

# Análise de desempenho de protocolos de roteamento para redes Ad Hoc sem fio

Fabrizio Lira Figueiredo\*, Marcel Cavalcanti de Castro, Marcos Antônio de Siqueira, Heloísa Peixoto de Barros Pimentel, Aníbal César Aguiar de Carvalho, José Antonio Martins

*Este artigo apresenta uma análise comparativa do desempenho de protocolos de roteamento para redes Ad Hoc sem fio. Uma vez descritos os protocolos AODV, DSR, DSDV, AOMDV, OLSR e ABR, simulações que permitem a comparação de desempenho entre eles, segundo um conjunto específico de métricas de Qualidade de Serviços (QoS), são realizadas. Os resultados encontrados permitem identificar e quantificar os pontos fortes e fracos de cada protocolo, gerando subsídios inclusive para a concepção de um novo protocolo de roteamento otimizado para o provimento de serviços de voz às redes Ad Hoc sem fio. O sistema resultante será de baixo custo e focado em serviços de telefonia em regiões rurais do Brasil.*

**Palavras-chave:** Protocolos de roteamento. Redes Ad Hoc sem fio. Serviços de voz. Análise quantitativa.

## 1 Introdução

Redes Ad Hoc sem fio caracterizam-se pela dinâmica topológica e pelas limitações da transmissão impostas pelo canal de rádio. Nesse caso, protocolos apropriados devem ser adotados para o estabelecimento e a manutenção de rotas entre dois nós de uma rede Ad Hoc (origem e destino), permitindo o encaminhamento de pacotes por meio de nós intermediários quando não houver conectividade direta entre eles.

Os protocolos proativos, ou *table driven*, mantêm em cada nó da rede uma ou mais tabelas com informações sobre rotas para todos os outros nós da rede. Quando ocorrem alterações na rede, os nós as propagam pela rede de forma que todos os nós possam alterar suas tabelas automaticamente. A troca de informações para a atualização das tabelas gera um tráfego (de controle) adicional na rede (*overhead* ou cabeçalho), que aumenta significativamente com a quantidade e com a mobilidade dos nós (HAAS & TABRIZI, 1998).

Outro ponto negativo no roteamento proativo refere-se aos elevados níveis de armazenamento e processamento. Alguns exemplos de protocolos proativos são: Wireless Routing Protocol (WRP) (MURTHY & GARCIA-LUNACEVES, 1996) e Destination Sequenced Distance Vector (DSDV) (PERKINS & BHAGWAT, 1994).

Na classe de protocolos reativos, as rotas são criadas apenas quando um pacote precisa ser enviado de um nó-origem para um nó-destino, através de um procedimento de descoberta de rotas. As rotas estabelecidas, quando interrompidas, são reconstruídas por meio de um procedimento de manutenção de rota. Em geral,

protocolos desse tipo utilizam os recursos da rede mais eficientemente, pois o *overhead* é gerado apenas na descoberta e na manutenção das rotas efetivamente necessárias. No entanto, o fato de nem sempre haver uma rota disponível implica um atraso maior no início da transmissão. Alguns exemplos de protocolos reativos são o Dynamic Source Routing (DSR) (JOHNSON, MALTZ & HU, 2003) e o Ad Hoc On-Demand Distance Vector (AODV) (PERKINS, BELDING-ROYER & DAS, 2003).

Os protocolos de roteamento Ad Hoc podem ainda ser classificados segundo o tipo de estrutura (hierárquicos ou planos), a quantidade de rotas estabelecidas (rota única ou múltiplas rotas) ou o posicionamento geográfico (baseados e não baseados em localização) (CÂMARA, 2000) (MURTHY & MANOJ, 2004).

Em aplicações de tempo real, algumas funções devem ser suportadas por um protocolo de roteamento Ad Hoc:

- responder rapidamente às variações da topologia da rede, provocadas, por exemplo, pela mobilidade dos nós;
- ser “escalável”, ou seja, ter desempenho pouco afetado pelo aumento do número de nós e do tráfego na rede;
- minimizar o atraso fim-a-fim e jitter;
- prover múltiplas rotas para evitar congestionamentos;
- utilizar eficientemente os recursos da rede, incluindo capacidade de processamento e armazenamento.

Na literatura, diversos protocolos de roteamentos têm sido propostos, mas poucas comparações quantitativas mais abrangentes e baseadas em um conjunto de métricas e cenários orientados a serviços de tempo real têm sido publicadas. Visando gerar subsídios para a concepção de um

\*Autor a quem a correspondência deve ser dirigida: fabrizio@cpqd.com.br.

protocolo de roteamento apropriado para o suporte de serviços de tempo real, realizou-se, neste trabalho, uma análise de desempenho quantitativa de um conjunto de protocolos de roteamento convencionais para redes Ad Hoc sem fio. Foi avaliada a escalabilidade em relação ao número de nós e à taxa de tráfego, em cenários *outdoor* e com topologia fixa, de acordo com o contexto do projeto em desenvolvimento no CPqD.

As demais seções são organizadas da seguinte forma: a Seção 2 apresenta o funcionamento dos protocolos de roteamento selecionados, com ênfase nos mecanismos de descoberta e reconstrução de rotas. A Seção 3 traz os resultados de simulação para os cenários utilizados. Na Seção 4, são apresentadas as conclusões do trabalho, em que são sugeridas possíveis abordagens para pesquisas futuras.

## 2 Protocolos de roteamento para redes Ad Hoc

Neste trabalho, foi selecionado um conjunto de protocolos de roteamento para redes Ad Hoc sem fio para a realização da análise quantitativa. Estão incluídos tanto protocolos clássicos (DSDV, DSR e AODV) como protocolos mais avançados (AOMDV, ABR e OLSR), que suportam algumas funcionalidades estratégicas para serviços de tempo real, como o suporte a múltiplas rotas e mecanismos otimizados de propagação de mensagens em toda a rede (*flooding*). Esses protocolos são descritos resumidamente a seguir.

### 2.1 Destination Sequenced Distance Vector (DSDV)

Trata-se de um protocolo proativo baseado no algoritmo de Bellman-Ford ou vetor de distâncias, mas com alguns melhoramentos para prevenir a ocorrência de *loops* nas rotas (PERKINS & BHAGWAT, 1994). Como em um típico algoritmo baseado em vetor de distâncias, cada nó mantém tabelas de roteamento para todos os possíveis destinos, para prevenir a ocorrência de *loops*, cada entrada da tabela de roteamento em um nó é marcada com um número de sequência (*sequence number*) atribuído pelo nó-destino. Tais números de sequência permitem que os nós distingam rotas antigas de rotas novas, evitando assim a formação de *loops* nas rotas.

O protocolo DSDV requer que cada nó anuncie, para seus atuais vizinhos, sua própria tabela de roteamento. Alterações na topologia podem ocorrer dinamicamente, então o anúncio deve ser realizado com frequência, assegurando que cada nó da rede possa localizar outro nó. Cada anúncio realizado deverá conter um novo número de sequência, informações de endereço de

destino, número de saltos (*hops*) para alcançar esse destino, e o número de sequência de informações recebidas do nó-destino.

Em decorrência do movimento dos nós ou das condições de propagação do canal de RF, quebras de enlace deverão ocorrer com certa frequência na rede. A quebra de enlace pode ser detectada pelo protocolo de camada de enlace, ou a partir do não-recebimento de mensagens de *broadcast* dos nós vizinhos durante um intervalo de tempo pré-configurado. Quando um enlace para um próximo salto (*next hop*) é interrompido, os números de sequência das rotas que contêm tal enlace também são atualizados. Essa informação de alteração de rota é imediatamente enviada por meio de *broadcasts* de pacotes de informações de roteamento.

Quando um nó recebe uma nova informação de roteamento, ela é comparada com a informação já disponível de um pacote recebido anteriormente. Qualquer rota com número de sequência recente é usada, enquanto aquelas com números de sequência antigos são descartadas. Por sua vez, uma rota com número de sequência igual a uma já existente é escolhida se apresentar uma métrica melhor.

A aplicação do protocolo DSDV é limitada a pequenas redes Ad Hoc pois ele é baseado em trocas periódicas de informações entre os nós para a atualização das tabelas de roteamento. Além disso, o protocolo DSDV requer que as tabelas de roteamento nos nós tenham entradas para todos os destinos possíveis.

### 2.2 Ad Hoc On-Demand Distance Vector (AODV)

Trata-se de um protocolo reativo (*on-demand*) puro, pois não é baseado na manutenção de informações sobre rotas pelos nós, tampouco na troca de informações de roteamento entre os nós (PERKINS, BELDING-ROYER & DAS, 2003).

O protocolo AODV pode ser entendido como um aperfeiçoamento do protocolo DSDV, por meio da diminuição do número de mensagens de troca de informações entre os nós para a manutenção das tabelas de roteamento. Além disso, as rotas no AODV são criadas apenas quando necessárias, evitando-se assim a manutenção de tabelas de roteamento completas.

Na operação do AODV, quando um nó (origem) deseja comunicar-se com outro nó (destino), ele (nó-origem) envia uma mensagem do tipo Route Request (RREQ) para seus nós vizinhos. Essa mensagem contém informações de endereço de origem e destino, número de sequência, número de saltos da rota e um número identificando a mensagem de *broadcast* (*broadcast\_id*).

Ao receber um RREQ, um nó pode responder ao nó-origem ou retransmitir a mensagem RREQ para seus vizinhos. Quando um nó intermediário

recebe uma mensagem RREQ e não possui nenhuma informação sobre uma rota até o destino indicado na mensagem, esse nó retransmite a mensagem RREQ para seus nós vizinhos, antes incrementando o campo do número de saltos. Além disso, o nó armazena informações referentes ao RREQ, como os endereços da origem e do destino e o *broadcast\_id*, que serão utilizadas no eventual estabelecimento da rota desejada.

Se a mensagem RREQ eventualmente chegar a um nó (intermediário) que já possui uma rota válida até o destino desejado – ou que é o próprio nó-destino –, o nó responde àquele que encaminhou o RREQ com uma mensagem do tipo *Route Reply Packet* (RREP). Essa mensagem é encaminhada até o nó-origem, criando assim um caminho reverso para que se estabeleça a comunicação bidirecional entre os nós-origem e destino.

É importante ressaltar que o protocolo AODV foi projetado para reduzir a disseminação de tráfego de controle, eliminando parcialmente o *overhead* no tráfego de dados, com o objetivo de aumentar a escalabilidade e o desempenho. Em contrapartida, por ser um protocolo reativo, existe a ocorrência de latências na transmissão do tráfego de dados para rotas novas na rede.

### 2.3 Dynamic Source Routing (DSR)

O DSR é um protocolo reativo que usa o conceito de roteamento baseado na origem. Ele é formado por dois componentes principais: a descoberta e a manutenção de rotas (JOHNSON, MALTZ & HU, 2003).

Como o DSR opera totalmente sob demanda, tanto na descoberta como na manutenção das rotas, ele não requer nenhum tipo de troca periódica de pacotes de sinalização. Dessa forma, não há transmissão de mensagens do tipo *link status sensing* e detecção de vizinhos. Conseqüentemente, não há necessidade de mecanismos de detecção do estado dos *links* no protocolo da camada de enlace.

Esse comportamento totalmente sob demanda permite que, quando a rede estiver estacionária, o *overhead* de roteamento tenda a zero a partir do momento em que todas as rotas necessárias para comunicação já tenham sido descobertas. À medida que os nós se movimentam ou os padrões de comunicação mudam, o *overhead* de pacotes de roteamento passa a ocorrer somente na atualização de rotas em uso no instante das mudanças.

Tais características tornam o protocolo *soft state*, ou seja, a sessão pode ser interrompida por causa das alterações ocorridas na rede. As conexões estabelecidas são dinâmicas e seus fluxos atravessam roteadores intermediários por meio de caminhos alocados para eles por tempo limitado. Portanto, a perda de qualquer estado

não interfere na correta operação do protocolo, já que o estado pode não mais ser necessário ou, em caso contrário, pode ser redescoberto rapidamente.

A operação do protocolo DSR pode ser descrita supondo um cenário em que um nó A deseja comunicar-se com um nó B. Nesse instante, inicia-se a etapa da descoberta da rota com o envio, pelo nó-origem A, de um pacote do tipo *Route Request* (RREQ) a todos os seus vizinhos. Esse pacote RREQ contém os endereços do destino (nó B) e da origem (nó A). Cada nó intermediário que recebe o pacote RREQ poderá realizar duas ações: se o nó intermediário não possuir em sua memória de rotas uma rota válida (não expirada) até o destino desejado B, então tal nó intermediário adicionará seu endereço ao pacote RREQ, retransmitindo-o a seus nós vizinhos. Eventualmente, o pacote RREQ chegará ao nó-destino B, tendo em seu conteúdo a sequência de nós da rota empregada entre A e B. O nó-destino, então, envia ao nó-origem um pacote do tipo *Route Reply* (RREP), empregando o reverso da rota descoberta.

Em contrapartida, o pacote RREQ pode ser recebido por um nó intermediário que possui em seu *cache* uma rota até o nó-destino. Nesse caso, o nó intermediário responderá ao nó-origem A com um pacote *Route Reply* informando a rota descoberta. Essa rota é composta pelas rotas parciais entre o nó-origem A e o nó intermediário, bem como entre o nó intermediário e o nó-destino B.

Uma vantagem do protocolo DSR é a possibilidade de não manter tabelas de roteamento nos nós, diminuindo assim a carga de processamento de pacotes nos nós, bem como o espaço de armazenamento necessário.

### 2.4 Associativity-Based Routing (ABR)

O Associativity-Based Long-Lived Routing (TOH, 1999) é um protocolo do tipo *on-demand*, que se baseia na premissa de que mecanismos de roteamento fundamentados no critério *shortest path* nem sempre podem ser apropriadamente aplicados a redes Ad Hoc sem fio.

O protocolo ABR define uma métrica para o estabelecimento de rotas diferentes daquelas encontradas nos protocolos anteriores. Para tanto, introduz o conceito de “grau de associatividade”, que expressa a estabilidade dos enlaces de um nó, que está relacionada com sua mobilidade em relação a seus vizinhos. A partir da avaliação da estabilidade local dos enlaces, obtém-se a estimativa de longevidade de uma rota, que corresponde à estabilidade da conexão ponto-a-ponto.

O grau de associatividade é estimado através da transmissão periódica por parte de cada nó de sinais do tipo *beacon* (*broadcast*). O objetivo central do protocolo ABR é escolher uma rota

cujos nós intermediários possuam alto grau de associatividade, pois estatisticamente tais nós terão baixo grau de mobilidade e os enlaces associados serão mais estáveis. Dessa forma, minimiza-se o número de atualizações das tabelas de roteamento durante a transmissão.

No processo de descoberta de rotas, assim como ocorre em outros protocolos, o nó-origem envia a seus vizinhos um pacote do tipo Broadcast Query (BQ), contendo o endereço do nó-destino, entre outras informações. Ao receber o pacote BQ, um nó deverá executar os seguintes procedimentos: verificar se já processou a requisição e descartá-la em caso afirmativo. Caso contrário, verificar se é o nó-destino e, se não for, acrescentar seu endereço e respectivas métricas (incluindo o grau de associatividade de seus vizinhos) ao pacote BQ, realizando um novo *broadcast* para os vizinhos.

Ao receber um BQ, o nó vizinho mantém apenas as informações de conectividade referentes aos enlaces com os nós vizinhos que não são vizinhos do nó anterior. Desse modo, quando o pacote BQ finalmente atingir o nó-destino, conterá o caminho percorrido pelo pacote, além dos graus de associatividade relativos aos nós que compõem aquele caminho.

Ao receber vários pacotes BQ do mesmo nó-origem, por meio de rotas distintas, o nó-destino seleciona a melhor rota (rota com maior grau de associatividade, menor número de *hops* ou uma seleção aleatória entre as rotas recebidas) e encaminha um pacote do tipo Reply, usando o caminho reverso descoberto pelo pacote BQ recebido. Ao receber os pacotes Reply, os nós intermediários assinalam a rota selecionada como válida e desativam todas as demais rotas para o nó-destino.

## 2.5 Ad Hoc On-Demand Multipath Distance Vector Routing (AOMDV)

Protocolos On-demand Multipath descobrem múltiplos caminhos entre a origem e o destino em uma simples descoberta de rota. Portanto, a descoberta de uma nova rota é necessária somente quando todos os caminhos existentes falharem. Já os protocolos de "caminho único" (*single path*) necessitam descobrir uma nova rota toda vez que o único caminho existente falha. Logo, protocolos On-Demand Multipath são mais eficientes, pois reduzem as interrupções no tráfego de aplicações de dados e o *overhead* de roteamento.

O AOMDV (MARINA & DAS, 2001) é uma extensão do protocolo AODV. A grande diferença está no número de rotas encontradas para cada descoberta de rota. O protocolo garante também prevenção de *loops* e a criação de múltiplos caminhos disjuntos.

No AOMDV, a mensagem Route Request (RREQ) é propagada da origem em direção ao

destino, estabelecendo múltiplos caminhos reversos em nós intermediários e nó-destino. Múltiplas mensagens Route Reply (RREPs) trafegam de volta nesses caminhos reversos, formando múltiplos caminhos em direção ao destino, a partir dos nós intermediários e de origem. Para isso, o AOMDV estende as informações de roteamento já disponíveis no protocolo AODV, permitindo o gerenciamento de múltiplos caminhos.

No AOMDV, condições necessárias para a manutenção de múltiplos caminhos são empregadas, como a regra do número de sequência, em que há manutenção de rotas somente para o mais alto número de sequência do destino; a regra do anúncio de rotas, em que nunca se anuncia uma rota mais curta que uma já anunciada; e a regra de aceitação de rotas, em que nunca se aceita uma rota mais longa que uma já anunciada.

Nos procedimentos de descoberta e manutenção, o AOMDV procura estabelecer rotas com enlaces ou nós disjuntos, isto é, caminhos que possuem independência com relação a falhas. O protocolo garante que os enlaces sejam disjuntos por meio de um mecanismo que mantém informação do último *hop* (além do *next hop*) para cada caminho. Para cumprir essa funcionalidade, o protocolo precisa conter informação do último *hop* para cada caminho na tabela de roteamento. As mensagens RREQs e RREPs do AOMDV devem carregar essa informação.

Com o uso de múltiplas rotas pelo AOMDV, existem duas opções para o encaminhamento dos pacotes através das múltiplas rotas: usar um caminho por vez ou usar todos simultaneamente. Para o protocolo AOMDV, foi escolhido o uso de um caminho por vez, na ordem em que foram estabelecidos. A segunda opção é interessante para o balanceamento de carga, sendo necessário resolver questões como quantidade de tráfego em cada caminho e reordenação de pacotes no destino.

## 2.6 Optimized Link State Routing Protocol (OLSR)

O Optimized Link State Routing Protocol (OLSR) é um protocolo de roteamento desenvolvido para operar em redes móveis Ad Hoc. É um protocolo do tipo proativo, no qual os nós trocam informações de topologia periodicamente. O protocolo OLSR adota o esquema de encaminhamento de pacotes baseado em tabela de rotas (CLAUSEN & JACQUET, 2003).

Para diminuir a intensidade de inundação (*flooding*) da rede com mensagens de sinalização, cada nó seleciona um Multipoint Relay (MPR) para propagar suas mensagens. No OLSR, somente os nós eleitos como MPRs são responsáveis por encaminhar o tráfego de

controle, permitindo a diminuição no número dessas mensagens na rede. Os nós selecionados como MPRs anunciam para a rede informações de alcançabilidade a respeito dos nós que os selecionaram como MPR. Os nós da rede selecionam seus MPRs entre seus vizinhos de um salto. Além das funcionalidades clássicas dos protocolos de roteamento Ad Hoc, o OLSR suporta funcionalidades complementares de extensões, como a redistribuição de rotas de outras redes e a redundância de MPRs. Na operação do protocolo, cada nó escolhe um conjunto de vizinhos para retransmitir suas mensagens (denominados MPRs). Nós “não-MPRs” recebem as mensagens de vizinhos de um *hop* e não as encaminham. Desse modo, os MPRs devem ser escolhidos de forma que, em termos de alcance, todos os nós a dois saltos recebam as mensagens de atualização. A seleção de MPRs pode ser descrita por diversos algoritmos, como exemplificado em Qayyum (2000). O mecanismo de escolha e notificação de MPRs é implementado por meio da troca de mensagens *HELLO*, em que cada nó possui e mantém informações de um conjunto de MPRs (*MPR Set*), para armazenamento dos MPRs do nó, e de quais nós estão usando o roteador local como MPR, respectivamente.

### 3 Resultados de simulação

A análise de desempenho realizada neste trabalho visa estudar o comportamento dos protocolos de roteamento para cenários de redes Ad Hoc *outdoor* sem mobilidade, com variações na densidade de nós da rede.

Essa análise apresenta simulações com geração de tráfego Constant Bit Rate (CBR) em diferentes taxas de envio de pacotes, com o intuito de analisar o desempenho dos protocolos de roteamento Ad Hoc para valores diferentes de densidade de nós. Os parâmetros e seus respectivos valores utilizados na simulação são apresentados na Tabela 1. Na análise, foram simulados cinco protocolos de roteamento (ABR, AODV, AOMDV, DSDV, DSR, OLSR), todos disponíveis no simulador NS-2 (Network Simulator – NS-2).

**Tabela 1** Parâmetros usados pela simulação dos protocolos de redes Ad Hoc

Cenário de simulação	
<b>Simulador</b>	NS-2
<b>Número de nós</b>	25, 50, 100, 200
<b>Topologia simulada</b>	Nós posicionados aleatoriamente (área: 1.000 x 1.000 m)
<b>Modelo de propagação</b>	Modelo do terreno plano

Cenário de simulação	
<b>Área de cobertura</b>	200 m
<b>Taxa de transmissão</b>	11 Mbit/s
<b>Taxa de transmissão de dados</b>	8, 16, 32, 64, 128 kbit/s
<b>Modelo de tráfego</b>	Constant Bit Rate (CBR)
<b>Protocolo MAC</b>	IEEE 802.11 DCF
<b>Comprimento dos pacotes de dados</b>	64 bytes

Foram adotadas as seguintes métricas para a avaliação de desempenho dos protocolos:

- percentual de entrega de pacotes: definida como a razão entre o número de pacotes recebidos nos nós-destino e o número de pacotes gerados pelos nós-origem, correspondente a uma medida de vazão efetiva;
- atraso fim-a-fim médio: consiste na diferença entre tempo de geração de pacotes na origem e o tempo de seu recebimento no destino. Resulta do somatório dos atrasos na rede, atrasos de processamento, atrasos de bufferização, tempos de transmissão e propagação de pacotes;
- jitter médio: no escopo de transmissão de dados, é a variação média no atraso de pacotes de dados causada por fatores como congestionamento da rede, pequenos deslocamentos no tempo previsto de recepção (*timing drift*) ou mudanças de rota;
- carga de roteamento normalizada: definida como a relação entre o número de pacotes de controle de roteamento transmitidos pelo número total de pacotes (dados e roteamento) transmitidos na rede.

Os cenários analisados correspondem a um tempo de simulação de 100 segundos, com intervalo de confiança de 90%. O tráfego é transmitido sobre um único fluxo de dados entre dois nós Ad Hoc localizados nas extremidades da topologia da rede. O impacto da variação do número de nós (25, 50, 100 e 200 nós) e da taxa de geração de tráfego (8, 16, 32 e 128 kbit/s) é analisado. O tamanho de pacotes gerados é fixado em 64 bytes e a análise do impacto da variação da taxa de tráfego é realizada no cenário de 200 nós.

A Tabela 1 apresenta os resultados obtidos para o percentual de entrega de pacotes em função do número de nós para os diferentes protocolos de roteamento simulados (ABR, AODV, AOMDV, DSDV, DSR, OLSR). Verifica-se que os protocolos DSR e AOMDV apresentam o melhor desempenho, com percentual estável em torno de 100%. Os demais protocolos apresentam uma redução na taxa efetiva de entrega de pacotes,

com o aumento do número de nós. O protocolo OLSR apresenta uma degradação de desempenho em topologias de 25 e 50 nós, que se deve à redução da eficácia dos mecanismos de seleção de MPRs em cenários de baixa densidade de nós.

**Tabela 2 Razão de entrega de pacotes em função do número de nós para cada protocolo analisado**

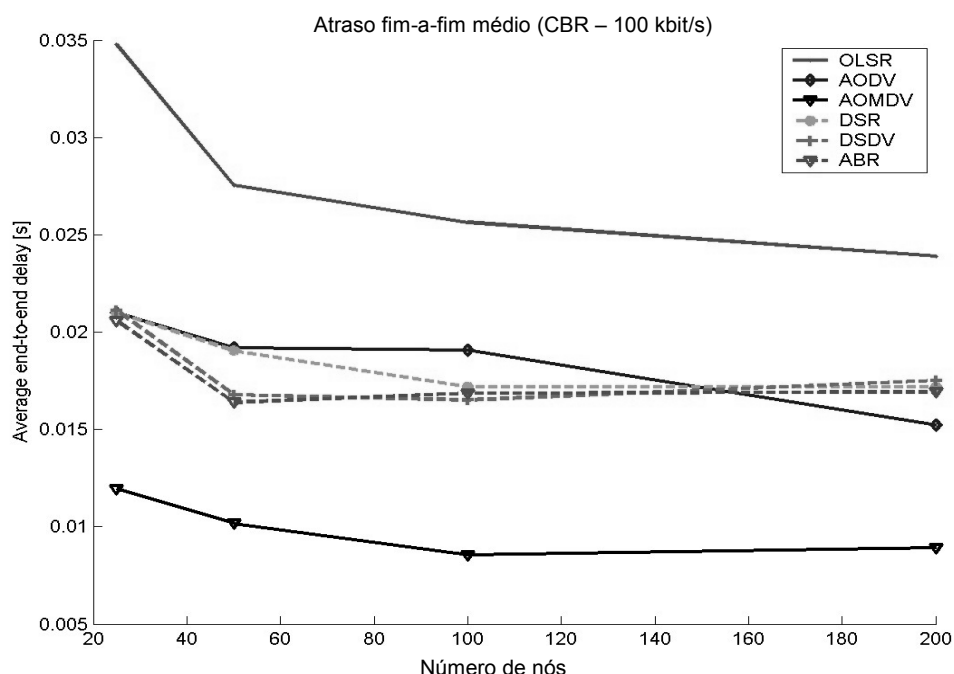
Protocolo	Número de nós			
	25	50	100	200
OLSR	75,60	91,92	100,00	97,12
AODV	99,96	99,96	99,96	88,44
AOMDV	99,88	99,84	99,96	99,92
DSR	99,96	99,96	99,96	99,96
DSDV	99,88	99,96	97,64	85,92
ABR	99,96	99,80	99,84	83,13

O atraso fim-a-fim médio dos pacotes de dados, em virtude do aumento do número de nós na rede, pode ser visualizado na Figura 1. Entre todos os protocolos simulados, o AOMDV apresentou o menor atraso fim-a-fim, permanecendo estável em torno de 10 ms. Verifica-se que os atrasos para os demais protocolos oscilam entre 15 e 35 ms. Observa-se ainda, para a maioria dos protocolos, uma leve

tendência de redução do nível de atraso, por causa do aumento da densidade de nós na rede, que possibilita a construção de rotas mais curtas. A Figura 2 ilustra o comportamento do jitter médio em relação ao aumento do número de nós. Pode-se verificar que a variação da densidade dos nós afeta significativamente o nível de jitter proporcionado pelos protocolos OLSR, DSDV e ABR, chegando a 20 ms na topologia de 50 nós, com o protocolo OLSR. Os protocolos AOMDV, AODV e DSR apresentam desempenhos semelhantes, com nível de jitter estável, em valores abaixo de 5 ms.

A variação da carga de roteamento normalizada, em função do número de nós da rede, é ilustrada na Figura 3. Observa-se que os protocolos proativos (DSDV e OLSR) de fato geram maior carga de roteamento na rede. Os protocolos AODV e DSR, por sua vez, geram o menor nível de *overhead* de sinalização, mantendo-se abaixo de 10% em todos os casos.

As Figuras 4 e 5 apresentam os resultados de percentual de entrega de pacotes e atraso fim-a-fim, em função de diferentes taxas de tráfego. Na Figura 4, verifica-se que, com o aumento da taxa de tráfego, ocorre redução da razão de entrega de pacotes para os protocolos ABR, AODV, DSDV, DSR e OLSR. No caso do protocolo AOMDV, no entanto, a razão de entrega de pacotes permanece estável e próxima de 100%.



**Figura 1 Desempenho em termos do atraso fim-a-fim, em função do número de nós**

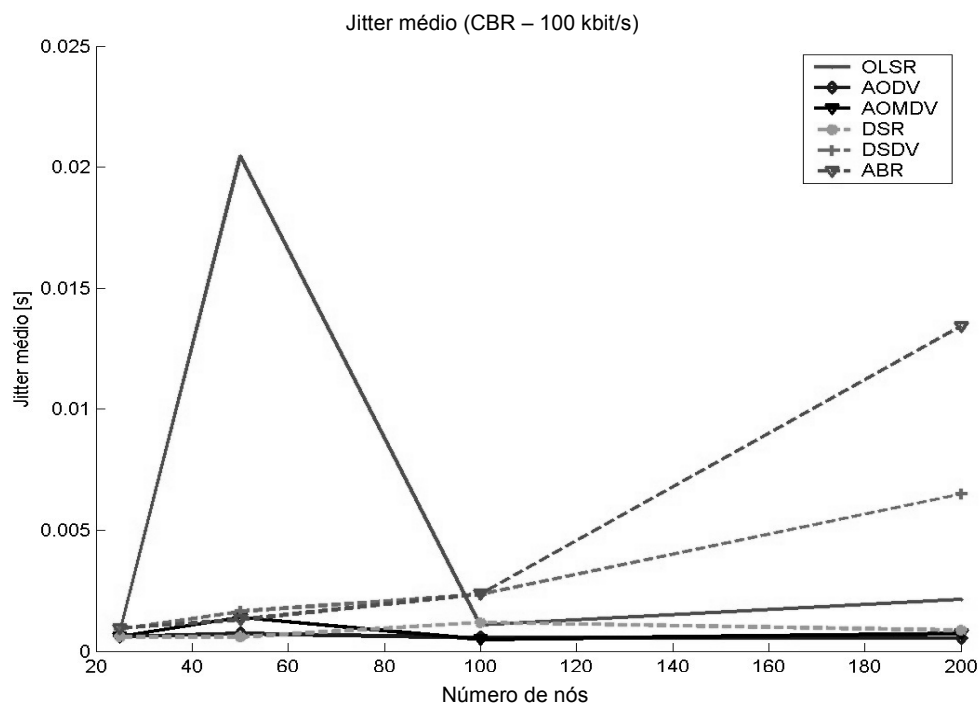


Figura 2 Desempenho em termos de jitter, em função do número de nós

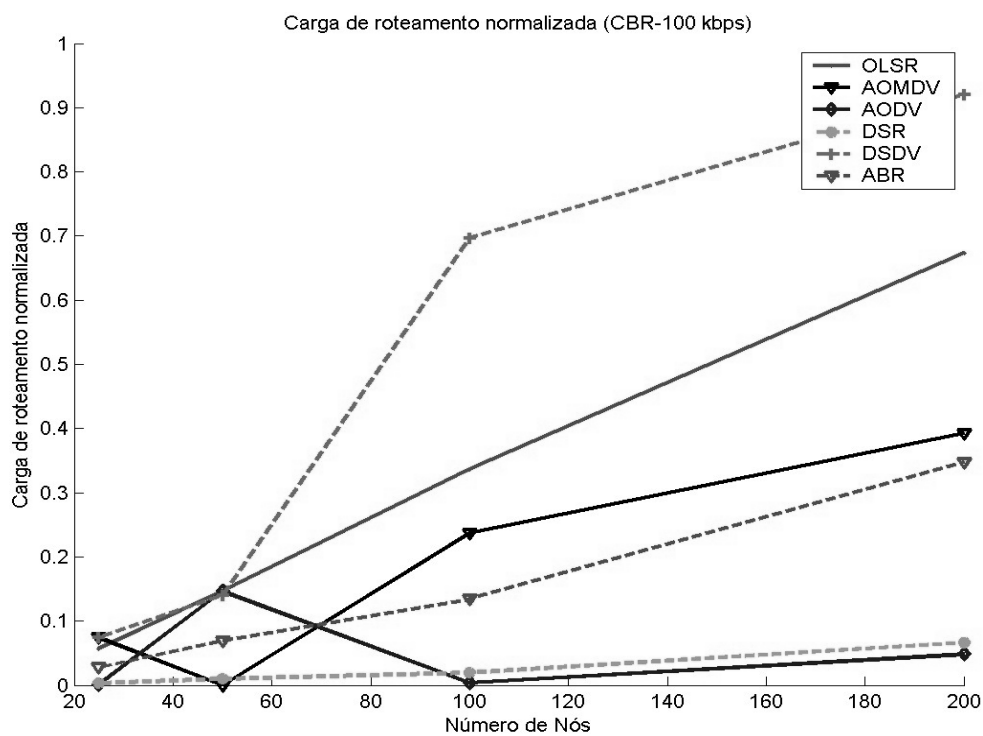


Figura 3 Desempenho em termos de carga de roteamento normalizada, em função do número de nós

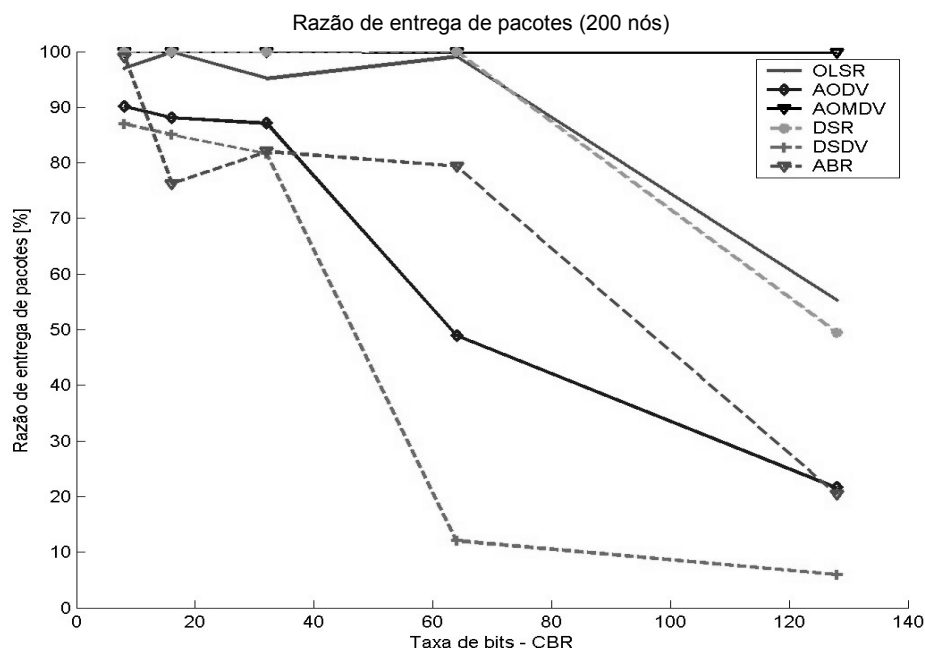


Figura 4 Desempenho em termos do percentual de entrega de pacotes, em função das taxas de tráfego

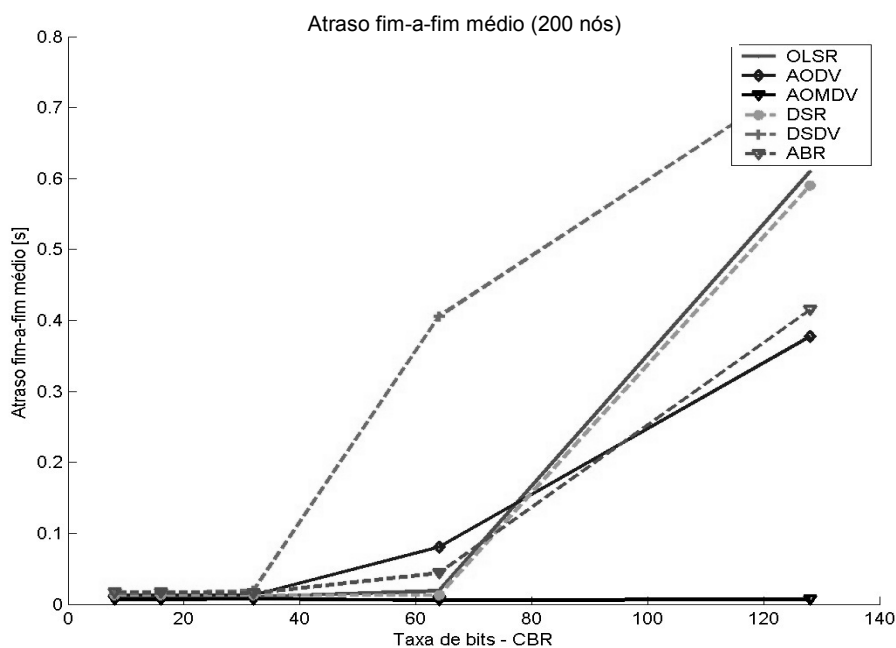


Figura 5 Desempenho em termos do atraso fim-a-fim, em função das taxas de tráfego

A Figura 5 ilustra os resultados de atraso fim-a-fim em função da taxa de tráfego. Consta-se que o protocolo AOMDV permaneceu com os menores valores de atraso fim-a-fim, ao passo que os demais protocolos apresentaram significativa elevação do atraso para a taxa de 128 kbit/s. Nesse cenário, o protocolo DSDV apresenta o pior desempenho, com nível de

atraso em torno de 800 ms.

Analisando os resultados dos gráficos e das tabelas apresentados, observa-se que os protocolos reativos apresentam desempenho superior em relação aos proativos, na grande maioria dos cenários. Esse fato indica que as funcionalidades implementadas nos protocolos reativos são mais eficazes em minimizar o



impacto do aumento do número de nós e das taxas de transmissão sobre tais métricas. Com relação às métricas de QoS mais relevantes (atraso fim-a-fim, jitter e vazão efetiva), os protocolos AOMDV, AODV e DSR proporcionaram melhor desempenho nos cenários avaliados, como menor nível de *overhead* de sinalização. Deve-se, portanto, considerar o suporte à multiplicidade de rotas e aos mecanismos eficientes de descoberta e manutenção as funcionalidades recomendáveis para um protocolo de roteamento orientado a QoS.

#### 4 Conclusão

Este trabalho apresenta uma ampla análise quantitativa do desempenho dos seguintes protocolos de roteamento para redes Ad Hoc sem fio: AODV, AOMDV, DSR, DSDV, OLSR e ABR.

A partir das observações dos resultados, conclui-se que os protocolos reativos AOMDV, AODV e DSR são mais eficientes, no conjunto das métricas de QoS consideradas. Portanto, eles são mais indicados como referência na definição de funcionalidades estratégicas para um protocolo de roteamento orientado a QoS. Vale salientar que os resultados foram obtidos com base em cenários de topologia estática e *outdoor*.

Os trabalhos futuros incluem a concepção e a validação de um novo protocolo de roteamento orientado a QoS, visando suportar serviços de voz sobre IP. Também pretende-se avaliar soluções do tipo *cross-layer*, obtidas a partir da integração de funcionalidades de protocolos de roteamento com a camada MAC e *frameworks* de QoS.

#### Referências

- BERTSEKAS, D.; GALLAGER, R. **Data networks**. 2. Ed. New Jersey: Prentice-Hall, 1992.
- CÂMARA, D. **Estudos de algoritmos de roteamento para redes móveis Ad Hoc**. 2000. Dissertação (mestrado em Telecomunicações) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- CLAUSEN, T.; JACQUET, P. **Optimized Link State Routing Protocol (OLSR)**. IETF RFC 3626, outubro de 2003. Disponível em: <[www.ietf.org/rfc](http://www.ietf.org/rfc)>. Acesso em: 10 jan. 2004.
- GIORDANO, S. **Mobile Ad Hoc networks**. In: Stojmenovic, I. (Ed.). *Handbook of Wireless Networks and Mobile Computing*, John Wiley & Sons, Inc., 2002.
- HAAS, Z. J.; TABRIZI, S. On some challenges and design choices in Ad Hoc communications. In: **IEEE MILCOM'98. Proceedings of the IEEE MILCOM'98**. Bedford, MA, 1998. p. 187-192.
- JOHNSON, D. B.; MALTZ, D. A.; HU, Y. C. **The Dynamic Source Routing protocol for mobile Ad Hoc networks (DSR)**. IETF RFC Ed Queue, maio de 2003. Disponível em: <[www.ietf.org/rfc](http://www.ietf.org/rfc)>. Acesso em: 12 jan. 2004
- MARINA, M. K.; DAS, S. R. Ad Hoc On-Demand Multipath Distance Vector routing. In: **IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON NETWORK PROTOCOLS**, 9., 2001, Riverside, CA. **Proceedings of 9th IEEE International Conference on Network Protocols**.
- MOY, J. **OSPF Version 2**. IETF RFC 1583, março de 1994. Disponível em: <[www.ietf.org/rfc](http://www.ietf.org/rfc)>. Acesso em: 15 jan. 2004
- MURTHY, S; GARCIA-LUN-ACEVES, J. J. An efficient routing protocol for wireless networks. **ACM Balzer Mobile Networks and Application Journal**, v. 1, n. 2, p. 183-197, nov. 1996. Disponível em: <<http://citeseer.ist.psu.edu/cs>>. Acesso em: 23 jan 2004
- MURTHY, C. S. R.; MANOJ, B. S. **Ad Hoc wireless networks, architectures and protocols**. New Jersey: Prentice Hall, 2004.
- PERKINS, C.; BELDING-ROYER, E.; DAS, S. **Ad Hoc On-Demand Distance Vector (AODV) routing**. IETF RFC 3561, julho de 2003. Disponível em: <[www.ietf.org/rfc](http://www.ietf.org/rfc)>. Acesso em: 18 jan. 2004.
- PERKINS, C.; BHAGWAT, P. Highly Dynamic Destination-Sequenced Distance-Vector routing (DSDV) for mobile computers. In: **ACM SIGCOMM Computer Communication Review. Proceedings of the Conference on Communications Architectures, Protocols and Applications SIGCOMM '94**. London, UK, 1994. p. 234-244.
- QAYYUM, A.; VIENNOT, L.; LAOUITI, A. **Multipoint relaying: An efficient technique for flooding in mobile wireless networks**. Research Report RR-3898, fevereiro de 2000. Disponível em: <<http://citeseer.ist.psu.edu/cs>>. Acesso em: 23 jan. 2004.
- TOH, C. K. **Long-lived Ad Hoc routing based on the concept of associativity**. IETF Internet Draft, março de 1999. Disponível em: <[www.ietf.org](http://www.ietf.org)>. Acesso em: 20 jan. 2004.
- NETWORK SIMULATOR – NS-2. Disponível em: <<http://www.isi.edu/nsnam/ns/>>.

**Abstract**

*This work shows a comparative analysis of the performance of wireless networks Ad Hoc routing protocols. AODV, DSR, DSDV, AOMDV, OLSR and ABR are presented and network simulation shows the performance of each one according to a specific Quality of Services (QoS) metric set. The results allow to identify and quantify both strong and weak features of each protocol, which leads to the definition of an entirely new, optimized routing protocol for voice service provisioning in wireless Ad Hoc networks. The resulting product to be implemented shall provide a low cost system for telephone services in Brazilian rural regions, to be developed by CPqD.*

**Key words:** Routing protocols. Wireless Ad Hoc networks. Voice services. Quantitative analysis.