

Proposta, Implementação e Análise de uma Métrica de Roteamento Multiplicativa para Redes em Malha Sem Fio*

Diego Passos , Célio Vinicius Neves de Albuquerque (Orientador)

Instituto de Computação – Universidade Federal Fluminense (UFF)

{dpassos, celio}@ic.uff.br

Abstract. *This paper proposes and implements a routing metric for multihop wireless networks, based on packet loss probabilities, in a programmable router testbed. The main goal of this metric is to avoid the routing instability and the high packet loss rates observed with existing metrics. Performance results, based on measurements of the ReMesh wireless mesh network deployed over the city of Niterói, Brazil, show improvements in terms of routing stability, packet loss rates, delays and, in some cases, throughput.*

Resumo. *Este artigo propõe e implementa uma métrica de roteamento para redes sem fio de múltiplos saltos, baseada em probabilidades de perda de pacotes, em um ambiente de testes formado por roteadores programáveis. O objetivo principal desta métrica é evitar a instabilidade das rotas e as altas taxas de perda de pacotes observadas com as métricas existentes. Os resultados apresentados, baseados em medições da rede ReMesh, implementada na cidade de Niterói, Brasil, mostram melhora de desempenho em termos de estabilidade de rotas, taxa de perda de pacotes, atrasos e, em alguns casos, vazão.*

1. Introdução

Redes ad-hoc são redes sem fio de múltiplos saltos, que têm como características serem auto-configuráveis e suportarem mobilidade. Este tipo de rede se opõe às redes sem fio estruturadas, onde existem pontos de acesso fixos que intermediam toda comunicação dos nós clientes.

Em uma rede estruturada, se um nó cliente deseja enviar uma informação a um outro cliente, os pacotes deverão ser transmitidos diretamente a um ponto de acesso, que por sua vez irá redirecioná-los ao nó de destino. Já em uma rede ad-hoc não há necessidade desta infra-estrutura, já que transmissão entre dois clientes se dá de forma direta, ou através de múltiplos saltos, onde os nós intermediários são outros clientes da mesma rede, atuando como roteadores encaminhando os pacotes até o destino final.

Claramente as redes ad-hoc têm custo menor do que as estruturadas, já que não é necessária a utilização de pontos de acesso. Além disso, uma rede ad-hoc é altamente escalável, já que cada cliente é potencialmente um roteador de pacotes para outros nós. Por outro lado, o roteamento neste tipo de rede não é trivial, já que não existe *a priori* um conjunto de nós com a missão de encaminhar pacotes, fazendo com que seja necessário que cada cliente descubra as rotas até o seu destino. Existe ainda a característica da

*Este trabalho é parcialmente financiado pelo CNPq, através do projeto PIBIC e pela RNP através do GT-Mesh.

mobilidade, que faz com que as rotas sejam dinâmicas, uma vez que os nós estão em constante movimento.

Neste cenário, surge um novo conceito de rede: as redes em malha ou *mesh*. As redes em malha utilizam comunicação sem fio e de múltiplos saltos, como as redes ad-hoc. Porém, em redes *mesh*, existe um subconjunto dos nós que não apresenta mobilidade. Estes nós atuam como roteadores para os nós clientes, que podem ser móveis. A idéia é que cada roteador da rede tenha diversos enlaces sem fio com alguns outros nós, de forma que a topologia obtida seja uma malha de enlaces. A grande vantagem desta abordagem é o fato de que cada nó tem vários caminhos alternativos para um mesmo destino. A escalabilidade das redes ad-hoc continua valendo, já que adicionar um novo ponto à malha só faz com que o número de caminhos alternativos cresça.

Embora a mobilidade neste tipo de rede seja menor, a necessidade de protocolos de roteamento continua, já que ela trabalha com múltiplos saltos, além de precisar se adaptar automaticamente à adição de novos nós. Dada a semelhança com as redes ad-hoc, houve uma utilização natural de protocolos de roteamento ad-hoc em redes *mesh*. No entanto, várias particularidades tornam o desenvolvimento de protocolos de roteamento *mesh* desejável.

O objetivo deste artigo é propor uma alternativa à métrica *Expected Transmission Count* (ETX), tendo em vista os problemas apresentados pela mesma, como alta taxa de perda de pacotes e instabilidade de rotas. Esta métrica, que tem como objetivo minimizar a perda de pacotes, será chamada de *Minimum Loss* (ML).

O artigo está organizado da seguinte forma: na seção 2 são apresentados alguns trabalhos relacionados. A seção 3 mostra com mais detalhes a métrica ETX, apontando seus pontos positivos e negativos. Na seção 4 é proposta a métrica ML para evitar alguns dos problemas apontados na métrica ETX. Na seção 5 são mostrados os resultados comparativos obtidos. Finalmente, na seção 6 é feita uma breve conclusão seguida de idéias para trabalhos futuros.

2. Trabalhos Relacionados

Muito estudo tem sido realizado na área de protocolos e métricas de roteamento para redes sem fio de múltiplos saltos. Os principais protocolos utilizados neste tipo de rede incluem os tradicionais OLSR [Clausen and Jacquet 2003], AODV [Perkins and Royer 1999, Perkins et al. 2003] e DSR [Johnson et al. 2001], além de variações destes, propostas em diversas implementações de redes *mesh*, como o MR-LQSR [Draves et al. 2004], o Srcr [Bicket et al. 2005] e o HSLS [Santivanez and Ramanathan 2003].

O OLSR (*Optimized Link State Routing*) é um protocolo pró-ativo, baseado em estado de enlaces, sendo utilizado pelos projetos VMesh [Tsarmpopoulos et al. 2005] e ReMesh. Já o AODV (*Ad-hoc On-Demand Distance Vector*) é reativo e baseia-se em vetor de distâncias. O projeto *MeshCluster* [Ramachandran et al. 2005] utiliza o AODV-ST (*AODV-Spanning Tree*), uma versão modificada do AODV, que emprega alguns conceitos do DSR (*Dynamic Source Routing*).

Já o MR-LQSR (*Multi-Radio Link-Quality Source Routing*), baseado no DSR, é utilizado na solução *mesh* da Microsoft e tem como principal característica ser projetado especialmente para redes que trabalham com múltiplos rádios. O projeto RoofNet

[Bicket et al. 2005] utiliza o Srrc, um protocolo híbrido que combina informações de estado de enlace com a técnica de descoberta de rotas do DSR. Finalmente, o HSLS (*Hazy Sighted Link State*) é um protocolo desenvolvido pelo projeto CUWin [CUWin 2007]. Este protocolo, também baseado em estado de enlace, tem por objetivo minimizar o custo da manutenção de uma visão consistente da rede. Mais detalhes sobre estes protocolos podem ser encontrados em [Akyildiz et al. 2005].

Em termos de métricas de roteamento, a mais simples consiste na tentativa de minimizar o número de saltos da origem ao seu destino. Ou seja, se existem duas rotas possíveis entre dois nós de uma rede, escolhe-se aquela que se utiliza da menor quantidade de enlaces. Por sua simplicidade, esta métrica é implementada em diversos protocolos. No entanto, [Couto et al. 2003] mostra que esta abordagem pode facilmente levar a escolhas de rotas ruins, já que a qualidade dos enlaces sem fio pode atingir níveis muito baixos.

Para contornar este problema, surgiram as chamadas *quality-aware metrics*. Ou seja, métricas de roteamento que levam em consideração algum tipo de fator que possa influenciar o desempenho do enlace. Entre estas métricas, pode-se citar o ETX [Couto et al. 2003], o ETT e o WCETT [Draves et al. 2004], além do mETX e do ENT [Koksal and Balakrishnan 2006].

O ETX procura minimizar o número de transmissões em nível de enlace necessárias para o sucesso no envio de um pacote entre dois nós. Esta métrica será abordada em maiores detalhes na seção 3. O ETT (*Expected Transmission Time*) é uma melhoria do ETX que leva em consideração não apenas o número de transmissões, mas também a taxa de transmissão de cada enlace, de forma a minimizar o atraso no envio de um pacote. Já o WCETT (*Weighted Cumulative ETT*) é uma variação do ETT para redes que utilizam múltiplos rádios, buscando aumentar a vazão levando em conta a diversidade de frequências possíveis.

O mETX (*modified ETX*) é uma variação do ETX que tenta tornar a estatística feita pela métrica mais precisa. Segundo [Koksal et al. 2006], o ETX não consegue captar as variações que ocorrem no enlace em intervalos de tempo menores do que da transmissão de um pacote, pois é feita apenas uma média de pacotes perdidos. A proposta é que, ao invés de se fazer a média dos pacotes perdidos, fosse usada uma média de bits errados por pacote. A cada pacote recebido com erros, o número de bits errados deveria ser contabilizado na média. Os autores sugerem que para isso seja utilizado um pacote de controle com uma sequência de bits conhecida por todos os nós da rede.

Já o ENT (*Effective Number of Transmissions*) é uma proposta de pré-processamento baseado no ETX, com o objetivo de desconsiderar enlaces cuja taxa de perda de nível 2 possa acarretar um número excessivo de perdas nas camadas de transporte e aplicação. Por definição, o ENT depende de 3 parâmetros: o ETX do enlace, o limite de retransmissões da camada de enlace e um valor δ relacionado com a taxa de perdas tolerável na rede. Após este pré-processamento, o protocolo deve escolher as rotas de acordo com os seus critérios, porém utilizando apenas os enlaces restantes.

Embora muitas métricas já tenham sido propostas, poucas são realmente implementadas. Várias delas se mostram inviáveis, como o mETX e o ENT e, na prática, a maior parte dos protocolos implementam o ETX ou pequenas variações deste.

3. A métrica ETX

A métrica ETX, proposta em [Couto et al. 2003], tem por objetivo aumentar a vazão conseguida na rede. Para isto, os autores sugerem escolher rotas que diminuam o número total de transmissões no nível de enlace, ao longo do caminho.

Dada a probabilidade P_{ab} de sucesso na transmissão de um pacote pelo enlace entre dois nós a e b , o número de transmissões necessárias para que esta envio ocorra é $\frac{1}{P_{ab}}$. Assim, define-se o ETX de um link como o inverso da probabilidade de sucesso na transmissão de um pacote através deste link. Ou seja:

$$ETX_{ab} = \frac{1}{P_{ab}}.$$

Em uma rede com três nós, a , b e c , se são necessárias duas transmissões para obter sucesso no enlace $a \rightarrow b$ e três no enlace $b \rightarrow c$, então, para um pacote ser enviado com sucesso de a até c , passando por b , são necessárias ao todo 5 transmissões de nível 2. Seguindo este raciocínio, define-se o ETX de um caminho $a_0 \rightarrow a_1 \rightarrow \dots \rightarrow a_n$, formado por n enlaces, como:

$$ETX_n = \sum_{i=0}^{n-1} \frac{1}{P_{a_i a_{i+1}}},$$

onde $P_{a_i a_{i+1}}$ denota a probabilidade de sucesso na transmissão de um pacote entre os nós a_i e a_{i+1} .

Pelas definições, fica claro que é necessário obter as probabilidades de sucesso dos enlaces para calcular o ETX. Para inferir tais valores, os autores propõe a utilização de pacotes de *broadcast*. Pelo padrão 802.11, tais pacotes não sofrem retransmissão, fazendo com que seja possível estimar a probabilidade de sucesso através da seguinte fórmula:

$$P_{ab} = \frac{s}{w}.$$

Na expressão, w é o tamanho de uma janela de transmissões considerada (por exemplo, dos últimos 10 pacotes), enquanto s é o número de sucessos obtidos.

Desta forma, o algoritmo de roteamento precisaria apenas enviar pacotes de controle periódicos e fazer a estatística de pacotes recebidos com sucesso de cada vizinho (através de números de sequência). O algoritmo escolheria então os caminhos com menor soma dos valores de ETX dos enlaces intermediários.

3.1. Problemas da Métrica ETX

Os proponentes da métrica ETX mostram que com esta abordagem o desempenho de uma rede sem fio de múltiplos saltos aumenta consideravelmente em relação à métrica de menor número de saltos. Mesmo assim, é fácil notar que este tipo de abordagem pode levar a escolhas ruins. Por exemplo, dada uma topologia com três nós, onde $ETX_{ab} = 1$, $ETX_{bc} = 1$ e $ETX_{ac} = 2$, percebe-se que a métrica avalia que a rota $a \rightarrow c$ é tão boa quanto a rota $a \rightarrow b \rightarrow c$. De fato, o protocolo escolherá a primeira opção, por dar

preferência ao caminho com menor número de saltos. Porém, o peso 2 no link direto representa uma taxa de perda de 50% dos pacotes.

Segundo [Couto et al. 2003], numa rede sem fio existe uma tendência de queda exponencial da vazão em função do número de saltos. Por isso, dar preferência aos caminhos mais curtos é uma boa estratégia do ponto de vista da vazão. No entanto, uma taxa de perda de 50% é muito acentuada, levando à queda do desempenho da rede. Isto é especialmente verdadeiro numa transmissão confiável de dados, utilizando o TCP (*Transmission Control Protocol*).

Neste exemplo fica claro também que na métrica ETX a adição de um enlace a uma rota eleva significativamente o custo de um caminho, já que cada enlace utilizado tem peso mínimo de 1.

Um outro problema um pouco mais sutil desta métrica está no fato de que são utilizados pacotes de *broadcast* para inferir as probabilidades. Pelo padrão 802.11, estes pacotes são transmitidos na modulação mais robusta (equivalente a uma taxa de 1Mbps). Quanto mais robusta a modulação utilizada, menor é a probabilidade de perda do pacote. Portanto, utilizando esta técnica, pode-se fazer uma estimativa muito otimista da qualidade de um enlace.

Por exemplo, sejam dois links, a e b , cujos valores de ETX associados sejam 1. Isto significa que a taxa de transmissão de 1Mbps ambos não sofreram perdas. Porém, é possível que a uma taxa maior o enlace a comece a apresentar perdas, enquanto b não. Desta forma, a métrica avaliaria ambos da mesma forma, embora o enlace b seja melhor do que o enlace a .

4. A Métrica ML

Como mostrado na seção 3, a métrica ETX utiliza a probabilidade de perda de pacotes nos enlaces para estimar o número de transmissões necessárias para que um envio tenha sucesso na camada de enlace. Desta forma, a soma dos valores de ETX de cada enlace de uma rota serial igual ao número de transmissões de um pacote em nível 2 necessárias para que este fosse enviado com sucesso desde a origem até o destino. O objetivo desta abordagem é aumentar a vazão obtida, pois, segundo os autores, ela é inversamente proporcional a esta quantidade de transmissões.

No caso da utilização de uma abordagem multiplicativa, o custo de cada enlace seria a probabilidade de sucesso na transmissão de um pacote em nível de enlace, e não o seu inverso. Desta forma, a métrica ML define o custo ML_n de uma rota $a_0 \rightarrow a_1 \rightarrow \dots \rightarrow a_n$, formada por n enlaces, como:

$$ML_n = \prod_{i=0}^{n-1} P_{a_i a_{i+1}},$$

onde $P_{a_i a_{i+1}}$ denota a probabilidade de sucesso na transmissão de um pacote entre os nós a_i e a_{i+1} .

O significado de ML_n é a probabilidade de sucesso de todo o caminho, supondo que a transmissão de cada enlace seja um evento independente. Portanto, escolher a rota

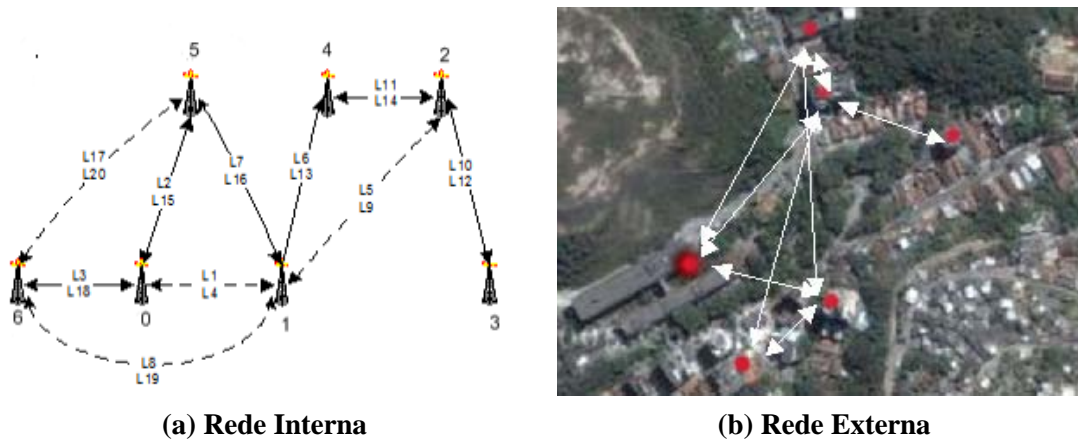


Figura 1. Topologias utilizadas nos testes. À esquerda, um esquema da topologia interna. À direita, uma visualização da topologia externa.

com o maior valor de ML significa escolher o caminho com a maior probabilidade de sucesso no envio de um pacote.

Claramente, isso diverge do objetivo da métrica ETX. Enquanto uma busca diminuir o número de transmissões em nível 2, a outra tenta achar caminhos mais seguros, em termos de perda de pacotes, ainda que isso leve a caminhos com mais saltos e, por isso, maior número de transmissões. De fato, a métrica ETX tende a escolher caminhos com menor número de enlaces, já que, como citado na seção 3.1, a adição de um enlace a um caminho significa uma adição de pelo menos 1 ao custo total.

4.1. Implementação

Para realizar testes comparativos foi utilizada a implementação do protocolo OLSR de `olsr.org` [Tønnesen 2007]. Esta implementação já provê uma extensão de qualidade de enlace utilizando a métrica ETX, desde a versão 0.4.8. Para implementar a métrica multiplicativa proposta, as únicas modificações realizadas no código foram substituir a operação de soma pela de multiplicação no algoritmo de Dijkstra e alterar o custo inicial de uma rota de 0 para 1.

Desta forma, a implementação é um pouco diferente da proposta apresentada. Porém na prática, como o inverso do produto é igual ao produto dos inversos e o ETX de um enlace é definido como o inverso da probabilidade de sucesso, em termos conceituais nada muda.

Claramente a implementação pode ser realizada sem problemas em qualquer protocolo que já implemente a métrica ETX como extensão de qualidade de enlace.

5. Resultados Comparativos

Para avaliar as duas métricas foram realizados testes comparativos em dois ambientes distintos. O primeiro consiste de uma rede em malha sem fio implementada com 7 roteadores *linksys* WRT54G espalhados por salas de um prédio da Universidade Federal Fluminense. O segundo ambiente é externo, formado por 5 roteadores colocados no topo de prédios de alunos da Universidade, voluntários no projeto, além de um colocado no topo de um prédio da UFF, atuando como *gateway*.

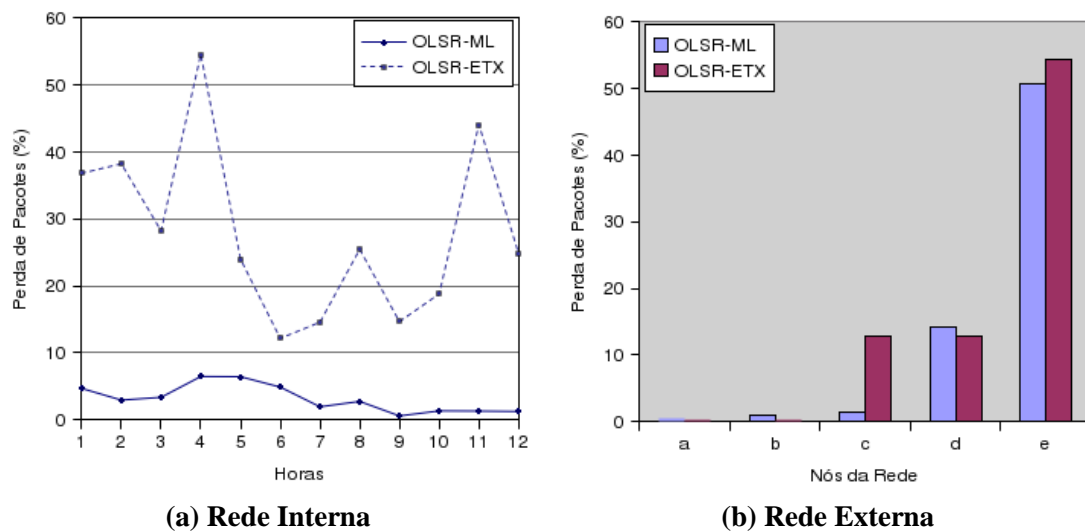


Figura 2. Perda de pacotes: à esquerda, na rede interna entre os nós 3 e 6 e à direita, na rede externa entre o *gateway* e cada um dos nós.

Neste segundo cenário, as antenas originais dos roteadores foram substituídas por antenas omni-direcionais externas de 19dB ou, no caso do *gateway*, por uma antena direcional de 24dB. A Figura 1 ilustra os ambientes.

Em ambos, o firmware original dos roteadores foi substituído pelo OpenWrt [OpenWrt 2007], uma distribuição Linux bastante reduzida, desenvolvida especificamente para este tipo de dispositivo. Uma imagem customizada foi compilada para utilizar a versão do OLSR com as alterações descritas na seção 4.1.

5.1. Perda de Pacotes

Os testes de perda de pacotes foram feitos utilizando a ferramenta *ping* do linux. A Figura 2 mostra os resultados obtidos. No caso da topologia interna, foi enviado um *ping* por segundo, durante 12 horas, de uma ponta a outra da rede (do nó 3 ao nó 6). Ao final de cada hora, a porcentagem de pacotes perdidos foi calculada. Desta forma, pode-se observar a evolução da taxa de perda ao longo do dia. Como esperado, a métrica ETX apresentou taxas de perda bem maiores ao longo de todo o dia.

Quanto à topologia externa, foram realizadas 4 medições por dia de 25 minutos do *gateway* para cada nó, durante 2 dias. Em 4 dos 5 casos apresentados, os resultados das duas métricas foram bem similares. Porém, em relação ao nó *c*, a métrica ML apresenta uma grande vantagem. Este nó pode se comunicar com o *gateway* por 2 caminhos: diretamente, através de um enlace de qualidade mediana, ou passando pelo nó *b*, utilizando 2 bons enlaces. Neste caso, freqüentemente a métrica ETX dá preferência à rota direta, enquanto a métrica ML escolhe o caminho indireto. Desta forma, a probabilidade de perda de pacotes aumenta bastante com o uso da métrica ETX.

5.2. Atraso

Os valores de atraso exibidos na Figura 3 são baseados no tempo de ida e volta apresentado no relatório de cada pacote de *ping*. Estes valores são referentes aos mesmos testes

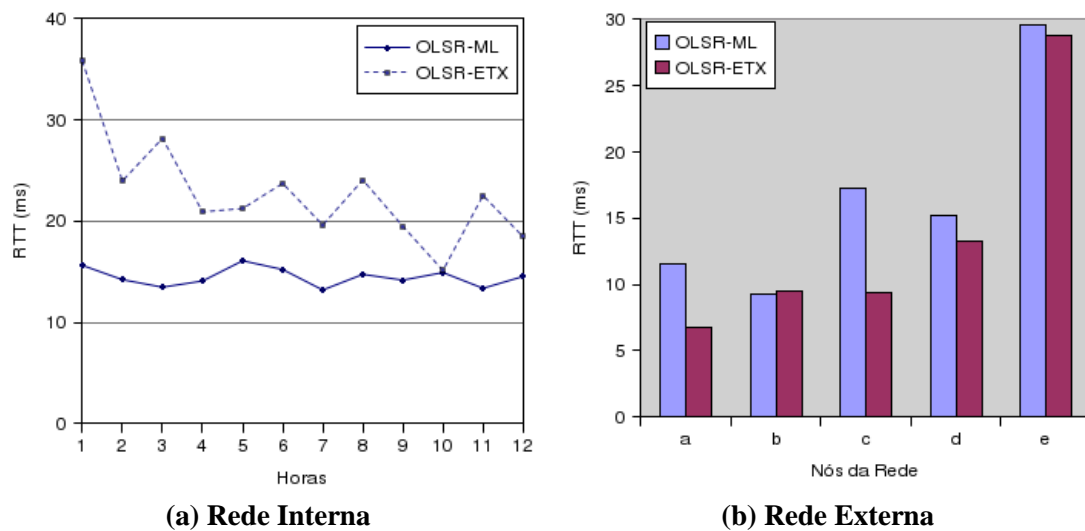


Figura 3. RTT médio: no gráfico da esquerda, entre os nós 3 e 6 da rede interna e no gráfico da direita entre o gateway e todos os outros nós.

utilizados para verificar perda de pacotes. No caso da rede interna, a cada hora, o RTT médio foi calculado.

De forma surpreendente, o RTT médio com a métrica ETX foi sempre maior. Uma possível explicação está no fato de que as probabilidades inferidas por esta métrica não são totalmente confiáveis, como discutido na seção 3.1, o que pode levar a um número maior de retransmissões em nível 2 nas rotas escolhidas pela métrica ETX.

Na topologia externa, os valores apresentados são relativos a média de todo o teste, para cada nó de destino da rede. Claramente, neste cenário a métrica ETX leva vantagem, escolhendo rotas mais curtas.

5.3. Vazão

Para medir a vazão dos enlaces foi utilizado o programa *iperf* [Tirumala et al. 2007]. Os gráficos da Figura 4 mostram os resultados obtidos de vazão utilizando TCP.

Na topologia interna, transferências de 5 minutos foram realizadas do nó 3 a cada um dos outros nós. Neste caso, as abordagens se mostraram equivalentes: de um lado rotas menores, levando a menos auto-interferência, enquanto do outro rotas mais seguras, sofrendo menor perda de pacotes.

Já na rede externa, os resultados apresentados são referentes a 14 dias de medições com cada métrica, sendo 4 medições de 5 minutos por dia. Os gráficos da Figura 4 mostram uma certa tendência de melhora com a métrica ML. Esta melhora se deve possivelmente às menores taxas de perda de pacotes, como mostrado na seção 5.1, já que se trata de um teste utilizando o protocolo TCP.

5.4. Estabilidade de rotas

Utilizando a opção *-R* da ferramenta *ping*, que mostra os primeiros 9 saltos utilizados pelo pacote, pôde-se constatar que durante um teste de uma hora a métrica ETX realizou mais de 400 trocas de rotas, enquanto a métrica multiplicativa utilizou apenas uma rota.

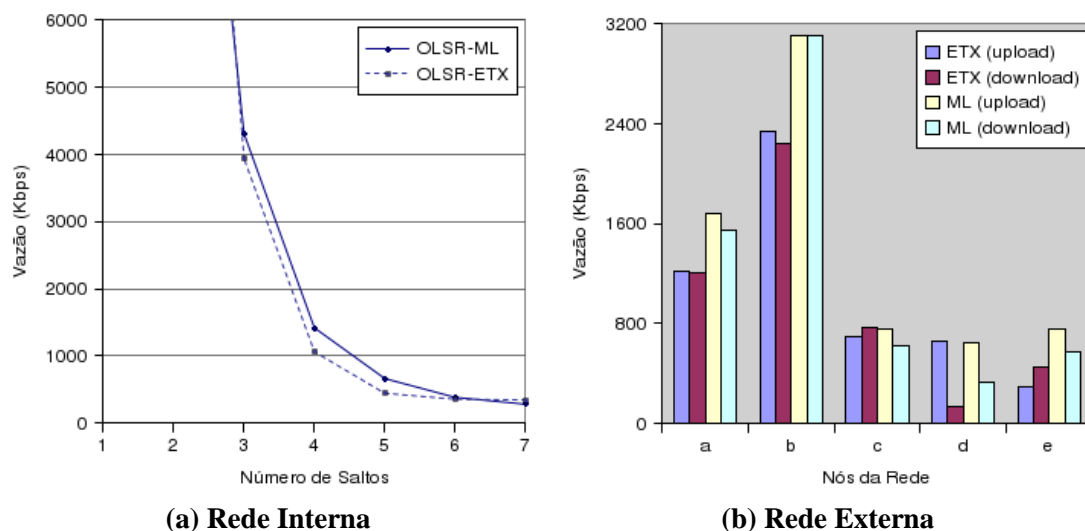


Figura 4. Vazão média: no gráfico da esquerda, entre os nós 3 e 6 da rede interna e no gráfico da direita entre o gateway e todos os outros nós.

6. Conclusões e Trabalhos Futuros

Com a popularização das rede em malha, a necessidade do desenvolvimento de novas tecnologias para este tipo de rede se faz presente. As características particulares destas redes têm sido estudadas, porém ainda não foram completamente exploradas. Isto faz com que as redes em malha não desenvolvam todo seu potencial, em termos de desempenho e serviços oferecidos. Tendo em vista a diversidade de projetos que utilizam estas redes para promover a inclusão digital, este tipo de estudo torna-se ainda mais importante.

Neste artigo, procurou-se discutir uma das muitas áreas de pesquisa sobre este tipo de rede: as métricas de roteamento. Elas são de fundamental importância em redes em malha e redes ad-hoc, pois é necessário estar constantemente avaliando os enlaces e rotas, sem, no entanto, interferir no desempenho da rede.

Além de discutir os principais trabalhos nesta área, este trabalho de iniciação científica apresentou algumas deficiências da métrica *Expected Transmission Count*, uma das mais utilizadas atualmente, além de uma proposta de métrica multiplicativa.

Ambas as métricas foram implementadas e testadas em duas redes reais, uma interna e outra externa, e os resultados mostraram que, em determinados cenários, a métrica ETX apresenta as deficiências descritas na seção 3.1 refletidas no desempenho da rede. Em vários casos, a adoção de uma métrica multiplicativa tornou a rede mais eficiente sob o ponto de vista da perda de pacotes, da estabilidade de rotas, do atraso e, como consequência, da vazão.

Os trabalhos futuros incluem estudar a adição de um fator a ser somado a cada enlace adicionado em uma rota, já que com o aumento do número de saltos a vazão tende a cair. Deve-se também considerar a possibilidade de utilizar monitoramento de tráfego para obter informações sobre a qualidade dos enlaces, diminuindo assim a necessidade de utilização de pacotes de controle do protocolo de roteamento. Outra possibilidade de pesquisa é desenvolver um método mais preciso para inferir as probabilidades de sucesso, além de considerar a variância destas medidas.

Referências

- Akyildiz, I. F., Wang, X., and Wang, W. (2005). Wireless mesh networks: a survey. *Comput. Netw. ISDN Syst.*, 47(4):445–487.
- Bicket, J., Aguayo, D., Biswas, S., and Morris, R. (2005). Architecture and evaluation of an unplanned 802.11b mesh network. In *MobiCom '05: Proceedings of the 11th annual international conference on Mobile computing and networking*, pages 31–42.
- Clausen, T. and Jacquet, P. (2003). Optimized link state routing protocol (olsr). RFC Experimental 3626, Internet Engineering Task Force.
- Couto, D. D., Aguayo, D., Bicket, J., and Morris, R. (2003). A high-throughput path metric for multi-hop wireless routing. In *MobiCom '03: Proceedings of the 9th annual international conference on Mobile computing and networking*, pages 134–146.
- CUWin (2007). <http://www.cuwireless.net>. Accessed in 13-03-2007.
- Draves, R., Padhye, J., and Zill, B. (2004). Routing in multi-radio, multi-hop wireless mesh networks. In *MobiCom '04: Proceedings of the 10th annual international conference on Mobile computing and networking*, pages 114–128.
- Johnson, D., Maltz, D., and Broch, J. (2001). *DSR: The Dynamic Source Routing Protocol for Multihop Wireless Ad Hoc Networks*. *Ad Hoc Networking*, chapter 5, pages 139–172. Addison-Wesley.
- Koksal, C. E. and Balakrishnan, H. (2006). Quality-aware routing metrics for time-varying wireless mesh networks. *IEEE Journal On Selected Areas In Communications*, 24(11):1984–1994.
- Koksal, C. E., Jamieson, K., Telatar, E., and Thiran, P. (2006). Impacts of channel variability on linklevel throughput in wireless networks. In *Joint International Conference on Measurement and Modeling of Computer Systems*, pages 51–62.
- OpenWrt (2007). <http://openwrt.org/>. Accessed in 03-02-2007.
- Perkins, C. E., Belding-Royer, E. M., and Das, S. R. (2003). Ad hoc on-demand distance vector (aodv) routing. RFC Experimental 3561, Internet Engineering Task Force.
- Perkins, C. E. and Royer, E. M. (1999). Ad-hoc on-demand distance vector routing. In *WMCSA '99: Proceedings of the Second IEEE Workshop on Mobile Computer Systems and Applications*, pages 90–100, Washington, DC, USA. IEEE Computer Society.
- Ramachandran, K., Buddhikot, M., Chandranmenon, G., Miller, S., Belding-Royer, E., and Almeroth, K. (2005). On the design and implementation of infrastructure mesh networks. In *IEEE Workshop on Wireless Mesh Networks (WiMesh)*.
- Santivanez, C. and Ramanathan, R. (2003). Hazy sighted link state (hsls) routing: A scalable link state algorithm.
- Tirumala, A., Qin, F., Dugan, J., Ferguson, J., and Gibbs, K. (2007). <http://dast.nlanr.net/projects/iperf/>. Accessed in 03-02-2007.
- Tønnesen, A. (2007). <http://www.olsr.org/>. Accessed in 03-02-2007.
- Tsarpapopoulos, N., Kalavros, I., and Lalis, S. (2005). A low-cost and simple-to-deploy peer-to-peer wireless network based on open source linux routers. In *Proceedings of TRIDENTCOM'05*, pages 92–97.