

# Adaptação Automática de Taxa em Redes 802.11 Densas\*

Kleber Vieira Cardoso<sup>1</sup>, José Ferreira de Rezende<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Grupo de Teleinformática e Automação (GTA)  
COPPE – Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)  
Caixa Postal 68.504 – 21.945-970 – Rio de Janeiro – RJ – Brasil

{kleber, rezende}@gta.ufrj.br

**Abstract.** *This paper presents an evaluation of automatic rate adaptation algorithms in IEEE 802.11 networks under severe contention for media access. In this sort of scenario, the mechanisms evaluated in this paper present low performance and the other ones proposed in the literature demand modifications of the standard or face restrictions related to the support offered by the commercial hardwares. In this context, a new automatic rate control mechanism is proposed and evaluated. It is shown that the new mechanism is simple and easy to implement in devices that follow the standard.*

**Resumo.** *Este artigo apresenta uma avaliação de algoritmos de adaptação automática de taxa em redes IEEE 802.11 sob condições de intensa disputa pelo acesso ao meio. Neste tipo de cenário, os mecanismos avaliados no artigo apresentam baixo desempenho e os demais mecanismos propostos na literatura exigem modificações ao padrão ou enfrentam restrições com relação ao suporte fornecido pelos hardwares comerciais. Nesse contexto, um novo mecanismo de controle automático de taxa é proposto e avaliado, sendo ele simples e facilmente implementável em dispositivos que seguem o padrão.*

## 1. Introdução

O uso de redes sem fio vem se tornando cada vez mais freqüente e o IEEE 802.11 é o padrão escolhido pela maioria dos dispositivos. Além dos computadores fixos e portáteis, vários outros equipamentos já possuem interfaces desta tecnologia, como por exemplo, impressoras, câmeras, dispositivos de armazenamento, celulares, etc.. Isso faz com que seja comum encontrar cenários com um grande número de dispositivos disputando o acesso ao meio, formando redes densas. Em muitos casos, não apenas uma, mas várias redes ou pares de comunicação disputam o canal. Nessas condições, mecanismos que façam uso otimizado da banda disponível são fundamentais para oferecer maior qualidade às aplicações. Um desses mecanismos é o que realiza a seleção automática da taxa de transmissão dos quadros de dados.

O padrão deixa livre para cada fabricante a definição de um algoritmo para seleção das taxas de transmissão, possibilitando que novas propostas venham a ser incorporadas aos dispositivos. Porém, a escolha da taxa de transmissão apresenta dificuldades pois precisa levar em consideração as condições do canal que podem variar de forma significativa ao longo do tempo. O que importa na escolha da taxa de transmissão é a qualidade do sinal

---

\*Este trabalho recebeu recursos da CAPES, CNPq, FAPERJ, FINEP e RNP

percebida pelo receptor a cada recepção de um quadro. No entanto, nas redes 802.11b(g), o padrão não provê recursos para que o transmissor disponha dessas informações.

Há vários algoritmos para adaptação de taxa em redes 802.11 [Holland et al. 2001, Sadeghi et al. 2005, Lacage et al. 2004, Bicket 2005, Kim et al. 2006a, Wong et al. 2006, cheng Chen et al. 2007, Judd et al. 2007], porém apenas dois têm sido amplamente referenciados por estarem em operação em dispositivos comerciais [Kammerman and Monteban 1997, Bicket 2005]<sup>1</sup>. Apesar da quantidade de algoritmos, há ainda espaço para melhorias, uma vez que não há uma solução ótima que atenda a todas as situações, dado o comportamento estocástico do canal e a escassez de informações disponíveis ao transmissor através da interface de rede. Além disso, a maioria das propostas apresentadas até o momento não leva em consideração as limitações impostas pelo *hardware*, apresentando resultados insatisfatórios quando efetivamente implementadas [Ramachandran et al. 2007]. Algumas propostas exigem ainda alterações aos padrões IEEE, o que dificulta a adoção das mesmas.

Nesse artigo, abordamos o problema da necessidade de diferenciação entre perdas causadas por qualidade do enlace e por colisão, comuns em redes densas. Perdas por colisão não deveriam afetar a escolha da taxa, ao contrário de perdas por degradação do sinal. Para lidar com esse problema é proposto um algoritmo que identifica o nível de ocupação do canal e, portanto, quando há maior probabilidade de perdas por colisão. Diferente de outros trabalhos que abordam o mesmo problema, o mecanismo proposto não exige alterações ao padrão IEEE 802.11 e leva em consideração restrições do *hardware*, permitindo sua fácil implementação em ambientes reais.

Este artigo obedece a seguinte organização. Na Seção 2, os algoritmos de adaptação automática de taxa são classificados, alguns mecanismos mais importantes são apresentados e suas limitações são comentadas. Nessa seção, são abordados também os problemas que mais afetam o desempenho dos mecanismos. Na Seção 3, é proposto um novo algoritmo que lida com o problema de redes densas. A Seção 4 apresenta os resultados de desempenho do novo algoritmo, comparando-os com os obtidos por outros algoritmos. Na Seção 5, o artigo é concluído e a continuidade do trabalho é descrita.

## 2. Algoritmos para controle automático de taxa

O padrão IEEE 802.11 exige que as interfaces suportem múltiplas taxas de transmissão na camada física, as quais são obtidas a partir de diferentes combinações de técnicas de modulação e taxas de codificação. Por exemplo, 802.11b deve suportar 4 taxas de transmissão (1, 2, 5.5 e 11 Mbps), enquanto 802.11g deve suportar 8 taxas adicionais (6, 9, 12, 18, 24, 36, 48 e 54 Mbps). Teoricamente, quanto mais baixa a taxa de transmissão, mais imune a ruído é a transmissão feita usando essa taxa. Dito de outra forma, numa taxa mais robusta a ruído, o receptor consegue decodificar quadros com uma menor relação sinal-ruído (SINR - *Signal to Interference-plus-Noise Ratio*). Ou ainda, duas taxas de transmissão diferentes apresentam probabilidades de perda de quadro distintas em função da mesma relação sinal-ruído. Em uma situação ideal, a adaptação de 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 a cada quadro. A qualidade do canal pode variar de forma significativa em curtas escalas de tempos devido

---

<sup>1</sup>É possível que outros algoritmos estejam sendo usados, mas não são citados por questões de sigilo.

a diferentes fatores, tais como: multi-percurso do sinal, mobilidade dos nós, mobilidade de obstáculos entre os nós comunicantes, sinais interferentes intra ou inter canal originados por dispositivos da mesma tecnologia ou por equipamentos de outras tecnologias na mesma banda (*Bluetooth* ou telefones sem fio, por exemplo), dentre outros. Os algoritmos de adaptação de taxa utilizam diferentes abordagens para lidar com a alta variabilidade do enlace, geralmente tentando maximizar a vazão oferecida às camadas superiores.

Os padrões 802.11b e .11g não prevêem nenhum recurso para que o receptor informe ao transmissor a qualidade que está observando do canal, mais especificamente qual a SINR que está percebendo ao receber os quadros. Uma vez que não há informação explícita sobre a situação do enlace visto pelo receptor, muitos algoritmos têm-se baseado apenas nas perdas detectadas pelo transmissor (não-recebimento de ACK) para tomar uma decisão [Kamerman and Monteban 1997, Lacage et al. 2004, Bicket 2005, Kim et al. 2006a, Wong et al. 2006], sendo chamados de mecanismos de malha aberta. No entanto, alguns mecanismos tentam contornar essa limitação [Holland et al. 2001, Cheng Chen et al. 2007, Judd et al. 2007], sendo classificados como de malha fechada. A abordagem utilizada por essa classe de algoritmos consiste em alterar os quadros da camada MAC, ou incluir novos quadros, para transportar a informação, o que apresenta dois problemas. Primeiro, a alteração das regras estabelecidas pelo padrão IEEE, inviabilizando sua adoção pelos fabricantes. Segundo, para funcionar efetivamente é necessário que o par de interfaces comunicantes implemente o mesmo mecanismo, impedindo seu emprego em ambientes com heterogeneidade de soluções.

Uma abordagem diferente [Judd et al. 2007] é assumir que o enlace é simétrico e realizar medições no transmissor. Ou seja, é uma solução em malha aberta, mas inferindo informações sobre o canal. As medições da SINR podem usar apenas os ACKs ou quadros de dados e/ou os demais quadros de controle. Porém, duas características das redes 802.11 levam esses mecanismos a terem um baixo desempenho. É muito comum encontrar enlaces 802.11 assimétricos [Yarvis et al. 2005, Kurth et al. 2006] e os ACKs, por terem tamanhos bem inferiores ao tamanho dos dados no outro sentido, podem levar a medições incorretas. Os algoritmos que tentam utilizar a qualidade do canal precisam ainda aplicar algum tipo de amortecimento aos valores instantâneos, pois os mesmos podem apresentar variações significativas em curtas escalas de tempo [Wong et al. 2006]. E por fim, esse tipo de algoritmo precisa também identificar a correlação adequada entre a SINR e a probabilidade de perda para cada taxa, a fim de permitir a escolha da taxa mais alta que forneça uma probabilidade de perda inferior a um valor pré-estabelecido. Essa correlação é dependente das características do *hardware* do receptor [Aguayo et al. 2004].

O primeiro trabalho publicado sobre adaptação de taxa em redes 802.11 foi o ARF (*Auto Rate Fallback*), tendo sido proposto originalmente para a tecnologia WaveLAN-II [Kamerman and Monteban 1997]. Alguns trabalhos na literatura [Sadeghi et al. 2005, Kim et al. 2006a, Kim et al. 2006b] afirmam que esse algoritmo, ou variantes dele, seria usado em vários dispositivos comerciais. Basicamente, o ARF consiste em aumentar a taxa quando 10 ACKs consecutivos são recebidos e diminuir quando há duas perdas em sequência ou uma perda logo após uma elevação de taxa. Essa abordagem simplista cria duas deficiências antagônicas. Por um lado, o algoritmo é muito conservador, pois abaixa a taxa ao observar apenas duas perdas consecutivas. Foi mostrado em [Wong et al. 2006] que há uma probabilidade alta de ocorrer duas perdas seguidas em qualquer taxa. Por ou-

tro lado, é muito agressivo, porque o ARF insiste em subir freqüentemente a taxa (a cada 10 ACKs), ainda que exista um longo histórico de insucessos nas tentativas. Cada nova tentativa pode ter um atraso maior, devido ao aumento da janela de sorteio do *backoff*, o qual será comentado em mais detalhe na Seção 3.

Outro algoritmo importante na literatura é o *SampleRate* [Bicket 2005], o qual é o mecanismo padrão de um *driver* parcialmente<sup>2</sup> aberto [MadWifi 2007]. O *SampleRate* é um mecanismo que tenta monitorar o atraso médio de transmissão em cada taxa, escolhendo aquela com menor atraso, ou seja, maior vazão. Com base em medições realizadas, o algoritmo foi concebido para não apenas aumentar ou diminuir a taxa quando percebe uma melhora ou piora do enlace, respectivamente. O mecanismo assume que eventualmente uma taxa mais alta pode ser melhor que a atual, mesmo quando a atual começa a observar uma degradação do canal. Essa idéia está fundamentada no conceito de que as diferentes combinações de modulação e taxa de codificação usadas em redes 802.11 não apresentam uma relação de robustez idêntica para todos os tipos de problemas encontradas em um canal sem fio. Ou seja, dependendo do tipo de interferência que está sendo observado, transmitir a 11 Mbps pode ser melhor do que a 5.5 Mbps. Além disso, o foco está na vazão e, portanto, perdas são toleradas desde que não a afetem. Por exemplo, uma taxa de 5.5 Mbps com 10% de perda ainda é melhor do que uma taxa de 2 Mbps sem perdas. O *SampleRate* apresenta bons resultados em vários cenários, porém já foi mostrado que ele não lida bem com mobilidade dos nós comunicantes [Wong et al. 2006, Judd et al. 2007] e com o problema do terminal escondido [Wong et al. 2006]. Nesse trabalho, verificamos que o *SampleRate* também não tem bom desempenho em redes densas, confirmando o resultado obtido em [Ramachandran et al. 2007]. De fato, mobilidade, terminal escondido e redes densas são os principais desafios dos algoritmos de adaptação de taxa, portanto, descreveremos melhor esses problemas nas subseções seguintes.

## 2.1. Mobilidade e terminal escondido

A mobilidade dos nós sem fio pode mudar as características de um enlace de forma significativa, causando grande impacto na SINR percebida. As alterações no canal podem ser didaticamente separadas em duas categorias: desvanecimento de larga escala e de curta escala [Rappaport 2001]. O desvanecimento de larga escala caracteriza a potência do sinal ao longo de grandes distâncias entre o transmissor e o receptor. Para a maior parte das aplicações de redes 802.11, as quais não envolvem velocidades altas, esse tipo de desvanecimento não representa problema para os mecanismos de controle automático de taxa. O desvanecimento de curta escala caracteriza flutuações rápidas na potência do sinal recebido, as quais ocorrem durante movimentos a curtas distâncias ou por durações curtas de tempo. Essas flutuações criam breves oportunidades para transmissão (ideal) em cada taxa. Conseguir detectar e utilizar de forma eficiente essas oportunidades pode ser considerado um problema ainda em aberto para algoritmos de adaptação de taxa. Ainda que existam propostas como o OAR (*Opportunistic Auto-Rate*) [Sadeghi et al. 2005] e RAF (*Rate-Adaptive Framing*) [Cheng Chen et al. 2007], as mesmas esbarram em uma das três limitações citadas: restrições de *hardware* com relação ao suporte fornecido ao algoritmo, baixo desempenho ao considerar soluções heterogêneas ou violação do padrão IEEE.

---

<sup>2</sup>Operações básicas como sintonia de frequência de operação estão “protegidas” dentro de um binário chamado HAL (*Hardware Abstraction Layer*)

Outro problema que afeta o desempenho de algoritmos de adaptação de taxa é a presença de terminais escondidos, os quais podem provocar colisões de quadros no receptor. Em redes 802.11, o problema do terminal escondido pode ser resolvido com o uso de mensagens RTS/CTS previstas no padrão [802.11]. No entanto, quando as mesmas são usadas antes do envio de cada quadro de dados, há uma sobrecarga de controle que diminui de forma significativa a vazão da rede. Alguns mecanismos, como RBAR (*Receiver-Based AutoRate*) [Holland et al. 2001], CARA (*Collision-Aware Rate Adaptation*) [Kim et al. 2006a], OAR e RRAA, fazem uso de mensagens RTS/CTS, embora tentem minimizar o efeito da sobrecarga. Por exemplo, o OAR transmite mais de um quadro em seqüência quando está em taxas mais altas, enquanto o RRAA e CARA ativam e desativam dinamicamente o uso das mensagens RTS/CTS. Em especial, o RRAA é composto por duas implementações, sendo que uma delas utiliza as mensagens RTS/CTS como sondas para verificar se as perdas estão sendo provocadas por colisões com terminais escondidos ou por degradação do sinal no enlace. O RRAA obtém bons resultados ao lidar com um cenário com terminal escondido. Por outro lado, os autores não destacaram o fato do RRAA-BASIC (sem sondas RTS) ter desempenho melhor que o RRAA com RTS em todos os testes, exceto o do terminal escondido. Ou seja, esse algoritmo não consegue evitar a degradação de desempenho provocada pelo uso de RTS/CTS quando não há terminal escondido, mesmo utilizando um mecanismo adaptativo. Nesse contexto, consideramos que a adaptação de taxa sob a presença de terminais escondidos também é um problema que exige soluções mais eficientes.

## 2.2. Redes densas

Vários trabalhos têm abordado o problema de adaptação de taxa quando um grande número de estações competem pelo acesso ao meio [Sadeghi et al. 2005, Kim et al. 2006a, Choi et al. 2007, Cheng Chen et al. 2007, Ramachandran et al. 2007]. Esse é um problema cada vez mais comum em redes 802.11, dado o número crescente de dispositivos utilizando essa tecnologia. Basicamente, o que ocorre é um grande número de colisões quando há muitas estações tentando transmitir, sejam elas estações clientes tentando se comunicar com seus APs ou estações *ad hoc* trocando quadros diretamente entre elas. Considerando os algoritmos amplamente usados nas redes reais, ou seja, os do tipo malha aberta baseados em perda de quadros, a dificuldade está em identificar se uma perda ocorreu por colisão ou por degradação do sinal. Caso a qualidade do enlace entre um par de nós seja satisfatória, perdas de quadros não devem levar a taxas mais baixas, e sim, à permanência na taxa atual ou até mesmo à elevação da taxa. Em uma situação de congestionamento severo com boa qualidade de enlace, a melhor escolha é a taxa mais alta suportada, maximizando a vazão da rede.

As soluções propostas até o momento não foram implementadas com sucesso ou simplesmente não foram implementadas devido a limitações de *hardware* ou do próprio padrão. Por exemplo, uma implementação com comportamento aproximado ao algoritmo CARA [Kim et al. 2006a] foi introduzida no *driver* MadWiFi em [Ramachandran et al. 2007], tendo mostrado um desempenho muito inferior ao obtido no trabalho teórico. Os autores atribuem os resultados a questões de implementação, com destaque para o problema dos dispositivos nem sempre respeitarem o NAV (*Network Allocation Vector*) determinado pelo RTS/CTS, provocando colisões. Em [Wong et al. 2006], é relatado que o desempenho do RRAA degrada quando há mais de 8 estações ativas e que

os autores desconhecem algoritmos que consigam lidar adequadamente com o problema.

### 3. YARAA - Yet Another Rate Adaptation algorithm

O YARAA é um algoritmo baseado em vazão que herda características do *SampleRate* e adiciona novos recursos para tratar o problema do alto número de colisões encontrado em redes densas. Do *SampleRate*, o YARAA mantém a estimativa do atraso de transmissão e a capacidade de comutar entre taxas não adjacentes. São acrescentados o monitoramento do atraso de transmissão efetivo e o acompanhamento da taxa de transmissão mais alta que obteve sucesso em um passado recente.

Na Figura 1, é ilustrado o modo básico de operação de uma rede 802.11, também conhecido como DCF (*Distributed Coordination Function*), focando apenas na parte relevante para a adaptação de taxa. Como pode ser visto na figura, quando uma estação quer transmitir, ela monitora o meio de transmissão até encontrá-lo livre, então aguarda um tempo de DIFS (DCF *Inter-Frame Space*) mais um *backoff* sorteado dentro do intervalo da janela de contenção (CW - *Contention Window*). O contador do *backoff* é decrementado enquanto o meio está vazio, paralisado quando outras estações transmitem e retomado quando o meio se torna livre novamente. À medida que a quantidade de estações tentando enviar aumenta, cresce também o número de vezes que o contador é paralisado. Embora não seja exibido na figura, ao tentar transmitir, a **estação A** poderia ter seu quadro colidindo com o de outra estação e precisaria realizar outra tentativa, sorteando um novo *backoff*. A probabilidade de ocorrer uma colisão aumenta com o crescimento do número de estações disputando o meio, influenciando os algoritmos de adaptação de taxa que utilizam a perda de quadros como estimativa da qualidade do canal.

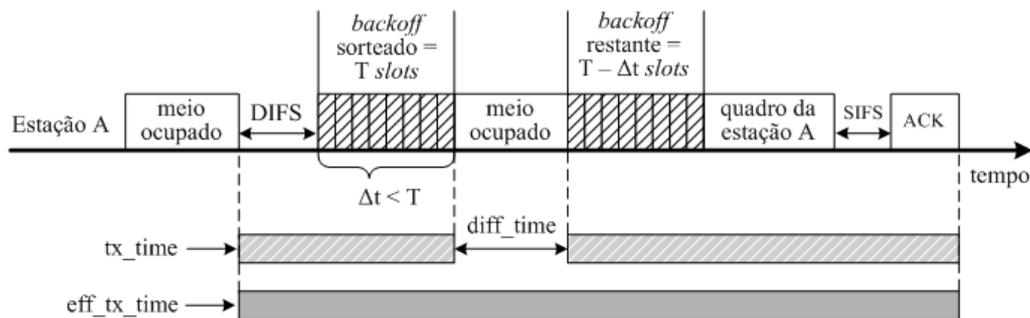


Figura 1. Modo de acesso básico de uma rede 802.11 (DCF).

Para realizar o cálculo da vazão, o YARAA utiliza o atraso de transmissão (**tx\_time** da Figura 1), o qual é obtido a partir da seguinte estimativa [Bicket 2005]:

$$tx\_time(b, r, n) = DIFS + \sum_{i=0}^r backoff(i) + (r+1) * (SIFS + ACK + header + (n * 8 / b))$$

onde **b** (*bit-rate*) corresponde à taxa de transmissão da camada física, **r** (*retries*) indica o número de tentativas de transmissão até o sucesso e **n** (*n-byte*) é o tamanho do quadro em *bytes*. O **backoff** assume o valor médio da janela de contenção dado o número de tentativas, onde o valor mínimo da janela é 32 *slots* e o valor máximo é de 1024 *slots*.

Padrão	Slot	DIFS	SIFS	ACK	header (cabeçalho)
802.11a	9 $\mu s$	34 $\mu s$	16 $\mu s$	header+14*8/b'	20 $\mu s$
802.11b	20 $\mu s$	50 $\mu s$	10 $\mu s$	header+14*8/b'	192 $\mu s$ (preâmbulo longo) ou 96 $\mu s$ (preâmb. curto)
802.11g (puro)	9 $\mu s$	28 $\mu s$	10 $\mu s$	header+14*8/b'	20 $\mu s$

**Tabela 1. Parâmetros de rede IEEE 802.11a/b/g.**

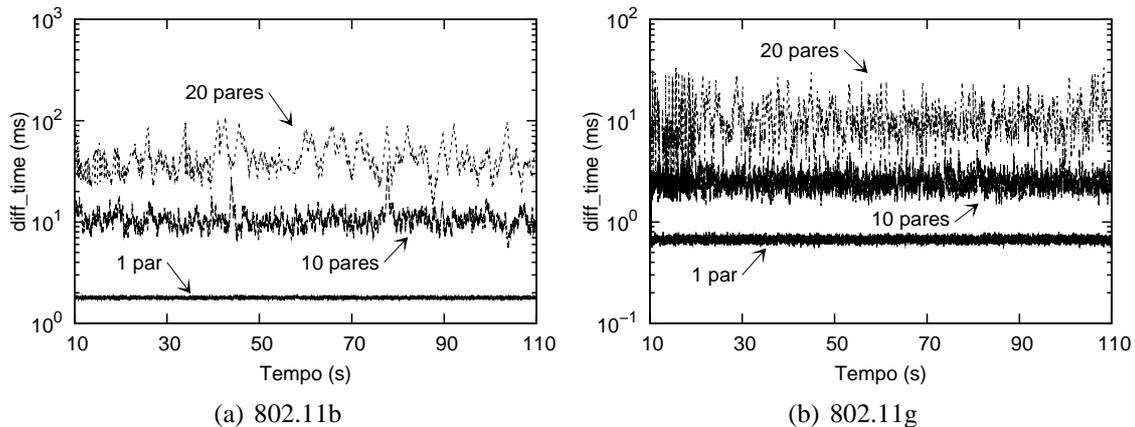
Os demais parâmetros são descritos na Tabela 1. A taxa **b'** de envio do ACK corresponde a um valor menor ou igual ao da taxa do quadro de dados correspondente [802.11 ].

O atraso de transmissão estimado (**tx\_time**) tem o intuito de medir o impacto das retransmissões na vazão. No entanto, ele não fornece o atraso de transmissão efetivo (**eff\_tx\_time**), uma vez que não é contabilizado o tempo que o contador do *backoff* fica parado em função de outras comunicações concorrentes. O cálculo do **tx\_time** permite que o algoritmo detecte perdas por degradação do canal, mas o torna incapaz de distingui-las de perdas por colisões. Desta forma, o YARAA calcula adicionalmente o atraso de transmissão efetivo (**eff\_tx\_time**), monitorando o tempo decorrido entre o momento em que o quadro chega à cabeça da fila e o instante em que o ACK (da camada MAC) retorna. Desses dois atrasos, é calculada a diferença: **diff\_time**.

Quando há poucas estações tentando transmitir, **tx\_time** é uma boa aproximação do atraso de transmissão efetivo. No entanto, com o aumento da concorrência pelo acesso ao meio há um aumento da divergência (**diff\_time**) entre ele e o atraso de transmissão efetivo, conforme ilustrado na Figura 2. O YARAA utiliza as variações em **diff\_time** para identificar o nível de disputa e definir quando há maior probabilidade de uma perda ser por colisão ou por degradação do sinal, minimizando comutações incorretas de taxa.

Na Figura 2, os valores de **diff\_time** foram obtidos a partir de diferentes níveis de disputa no acesso ao meio, utilizando uma quantidade crescente de pares de estações tentando transmitir. Por questão de legibilidade, são apresentados apenas os valores para 1, 10 e 20 pares, mas foram avaliados cenários com até 50 pares de estações. A partir de 20 pares, foi observado uma alta flutuação no valor de **diff\_time**, mas sem um aumento significativo da média. Nessa avaliação, todas as fontes de tráfego estavam em saturação, ou seja, sempre tinham dados a enviar. No entanto, **diff\_time** é monitorado para identificar o nível de disputa pelo acesso ao meio e não a quantidade de estações transmitindo. Ou seja, o número de estações que levam aos níveis de concorrência indicados na Figura 2 podem ser diferentes dos apresentados, caso as fontes não estejam transmitindo na saturação, mas isso não afeta o desempenho do YARAA. Além disso, como a diferença entre os atrasos é um valor relativo, o tamanho do quadro tem pouca influência sobre o algoritmo, conforme foi verificado durante a avaliação.

A Listagem 1 resume o funcionamento do YARAA. A configuração das variáveis **diff\_time\_lowThresh** e **diff\_time\_highThresh** teve como base os valores encontrados durante as medições de **diff\_time** (Figura 2). Em uma rede 802.11b, observou-se que, em situações de baixo congestionamento, **diff\_time** assume um valor médio de 2 ms, alcançando 40 ms quando há uma disputa intensa pelo meio. Em uma rede 802.11g, foram encontrados valores de 800  $\mu s$  e 10 ms para os dois casos extremos de concorrência pelo meio. Os valores instantâneos de atraso (**tx\_time** e **eff\_tx\_time**) não são usados,



**Figura 2. Diferença entre o atraso de transmissão estimado e o efetivo.**

mas sim as médias móveis ponderadas exponencialmente (*Exponentially Weighted Moving Average - EWMA*) de ambos. Esse procedimento é importante, pois existe uma alta variância nos valores instantâneos de atraso, a qual levaria à instabilidade do algoritmo.

Quando o YARAA detecta que o nível de concorrência pelo acesso ao meio está subindo, ele começa a aumentar a probabilidade de realizar tentativas na taxa de transmissão mais alta obtida em um passado recente. Esse passado varia de algumas dezenas de milissegundos a 60 segundos, dependendo da quantidade de tráfego gerada pela estação. Quanto maior o número de quadros enviados pela estação, mais acurada será a informação sobre todas as taxas, inclusive da taxa mais alta “recomendada”. Vale ressaltar que a taxa de transmissão mais alta não é necessariamente a maior de uma determinada tecnologia (por exemplo, 54 Mbps em 802.11g). Devido à qualidade do enlace, pode ser necessário utilizar uma taxa mais baixa (por exemplo, 48 Mbps). Esse cuidado foi fundamental para conseguir um bom desempenho do YARAA em redes densas sob diferentes níveis de qualidade do meio de transmissão.

#### Listagem 1. Código do YARAA

```
diff_time = eff_tx_time - tx_time;
prob_high_rateTry = (diff_time - diff_time_lowThresh) /
    (diff_time_highThresh - diff_time_lowThresh);
if (diff_time <= diff_time_lowThresh) {
    highRateTry = false;
} else if (diffTxTime >= diffTxTimeHThresh) {
    highRateTry = true;
} else {
    randomValue = Random::uniform(0,1);
    if (randomValue <= prob_high_rateTry) {
        highRateTry = true;
    } else { highRateTry = false; }
}
if (highRateTry) { tryHighestRate(); }
```

Ao contrário de outros algoritmos que abordam o problema, o YARAA leva em consideração restrições práticas de implementação, possibilitando que o mesmo seja efetivamente incluído em um *driver*. Por exemplo, o YARAA usa apenas informações facil-

mente obtidas dos dispositivos (como atraso de transmissão de um quadro), não necessita de mensagens RTS/CTS, não altera quadros de controle definidos pelo padrão e não depende de medições da SINR. Mesmo assim, o YARAA apresentou desempenho superior a outros mecanismos usados em dispositivos comerciais, como será mostrado a seguir.

#### 4. Avaliação dos mecanismos

A avaliação dos algoritmos foi feita utilizando o simulador ns-2 (versão 2.31) com algumas alterações, a saber: 1) Inclusão de uma biblioteca [SIGNET 2007] que possui suporte a múltiplas taxas de transmissão e um modelo de erro de quadro baseado na SINR percebida na recepção de cada quadro. 2) Inclusão de dois modelos de desvanecimento do canal ([ARC 2007] e [Mhatre 2007]). 3) Implementação do *SampleRate* de acordo com o código do *driver* [MadWifi 2007]. 4) Implementação do YARAA.

Foram avaliados quatro algoritmos: SNR, ARF, *SampleRate* e YARAA. O SNR é um mecanismo de referência, não implementável na prática, pois ele conhece qual seria a SINR do quadro no receptor antes do seu envio. Dessa forma, o SNR escolhe, a cada quadro, a maior taxa que garanta a probabilidade de perda desejada para diferentes condições do enlace. Com a escolha de probabilidades de perda baixas e cenários com alta SINR, quase todas as perdas ocorrem por colisão. O ARF, que faz parte da biblioteca utilizada, foi alterado para permitir a adaptação de taxa por enlace ponto-a-ponto, uma vez que o ARF original considera que todos os nós com os quais uma estação se comunica estão no mesmo enlace, ou seja, a taxa de transmissão pode aumentar ou diminuir para um nó devido aos quadros recebidos (ou perdidos) de um outro nó.

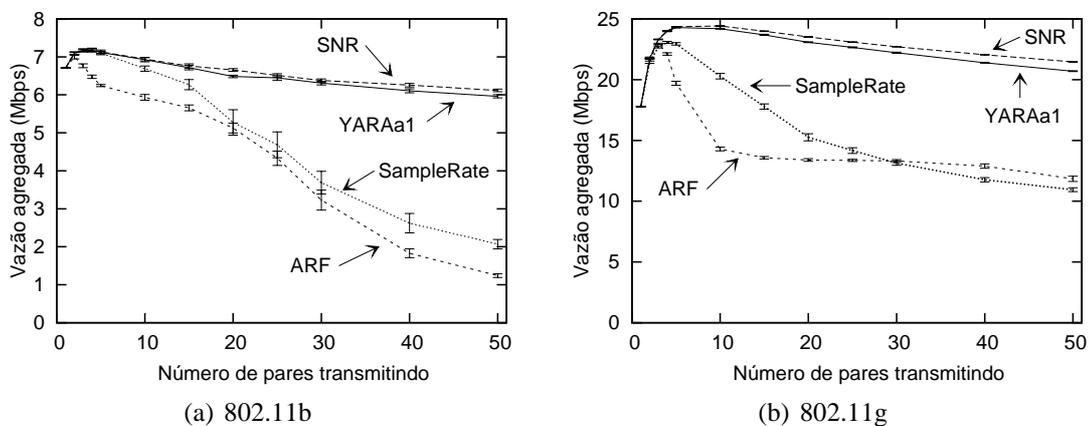
Por se tratar de uma avaliação de camada física e enlace, foi utilizado o agente de roteamento **DumbAgent** do ns-2, o qual estabelece comunicação de apenas um salto, sem reencaminhamento e sem uso de mensagens de controle. Os resultados apresentados se referem a pacotes de 1500 *bytes*, mas outros tamanhos de pacotes foram utilizados e apresentaram resultados semelhantes na comparação dos algoritmos. Foram realizadas rodadas de 110 segundos e cada configuração foi executada 30 vezes, sendo utilizado um nível de confiança de 95% no cálculo do intervalo de confiança. Todas as fontes de tráfego têm um tempo de início aleatório distribuído uniformemente em um intervalo inferior aos 10 primeiros segundos, sendo que os 10 segundos iniciais da simulação são desprezados como transiente. A avaliação dos mecanismos, detalhada a seguir, foi dividida em três partes: pares de comunicação, rede infra-estruturada e modelos de propagação.

##### 4.1. Pares de comunicação

Inicialmente, o intuito foi verificar como os algoritmos se comportam à medida que aumenta o número de estações disputando o acesso ao meio em uma rede *ad hoc* com comunicações de um único salto. Foi utilizado apenas o modelo de erro no nível de quadro baseado na SINR, o qual considera um decaimento do sinal apenas com a distância. Considerando que redes densas são geralmente estabelecidas em áreas pequenas, foi utilizada uma topologia em grade sobre uma área de  $100m^2$ , onde a distância mínima entre as estações é de 1 metro. As posições da fonte e do destino de cada par são escolhidas aleatoriamente, mas devido à proximidade dos nós não ocorrem transmissões simultâneas sem que haja colisão. Foram feitas simulações com tráfegos TCP e UDP em saturação. Os resultados mostraram comportamento similar com diferença apenas nos valores absolu-

tos, ocasionada pelo controle de congestionamento do TCP, o qual levou a rede a menores valores de vazão agregada. São apresentados apenas os resultados com fontes UDP.

As Figuras 3(a) e 3(b) mostram como a vazão agregada varia em função do nível de disputa pelo meio. Em uma rede 802.11b, observa-se que o *SampleRate* tem um bom desempenho quando o número de estações concorrendo ao meio é menor que 15, pois a partir desse valor há uma degradação significativa. Em uma rede 802.11g, o desempenho do *SampleRate* começa a ser severamente afetado mais cedo, a partir de 10 estações, e chega a ser pior que o ARF quando o número de estações ultrapassa 30. Conforme esperado, o ARF teve o pior desempenho na maioria dos cenários, enquanto o SNR obteve a vazão agregada máxima. O YARAA teve um desempenho próximo ao do SNR, com uma pequena tendência de aumento da diferença com o aumento da concorrência pelo meio.

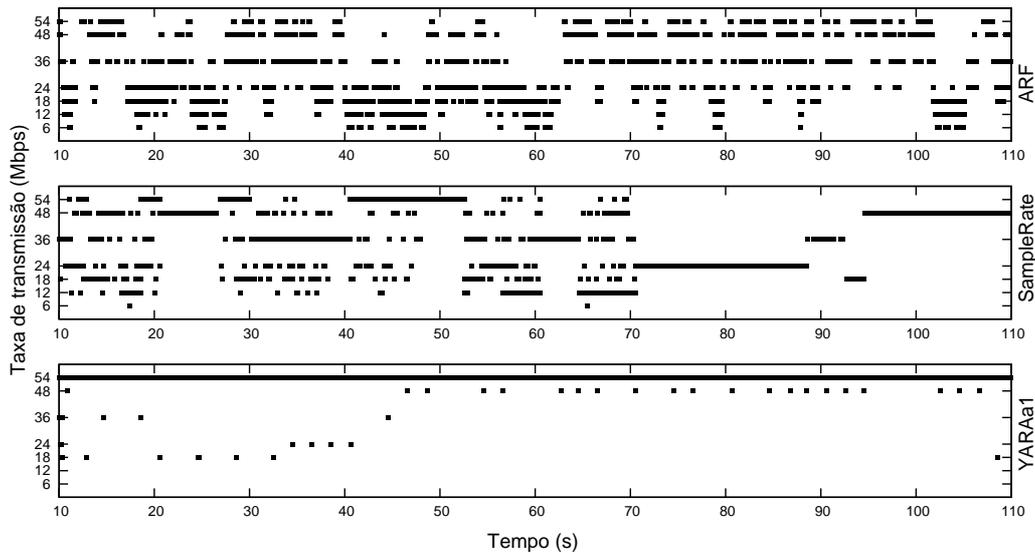


**Figura 3. Vazão agregada em função do número de pares de comunicação.**

A Figura 4 detalha a reação dos mecanismos de comutação de taxa em uma rede densa, mostrando as taxas escolhidas ao longo do tempo pela mesma estação para cada um dos algoritmos. A avaliação foi realizada com 20 estações em saturação. Uma análise superficial pode levar à conclusão que um algoritmo baseado puramente em vazão, como o *SampleRate*, seria imune ao nível de disputa uma vez que ele coleta informações de diferentes taxas e todas sofrem uma quantidade semelhante de perdas para as mesmas condições de disputa do canal, desprezando perdas por degradação do sinal. No entanto, quando o nível de disputa é muito alto, o número de amostras que o algoritmo dispõe de cada taxa é pequeno e, portanto, as estatísticas são imprecisas. Assim, o mecanismo realiza escolhas incorretas na adaptação, degradando seu desempenho. A figura mostra também as constantes oscilações do ARF, o que seria esperado dado que a probabilidade de perda é similar em todas as taxas. O SNR não é exibido, mas seu comportamento foi o de sempre escolher a taxa mais alta. Por fim, é possível entender porque o YARAA consegue se aproximar do ideal, pois mesmo observando um grande número de perdas, ele consegue discernir a maioria como sendo por colisão e comuta para a taxa mais alta.

#### 4.2. Rede infra-estruturada

Nessa parte da avaliação, foi usado o modo infra-estruturada, semelhante a outros trabalhos sobre redes densas [Kim et al. 2006a, Choi et al. 2007, Ramachandran et al. 2007]. Novamente, usou-se apenas o modelo de erro no nível de quadro baseado na SINR e uma



**Figura 4. Adaptação de taxa dos algoritmos ao longo do tempo.**

topologia similar à da seção anterior, porém com um AP no centro da área. As posições das estações clientes são escolhidas aleatoriamente. Foram realizadas simulações com **b** e **g**, mas serão mostrados apenas os resultados com (**g**). Assim como na seção anterior, a tendência dos algoritmos não apresentou diferença significativa entre as duas tecnologias. Foram feitas simulações com tráfego TCP e UDP, sendo apresentado apenas os gráficos de UDP. Diferentemente dos pares de comunicação, as simulações em modo infra-estruturado com TCP apresentaram algumas peculiaridades que serão discutidas ao fim dessa seção. Foi utilizado um número máximo de 20 estações, valor suficiente para discriminar o comportamento dos algoritmos.

A Figura 5(a) mostra o resultado dessas simulações, o qual foi semelhante ao obtido para o *SampleRate* e para o SNR em uma avaliação através de experimentos apresentada em [Ramachandran et al. 2007]. O tráfego é todo das estações em direção ao AP (*upstream*) e as fontes transmitem na saturação. Basicamente, confirma-se que o *SampleRate* tem seu desempenho degradado à medida que aumenta o número de estações disputando o meio. Mais uma vez, o YARAa mostrou-se imune ao problema das perdas por colisão, obtendo um resultado próximo ao ótimo desse cenário (alcançado pelo SNR).

Na Figura 5(b), é avaliado o impacto do aumento do tráfego *upstream* no desempenho dos algoritmos. O número de estações ativas é fixo e igual a 20, enquanto que o número de estações transmitindo para o AP varia de 0 a 20. Enquanto menos de 20% das estações enviam tráfego ao AP, os algoritmos apresentam um desempenho semelhante. A partir de 30%, o comportamento se assemelha ao do cenário com 100% de fontes *upstream*, mostrado na Figura 5(a). Ou seja, quando o tráfego é predominantemente *downstream*, não existe muita disputa pelo meio, pois há apenas o AP e algumas eventuais estações tentando transmitir. Na medida em que há um aumento no número de estações tentando transmitir para o AP, essa situação se altera, fazendo a disputa se elevar e exigindo maior atuação dos algoritmos de comutação de taxa.

Em modo infra-estruturado e com tráfego apenas TCP, a diferença entre os algo-

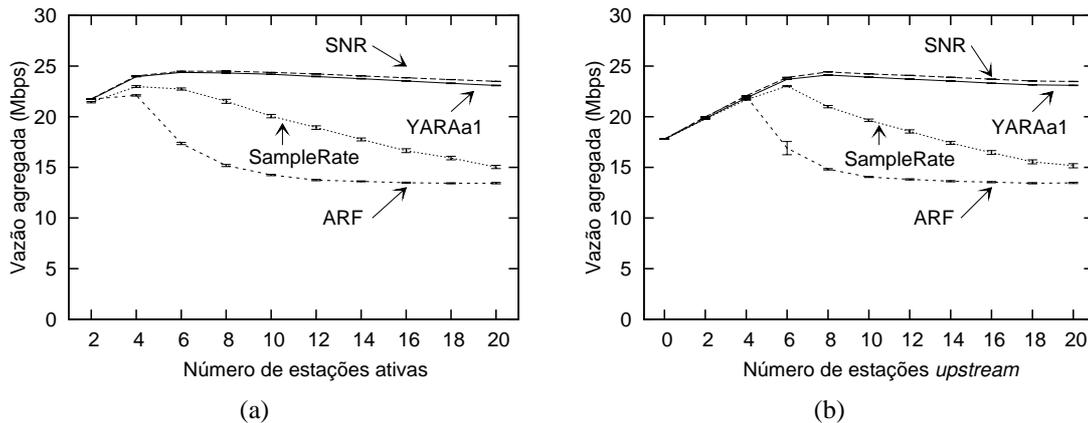


Figura 5. Vazão agregada com fontes UDP.

ritmos de controle de taxa se torna bem menor. SNR e YARAA continuam tendo melhor desempenho, enquanto o *SampleRate* se torna equivalente ao ARF. Esse fato é justificado por duas características do protocolo TCP. A primeira é o controle de congestionamento que faz com que o TCP diminua sua taxa ao perceber perdas. Os resultados mostraram uma vazão agregada sempre menor que 19 Mbps com o tráfego TCP, até mesmo com o SNR e com o YARAA. A segunda é que o ACK do TCP cria um tipo de “sincronização” entre as estações e o AP, independente das estações serem *upstream* ou *downstream*.

### 4.3. Modelos de propagação

Por fim, são apresentados os resultados dos algoritmos de adaptação de taxa quando há perdas por colisão e por degradação do sinal ocorrendo no mesmo enlace. Nessa seção, são utilizados dois modelos de desvanecimento do canal para representar problemas encontrados com frequência no meio sem fio, como multi-percurso e desvanecimento rápido. A avaliação dos modelos utiliza uma metodologia semelhante à da Seção 4.1. Serão exibidos os resultados para a tecnologia 802.11g, com tráfego UDP e com 20 estações transmitindo na saturação. Devido a maior aleatoriedade acrescentada pelos modelos de propagação, foram realizadas 60 rodadas de simulação para cada configuração apresentada, de forma a diminuir o tamanho do intervalo de confiança dos resultados.

Inicialmente, foi utilizado o modelo de desvanecimento *Ricean* [ARC 2007], o qual simula as condições do canal que variam no tempo. Esse modelo possui dois parâmetros de ajuste:  $K$  e  $maxVelocity$ .  $K$  descreve o nível de linha de visada do enlace, sendo que  $K = 0$  significa que não há nenhuma componente de linha de visada, ou seja, apenas sinais refletidos são recebidos. Com o aumento do valor de  $K$ , a componente de linha de visada é mais forte, aumentando a SINR e permitindo que taxas de transmissão mais altas sejam escolhidas mais frequentemente.  $maxVelocity$  representa a velocidade máxima de movimento relativo entre as estações comunicantes e os objetos no enlace. Quanto maior o valor de  $maxVelocity$ , maior é a variação da SINR. O modelo *Ricean* é usado para modular a saída de um modelo de desvanecimento de larga escala, tendo sido usado o modelo *Two-Ray Ground*. O *Two-Ray Ground* considera que o sinal transmitido tem duas componentes, uma direta e outra refletida no solo.

Foi observado que o modelo chega a produzir atenuações significativas no sinal,

levando a perda de pacotes. No entanto, dada a pequena área em que as estações estavam distribuídas e, portanto, a alta SINR percebida pelos receptores, o número de perdas adicionais gerado por esse modelo não afetou de forma significativa o desempenho de nenhum dos algoritmos avaliados. Sendo assim, os resultados para esse modelo não serão apresentados, pois não acrescentam novas informações.

O segundo modelo aplicado [Mhatre 2007] utiliza o *Shadowing* para representar o desvanecimento de larga escala, mantendo o *Ricean* na descrição do desvanecimento rápido variante com o tempo. O *Shadowing* utiliza uma variável aleatória para representar os efeitos de multi-percurso, descrevendo o nível de atenuação do sinal entre as estações. Dois parâmetros importantes desse modelo são o  $\beta$  (expoente de perda no caminho) e  $\sigma_{dB}$  (desvio-padrão do sobreamento). Maiores valores de  $\beta$  correspondem a mais obstruções e, logo, decrescimento mais rápido na potência média recebida conforme a distância aumenta. O valor de  $\sigma_{dB}$  reflete a variação da potência recebida a uma certa distância e possui valores característicos de acordo com o ambiente que se deseja representar. O gráfico da Figura 6(a) mostra o resultado para  $\beta = 4$  (ambiente *indoor* com obstruções) e  $\sigma_{dB} = 7$  (escritório com partições “finas”). Na Figura 6(b), é exibido o resultado também para  $\beta = 4$ , com  $\sigma_{dB} = 9.6$  (escritório com partições “espessas”). Essa parametrização do modelo cria um ambiente hostil para todas as estações.

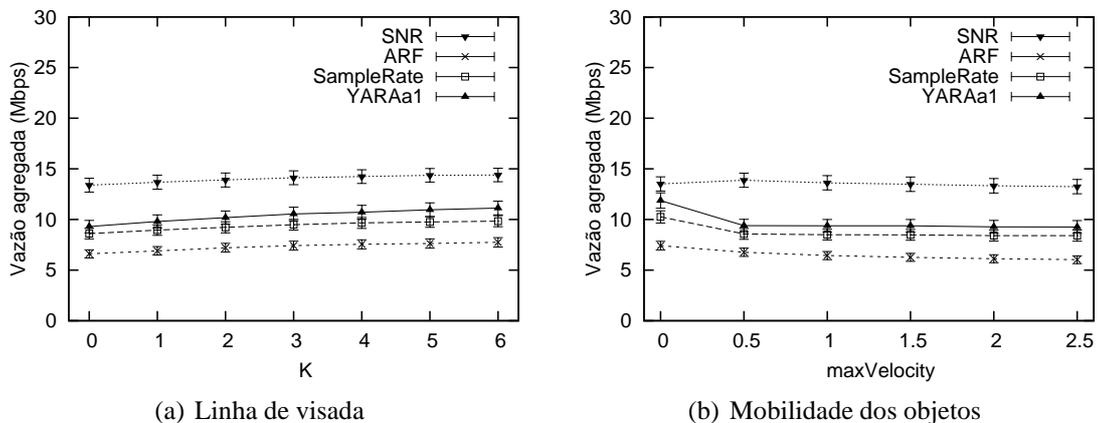


Figura 6. Vazão agregada sob condições hostis.

A Figura 6(a) mostra a influência de  $K$  sobre a vazão agregada, enquanto a Figura 6(b) exhibe o impacto de  $maxVelocity$ . Como havia sido verificado com o uso apenas do modelo *Ricean*, esses dois parâmetros têm pouca influência na vazão agregada. Vale destacar o impacto da velocidade relativa dos objetos sobre os mecanismos que utilizam a perda pacotes para monitorar a qualidade do canal (ARF, *SampleRate* e YARAA). Porém, a única diferença sensível ocorre entre a ausência e presença de movimento, independente da velocidade. Por outro lado, o modelo *Shadowing* afeta de forma significativa todos os mecanismos, diminuindo de forma sensível a vazão agregada rede. Embora, não haja discrepância sensível entre o tipo de partição utilizada (valores de  $\sigma_{dB}$ ). Nessas condições extremas, o YARAA ainda alcançou um desempenho satisfatório, mesmo que sua diferença em relação ao ideal tenha diminuído sensivelmente.

## 5. Conclusão e trabalhos futuros

O YARAA demonstrou ter desempenho satisfatório em redes densas, assim como em redes com baixa carga. O algoritmo também conseguiu lidar adequadamente com ambientes *indoor* hostis a transmissões sem fio. Além disso, foi mostrado que o algoritmo é simples e pode ser facilmente implementado em dispositivos comerciais que sigam o padrão IEEE 802.11 (a, b ou g). Como uma evolução do trabalho, está em andamento as alterações do *driver* MadWifi para incluir o YARAA. Pretende-se então realizar experimentos práticos para validação do algoritmo. Posteriormente, planeja-se incluir melhorias no YARAA para tratar também os problemas de mobilidade e de terminal escondido. Uma melhoria que está sendo avaliada é a substituição da EWMA por um modelo de Markov Oculto para estimar os atrasos em escalas de tempo menores.

## Referências

- 802.11. *IEEE 802.11, 1999 Edition (ISO/IEC 8802-11: 1999). IEEE Standards for Information Technology – Telecommunications and Information Exchange between Systems – Local and Metropolitan Area Network – Specific Requirements – Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, 1999.*
- Aguayo, D., Bicket, J., Biswas, S., Judd, G., and Morris, R. (2004). Link-level Measurements from an 802.11b Mesh Network. In *ACM Special Interest Group on Data Communication (SIGCOMM)*.
- ARC (2007). Additions to the NS network simulator to handle Ricean and Rayleigh fading. <http://www.ece.cmu.edu/wireless/downloads.html>. [Último acesso: 25-Novembro-2007].
- Bicket, J. C. (2005). Bit-rate Selection in Wireless Networks. Master's thesis, Dept. of Electrical Engineering and Computer Science - Massachusetts Institute of Technology.
- cheng Chen, C., Luo, H., Seo, E., Vaidya, N. H., and Wang, X. (2007). Rate-Adaptive Framing for Interfered Wireless Networks. In *IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM)*.
- Choi, J., Na, J., Park, K., and kwon Kim, C. (2007). Adaptive Optimization of Rate Adaptation Algorithms in Multi-Rate WLANs. In *IEEE International Conference on Network Protocols (ICNP)*.
- Holland, G., Vaidya, N., and Bahl, P. (2001). A Rate-Adaptive MAC Protocol for Multi-Hop Wireless Networks. In *ACM International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom)*.
- Judd, G., Wang, X., and Steenkiste, P. (2007). Extended Abstract: Low-overhead Channel-aware Rate Adaptation. In *ACM International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom)*.
- Kamerman, A. and Monteban, L. (1997). WaveLAN-II: A High-performance Wireless LAN for the Unlicensed Band. *Bell System Technical Journal*.
- Kim, J., Kim, S., Choi, S., and Qiao, D. (2006a). CARA: Collision-Aware Rate Adaptation for IEEE 802.11 WLANs. In *IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM)*.
- Kim, S., Lee, S.-J., and Choi, S. (2006b). The Impact of IEEE 802.11 MAC Strategies on Multi-hop Wireless Mesh Networks. In *IEEE Workshop on Wireless Mesh Networks (WiMesh)*.
- Kurth, M., Zubow, A., and Redlich, J.-P. (2006). Multi-Channel Link-level Measurements in 802.11 Mesh Networks. In *International Conference on Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC)*.
- Lacage, M., Manshaei, M. H., and Turletti, T. (2004). IEEE 802.11 Rate Adaptation: A Practical Approach. In *ACM International Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWiM)*.
- MadWifi (2007). MadWifi. <http://madwifi.org>. [Último acesso: 07-Novembro-2007].
- Mhatre, V. (2007). Enhanced Wireless Mesh Networking for ns-2 simulator. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*.
- Ramachandran, K., Kremo, H., Gruteser, M., Spasojević, P., and Šeškar, I. (2007). Experimental Scalability Analysis of Rate Adaptation Techniques in Congested IEEE 802.11 Networks. In *IEEE International Symposium on World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM)*.
- Rappaport, T. S. (2001). *Wireless Communications: Principles and Practice*. Prentice Hall, Inc.
- Sadeghi, B., Kanodia, V., Sabharwal, A., and Knightly, E. (2005). OAR: An Opportunistic Auto-Rate Media Access Protocol for Ad Hoc Networks. *Kluwer Academic Wireless Networks*.
- SIGNET (2007). dei80211mr: a new 802.11 implementation for NS-2. <http://www.dei.unipd.it/wdyn/?IDsezione=5090>. [Último acesso: 25-Novembro-2007].
- Wong, S. H. Y., Yang, H., Lu, S., and Bharghavan, V. (2006). Robust Rate Adaptation for 802.11 Wireless Networks. In *ACM International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom)*.
- Yarvis, M., Papagiannaki, K., and Conner, W. S. (2005). Characterization of 802.11 Wireless Networks in the Home. In *International workshop on Wireless Network Measurements (WiNMe)*.