaminhamento para MANET. Este protocolo sendo proativo, disponibiliza as rotas quando estas são necessárias. Todos os nós da rede mantêm uma ou mais tabelas com informação da topologia da rede.

Quando se verificam alterações na topologia da rede, existe um aumento do fluxo de mensagens para informar os nós disponíveis das alterações ocorridas, dando origem à existência de elevado *overhead* na rede [2]. Para reduzir o *overhead* o protocolo OLSR utiliza a técnica chamada de *Multipoint Relay* (MPR). A utilização desta técnica tem como objetivo reduzir o fluxo de mensagens na rede, através da redução de transmissões em algumas partes da rede e da obtenção do caminho mais curto.

São utilizados dois tipos de mensagens de controlo pelo protocolo: mensagens HELLO e mensagens *Topology Control* (TC). O protocolo utiliza as mensagens HELLO para saber informações dos seus vizinhos e do estado das ligações. Estas mensagens são também utilizadas para seleccionar os nós que

vão constituir o conjunto dos nós que vão atuar como MPR. As mensagens HELLO são transmitidas apenas a um *hop* de distância e as mensagens TC são transmitidas por *broadcast* para toda a rede. Apenas os nós que funcionam como MPR podem transmitir mensagens TC, as quais são transmitidas periodicamente para toda a rede [4]. Cada nó escolhe os seus MPRs.

Para determinar o conjunto de MPRs são utilizadas informações sobre simetria a um e dois *hops* dos vizinhos. Cada nó seleciona um conjunto de nós vizinhos como MPR, entre os vizinhos a um *hop* com ligação simétrica, cobrindo todos os vizinhos a dois *hops* (Fig.1) e regista na tabela de seletores MPR. Se existir alterações na topologia dos vizinhos a um ou dois *hops* o conjunto de MPRs é recalculado [5].

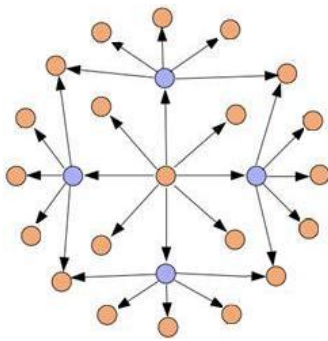


Fig.1 Conjunto de MPRs selecionados por um nó. Adaptada de [13].

Cada nó MPR determina o caminho ideal (relativamente ao número de *hops*) para qualquer destino através de informações disponíveis de topologia e armazena essa informação na tabela de encaminhamento.

Os nós que não fazem parte do conjunto de MPRs podem ler e processar informação mas não podem retransmitir [2].

### III. AVALIAÇÃO

Neste artigo comparam-se os resultados obtidos para o protocolo OLSR, através da utilização dos simuladores NS-3 e OPNET Modeler, avaliando a escalabilidade e a mobilidade do protocolo relativamente a duas métricas: atraso e perdas.

O desempenho do protocolo OLSR, utilizando o simulador OPNET, já foi avaliado em [12]. Neste artigo vamos avaliar o desempenho do OLSR utilizando o simulador NS-3 e comparar os resultados obtidos neste simulador com os obtidos no OPNET.

As métricas usadas para avaliar o protocolo OLSR, neste artigo, são o atraso, que representa o atraso médio no envio de pacotes, tendo em conta apenas os pacotes recebidos correctamente, e as perdas de pacotes que corresponde aos pacotes perdidos durante uma transmissão.

Para avaliar o desempenho do protocolo OLSR, foram realizadas 30 simulações, com valores de semente diferentes em cada cenário apresentado. Os nós existentes em cada simulação movem-se de acordo com o modelo de mobilidade *Random Waypoint* [18], com um tempo de pausa de 50 segundos. O período de simulação de cada cenário é de 600

segundos, sendo a área de simulação de 1-1 km<sup>2</sup>. A camada MAC do protocolo IEEE 802.11b é utilizada em todas as simulações com uma taxa de dados de 11Mb/s.

São construídos diferentes cenários de redes, com diferentes números de nós (10,...,90) e utilizando nas simulações quatro velocidades (0, 3, 30 e 120 km/h). Em cada cenário são utilizados 16 fluxos gerados entre cada par origem-destino, com o destino escolhido aleatoriamente, com uma *Constant Bit Rate* (CBR) de 4Kb/s. É escolhido o gerador de tráfego CBR porque devido às suas características a carga na rede tende a tornar-se mais estável.

#### A. Simuladores NS-3 e OPNET Modeler

O Network Simulator – versão 3 (NS-3) é um novo simulador de redes que pretende ser uma alternativa ao popular Network Simulator – versão 2 (NS-2). O NS-3 é um simulador de redes de eventos discretos, ou seja, consiste em analisar o estado de uma rede apenas em determinado tempo, podendo ignorar os outros estados sem que isso interfira no resultado da análise.

O NS-3 é uma ferramenta *Open Source*, distribuído sob a licença de GNU GPLv2. O seu desenvolvimento teve início em 2006, é escrito em linguagem C++, com interface em Python opcional, e tem como objetivo servir de plataforma para a investigação e educação. Os principais conceitos por trás do NS-3 são a modularidade, reutilização e extensibilidade [10].

O simulador encontra-se em desenvolvimento, saindo, aproximadamente, a cada 3-4 meses uma nova versão estável. Neste momento, o simulador encontra-se na versão número 12.

O OPNET (*Optimized Network Engineering Tool*) Modeler [11] é uma ferramenta de *software* para modelação e simulação de redes, desenvolvido pela empresa OPNET Technologies. Fornece diferentes níveis de modelação de acordo com as necessidades e os requisitos da simulação. O OPNET oferece uma *interface* gráfica ao utilizador (GUI – *Graphical User Interface*) que permite editar e construir os modelos de várias entidades de redes, desde a camada física até à camada da aplicação, sem recorrer à linguagem de programação. O OPNET Modeler permite a manipulação do código de programação e é escrito na linguagem C++.

Algumas das principais características OPNET Modeler são: ser um motor de simulação de eventos discretos rápido; possuir vários protocolos e modelos de dispositivos que são fornecidos pelo código fonte; modelação orientada a objetos; um ambiente que inclui centenas de modelos pré-construídos, usados para estudar mudanças de desempenho nas redes; ambiente de simulação mais escalável e eficiente.

TABELA I  
PROTOCOLOS DE ENCAMINHAMENTO

Simulador	Protocolos de encaminhamento					
	AODV	DSDV	OLSR	TORA	DSR	OPSFv3
NS-3	x	x	x			
OPNET	x		x	x	x	x

A tabela I apresenta os protocolos de encaminhamento utilizados pelos simuladores, em MANET.

Para realizar este trabalho foi escolhido o protocolo OLSR. Esta escolha deve-se ao facto deste protocolo apresentar mais problemas de escalabilidade que o protocolo AODV, uma vez que, sendo um protocolo proativo mantém as suas tabelas de encaminhamento atualizadas, o que obriga a trocar periodicamente informações da rede com todos os nós.

TABELA II  
MODELOS DE MOBILIDADE

Simulador	Modelos de Mobilidade			
	Random Walk 2D	Random WayPoint	Arbitrary trajectories	HLA mobility updates
NS-3	x	x		
OPNET		x	x	x

A tabela II apresenta alguns dos modelos de mobilidade que podem ser utilizados em MANET pelos simuladores NS-3 e OPNET.

Foi escolhido o modelo de mobilidade *Random Waypoint* para desenvolver este trabalho, por existir nos dois simuladores e por ser, geralmente, o modelo de mobilidade padrão para MANET.

### B. Análise de resultados

Nesta secção serão analisados os resultados obtidos, do protocolo OLSR, através dos simuladores OPNET e NS-3, relativamente às duas métricas consideradas. Todos os resultados apresentados nos gráficos mostram um intervalo de confiança de 95%.

#### 1) Perdas

Ao analisarmos a Fig.2 relativamente à percentagem de tráfego perdido nas redes, utilizando o simulador OPNET, verificamos que o número de perdas é maior para velocidades mais elevadas, independentemente do número de nós, com exceção do cenário com 70 nós à velocidade de 120km/h, onde se verifica uma diminuição do número de perda, podendo estar relacionado com algum comportamento específico da rede e do modelo de mobilidade *Random Waypoint*.

A rede que apresenta melhores resultados é aquela onde os nós se deslocam à velocidade de 3km/h, possivelmente devido ao facto de haver a possibilidade de existirem menos nós inacessíveis, uma vez que estes se deslocam a uma velocidade moderada [12].

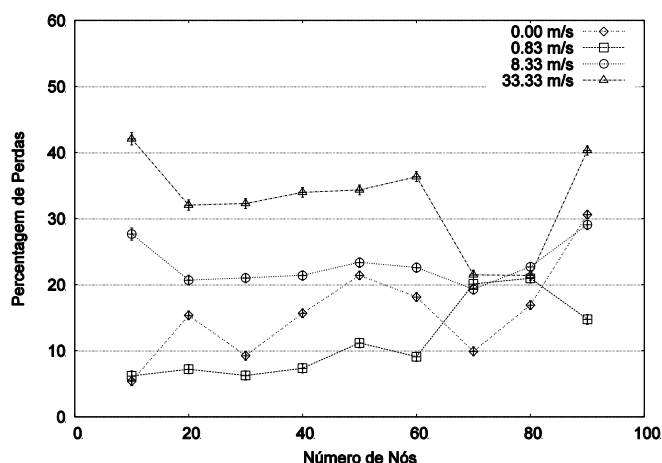


Fig. 2 Média das Perdas do tráfego para 16 Fluxos (OPNET)

De acordo com os resultados apresentados na Fig.3, relativamente à percentagem de tráfego perdido nas redes utilizando o simulador NS-3, verificamos que nos cenários móveis as perdas vão diminuindo à medida que aumenta o número de nós, devido a existir uma maior conectividade entre os nós. Verificamos, também, que as diferentes velocidades não têm um impacto significativo entre elas nos diferentes cenários, o que se deve, possivelmente, às características do modelo de mobilidade utilizado.

A rede estática apresenta melhor desempenho relativamente às redes móveis. Com o aumento do número de nós, na rede estática, aumenta a conectividade entre os nós mas, a partir dos 60 nós verificamos que o seu desempenho diminui devido à carga do protocolo e/ou interferências no meio sem-fios.

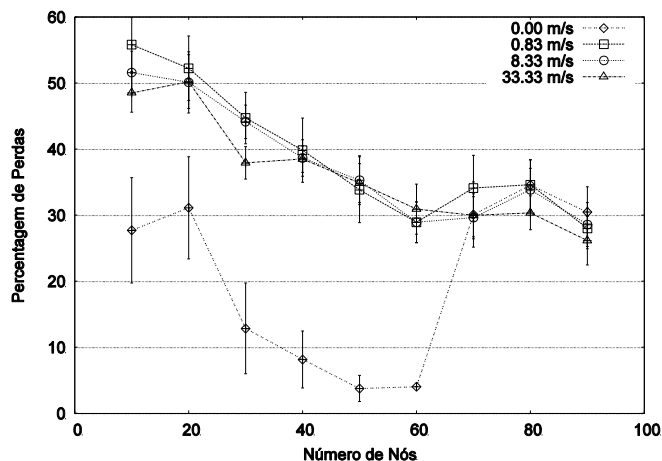


Fig. 3 Média das Perdas do tráfego para 16 Fluxos (NS-3)

#### 2) Atraso

De acordo com os resultados obtidos na Fig.4, através do simulador OPNET, as redes estáticas apresentam um atraso maior relativamente às redes com alguma mobilidade, especialmente nas redes onde o número de nós é reduzido.

Existe um aumento significativo do atraso em todas as redes de 10 para 20 nós, sendo depois o atraso mantido apesar do aumento do número de nós.

A partir dos 20 nós o valor do atraso mantém-se nas redes móveis, havendo apenas algumas flutuações, com o aumento do número de nós na rede [12].

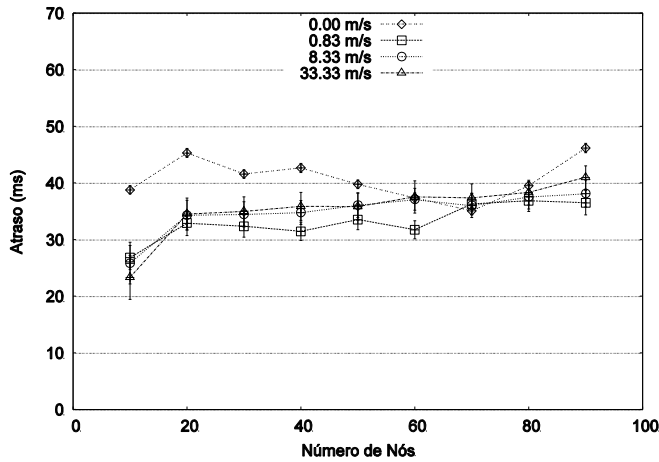


Fig. 4 Média do Atraso do tráfego em segundos para 16 Fluxos (OPNET)

Os resultados obtidos para o atraso do tráfego nas redes, apresentados na Fig.5 (simulador NS-3), mostram que as redes estáticas apresentam um melhor desempenho, até 60 nós, relativamente às redes com mobilidade, possivelmente devido ao facto de os nós não precisarem de atualizar constantemente as rotas para os vários destinos. Assim, as tabelas de encaminhamento são mais estáveis o que leva a que o *overhead* seja menor.

Para redes com velocidade moderada o aumento do atraso é mais significativo a partir dos 50 nós. Por outro lado, nas redes com velocidade superior o atraso é maior, o que poderá dever-se a caminhos mais longos, rotas menos eficientes ou existirem interferências mais elevadas pelo facto de os nós estarem muito próximos em grupos muito grandes.

Através da análise do atraso podemos dizer que o protocolo OLSR apresenta uma adaptação adequada para redes de baixa e média densidade, relativamente a redes estáticas e redes com velocidade moderada.

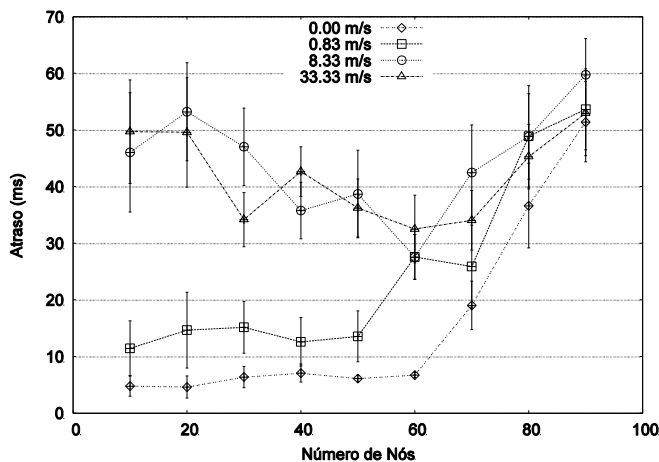


Fig. 5 Média do Atraso do tráfego em segundos para 16 Fluxos (NS-3)

### C. Comparação dos resultados obtidos nos simuladores

Será efectuada nesta secção a comparação dos resultados obtidos através dos simuladores OPNET e NS-3, para o protocolo OLSR, relativamente às duas métricas consideradas.

#### 1) Perdas

No simulador OPNET é evidente a diferença entre as velocidades, não se verificando o mesmo no simulador NS-3, o que mostra que o modelo de mobilidade *Random Waypoint* apresenta problemas. Este modelo de mobilidade tem sido amplamente utilizado na literatura e, embora em alguns trabalhos tenha mostrado algumas desvantagens em usá-lo [15], ainda é amplamente utilizado em trabalhos recentes [16][17], porque fornece uma forma genérica de mobilidade sem estar preso a aplicações específicas. Além disso, o *Random Waypoint* implementado no simulador sem fios OPNET Modeler garante uma distribuição uniforme das coordenadas x e y dentro dos limites do cenário, bem como diferentes estados iniciais (pausa e movimento) para cada nó, garantindo uma distribuição “*steady-state*” no modelo *Random Waypoint* [18].

No OPNET não existe uma relação direta entre a velocidade e o número de nós, enquanto no NS-3 com o aumento do número de nós diminui o número de perdas. As redes com 70 e 80 nós têm um comportamento que foge ao padrão.

Nos cenários estáticos o número de perdas é semelhante nos dois simuladores quando aumenta o número de nós no cenário.

#### 2) Atraso

No simulador OPNET não existe para os diferentes cenários, muita diferença em relação ao atraso quando é aumentado o número de nós e a velocidade. No NS-3, os cenários com velocidade mais elevada e os cenários com menos velocidade apresentam um valor semelhante para o atraso, o que pode ser devido à existência de grupos e rotas maiores.

A ordem de grandeza dos valores apresentados para o atraso no simulador NS-3 é muito semelhante.

Os resultados obtidos em termos de desempenho de tráfego, mostram que os dois simuladores têm um comportamento comparável. Um aspeto onde os simuladores apresentam diferenças está relacionado com a mobilidade.

O impacto do número de nós relativamente à velocidade é mais sensível no caso do simulador NS-3.

De acordo com os valores obtidos para os parâmetros avaliados, nos simuladores, verificamos que precisamos de realizar um maior número de simulações, no simulador NS-3, para obter resultados com o mesmo grau de confiança dos obtidos para o OPNET.

Os dois simuladores, através dos resultados obtidos, mostram que o protocolo OLSR tem problemas de



escalabilidade e que é mais adequado para redes não muito grandes e com velocidade moderada. Quando o número de nós aumenta até aos 60, o protocolo é beneficiado o que não se verifica quando o número de nós é superior, sugerindo que o protocolo não é escalável.

#### IV. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Neste artigo foi estudada a mobilidade e escalabilidade do protocolo de encaminhamento OLSR, através das métricas perdas e atraso. O desempenho do protocolo foi comparado relativamente aos resultados obtidos nos simuladores NS-3 e OPNET.

Os resultados obtidos mostram-nos que o protocolo OLSR apresenta problemas de escalabilidade, sendo mais adequado para redes não muito grandes e com velocidades não muito elevadas.

A escolha do simulador poderá estar relacionada com o facto de se pretender ou não desenvolver novas funcionalidades. O simulador NS-3 permite o desenvolvimento de novas funcionalidades e tem distribuição gratuita, o que não acontece com o OPNET que é um simulador comercial. O OPNET no entanto é muito utilizado em organizações devido às suas funcionalidades. Uma característica que também os distingue é o facto de o OPNET apresentar uma *interface* amigável ao contrário do NS-3.

Trabalhos futuros a serem realizados com base neste artigo envolvem verificar o comportamento das mensagens de controlo do OLSR e qual o impacto dessas mensagens no desempenho do protocolo, recorrendo ao simulador NS-3. Será ainda interessante comparar o desempenho do protocolo reativo AODV relativamente ao OLSR, utilizando o NS-3 assim como analisar o modelo *Random Waypoint* nos dois simuladores.

#### AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado pelo Projeto Nacional MORFEU(PTDC/EEE-CRO/108348/2008). Os autores gostariam de agradecer ao Programa OPNET para Universidades as licenças do OPNET Modeler Wireless Suite®.

#### REFERÊNCIAS

- [1] T. Clausen and P. Jacquet, "Optimized Link State Routing (OLSR) RFC 3626", IETF Networking Group, October 2003.
- [2] Preetam Suman, Dhananjay Bisen, Poonam Tomar, Vikas Seiwar and Rajesh Shukla, "Comparative study of Routing Protocols for Mobile Ad-hoc Networks", Bhopal, India, 2009.
- [3] Nakagawa, H. Nakamaru, K. Ohta, T. Kakuda, Y., Grad. Sch. of Inf. Sci., "A hierarchical routing scheme with location information on autonomous clustering for mobile ad hoc networks (GPS)", Hiroshima City Univ., Hiroshima, Japan, 2009.
- [4] Aleksandr Huhtonen, "Comparing AODV and OLSR Routing Protocols", Helsinki University of Technology, Telecommunication Software and Multimedia Laboratory, 2004.
- [5] Arun Kumar B. R., Lokanatha C. Reddy and Prakash S. Hiremath, "Performance Comparison of Wireless Mobile Ad-hoc Network

- Routing Protocols", IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security, VOL. 8 N°6, June 2008, pp. 337-343.
- [6] S. Gowrishankar, T. G. Basavaraju, M. Singh Kumar Sarkar, "Scenario based Performance Analysis of AODV and OLSR in Mobile Ad hoc Networks", Proceedings of the 24th South East Asia Regional Computer Conference, Bangkok, Thailand, November 2007.
- [7] Anis Laouti, Paul Muhlethaler, Abdellah Najid and Epiphane Plakoo, "Simulation Results of the OLSR Routing Protocol for Wireless Network", INRIA Rocquencourt, 2002.
- [8] Takashi Hamma, Takashi Katoh, Bhed Bahadur Bista, Toyoo Takata. "An Efficient ZHLS Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks". In 17th International Workshop on Database and Expert Systems Applications (DEXA 2006), 4-8 September 2006, Krakow, Poland. Pages 66-70, IEEE Computer Society, 2006.
- [9] R. Aoudjit, M. Lalam, M. Belkadi and M. Daoui, "Impact of Mobility on the Ad-hoc On-Demand Distance Vector Routing Protocol", Département d' Informatique, 2004.
- [10] (2011)The NS3 website. [Online]. Available: <http://www.nsnam.org/>
- [11] (2011)The OPNET website. [Online]. Available: <http://www.opnet.com/>
- [12] David Palma and Marília Curado, "Inside-out OLSR Scalability Analysis", Department of Informatics Engineering, Centre for Informatics and Systems University of Coimbra, 2009.
- [13] Andreas Tonnesen (2011) Mobile Ad-Hoc Networks homepage. [Online]. Available: <http://www.olsr.org/docs/wos3-olsr.pdf>
- [14] Guedes, S., Conceição, V., Nuno, C., Rodrigues, "Plataforma de Desenvolvimento e Simulação de Protocolos", 2005.
- [15] Majid Shakeri, Ebrahim Hosseini, "Simulation and evaluation of routing protocols in wireless mobile Ad Hoc network", Islamic Azad University, Natanz Branch, Iran, 2010.
- [16] Shan Zhou and Lei Ying, "On Delay Constrained Multicast Capacity of Large-Scale Mobile Ad-Hoc Networks", Electrical and Computer Engineering, 2009.
- [17] Min Qin and Roger Zimmermann, "An Adaptive Strategy for Mobile Ad Hoc Media Streaming", Senior Member, IEEE, 2010.
- [18] William Navidi and Tracy Camp, "Stationary Distributions for the Random Waypoint Mobility Model", Department of Mathematical and Computer Sciences, Colorado School of Mines, Golden, Colorado 80401, 2003.