Controle de Admissão e Controle de Carga para Redes IEEE 802.11 Infra-Estruturadas*

José Coelho de Melo Filho(1) , José Ferreira de Rezende(2) ,
Luci Pirmez(1), Luiz Fernando Rust da Costa Carmo(1)

(1) Núcleo de Computação Eletrônica (NCE)/UFRJ
(2) Grupo de Teleinformática e Automação (GTA)/COPPE/UFRJ

Resumo

Este trabalho investiga a coexistência de fluxos com diferentes requisitos de Qualidade de Serviço em redes de acesso sem fio IEEE 802.11. São utilizados dois esquemas: um controle de admissão baseado em medidas e um controle de carga para tráfego de melhor esforço, este último baseado na manipulação dinâmica de parâmetros da camada MAC em modo DCF. São realizadas simulações para comprovar a validade do uso conjunto destes esquemas em um ponto de acesso 802.11, visando oferecer níveis de serviço para cada tipo de tráfego e manter alto o nível de utilização da rede.

Abstract

This work investigates the coexistence of flows with different Quality of Service requirements in IEEE 802.11 wireless access networks. Two schemes are used: a measurement-based admission control and a rate control for best-effort traffic, based on dynamic alteration of MAC parameters in DCF mode. Simulations are performed to prove the validity of the use of both schemes in an 802.11 access point, intending to offer service levels for each traffic type and to keep high network utilization levels.

Palavras-chave: Comunicação sem fio, redes 802.11, QoS, Acesso sem fio, Controle de Admissão.

1 Introdução

O padrão para redes locais sem fio 802.11 [1], do IEEE (*Institute of Electrical and Eletronics Engineers*), deverá desempenhar um papel importante como tecnologia de acesso sem fio às redes IP, particularmente à Internet. Ele está cada vez mais presente nas redes de *campus* de universidades de países desenvolvidos, oferecendo uma constante possibilidade de acesso à rede com suporte à mobilidade. Existem ainda provedores que distribuem pontos para acesso público em locais de grande concentração de usuários, conhecidos como *hotspots*, como centros de convenções, salas de espera de aeroportos e hotéis.

Comparado com outras opções de acesso sem fio, como as redes celulares de 3^a geração ("Redes 3G"), as redes de acesso 802.11 têm como vantagens: a) baixo custo de instalação, com o uso de pontos de acesso baratos, em relação ao preço de uma Estação Radio-Base (ERB) celular; b) taxas de transmissão de dados mais altas, pois enquanto o UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*) - versão 3G das redes celulares padrão GSM - fica restrito a 2 Mbps, a versão 802.11b [2] oferece taxas de 1 a 11 Mbps, e a versão 802.11a [3] vai até 54 Mbps; c) solução baseada em IP de ponta a ponta da conexão, sem necessidade de conversão de protocolos.

No entanto, este padrão não possui mecanismos para fornecer QoS às aplicações, o que é uma deficiência crítica. Para corrigir isso, está sendo desenvolvida pelo IEEE a especificação 802.11e, como uma extensão à especificação original, criando estes mecanismos. A idéia é que um ponto de coordenação, normalmente o ponto de acesso, emita pacotes especiais contendo um conjunto de parâmetros de QoS (*QoS Parameter Set*), reconfigurando dinamicamente os parâmetros de controle de acesso ao meio (MAC) das interfaces de rede usadas nas estações. Dessa forma, ele altera a carga oferecida à rede por estas estações, seguindo regras de diferenciação de serviços e prioridades de acesso.

Mesmo com esses mecanismos disponíveis, permanece em aberto a questão de como o conjunto de parâmetros deve ser composto para cada situação particular de carga e quando eles devem ser alterados, de maneira a promover a eficiência no uso dos recursos de comunicação da rede, e ainda manter os níveis de Qualidade de Serviço das aplicações presentes. Este trabalho representa um primeiro esforço no sentido de investigar essa questão.

O presente artigo está organizado da seguinte forma. Na Seção 2, o padrão 802.11 é apresentado. Na Seção 3,

*Este trabalho foi realizado com recursos do NCE, CNPq, CAPES, COFECUB e FAPERJ.

são descritas algumas técnicas de diferenciação de serviços em redes 802.11 e como elas podem ser usadas em controle de carga. Na Seção 4 é apresentado o esquema de Controle de Admissão Baseado em Medidas utilizado. Na Seção 5, são apresentados os resultados de simulações e avaliações do uso conjunto desses esquemas. Por fim, a Seção 6 traz as conclusões.

2 Visão Geral do IEEE 802.11

2.1 Arquitetura e Camada Física

O padrão IEEE 802.11 [1] foi criado em 1999, para as redes locais sem-fio, e especifica a camada física e a sub-camada de controle de acesso ao meio (MAC) dessas redes.

No 802.11, o conjunto básico de serviço (*Basic Service Set* - BSS) é o bloco fundamental de construção da arquitetura [1]. Um BSS é definido como um grupo de estações (STAs) que estão sob o controle direto de uma única função de coordenação (Seção 2.2), que determina quando uma estação pode transmitir e receber dados. Quando as estações comunicam-se umas com as outras diretamente [4], sem contar com nenhuma infra-estrutura, a rede sem fio é chamada *ad-hoc*. Quando as estações dispõem de uma infra-estrutura para se comunicar com outros BSS fora de seu alcance ou com redes fixas, a rede 802.11 é chamada de infra-estruturada. Nesse caso é utilizado um ponto de acesso (*AP - Access Point*) que interliga as estações sem fio à infra-estrutura e provê outras funções como o suporte à mobilidade. O foco do presente trabalho está nas redes 802.11 infra-estruturadas.

O 802.11 define três tipos de camada física: FHSS (*Frequency Hopping Spread Spectrum*), DSSS (*Direct Sequence Spread Spectrum*) e infravermelho. Todas provêem um sinal de avaliação de canal livre (*Clear Channel Assessment signal* - CCA), utilizado pelo MAC (Seção 2.2) para indicar se o meio está livre. Cada camada física oferece uma taxa de 1 ou 2 Mbps. A taxa básica de 1 Mbps é gerada usando modulação DBPSK e a de 2 Mbps usando DQPSK [1]. Os padrões 802.11a [3] e 802.11b [2] alteram a camada física do 802.11 [1] para proverem taxas de transmissão mais altas. O padrão 802.11b [2] especifica taxas de 5,5 e 11 Mbps. Um protocolo de convergência de nível físico permite que estações 802.11 e 802.11b se comuniquem utilizando as taxas de 1 e 2 Mbps. O 802.11a [3] pode prover taxas de até 54 Mbps, utilizando uma técnica mais avançada de multiplexação, a multiplexação por divisão ortogonal em freqüência (OFDM). As estações 802.11a não são compatíveis com as 802.11 ou 802.11b.

2.2 O MAC 802.11 - Modo DCF

A sub-camada MAC do 802.11 define dois tipos de funções de acesso ao meio: a função de coordenação distribuída (*Distributed Coordination Function* - DCF) e a função de coordenação por um ponto (*Point Coordination Function* - PCF). O PCF é opcional, mas o DCF é obrigatório. No modo PCF, um ponto de coordenação controla o acesso ao meio, através de consulta periódica (*polling*) a cada estação, proporcionando uma oportunidade de transmitir sem contenção. O modo PCF está fora do escopo deste trabalho. Maiores informações sobre esse modo podem ser encontradas em [1, 4, 5].

O DCF é o mecanismo básico de acesso ao meio no 802.11. Trata-se de um protocolo de acesso múltiplo com detecção de portadora, semelhante ao CSMA/CD usado nas redes IEE 802.3 (*Ethernet*). Antes de iniciar a transmissão, um nó que queira transmitir dados "escuta" o meio por um período fixo de tempo, para detectar se ele está ocupado, transmitindo caso não esteja ou aguardando um tempo aleatório caso esteja. A diferença para o CSMA/CD é que a detecção de colisão não é realizada, por limitações técnicas [6]. Essa função é substituída por um mecanismo de prevenção de colisão com reconhecimento positivo (ACK), e o método é conhecido como (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance* - CSMA/CA).

Existem dois esquemas de funcionamento do DCF no padrão [1]: o esquema básico que usa CSMA/CA (obrigatório) e outro (opcional) que usa também pedidos (*Request To Send* - RTS) e permissões (*Clear To Send* - CTS) para transmitir dados.

No esquema básico, uma estação que quer transmitir ouve o meio, e caso ele esteja livre após um determinado tempo chamado DIFS (*Distributed Interframe Space*), a estação transmite. Caso contrário, a transmissão é adiada e inicia-se um processo de *backoff*, no qual a estação escolhe um valor aleatório entre zero e o tamanho da janela de contenção (CW), multiplica esse valor pelo tempo de duração de um slot (*slottime*) e cria um temporizador de *backoff*. Esse método é conhecido como *backoff* exponencial binário. O temporizador passa a ser decrementado periodicamente quando o meio está livre. O período de decremento é dado pelo parâmetro *slottime* do MAC, que é definido no padrão. O temporizador é parado quando alguma transmissão é detectada no meio, reiniciando quando o meio fica livre novamente. Quando finalmente o temporizador expira, a estação envia o seu quadro. O esquema básico do DCF é apresentado na Figura 1.

A estação receptora usa o método de verificação cíclica (CRC) para detectar erros e, caso o pacote pareça estar correto, envia após um tempo chamado espaço curto entre quadros (*Short Interframe Space* - SIFS) um quadro de reconhecimento positivo (ACK). SIFS é sempre menor que DIFS, ou seja, a estação receptora sempre ganha a disputa com outras estações que queiram transmitir quadros de dados quando é para enviar o ACK (Figura 1). Caso a estação transmissora não receba o ACK no tempo esperado, deduzirá que o quadro colidiu, escalonará uma retransmissão e entrará no processo de *backoff* descrito anteriormente.

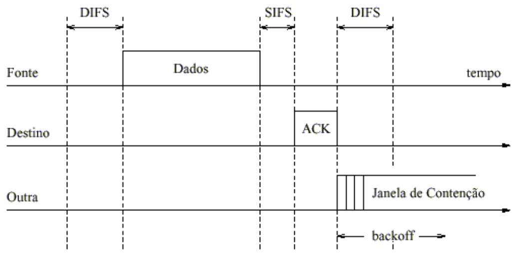

Figura 1: Esquema básico de acesso no DCF.

Para reduzir a probabilidade de colisões repetidas de estações tentando transmitir, a janela de contenção começa com um valor mínimo dado por CW_{min} (igual a 31 no 802.11b DSSS) e a cada transmissão não sucedida a janela de contenção aumenta para uma próxima potência de 2 menos 1, até que seja atingido um valor máximo predefinido chamado CW_{max} (1023 no 802.11b DSSS). Caso um número máximo de tentativas de transmissões seja alcançado (7 no esquema básico ou 4 com RTS/CTS), o pacote é descartado. Se a transmissão foi bem sucedida e há mais algum pacote a transmitir, o transmissor entra então na fase de *backoff*, para evitar a captura do meio.

O segundo esquema de acesso usado no DCF (Figura 2), opcional, inclui quadros RTS e CTS para evitar problemas gerados por terminais "escondidos", típico da comunicação sem fio [1]. Nesse esquema, os pacotes RTS e CTS contém informações a respeito do nó de destino e de um tempo relativo ao envio do pacote de dados e de seu respectivo ACK. A estação transmissora envia um RTS ao receptor após DIFS segundos de meio livre, antes da transmissão do quadro de dados, a fim de reservar o meio (Figura 2). O receptor, caso esteja pronto para receber, responde com um CTS após o meio estar livre por um tempo SIFS. Ao receber o CTS e esperar o meio estar livre por SIFS segundos (Figura 2), o transmissor inicia o envio do quadro de dados e passa a aguardar o ACK correspondente, como no DCF básico. Caso não receba o CTS, o transmissor entra na fase de *backoff* e retransmite o RTS.

[1] Esse problema surge, por exemplo, quando uma estação B é capaz de receber quadros de dois diferentes transmissores, A e C, porém estes transmissores estão fora do alcance um do outro e não podem se comunicar entre si. Diz-se que A está escondido para C e vice-versa. Nesse caso, o transmissor A pode achar que o meio está livre mesmo que C esteja transmitindo, o que resultará em colisão no receptor B.

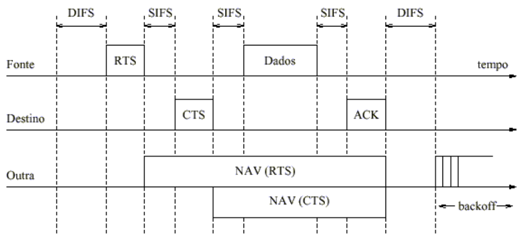

Figura 2: DCF utilizando RTS e CTS.

Todas as estações que ouvirem o RTS ou o CTS irão utilizar a informação da duração da transmissão contida nesses quadros (incluindo a recepção do ACK pelo transmissor) para atualizar o seu vetor de alocação de rede (*Network Allocation Vector* - NAV), que é utilizado para a detecção virtual da portadora (Figura 2). Com essa informação, as demais estações não envolvidas na transmissão atual irão evitar fazer acesso ao meio no período de tempo reservado, não importando se o CCA indique que o meio está livre. Desse modo, qualquer terminal escondido poderá adiar a sua transmissão para evitar colisões. O uso de RTS e CTS é controlado por estação através de um limiar de RTS ($RTS_{threshold}$); a estação usará RTS somente na transmissão de quadros com tamanhos maiores que esse limiar.

3 MAC 802.11 e QoS

3.1 Diferenciação de Serviços no MAC 802.11

O problema de provisionamento de Qualidade de Serviço no 802.11 tem sido muito estudado recentemente. Rubinstein e Rezende [5] resumem alguns dos problemas apontados na literatura, relacionados à utilização do TCP em redes 802.11, em particular a injustiça no compartilhamento da banda passante disponível [7, 8, 9, 10] e a instabilidade provocada no TCP [10]. Diversas propostas de diferenciação de serviços foram elaboradas [9, 11, 12, 8]. Geralmente elas envolvem um ou mais parâmetros básicos do MAC 802.11 para promover diferenciação, alterando a forma com que cada uma das estações acessa o meio e estabelecendo prioridades de acesso entre elas. Algumas técnicas foram elaboradas para o modo DCF e outras para o modo PCF. Este trabalho enfoca as técnicas voltadas para o modo DCF. Nesse modo, as técnicas envolvem basicamente o tamanho do DIFS, o cálculo do backoff, o tamanho máximo dos pacotes ou o uso do RTS/CTS (para maiores detalhes, ver [5] e suas referências). A seguir será visto como cada um destes parâmetros promove diferenciação.

Conforme explicado na Seção 2.2, o DIFS controla o tempo que a estação sempre espera antes de tentar iniciar uma transmissão. Uma estação de baixa prioridade, que use um valor de DIFS maior, terá menor probabilidade de encontrar o meio livre comparada com outra de alta prioridade, que esteja usando um DIFS menor.

O procedimento de *backoff* também controla o tempo que uma estação espera antes de tentar uma transmissão. A técnica consiste na escolha de intervalos diferenciados para as janelas de contenção de cada estação, controlados pelos parâmetros CWMin e CWMax do MAC. Uma estação com CWMin menor tenderá a escolher valores para o temporizador menores que outra com CWMin maior. Esperando mais tempo, a segunda estação terá menos chances de obter o meio que a primeira, ficando portanto com prioridade mais baixa. O efeito é similar à alteração do DIFS, com a diferença que o DIFS é uma parte determinística da espera, enquanto o tempo de *backoff* é probabilístico.

O tamanho do quadro também promove diferenciação, uma vez que a disputa pelo acesso é realizada quadro a quadro. Estações com maior prioridade utilizam quadros de maior tamanho nas suas transmissões, garantindo um maior tempo de utilização do meio cada vez que esta estação ganha a disputa. No entanto, quadros maiores estão mais sujeitos a erros, reduzindo a eficácia deste mecanismo em meios com taxas altas de erros [11].

A técnica baseada no limiar de RTS consiste na utilização ou não da reserva do meio através do *handshake* RTS/CTS. Estações com valores de limiares superiores ao tamanho dos pacotes de um determinado fluxo não utilizarão RTS/CTS e com isso terão uma maior probabilidade de colisão e assim uma menor prioridade.

Algumas dessas técnicas podem ser utilizadas para promover também uma diferenciação por fluxo (ou categoria de tráfego) ou até mesmo por pacote, e não apenas por estação. O DIFS e o *backoff* podem ser usados, por exemplo, para diferenciação de fluxos distintos de uma mesma estação, como proposto no esquema do VDCF ou Virtual-DCF [13, 14]. Neste esquema, dentro de uma mesma estação existem vários "MACs virtuais", um para cada categoria de tráfego, usando filas diferentes e valores de DIFS e CWMin também distintos. Os conflitos entre estes MACs virtuais nas tentativas de transmissão são resolvidos internamente pela estação, com base na prioridade de cada categoria de tráfego. Já em [12], é criado um esquema distribuído de agendamento de prioridades onde a prioridade do próximo pacote a ser transmitido pela estação é informada às outras por meio dos pacotes de RTS, CTS, dados e ACK. Assim, pacotes de uma mesma estação ou até de um mesmo fluxo podem ser transmitidos com prioridades diferentes.

3.2 A Extensão 802.11e

Atento às necessidades de padronização e aos desenvolvimentos recentes na área de QoS em redes 802.11, o IEEE criou o Grupo de Tarefas E dentro do Grupo de trabalho 11 para especificar uma extensão ao padrão que introduzisse mecanismos de provisão de QoS no MAC 802.11. Esse trabalho ainda está em andamento, de forma que as definições que serão aqui apresentadas estão sujeitas a mudanças.

No 802.11e, as estações (STAs) são chamadas de QSTAs (*QoS Station*), o ponto de acesso de QAP (*QoS Access Point*) e o BSS de QBSS (*QoS Basic Service Set*). O ponto de acesso acrescenta às suas funções a coordenação de QoS dentro do QBSS. O 802.11e incorpora os conceitos de mac virtual do VDCF [13, 14], onde várias instâncias do MAC, uma para cada categoria de acesso, operam em paralelo dentro de uma mesma estação, usando valores diferentes de DIFS (chamados de *AIFS - Arbitration Interframe Space*) e CWMin. Cada estação pode suportar até 8 categorias de acesso.

Um conjunto de parâmetros de QoS (*QoS Parameter Set*) é usado para informar às QSTAs os parâmetros necessários para o estabelecimento da funcionalidade de QoS. Esse conjunto, que é transmitido pelo AP, encapsulado em pacotes de controle, fornece o valor de AIFS(i) e do CWMin(i) a ser usado para cada categoria de acesso. Ele pode ser usado para estabelecer políticas, modificar políticas ao admitir novos fluxos ou adaptar-se às mudanças na carga oferecida à rede.

Um conceito importante no 11e é o de oportunidade de transmissão, ou TxOP (*Transmission Opportunity*). Uma TxOP é definida como um intervalo de tempo no qual uma estação tem o direito de iniciar transmissões sem ter que disputar o meio. Ela é marcada por um tempo de início e uma duração. Durante uma TxOP, uma estação pode enviar vários quadros em rajada. Para evitar captura do meio, a duração da rajada não pode ultrapassar um limite máximo. Assim, um terceiro parâmetro, o *TxOP Limit*, também é transmitido no *QoS Parameter Set*. Diferentemente do AIFS(i) e do CWMin(i), este valor é configurado para todo o QBSS, e não por categoria de acesso.

3.3 Controle de Carga

A alteração nos parâmetros do MAC transmitidos no *QoS Parameter Set* pode controlar a carga imposta à rede por uma determinada fonte. O tamanho do DIFS é definido por $SIFS + xDIFS * slottime$. No 802.11b, xDIFS é igual a 2, o que dá um tempo de espera de $50\mu s$, já que SIFS é $10\mu s$, e *slottime* é $20\mu s$ nesse padrão. A Figura 3 mostra o efeito da manipulação do parâmetro de tamanho do DIFS sobre uma fonte FTP que usa pacotes de 576 bytes. Nesse cenário, o valor do fator de multiplicação (que aqui está sendo chamado de xDIFS) é decrementado de um a cada 20 segs, indo de 2 até 30. O tamanho mínimo da janela de contenção (CWMin) é mantido constante e igual a 31. Verifica-se uma redução gradual à medida que o tamanho do DIFS vai sendo alterado.

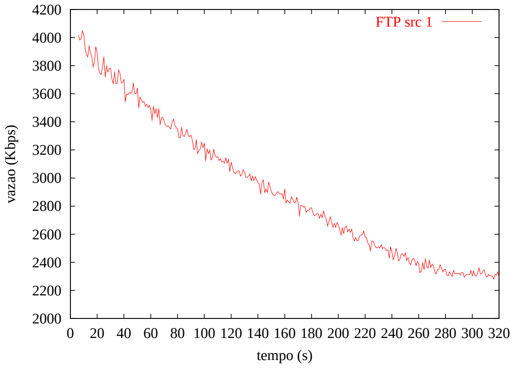

Figura 3: Vazão obtida por uma fonte FTP(576 bytes) com alterações sucessivas do xDIFS, variando de 2 a 30.

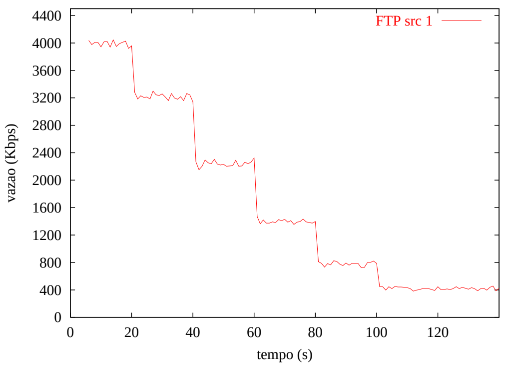

Figura 4: Vazão obtida por uma fonte FTP(576 bytes) com alterações sucessivas do CWMin, variando de 31 a 1023.

A Figura 4 mostra o efeito da manipulação do parâmetro de tamanho da janela de contenção (CWMin) no mesmo cenário, com xDIFS fixo em 2 e o CWMin variando de 31 a 1023. Como o CWMin só pode assumir valores que sejam potência de 2, ele é dobrado a cada 20 segs.

Percebe-se uma variação em degrau da vazão obtida pela fonte FTP, em contraste com a variação suave verificada no caso anterior. Isso pode ser explicado da seguinte forma: Incrementar o valor de xDIFS significa acrescentar um *slottime* ao tempo de espera, ou 20μs, fazendo o DIFS ir para 70, 90, 110μs e assim por diante. Isso altera o espaçamento entre pacotes de forma linear, acrescentando 20μs a cada passo, o que reduz a taxa de dados suavemente. Já o tamanho médio do tempo de espera de *backoff, ou backofftime* é *(CWMin/2) * slottime*, pois o valor de CW é escolhido aleatoriamente no intervalo entre 0 e CWMin. Se CWMin é 31, então a espera média durante um backoff é de 16*20 = 320μs. Se o CWMin é dobrado, este valor também dobra, passando para 640μs, acarretando um impacto maior no espaçamento entre pacotes e conseqüentemente reduzindo a taxa de dados de forma mais drástica.

4 Controle de Admissão Baseado em Medidas

4.1 Conceitos Básicos

O Controle de Admissão (*AC - Admission Control*) é a função desempenhada pelos nós da rede, de forma centralizada ou distribuída, no intuito de determinar se um novo fluxo ou chamada pode ser aceito em uma rede com recursos limitados. O objetivo é a preservação da QoS dos fluxos já existentes na rede, quando da chegada de uma nova solicitação. Um novo fluxo só será admitido se, por algum critério, não degradar as garantias (quantitativas ou qualitativas) dos demais fluxos. A definição de como empregar tal critério é a principal diferença entre os vários algoritmos de AC existentes.

O Controle de Admissão deve ainda buscar maximizar os níveis de utilização da rede e ter baixo custo computacional, já que ele deve oferecer uma resposta em tempo real. Existem duas abordagens principais de Controle de Admissão: Baseado em Parâmetros ou Baseado em Medidas.

Os métodos baseados em parâmetros (*PBAC-Parameter-Based Admission Control*) usam descrições de tráfego previamente estabelecidas para computar os recursos de rede ainda disponíveis e decidir sobre a admissão de novos fluxos. A caracterização dos fluxos pode seguir modelos determinísticos ou estocásticos. Nesse último caso busca-se um maior ganho na multiplexação estatística. Os métodos baseados em parâmetros têm geralmente baixo custo computacional e oferecem garantias mais restritas de qualidades (em termos de retardo e perdas), sendo mais adequados a aplicações de tempo real; no entanto, não maximizam os níveis de utilização da rede [15, 16]. Além disso, existem dois problemas [17]: a dificuldade em se caracterizar o tráfego de fontes com comportamento em rajadas, o que pode levar a erros que superestimam ou subestimam a necessidade real de recursos, e a dificuldade de policiar este tráfego estatisticamente modelado para evitar que o controle de admissão seja "enganado". Maiores detalhes sobre este tipo de controle de admissão podem ser encontrados em [18].

Os métodos baseados em medidas (*MBAC - Measurement-Based Admission Control*), por outro lado, não requerem uma caracterização precisa do tráfego. Eles usam esta informação apenas para os novos fluxos, e buscam caracterizar os fluxos já admitidos usando estimativas medidas diretamente sobre o tráfego real. As decisões são feitas comparando-se os parâmetros do novo fluxo com as medidas tomadas na rede a cada instante. Isso ameniza os problemas citados acima com relação à imprecisão da caracterização de fluxos, mas diminui a capacidade do controle de admissão de oferecer garantias absolutas a aplicações pouco tolerantes às variações do retardo e da taxa de perdas.

Grossglauser e Tse [17] ressaltam ainda 3 questões a serem consideradas na construção de esquemas de MBAC: o risco de erros de estimativa (que leva a erros nas decisões de admissão), a influência da dinâmica de chegada e partida de fluxos nessas estimativas e a quantidade de memória (informação sobre o "passado" dos fluxos) a ser usada no cálculo.

O MBAC tem dois componentes básicos: um mecanismo de medição, usado para estimar a carga atual da rede, e um algoritmo de decisão, que usa a estimativa levantada para decidir se o fluxo será ou não aceito. Ambos podem usar técnicas variadas. Jamin et al [15] citam 3 técnicas usadas nos mecanismos de medição - janelas de tempo (*Time-Window*), amostras de pontos (*Point Samples*) e média exponencial (*Exponencial Averaging*) - e 4 técnicas para algoritmos de decisão - soma simples (*Simple Sum*), soma medida (*Measured Sum*), região de aceitação (*Acceptance Region*) e banda equivalente (*Equivalent Bandwidth*).

4.2 Necessidade do Controle de Admissão em Redes 802.11

Para ilustrar a necessidade de um controle de admissão em redes 802.11, foram realizadas simulações com fontes de voz utilizando o modelo descrito na Seção 5.1. A Figura 5 mostra a evolução do retardo experimentado pelos pacotes de voz na fila do ponto de acesso de uma rede 802.11 sem controle de admissão. As barras verticais representam o percentil 95, coletado pelo estimador, do conjunto de valores de retardo observado pelos pacotes de voz que passam pela fila de transmissão sem fio (IfQ) do ponto de acesso. Esses valores são referentes ao tráfego no sentido do nó fixo para os móveis, chamado de sentido de descida ou *downlink*(DL).

Observa-se que, acima de 50 fontes, o retardo evolui rapidamente para valores acima de 100 ms. Estes valores altos são inaceitáveis, considerando-se que o tráfego ainda sofrerá retardo nos outros enlaces da rede e no processamento no nível de aplicação, e que a soma de todas estas parcelas de retardo deveria se situar entre 150 e 400 ms para que a qualidade de voz seja aceitável (por exemplo, no UMTS[19]). Isso comprova que o número máximo de fontes de voz na rede 802.11 deve ser controlado por alguma função de admissão. Neste trabalho, será considerado aceitável um retardo de no máximo 50 ms no enlace sem fio.

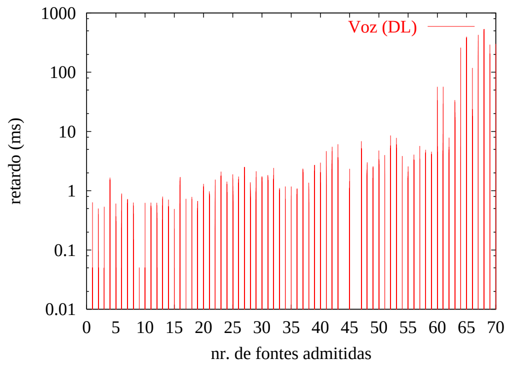

Figura 5: Amostras de retardo coletadas no ponto de acesso, em função do número de fontes presentes na rede (sem RTS\CTS).

A Figura 6 ilustra a mesma situação, porém com o uso do mecanismo de RTS\CTS. Neste caso, o retardo observado é ainda maior que no caso anterior, por causa da sobrecarga adicionada pelos pacotes de RTS e CTS. Se for assumido que na área de um *hotspot* os terminais estarão próximos uns dos outros, minimizando a ocorrência de terminais escondidos, então os benefícios advindos da reserva de meio via quadros RTS e CTS não compensam a sobrecarga que eles acrescentam no caso de pacotes pequenos.

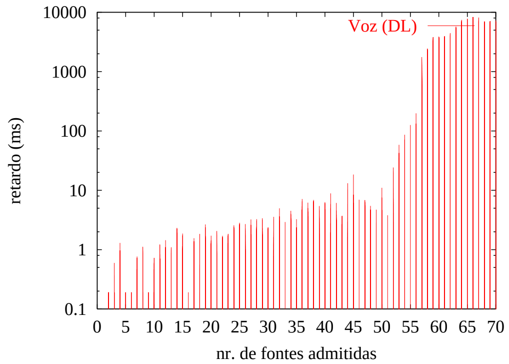

Figura 6: Amostras de retardo coletadas no ponto de acesso, em função do número de fontes presentes na rede (com RTS\CTS).

4.3 Descrição do Controle de Admissão Implementado

Neste trabalho foi implementado um controle de admissão baseado em medidas para uso em redes 802.11[2]. O algoritmo de decisão utilizado é o de soma medida. Nesse algoritmo, uma medida feita diretamente na rede é usada para estimar a carga do tráfego existente. Um

[2]Embora o MBAC não seja adequado ao tráfego de voz, por não fornecer garantias estritas de retardo, sua escolha para implementação visa adaptá-lo aos outros tipos de tráfego possíveis em uma rede 802.11, que serão explorados em trabalhos futuros.

novo fluxo será aceito se

$$V + V_f < C * p$$

ou seja, a soma da estimativa de carga (V) com a carga solicitada pelo novo fluxo (V_f) for menor que a capacidade do canal (C) multiplicada por um fator de utilização (p) pré-definido. O fator de utilização é um valor entre 0 e 1, e é usado para reduzir a probabilidade de erros da abordagem baseada em medidas, que é maior quando a utilização da rede está próxima da capacidade máxima, devido às grandes variações de retardo nessas situações. Ao ser aceito o novo fluxo, a estimativa de carga é incrementada somando-se os valores de V e V_f.

O mecanismo de medição escolhido é o de janelas de tempo, o mesmo empregado em [16]. Nesse mecanismo, um módulo estimador computa a carga média a cada intervalo de amostra. Ao final da janela de tempo T, a maior das amostras de carga obtidas nessa janela é tomada como a estimativa de carga para a janela seguinte. No decorrer de cada janela, se for obtida uma amostra de carga maior que a estimativa atual, o valor dessa amostra passa a ser considerado a estimativa válida para a janela atual. A estimativa também cresce quando um novo fluxo é admitido, somando-se a ela o valor de V_f, como descrito no parágrafo anterior. Nesse caso, uma nova janela é forçosamente iniciada.

O tamanho da janela (T) e do intervalo de amostra (S) são dois fatores importantes para o desempenho do controle de admissão [16]. O tamanho de T controla a adaptabilidade do mecanismo de medições às variações de carga. Um valor maior de T significa usar uma maior abrangência da memória de medidas feitas no passado, tornando o controle de admissão mais conservador. Isso acarreta menos violações de retardo, mas causa uma menor utilização do canal. O valor de S, por sua vez, controla a sensibilidade do mecanismo de medição às rajadas. Um valor muito pequeno de S captura mais facilmente as amostras de tamanho mais elevado, tornando o controle ainda mais conservador.

5 Simulações

5.1 Cenário

A ferramenta de simulação utilizada foi o simulador ns-2 [20], versão 2.1b8a, com modificações no código do MAC 802.11 para suportar a alteração dos parâmetros do MAC. O cenário de simulação consiste de um AP 802.11 conectado a um nó fixo por meio de um enlace de 10 Mbps, com retardo de 2 ms e fila *Drop Tail.* O ponto de acesso (AP) está localizado no centro de uma área de 350 x 350 metros, de forma que todos os nós móveis contidos na área estejam a uma distância menor que 250 metros, que é o alcance padrão no NS para nós móveis. O enlace sem fio tem largura de banda de 11 Mbps. O cenário simula a situação de um *hotspot* 802.11b fornecendo acesso à rede fixa, por exemplo, uma rede IP ou uma rede celular 2,5 ou 3G com acesso a redes IP. Neste último caso, o 802.11 estaria sendo utilizado na RAN(*Radio Access Network*) da arquitetura 2,5\3G, como uma alternativa de acesso de curto alcance e banda larga. A Figura 7 ilustra essa configuração. O tempo de simulação é de 1200 segundos. As simulações são feitas sem o uso de RTS\CTS.

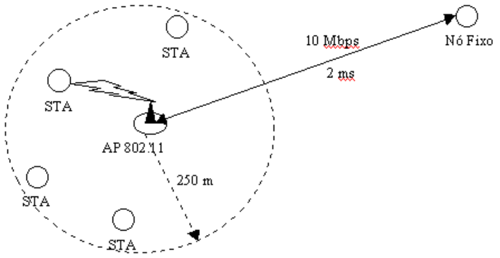

Figura 7: Cenário usado nas simulações.

O cenário explora a coexistência de fontes de voz com conexões TCP de longa duração. Uma fonte FTP é iniciada no primeiro nó móvel, a partir de 2,5 segs, e dura até o final de cada simulação. Ela emprega pacotes de 576 bytes, e o nó que gera o tráfego FTP está inicialmente configurado com xDIFS=2 e CWMin=31, seguindo a especificação 802.11b.

As fontes de voz chegam a um intervalo que segue uma distribuição uniforme, indo de 0 a 7 segs[3]. A duração de cada uma delas segue uma distribuição exponencial com média de 300 segs. Os nós móveis que iniciam o tráfego de voz empregam um xDIFS=2 e CWMin=7. Estes valores devem ser os menores possíveis, uma vez que influenciam diretamente no retardo. Para simular o padrão conversacional de cada conexão de voz, foi empregada uma fonte *onoff* na direção do nó móvel para o nó fixo (sentido de subida ou *uplink*) e outra na direção do nó fixo para o móvel (sentido de descida ou *downlink*), que são iniciadas com uma diferença de até 1 segundo. Essa bidirecionalidade, embora pouco explorada em outros estudos, é necessária para tornar a simulação o mais próxima possível da situação real. Isso porque, no caso do 802.11, o tráfego no sentido de descida compete pelo meio sem fio com o tráfego de subida, o que não ocorre em outras tecnologias de rede. As fontes geram dados a uma taxa de 64 kbps, com pacotes de 210 bytes, e têm períodos de atividade e de silêncio seguindo distribuições exponenicais com médias 1,2 e 1,8 segs, respectivamente.

[3] Em [16], o intervalo entre chegadas segue um distribuição exponencial com média 400 ms. No entanto, isso leva a uma taxa de chegada de fluxos muita alta e pouco razoável para o caso em questão, sendo mais adequada a estudos de redes de núcleo.

Isso equivale a um codificador PCM (*Pulse Code Modulation*) com supressão de silêncio.

O critério de admissão das fontes de voz leva em conta a carga média gerada pelas fontes, a estimativa de carga fornecida pelo estimador e o percentual de utilização desejado para o enlace com o nó fixo, conforme já explicado na Seção 4.3. Dois detalhes merecem atenção especial: o primeiro diz respeito à carga média da fonte, cujo valor é usado como a carga solicitada pelo novo fluxo (V_f). Uma vez que todas as medidas são feitas no nível MAC, essa carga deve ser corrigida a fim de contabilizar a sobrecarga inserida pelos cabeçalhos dos níveis inferiores à aplicação. Ela deve ainda ser somada ao tráfego dos reconhecimentos (ACKs) do nível da sub-camada MAC, já que para cada pacote recebido pelo MAC é emitido um ACK no sentido contrário.

O segundo diz respeito ao percentual de utilização do enlace com o nó fixo (parte "com fio" da topologia). Esse percentual deve levar em conta o fato de que o tráfego de voz é bidirecional, e deve ainda considerar a capacidade máxima do canal sem fio para um dado tamanho de pacote (no caso, 210 bytes). Nas simulações realizadas, verificou-se que acima de 3,5 Mbps o retardo dos pacotes de voz cresce rapidamente, sinalizando que a capacidade do canal sem fio para o tamanho de pacote empregado foi ultrapassada. Assim, o percentual de utilização máximo foi estabelecido em 17% para cada direção, o que irá gerar um tráfego de até 3,4 Mbps tanto na parte fixa quanto na parte sem fio da topologia, deixando uma pequena banda ainda disponível para a conexão FTP. Embora pareça que o enlace fixo está sendo sub-utilizado, valores maiores para esse percentual apenas farão com que o controle de admissão aceite mais fontes, que conseqüentemente estarão sujeitas a níveis de retardo maiores no enlace sem fio (Isso revela que o verdadeiro gargalo dessa configuração é o meio sem fio e seu protocolo de acesso, e não o enlace fixo de 10 Mbps).

Pressupõe-se que esteja disponível alguma forma de sinalização entre nó móvel e ponto de acesso, a fim de que a requisição de conexão e a resposta do controle de admissão sejam enviadas.

5.2 Verificação do Funcionamento do Controle de Admissão

Inicialmente foi feita uma simulação para verificar se a implementação do MBAC escolhido está correta e apresenta, para o caso sem fio, comportamento similar ao caso tradicional de redes fixas. O objetivo é verificar seu funcionamento para que possa ser utilizado em conjunto com o controle de carga.

Essa simulação foi realizada somente com as fontes de voz, sem a presença do tráfego FTP. No mecanismo de medição foi empregado um tamanho de janela e um intervalo de amostra de 4,0 e 0,4 segundos, respectivamente. A carga média do tráfego de voz, medida pelo estimador a cada intervalo de amostra, é dada pela soma dos bytes dos pacotes de voz que passaram pela fila de transmissão sem fio (IfQ) do AP no intervalo, dividida pelo tamanho do intervalo (0,4 segs). A Figura 8 mostra a evolução da carga de voz medida pelo estimador ao longo da simulação[4].

O controle de admissão admitiu um total de 148 fontes de voz durante os 1200 segs da simulação. O número máximo de fontes simultâneas que satisfaz as restrições de retardo para esse cenário (calculado em 41 fontes) foi atingido por volta dos 173 segs. A média da estimativa de carga de 200 a 1200 segundos é de 1299,724 kbps, 76.45% dos 1700 Kbps pretendidos inicialmente. Isso mostra que o controle de admissão foi conservador e pode ainda ser aperfeiçoado para promover um maior ganho na utilização do canal. O resultado está coerente com o obtido em [15], onde o algoritmo de soma medida possibilitou 79% de utilização com fontes equivalentes às usadas neste trabalho.

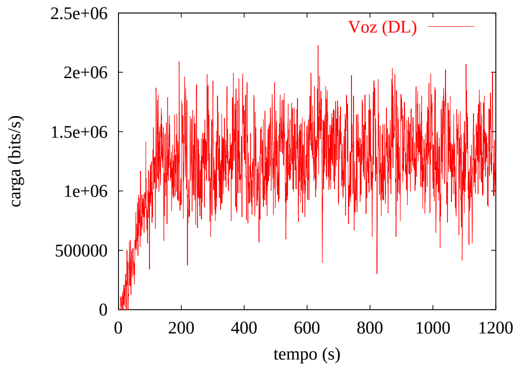

Figura 8: Carga do tráfego agregado de voz no sentido de descida, medida pelo estimador no AP em cada intervalo de amostra.

As Figuras 9 e 10 mostram, respectivamente, o retardo observado nos pacotes de voz no ponto de acesso (enviados no sentido de descida) e na primeira estação móvel (enviados no sentido de subida). Essa medida de retardo é feita nos transmissores, e é composta do retardo sofrido na fila e da latência de acesso ao meio. As duas figuras mostram que o retardo tanto no sentido de subida quanto no de descida ficou sempre abaixo de 5 ms e que o controle de admissão, apesar de ter sido conservador no uso de banda, garantiu uma simetria do retardo nos dois sentidos, mantendo uma mesma ordem de grandeza. A média desses valores, entre 200 e 1200 segs, é de 1.288 ms no ponto de acesso e de 0.329 ms no nó móvel.

[4] Essa medida reflete apenas o tráfego de voz no sentido de descida. Assumindo-se que a simetria do tráfego de subida e descida se mantém, a carga real de voz nos dois sentidos é o dobro dessa medida, somado ainda ao tráfego de pacotes de reconhecimento (ACK) do nível MAC nos dois sentidos.

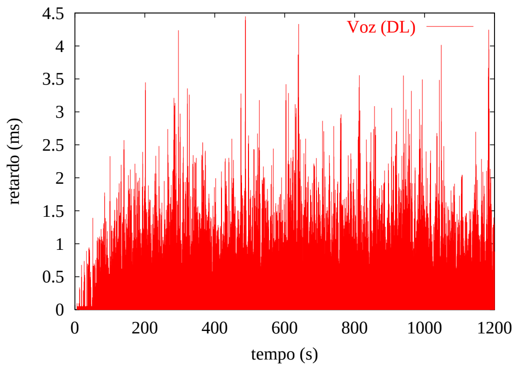

Figura 9: Retardo dos pacotes de voz do tráfego de descida, medida pelo estimador no AP em cada intervalo de amostra.

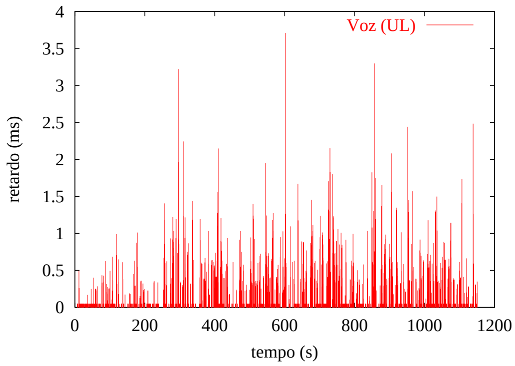

Figura 10: Retardo dos pacotes de voz do tráfego de subida, medida pelo estimador na primeira estação móvel em cada intervalo de amostra.

5.3 Coexistência do Tráfego de Voz com o FTP

Foram explorados 4 casos, visando submeter o tráfego de voz a influências variadas do tráfego FTP: 1) tráfego FTP no sentido de descida, com parametrização de QoS estática no nó que o inicia; 2) FTP no sentido de descida, com parametrização dinâmica; 3) FTP no sentido de subida, com parametrização estática; 4) FTP no sentido de subida, com parametrização dinâmica. Em cada simulação é medida a vazão obtida pela fonte FTP (com base na contagem dos pacotes de reconhecimento do TCP recebidos pela fonte, medida essa conhecida como *goodput*), o retardo dos pacotes de voz na fila de transmissão da interface sem fio do AP e de um dos nós móveis, e a carga agregada do tráfego de voz medida pelo estimador no AP.

O objetivo é que o maior número possível de fontes de voz entrem e saiam da rede, mantendo o retardo inferior a 50 ms, e ainda permitir ao tráfego FTP explorar o máximo da banda restante.

Para facilitar a observação do efeito da entrada e saída das fontes de voz sobre a vazão obtida pelo tráfego FTP, as fontes só serão admitidas até 450 segs de simulação e terão duração fixa de 550 segs. Assim podem ser observados 4 períodos: um de admissão entre 0 e 450 segs, um período estável entre 450 e 550 segs onde o número máximo de fontes de voz está presente, um período de saída das fontes, a partir de 550 segs, podendo ir até 1000 segs, e por último um período onde somente o tráfego FTP e a primeira fonte de voz estão presentes. Esta última foi usada, durante toda a simulação, para monitorar o retardo do tráfego de subida.

5.4 Resultados - Parametrização Estática

Na parametrização estática (casos 1 e 3), os parâmetros do MAC(xDIFS e CWMin) para o tráfego FTP são preestabelecidos, e não são modificados durante toda a simulação. Como os nós móveis que geram o tráfego de voz estão usando xDIFS=2 e CWMin=7, devem ser usados para o FTP valores maiores para ambos ou para pelo menos um destes parâmetros, a fim de que haja diferenciação. Por outro lado, esses valores não podem ser muito altos, porque não permitirão que o fluxo FTP explore a capacidade máxima do canal na ausência das fontes de voz. Para as simulações dos casos 1 e 3 foram usados xDIFS=2 e CWMin=31, valores *default* da especificação 802.11b. A Figura 11 mostra o percentil 95 dos valores de retardo observados pelos pacotes de voz na IfQ do ponto de acesso, coletado pelo estimador a cada intervalo de amostra, para o caso 1.

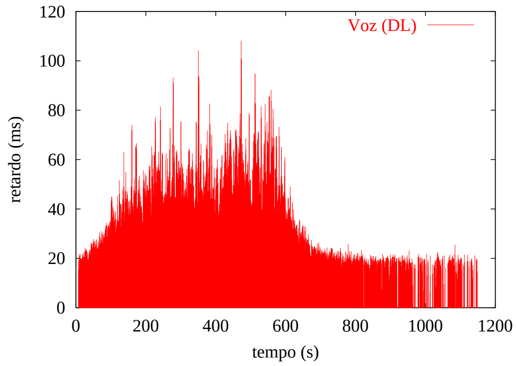

Figura 11: Retardo dos pacotes de voz na IfQ do ponto de acesso, para FTP downlink com parametrização estática.

Nessa simulação, o limite superior de retardo para voz (50 ms) é atingido antes da entrada da 38^a fonte de voz, por volta de 200 segs. A média no período entre 450 e 550 segs, quando o máximo de fontes estão presentes, é de 55.935 ms, mas ocorrem valores isolados maiores que 100 ms. Após isso, ele cai gradativamente até atingir a casa dos 20 ms, quando existem apenas o tráfego FTP e a primeira fonte de voz.

As Figuras 12 e 13 mostram, respectivamente, a carga de voz medida pelo estimador no ponto de acesso e a vazão obtida pela fonte FTP ao longo da simulação. observa-se que a vazão obtida pela fonte FTP está sempre acima de 1000 kbps e que retorna ao máximo à medida que as fontes de voz vão saindo da rede.

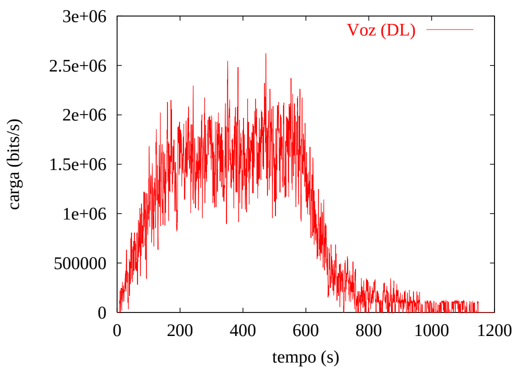

Figura 12: Carga Medida pelo Estimador no ponto de acesso - FTP downlink com parametrização estática.

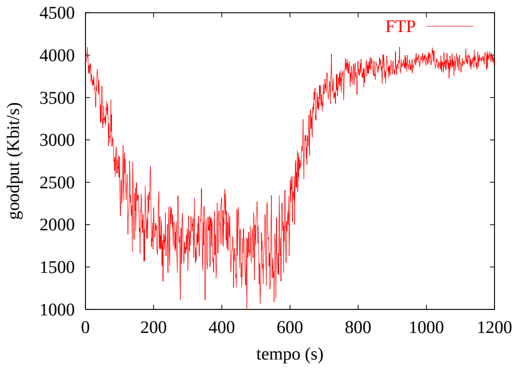

Figura 13: Vazão da Fonte FTP downlink com parametrização estática.

As simulações do caso 3 (com FTP no sentido de subida) apresentaram comportamento similar. Os gráficos não são apresentados aqui por limitações de espaço.

Com a parametrização estática ocorre um aumento gradual do retardo de voz à medida que o número de fontes aumenta. Seria possível obter níveis de retardo mais baixos, usando-se por exemplo um xDIFS=4 e CWMin=63, mas isso evitaria que a fonte de baixa prioridade (no caso, o FTP) utilizasse a capacidade máxima do meio quando não existisse tráfego de alta prioridade na rede. O ideal é que essa configuração possa ser feita dinamicamente, de acordo com a situação de carga observada a cada instante.

5.5 Resultados - Parametrização Dinâmica

Na parametrização dinâmica, os valores de xDIFS e CWMin são alterados dinamicamente durante a simulação, de acordo com a situação de carga e retardo presentes na rede. A alteração é disparada por um mecanismo de controle executado periodicamente pelo ponto de acesso, com base nas informações disponíveis (medidas de carga e retardo) sobre os diversos tráfegos que o atravessam. Esse mecanismo de controle pressupõe a existência de uma forma de comunicação dos novos parâmetros, o que será realizado no 802.11e usando-se o *QoS Parameter Set* já descrito, inserido nos quadros de *Beacon* e *Probe Response*.

Para investigar a viabilidade do controle de carga via alteração de parâmetros do MAC, é empregado um mecanismo de controle simplificado. A cada chegada de uma nova fonte, ele inspeciona os valores do retardo dos pacotes de voz no AP e da estimativa de carga do tráfego de voz, fornecidos pelo estimador. Dependendo desses valores, o mecanismo provoca a redução ou aumento da carga da fonte FTP, incrementando ou decrementando o valor de xDIFS e CWMin do FTP toda vez que uma condição é violada.

A condição para a redução de carga é simples: ela ocorre sempre que um limiar superior de retardo é ultrapassado. Esse limiar foi fixado em 30 ms, abaixo dos 50 ms máximos pretendidos, criando uma margem de segurança para permitir que o tráfego se acomode antes de atingir o limite máximo de 50 ms. Já a condição para o aumento de carga tem duas partes: ele ocorre quando o retardo está abaixo de um limiar inferior (no caso, 5 ms) *e* houve uma diferença da carga de voz da janela atual em relação à janela anterior equivalente à carga média de uma fonte de voz (o que sugere que ocorreu a saída de uma delas). Assim, a condição de aumento de carga do FTP ocorre menos freqüentemente que a de redução, evitando instabilidade do mecanismo de controle, e sua aplicação predomina no período de simulação em que as fontes de voz vão saindo uma a uma. Ou seja, o mecanismo é agressivo ao reduzir a carga do FTP, e conservador ao aumentar.

A redução de carga é feita inicialmente alterando apenas o valor do xDIFS que, como visto, promove uma redução mais suave do que a obtida pela alteração do CWMin. A cada operação de redução aplicada, o xDIFS é incrementado de uma unidade. Quando xDIFS=30, apenas o CWMin passa a ser alterado, assumindo o valor da próxima potência de 2 a cada operação. O aumento de carga inverte a última alteração de xDIFS ou CWMin feita pela operação de redução, decrementando xDIFS ou dividindo CWMin por dois.

A Figura 14, semelhante à Figura 11, apresenta o retardo medido no AP para o caso da parametrização dinâmica e FTP downlink (caso 2).

Em contraste com a situação mostrada na Figura 11, nessa simulação, a média no período entre 450 e 550 segs, quando o máximo de fontes estão presentes, é de 11.652 ms, e poucos valores ficaram acima dos 50 ms, limite máximo desejado. Observa-se ainda que o limiar de redução de carga do FTP pelo mecanismo de controle (30 ms), é atingido várias vezes, o que indica que o valor de xDIFS foi alterado repetidamente até que o retardo de voz ficasse aceitável. A demora observada entre o início das ocorrências de violação desse limiar e a efetiva redução dos níveis de retardo sugere que o mecanismo de redução de carga do FTP deve ser aprimorado.

As Figuras 15 e 16 mostram, respectivamente, a carga medida pelo estimador no ponto de acesso e a vazão obtida pela fonte FTP ao longo da simulação. No período em que todas as fontes de voz estão presentes, a vazão média do FTP é de 1799.424 kbps. Comparando-se estes gráficos com os das figuras 12 e 13, verifica-se que o efeito de redução do retardo foi obtido sem que fosse necessária uma redução drástica da vazão obtida pelo tráfego FTP.

De modo idêntico ao que ocorreu na parametrização estática (casos 1 e 3), a simulação com FTP no sentido de subida (caso 4), apresentou comportamento similar ao da simulação com FTP no sentido de descida (caso 2).

A parametrização dinâmica promove uma melhor utilização do meio por parte da fonte de baixa prioridade, por apresentar uma maior adaptabilidade à entrada e saída das fontes de alta, e também permite confinar de forma mais precisa o retardo dos pacotes de voz dentro dos limites mínimo e máximo. As violações ainda observadas indicam a necessidade de refinamento do mecanismo de controle. Diversas estratégias de controle de carga devem ainda ser testadas até que seja encontrada uma que melhor se aplique a esse caso. Por outro lado, a desvantagem trazida pela parametrização dinâmica é o aumento do esforço computacional realizado no ponto de acesso, o que amplia o grau de complexidade deste componente da rede.

Cabe ressaltar que o efeito da parametrização dinâmica sobre as camadas superiores não foi estudado neste cenário, merecendo uma investigação mais detalhada.

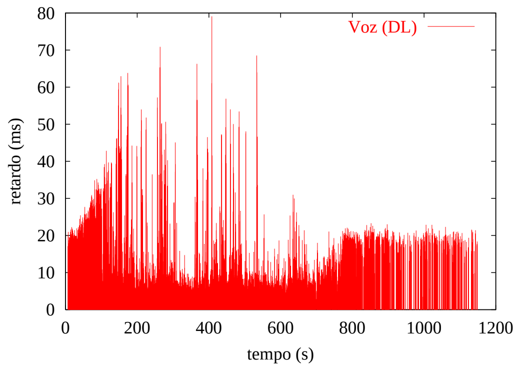

Figura 14: Retardo dos pacotes de voz na IfQ do ponto de acesso, para FTP downlink com parametrização dinâmica.

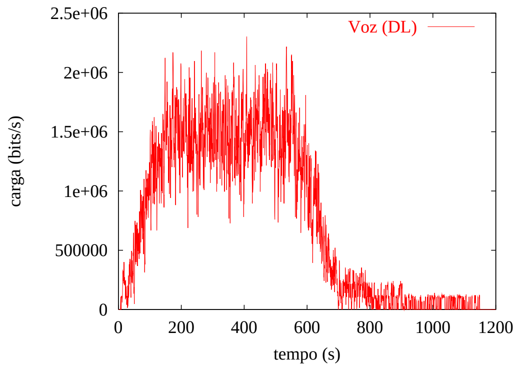

Figura 15: Carga de voz medida pelo estimador no ponto de acesso no caso 2 (FTP downlink com parametrização dinâmica).

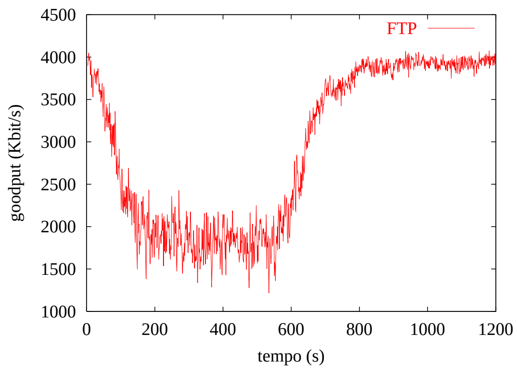

Figura 16: Vazão da Fonte FTP downlink com parametrização dinâmica.

6 Conclusões

Neste trabalho foi apresentada uma proposta de controle de admissão baseado em medidas para fontes com restrições de retardo em redes 802.11, utilizado em conjunto com um controle de carga para classes de tráfego de melhor esforço. Esse controle de carga foi realizado através da configuração estática ou dinâmica de parâmetros do MAC 802.11, disparada pelo ponto de acesso.

As simulações mostraram que, em um enlace 802.11, fontes de voz, de prioridade alta, podem ter seus limites de retardo comprometidos na presença de fontes FTP, consideradas de menor prioridade, mas que é possível manter esse retardo abaixo de um limite desejado através da alteração dos parâmetros que afetam o tamanho do DIFS e do CWMin para o nó que gera o tráfego FTP. Percebeu-se ainda que a parametrização dinâmica apresenta benefícios em relação à estática, o que aponta para o desenvolvimento de mecanismos de controle mais refinados. A princípio, os mecanismos aqui apresentados são aplicáveis a outras classes de tráfego diferentes das utilizadas, o que será investigado em trabalhos futuros. Também deverão ser ainda avaliados outros mecanismos de controle de admissão, bem como a influência da parametrização dinâmica sobre as camadas superiores, cenários envolvendo mobilidade, a influência do tamanho das oportunidades de transmissão (*TxOPs Limit*) e uma maior dinâmica de entrada e saída de fluxos com perfis mais variados.

Conclui-se que os elementos de diferenciação de serviços a serem introduzidos pela extensão 11e são bastante efetivos, mas há necessidade de se conhecer melhor a influência de cada um deles nos parâmetros de desempenho da rede, e de se desenvolver mecanismos como os aqui apresentados, para que esses elementos possam ser utilizados de maneira eficiente.

Referências

[1] Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications. IEEE Standard 802.11, 1999.

[2] Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications: Higher-speed physical layer extension in the 2.4 GHz band. IEEE Standard 802.11b, 1999.

[3] Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications: High-speed physical layer in the 5 GHz band. IEEE Standard 802.11a, 1999.

[4] Crow, B. P., Widjaja, I., Kim, J. G., and Sakai, P. T. IEEE 802.11 wireless local area networks. *IEEE Communications Magazine 35*, 9 (setembro de 1997), 116–126.

[5] Rubinstein, M. G., and Rezende, J. Qualidade de serviço em redes 802.11. In *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores* (Rio de Janeiro, Brazil, 2002).

[6] Schiller, J. *Mobile Communications*, 1^{st} ed. Addison-Wesley, 2000. ISBN 0201398362.

[7] Tang, K., and Gerla, M. Fair sharing of MAC under TCP in wireless ad hoc networks. In *IEEE Multiaccess, Mobility and Teletraffic for Personal Communications (MMT'99)* (Veneza, Itália, outubro de 1999).

[8] Bensaou, B., Wang, Y., and Ko, C. C. Fair medium access in 802.11 based wireless ad-hoc networks. In *IEEE/ACM The First Annual Workshop on Mobile Ad Hoc Networking & Computing (MobiHoc'00)* (Boston, EUA, agosto de 2000).

[9] Vaidya, N. H., Bahl, P., and Gupta, S. Distributed fair scheduling in a wireless LAN. In *ACM The Sixth Annual Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'00)* (Boston, EUA, agosto de 2000).

[10] Xu, S., and Saadawi, T. Does the IEEE 802.11 MAC protocol work well in multihop wireless ad hoc networks? *IEEE Communications Magazine 39*, 6 (junho de 2001), 130–137.

[11] Aad, I., and Castelluccia, C. Differentiation mechanisms for IEEE 802.11. In *Infocom'2001* (Anchorage, Alasca, abril de 2001).

[12] Kanodia, V., Li, C., Sabharwal, A., Sadeghi, B., and Knightly, E. Distributed multi-hop scheduling and medium access with delay and throuphput constraints. In *ACM The Seventh Annual Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'01)* (Roma, Itália, julho de 2001).

[13] Chesson, G., Diepstraten, W., Kitchin, D., Teunissen, H., and Wentink, M. Baseline d-qos proposal - ieee document 802.11-00/399. Relatório técnico, IEEE 802.11 TGe, 2000.

[14] Chesson, G., Diepstraten, W., Hoeben, M., Singla, A., Teunissen, H., and Wentink, M. Vdcf presentation - ieee document 802.11-01/132. Relatório técnico, IEEE 802.11 TGe, março de 2001.

[15] Jamin, S., Shenker, S., and Danzig, P. Comparison of measurement-based admission control algorithms for controlled-load service. In *INFOCOM'97* (Kobe, Japan, abril de 1997).

[16] Jamin, S., Danzig, P., Shenker, S., and Zhang, L. A measurement-based admission control algorithm for integrated services packet networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking* (fevereiro de 1997).

[17] Grossglauser, M., and Tse, D. A framework for robust measurement-based admission control. *IEEE/ACM Transactions on Networking 7*, 3 (junho de 1999).

[18] Keshav, S. *An Engineering Approach to Computer Networking: ATM Networks, the Internet, and the Telephone Network*. Addison-Wesley, 1997.

[19] Universal mobile telecommunications system (umts); qos concept and architecture. Relatório técnico, ETSI, junho de 2001.

[20] Fall, K., and Varadhan, K. The NS Manual. Relatório técnico, The VINT Project, janeiro de 2002.