

# Definindo Critérios no Compartilhamento de Banda em Redes 802.11b sob Degradação de Performance\*

Celso Barbosa Carvalho<sup>1</sup>, José Ferreira de Rezende<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Grupo de Teleinformática e Automação (GTA) /  
Pós-Graduação em Engenharia (COPPE)  
Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)

celso, rezende@gta.ufrj.br

**Abstract.** *In an IEEE 802.11b WLAN, stations (STAs) can transmit using four different rates varying from 1Mbps to 11Mbps. This characteristic makes that a STA, transmitting at lower rates, captures the channel for a long term what penalizes the others in the bandwidth sharing. This “anomaly” originates from the CSMA/CA access method that gives equal channel access probability to all STAs, independently of their rates. This article investigates the problem and defines rules in the bandwidth sharing that benefit higher rate transmitting stations. We use concepts of the IEEE 802.11e to implement the established rules in a priority control mechanism. At last, the results are evaluated with a fairness index expression from the literature.*

**Resumo.** *Em uma rede IEEE 802.11b, as estações sem fio (STAs) podem transmitir com taxas de 11Mbps, 5.5Mbps, 2Mbps ou 1Mbps. Assim, uma STA transmitindo a uma taxa menor ocupa o meio por um longo período, penalizando todas as outras. Esta “anomalia” tem como base o método CSMA/CA que garante igual probabilidade de acesso ao meio para todas as STAs. O presente artigo investiga o problema e define critérios que beneficiam as STAs de maior taxa, de maneira a compensar o longo período que as STAs mais lentas ocupam o canal. Utiliza-se, ainda, a extensão 802.11e para implementar o critério estabelecido em um mecanismo de priorização. Por fim, avalia-se o mecanismo proposto através de um índice de justiça.*

Palavras-chave: Comunicação sem fio, Qualidade de Serviço (QoS), Controle de Prioridade.

## 1. Introdução

Os recentes avanços tecnológicos apontam para um mundo das comunicações móveis, onde os usuários poderão acessar informações e comunicar-se de forma rápida e transparente a qualquer hora e em qualquer lugar. Dentre as tecnologias atuais que vêm contribuindo para o futuro das comunicações ubíquas, destaca-se o padrão 802.11 que devido

---

\*Este trabalho foi realizado com recursos do CNPq, RNP, FINEP, FUNTTEL, FUCAPI, UFAM e SUFRAMA.

a sua popularidade, altas taxas e baixo custo tem conseguido uma grande penetração no mercado. Estimativas apontam para a existência em todo o mundo de cerca de 80.000 *hot spots* ao final de 2004 e que 90% dos computadores portáteis produzidos até 2006 sairão de fábrica equipados com a tecnologia *wi-fi*.

Num cenário do tipo *hot spot*, o desempenho das STAs torna-se um requisito essencial, uma vez que aplicativos multimídia, de acesso móvel a informações ou jogos em rede necessitam de grande largura de banda. Sendo assim, grandes esforços têm sido empregados por parte dos fabricantes e pesquisadores em identificar e resolver problemas que possam degradar o desempenho dos protocolos e redes desta tecnologia. Um exemplo de diminuição de performance pode ser observado no 802.11 com o aumento da distância entre os pontos em comunicação ou na presença de interferências e/ou ruídos no meio. Nesta condição, há uma diminuição da relação sinal/ruído e conseqüente elevação da taxa de erros dos pacotes transmitidos pelas STAs. Tais situações adversas são solucionadas com esquemas de modulação mais robustos que têm como inconveniente a redução da taxa de transmissão das STAs. Para o 802.11b, são previstas as taxas de 11Mbps e 5.5Mbps, em adição as taxas de 1Mbps e 2Mbps já existentes no padrão original. Embora o 802.11b tenha sido criado com o objetivo de proporcionar maiores taxas de transmissão, seu funcionamento pode ainda ser degradado na presença de STAs transmitindo a taxas de bits menores. Conforme observado em [Heusse et al., 2003], uma STA mais lenta, ao transmitir um pacote de tamanho T, ocupa o meio por um período maior quando comparada a uma STA mais rápida. Neste cenário, a STA de maior taxa terá sua vazão decrescida para um valor próximo ao da STA que transmite a uma taxa de bits menor. Esta diminuição de desempenho ocorre em função do método CSMA/CA (*Carrier Sense with Collision Avoidance*), o qual atribui igual probabilidade de acesso ao meio para todas as STAs, independentemente de suas taxas.

Sendo assim, o presente trabalho estabelece critérios para fornecer um melhor desempenho às STAs de maior taxa, de maneira que elas não sejam tão prejudicadas pelas STAs mais lentas. Tais critérios têm como objetivo fazer o compartilhamento da banda disponível e ir ao encontro das definições de justiça.

Poucos trabalhos na literatura têm considerado a existência da “anomalia” e, de acordo com a nossa pesquisa, nenhuma solução foi proposta para este problema até o momento. Desta forma, a contribuição deste artigo é a de investigar e sugerir soluções para a questão discutida. Tal como proposto em [Carvalho e de Rezende, 2004], utiliza-se a extensão IEEE 802.11e para atribuir diferentes valores dos parâmetros de prioridade no acesso ao meio para as STAs de acordo com suas taxas. Tal procedimento tem como objetivo diminuir a probabilidade de transmissão das STAs de menor taxa, compensando, assim, o grande período que elas ocupam o canal.

Para expor tais assuntos, organizou-se o trabalho da seguinte maneira: a seção 2 lista pesquisas relacionadas ao tema; a seção 3 faz uma breve revisão bibliográfica dos protocolos 802.11b/e; a seção 4 analisa a “anomalia” de performance do 802.11 através de simulações utilizando o NS-2(*Network Simulator*); a seção 5 aborda os critérios e mecanismo utilizados na redução da “anomalia”, além de avaliar os resultados obtidos através de um índice de justiça; por fim, a seção 6 traz as conclusões.

## 2. Trabalhos Relacionados

Vários trabalhos têm analisado o desempenho em termos de vazão do MAC 802.11. Em [P.Chatzimisios et al., 2002], [Bianchi, 2000] e [Xiao e Rosdahl, 2002] são apresentados modelos analíticos para computar a vazão máxima do protocolo, no entanto, as pesquisas relacionadas desconsideram em suas análises a presença de STAs transmitindo com diferentes taxas em uma rede 802.11.

Heusse et al. [Heusse et al., 2003] verificam o desempenho do MAC 802.11b, considerando STAs com taxas diferentes; a “anomalia” de performance do protocolo CSMA/CA é identificada por meio de fórmulas matemáticas e experimentos que constataam o problema. Contudo, o trabalho não observa os efeitos da existência de diferentes distâncias entre as STAs e AP, além de não propor solução para a questão investigada.

Carvalho e Rezende [Carvalho e de Rezende, 2004] avaliam o impacto da variação de taxa e distância das STAs na constatação da anomalia. No mesmo trabalho é desenvolvido e avaliado um mecanismo de controle de prioridade baseado em [Filho et al., 2003] que utiliza os parâmetros de QoS (*Quality of Service*) do IEEE 802.11e para priorizar as STAs de acordo com suas taxas. No entanto, tal mecanismo não considera em seu critério de priorização a vazão efetiva ou a quantidade de STAs presentes na rede. O mecanismo também não trata a existência de tráfego em *downlink* ou cenários com convivência simultânea de STAs transmitindo a 11Mbps, 5.5Mbps 2Mbps e 1Mbps, tal como possível em uma rede IEEE 802.11b do tipo *hot spot*.

Como será visto nas próximas seções, o presente artigo tem como principal contribuição considerar tais variáveis, criando assim cenários mais realistas de operação das redes 802.11b, e definir critérios mais justos na divisão da banda disponível entre as STAs que transmitem com taxas distintas.

## 3. IEEE 802.11

O padrão 802.11 foi criado em 1997 pelo IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*), e em seu escopo estão definidas as camadas PHY (*physical layer*) e MAC (*Medium Access Control*). Em 1999 foi lançada a extensão 802.11b que define transmissões de até 11Mbps na banda ISM (*Industrial, Scientific and Medical*) em 2.4GHz. Novas extensões foram propostas e outras continuam em desenvolvimento, tal como o IEEE 802.11e, que é capaz de oferecer QoS em redes WLAN (*Wireless LAN*).

### 3.1. O MAC 802.11b

O MAC 802.11b define dois modos de acesso ao canal, são eles: DCF (*Distributed Coordination Function*) e PCF (*Point Coordination Function*). O primeiro é executado de maneira distribuída nas STAs, e o segundo utiliza um nó coordenador, chamado de PC (*Point Coordinator*) que controla as transmissões das STAs através de um esquema de eleição. O DCF é de uso obrigatório e pode ser usado como método de acesso único. Em uma segunda configuração, ambos são multiplexados no tempo em um quadro formado por um CP (*Contention Period*) e um período CFP (*Contention Free Period*). O método PCF não faz parte do escopo deste trabalho e, portanto, não será comentado em detalhes.

No DCF, a própria STA determina quando acessar o meio, utilizando um esquema de *listen-before-talk* definido no CSMA/CA. De acordo com o protocolo, uma STA que

deseja transmitir verifica se o meio está livre por um período de tempo igual a DIFS (*Distributed Interframe Space* -  $50\mu\text{s}$  no 802.11b). Caso ele esteja livre, a STA pode iniciar sua transmissão. A STA de destino, ao receber o quadro enviado, espera por um período chamado SIFS (*Short Interframe Space* -  $10\mu\text{s}$ ), e então responde com uma mensagem de ACK (*Acknowledgement*).

Caso o meio esteja ocupado na tentativa inicial, a STA transmissora esperará por um segundo período de DIFS, no qual o meio deve estar livre, e iniciará um procedimento de *backoff*. Este período de espera é obtido através do produto de uma variável uniformemente distribuída, entre 0 e  $CW_{min}$  (*Congestion Window*), e o tempo de um *slot* ( $20\mu\text{s}$ ). O temporizador de *backoff* é decrementado em unidades de um *slot time* caso não haja transmissões no meio. O decremento é interrompido caso o meio se torne ocupado, reiniciando após DIFS, caso volte a ficar livre. Quando o temporizador alcança o valor zero, a STA pode transmitir seu quadro e esperar por um ACK. Caso o ACK não retorne no tempo esperado, a STA transmissora chama seus procedimentos de *backoff* e retransmissão. Para cada nova retransmissão o valor de  $CW_{min}$  é aumentado ( $CW_{min} = (CW_{min} * 2) + 1$ ) até o valor limite  $CW_{max}$ . No 802.11b,  $CW_{min}$  possui valor inicial 31 e  $CW_{max}$  assume o valor 1023.

### 3.2. A extensão 802.11e

O 802.11e utiliza um mecanismo chamado de HCF (*Hybrid Coordination Function*) que incorpora dois métodos de acesso ao meio. O primeiro, baseado em contenção, é chamado de EDCF (*Enhanced Distributed Coordination Function*) e o segundo, livre de disputa, tem como base um mecanismo de eleição. O EDCF pode ser usado como método único de acesso, ou multiplexado em um super-quadro (*superframe*) juntamente com um período livre de disputa. No HCF a estação coordenadora é conhecida como HC (*Hybrid Coordinator*), e de maneira similar ao 802.11, geralmente reside no AP.

O suporte à QoS no EDCF é conseguido pela utilização de múltiplas Categorias de Tráfego (*Traffic Categories* - TCs). Os quadros de dados das camadas superiores chegam ao MAC com uma prioridade que é mapeada em uma TC. Cada STA possui até 8 TCs, que são parametrizadas com seus próprios valores de  $CW_{min}$ ,  $CW_{max}$  e AIFS (*Arbitrary Interframe Space*), e realizam procedimentos de *backoff* independentes. Os valores de parâmetros utilizados em cada TC são determinados pelo HC e emitidos para as STAs. Com isso, um mesmo conjunto de parâmetros destinados a uma TC pode ser usado por instâncias de *backoff* localizadas em STAs diferentes.

No EDCF, uma STA pode transmitir se o meio estiver livre por um período maior ou igual a  $AIFS[TC]$  (*Arbitrary Interframe Space*). Caso o meio esteja ocupado, a STA esperará o final da transmissão corrente, mais um período adicional de  $AIFS[TC]$  (no qual o meio deve estar livre), e iniciará um procedimento de *backoff* com intervalo de espera entre  $([1, CW_{min}[TC] + 1]) * SlotTime$ . Para cada tentativa de transmissão mal sucedida, um novo valor de  $CW$  é calculado utilizando um fator de persistência ( $PF[TC]$ ), conforme apresentado na figura

Uma colisão ocorrida entre diferentes TCs, dentro de uma STA, é resolvida dando-se uma Oportunidade de Transmissão (*Transmission Opportunity* - TXOP) para a TC mais prioritária. Neste caso, a TC que possui menor prioridade entrará em *backoff*. No caso de colisões ocorridas entre STAs distintas, ambas realizam o procedimento de *backoff*.

## 4. Anomalia de Performance do 802.11b

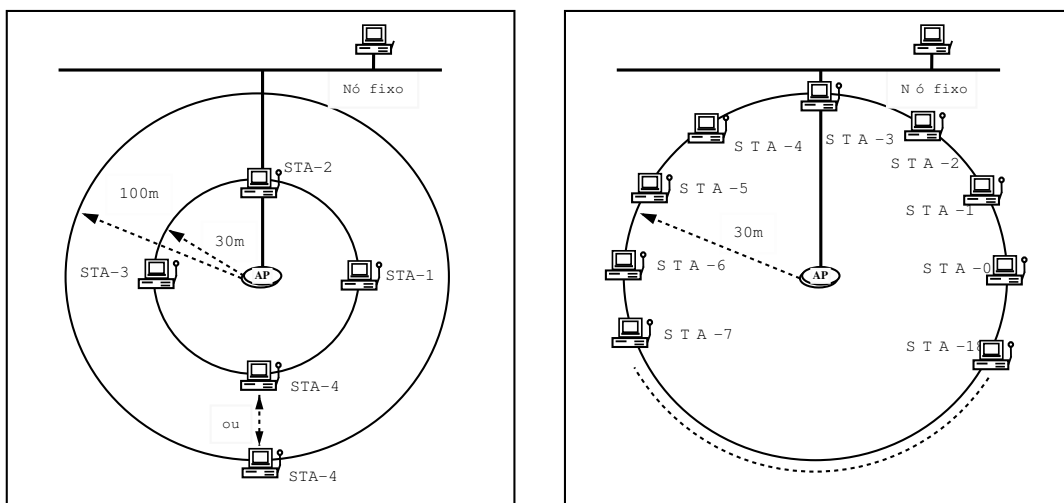
Diversos fatores influenciam a vazão obtida pelas STAs em uma rede 802.11b. Podem-se citar a distância entre STAs e AP ou a quantidade de STAs existentes com suas respectivas taxas de transmissão. A seguir, descreve-se os cenários utilizados para constatação da anomalia através da variação dos parâmetros comentados.

### 4.1. Cenários de Simulação

Utilizou-se o NS-2 versão 2.26, no qual foi anexado o agente NOAH (*Non Ad Hoc Routing Agent*). Este procedimento foi necessário para simular redes infra-estruturadas, visto que o NS original possui somente protocolos de roteamento *Ad hoc*. Alterou-se o MAC 802.11 de maneira a possibilitar a utilização de enlaces de taxa simétrica (*downlink* e *uplink*) e instrumentou-se a mesma camada com código que permitisse a análise de seu funcionamento, em cenários com STAs transmitindo a diferentes taxas e distâncias do AP.

Para os experimentos, utilizou-se cenários (figura 1) com um AP localizado no centro de circunferências, de 30m e 100m de raio, e conectado a um nó fixo através de um enlace de 100Mbps e 2ms de retardo.

Nos cenários 1 e 2 (figura 1(a)) foram utilizadas três (03) STAs transmitindo a 11Mbps e uma (01) cuja taxa é decrescida a cada 100s de 11Mbps para 5.5Mbps, 2Mbps e 1Mbps. No cenário 1 todas as STAs estão a 30m do AP e igualmente espaçadas na circunferência, a fim de constatar a anomalia sem a influência dos fatores distância e quantidade de STAs.



(a) Cenários 1 e 2

(b) Cenário 3

**Figura 1: Cenários de Simulação**

Para o cenário 2, as STAs com taxa de 11Mbps estão posicionadas a 30m do AP, e a STA de taxa variável, posicionada a 100m de raio com o propósito de observar a influência da distância sobre a vazão das STAs.

No cenário 3 (figura 1(b)) e em sua primeira configuração, fixou-se em um (01) a quantidade de STAs transmitindo a 11Mbps e variou-se de um (01) a dezoito (18) a

quantidade de STAs transmitindo com taxa variável (11Mbps, 5.5Mbps e 2Mbps). No mesmo cenário, em sua segunda configuração e de maneira contrária, fixou-se a quantidade de STAs de menor taxa variando-se a quantidade de STAs transmitindo a 11Mbps. Em ambas configurações, todas as STAs estão localizadas a 30m de raio do AP, objetivando observar a influência da variação da quantidade de STAs de maior e menor taxa sem a influência da distância.

Nos cenários 1 e 2 foram realizadas simulações de 400 segundos, anexando a cada STA uma fonte CBR e protocolo de transporte UDP, com o intuito de simplificar a análise dos resultados devido ao comportamento constante destes protocolos. O tráfego da fonte é de 2Mbps com pacotes de 2312 bytes (tamanho máximo do quadro MAC) em sentido *downlink* ou *uplink*, para que se possa observar a influência da colisão de pacotes. Nesses aspectos, o cenário 3 difere dos dois primeiros, visto que foram realizadas simulações de 200 segundos com tráfego somente em *uplink*, variando-se em cada experimento a quantidade de STAs conforme comentado anteriormente.

#### 4.2. Resultados Obtidos

Nas figuras 2 e 3 observa-se uma diminuição da vazão das STAs e da rede (agregado) à medida que se reduz, gradativamente, a taxa de transmissão de uma das STAs de 11Mbps para 5.5Mbps, 2Mbps e 1Mbps.

Comparando-se as figuras 2(a) e 3(a) (tráfego *downlink*), observa-se a existência de curvas idênticas, independentemente da distância das STAs ao AP. Isto ocorre pois os pacotes são originados por um único nó (AP), e assim, não ocorrem colisões nos receptores. Nas figuras 2(b) e 3(b) (tráfego em *uplink*), percebe-se que há uma diferença entre

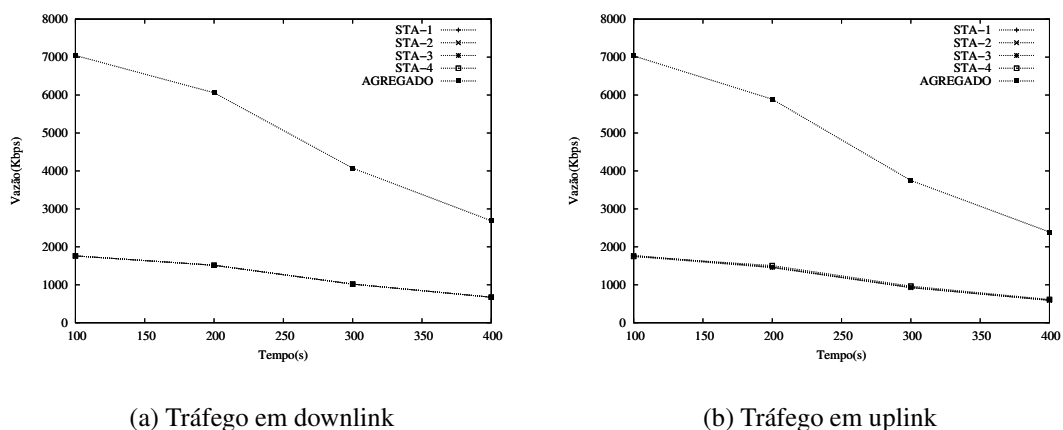
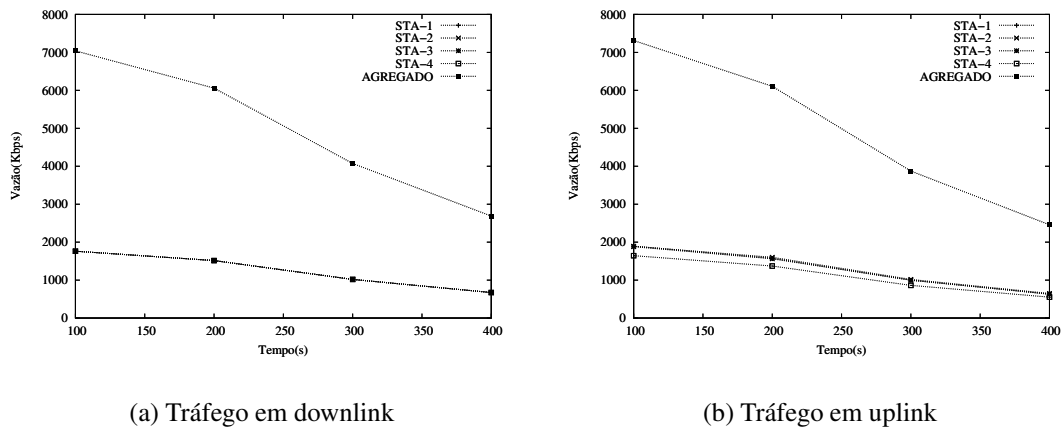
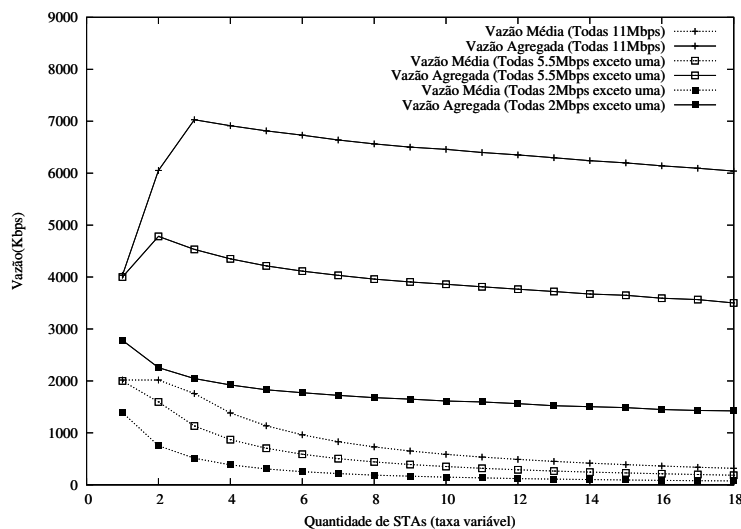


Figura 2: STA de taxa variável a 30m do AP

a vazão da STA de taxa variável quando ela está a 30m ou a 100m do AP. Na situação onde a STA está distante, obtém-se uma menor vazão desta STA quando comparada com as demais, uma vez que seus pacotes são capturados no receptor (AP). A captura de um pacote acontece quando uma STA recebe duas transmissões simultâneas, e a relação de potência entre os dois pacotes recebidos é maior que certo limiar, ajustado em 10dB no NS-2. Nesta condição, o primeiro pacote pode ainda ser interpretado e a STA receptora responderá normalmente com um ACK para o transmissor.



**Figura 3: STA de taxa variável a 100m do AP**



**Figura 4: Uma STA de taxa 11Mbps - De uma (01) a dezoito (18) STAs de taxa variável**

Confrontando-se os resultados obtidos nas figuras 4 e 5, percebe-se que a vazão média das STAs (três curvas inferiores) decai mais rapidamente ao fixar-se a quantidade de STAs a 11Mbps e aumentar-se a quantidade de STAs de menor taxa. Devido ao mesmo motivo nota-se na figura 4 que há um decréscimo da vazão agregada da rede (três curvas superiores). Tais comportamentos ocorrem pois cada uma das STAs mais lentas ocupa o canal demasiadamente, penalizando ainda mais todas as outras.

Na figura 5 observa-se um menor impacto da única STA de menor taxa sob a vazão agregada, a medida que a quantidade de STAs mais rápidas aumenta. Isto ocorre pois há uma diluição da componente de vazão da STA de menor taxa no agregado da rede.

Com os resultados obtidos nesta seção, constata-se a anomalia de taxas do 802.11b, e percebe-se que a influência das STAs de menor taxa tende a ser amortizada com a diminuição de sua quantidade, e de maneira contrária, tende a ser mais evidente com o aumento da quantidade de STAs que possuem taxa reduzida.

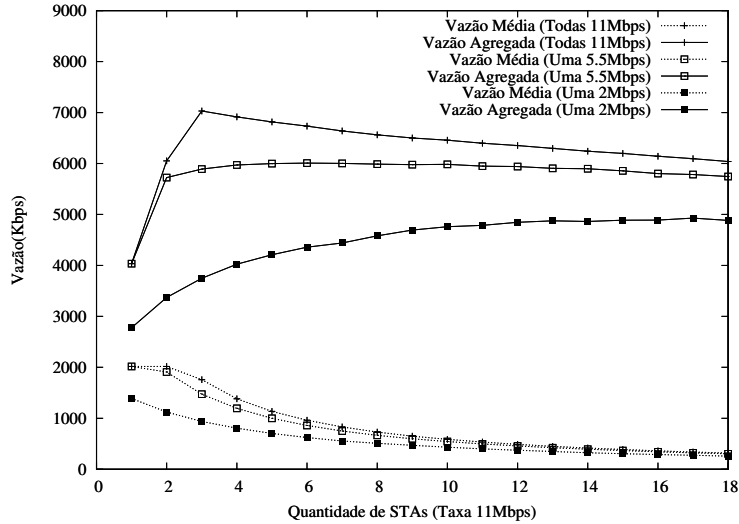


Figura 5: Uma STA de taxa variável - De uma (01) a dezoito (18) STAs de taxa 11Mbps

## 5. Critérios e Mecanismo de Controle de Prioridade

Esta seção apresenta os critérios e mecanismo de controle de prioridade desenvolvido para a minimização da anomalia. Tais critérios consideram o tempo de transmissão de pacotes das STAs, para determinar o quanto uma STA de maior taxa é mais veloz que uma de taxa reduzida.

### 5.1. Critérios de Priorização

Em uma rede 802.11b o tempo gasto para transmitir com sucesso um quadro MAC por uma STA com  $taxa_i$  é dado por:

$$t_{tr}^{taxa_i} = t_{quadro}^{taxa_i} + t_{ov} \quad (1)$$

Onde  $t_{quadro}^{taxa_i}$  é o tempo de transmissão de um quadro MAC,  $t_{ov}$  é o tempo gasto com *overheads* de protocolo e  $y$  é um índice que varia de 1 a 4 e, é utilizado para representar as quatro possíveis taxas de transmissão do 802.11b (ex:  $taxa_1=11Mbps$  ou  $taxa_2=5.5Mbps$ ). A partir da expressão (1) e desmembrando-se a variável  $t_{ov}$ , tem-se que:

$$t_{tr}^{taxa_i} = DIFS + 2 * t_{PrAndH} + t_{quadro}^{taxa_i} + 2 * t_{prop} + SIFS + t_{ACK} + t_{E[CW_{min}]} \quad (2)$$

Sendo que os tempos relacionados na equação acima são dados por:

- $t_{E[CW_{min}]}$  - tempo médio gasto em contenção ( $((CW_{min} + 1)/2) * slottime$ )
- $t_{PrAndH}$  - tempo de transmissão do preâmbulo e cabeçalho PLCP longo ( $192\mu s$ )
- $t_{ACK}$  - tempo de transmissão do ACK ( $112\mu s$ )
- $t_{prop}$  - tempo de propagação no meio ( $1\mu s$ )
- $t_{quadro}^{taxa_i}$  - tempo de transmissão do quadro MAC ( $((8 * (MACHeader + T_{dados} + CRC)) / taxa_i)$ )



As constantes MACHeader (30 bytes) e CRC (4 bytes) são ,respectivamente, o cabeçalho e o campo de verificação de erros de quadro da camada MAC. A variável  $T_{dados}$  representa o tamanho (em bytes) do pacote de dados que está sendo transmitido.

Das equações anteriores, tem-se que a relação entre os tempos de transmissão de quadros de duas STAs transmitindo com taxas distintas, é dada por:

$$\alpha = t_{tr}^{taxa_{i+1}} / t_{tr}^{taxa_i} \quad (3)$$

A partir da expressão (3), percebe-se que uma STA que transmite a  $taxa_i$  é  $\alpha$  vezes mais rápida ao transmitir dados que uma STA transmitindo a  $taxa_{i+1}$ , caso sejam considerados os tempos gastos com *overhead* de protocolo. Desta maneira, estabeleceu-se neste trabalho que qualquer STA de maior taxa tenha vazão  $\alpha$  vezes superior a qualquer outra mais lenta. Este critério foi utilizado para  $n_i$  (quantidade de STAs mais rápidas) maior que  $n_{i+1}$  (quantidade de STAs mais lentas), uma vez que o emprego da relação (3) na condição contrária, faria com que houvesse uma queda da vazão agregada da rede. Esta diminuição de performance pode ser percebida ao considerar-se o exemplo extremo de uma (01) STA de maior vazão e um número crescente de STAs de menor desempenho, transmitindo pacotes de tamanho T. Conforme expressão abaixo, sendo n a quantidade total de STAs,  $taxa_1$  e  $taxa_2$ , respectivamente, as taxas de transmissão da STA mais veloz e a taxa de transmissão das STAs mais lentas e, considerando que as STAs possuem valor de vazão igual ao de sua taxa de transmissão, percebe-se que a vazão total de envio de dados na rede tende para o valor das STAs de menor taxa.

$$Vazao_{total} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n \cdot T}{T \cdot \left( \frac{1}{taxa_1} + \frac{n-1}{taxa_2} \right)} = taxa_2 \quad (4)$$

Assim, para  $n_i \leq n_{i+1}$ , utilizou-se a relação (3) para determinar o quanto a vazão agregada das STAs mais rápidas deve ser maior que a vazão agregada das STAs de menor taxa. Esta abordagem limita as STAs de menor taxa a uma fatia de banda e as impede de prejudicar ainda mais a performance da rede.

## 5.2. Mecanismo de Controle de Prioridade

O mecanismo de ajuste de prioridade está localizado no AP e mede periodicamente a carga agregada destinada (*downlink*) ou proveniente (*uplink*) das STAs transmitindo a uma determinada taxa de transmissão (ex: 11Mbps e 5.5Mbps). O AP associa uma TC a cada uma das quatro possíveis taxas do 802.11b e emite novos valores do parâmetro AIFS[TC], de acordo com a situação de carga medida. O parâmetro CWmin[TC] não foi utilizado com fins de priorização, e sim com o objetivo de diminuir a probabilidade de colisões. No mecanismo, o ajuste de prioridade é executado periodicamente pelo módulo ajustarPrioridade. Este procedimento inicia com cálculo de duas razões. A primeira (*rTempo*-linha 6), conforme equação 3, exprime o quanto uma STA da categoria  $TC_i$  é mais veloz que uma STA da categoria  $TC_{i+1}$ . A segunda variável (*rVazao*-linhas 02 e 05) armazena a relação entre as vazões individuais das STAs pertencentes a categoria  $TC_i$  e  $TC_{i+1}$ , caso a quantidade de STAs de maior taxa ( $NSTAs[TC_i]$ ) seja maior que as da categoria imediatamente inferior ( $NSTAs[TC_{i+1}]$ ). Na situação contrária ( $NSTAs[TC_i] \leq NSTAs[TC_{i+1}]$  - linha 04) armazena-se na variável *rVazao* a relação entre a vazão agregada das categorias  $TC_i$  e  $TC_{i+1}$ . Dependendo dos valores das variáveis *rVazao* e *rTempo*, baixa-se (linha

09) ou eleva-se (linha 12) a prioridade da  $TC_{i+1}$ , verificando-se se a vazão média destas STAs não alcançou um valor considerado mínimo (variável  $vMinimo$ ). A redução ou elevação de prioridade é realizada somando-se ou subtraindo-se a quantidade de um (01)  $slottime$  da variável  $AIFS[TC_{i+1}]$ .

O ajuste de contenção é realizado com a chegada de novas STAs (figura 6(b)). Na função `ajustarCWmin` é verificado se o produto de uma variável  $K$  (utilizado o valor 2) pela quantidade total de STAs é maior ou menor que o valor de  $CWmin$  das categorias existentes. Caso o valor comparado seja maior (linha 02) que o  $CWmin$  atual, eleva-se a janela de contenção mínima conforme linha 03; caso contrário (linha 05), reduz-se o valor da variável  $CWmin$  (linha 06).

Em ambos os procedimentos comentados, os novos valores de  $CWmin[TC]$  e  $AIFS[TC]$  são emitidos para as STAs através do procedimento `emitirParametros`.

```

ajustarPrioridade(TC_i+1){
01: Se (NSTAs[TC_i]>NSTAs[TC_i+1])
02:   rVazao=(aGreg[TC_i]*NSTAs[TC_i+1])/
03:     (aGreg[TC_i+1]*NSTAs[TC_i])
04:   Senao
05:     rVazao=aGreg[TC_i]/aGreg[TC_i+1]
06:   rTempo = Ttr[TC_i+1]/Ttr[TC_i]
07:   Se (rVazao < rTempo) AND
08:     (aGreg[TC_i+1]/NSTAs[TC_i+1] >= vMinimo)
09:     baixarPrioridade(TC_i+1)
10:   Se (rVazao < rTempo) OR
11:     (aGreg[TC_i+1]/NSTAs[TC_i+1] < vMinimo))
12:     elevarPrioridade(TC_i+1)
13:   emitirParametros( )
}

```

(a) Módulo de Ajuste de Prioridade

```

ajustarCWmin(TC_i){
01:   cwMinAtual = cwMin[TC_i]
02:   Se (K*totalSTAs > (cwMinAtual+1))
03:     cwMinAtual=cwMinAtual*2+1
04:   Senao
05:     Se (K*totalSTAs <= (cwMinAtual+1)*1/2)
06:       cwMinAtual=(cwMinAtual-1)/2
07:   Se cwMinAtual < 7
08:     cwMinAtual = 7
09:   Se cwMinAtual > 1023
10:     cwMinAtual = 1023
11:   Para TC_i de 0 a 3 //04 TCs existentes
12:     cwMin[TC_i]=cwMinAtual
13:   emitirParametros( )
}

```

(b) Módulo de ajuste de Contenção

**Figura 6: Algoritmos Utilizados**

### 5.3. Simulações

Foi utilizada versão do MAC 802.11 com suporte ao EDCF, na qual implementou-se enlaces simétricos (*downlink* e *uplink*), além do próprio mecanismo de controle de prioridade. Empregou-se nos experimentos a topologia da figura 1(b) com STAs igualmente espaçadas na circunferência de 30m de raio do AP, com o intuito de observar a eficácia do mecanismo sem a influência do fator distância. Foram empregadas fontes CBR gerando tráfego com taxa de 2Mbps e pacotes de 2312 bytes, tal como na caracterização da anomalia. Todas as TCs iniciaram com valor de  $AIFS$  igual a 2 e  $CWmin$  igual a 7, os quais foram alterados no decorrer das simulações. As características acima foram empregadas em duas configurações distintas do mesmo cenário, sendo que na primeira coexistiam STAs transmitindo em duas taxas distintas, e na segunda havia presença de STAs transmitindo nas quatro possíveis taxas do 802.11b.

Na primeira configuração as simulações tiveram duração de 400s divididos em quatro intervalos, com entrada de fontes espaçadas de 2s dentro de cada fase. A primeira etapa teve término em 100s, e nela admitiu-se três (03) fontes da categoria  $TC_0$ . A segunda, terceira e quarta fases também possuíam duração de 100s cada, e nelas admitiu-se

respectivamente uma (01), duas (02) e outras duas (02) STAs da  $TC_1$ , o que fez um total de 0, 1, 3 e 5 STAs desta categoria (menor taxa) em cada uma das fases do experimento.

Com Mecanismo - <i>uplink</i>					
<i>Fase</i>	Agreg-11M	Agreg-2M	Agreg.Total	Vmedia-11M	Vmedia-2M
A1	6000.0	0.0	6000.0	2000.0	0.0
A2	4443.3	403.8	4847.1	1481.1	403.8
A3	3112.3	718.5	3830.9	1037.4	239.5
A4	3115.1	686.1	3801.3	1038.3	137.2
Sem Mecanismo - <i>uplink</i>					
B1	6000.0	0.0	6000.0	2000.0	0.0
B2	2772.1	955.6	3727.7	924.0	955.6
B3	1231.9	1264.7	2486.7	410.6	418.2
B4	773.3	1326.2	2099.5	257.7	265.2

**Tabela 1: Vazões média e Agregada Obtidas com e sem utilização do Mecanismo (*uplink*)**

Foram realizadas 10 simulações com e sem a utilização do mecanismo em *uplink* e *downlink*. Os resultados dos experimentos, quando a TC menos prioritária possui a taxa de 2Mbps, são apresentados na tabela 1. Nas colunas 2, 3 e 4 estão as vazões das categorias  $TC_0$ ,  $TC_1$  e a vazão agregada da rede. As colunas 4 e 5 relacionam as vazões médias das STAs das TCs envolvidas.

Com Mecanismo - <i>downlink</i>					
<i>Fase</i>	Agreg-11M	Agreg-2M	Agreg.Total	Vmedia-11M	Vmedia-2M
A1	6000.0	0.0	6000.0	2000.0	0.0
A2	5555.9	519.3	6075.2	1851.9	519.3
A3	3930.4	878.0	4808.5	1310.1	292.6
A4	3929.0	878.0	4807.0	1306.6	175.6
Sem Mecanismo - <i>downlink</i>					
B1	6000.0	0.0	6000.0	2000.0	0.0
B2	2963.3	987.8	3951.2	987.7	987.7
B3	1399.1	1399.1	2798.3	466.3	466.3
B4	916.2	1527.1	2443.4	305.4	305.4

**Tabela 2: Vazões média e Agregada Obtidas com e sem utilização do Mecanismo (*downlink*)**

Na segunda configuração do cenário de validação do mecanismo, os experimentos duraram 500s, divididos em cinco intervalos iguais. Na primeira etapa (entre 0 e 100s), foram admitidas 01 fonte de cada TC. Para o segundo, terceiro e quarto períodos foram admitidas, respectivamente, uma STA das categorias  $TC_3$ ,  $TC_2$  e  $TC_1$ . No quinto e último período, recebeu-se mais duas (02) STAs de taxa 11M ( $TC_0$ ). Foram realizadas 10 simulações com tráfego em *uplink*, com e sem o uso do mecanismo. A média dos resultados dos experimentos é apresentada na tabela 3, sendo que nas colunas de 2 a 6 são relacionadas, respectivamente, as vazões agregadas de cada TC e vazão total da rede.

Com Mecanismo - <i>uplink</i>					
<i>Fase</i>	Agreg-11M	Agreg-5.5M	Agreg-2M	Agreg-1M	Agreg.Total
A1	1620.9	967.7	395.0	206.1	3189.8
A2	1568.9	947.9	402.0	207.0	3125.9
A3	1553.3	926.0	382.5	208.6	3070.5
A4	1522.9	922.4	377.9	199.3	3022.5
A5	1983.0	760.3	320.9	177.2	3241.5
Sem Mecanismo - <i>uplink</i>					
B1	433.1	434.6	441.5	449.9	1759.2
B2	266.1	279.1	280.2	570.4	1395.9
B3	231.4	225.7	475.2	466.1	1398.6
B4	204.1	425.6	428.4	434.8	1493.0
B5	542.4	364.5	383.1	391.2	1681.4

**Tabela 3: Vazões Obtidas com e sem utilização do Mecanismo em cenário com transmissão simultânea em 4 taxas (*uplink*)**

O mecanismo proposto foi avaliado, aplicando-se os dados de vazão mostrados nas tabelas 1, 2 e 3 em uma fórmula de índice de justiça (*fairness index*-FI) proposta por [R.Jain e D.Chiu, 1984], e apresentada na equação 4.

$$fairness\ index = \frac{(\sum_{i=0}^{N-1} x_i)^2}{N * \sum_{i=0}^{N-1} (x_i)^2} \quad (5)$$

Na equação acima, N é a quantidade de TCs envolvidas e  $x_i$  pode ser determinado de três maneiras distintas:(a) dado pela vazão individual média ( $T_i = Agreg_i/n_i$ ) das STAs pertencentes a  $TC_i$ , normalizada pela vazão considerada ótima ( $O_i$ ) para as STAs da categoria;(b) vazão agregada ( $Agreg_i$ ) das STAs pertencentes a  $TC_i$ , normalizada pela vazão considerada ótima para a categoria em questão;(c) assume valor 1 se, a vazão individual média das STAs ( $Agreg_i/T_i$ ) pertencentes à categoria para a qual se quer determinar  $x_i$  é igual a taxa da fonte ( $taxaFonte_i$ ) destas STAs. As opções (a) e (b) para determinação de  $x_i$  são determinadas conforme critérios estabelecidos na seção 5.1 e que estão relacionados a quantidade de STAs pertencentes a  $TC_i$  e categoria imediatamente inferior ( $TC_{i+1}$ ). Nota-se ainda o surgimento do critério (c) na determinação de  $x_i$  e que é utilizado quando as STAs da categoria  $TC_i$  conseguem escoar toda a vazão de suas fontes.

$$x_i = \begin{cases} T_i/O_i & \text{se } n_i > n_{i+1} & (a) \\ Agreg_i/O_i & \text{se } n_i \leq n_{i+1} & (b) \\ 1 & \text{se } Agreg_i/n_i = taxaFonte_i & (c) \end{cases}$$

Na equação anterior, a variável  $O_i$  representa a vazão considerada ótima do agregado ou das STAs em questão, e é dada como uma fração da banda disponível (variável BWAgreg),conforme a seguir:

$$O_i = \begin{cases} (\sum_{j=0}^{N-1} \frac{t_j}{t_j * n_j})^{-1} . BWAgreg & \text{se } n_i > n_{i+1} \\ (\sum_{j=0}^{N-1} \frac{t_j}{t_j})^{-1} . BWAgreg & \text{se } n_i \leq n_{i+1} \end{cases}$$

Sendo  $t_i$  o tempo que uma STA da  $TC_i$  ocupa o canal ao transmitir um pacote de tamanho  $T$ , e  $t_j$  são os tempos de ocupação do canal das STAs das TCs existentes. De

acordo com as expressões anteriores, quanto menor o valor de  $t_i$ , maior será sua fatia da banda. As variáveis  $x_i$  e  $O_i$  da última categoria existente ( $i$  de 0 a 3) são escolhidas de acordo com a quantidade de STAs da categoria anterior.

Os valores de FI para cada uma das configurações das tabelas 1, 2 e 3, são apresentados na tabela 4. Resultados próximos de 1 indicam que o mecanismo fornece valores de vazões mais próximos dos critérios estabelecidos, e desta maneira mais próximos ainda de um valor considerado mais justo para as STAs, conforme suas taxas de transmissão.

Com Mecanismo			
<i>Fase</i>	FI( <i>Uplink</i> -2 TCs)	FI( <i>Downlink</i> -2 TCs)	FI( <i>Uplink</i> -4 TCs)
A1	1.0000	1.0000	0.9999
A2	0.9884	0.9853	0.9997
A3	0.9998	0.9999	0.9995
A4	0.9998	0.9999	0.9999
A5	-	-	0.9637
Sem Mecanismo			
B1	1.0000	1.0000	0.6288
B2	0.7030	0.7138	0.4589
B3	0.7058	0.7138	0.5479
B4	0.6258	0.6324	0.5959
B5	-	-	0.6981

**Tabela 4: Índice de Justiça obtido para cada configuração**

#### 5.4. Análise dos Resultados

Observa-se a partir das tabelas 1 e 2 (colunas 2 e 4) e tabela 3 (colunas 2, 3 e 6) que o mecanismo proporciona aumento da vazão agregada das STAs de maior taxa e vazão agregada da rede. Percebe-se nas fases A1 à A4, das tabelas 1 e 2, que mesmo com a utilização do mecanismo, existe um decréscimo da vazão agregada das STAs de maior taxa à medida que se aumenta a quantidade das STAs de menor performance. Tal decréscimo fica estabilizado nas fases A3 e A4, uma vez que se considerou no mecanismo, que para  $n_i \leq n_{i+1}$ , a vazão agregada das STAs de maior taxa seria superior ao outro agregado, conforme relação 3. Comparando-se os resultados obtidos nas fases A1 à A4 das mesmas tabelas (tabelas 1 e 2), nota-se que para tráfego em *downlink*, existem maiores valores de vazão das STAs de maior taxa e vazão total da rede, quando comparado aos resultados obtidos para tráfego em *uplink*. Este resultado é conseguido pois no caso de tráfego no sentido do AP para as STAs, o próprio AP gerencia as colisões entre as TCs existentes, atribuindo a TXOP para a TC mais prioritária.

Na tabela 4, ao comparar-se as linhas  $A_i$  com as linhas  $B_i$  ( $i$  de 0 a 5) de uma mesma coluna, percebe-se que o mecanismo propicia valores de índice de justiça mais próximos de 1 para todas as configurações e em todas as suas fases, quando confrontado com os resultados obtidos sem a utilização do mecanismo. Ao comparar-se as linhas A1 e B1 (colunas 2 e 3) da mesma tabela visualiza-se valores de índice iguais a 1 com e sem a utilização do mecanismo. Isto ocorre, porque nestas fases de simulação existem somente três STAs de maior taxa e, assim, todas obtêm vazões iguais as das suas fontes CBR.

## 6. Conclusões

Este artigo verificou a “anomalia” de performance do 802.11, constatando o problema em cenários onde variou-se a distância e o sentido de tráfego (*downlink* ou *uplink*) entre STAs e AP, e também a quantidade de STAs transmitindo com diferentes taxas. No mesmo trabalho foram definidos critérios de priorização de acesso ao meio que beneficiam as STAs de maior taxa, a fim de compensar o longo período que as STAs de menor taxa ocupam o canal em redes 802.11. Implementou-se tais critérios em um mecanismo de priorização, utilizando-se a extensão IEEE 802.11e. Verificou-se que o mecanismo reduz os efeitos da anomalia em cenários com variação do sentido de tráfego (*downlink* ou *uplink*) e/ou a quantidade de STAs transmitindo em diferentes taxas. Avaliou-se o mecanismo utilizando-se uma fórmula de índice de justiça, com a qual foi constatada a eficiência dos algoritmos propostos em sua tarefa de atribuir para as STAs vazões proporcionais aos seus tempos de ocupação do canal.

## Referências

- Bianchi, G. (2000). Performance analysis of the ieee 802.11 distributed coordination function. Em *JSAC Wireless series*, vol. 18.
- Carvalho, C. B. e de Rezende, J. F. (2004). Seleção dinâmica de parâmetros de qos na resolução da anomalia de performance do ieee 802.11b. Em *Simpósio Brasileiro de Telecomunicações - SBT'04*, Belém, Brasil.
- Filho, J. C. M., de Rezende, J. F. e Pirmez, L. (2003). Seleção dinâmica de parâmetros de controle de qualidade de serviço em redes ieee 802.11 infra-estruturadas. Em *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores - SBRC'2003*, Natal, Brasil.
- Heusse, M., Rousseau, F., Berger-Sabbatel, G. e Duda, A. (2003). Performance anomaly of 802.11b. Em *IEEE INFOCOM 2003*.
- Mangold, S., Choi, S., Hiertz, G. R. e Walke, B. (2003). Analysis of ieee 802.11e for qos support in wireless lans. *IEEE Wireless Communications*, 10(6).
- P.Chatzimisios, V.Vitsas e A.C.Boucouvalas (2002). Throughput and delay analysis of ieee 802.11 protocol. Em *IEEE International workshop on network Appliances (IWNA)*, Liverpool, England.
- R.Jain, W. H. e D.Chiu (1984). A quantitative measure of fairness and discrimination for resource allocation in shared computer systems. Em *DEC-TR-301*.
- Xiao, Y. e Rosdahl, J. (2002). Throughput and delay limits of ieee 802.11. *IEEE Communications Letters*, 6(8):355–357.