

Análise de Redes Móveis Ad Hoc para Cenários de Operações Militares

Ivana Cardial de M. Pereira^{1,2} e Aloysio de Castro P. Pedroza¹

¹Grupo de Teleinformática e Automação (GTA)
COPPE/EE Programa de Engenharia Elétrica
Universidade Federal do Rio de Janeiro
<http://www.gta.ufrj.br/>

²CASNAV–Centro de Análises de Sistemas Navais
{ivana,alloysio}@gta.ufrj.br

Abstract. *This work analyzes the behavior of three proposed protocols for ad hoc mobile wireless networks (AODV, DSR e DSDV), by means of a realistic scenario, which is represented by of a typical military operation in a battlefield, namely an assault and enemy position takeover, seeking a certain degree of generalization for military operations of similar kind. The proposed scenario differs substantially from simulations employed to evaluate the efficiency of these routing algorithms, frequently found in the literature, since in this case we model directly the mobility of groups of nodes, which seek a common objective in cooperation with each other.*

Resumo. *O objetivo deste trabalho visa à análise do comportamento de três protocolos de roteamento propostos para redes ad hoc (AODV, DSR e DSDV) utilizando um cenário que retrata uma situação real, que é representado por uma ação militar típica em um campo de batalha - uma ação de assalto e tomada de posição inimiga, buscando as condições que melhores se adéquem a este cenário ou a outros que apresentarem características similares. Diferentemente das simulações frequentemente conduzidas para avaliar a eficiência destes algoritmos, o cenário proposto tem como principal característica a mobilidade em grupo dos seus nós, que visam a alcançar de forma cooperativa um determinado objetivo .*

1. Introdução

Uma rede *ad hoc* é um conjunto de nós móveis sem fio, que são capazes de se comunicar diretamente entre si, formando dinamicamente uma rede temporária, sem o uso de qualquer ponto de acesso centralizado ou estação de suporte à mobilidade. Neste tipo de rede, os nós funcionam como roteadores, sendo capazes de descobrir e manter rotas para outros nós da rede; e como *hosts*, rodando aplicações dos usuários. Em razão da mobilidade dos nós, as redes *ad hoc* apresentam uma topologia dinâmica, isto é, mudam frequentemente e de forma imprevisível, influenciando fortemente nas características da rede, tornando, assim, o roteamento em redes *ad hoc* um grande desafio.

Neste artigo nós nos concentramos em avaliar como os protocolos de roteamento de redes *ad hoc* se comportam em um contexto mais específico, representado por um cenário realístico, diferenciando-se de comparações anteriores [Broch et al., 1998, Perkins et al., 2000] onde os movimentos dos nós eram puramente aleatórios. Para isto desenvolvemos e simulamos um cenário que retrata uma operação militar típica. Nosso objetivo é buscar as condições que melhor se adequem a este tipo de cenário ou a outros com características similares.

Aplicações militares representam um exemplo clássico de utilização de redes *ad hoc*. Estas aplicações se caracterizam pelo fato de seus nós se moverem em grupo, com padrões de tráfego que obedecem a uma cadeia hierárquica rígida e com aleatoriedade de movimentos controlada, obedecendo a um padrão de movimentação pré-determinado, já que os grupos devem buscar, de forma cooperativa, alcançar um determinado objetivo comum.

Devido às características de mobilidade de suas operações, a comunidade militar tem demonstrado grande interesse nas comunicações móveis. Especificamente, as redes *ad hoc* são de extrema importância para as suas aplicações, já que em uma situação de conflito as comunicações no campo de batalha não podem depender de infra-estruturas fixas. As redes *ad hoc* se apresentam como a única estrutura de rede viável para este tipo de aplicação, onde informações táticas são trocadas, e uma configuração de rede descentralizada é uma vantagem operativa ou até mesmo uma necessidade.

Os protocolos de roteamento DSDV, AODV e DSR foram selecionados para análise neste trabalho. O AODV e o DSR foram escolhidos pela sua importância e porque eles mostraram os melhores resultados em [Broch et al., 1998, Johansson et al., 1999], mas não foram comparados em cenários com as características apresentadas. O DSDV é um protocolo proativo e foi incluído para ilustrar a diferença de comportamento entre protocolos por demanda e protocolos proativos.

Este trabalho foi dividido da seguinte forma: na seção 2 é apresentada uma breve introdução sobre protocolos de roteamento em redes *ad hoc*, onde os protocolos selecionados para análise são descritos de forma sucinta; a seção 3 apresenta a descrição do cenário desenvolvido para este trabalho; as características da simulação são descritas na seção 4; os resultados são apresentados na seção 5; finalmente, a seção 6 conclui o trabalho.

2. Protocolos de Roteamento em Redes Ad Hoc

Nesta seção apresentaremos uma breve descrição dos protocolos de roteamento que serão avaliados neste trabalho.

2.1. Dynamic Source Routing - DSR

O DSR [David B. Johnson, 2002] é um protocolo de roteamento reativo que usa roteamento na fonte para entregar pacotes de dados, ou seja, o nó origem determina toda a sequência de nós por onde passará o pacote até chegar ao seu destino e os cabeçalhos dos pacotes de dados carregam esta sequência de nós. Cada nó mantém um *cache*, onde todas as suas rotas conhecidas são armazenadas. O DSR permite que cada nó mantenha

múltiplas rotas para o mesmo destino. O DSR consiste de dois mecanismos: descoberta de rotas e manutenção de rotas.

Quando um nó precisa enviar um pacote para outro nó, o nó de origem verifica se possui uma rota para o nó de destino em seu *cache*. Caso a rota exista, o nó origem usa esta rota para enviar o pacote; em caso contrário inicia um processo de descoberta de rotas para encontrar dinamicamente uma rota para o destino.

O protocolo DSR possui a vantagem de ser capaz de “aprender” rotas. Quando um nó A encontra uma rota para um nó C por meio do nó B, A aprenderá uma rota para B, e B aprenderá uma rota para A. Quando os dados começarem a fluir de A para C, B aprenderá uma rota para C e A aprenderá uma rota para A.

2.2. Destination Sequenced Distance Vector - DSDV

O DSDV [Perkins and Bhagwat, 1994] é um protocolo de roteamento proativo, baseado em vetor de distâncias, que trabalha requisitando periodicamente de cada um dos nós vizinhos suas tabelas de roteamento, com a finalidade de manter suas tabelas atualizadas. Cada nó da rede mantém uma tabela de roteamento que contém o próximo salto e o número de saltos para alcançar o destino. As tabelas mantêm rotas para todos os nós da rede, mesmo que nunca seja necessário enviar pacote para este nó. Cada nó mantém apenas uma rota para cada destino. O DSDV inicia um processo de atualização de rota periodicamente ou quando a topologia da rede se altera.

2.3. Ad Hoc On Demand Distance Vector - AODV

O AODV [Perkins et al., 2002] é um protocolo reativo, e é uma combinação do DSR e do DSDV. Assim como o DSR, o AODV é baseado em demanda, ou seja, descobre rotas somente quando necessário e utiliza os mecanismos de descoberta de rotas e manutenção de rotas. Entretanto, o AODV utiliza a característica do DSDV de manter tabelas de roteamento tradicionais de uma entrada para cada destino, diferentemente do DSR que permite múltiplas rotas para cada destino. Pode ser considerado como uma versão melhorada do DSDV, já que seu funcionamento baseado em demanda minimiza o número de *broadcasts* exigidos para criação de rotas.

3. Cenário Militar

3.1. Requisitos Básicos

No campo de batalha moderno pode-se fazer uso extensivo de comunicação sem fio. As unidades móveis podem ser usadas nos centros de comando e controle, nos próprios veículos (como carros de combate, helicópteros, navios ou aeronaves), assim como os próprios soldados poderão carregar seus terminais de comunicação pessoal. Portanto, para que o cenário descrito seja implementado de forma confiável, vários requisitos básicos devem ser atendidos, como segurança, necessidades de roteamento em condições de mobilidade diversas, diferentes prioridades advindas do nível de urgência das mensagens e dificuldades de ordem física às transmissões eletromagnéticas (reflexão, difração, *scattering*, etc.), devido a acidentes geográficos [Määttä, 2000]. Para as aplicações militares, o tempo para entregar uma mensagem é uma restrição crítica. Possivelmente, o mais importante nesses casos é encontrar os nós de modo eficiente, e no menor espaço de tempo

possível. Sob esta visão, a economia de energia e banda passante torna-se um problema secundário.

3.2. Movimentação

Existem vários modelos de mobilidade utilizados para representar o movimento dos usuários em uma diversidade de cenários, usados para avaliar o comportamento de algoritmos de roteamento em redes *ad hoc*. Os modelos de mobilidade individual são os mais utilizados na literatura para avaliação da eficiência dos algoritmos de roteamento em redes *ad hoc*, devido às suas características de modelagem mais simples e fácil implementação. Porém, esses modelos restringem-se a comportamentos de movimentação específicos, que, muitas vezes, se afastam demais da realidade [Campos and Moraes, 2003].

As utilizações militares de redes *ad hoc* possuem algumas características próprias que podem ser assim resumidas [Cisco Systems, 2003]: uma cadeia de comando bem definida, que pode impactar na topologia da rede; as unidades (grupos de nós) devem cooperar umas com as outras, uma vez que, normalmente, compartilham uma missão; e as operações militares, tipicamente, são conduzidas dentro de limites espaço-temporais bem definidos. Esses fatores implicam em restrições à mobilidade dos nós da rede, em especial no controle da aleatoriedade dos movimentos.

3.3. Descrição

Neste trabalho é apresentado um padrão de comunicação em uma ação de oportunidade, constituída de assalto e tomada de posição inimiga. Este tipo de ação caracteriza-se pela necessidade de um alto nível de coordenação entre os grupos e por não se esperar forte reação por parte do inimigo, devido ao efeito do elemento surpresa.

O cenário proposto na Figura 1 representa uma típica operação de um pelotão de infantaria, composto de 35 participantes, cada qual com seus comunicadores pessoais dotados da capacidade de formação de uma rede *ad hoc*. Este pelotão está dividido em 8 grupos de combate, cada um com 4 elementos; um grupo formado por 2 observadores que ocupam uma posição avançada em relação aos outros grupos, e que têm como tarefa mantê-los informados da situação e das posições ocupadas pela força inimiga, quando houver; e uma Central de Comando, CC (representada pelo nó cinza na figura), operando no interior de um veículo (carro de combate, caminhão, etc).

Os grupos ocupam posições estratégicas para que possam alcançar, de forma cooperativa, um determinado ponto-objetivo neste cenário, com a finalidade de cumprir uma determinada tarefa. O padrão de tráfego empregado neste cenário consiste no envio de ordens e missões pela central de comando, seguido da mensagem de reconhecimento do grupo de combate que recebe a missão. Outro tipo usual de comunicação é o envio de informações por parte dos grupos de combate à CC, trazendo informes acerca do campo de batalha.

4. Modelo de Simulação

Para as simulações foi utilizado o simulador de rede *ns-2* [Fall and Varadhan, 2002]. Este simulador foi desenvolvido pela Universidade da Califórnia em Berkeley e pelo projeto

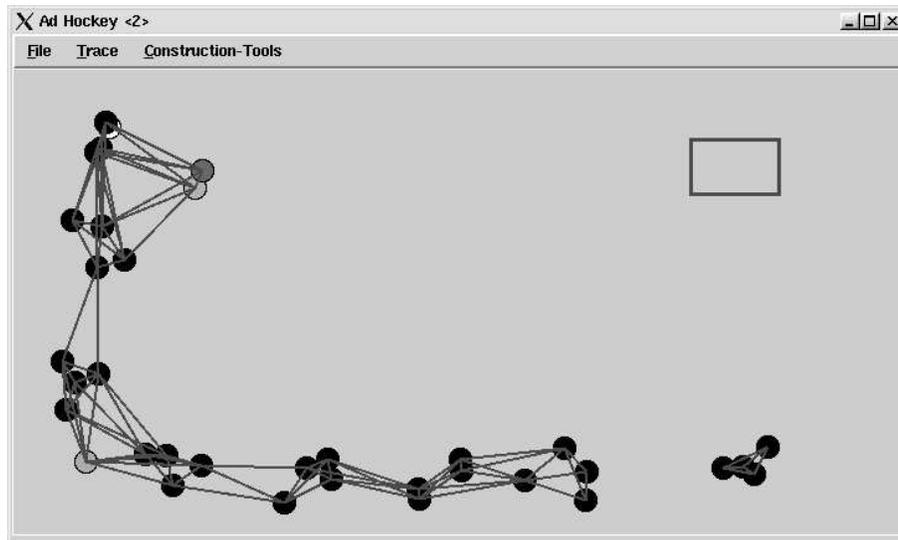


Figura 1: Cenário Militar

VINT. Posteriormente, o *Monarch Research Group* da CMU (*Carnegie Mellon University*) desenvolveu extensões para fornecer suporte a simulações para redes sem-fio completas, que modelam o padrão IEEE 802.11 na camada física, camada de enlace usando o modo DCF (*Distributed Coordination Function*). As métricas selecionadas para comparar o desempenho dos protocolos foram as seguintes:

- **taxa de entrega de pacotes** - razão entre o número de pacotes recebidos no destino final e o número de pacotes gerados pelas fontes de tráfego;
- **atraso médio fim a fim dos pacotes de dados** - inclui todos os possíveis atrasos causados pela latência da descoberta de rotas, propagação, atrasos devido a retransmissões da camada MAC e tempos de transferência;
- **número de pacotes de roteamento** - foram medidos a quantidade total de pacotes de roteamento que são representados pelos pacotes de descoberta e manutenção das rotas, enviados pela origem ou encaminhados pelos nós intermediários. Nos protocolos por demanda (AODV e DSR) estes pacotes são representados pelos pacotes RREQ, RREP e RERR. No DSDV são representados pelas tabelas de roteamento que são trocadas periodicamente.
- **número de bytes de roteamento** - foram medidos a quantidade total de *bytes* em cada pacote de roteamento, incluindo a quantidade de *bytes* de cabeçalho em pacotes de dados, que corresponde normalmente ao roteamento na fonte.

4.1. Modelo de Mobilidade

Com a proposta de avaliar o impacto da mobilidade no funcionamento dos protocolos de roteamento para redes *ad hoc*, foi desenvolvido neste trabalho um padrão de movimentação que busca se aproximar das características de um típico cenário militar. Por meio desse padrão evita-se mudanças bruscas de direção, permitindo-se que os movimentos sejam feitos na mesma direção com velocidades distribuídas uniformemente e com intervalos de pausa no movimento também distribuídos uniformemente. Desta forma, tenta-se retratar com uma maior aproximação, o movimento real dos usuários no cenário proposto.

Para especificação do padrão de mobilidade deste cenário foi usado o gerador de cenários de mobilidade *ScenGen* [Quiming, 2002], que gera uma saída configurada para o uso do simulador de rede *ns-2*. O *ScenGen* é uma ferramenta destinada a gerar cenários por meio de modelos de mobilidade. O *ScenGen* foi desenvolvido em C++ e implementa os seguintes modelos de mobilidade: *Random Waypoint*, *Pursue*, *Gauss-Markov*, *Brownian* e *Column*.

Para atender às restrições de mobilidade do cenário foi desenvolvido um novo modelo de mobilidade para ser incluído no *ScenGen*, denominado *Mixed Waypoint*. Neste modelo, o nó parte de um ponto de origem pré-especificado e se move para um ponto de destino escolhido aleatoriamente dentro de uma sub-área da área de simulação. Dessa forma, todos os grupos partirão na mesma direção, mas alcançarão pontos distintos, restritos ao limite de uma pequena área. Foram considerados dois tipos de movimento para este cenário: o movimento individual dos membros de cada grupo relativo ao centro do grupo e o movimento do grupo como um todo, aplicando-se o modelo de movimentação ao centro do grupo. Foram utilizados como base os modelos *Random Waypoint* [T. Camp, 2002], e *Mixed Waypoint*, respectivamente, para modelar os dois movimentos citados acima.

Os nós móveis que formam os grupos movem-se com uma velocidade que segue uma distribuição uniforme entre o intervalo de 0 a 2m/s e um tempo de pausa distribuído uniformemente entre o intervalo de 0 a 5 segundos. O nó que está montado no veículo move-se com velocidade média de 3m/s. Os grupos se movimentam com velocidade média de 2m/s em direção a um determinado objetivo militar (Figura 1). Para a área de simulação utilizou-se um campo retangular de 2000x1000m com a seguinte distribuição dos nós: 8 grupos formados por 4 nós cada grupo, 1 grupo formado por 2 nós e um nó montado em um veículo. Cada nó tem um raio de alcance de 250 metros. O tempo de simulação é de 500 segundos, que é o tempo médio que os grupos levam para alcançar o objetivo.

4.2. Modelos de Tráfego

Para esta simulação, o tráfego é gerado por 10 fontes *Constant Bit Rate* (CBR) - posicionadas na central de comando. Além disso, cada um dos 10 grupos móveis possui uma fonte adicional. O tamanho dos pacotes é de 512 *bytes*, a taxa de envio de pacotes de 4 pacotes/segundo. O modelo de tráfego é implementado de forma a selecionar aleatoriamente um nó-líder entre os participantes de cada grupo, representando o comandante do grupo de combate. Cada um destes nós-líderes é o responsável pela comunicação de seu grupo com a CC. Todas as conexões iniciam em tempos uniformemente distribuídos entre 0 e 180 segundos.

5. Resultados da Simulação

Foram realizadas simulações com os enlaces operando às taxas nominais de 2Mbps e 11Mbps.

5.1. Capacidade da Rede de 2Mbps

O resumo dos resultados obtidos nas simulações, utilizando capacidade da rede de 2Mbps, para cada protocolo no cenário proposto é apresentado na Tabela 1.

| MÉTRICAS AVALIADAS | DSDV | AODV | DSR |
|--------------------------|--------|--------|--------|
| Taxa de Entrega | 77,28% | 77,96% | 85,90% |
| Atraso médio (seg) | 0,4125 | 1,0532 | 1,0009 |
| Pacotes de Roteamento | 2804 | 32660 | 5102 |
| Bytes de Roteamento (MB) | 1,92 | 3,18 | 2,61 |

Tabela 1: Resultados das simulações utilizando capacidade da rede de 2Mbps

Taxa de Entrega de Pacotes

O AODV e o DSDV apresentam, em média, taxa de entrega de pacotes similares e descartam 41% e 35% respectivamente por quebra de enlace, enquanto que o DSR entrega em média 10% mais pacotes que estes dois protocolos e praticamente não apresenta descarte por quebra de enlace, já que utiliza o procedimento de “salvamento”, que significa que um nó, ao encontrar o próximo salto da sua rota inalcançável, pode buscar em seu *cache* uma rota alternativa para este destino, evitando, assim, que o pacote seja descartado. Como o DSR utiliza roteamento na fonte e escuta promíscua, aprende muito mais rotas que o AODV. A aprendizagem do AODV limita-se ao conhecimento da fonte quando encaminha pacotes.

As filas de interface são o principal motivo para o descarte de pacotes de dados para os três protocolos, sendo que, no DSR, representa 85% dos descartes medidos. Os pacotes de dados e os pacotes de roteamento que são enviados pela camada de roteamento são enfileirados na fila de interface até que a camada MAC possa transmiti-los. A fila de interface é FIFO e seu tamanho máximo foi configurado para 50 pacotes. Uma vez que, no cenário apresentado, os líderes de cada grupo só recebem pacotes do nó que representa a CC, em determinados momentos as filas de interface (IFQ) relativas a este nó tendem a ficar congestionadas de pacotes aguardando para serem enviados, ultrapassando a quantidade máxima de pacotes permitida para armazenamento. Com isso, observa-se que uma grande quantidade de pacotes de dados é descartada neste nó.

Atraso

A medida de atraso de entrega de pacotes é significativamente menor para o DSDV e é similar para o AODV e DSR. Isto se deve ao fato dos protocolos com modo de operação proativa, como o DSDV, possuírem rotas para todos os destinos armazenadas em tabelas, enquanto que o AODV e o DSR operam por demanda, somente buscando as rotas no instante que necessitam enviar um pacote de dados para um destino com rota desconhecida.

Sobrecarga de Roteamento

Embora o DSR e o AODV possuam mecanismos de construir rotas por demanda muito similares, a sobrecarga de roteamento exigida por ambos apresenta-se bem distinta. Verifica-se que o AODV gera, em média, um número de pacotes de roteamento seis vezes superior ao DSR por causa das inundações da rede com pacotes de descoberta de rotas. O AODV interpreta como quebra de enlace quando o nó não consegue reservar o meio para enviar pacotes de dados de vido ao congestionamento na rede, e com isto propaga a falsa informação de rota inválida através de pacotes de RERR, estimulando que se inicie processos de descoberta de rotas desnecessariamente, aumentando o número de pacotes

de roteamento que trafegam nesta rede. O AODV iniciou cerca de 1350 descobertas de rotas em 500 segundos de simulação, o que resultou na transmissão de 22.000 pacotes de *Route Request*. O DSR limita a propagação de pacotes *Route Request* na rede por meio de sua política de aprendizado de rotas e o procedimento de questionar primeiramente os nós vizinhos para obter uma rota desejada. A inundação da rede só acontece com o não recebimento de uma resposta destes vizinhos. Em um único ciclo de busca de rota o DSR responde a todos os questionamentos que alcançam o destino, portanto, a fonte aprende várias rotas alternativas para um mesmo destino, o que é útil quando a conexão falha. Com isso, o DSR envia, em média, 830 pacotes de *Route Request* em 500 segundos de simulação, sendo que 230 destes pacotes são não propagáveis, isto é, obteve-se as rotas questionando apenas os vizinhos, e cerca de metade dos pacotes de roteamento que circulam na rede são de *Route Reply*, já que o DSR responde a todas as requisições de rota que alcançam o destino, diferentemente do AODV, que responde apenas à primeira requisição de rota. Embora o DSDV exija trocas periódicas de tabelas de roteamento, com a finalidade de manter suas tabelas atualizadas, esse protocolo apresenta o melhor resultado com relação à quantidade de pacotes de roteamento, já que não utiliza pacotes de requisição de rotas, que são específicos dos protocolos que operam por demanda.

Análise Comparativa dos Protocolos

Apresentamos os resultados das diferentes métricas para cada protocolo dinamicamente, no decorrer do tempo de simulação, uma vez que o padrão de mobilidade desenvolvido para este cenário apresenta características diferentes ao longo do tempo. Para a condução das comparações de desempenho entre os protocolos foram utilizados intervalos de confiança de 95%. As barras de erros foram suprimidas dos gráficos da Figura 2 para permitir uma melhor visualização.

A taxa de entrega de pacotes para os diferentes protocolos é mostrada na Figura 2(a). O DSDV demora cerca de 35 segundos até que esteja pronto para enviar o primeiro pacote de dados, já que opera de forma proativa, montando suas tabelas de entradas, independentemente da necessidade de utilização de uma rota. Isto faz com que este protocolo apresente um alto índice de descarte nos primeiros segundos de simulação, devido aos pacotes que são enviados e perdidos antes que as rotas tenham sido estabelecidas. Como pode ser observado nos gráficos, o cenário apresentou condições críticas durante o intervalo de 100 a 200 segundos. Notou-se neste período um efeito de “afunilamento”, já que as fontes associadas ao nó de comando geram pacotes para todos os nós líderes da rede. Estes pacotes ficam enfileirados na fila de interface (IFQ) aguardando o meio estar livre para que possam ser enviados pela camada MAC, resultando, com isso, em atrasos maiores para o envio dos pacotes (Figura 2(b)). Neste momento, observou-se uma acentuada queda na taxa de entrega para os três protocolos, sendo que o DSR, que até então estava se mostrando ligeiramente melhor que o AODV, atingiu valores mais baixos. A partir de 250 segundos de simulação, as rotas ficam mais estáveis, com isso, a taxa de entrega praticamente atinge 100%, sendo que o DSR é o primeiro a se aproximar deste valor. O DSDV apresenta o pior desempenho quando as condições da rede são críticas, mas recupera-se rapidamente quando estas condições melhoram, mostrando-se superior ao AODV, que para manter suas rotas exige uma alta sobrecarga na rede com pacotes de roteamento.

A Figura 2(b) mostra a métrica de atraso médio de pacotes para os três protocolos. O DSDV apresenta o menor atraso, pois suas rotas estão armazenadas em tabelas de roteamento, fazendo com que a latência seja mínima. No início da simulação, o atraso é zero porque todos os pacotes de dados foram descartados por falta de rota. O DSR apresenta o maior atraso quando as condições da rede são críticas, decrescendo acentuadamente quando estas condições melhoram. Em condições críticas as rotas alternativas presentes no *cache* do DSR desatualizam-se mais rapidamente, resultando em perda de tempo utilizando estas rotas. Observa-se que os três protocolos apresentam um atraso maior no trecho crítico da rede. Isso ocorre porque as filas de interface ficam muito cheias.

A quantidade de pacotes de roteamento apresentado na Figura 2(c) mostra que o DSDV não reage às diferentes condições da rede, uma vez que os seus intervalos de atualizações de rotas permanecem inalterados. O AODV apresenta a maior quantidade de pacotes de roteamento, devido às constantes inundações da rede em busca de rotas para diferentes destinos. O DSR limita a quantidade de busca de rotas por causa do seu processo de aprendizado de rotas.

A quantidade de *bytes* de roteamento apresentada na Figura 2(d) mostra-se aproximadamente constante para o DSDV. O roteamento na fonte usado pelo DSR faz com que ele apresente uma quantidade de *bytes* de roteamento elevada. Os responsáveis pela quantidade de *bytes* geradas para o AODV são os pacotes de controle decorrentes das inundações da rede, já que os pacotes de dados carregam somente o endereço de destino e não as rotas para alcançar este destino.

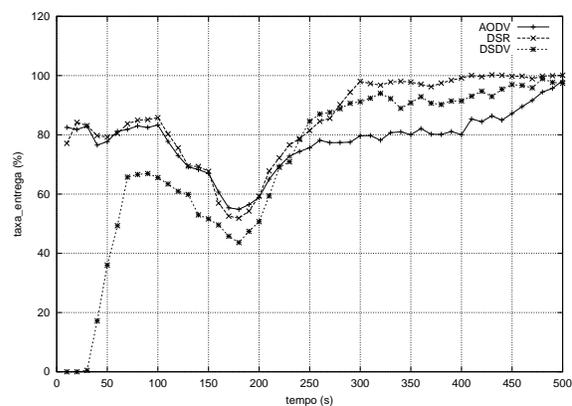
5.2. Capacidade da rede de 11Mbps

Ao dimensionarmos a rede para este cenário achamos suficiente utilizar a capacidade da rede de 2Mbps, Uma vez que se trata de um cenário com poucos nós (35 nós) e com carga de tráfego baixa (4pac/seg). Entretanto, os resultados mostraram-se abaixo dos valores esperados, pois o congestionamento nas filas devido à concentração do tráfego no nó que corresponde à CC, provoca uma grande quantidade de descartes de pacotes neste nó. Por isto, repetimos as simulações utilizando uma largura de banda de 11Mbps, como mostram a Tabela 2. Observamos para o AODV uma drástica melhora em relação à quantidade de pacotes de roteamento que trafegavam na rede, pois diminuiu-se consideravelmente o descarte de pacotes de dados motivados pelo congestionamento, restringindo, assim, o número de inundações da rede, resultante das repetidas descobertas de rotas iniciadas. Com o descongestionamento da rede todos os protocolos aumentam sua taxa de entrega de pacotes.

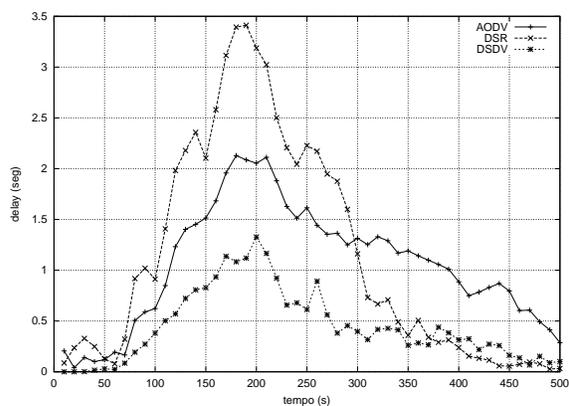
| MÉTRICAS AVALIADAS | DSDV | AODV | DSR |
|---------------------------------|--------|--------|--------|
| Taxa de Entrega | 86,15% | 97,10% | 97,69% |
| Atraso Médio | 0,0437 | 0,0143 | 0,0566 |
| Pacotes de Roteamento | 2646 | 2994 | 1466 |
| <i>Bytes</i> de Roteamento (MB) | 1,93 | 1,99 | 1,82 |

Tabela 2: Resultados das simulações utilizando largura de banda de 11Mbps

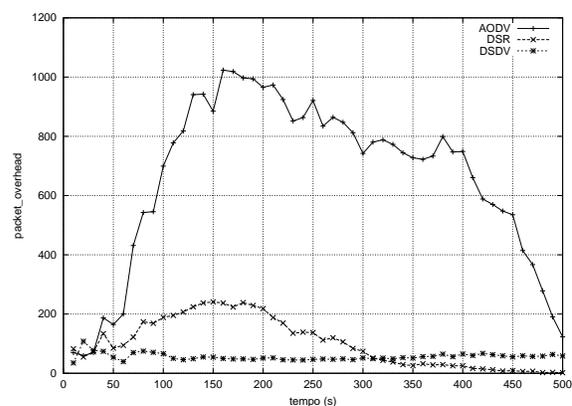
Na tentativa de solucionar os problemas decorrentes dos diversos particionamentos na rede que ainda se apresentavam, repetimos a simulação anterior aumentando o



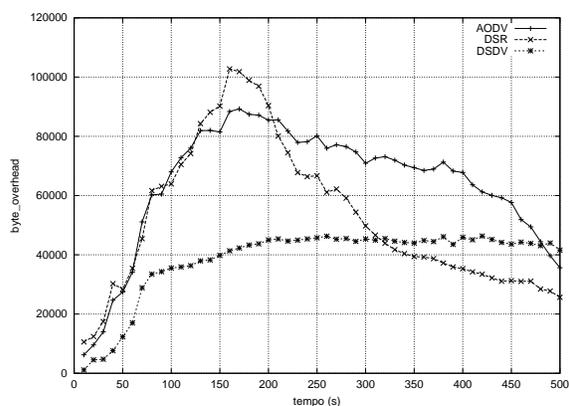
(a) Taxa de Entrega dos Pacotes



(b) Média de Atraso dos Pacotes



(c) Número de Pacotes de Roteamento



(d) Número de bytes de Roteamento

Figura 2: Comparação dos protocolos para as diferentes métricas usando largura de banda de 2Mbps.

alcances dos transmissores para 300 metros, e com isto, obtivemos um resultado mais adequado à eficiência exigida para este tipo de aplicação, como mostra a Tabela 3.

| MÉTRICAS AVALIADAS | DSDV | AODV | DSR |
|--------------------------|--------|--------|--------|
| Taxa de Entrega | 93,30% | 99,50% | 99,63% |
| Atraso Médio | 0,0118 | 0,0162 | 0,0225 |
| Pacotes de Roteamento | 5132 | 2877 | 1165 |
| Bytes de Roteamento (MB) | 1,64 | 2,17 | 1,94 |

Tabela 3: Resultados das simulações utilizando alcance dos transmissores de 300 metros

6. Conclusão e Trabalhos Futuros

Para avaliar o desempenho dos protocolos de roteamento AODV, DSR e DSDV sob condições que não sejam puramente aleatórias foi projetado e simulado um cenário que

busca retratar uma situação real de uma operação militar em um campo de batalha. Para isto, foi feito um levantamento de todas as características deste cenário, em manuais e com militares especialistas, de forma que sua apresentação fosse a mais fiel possível. O desenvolvimento deste cenário consistiu em se selecionar entre os modelos de mobilidade implementados na ferramenta utilizada (*ScenGen*), os que melhores representassem os movimentos reais dos nós, o que resultou na necessidade de implementar um novo modelo para alcançar este objetivo com maior precisão. Os geradores de tráfego também foram implementados de modo que as conexões dos nós seguissem os padrões hierárquicos exigidos para estes tipos de operação.

No cenário proposto os nós apresentam baixa velocidade, portanto as rotas permanecem, em geral, mais estáveis, e o que se observa é que, tipicamente, existe um ou mais períodos críticos onde as condições de tráfego podem sobrecarregar o nó que exerce o controle dos outros nós do grupo. Neste intervalo, o DSR, que até então se mostrara em vantagem em relação aos outros protocolos, sofre uma suave queda de desempenho, o que foi contornado aumentando-se a largura de banda para 11Mbps. No geral, o DSR apresentou o melhor desempenho nas diversas simulações realizadas. Como neste cenário os nós dentro de um grupo estão próximos um dos outros, as rotas são facilmente restabelecidas em caso de quebra de enlace, já que, qualquer nó dentro de um grupo pode servir para encaminhar pacotes. Portanto, protocolos que tenham a característica de múltiplas rotas para o mesmo destino, como o DSR, são indicados para este tipo de cenário. É indicada também, a utilização de alcance dos transmissores de 300 metros para atenuar o problema de diversos particionamentos na rede, causados pelo próprio comportamento da movimentação em grupo dos nós móveis. Alcances maiores que este não são aconselháveis, pois pode comprometer desnecessariamente a segurança da operação.

Embora a rede analisada apresente um número limitado de nós, com reduzida velocidade e uma limitada taxa de envio de pacotes, observa-se que ela difere das redes *ad hoc* típicas (planas), nas quais os nós possuem livre movimento para qualquer direção, e podem estabelecer comunicação indiscriminadamente com qualquer outro nó dentro de seu alcance. As forças militares possuem uma cadeia hierárquica de comando bem definida e, em geral, a localização dos elementos de combate (nós), sua mobilidade e a comunicação entre eles seguem este preceito, ocasionando um considerável efeito restritivo na topologia da rede *ad hoc*. As redes *ad hoc* militares caracterizam-se por apresentar uma configuração hierárquica, acarretando na sobrecarga de tráfego em determinados nós da rede, e em sérias dificuldades na disputa do meio, o que resulta em problemas de atraso, descarte de pacotes e, conseqüentemente, em aumento do tráfego de roteamento. Este problema é amenizado redimensionando-se a capacidade da rede para 11 Mbps.

Para fins comparativos realizou-se simulações, onde os nós foram posicionados aleatoriamente na área de simulação, e seus movimentos foram conduzidos baseados exclusivamente no modelo *Random Waypoint*. Verificou-se uma queda acentuada no desempenho dos três protocolos, já que a dimensão da área não garante uma densidade razoável para a rede em questão. Os nós movimentado-se todos em uma direção, como no cenário proposto, favorece a conectividade desta rede.

Para futuras pesquisas sugerimos que baseado nas simulações apresentadas, proponha-se um protocolo extraindo as características dos protocolos avaliados que melhor se adaptem ao cenário proposto. Além disso, deve-se avaliar o impacto de

implementações que contemplem aspectos relativos à segurança nesse tipo de rede. Por fim, conduzir novas simulações com outros protocolos existentes, a fim de dar continuidade à busca de um protocolo que melhor atenda às exigências impostas por este tipo de cenário.

Referências

- Broch, J., Maltz, D. A., Johnson, D. B., Hu, Y.-C., and Jetcheva, J. (1998). A performance comparison of multi-hop wireless for ad hoc network routing protocols. In *in Proceedings of the Fourth Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking*, pages 85–97.
- Campos, C. A. V. and Moraes, L. F. M. (2003). Modelos markovianos de mobilidade individual para redes móveis ad hoc. In *SBRC Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores*.
- Cisco Systems, I. (2003). Mobile ad hoc networks for the military. In *MSWiM Proceedings of the ACM International Workshop on Modeling and Simulation of Wireless and Mobile Systems*.
- David B. Johnson, D. A. M. (2002). The dynamic source routing protocol for mobile ad hoc networks. In *Internet Draft, draft-ietf-manet-dsr-06.txt*.
- Fall, K. and Varadhan, K. (2002). *ns Notes and Documentation*. UC Berkeley, LBL, USC/ISI, and Xerox PARC (The VINT Project). <http://www.isi.edu/nsnam/ns/ns-documentation.html>.
- Johansson, P., Larsson, T., Hedman, N., Mielczarek, B., and Degermark, M. (1999). Scenario-based performance analysis of routing protocols for mobile ad-hoc networks. In *In Proceedings of ACM/IEEE MOBICOM'99*, pages 195–206.
- Määttä, R. (2000). Wireless ad hoc routing protocols, a taxonomy. *Defence Forces Research Institute*.
- Perkins, C. and Bhagwat, P. (1994). Highly dynamic destination-sequenced distance-vector routing (DSDV) for mobile computers. In *ACM SIGCOMM Conference on Communications Architectures, Protocols and Applications*, pages 234–244.
- Perkins, C. E., Belding-Royer, E. M., and Das, S. R. (2002). *Ad Hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing*. <http://www.ietf.org/internet-drafts/draft-ietf-manet-aodv-12.txt>.
- Perkins, C. E., Royer, E. M., Das, S. R., and Marina, M. K. (2000). Performance comparison of two on-demand routing protocols for ad hoc networks. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM)*, pages 3–12.
- Quiming, L. (2002). *The Scenario Generator: a tool to generate MANET mobility scenarios for NS-2*. UC Berkeley, LBL, USC/ISI, and Xerox PARC (The VINT Project). <http://www.comp.nus.edu.sg/liqm/scengen>.
- T. Camp, J. Boleng, V. D. (2002). A survey of mobility models for ad hoc network research. In *Wireless Communications and Mobile Computing (WCMC)*, pages 483–502.