

Uma Proposta de Roteamento Utilizando Comunicação Adaptativa em Redes sem Fio Múltiplos Saltos com Múltiplas Antenas

Renan Hackbarth, Marcos Tomio Kakitani, Anelise Munaretto,
Richard Demo Souza e Mauro Fonseca

Resumo—Esse artigo propõe uma rede sem fio adaptativa, que utiliza o protocolo de roteamento OLSR (*Optimized Link State Routing*) e o conceito de métricas inter-camadas na escolha das rotas. O protocolo OLSR foi modificado, de modo que o algoritmo dê preferência para a rota que possibilite gerar a maior vazão possível no percurso fim-a-fim. Assume-se que cada nó possui conhecimento prévio da taxa de transmissão que irá proporcionar a maior vazão possível, de acordo com o estado do enlace, e assim define a taxa de transmissão ótima a ser utilizada. O comportamento do modelo proposto foi avaliado através de simulações computacionais utilizando técnicas SISO e MIMO, e os resultados foram comparados com um modelo que faz uso de um mecanismo de adaptação de taxa de transmissão mais tradicional (ARF), utilizando a versão padrão do protocolo OLSR descrita pela RFC3626. De acordo com os resultados obtidos, a proposta atual apresentou melhor desempenho dentro dos critérios avaliados.

Palavras-Chave—Transmissão adaptativa, MIMO, OLSR, Cross-Layer.

Abstract—This work presents a proposal of an adaptive wireless network, which employs the OLSR (*Optimized Link State Routing*) protocol and a cross-layer metric concept to calculate its routes. The OLSR protocol was modified, so the algorithm selects the route which permits to reach the highest theoretical throughput in the end-to-end path. It is assumed that each wireless node has previous knowledge of the transmission rate which will ensure the highest throughput regarding the state of the link, and then adapts their transmission rates accordingly. The behaviour of this proposed model has been evaluated by means of computer simulations using SISO and MIMO techniques, and all results have been compared to a model with a more traditional rate adapting mechanism (ARF), using the standard OLSR version described in the RFC3626. Based on the obtained results, the proposed scheme presents better performance in all evaluated criteria.

Keywords—Adaptive Transmission, MIMO, OLSR, Cross-Layer.

I. INTRODUÇÃO

O uso das redes de comunicações sem fio em aplicações corporativas e domésticas tornou-se absolutamente comum. Contudo, a própria a natureza dinâmica do meio de comunicação sem fio é um dos principais limites para este tipo de comunicação, tanto em termos de alcance quanto à taxa de

transferência de dados da rede. Para sobrepor essas barreiras, novas técnicas e tecnologias de comunicações sem fio são desenvolvidas constantemente, oferecendo diversos recursos capazes de otimizar e facilitar a comunicação de dados. Dentre essas técnicas podem ser destacados o uso da tecnologia MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) e o conceito de otimização inter-camadas (*cross-layer*).

A tecnologia de múltiplas antenas conhecida como MIMO tem por finalidade aumentar a capacidade do enlace sem fio, inserindo diversidade e multiplexação espacial. Essa técnica tem sido considerada uma das mais importantes soluções para aumentar a taxa de transmissão em redes sem fio IEEE 802.11 [1]. Porém, como as condições dos enlaces sem fio são variáveis, os ganhos que uma determinada técnica pode produzir acabam variando também. Assim, melhores resultados poderiam ser obtidos caso as técnicas de transmissão se adaptassem às condições do meio. Nesse sentido o uso do conceito de otimização inter-camadas, baseado numa arquitetura onde diferentes camadas trocam informações a fim de otimizar o desempenho da rede [2], mostra-se bastante promissor.

Procurando otimizar a eficiência das redes sem fio, em [3] buscou-se mostrar as vantagens da seleção da melhor combinação de modulação e técnica MIMO, para determinadas faixas de valor de SNR (*Signal Noise Ratio*), maximizando a taxa de transferência de dados fim-a-fim. Já em [2] é realizado um estudo sobre a arquitetura de redes inter-camadas, para o suporte de Qualidade de Serviço (*QoS*) em redes sem fio múltiplos saltos.

Esse artigo apresenta uma proposta de roteamento adaptativa em redes sem fio múltiplos saltos com múltiplas antenas, utilizando uma versão modificada do protocolo OLSR [4]. Nesse contexto, comparou-se diversos parâmetros de tráfego considerando cenários com ou sem múltiplas antenas por nó, comparando assim esquemas SISO (*Single Input Single Output*) e MIMO adaptativos. Este trabalho também considera o uso do padrão IEEE 802.11g, por ser um padrão amplamente aceito e utilizado entre os equipamentos de rede sem fio. Os resultados demonstram que o esquema proposto é capaz de melhorar consideravelmente o desempenho da rede sem fio.

O restante deste artigo está estruturado da seguinte maneira. A Seção II apresenta detalhes da proposta, incluindo uma discussão sobre o novo protocolo OLSR proposto e o mecanismo adaptativo. Na Seção III faz-se uma breve introdução sobre o ambiente de simulação e o conceito utilizado para simular o modelo de perdas do canal. Já na Seção III-A

Renan Hackbarth, Marcos Tomio Kakitani, Anelise Munaretto, Richard Demo Souza, CPGEI - Prog. de Pós-Graduação em Eng. Elétrica e Informática Industrial, UTFPR - Curitiba-PR, Brasil e Mauro Fonseca, PPGIA - Prog. de Pós-Graduação em Informática, PUC - Curitiba-PR, Brasil, E-mails: renan_rh@yahoo.com.br, mtkakitani@ieee.org, anelise@utfpr.edu.br, richard@utfpr.edu.br, mauro.fonseca@ppgia.pucpr.br

são apresentadas as características e parâmetros dos cenários propostos para simulação. Na Seção III-B, os resultados são analisados, enquanto que a Seção IV conclui o artigo.

II. PROPOSTA

A. Protocolo OLSR Proposto

O protocolo OLSR (*Optimized Link State Routing Protocol*) foi inicialmente desenvolvido para redes sem fio *ad hoc*. É um protocolo proativo, ou seja, troca regularmente informações sobre a topologia e atualizações da mesma, através de mensagens pré-definidas e as armazena em estruturas internas. O protocolo OLSR é definido pela RFC3626 [4], e implementa uma variação do algoritmo *Link State*. Nesse trabalho, utilizou-se como base a versão do protocolo OLSR conhecida como UM-OLSR [5], condscendente com a RFC3626. Entretanto, a fim de implementar um sistema adaptativo, propôs-se uma modificação no comportamento do protocolo OLSR, descrita em mais detalhes a seguir.

O protocolo OLSR, como descrito na RFC3626, faz a escolha da rota para o destino buscando a rota que irá proporcionar o menor número de saltos. Já na atual proposta, o algoritmo deverá escolher o caminho que irá proporcionar a maior vazão teórica possível no percurso fim-a-fim. Portanto, a partir das mensagens de HELLO (OLSR) trocadas entre os elementos da rede e seus vizinhos a 1 salto, a camada de acesso calcula o valor da relação sinal ruído mais interferência (SINR) correspondente ao enlace em questão. Dessa maneira todos os elementos pertencentes à topologia adquirem conhecimento do estado (SINR) do enlace com seus vizinhos. Para que os elementos mais distantes também tenham esse conhecimento, essa informação é incluída na mensagem de TC e no repositório do protocolo OLSR respectivo. Por fim, conhecendo o valor de SINR, a camada de rede determina qual a taxa de transmissão e respectiva modulação que irá proporcionar a maior vazão possível no enlace respectivo. Com esse intuito, foram obtidas as curvas de vazão \mathcal{V} para cada taxa de transmissão do padrão IEEE 802.11g, de acordo com:

$$\mathcal{V} = R \times (1 - P_{out}), \quad (1)$$

onde P_{out} representa a probabilidade de *outage* e a variável R representa as taxas de transmissão do padrão 802.11g. A probabilidade de *outage* representa a probabilidade de erro na decodificação da mensagem enviada por um determinado transmissor [6]. Apesar da probabilidade de *outage* ser definida para um bloco de mensagem de tamanho infinito, diversos trabalhos [7], [8], [9] mostraram que a probabilidade de *outage* é capaz de estimar de forma bastante realista a taxa de erro de bloco (FER) quando códigos corretores de erro de alto desempenho são empregadas mesmo com blocos relativamente curtos. Assim, para efeitos desse estudo, considerou-se que os valores de P_{out} são uma boa aproximação para a FER.

A Figura 1 apresenta a evolução das curvas de vazão, supondo canal Rayleigh e nós com uma única antena (SISO), para uma grande faixa de valores de SINR. Com base nas informações encontradas na Figura 1 montou-se a Tabela I, que relaciona as taxas de transmissão que proporcionarão a maior vazão possível, para intervalos distintos de valores de SINR.

Portanto, conhecendo o estado do enlace (SINR) a camada de rede consulta a Tabela I e verifica a taxa de transmissão correspondente.

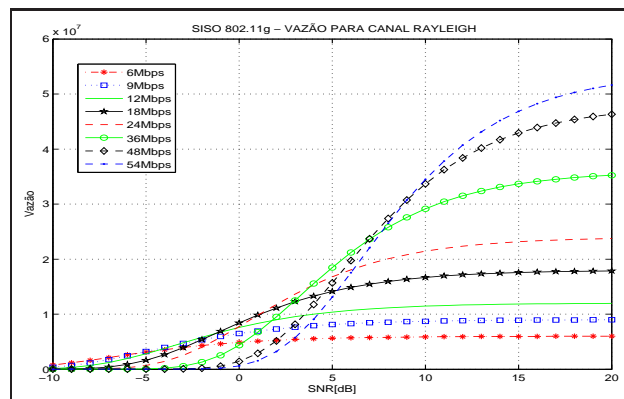


Fig. 1. SISO - Curvas de vazão para as oito taxas do padrão IEEE 802.11g

TABELA I
TAXAS DE TRANSMISSÃO E MODULAÇÃO RESPECTIVA PARA DIFERENTES FAIXAS DE SINR

| Taxa de Transmissão | SINR dB | Modulação e Taxa do Código |
|---------------------|---------------|----------------------------|
| 6Mbps | -10 < -5.25 | BPSK-1/2 |
| 9Mbps | -5.25 < -3.42 | BPSK-3/4 |
| 12Mbps | -3.42 < -1.25 | QPSK-1/2 |
| 18Mbps | -1.25 < 1 | QPSK-3/4 |
| 24Mbps | 1 < 3.82 | 16QAM-1/2 |
| 36Mbps | 3.82 < 6.95 | 16QAM-3/4 |
| 48Mbps | 6.95 < 9.04 | 64QAM-2/3 |
| 54Mbps | ≥ 9.04 | 64QAM-3/4 |

Conhecendo o valor de SINR do enlace e o modo de transmissão respectivo, o nó consulta as informações apresentadas na Figura 1 e obtém a vazão respectiva. Este valor de vazão é associado ao enlace, sendo que o mesmo caracteriza uma nova métrica para o protocolo, definida como a máxima vazão teórica possível de ser atingida no mesmo. Porém, buscando a simplificação no cálculo dessa métrica fim-a-fim, escolheu-se utilizar uma métrica aditiva [10] de custo \mathcal{C} , definida como:

$$\mathcal{C} = \sum_i \frac{1}{\mathcal{V}_i}, \quad (2)$$

onde i representa o número de saltos. Dessa forma, basta somar o valor deste custo a cada salto entre origem e destino, para se obter o valor do custo fim-a-fim. Ao utilizar a nova métrica proposta, uma determinada rota, mesmo apresentando número de saltos superior, poderá ser escolhida como melhor caminho caso possibilite atingir um maior valor de vazão média no percurso fim-a-fim.

B. Mecanismo Adaptativo

O padrão 802.11 deixa livre para cada fabricante a definição de um algoritmo para a seleção das taxas de transmissão. Essa escolha deve levar em conta as condições do canal, que podem variar de forma significativa ao longo do tempo. De modo que, quanto mais baixa a taxa de transmissão, mais

robusta é a transmissão feita usando essa taxa. Assim em uma situação ideal, a adaptação da taxa consistiria em diminuir a taxa quando a qualidade do canal piorasse e aumentar quando a mesma melhorasse, sendo a qualidade mapeada na SINR percebida no receptor [11].

Várias formas de adaptar a taxa de transmissão à condição do canal já foram propostas, como [12], [13], [14]. No esquema conhecido como RBAR (Receiver-Based Auto-Rate) [12], através da troca de mensagens de RTS (Request to Send) e CTS (Clear to Send) é possível que o transmissor conheça o estado (SINR) no receptor e adapte a sua taxa de transmissão de acordo. É com base nesse esquema que o modelo de adaptação de taxa utilizado nesse trabalho é proposto. Entretanto, utilizar as mensagens de RTS/CTS não proporcionam uma melhora significativa no desempenho do sistema [15], [16], tal que no modelo proposto as mensagens de controle do protocolo OLSR serão aproveitadas para o mesmo fim.

Assim, de acordo com o valor de SINR calculado no receptor, o algoritmo irá escolher a forma de transmissão que irá proporcionar a maior vazão teórica possível. Portanto, além deste modelo promover a escolha do caminho que possibilitará atingir a maior vazão possível, os elementos sem fio também irão adaptar as suas taxas de transmissão de acordo com o estado do enlace (ponto-a-ponto), na tentativa de atingir essa mesma máxima vazão teórica.

Para fins de comparação e verificação de desempenho, também é objetivo dessa proposta a simulação de cenários que implementem a combinação do modelo proposto, com as vantagens proporcionadas pelos esquemas que fazem uso de múltiplas antenas. Por simplicidade, no estudo de esquemas MIMO consideramos somente casos onde tanto o transmissor quanto o receptor possuem duas antenas, de modo que avaliemos o desempenho dos esquemas bastante conhecidos [6]: Beamforming (BF) 2x2, Alamouti 2x2, e V-BLAST 2x2. Vale ressaltar que tanto no caso de beamforming quanto do uso da técnica de Alamouti, supomos que o receptor faz a combinação por razão máxima (MRC).

III. AVALIAÇÃO DA PROPOSTA

A fim de implementar a atual proposta, escolheu-se utilizar a versão 2.34 do NS (Network Simulator) [17]. O NS é um simulador de eventos discretos de código aberto, desenvolvido para pesquisa em redes [18]. Para simular o modelo de perdas se utilizou o conceito de probabilidade de *outage*, que para o caso de um canal Rayleigh e um sistema SISO [6]:

$$P_{out} = 1 - e^{-\gamma_{min}/\bar{\gamma}_s}, \quad (3)$$

onde γ_{min} representa a SINR mínima para um desempenho aceitável e $\bar{\gamma}_s$, a SINR média. Os valores de FER são utilizados como parâmetro de entrada para o código do NS, a fim de simular o modelo de perdas e consequentemente, o comportamento de cenários distintos do ponto de vista da camada de acesso (incluindo os cenários com esquemas MIMO, que possuem equações de P_{out} específicas [6], [19], e que são discutidos com mais detalhes em [20]).

Para determinar o valor de SINR, a interferência é calculada utilizando um modelo Gaussiano, capaz de levar

em consideração o efeito das transmissões simultâneas no receptor. A equação correspondente (incluída pela biblioteka *dei80211mr* do simulador NS 2.34) é representada por:

$$SINR = \frac{P_r}{N + I}, \quad (4)$$

onde P_r é a potência recebida, N é a potência do ruído na recepção e I é a potência de interferência percebida no receptor em função das transmissões simultâneas na rede.

A. Simulações

Buscando demonstrar de forma mais clara o desempenho do modelo proposto, definiu-se um modelo de referência para fins de comparação. Nesse contexto, foram capturados os resultados utilizando o protocolo OLSR como proposto pela RFC3626, ou seja, considerando o menor número de saltos como métrica. Nesse mesmo ambiente o mecanismo conhecido como ARF (*Auto-Rate Fallback*) [21] foi selecionado para adaptar as taxas de transmissão de acordo com o estado do meio. Este foi selecionado pois alguns trabalhos da literatura afirmam que esse algoritmo, ou variantes do mesmo, são amplamente utilizados em equipamentos comerciais [14] [22].

B. Resultados

Nesta seção, primeiramente considerou-se o cenário composto por 11 nós sem fio (SISO), exposto na Figura 2.

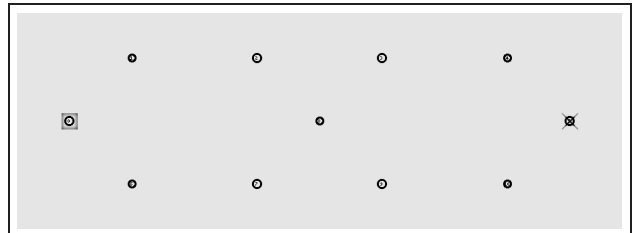


Fig. 2. Topologia - 11 nós previamente posicionados

No início da simulação os nós trocam mensagens de HELLO e TC de maneira que eles tomem conhecimento da presença um do outro na rede, e atualizem suas tabelas de roteamento. Esse período é conhecido como o período de convergência do protocolo, de maneira que no cenário atual 15 segundos foi suficiente para atingir a convergência. Na sequência um fluxo de dados utilizando o protocolo UDP, taxa de transmissão de 4Mbps e tamanho do pacote de 1024bytes, é gerado pelo nó em formato de quadrado, tendo o nó em formato de "X" como destino. As transmissões foram realizadas considerando um sistema formado por uma única antena transmissora e receptora (SISO). Após o sistema estabilizar, capturou-se uma série de resultados considerando o OLSR descrito pela RFC3626 e o OLSR proposto, os quais são apresentados na Tabela II.

Como pode ser observado na Tabela II, utilizando o protocolo OLSR proposto atingiu-se um valor de vazão média igual a 1632,19 kbps. Entretanto, utilizando o protocolo OLSR como descrito pela RFC 3626, obteve-se uma vazão média de 1186,22 kbps. Ou seja, o modelo proposto possibilitou atingir

TABELA II
RFC3626 vs. OLSR PROPOSTO - CONJUNTO DE MEDIDAS.

| Medidas | OLSR - RFC3626 | OLSR - Proposto |
|---------------------|----------------|-----------------|
| Vazão Média[kbps] | 1186,22 | 1632,19 |
| Atraso Médio[ms] | 480,19 | 220,60 |
| Jitter Médio[ms] | 6,27 | 2,92 |
| Pacotes enviados | 7325 | 7325 |
| Pacotes recebidos | 2172 | 2873 |
| Pacotes perdidos | 5153 | 4452 |
| Pacotes de controle | 298 | 301 |

um valor de vazão média aproximadamente 50% superior, quando comparado com o OLSR descrito pela RFC3626. Ao analisar os demais itens dessa tabela, verificou-se que o uso do OLSR proposto reduziu o valor do atraso médio fim-a-fim aproximadamente para metade - de 480,19 ms para 220,60 ms. Esta queda foi ainda mais acentuada em termos do *jitter* médio - variando de 6,27 ms à 2,82 ms.

Outro detalhe importante a ser observado na Tabela II, é o número de pacotes perdidos. Utilizando o OLSR descrito pela RFC3626, 5153 pacotes foram perdidos, enquanto que o OLSR proposto reduziu esse número de perdas para 4452 pacotes. Já o número de pacotes de controle do protocolo trocados entre os nós praticamente se manteve.

Portanto, no cenário em questão o OLSR proposto gerou um ganho significativo em termos de vazão. A redução dos valores de atraso e *jitter* médios pode ser muito útil no desempenho de aplicativos que exijam baixos valores de atraso e *jitter* nas suas transmissões, tais como aplicações de voz e vídeo. Já a redução do número de pacotes perdidos proporcionada pelo uso do OLSR proposto garante uma rede mais estável e confiável.

Com o intuito de apresentar o comportamento do modelo proposto em diferentes cenários, foram exploradas as vantagens proporcionadas pelas técnicas MIMO. Neste âmbito foram sorteadas dez topologias distintas, cuja posição dos nós foi escolhida aleatoriamente (para maiores detalhes consultar [20]). Mais uma vez, buscando facilitar a compreensão e análise dos resultados obtidos, manteve-se a configuração do tráfego sugerida na simulação anterior. Ou seja, considerou-se um único fluxo com taxa de transmissão constante de 4Mbps e tamanho de pacote fixo em 1024 bytes.

Cada topologia é composta por 11 nós sem fio, de onde foram capturados valores de vazão, atraso e *jitter* médios, como também o número de pacotes de controle trocados e pacotes perdidos. A Figura 3 apresenta os valores de vazão médios para cada esquema MIMO. Os resultados obtidos sem o auxílio desses esquemas também são apresentados para fins de comparação.

Na Figura 3 as linhas vermelha e azul respectivamente, representam a vazão média utilizando o OLSR descrito pela RFC3626 e o OLSR proposto para cada topologia. Já as demais linhas representam os resultados atingidos utilizando a combinação do OLSR proposto com um determinado esquema MIMO. Como pode ser observado em todas as topologias, o uso dos esquemas MIMO em conjunto com o OLSR proposto geraram um ganho de vazão ainda superior quando comparado com os ganhos proporcionados pelo OLSR proposto isolado (sem o auxílio de técnicas MIMO). Por fim, as técnicas V-

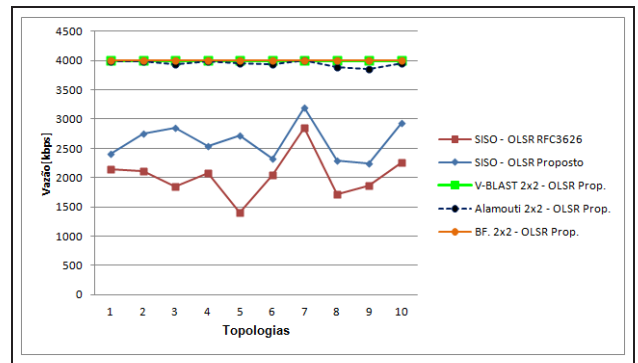


Fig. 3. Resultados - Vazão média obtida nas 10 topologias

BLAST 2x2 e Beamforming 2x2 juntamente com o OLSR proposto, foram as combinações que possibilitaram atingir os valores mais altos em termos de vazão média (se igualando à taxa de transmissão máxima estabelecida para o fluxo de dados - 4Mbps).

Outros parâmetros como o atraso, *jitter*, número de pacotes perdidos e pacotes de controle, também foram medidos. As Figuras 4, 5 e 6 apresentam essas medidas.

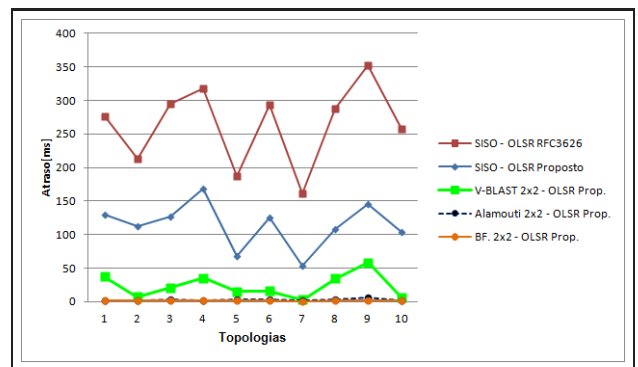


Fig. 4. Resultados - Atraso médio obtido nas 10 topologias

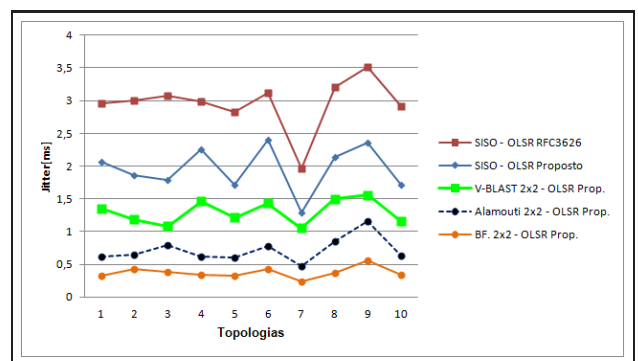


Fig. 5. Resultados - Jitter médio obtido nas 10 topologias

Ao analisar as Figuras 4 e 5 fica evidente que a combinação dos esquemas MIMO e o OLSR proposto resultaram em valores de atraso e *jitter* inferiores aos obtidos somente utilizando o OLSR proposto (sem o auxílio de qualquer técnica MIMO). O mesmo pode ser observado em termos de pacotes perdidos, conforme ilustra a Figura 6. Por fim, embora não ilustrado

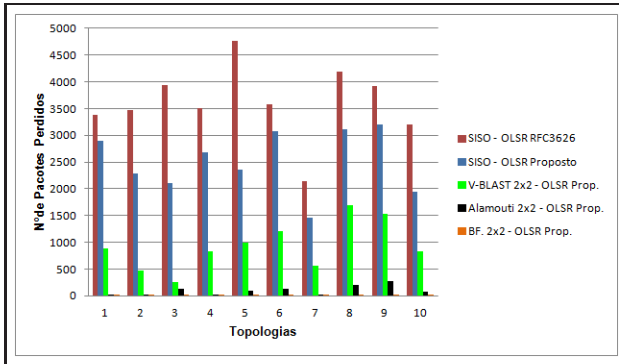


Fig. 6. Resultados - Número de pacotes perdidos obtido nas 10 topologias

aqui, o número de mensagens de controle praticamente permaneceu inalterado em todas 10 topologias.

A combinação do esquema Beamforming 2x2 juntamente com o OLSR proposto, foi a combinação que apresentou os menores valores em termos de atraso, *jitter* e número de pacotes perdidos. Porém, com o uso da técnica Alamouti 2x2 foi possível obter resultados próximos. Dada a maior simplicidade da técnica de Alamouti em relação ao Beamforming (que requer o conhecimento do canal no transmissor), podemos afirmar que ela seria uma boa opção na prática para ser usada em conjunto com o OLSR proposto.

IV. CONCLUSÃO

Este trabalho investigou o uso de uma proposta de roteamento adaptativa em redes sem fio múltiplos saltos, utilizando uma versão modificada do protocolo OLSR. De acordo com a condição do canal, o nó determina a taxa de transmissão e consequente modulação que irá proporcionar a maior vazão possível no enlace. Essa informação é repassada para a camada de rede que, com auxílio da versão modificada do protocolo de roteamento, seleciona a melhor rota (maior vazão) no percurso fim-a-fim. Através de simulações computacionais, os resultados foram obtidos e comparados com a versão do protocolo OLSR descrita pela RFC3626.

Resultados numéricos demonstram que o uso do esquema proposto é vantajoso tanto em termos de vazão, como atraso e *jitter*. A diminuição tanto do atraso quanto do *jitter*, proporcionadas pelo esquema proposto, podem ser muito interessantes para aplicações sensíveis a esses tipos de variáveis. Já a redução observada no número pacotes perdidos, garante uma importante melhora em características essenciais, tais como a confiabilidade e estabilidade da rede. Por fim, a combinação do uso de esquemas MIMO com o modelo proposto, demonstrou ser ainda mais eficiente. O uso dos esquemas Beamforming 2x2 e V-BLAST 2x2 em conjunto com o modelo proposto foram as combinações que proporcionaram os melhores resultados em termos de vazão. O esquema Beamforming 2x2 garantiu os menores valores em termos de atraso, *jitter* e número de pacotes perdidos. Entretanto, apesar do esquema Alamouti 2x2 apresentar desempenho ligeiramente inferior ao do Beamforming 2x2, ele tem como vantagem o fato de não requerer o conhecimento do canal no transmissor [6], e portanto ser mais simples.

REFERÊNCIAS

- [1] I. F. Akyildiz and X. Wang, "Cross-layer design in wireless mesh networks," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 57, no. 9, pp. 1061–1076, Mar. 2008.
- [2] Q. Zhang and Y.-q. Zhang, "Cross-Layer design for QoS support in multihop wireless networks," in *Proceedings of the IEEE*, Jan. 2008, vol. 96, no. 1, pp. 64–76.
- [3] R. Borges, A. Munaretto, M. Fonseca, and R. D. Souza, "Otimização de rotas em redes MIMO múltiplos saltos com métricas inter-camadas," *XXVI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações*, vol. 1, pp. 1–6, Sep. 2008.
- [4] T. Clausen and P. Jacquet, "Optimized link state routing protocol (OLSR)." IETF Request for Comments 3626, Tech. Rep., Oct. 2003. [Online]. Available: <http://portal.acm.org/citation.cfm?id=RFC3626>
- [5] F. J. Ros, "UM-OLSR," 2009. [Online]. Available: <http://masimum.dif.um.es/?Software:UM-OLSR>
- [6] A. Goldsmith, *Wireless Communications*. New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2005.
- [7] R. Knopp and P. A. Humblet, "On coding for block fading channels," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 46, no. 1, pp. 189–205, Jan. 2000.
- [8] E. Malkamaki and H. Leib, "Coded diversity on block-fading channels," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 45, no. 2, pp. 771–781, Mar. 1999.
- [9] A. des Rosiers and P. Siegel, "On performance bounds for space-time codes on fading channels," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 52, no. 10, pp. 1688–1697, Oct. 2004.
- [10] J. Wang, Z. and Crowcroft, "Quality-of-service routing for supporting multimedia applications," *IEEE Journal of Selected Areas in Communications*, vol. 14, no. 7, pp. 1228–1234, Sep. 1996.
- [11] K. V. Cardoso and J. F. de Rezende, "Adaptação automática de taxa em redes 802.11 densas," *XVI Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores - SBRC2008*, pp. 467–480, May 2008.
- [12] G. Holland, N. Vaidya, and P. Bahl, "A rate-adaptive MAC protocol for multi-hop wireless networks," in *Proceedings of the 7th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*. New York, NY, USA: ACM, Jul. 2001, pp. 236–251.
- [13] M. Lacage, M. H. Manshaei, T. Turletti, and S. Antipolis, "IEEE 802.11 rate adaptation: a practical approach," in *Proceedings of the 7th ACM International Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems*. New York, NY, USA: ACM, Oct. 2004, pp. 126–134.
- [14] J. Kim, S. Kim, S. Choi, and D. Qiao, "CARA: Collision-Aware Rate Adaptation for IEEE 802.11 WLANs," in *INFOCOM 2006. 25th IEEE International Conference on Computer Communications. Proceedings*, Apr. 2007, pp. 1–11.
- [15] K. Xu, M. Gerla, and S. Bae, "Effectiveness of RTS / CTS handshake in IEEE 802.11 based ad hoc networks," *Ad Hoc Networks*, vol. 1, no. 1, pp. 107–123, Jul. 2003.
- [16] D. Johnson, C. Aichele, and N. Ntlatlapa, "A simple pragmatic approach to mesh routing using BATMAN," in *2nd IFIP International Symposium on Wireless Communications and Information Technology in Developing Countries*, Oct. 2008, p. 10.
- [17] "The network simulator - ns-2," 2010. [Online]. Available: <http://www.isi.edu/nsnam/ns>
- [18] T. Issariyakul and E. Hossain, *Introduction to Network Simulator NS2*. New York, NY: Springer Science+Business media LLC, Oct. 2008.
- [19] S. Loyka, F. Gagnon, and S. Member, "Performance analysis of the V-BLAST algorithm: an analytical approach," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 3, no. 4, pp. 1326–1337, Jul. 2004.
- [20] R. Hackbarth, "Uma proposta de roteamento utilizando comunicação adaptativa em redes sem fio múltiplos saltos com múltiplas antenas," Dissertação de Mestrado, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2012.
- [21] A. Kameron and L. Monteban, "WaveLAN-II: a high-performance wireless LAN for the unlicensed band," *Bell Labs Technical Journal*, vol. 2, no. 3, pp. 118–133, Jul. 1997.
- [22] B. Sadeghi, V. Kanodia, A. Sabharwal, and E. Knightly, "OAR: an opportunistic auto-rate media access protocol for ad hoc networks," *Wireless Networks*, vol. 11, no. 1, pp. 39–53, Jan. 2005.