

O uso de pares de pacotes para monitoração da taxa de transmissão e da capacidade de vazão em redes IEEE 802.11

Arlindo Flávio da Conceição¹, Fabio Kon¹

¹Grupos de Sistemas Distribuídos – Departamento de Ciência da Computação
Instituto de Matemática e Estatística – Universidade de São Paulo (DCC - IME/USP)
<http://gsd.ime.usp.br>

{arlindo,kon}@ime.usp.br

Abstract. *This work analyzes the behavior of the mechanism of Pair of Packets over IEEE 802.11b networks. We propose the usage of the mechanism to monitor — in the application layer — the automatic rate control (ARC) of IEEE 802.11. The ARC activities have a strong influence over adaptive applications, but it works without notifying the application layer about its behavior. We also present the utilization of the Pair of Packets mechanism to infer the maximum throughput of IEEE 802.11 environments.*

Resumo. *Este trabalho avalia o comportamento do mecanismo de Pares de Pacotes sobre as redes sem fio IEEE 802.11. Propomos o uso do mecanismo para monitorar, na camada de aplicação, o controle automático da taxa de transmissão (ARC) de IEEE 802.11. As alterações na taxa de transmissão têm forte impacto no comportamento das aplicações adaptativas; mas apesar desse impacto, as alterações são feitas sem nenhuma notificação à camada de aplicação. Este trabalho também explora a capacidade do mecanismo de pares de pacotes de inferir a vazão máxima das redes IEEE 802.11.*

1. Introdução

As aplicações adaptativas são capazes de adequar-se às condições de execução; para isso, monitoram certas métricas de adaptação e, em função delas, executam as devidas adaptações. No entanto, o desenvolvimento de aplicações adaptativas para redes IEEE 802.11 é mais difícil do que para as redes tradicionais [da Conceição and Kon 2006]; isso ocorre porque algumas características das redes IEEE 802.11 reduzem a acuidade das métricas de adaptação, tornando sua interpretação mais complexa. Além disso, em redes IEEE 802.11 existem novas métricas de adaptação a serem monitoradas, como, por exemplo, a qualidade do sinal.

Dentre os fatores que reduzem a acuidade das métricas de adaptação também podemos citar os próprios mecanismos da camada MAC de IEEE 802.11. O mecanismo de retransmissão automática de quadros (*Automatic Repeat reQuest* ou ARQ) oferece o exemplo mais comum de como as métricas de adaptação podem ser negativamente afetadas pelos mecanismos internos de IEEE 802.11. O mecanismo ARQ é responsável por reenviar um quadro de transmissão caso a entrega deste quadro não tenha sido confirmada (*acknowledged*); o número de tentativas de reenvio é definido em função do tamanho do quadro: para os quadros menores do que o *RTS Threshold*, o número padrão de reenvios

é sete e, para os quadros maiores, é quatro [Gast 2002]. Porém, ao fazer uso de retransmissões para melhorar a confiabilidade da transmissão, IEEE 802.11 afeta a acuidade das métricas de adaptação baseadas na informação de perda de pacotes, dificultando assim o uso dessas métricas no desenvolvimento de estratégias adaptativas. Na prática, devido às retransmissões, as perdas de pacotes em redes IEEE 802.11 são perceptíveis apenas quando a qualidade do canal já está bastante deteriorada, ou seja, quando pode ser tarde demais para a realização de adaptações.

O mecanismo para controle automático da taxa de transmissão (*Automatic Rate Control* ou ARC) também tem grande impacto sobre a acuidade das métricas de adaptação [Haratcherev et al. 2005] e é responsável por escolher a modulação adequada às condições do canal, com o objetivo de explorar o compromisso entre a taxa de erros e a capacidade de transmissão. Seu princípio de atuação é: quanto pior a situação do canal, mais robusta deve ser a modulação utilizada (menor a taxa de transmissão); quanto melhor o canal, menos robusta pode ser a modulação utilizada (maior a taxa de transmissão). O padrão IEEE 802.11g define o uso de até 14 diferentes modulações, que resultam nas taxas de transmissão: 54, 48, 36, 33, 24, 22, 18, 12, 11, 9, 6, 5.5, 2 e 1 Mbps. Porém, o padrão deixa em aberto o algoritmo e os critérios usados pelo mecanismo de ARC para escolher dentre essas possíveis modulações¹. Como consequência dessa não-definição, os mecanismos de ARC são implementados pelos fabricantes de interfaces de rede IEEE 802.11 de maneira proprietária (“fechada”); isso não seria um problema não fosse o impacto direto do mecanismo de ARC no comportamento da conexão, nas métricas de adaptação e, inclusive, na rede sem fio como um todo.

Do ponto de vista do desenvolvimento de aplicações, uma das principais consequências da atuação do mecanismo de ARC são as variações relativamente bruscas na capacidade de vazão do sistema. Como o uso de diferentes modulações é uma estratégia presente apenas nas redes sem fio — e não nas redes tradicionais —, as aplicações atuais não estão preparadas para essas reduções abruptas na capacidade de vazão. Nem mesmo as aplicações adaptativas levam em consideração as alterações na taxa de transmissão, pois em geral esta informação não está disponível para a camada de aplicação. Grosso modo, o impacto do mecanismo de ARC nas aplicações tem sido negligenciado; na verdade, mais do que isso, as aplicações para redes IEEE 802.11 têm sido tratadas apenas como aplicações para redes *Ethernet*.

Dessa forma, não considerar o impacto do mecanismo de ARC pode fazer com que as métricas de adaptação sejam erroneamente interpretadas. Afinal, as mesmas taxas de perdas de pacotes não podem ser interpretadas da mesma maneira, quando obtidas a diferentes taxas de transmissão; o mesmo argumento se aplica também para a interpretação de outras métricas, tais como as baseadas em perda de quadros, atraso, *jitter* etc. Portanto, a taxa de transmissão é uma informação fundamental para o projeto de algoritmos adaptativos para redes IEEE 802.11.

Dada essa necessidade, propomos neste artigo uma técnica para monitorar o impacto nas taxas de transmissão das alterações feitas pelo mecanismo de ARC; a técnica baseia-se no mecanismo de pares de pacotes e tem como objetivo ser uma métrica de adaptação complementar — quiçá fundamental — para o projeto de aplicações adaptati-

¹Na página 12 de [IEEE Working Group for WLAN Standards 2003] afirma-se literalmente que a definição do algoritmo usado pelo mecanismo de ARC está além do escopo da padronização.

vas para redes IEEE 802.11. Com esse objetivo, a Seção 2 descreve o mecanismo de ARC e suas implicações para o projeto de aplicações. A Seção 3 apresenta o mecanismo de pares de pacotes e os trabalhos relacionados. A Seção 4 descreve o ambiente experimental utilizado. A Seção 5 demonstra os resultados obtidos e a utilização do mecanismo de pares de pacotes para a monitoração de alterações na taxa de transmissão. A Seção 6 discute algumas limitações à aplicação do mecanismo. Por fim, a Seção 7 apresenta nossas conclusões e experiências obtidas na utilização do mecanismo.

2. Controle automático da taxa de transmissão

O mecanismo para controle automático da taxa de transmissão (*Automatic Rate Control* ou ARC) é um dos maiores responsáveis pelo sucesso das redes IEEE 802.11, pois permite tanto altas taxas de transmissão, quanto maiores áreas de cobertura. A função do mecanismo é analisar a condição do canal de comunicação e escolher a modulação mais adequada a essa condição.

O uso de modulações mais robustas permite o tráfego de dados mesmo sobre canais deteriorados, ou seja, canais sujeitos a taxas de erro elevadas. Conseqüentemente, essas modulações também permitem o maior alcance das transmissões. Porém, a robustez da modulação é obtida em detrimento da taxa de transmissão. A Figura 1 ilustra a relação entre vazão e distância de três modulações diferentes². Em suma, as modulações mais robustas atingem menores taxas de transmissão, mas podem alcançar distâncias maiores, e as modulações menos robustas atingem taxas de transmissão maiores, mas alcançam distâncias menores.

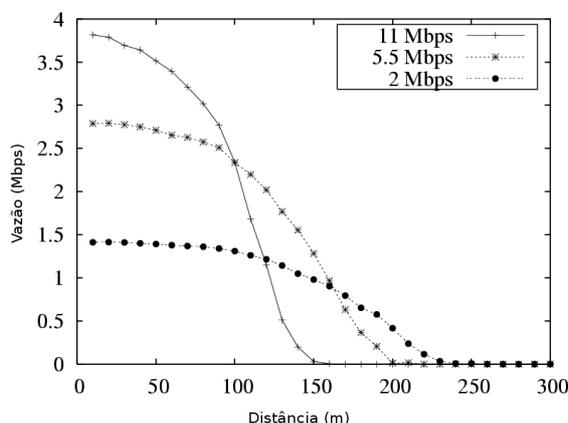


Figura 1. Vazão TCP em uma rede IEEE 802.11b (com o mecanismo RTS/CTS habilitado).

A atividade de adaptação conduzida transparentemente pelo mecanismo de ARC é essencial, mas dificulta o desenvolvimento de aplicações adaptativas para redes IEEE 802.11, pois interfere na interpretação das métricas de adaptação e gera distorções indesejáveis no compartilhamento da capacidade da rede sem fio [Heusse et al. 2003].

2.1. Problemas acarretados pelo uso de ARC

Uma vez que os algoritmos e as métricas de adaptação usados pelo mecanismo ARC não são definidos pelo padrão IEEE 802.11, os fabricantes definem os critérios de adaptação

²A Figura 1 foi gentilmente cedida por Godfrey Tan, ex-doutorando no grupo de Redes e Sistemas Móveis do MIT (<http://nms.lcs.mit.edu>).

segundo as peculiaridades de seus dispositivos IEEE 802.11. Ou seja, cada interface de rede pode responder de maneira diferente às condições do canal de comunicação, acionando diferentemente os mecanismos de ARC, mesmo quando sujeitos às mesmas condições de sinal e conexão.

O projeto de aplicações adaptativas para redes IEEE 802.11, portanto, deve levar em consideração a diversidade de comportamento nas interfaces de rede. Ou, no mínimo, é preciso que a avaliação das métricas de adaptação considere as taxas de transmissão efetivamente exercidas, pois métricas iguais não podem ser interpretadas da mesma maneira quando obtidas a diferentes taxas de transmissão. Sem a informação de taxa de transmissão, as métricas de adaptação ficam “míopes” e podem não refletir a real condição de uma conexão.

Além disso, não existem mecanismos para notificar a camada de aplicação das alterações na taxa de transmissão. Atualmente, a forma “natural” de se fazer essa notificação seria através da API de NDIS (*Network Driver Interface Specification*); mas a API não disponibiliza a informação de taxa de transmissão em uso, disponibiliza apenas o conjunto de modulações (taxas de transmissão) que a interface de rede é capaz de usar. Devido à necessidade de melhores métricas de adaptação, foi criado um comitê para a elaboração do padrão IEEE 802.11k (*Radio Resource Measurement*), que deve prover mecanismos mais confiáveis para a avaliação da qualidade do sinal e da conexão sem fio. Mas esse novo padrão não auxiliará os dispositivos atuais e, por ainda estar em desenvolvimento, levará vários anos para chegar aos usuários finais.

O uso de diferentes modulações também pode acarretar algumas anomalias indesejáveis, como a reportada em [Heusse et al. 2003]. Em uma rede IEEE 802.11b, unidades móveis que transmitem a taxas menores, por exemplo a 1 Mbps, afetam negativamente a capacidade de transmissão das unidades que operam a 11 Mbps. Isso ocorre porque o protocolo MAC de IEEE 802.11 foi projetado para que todas as unidades móveis tenham a mesma probabilidade de acesso ao meio, independente da taxa de transmissão, do tamanho dos pacotes ou da qualidade da conexão. Sendo assim, duas unidades A e B, transmitindo respectivamente a 11 e 1 Mbps, têm a mesma probabilidade de acesso ao meio e, conseqüentemente, a unidade A tem que “esperar” pela transmissão da unidade B. O mecanismo de ARC é o pivô dessa injustiça no compartilhamento da capacidade de transmissão entre unidades móveis [Tan and Guttag 2005].

Antes de prosseguir e descrever o método de pares de pacotes, cabe questionar: por que realizar adaptações no nível das aplicações, se o mecanismo ARC já o faz? É verdade que o mecanismo ARC possui melhores condições para decidir sobre a adaptação do canal sem fio do que a aplicação, pois tem pleno acesso à camada MAC e PHY, mas, por outro lado, o mecanismo ARC não possui informações sobre a natureza quer da aplicação e de seus requisitos, quer das possíveis estratégias adaptativas, o que torna desejável — e por vezes essencial — a implementação de mecanismos adaptativos na camada de aplicação. Além disso, deve-se observar que as adaptações realizadas pelo mecanismo ARC também são feitas sob certo grau de miopia, pois, para definir a taxa de *transmissão*, o mecanismo de ARC baseia-se principalmente nas estatísticas locais de *recepção* [Haratcherev et al. 2005], o que pode levar a erros, dado que as transmissões em redes sem fio não são necessariamente simétricas [Kotz et al. 2003, Kotz et al. 2004].

3. O mecanismo de pares de pacotes e trabalhos relacionados

O mecanismo de pares de pacotes usado nesse trabalho foi inspirado num mecanismo mais geral, o mecanismo de trem de pacotes, ilustrado na Figura 2, que é composto por um emissor e um receptor, tal que ao emissor cabe enviar pacotes a intervalos constantes de tempo e ao receptor, por sua vez, cabe analisar a recepção desses pacotes. De maneira geral, a recepção sofre influência das condições da rede. Em redes sujeitas a condições mais severas, como por exemplo congestionamentos, observam-se maiores variações no intervalo de tempo entre cada recepção de pacotes, assim como a eventual perda de pacotes. Por outro lado, em redes ociosas, as recepções são mais estáveis.

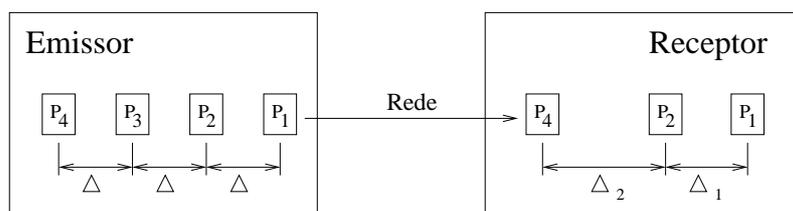


Figura 2. Mecanismo de trem de pacotes.

Os mecanismos de trem de pacotes e suas variações têm sido usados em algoritmos para a inferência das condições de redes desde o final da década de 80. O conceito de análise da recepção de pacotes foi inicialmente apresentado por Van Jacobson [Jacobson 1988]. Outro pioneiro foi Keshav [Keshav 1991a], que considerava o intervalo entre pacotes no controle de fluxos; essa abordagem também pode ser encontrada em [Keshav 1991b] e [Keshav 1994]. Em [Bolot 1993], pequenos datagramas UDP (*probing packets*) eram usados para caracterizar o comportamento fim-a-fim de perdas e atrasos na Internet; esse foi um dos primeiros trabalhos a observar a importância de tais mecanismos para as então emergentes aplicações de áudio e vídeo. O mecanismo também foi utilizado para estimar a capacidade máxima de redes cabeadas [Roesler et al. 2003]. Mais recentemente, [Dovrolis et al. 2004] concluiu um estudo abrangente sobre a capacidade das técnicas de avaliação de redes baseadas em medidas de dispersão, ou seja, baseadas nos intervalos entre pacotes. Em suma, os trabalhos anteriores constataram que o método de trem de pacotes possui as seguintes características:

- maior estabilidade e precisão do método, quanto maiores forem os pacotes utilizados;
- maior confiabilidade das inferências, quanto maior o número de pacotes analisados;
- adequação do método para inferência da capacidade máxima da rede, mas não para a inferência da utilização da rede.

As razões para as duas primeiras constatações são relativamente intuitivas; afinal, quanto maior a amostra, maior a sua precisão. A razão da terceira constatação é que, para inferir a utilização da rede, é preciso que os pacotes pertencentes ao trem de pacotes sejam atrasados pelo tráfego presente na rede, mas isso ocorre com pouca frequência, pois em geral os pacotes do trem “cabem” nos períodos de transmissão.

Embora não tenhamos encontrado, na literatura, a exploração do mecanismo em redes IEEE 802.11, recentemente avaliamos o comportamento do mecanismo de trem de

pacotes nas redes IEEE 802.11 [da Conceição and Kon 2004]. A nossa avaliação, em suma, corroborou os resultados anteriormente obtidos para as redes cabeadas, exceto nas situações que envolviam mobilidade, pois esta não é uma característica das redes Ethernet.

Este trabalho, por sua vez, explora a aplicação de uma variação do método de trem de pacotes, o método de pares de pacotes, sobre as redes IEEE 802.11, o qual consiste em enviar pares de pacotes do emissor para o receptor a intervalos regulares; a diferença deste para o mecanismo de trem de pacotes é que os pacotes pertencentes a um par são inseridos na rede sem intervalo entre eles, ou seja, um imediatamente após o outro, como ilustra a Figura 3. Para simplicidade do texto, a diferença de tempo entre o recebimento dos pacotes de um par será chamada de IEP (Intervalo Entre Pacotes). É na avaliação dos IEPs que se baseiam nossos algoritmos para monitoração das taxas de transmissão e para inferência da capacidade da rede.

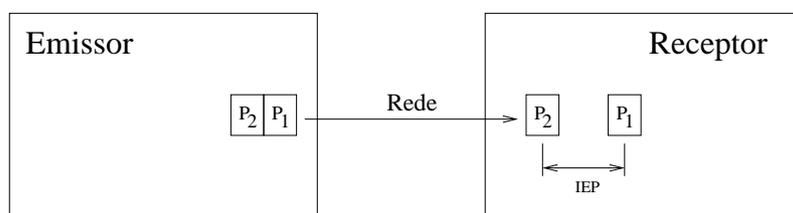


Figura 3. Mecanismo de pares de pacotes.

A implementação do mecanismo de pares de pacotes requer algumas decisões de projeto (protocolo de transporte, tamanho dos pacotes, intervalos entre pares de pacotes etc.) que dependem da aplicação. Neste trabalho, usamos como referência para a implementação do mecanismo de pares de pacotes as aplicações de transmissão de fluxos de vídeo (*video streaming*). Além da crescente importância dessas aplicações nos dias atuais, elas foram usadas como referência porque se adequam bem ao método de pares de pacotes. As aplicações de vídeo, de maneira geral, adotam protocolos construídos sobre o protocolo UDP para a transmissão dos quadros de vídeo [Schulzrinne et al. 2003, Ikkurthy and Labrador 2002]. A implementação de pares de pacotes também deve preferir UDP a TCP, pois protocolos de transporte confiáveis valem-se de estratégias de retransmissão e de controle que afetariam a medição dos IEPs. Ademais, protocolos confiáveis omitem a perda de pacotes, o que é uma informação relevante na análise do par de pacotes.

Além disso, o tamanho dos pacotes normalmente usados nas aplicações de vídeo e no mecanismo de pares de pacotes também é compatível. Em [Ikkurthy and Labrador 2002], recomenda-se a transmissão de fluxos contínuos de vídeo MPEG em pacotes de aproximadamente 750 octetos. Em [Roesler et al. 2003], constatou-se que pacotes de 500 a 1.000 octetos são adequados aos mecanismos de trem de pacotes. Estes valores também estão abaixo dos limites de fragmentação estipulados para as redes IEEE 802.11 e Ethernet (respectivamente, 2.346 e 1.500 octetos), evitando assim a fragmentação de quadros de vídeo, ou pacotes UDP, em dois ou mais quadros de transmissão da camada MAC. O tamanho dos pacotes usados em nossas avaliações é de 1.000 octetos.

4. Ambiente experimental

Para a realização dos experimentos, implementamos o mecanismo de pares de pacotes em linguagem de programação Java, versão 1.5. O código-fonte do protótipo desenvolvido está disponível em <http://gsd.ime.usp.br/software/WirelessMultimedia/sourcecode>. Também usamos as ferramentas *Netperf* e *Ethereal* para validar os resultados obtidos.

O ambiente experimental utilizado é composto de um computador servidor (Dual-Pentium III, com 2 processadores de 1 GHz e 512 MB de memória, sistema operacional Debian-Linux, distribuição Woody) e de dois computadores portáteis da marca Compaq (Pentium III 800 MHz com 128 MB de memória e Pentium III 1 GHz com 256 MB de memória, ambos usando Windows XP, SP2). Para a conectividade sem fio entre os computadores foi usado um ponto de acesso da marca Samsung, modelo SWL-4000 AP. O servidor era conectado à mesma sub-rede do ponto de acesso por cabeamento Fast Ethernet de 100 Mbps. Os computadores portáteis eram conectados ao ponto de acesso através de interfaces IEEE 802.11 de diferentes fabricantes e modelos, tais como: WMP55AG, AIR-PCM340, WUSB54GP Ver. 4, WUSB54AG, WUSB54G Ver. 4, WPC54G Ver. 1.2, SWL-2100N e PC24E-H-FC. Para garantir a consistência dos resultados, todos os experimentos apresentados neste artigo foram obtidos usando-se esta última interface, um cartão PCMCIA IEEE 802.11b, da Lucent, modelo WaveLAN Silver PC24E-H-FC, *chipset* Orinoco.

5. Comportamento dos IEPs mediante mobilidade e suas aplicações práticas

Em nossos experimentos, o comportamento dos IEPs em redes IEEE 802.11 foi semelhante ao observado nas redes Ethernet tradicionais, exceto talvez nas situações de mobilidade [da Conceição and Kon 2004] e pela maior variância das características da conexão. Esta seção descreve o comportamento dos IEPs e apresenta duas aplicações do mecanismo na monitoração de fluxos em redes IEEE 802.11. Demonstraremos que o mecanismo de pares de pacote permite monitorar, no nível da aplicação, as alterações na taxa de transmissão executadas pelo mecanismo ARC e, além disso, permite também inferir a vazão máxima da rede.

A Figura 4 apresenta um experimento em que os pares de pacotes são enviados do servidor para a unidade móvel enquanto a unidade móvel é deslocada dentro da área de cobertura do ponto de acesso. Apresentam-se duas informações: os IEPs e a qualidade do sinal, sendo esta última medida no instante de recebimento do par de pacotes, conforme os métodos descritos em [da Conceição and Kon 2006]. A qualidade do sinal é apresentada a fim de denotar o deslocamento da unidade móvel em relação ao ponto de acesso — quanto maior a força do sinal, menor a distância para o ponto de acesso e vice-versa. Desse experimento derivam duas observações importantes: que o valor dos IEPs se concentra em patamares (o primeiro patamar entre 1 e 2ms e o segundo em torno de 5ms) e que existe forte correlação entre os patamares e a qualidade do sinal.

A distribuição dos IEPs em patamares ocorre devido à atuação do mecanismo de ARC, que diminui a taxa de transmissão quando a qualidade da transmissão se deteriora. O patamar inferior corresponde à taxa de transmissão de 11 Mbps e o segundo patamar, à taxa de 5,5 Mbps.

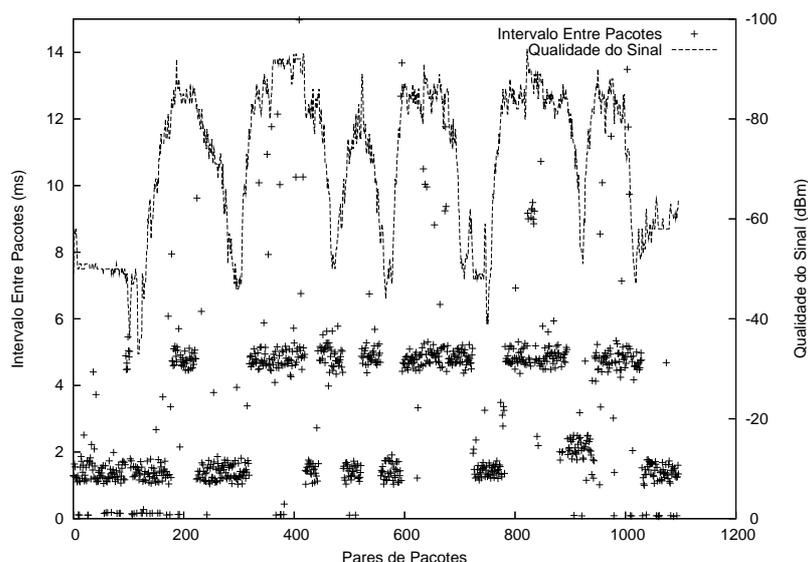


Figura 4. Comportamento dos IEPs mediante mobilidade (pacotes de 1000 octetos).

A correlação entre os patamares e a qualidade do sinal, porém, é indireta. Segundo [Haratcherev et al. 2005], as métricas usadas pelo mecanismo de ARC para decidir alterar a taxa de transmissão baseiam-se em estatísticas sobre a qualidade da transmissão e da recepção, como a taxa de perda de quadros (*Frame Error Rate*), a taxa de erros (*Bit Error Rate*), taxa de mensagens ACK perdidas, vazão etc.; e não na qualidade do sinal. Esta é apenas uma métrica de adaptação auxiliar, pois, devido a sua alta variabilidade, é difícil estabelecer uma relação entre o valor da qualidade do sinal e a respectiva taxa ótima de transmissão. Além disso, diferentes interfaces IEEE 802.11 podem oferecer diferentes valores para a qualidade do sinal, pois as interfaces não oferecem valores calibrados para a qualidade do sinal (*Signal Strength Indication* ou SSI). Observe ainda que, para decidir qual modulação usar, o transmissor precisaria saber a qualidade de sinal medida no receptor. A troca de informações entre receptores e transmissores sobre a qualidade do sinal faz parte da especificação IEEE 802.11h (*Dynamic channel selection and transmission power control*), mas essa especificação aplica-se apenas às redes IEEE 802.11a e, ao que parece, não foi amplamente adotada por implicar adicionais trocas de mensagens de sinalização.

5.1. Aplicação 1: monitoração das alterações na taxa de transmissão

Em função dos IEPs podem-se inferir as alterações na taxa de transmissão efetuadas pelos mecanismos de ARC; para isso é preciso determinar os patamares e a qual deles o IEP observado pertence. A Figura 5 apresenta a distribuição dos IEPs referentes ao experimento da Figura 4. O gráfico ilustra que os patamares são suficientemente bem definidos para se projetar um algoritmo capaz de, em função dos IEPs, inferir a taxa de transmissão. Na verdade, mais importante do que inferir a taxa de transmissão, é definir se ela foi reduzida, ou seja, se os IEPs pertencem ou não ao primeiro patamar de recepção. Se os IEPs não pertencem ao primeiro patamar, significa que o mecanismo de ARC identificou problemas na conexão.

No experimento apresentado na Figura 4, o valor médio dos IEPs “pertinentes”

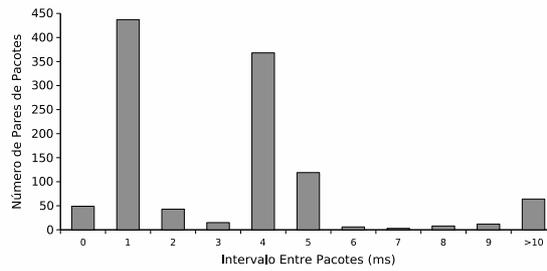


Figura 5. Distribuição dos IEPs.

ao primeiro patamar, aqueles abaixo de 4ms, é de 1,43ms (desvio padrão³ de 0,61). A partir dessas medidas, que determinam o primeiro patamar, podemos definir uma heurística para encontrar um valor de corte α , tal que um IEP é dito pertencente ao primeiro patamar se o seu valor for menor ou igual a α .

Definimos α como sendo igual ao valor do IEP médio mais duas vezes o valor do desvio padrão; no nosso exemplo, $\alpha = 2,65\text{ms}$. Desse modo, a heurística infere a alteração da taxa de transmissão comparando o valor dos IEPs ao valor de α : se $IEP > \alpha$, então consideramos que a taxa de transmissão foi reduzida pelo mecanismo de ARC; senão, consideramos que não houve alteração. Para garantir a estabilidade das inferências (histerese), levamos em conta três comparações consecutivas, ou seja, consideramos que a taxa de transmissão foi reduzida quando são observados três IEPs consecutivos maiores do que α e consideramos que a taxa de transmissão foi restabelecida quando são observados três IEPs consecutivos menores ou iguais a α . A Figura 6 mostra os resultados obtidos pela nossa estratégia; observe que os cortes foram precisos.

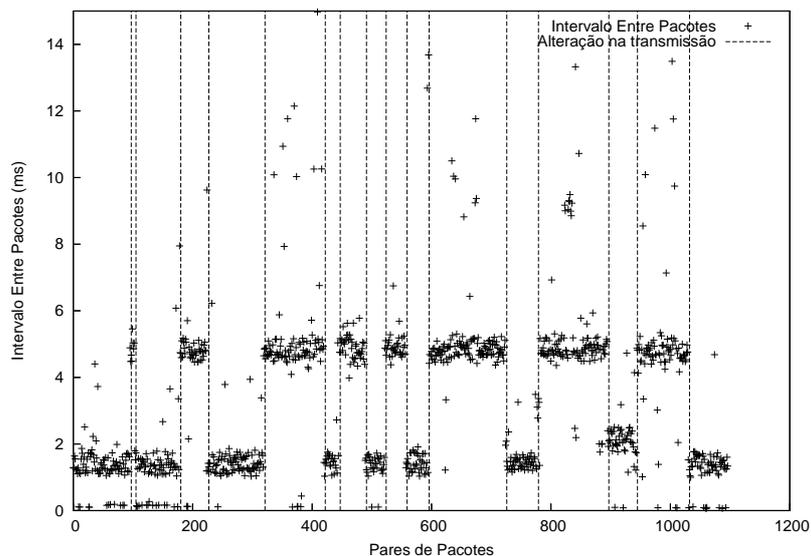


Figura 6. Resultados da estratégia para determinação das alterações na taxa de transmissão.

³O histograma de distribuição apresentado na Figura 5 mostra que a distribuição dos IEPs não é uma distribuição normal. Apesar disso, usamos a medida de desvio padrão devido ao fato de que as distribuições para cada patamar assemelham-se a uma distribuição normal.

Resta dizer que, em nossos experimentos, não notamos a interferência do mecanismo de pares de pacotes na qualidade das transmissões. Ao comparar fluxos com e sem pares de pacotes, não observamos quaisquer alterações nas taxas de perdas de pacotes, nem nas características dos fluxos, exceto, é claro, a entrega consecutiva dos pacotes pertencentes ao par de pacotes.

5.2. Aplicação 2: inferência da capacidade máxima da rede

Além de monitorar as ações dos mecanismos de ARC, o valor médio dos IEPs pode ainda ser usado para calcular uma aproximação da capacidade máxima de vazão da rede. De maneira simplificada, a carga máxima da rede, em Mbps, pode ser estimada através da seguinte fórmula:

$$Carga = (8 * (TamanhoDoPacote)) / (IEP * 1000),$$

onde *TamanhoDoPacote* é o tamanho do pacote em número de octetos e IEP é o valor médio do IEP em milissegundos.

Aplicando-se a fórmula ao nosso exemplo, em que *TamanhoDoPacote* = 1.000 e *IEP* = 1,43, a estimativa para a vazão máxima comportada pelo ambiente é de 5,59 Mbps. Segundo medições realizadas usando a ferramenta *Netperf*, a capacidade do ambiente 802.11 utilizado é de 5,6 Mbps; ou seja, a estimativa baseada na medição dos IEPs gerou uma aproximação muito boa para a capacidade real do ambiente. Obviamente, existem outros fatores que poderiam ser considerados para aumentar a precisão da estimativa, como as sobrecargas de transmissão dos cabeçalhos e a variabilidade das amostras, mas este modelo, apesar de simples, gerou uma ótima estimativa.

A mesma estratégia pode ser usada para estimar a capacidade da rede para o segundo patamar. Em nosso exemplo, o IEP médio do segundo patamar (IEPs maiores do que 2,65ms) é de 4,91ms. Aplicando-se a fórmula definida acima, obtém-se uma capacidade máxima de 1,63 Mbps para o segundo patamar. Essa informação é importante para o projeto de aplicações para ambientes de rede IEEE 802.11, pois nestas redes, diferentemente das redes *Ethernet*, os mecanismos de ARC podem reduzir a taxa de transmissão sem qualquer notificação aos protocolos de nível superior ou à aplicação.

As aplicações para redes IEEE 802.11 devem ser capazes de adaptar-se a reduções bruscas nos níveis de vazão. Uma aplicação de *video streaming* executada em um ambiente IEEE 802.11b pode, por exemplo, transmitir o vídeo a aproximadamente 5,6 Mbps de taxa real de transmissão, mas essa capacidade de vazão pode ser subitamente reduzida, pela ação do mecanismo de ARC, para aproximadamente 1,63 Mbps.

Se as aplicações executadas sobre redes IEEE 802.11 não forem capazes de se adequar rapidamente às reduções na vazão, não apenas suas funcionalidades podem ser afetadas, mas também a rede como um todo. Nas redes IEEE 802.11, diferentemente de algumas outras tecnologias sem fio, exceder a capacidade de vazão afeta negativa e diretamente todos os usuários do ambiente sem fio [da Conceição and Kon 2003], pois a capacidade de transmissão é compartilhada entre todos os usuários. Portanto, é importante que as aplicações para redes IEEE 802.11 sejam capazes de monitorar a vazão real a que estão submetidas — e o mecanismo de pares de pacotes é uma alternativa para a implementação desse requisito.

6. Limitações do mecanismo de pares de pacotes

A implementação do mecanismo de pares de pacotes requer certos cuidados e possui algumas limitações. O principal deles é o de enviar os pacotes do par um imediatamente após o outro, ou seja, sem atividades adicionais entre essas tarefas; o mesmo procedimento se aplica à recepção dos pacotes.

Outra precaução refere-se à resolução do relógio do sistema; se essa resolução é baixa, por exemplo da ordem de milissegundos, a acuidade da medição dos IEPs fica muito reduzida. Nas aplicações escritas na linguagem Java, por exemplo, ao invés do método-padrão de marcação de tempo `System.currentTimeMillis()`, cuja resolução é da ordem de milissegundos, deve-se usar o método `System.nanoTime()`, cuja resolução é maior e, desse modo, permite que sejam feitas avaliações mais precisas dos IEPs.

A principal limitação para o uso do mecanismo de pares de pacotes é o tamanho dos pacotes. Eles devem ser suficientemente grandes, para gerar variações significativas no valor dos IEPs, mas não devem ultrapassar os limites de fragmentação das camadas de rede. Na camada MAC de IEEE 802.11, o tamanho máximo de um quadro de transmissão é 4.096 octetos. Alguns fabricantes, porém, definem o limiar de fragmentação (*Fragmentation Threshold*) em 1.472 octetos (o valor-padrão, segundo o protocolo, é de 2.346 octetos); de modo tal que o limite de fragmentação das redes Ethernet, que é de 1.500 octetos, também seja atendido [Gast 2002]. A diferença de 28 octetos entre 1.472 e 1.500 octetos é para conter os cabeçalhos dos protocolos IP e UDP que, juntos, somam 28 octetos. Em suma, o tamanho dos pacotes não deve ultrapassar 1.472 octetos, pois isso implicaria fragmentações, desfragmentações e mensagens ACK adicionais que reduziriam a acuidade dos IEPs.

Certas aplicações, entretanto, usam pacotes bem menores do que 1.472 octetos, ou mesmo do que os 1.000 octetos que usamos em nossos experimentos. A aplicação Skype, por exemplo, usa pacotes UDP de 67 octetos [Baset and Schulzrinne 2004] para a transmissão de voz (VoIP). Ao usar pacotes pequenos, o tempo de transmissão dos dados (a transmissão de fato) pode ser inferior à sobrecarga inerente à camada MAC de IEEE 802.11, dificultando assim a formação de patamares claros na distribuição dos IEPs. Essa sobrecarga inclui os tempos de espera SIFS e DIFS, o tempo de *backoff*, a transmissão dos cabeçalhos e o tempo de transmissão da mensagem de ACK [Gast 2002]. Em redes IEEE 802.11b operando a 11 Mbps, a sobrecarga total alcança em média 0,84ms [Garg and Kappes 2003], podendo chegar a 1,6ms quando operando a taxas menores de transmissão [Arranz et al. 2001]. Por outro lado, o tempo para transmissão de um pacote UDP com carga útil de 67 octetos é de aproximadamente 0,043ms a 11 Mbps e de 0,085ms a 5,5 Mbps. Portanto, a sobrecarga pode ser facilmente o fator dominante no tempo total da transmissão dos pares de pacotes e, conseqüentemente, do valor dos IEPs.

A Figura 7 mostra um experimento em que foram usados pacotes UDP de 67 octetos. A variação nos IEPs é menor, não há a formação clara de múltiplos patamares. O valor médio do IEP é de aproximadamente 0,8ms, mas é difícil definir a ocorrência do segundo patamar. Isso ocorre também porque, para pacotes pequenos, as taxas de erros são menores e, desse modo, a atuação do mecanismo de ARC é menos necessária — lembre-se que a atuação do ARC baseia-se principalmente na perda de pacotes, quadros e mensagens, e não na qualidade do sinal. Sem atuação do ARC, não há alteração das taxas de transmissão, nem formação de patamares. Desse modo, os pares de pacotes devem ser

utilizados com pacotes grandes apenas; no entanto; essa restrição não invalida a aplicação da técnica, pois os problemas concentram-se justamente nas aplicações que utilizam pacotes grandes. Em outras palavras, podemos não cobrir a maioria das aplicações, mas cobrimos a maioria dos problemas.

devem ser utilizados apenas com pacotes grandes, podemos reforçar essa afirmação nas conclusões. Todavia, não acreditamos que essa seja uma restrição, pois os problemas concentram-se nas aplicações que utilizam pacotes grandes. Ou seja, podemos não cobrir a maioria das aplicações, mas cobrimos a maioria dos problemas.

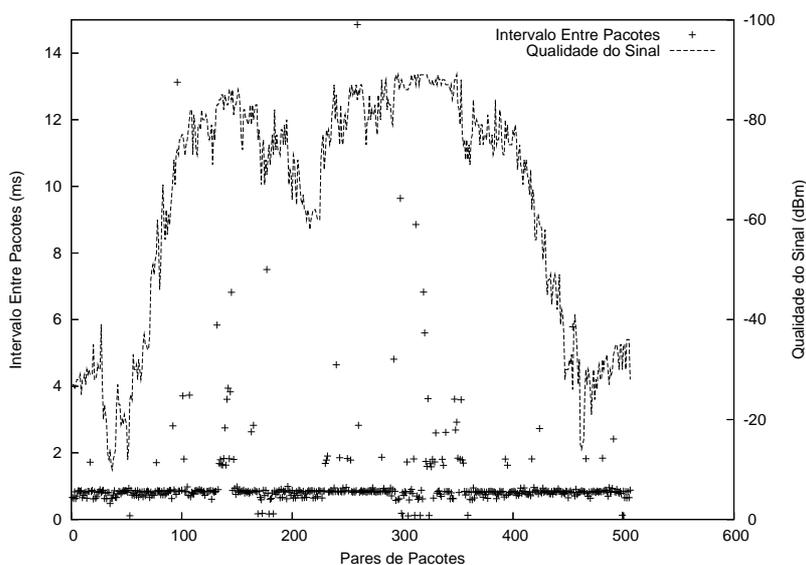


Figura 7. Comportamento dos IEPs mediante mobilidade (pacotes de 67 octetos).

Ainda sobre o tamanho dos pacotes, resta dizer que o tempo para transmissão dos dados começa a dominar o tempo total da transmissão, sobrepujando as sobrecargas, quando o tamanho dos pacotes atinge cerca de 1.000 octetos, consumindo cerca de 0,715ms a 11 Mbps.

Outra limitação para o uso do mecanismo de pares de pacotes decorre da diferença de comportamento entre interfaces IEEE 802.11 de diferentes fabricantes e da compatibilidade entre elas. O mecanismo de pares de pacotes pode não ter exatamente o mesmo comportamento ao se usar interfaces de diferentes modelos e fabricantes; as diferenças podem ser sutis, como as decorrentes da diferença entre os algoritmos propostos por cada fabricante para o mecanismo de ARC, mas também podem inviabilizar o uso do mecanismo de pares de pacotes; por exemplo, em nossos experimentos não conseguimos observar a atuação do mecanismo de ARC ao usar a interface Linksys, modelo WPC54G, e o ponto de acesso Samsung, modelo SWL-4000 AP. Aparentemente, apenas conexões de 11 Mbps podem ser estabelecidas entre esses dois produtos. Contudo, acreditamos que, com a evolução dos dispositivos, esses problemas serão mitigados, pois a cada versão os dispositivos IEEE 802.11 têm melhorado sensivelmente, tanto em compatibilidade, quanto em desempenho.

7. Conclusões

Neste trabalho, avaliamos empiricamente o comportamento do mecanismo de pares de pacotes em redes IEEE 802.11b e, principalmente, mostramos que ele pode ser usado para monitorar, no nível da aplicação, as alterações na taxa de transmissão feitas pelo mecanismo ARC; a estratégia apresentada foi capaz de determinar com precisão essas alterações. Além disso, mostramos que o mecanismo de pares de pacotes pode ser usado para inferir a capacidade de vazão das redes IEEE 802.11.

Apesar da importância das informações sobre capacidade de vazão e taxa efetiva de conexão para o projeto de aplicações, não temos conhecimento de trabalhos que disponibilizem essas informações para as camadas de aplicação. Somadas às métricas de adaptação tradicionais, as informações fornecidas pelos pares de pacotes podem resultar em estratégias adaptativas mais adequadas para as redes IEEE 802.11. Além disso, para certas aplicações, como as de transmissão de vídeo, o mecanismo pode ser implementado com pouco ou nenhum prejuízo aos requisitos da aplicação; inclusive sem a adição de novas mensagens de controle.

Portanto, o mecanismo de pares de pacotes pode, a baixo custo computacional, melhorar a interpretação das métricas de adaptação, contribuindo assim para o projeto de aplicações cada vez mais adequadas aos novos desafios impostos pelas redes sem fio. Em nossos trabalhos futuros, continuaremos buscando novas métricas e estratégias de adaptação para as redes IEEE 802.11.

Referências

- Arranz, M., Agüero, R., Muñoz, L., and Mähönen, P. (2001). Behavior of UDP-based applications over IEEE 802.11 wireless networks. In *12th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, volume 2, pages F72–F77, San Diego, USA.
- Baset, S. A. and Schulzrinne, H. (2004). An analysis of the Skype peer-to-peer Internet telephony protocol. Technical Report CUCS-039-04, Department of Computer Science, University of Columbia, New York, USA.
- Bolot, J.-C. (1993). Characterizing end-to-end packet delay and loss in the internet. *Journal of High Speed Networks*, 2(3):305–323.
- da Conceição, A. F. and Kon, F. (2003). Adaptação de fluxos contínuos UDP sobre redes IEEE 802.11b. In *V Workshop de comunicação sem fio e computação móvel (WCSF)*, pages 91–101, São Lourenço-MG, Brazil.
- da Conceição, A. F. and Kon, F. (2004). O uso do mecanismo de pares de pacotes sobre redes IEEE 802.11b. Technical Report RT-MAC-2004-08, Departamento de Ciência da Computação, IME-USP, São Paulo, Brazil.
- da Conceição, A. F. and Kon, F. (2006). Desenvolvimento de aplicações adaptativas para redes IEEE 802.11. In *24th Brazilian Symposium on Computer Networks (SBRC)*, Curitiba-PR, Brazil.
- Dovrolis, C., Ramanathan, P., and Moore, D. (2004). Packet-dispersion techniques and a capacity-estimation methodology. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 12(6):963–977.

- Garg, S. and Kappes, M. (2003). An experimental study of throughput for UDP and VoIP traffic in IEEE 802.11b networks. In *IEEE Wireless Communications and Network Conference (WCNC)*, pages 1748–1753, New Orleans, USA.
- Gast, M. S. (2002). *802.11 Wireless Networks. The definitive guide*. O'Reilly Media.
- Haratcherev, I., Taal, J., Langendoen, K., Lagendijk, R., and Sips, H. (2005). Automatic IEEE 802.11 rate control for streaming applications. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 5:421–427. Special issue on Radio Link and Transport Protocol Engineering for Future-Generation Wireless Mobile Data Networks.
- Heusse, M., Rousseau, F., Berger-Sabbatel, G., and Duda, A. (2003). Performance anomaly of 802.11b. In *22nd Conference on Computer Communications (INFOCOM)*, volume 2, pages 836–843, San Francisco, USA.
- IEEE Working Group for WLAN Standards (2003). IEEE 802.11g: Further Higher Data Rate Extension in the 2.4 GHz Band.
- Ikkurthy, P. and Labrador, M. A. (2002). Characterization of MPEG-4 traffic over IEEE 802.11b wireless LANs. In *Annual IEEE Conference on Local Computer Networks (LCN)*, volume 27, pages 421–430, Tampa, USA.
- Jacobson, V. (1988). Congestion avoidance and control. In *Proceedings of the Conference of the Special Interest Group on Data Communication (ACM SIGCOMM)*, Stanford, USA.
- Keshav, S. (1991a). *Congestion Control in Computer Networks*. PhD thesis, Department of Electrical Engineering and Computer Science, University of California, Berkeley, USA. Published as UC Berkeley TR-654.
- Keshav, S. (1991b). A control-theoretic approach to flow control. In *Proceedings of the Conference of the Special Interest Group on Data Communication (ACM SIGCOMM)*, pages 3–15, Zürich, Switzerland.
- Keshav, S. (1994). Packet-pair flow control. <http://www.cs.cornell.edu/skeshav/doc/94/2-17.ps>.
- Kotz, D., Newport, C., and Elliott, C. (2003). The mistaken axioms of wireless-network research. Technical Report TR2003-467, Dartmouth College Computer Science, Hanover, USA.
- Kotz, D., Newport, C., Gray, R. S., Liu, J., Yuan, U., and Elliott, C. (2004). Experimental evaluation of wireless simulation assumptions. In *7th ACM International Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWiM)*, pages 78–82, Venezia, Italy.
- Roesler, V., Finsch, P. M., de Andrade, M., and Lima, J. V. (2003). Análise do mecanismo de pares de pacotes visando estimar a banda da rede via UDP. In *21st Brazilian Symposium on Computer Networks (SBRC)*, Natal-RN, Brazil.
- Schulzrinne, H., Casner, S., Frederick, R., and Jacobson, V. (2003). RTP: A Transport Protocol for Real-Time Applications. RFC 3550.
- Tan, G. and Guttag, J. (2005). The 802.11 MAC protocol leads to inefficient equilibria. In *24th Conference on Computer Communications (INFOCOM)*, Miami, USA.