

Implementação da Métrica de Roteamento Tempo Esperado de Transmissão em Redes em Malha Sem Fio

Pedro M. Esposito¹, Felipe O. S. B. Schiller¹, Miguel Elias M. Campista¹, Igor M. Moraes¹,
Marcelo G. Rubinstein², Luís Henrique M. K. Costa¹, Otto Carlos M. B. Duarte¹

¹Grupo de Teleinformática e Automação
PEE/COPPE - DEL/POLI
Universidade Federal do Rio de Janeiro

²PEL/DETEL - FEN
Universidade do Estado do Rio de Janeiro

{pedro, fschiller, miguel, igor, luish, otto}@gta.ufrj.br, rubi@uerj.br *

Abstract. *Wireless mesh networks employ a backbone composed by wireless routers usually fixed. These routers extend the coverage area of access points and guarantee network connectivity. In wireless mesh networks, the traditional used metric, number of hops, is not suitable, because of high error rates and variable link quality. Thus, new routing metrics are needed such as the Expected Transmission Count (ETX) and the Expected Transmission Time (ETT), proposed in literature. In this work we implement a plugin of the ETT metric for the OLSR routing protocol. In order to evaluate the performance of number of hops, ETX, and ETT metrics, we have performed experiments in an indoor test-bed. Results show that, with ETT, the loss rate is lower and the route stability is greater than using other metrics.*

Resumo. *As redes em malha sem fio utilizam um backbone composto por roteadores sem fio geralmente fixos. Esses nós estendem a área de cobertura de pontos de acesso e garantem conectividade à rede. Nas redes em malha sem fio, a métrica tradicionalmente utilizada, número de saltos, não é adequada, em função das altas taxas de erro e da qualidade variável dos enlaces. Novas métricas de roteamento são necessárias. Assim, métricas como o número esperado de transmissões (ETX) e o tempo esperado de transmissão (ETT) foram propostas na literatura. Neste trabalho é implementado um plugin da métrica ETT para o protocolo de roteamento OLSR. Para comparar o desempenho das métricas número de saltos, ETX e ETT, foram realizados experimentos em uma rede de testes em ambiente fechado. Os resultados mostram que a taxa de perda de pacotes é menor e a estabilidade das rotas é maior quando a métrica ETT é utilizada.*

1. Introdução

Atualmente, o IEEE 802.11 é o padrão de redes locais sem fio mais difundido no mundo. Um dos modos de operação desse padrão é o modo ad hoc. Nesse modo, não há elementos centralizadores e os nós são geralmente móveis. Além disso, os nós

*Este trabalho foi apoiado por recursos do CNPq, CAPES, FAPERJ, FINEP, FUJB, FUNTTEL e RNP.

trabalham de forma colaborativa sendo responsáveis pelo roteamento dos pacotes através de múltiplos saltos até o destino. Essas redes são tema de diversos trabalhos de pesquisa e já são implementadas comercialmente. Suas principais vantagens são a capacidade de autoconfiguração e a ausência de infra-estrutura, o que as tornam muito atraentes para aplicações onde não se justifica um alto investimento ou em aplicações de resgate, onde a infra-estrutura de comunicações pode ser precária. Entretanto, a ausência completa de infra-estrutura pode também se tornar um obstáculo caso haja necessidade de comunicação com redes cabeadas. Mais ainda, a mobilidade dos nós somada às instabilidades do meio sem fio podem resultar em baixa conectividade [Campista et al., 2007].

As redes em malha sem fio surgem para aumentar a conectividade das redes ad hoc e para estender a área cobertura dos pontos de acesso. A principal característica que diferencia as redes em malha das redes ad hoc é a presença de um *backbone* geralmente estacionário formado por roteadores sem fio. A presença desses roteadores aumenta a conectividade da rede, além de prover cobertura a locais afastados da infra-estrutura cabeada. Em muitos casos, pode-se inclusive prover acesso à Internet aos usuários conectados ao *backbone*.

Nas redes em malha sem fio, os nós que compõem o *backbone* são geralmente estáticos, podendo ser alimentados diretamente pela rede elétrica. Do ponto de vista do roteamento, não há preocupação com economia de energia ou mobilidade. Por outro lado, a transmissão sem fio se traduz em enlaces com altas taxas de erro por bit além de qualidade do enlace bastante variável no tempo. Diferentes fontes de interferência podem influenciar na qualidade do enlace, como equipamentos de rede, outros equipamentos elétricos como motores, telefones, fornos de microondas, até pessoas, em ambientes internos [Sun et al., 2005]. Desta forma, os protocolos de roteamento propostos para redes em malha têm utilizado métricas que tentam refletir a qualidade do enlace, pois a utilização do número de saltos (HOP) como métrica pode levar à degradação do desempenho da rede. Esse novo paradigma é conhecido como roteamento ciente da qualidade (*quality-aware routing*) [Koksal e Balakrishnan, 2006].

Muitos trabalhos vêm utilizando redes de testes para a comparação de métricas cientes da qualidade. Em [Couto et al., 2003] a métrica ETX (*Expected Transmission Count*) foi proposta para aumentar a eficiência de redes em malha sem fio. A métrica ETX estima o número médio de tentativas necessárias para se obter uma transmissão com sucesso em cada enlace. Os autores mostram que o ETX obtém um melhor desempenho que a métrica número de saltos, pois escolhe rotas compostas por enlaces de melhor qualidade ao invés de rotas com o menor número de saltos. Eles mostram que ao minimizar o número de saltos, as rotas tendem a ser compostas por enlaces longos e de baixa qualidade. Em [Draves et al., 2004a], a métrica ETX é comparada a outras métricas cientes da qualidade como o RTT (*Round Trip Time*) e o par de pacotes, além do número de saltos. A métrica RTT calcula o intervalo de tempo entre a transmissão de uma sonda ao vizinho e a recepção do respectivo reconhecimento positivo. Utilizando a métrica par de pacotes, os nós enviam duas sondas (*probes*) em seguida aos seus vizinhos. Após receber as sondas, cada vizinho calcula o intervalo de tempo entre a recepção da primeira e da segunda sonda e envia o resultado de volta ao transmissor. Os autores mostram que o ETX alcança um desempenho superior a todas as métricas testadas. Em [Passos et al., 2006] o protocolo OLSR-ML (*Optimized Link State Routing-Minimum Loss*) é proposto. O

OLSR-ML é uma variante do protocolo OLSR que escolhe rotas com a menor probabilidade de erro fim-a-fim. Os resultados obtidos com o OLSR-ML mostram um número menor de troca de rotas em comparação ao OLSR usando a métrica ETX. Trabalhos como [Aguayo et al., 2004] e [Robinson et al., 2005] avaliam características relacionadas com a camada física e que influenciam diretamente o valor das métricas cientes da qualidade. Esses trabalhos medem o impacto da instabilidade do meio sem fio na qualidade dos enlaces, e conseqüentemente nos protocolos de roteamento, e o desempenho do *hardware* empregado.

Este trabalho implementa a métrica ciente da qualidade ETT (*Expected Transmission Time*) [Draves et al., 2004b], proposta na literatura, no protocolo de roteamento OLSR [Clausen et al., 2001]. Para tal, foi desenvolvido um *plugin* para o OLSR com o objetivo de facilitar a portabilidade do código. A métrica ETT calcula o tempo médio necessário para transmitir um pacote de dados em cada enlace. Essa métrica é uma evolução do ETX. Originalmente, o OLSR utiliza a métrica número de saltos e, recentemente, já pode ser encontrada também uma implementação do OLSR utilizando o ETX. A implementação do ETT no OLSR é importante, pois um dos objetivos do padrão de redes em malha sem fio IEEE 802.11s, ainda em desenvolvimento, é definir um protocolo modelo para o encaminhamento de pacotes utilizando como base o OLSR. O desempenho do OLSR com a métrica ETT implementada é verificado em uma rede de testes montada no bloco H do Centro de Tecnologia da UFRJ. Nessa rede, o desempenho das métricas número de saltos, ETX e ETT foi comparado. Os resultados mostram que o ETT apresenta uma menor taxa de perda de pacotes e uma melhor estabilidade.

Este trabalho está organizado da seguinte forma. A Seção 2 introduz as duas métricas cientes da qualidade, ETX e ETT. Já a Seção 3 resume o protocolo de roteamento OLSR. O *plugin* para o OLSR da métrica ETT e os principais detalhes da implementação são apresentados na Seção 4. A Seção 5 descreve a rede de testes, incluindo o cenário e os equipamentos utilizados. Os resultados obtidos experimentalmente são analisados na Seção 6. Finalmente, a Seção 7 conclui este trabalho e indica possíveis direções futuras.

2. Métricas de Roteamento

Em redes ad hoc móveis, a métrica usualmente utilizada é o número de saltos. Nessas redes, esta métrica é adequada dado o dinamismo dos nós que pode levar a diversas quebras de enlaces. Torna-se então importante obter rapidamente uma rota para o destino não importando a sua qualidade. Nas redes em malha sem fio, em contrapartida, o número de quebras de enlaces não é tão grande, visto que os roteadores são geralmente fixos. Portanto, os protocolos de roteamento se preocupam mais com as variações da qualidade dos enlaces do que, mais precisamente, com as suas quebras. Além disso, foi observado que minimizando o número de saltos, há uma tendência de escolher rotas formadas por enlaces longos e de pior qualidade [Couto et al., 2003, Draves et al., 2004a]. Assim, surgiram as métricas cientes da qualidade [Koksal e Balakrishnan, 2006] que tentam projetar as variações do meio físico nas métricas de roteamento. A seguir, duas das principais métricas cientes da qualidade, ETX e ETT, são apresentadas.

2.1. Número Esperado de Transmissões

A métrica número esperado de transmissões (ETX) [Couto et al., 2003] estima o número médio de transmissões necessárias (incluindo retransmissões) para que um pacote

seja corretamente entregue ao destino. O principal objetivo de projeto desta métrica é encontrar caminhos que proporcionem alta vazão.

A métrica ETX de um enlace é calculada através das taxas de entregas de pacotes dos enlaces direto (d_f) e reverso (d_r). O enlace direto é utilizado para o envio dos dados enquanto que os reconhecimentos positivos (ACKs) são transmitidos no enlace reverso. Como a probabilidade de sucesso de uma transmissão de um pacote de dados e de seu respectivo ACK é $d_f \times d_r$, o número médio de transmissões (ETX) é dado pelo seu inverso. Logo a métrica ETX é igual a:

$$ETX = \frac{1}{d_f \times d_r}. \quad (1)$$

Para calcular a métrica ETX, os roteadores enviam periodicamente em difusão sondas de tamanho pequeno e fixo. Para evitar sincronizações acidentais, o período de envio das sondas é variado em até 10% [Couto et al., 2003]. As transmissões são realizadas em difusão pois esse tipo de transmissão não gera ACKs ou retransmissões em redes como o IEEE 802.11. Dessa forma, a contagem do número de sondas perdidas permite ao transmissor estimar o número de vezes que o mecanismo de solicitação automática de repetição (ARQ) retransmitiria um pacote em *unicast* [Draves et al., 2004a]. Essas sondas contêm o número de sondas recebidas dos seus nós vizinhos no último intervalo predefinido (w). Ao receberem essas informações, os roteadores são capazes de estimar as taxas de entrega dos enlaces diretos (d_f) para cada vizinho. Para calcular a taxa de entrega nos enlaces reversos (d_r), cada nó conta o número de sondas recebidas de cada vizinho no mesmo intervalo w [Draves et al., 2004b]. O exemplo a seguir ilustra esse cálculo. Supondo uma transmissão de dados de A para B , um período de envio de sondas de 1 s e uma janela w de 10 s, o número de sondas recebidas caso não haja perdas é 10. Se o nó A recebeu 8 sondas no último intervalo w e na última sonda recebida o nó B informou que havia recebido 9 sondas de A no último intervalo w , a métrica ETX de A para B é dada por $\frac{1}{\frac{9}{10} \times \frac{8}{10}} = 1,39$. Pode-se observar que de acordo com a Eq. 1 quanto pior a qualidade do enlace, maior o valor de ETX.

A métrica ETX de uma rota corresponde à soma do ETX de cada enlace desde a origem até o destino. Com isso, o protocolo de roteamento verifica os ETXs das rotas e escolhe a que possui menor ETX, ou seja, o caminho que minimiza a soma do número esperado de transmissões.

A métrica ETX possui duas deficiências principais. Como as sondas são enviadas na taxa básica e são de pequeno tamanho, elas não refletem de modo preciso as taxas de perdas para taxas físicas mais altas de pacotes de tamanhos maiores que as sondas.

2.2. Tempo Esperado de Transmissão

A métrica tempo esperado de transmissão (ETT) foi proposta para lidar com as deficiências do ETX. O ETT estima o tempo médio necessário para a transmissão de um pacote de tamanho fixo em um enlace. A métrica ETT considera diferentes taxas físicas e um tamanho de pacotes mais próximo ao tamanho médio de um pacote de dados.

A métrica ETT pode ser calculada através de ajustes na métrica ETX de acordo com o tamanho do pacote e a capacidade de transmissão do enlace. Para estimar a capacidade de um enlace, os roteadores podem usar a técnica de pares de pacotes (*packet*

pair) [Draves et al., 2004b]. Dessa forma, tem-se:

$$ETT = ETX \times \frac{S}{B}, \quad (2)$$

onde S é o tamanho do pacote e B é a capacidade de transmissão do enlace. Na técnica par de pacotes utilizada neste trabalho, duas sondas, uma pequena (137 bytes) seguida de uma grande (1137 bytes), são enviadas para cada vizinho. Cada vizinho ao receber o par de sondas calcula o atraso entre a recepção da primeira e da segunda. Esse atraso é enviado ao nó que originou o par de sondas. Após receber um determinado número de amostras do atraso, esse nó estima a capacidade de transmissão do enlace dividindo o tamanho da sonda maior do par pelo menor valor de atraso recebido [Draves et al., 2004b].

A métrica ETT também pode ser calculada através da transmissão de sondas em taxas diferentes [Aguayo et al., 2005, Bicket et al., 2005]. Nesse caso, são enviadas periodicamente sondas de 1500 bytes em diferentes taxas físicas do IEEE 802.11 para calcular a taxa de perda de pacotes de dados nas diferentes taxas. Além disso, são transmitidas sondas de pequeno tamanho em uma taxa básica para permitir que os receptores calculem a taxa de perda de ACKs. Nesse caso, o ETT é o tempo esperado para transmitir um quadro de 1500 bytes na taxa de dados que proporciona a maior vazão.

Da mesma forma do que na métrica ETX, o ETT de uma rota é a soma dos ETTs dos enlaces individuais e quanto menor o ETT, melhor a rota.

3. O Protocolo OLSR

Esta seção apresenta o funcionamento básico do protocolo de roteamento OLSR (*Optimized Link State Routing*) [Clausen et al., 2001], para o qual foi implementada a métrica ETT. A implementação do protocolo OLSR utilizada chama-se `olsrd` (OLSR *daemon*) [Olsrd, 2007]. O OLSR é um protocolo pró-ativo, ou seja, o OLSR envia periodicamente mensagens de controle que permitem a descoberta prévia de rotas para todos os destinos da rede. Isto faz com que não haja atraso quando uma nova rota é necessária, ao contrário de protocolos de roteamento reativos. Porém, parte da capacidade da rede é gasta com a sobrecarga de controle.

O OLSR é um protocolo de estado de enlace. Para conhecer o estado dos enlaces locais, o nó envia mensagens HELLO periódicas, com endereço de destino *broadcast*. O recebimento dos HELLOs permite aos vizinhos saber que este nó está ativo. Além disso, as mensagens HELLO contêm informações sobre os nós que podem ser vistos pelo emissor, incluindo quais enlaces já foram verificados como sendo bidirecionais. Apenas enlaces bidirecionais são usados na construção de rotas. Como cada nó lista os seus vizinhos nas mensagens HELLO, o processo permite que um nó conheça seus vizinhos de até dois saltos.

Os anúncios de estado do enlace do OLSR são enviados dentro de mensagens chamadas TC (*Topology Control*). As mensagens TC são enviadas em inundação em toda a rede, como realizado numa rede cabeada. Como os enlaces sem fio são de difusão, estas mensagens são enviadas para o endereço de *broadcast*, o que permite reduzir a sobrecarga da rede com mensagens de controle. Ainda visando reduzir o tráfego de controle, cada nó seleciona um conjunto de MPRs (*MultiPoint Relays*), que são os únicos vizinhos que encaminharão suas mensagens de roteamento. Os demais podem ouvir tais mensagens,

mas não as retransmitem. Os MPRs são selecionados de forma que todos os nós a dois saltos do emissor possam ser alcançados. As mensagens TC enviadas periodicamente contêm uma lista de vizinhos que selecionaram o emissor para ser seu MPR. A utilização de MPRs diminui o número de mensagens de roteamento TC. Porém, o número reduzido de TCs pode se tornar uma vulnerabilidade quando a qualidade dos enlaces é ruim. Como há menos mensagens redundantes, as suas perdas eventuais levam as tabelas de roteamento a não serem atualizadas corretamente. Como os mapas da topologia nos diferentes nós da rede podem estar dessincronizados, podem ocorrer *loops* de roteamento, levando a congestionamento e mais perdas de mensagens em um ciclo repetido indefinidamente.

Por padrão, o OLSR utiliza a métrica número de saltos no cálculo de rotas. Recentemente, foi adicionada ao `olsrd` a métrica ETX. Em vez de utilizarem-se sondas para determinar a probabilidade de perda de pacotes, a perda das próprias mensagens HELLO foi utilizada, economizando mensagens de controle. A desvantagem, como será visto mais adiante, está na utilização do endereço de envio de *broadcast*. Neste trabalho, implementou-se um *plugin* para o `olsrd`, onde a métrica ETT é calculada, levando em consideração a vazão medida através da perda de pares de pacotes.

4. Implementação da Métrica ETT no OLSR

A implementação utilizada do protocolo OLSR [Olsrd, 2007] possui uma interface que permite a criação de *plugins*. Essa interface foi escolhida para a implementação da métrica ETT, pois não envolve modificações no código original do `olsrd`. Isso facilita a portabilidade para novas versões do protocolo assim como a utilização da métrica ETT em redes onde já exista o `olsrd` instalado. Por outro lado, a utilização de um *plugin* também impõe algumas restrições de implementação.

No OLSR, todas as mensagens de controle são enviadas para o endereço IP de destino de *broadcast*. Inclusive as mensagens TC, que em protocolos de estado de enlace para redes cabeadas como o OSPF são enviadas em *unicast*, no OLSR, são enviadas em *broadcast*. Isso se deve ao fato de em uma rede sem fio todos os enlaces serem de difusão na camada física. Desta forma, mesmo que um pacote seja enviado em *unicast*, todos os nós no alcance do emissor recebem o pacote e não podem transmitir pacotes caso o meio esteja ocupado. Assim, torna-se mais eficiente a utilização do endereço IP de destino em *broadcast*, principalmente considerando que o anúncio de estado de enlace deve ser enviado, de qualquer forma, a todos os nós da rede por inundação. No IEEE 802.11, transmissões em *broadcast* utilizam uma das taxas básicas do meio [IEEE, 2003]. Apenas os pacotes de dados, que são enviados em *unicast*, podem se transmitidos na taxa máxima.

O envio das mensagens de controle em *broadcast* constitui-se como o primeiro desafio da implementação da métrica ETT no protocolo OLSR. Como apresentado na Seção 2.2, uma das formas de calcular o valor de ETT demanda a estimativa da capacidade de transmissão por enlace. Conforme a Eq. 2, o cálculo do ETT depende do valor estimado da variável B para cada enlace. Essa estimativa é realizada através da técnica par de pacotes, onde a única forma de diferenciar os enlaces é enviar sondas em *unicast* para cada vizinho. Entretanto, como todas as mensagens de controle definidas pelo OLSR são enviadas em *broadcast*, a interface do *plugin* sequer possui o parâmetro “endereço de destino”. Além disso, todas as mensagens em *broadcast* são enviadas na taxa básica da rede. Uma solução para contornar esse problema seria enviar sondas em *broadcast* em

taxas diferentes da taxa básica. Essa solução, porém, exigiria mudanças no *firmware* que não foram possíveis com os equipamentos disponíveis. Existe ainda outro problema relacionado às mensagens de controle do OLSR. Para diminuir a sobrecarga, mais de uma mensagem de controle podem ser agregadas em um único pacote IP para reduzir o número de acessos ao meio. Para realizar a estimativa da capacidade de transmissão, entretanto, essa característica representaria um obstáculo pois as sondas enviadas pela técnica par de pacotes têm tamanhos fixos conhecidos (137 e 1137 bytes). Como consequência desses problemas, optou-se por utilizar um soquete específico para envio e recepção das sondas utilizadas na estimativa da capacidade de transmissão para cálculo do ETT. Assim, pode-se definir o tamanho das sondas e enviá-las em *unicast* sem se limitar aos parâmetros predefinidos pela interface do `olsrd`.

Para não bloquear o processamento do próprio OLSR com a espera por sondas, o soquete relativo ao ETT foi, em um primeiro momento, passado pelo *plugin* como parâmetro para o processo `olsrd`. Desta forma, o `olsrd` faz uma chamada *select* em todos os soquetes e envia a mensagem ao *plugin*, quando necessário. No entanto, esta implementação possui um problema grave, em especial nos roteadores utilizados. A estimativa ETT se baseia na medida do tempo entre a chegada da sonda pequena e da sonda grande. Quando se passa o soquete do ETT para a responsabilidade do processo `olsrd`, o tempo medido entre as duas sondas se torna, na realidade, o tempo entre a entrega da primeira e da segunda mensagem pelo *daemon* ao *plugin*. Especialmente no roteador, uma máquina com baixo poder de processamento, foi observado que os tempos entre as duas sondas estavam mascarados pelo tempo que o `olsrd` leva para sinalizar a chegada de uma mensagem. Assim, optou-se pela implementação de um *thread* específico, separado do *thread* de execução principal do `olsrd`. A abertura de um soquete dentro de outro *thread* não prejudica o processamento do *daemon* `olsrd` e ao mesmo tempo permite que a medida de tempo seja realizada logo após a chegada de uma sonda neste soquete.

4.1. Normalização da Métrica

O valor do ETT de um enlace é obtido multiplicando o valor do seu ETX por S/B (Eq. 2). Como o próprio `olsrd` atualiza constantemente os valores do ETX, não é possível alterar esse valor diretamente pelo *plugin*. No entanto, o `olsrd` possui uma variável chamada “modificador de LQ”, que é uma constante utilizada para atribuir maior ou menor peso a um enlace qualquer. O LQ é a variável utilizada pelo OLSR para armazenar a qualidade de um enlace, o equivalente a d_f na Eq. 1. O valor do modificador de LQ é armazenado pelo `olsrd` para cada enlace existente na rede e pode ser passado para o `olsrd` como parâmetro. A implementação do ETT deste trabalho se beneficiou desse modificador para alterar dinamicamente o valor do ETX a partir do *plugin*. Assim, o problema do cálculo do ETT no `olsrd` foi contornado utilizando como modificador de LQ o valor B/S , pois $ETT = ETX \times S/B = ETX/B/S$. Na implementação do `olsrd`, o valor do modificador é um número entre 0 e 1, assim, B/S é normalizado no *plugin*.

5. Rede de Testes

A rede de testes implementada está operando no bloco H do Centro de Tecnologia da UFRJ, localizado na Ilha do Fundão. A rede é composta por 13 nós, sendo 4 computadores pessoais equipados com interfaces de rede sem fio IEEE 802.11, marca Netgear e

chipset Atheros AR5212, e 9 roteadores sem fio IEEE 802.11 da marca Linksys, modelo WRT54G. As configurações de *hardware* e *software* de cada equipamento são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Configuração dos equipamentos usados na rede de testes.

Equipamentos	Sist. Operacional	Processador	RAM	HD/ROM
Computador C_1	Linux Debian 3.1, núcleo 2.4.27	Athlon XP 1,25 GHz	512 MB	40 GB
Computador C_2	Linux Debian 3.1, núcleo 2.4.27	Pentium 4, 2,8 GHz	1 GB	80 GB
Computador C_3	Linux Debian 3.1, núcleo 2.4.27	Pentium 4, 3,4 GHz	512 MB	80 GB
Computador C_4	Linux Debian 3.1, núcleo 2.6.18	Pentium D, 3,20 GHz	1 GB	80 GB
Roteadores ($R_1 - R_9$)	Linux OpenWrt RC4, núcleo 2.4.30	BCM3302 V0.7, 200 MHz	8 MB	2 MB

Todos os equipamentos executam a versão 0.4 do *software* `olsrd` [Olsrd, 2007]. Os computadores utilizam a versão 0.9 do *driver* `madwifi` [Madwifi, 2007]. Os roteadores utilizam o *driver* `broadcom-drv` da Broadcom. Nenhum equipamento possui antenas adicionais.

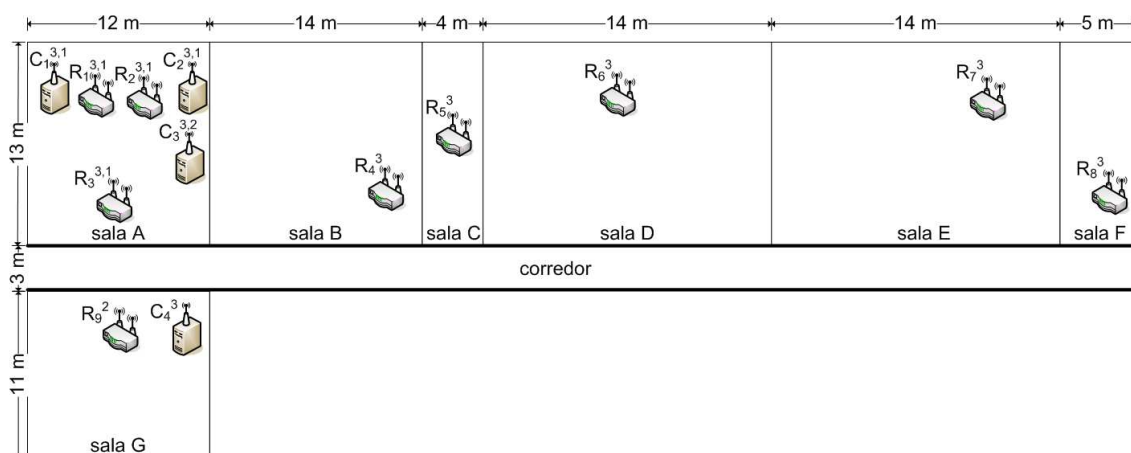


Figura 1. A topologia da rede de testes.

Os equipamentos estão localizados em salas do segundo e terceiro andares do bloco H, como mostra a Figura 1. Os andares são separados por um entrepiso de aproximadamente 3 m de altura. Os números em sobrescrito indicam o andar e o andar do mezanino, onde se encontram os roteadores, caso haja um mezanino na sala. A distância entre os dois equipamentos mais distantes (nós C_1 e R_8) é de aproximadamente 73 m. A sala A possui um mezanino e está dividida em salas menores por divisórias de madeira. Os nós C_1 , R_1 , R_2 e C_2 estão localizados na mesma sala, na parte inferior da sala A. O nó R_3 também está na parte inferior do mezanino, porém em uma outra sala. O nó C_3 se encontra na parte superior do mezanino. As paredes que separam as salas de A a F são simples e de alvenaria. As paredes entre todas as salas e o corredor são duplas e de alvenaria. É importante ressaltar que existem outras redes sem fio operacionais no mesmo

local. No pior caso, foram encontradas quatro redes sem fio operacionais. Dessas quatro, uma opera no mesmo canal da rede de testes.

6. Resultados

A análise dos resultados está dividida em duas partes. Na primeira parte, verifica-se o desempenho dos equipamentos utilizados na rede. O objetivo é obter a vazão máxima quando os equipamentos são fontes de tráfego. Na segunda parte, o objetivo é avaliar a taxa de perda de pacotes e a estabilidade das rotas resultantes do uso das métricas número de saltos (HOP), ETX e ETT pelo protocolo OLSR. Os experimentos são realizados na rede de testes descrita na Seção 5.

As mensagens HELLO são enviadas a cada 2 s e cada HELLO recebido tem validade de 60 s. A taxa de perdas do meio é calculada utilizando 10 amostras. A métrica ETX é calculada com base na taxa de perda de mensagens HELLO. As mensagens de estado do enlace, TC, são enviadas a cada 5 s. Já os pares de pacotes, enviados em *unicast* para medida do ETT, são enviados a cada 10 s. São utilizadas 6 amostras para a estimativa da capacidade do enlace. Cada amostra possui tempo de validade de 60 s.

6.1. Testes de Sanidade

Neste trabalho, a primeira medida realiza testes de sanidade de desempenho dos equipamentos utilizados na rede, sendo esses os roteadores e os computadores pessoais (PCs) apresentados na Seção 5. Para isso, utilizou-se a ferramenta de análise de rede `Iperf` [Iperf, 2007] para medir a vazão máxima quando cada um desses equipamentos é fonte de tráfego. O objetivo é verificar se existem limitações físicas do *hardware* que impeçam cada um dos equipamentos de alcançar a vazão máxima do padrão IEEE 802.11g [IEEE, 2003].

A Figura 2 mostra o resultado dos testes de sanidade do *hardware*. Nesses testes, foram utilizados um roteador e um PC e os nós se intercalavam como fonte e destino do tráfego, ou em outras palavras, nó cliente e nó servidor do `Iperf`. Tanto no PC quanto no roteador a taxa física da rede foi fixada na máxima permitida pelo padrão, 54 Mbps, e os nós foram colocados próximos para diminuir possíveis interferências do meio de propagação sem fio. O `Iperf` foi configurado para gerar pacotes a uma taxa constante acima da saturação do IEEE 802.11g [Amodei Jr. et al., 2005] utilizando UDP. Ao variar o tamanho dos pacotes, percebe-se que quando o roteador trabalha como fonte de tráfego a taxa de crescimento da vazão alcançada diminui com o aumento do tamanho dos pacotes. Isso ocorre graças às limitações de processamento e memória do roteador que o impedem de gerar e armazenar uma taxa muito elevada de pacotes com tamanhos acima de 800 bytes aproximadamente.

A necessidade de se lançar o servidor ou o cliente remotamente foi uma limitação verificada no decorrer dos testes com o `Iperf`. A alta variação da qualidade do meio sem fio e a presença de interferências dificultam o estabelecimento de conexões remotas seguras para lançar o `Iperf` repetidas vezes. Especialmente em ambientes fechados, problemas relacionados ao meio de propagação podem se tornar ainda mais severos devido à presença de um grande número de obstáculos e também à presença de outras redes sem fio IEEE 802.11 operando no mesmo canal. Inicialmente, foi desenvolvido um *script* para automatizar o lançamento do `Iperf` nas diferentes máquinas através de autenticação

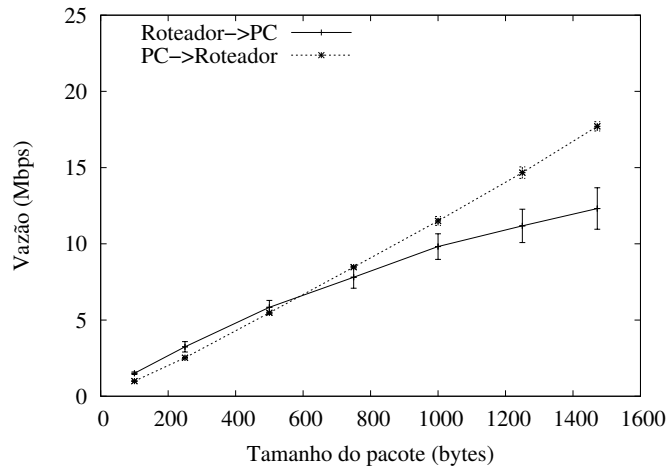


Figura 2. Testes de sanidade com os diferentes equipamentos.

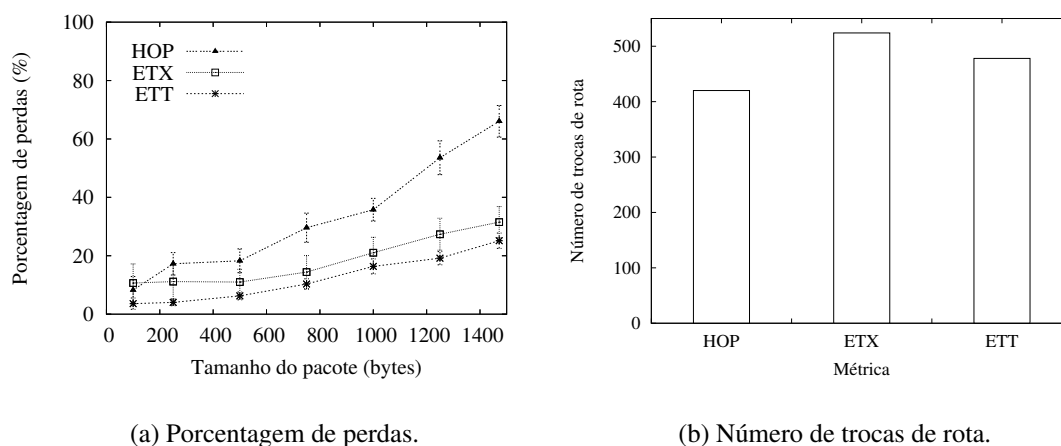
por chaves. Esse *script* não mostrou um desempenho satisfatório pois, por diversas vezes, a conexão não era estabelecida corretamente e, conseqüentemente, o Iperf não era lançado. Para evitar esses problemas decidiu-se usar a ferramenta *ping* nos testes seguintes. Apesar dessa ferramenta ser mais simples, ela atende aos testes posteriores e não exige o estabelecimento remoto de clientes e servidores.

6.2. Avaliação das Métricas de Roteamento

Nesta avaliação, as métricas número de saltos (HOP), ETX e ETT são utilizadas pelo protocolo OLSR para o cálculo das rotas. O objetivo é verificar qual das métricas proporciona uma menor taxa de perda de pacotes e uma maior estabilidade de rotas ao OLSR. O experimento consiste no envio de pacotes ICMP *echo request* a uma taxa de 100 pacotes por segundo, utilizando a ferramenta *ping*. A cada experimento o tamanho dos pacotes é variado. Além disso, um experimento tem duração de 5 segundos e o intervalo entre experimentos é de 5 segundos. Esse intervalo entre experimentos é suficiente para garantir que o tráfego gerado durante o experimento não prejudique a troca de informações de controle de roteamento e nem a janela de observação de HELLOs para o cálculo da métrica ETX. Durante todos os experimentos são utilizados os mesmos nós fonte e destino. No caso, o nós C_4 e R_6 são, respectivamente, fonte e destino, como indicado na Figura 1. Os experimentos para cada métrica são repetidos durante 1 hora.

A Figura 3(a) mostra a taxa de perda de pacotes para as três métricas ao longo de uma hora. Nessa figura, varia-se o tamanho dos pacotes enviados pelo *ping*. É observado que o pior desempenho foi o da métrica número de saltos (HOP) como esperado. Já o desempenho verificado da métrica ETT apresentou-se melhor na média que o ETX. A diferença de desempenho entre o ETT e o ETX pode ser menor ou maior dependendo das condições do meio e do cenário de testes utilizado. O desempenho das métricas cientes da qualidade é melhor caso haja mais de uma rota com qualidade e número de saltos diferentes entre origem e destino. Já o ETT é vantajoso caso haja mais de uma rota até o destino com probabilidade de perda equivalente, porém com taxas de transmissão diferentes. Nesse caso o ETX não é eficiente, pois não consegue identificar a melhor rota. É observada, nos testes realizados, uma taxa de perda considerável. Isso ocorre porque a rede de testes utilizada é localizada em um ambiente fechado e com obstáculos (Seção 5).

Pode ser observado ainda o aumento das perdas com o tamanho dos pacotes.



(a) Porcentagem de perdas.

(b) Número de trocas de rota.

Figura 3. Experimentos realizados na rede de testes.

Na Figura 3(b) é visto que a métrica número de saltos (HOP) é a que gerou o menor número de trocas de rotas, mas por outro lado, obteve o pior desempenho em termos de perda de pacotes. Isso ocorre porque utilizando a métrica HOP, o OLSR não se adapta às variações de qualidade dos enlaces. A métrica ETX, que mede as perdas de pacotes nos enlaces, é a que produz a maior quantidade de trocas de rotas. No entanto, trocar de rota excessivamente também pode acarretar perdas de pacotes, o que é demonstrado pelo número de trocas observado com a métrica ETX. A métrica ETT estima a qualidade do enlace baseada em duas medidas, a probabilidade de perdas e a capacidade dos enlaces, mudando as rotas com mais frequência que o HOP, mas não tão frequentemente quanto o ETX. Como a estimativa é mais precisa que a feita pela métrica ETX, as rotas são mais estáveis e o desempenho obtido, melhor.

7. Conclusão

Neste artigo, foi implementado um *plugin* da métrica ciente da qualidade chamada tempo esperado de transmissão (ETT) para o protocolo de roteamento OLSR. Esta métrica foi comparada com as métricas número de saltos e número esperado de transmissões (ETX) em relação à taxa de perda de pacotes e à estabilidade das rotas. Os testes experimentais envolveram uma rede em malha implantada no Centro de Tecnologia da UFRJ composta por computadores pessoais e roteadores.

Os resultados mostram que a métrica ETT obteve um melhor desempenho na média que o número de saltos e o ETX. O desempenho das métricas cientes da qualidade é melhor caso haja mais de uma rota com qualidade e número de saltos diferentes entre origem e destino. Em particular, o ETT é vantajoso caso haja mais de uma rota até o destino com probabilidade de perda equivalente, porém com taxas de transmissão diferentes. Em relação à estabilidade das rotas, o número de trocas de rotas executadas com a métrica ETT ficou entre a quantidade das métricas HOP e ETX. Desta forma, com a métrica ETT o protocolo OLSR se adaptou melhor às variações de qualidade dos enlaces, sem gerar oscilações de rotas desnecessárias, obtendo o melhor desempenho em termos de entrega de pacotes.

Referências

- Aguayo, D., Bicket, J., Biswas, S., Judd, G. e Morris, R. (2004). Link-level measurements from an 802.11b mesh network. Em *Sigcomm*, p. 121–132.
- Aguayo, D., Bicket, J. e Morris, R. (2005). SrcRR: A high throughput routing protocol for 802.11 mesh networks (DRAFT). Relatório técnico, MIT.
- Amodei Jr., A., Campista, M. E. M., de O. Cunha, D., Velloso, P. B., Costa, L. H. M. K., Rubinstein, M. G. e Duarte, O. C. M. B. (2005). Analysis of medium access control protocols for home networks. Relatório técnico, UFRJ.
- Bicket, J., Aguayo, D., Biswas, S. e Morris, R. (2005). Architecture and evaluation of an unplanned 802.11b mesh network. Em *ACM MobiCom*, p. 31–42.
- Campista, M. E. M., Moraes, I. M., Esposito, P. M., Amodei Jr., A., Cunha, D. O., Costa, L. H. M. K. e Duarte, O. C. M. B. (2007). The ad hoc return channel: a low-cost solution for Brazilian interactive digital TV. *IEEE Communications Magazine*, 45(1):136–143.
- Clausen, T., Jacquet, P., Laouiti, A., Muhlethaler, P., Qayyum, A. e Viennot, L. (2001). Optimized link state routing protocol. Em *IEEE International Multi Topic Conference (INMIC)*, p. 62–68.
- Couto, D. S. J. D., Aguayo, D., Bicket, J. e Morris, R. (2003). A high-throughput path metric for multi-hop wireless routing. Em *ACM MobiCom*, p. 134–146.
- Draves, R., Padhye, J. e Zill, B. (2004a). Comparison of routing metrics for static multi-hop wireless networks. Em *Sigcomm*, p. 133–144.
- Draves, R., Padhye, J. e Zill, B. (2004b). Routing in multi-radio, multi-hop wireless mesh networks. Em *ACM MobiCom*, p. 114–128.
- IEEE (2003). Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications: High-speed physical layer in the 2.4 GHz band. IEEE Standard 802.11g.
- Iperf (2007). <http://dast.nlanr.net/Projects/Iperf>.
- Koksal, C. E. e Balakrishnan, H. (2006). Quality-aware routing metrics for time-varying wireless mesh networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 24(11):1984–1994.
- Madwifi (2007). <http://www.madwifi.org>.
- Olsrd (2007). <http://www.olsr.org>.
- Passos, D., Teixeira, D. V., Muchaluat-Saade, D. C., Magalhães, L. C. S. e Albuquerque, C. (2006). Mesh network performance measurements. Em *International Information and Telecommunications Technologies Symposium (I2TS)*.
- Robinson, J., Papagiannaki, K., Diot, C., Guo, X. e Krishnamurthy, L. (2005). Experimenting with a multi-radio mesh networking testbed. Em *Workshop on Wireless Network Measurements (WiNMee)*.
- Sun, Y., Sheriff, I., Belding-Royer, E. M. e Almeroth, K. C. (2005). An experimental study of multimedia traffic performance in mesh networks. Em *International Workshop on Wireless Traffic Measurements and Modeling*, p. 25–30.