

Qualidade de Serviço em Redes 802.11

Marcelo G. Rubinstein¹ e José Ferreira de Rezende²

¹ Depto. de Eng. Eletrônica e Telecomunicações - Universidade Estadual do Rio de Janeiro
FEN - Rua São Francisco Xavier, 524 - 20550-013 - Rio de Janeiro RJ - Brasil

² Grupo de Teleinformática e Automação - Universidade Federal do Rio de Janeiro
PEE-COPPE/DEL-EE - CP 68504 - 21945-970 - Rio de Janeiro RJ - Brasil

Abstract

This paper presents the major quality of service problems in IEEE 802.11 local area networks. The problems of unfairness in the sharing of bandwidth and instability in TCP connections are described in detail. Moreover, differentiation techniques for providing medium access priorities are presented. We evaluate the performance of unfairness, instability, and differentiation techniques by simulation experiments.

Resumo

Este trabalho apresenta os principais problemas da provisão de qualidade de serviço em redes locais sem-fio IEEE 802.11. Os problemas de injustiça no compartilhamento da banda passante disponível no canal e de instabilidade de conexões TCP são descritos detalhadamente. Além disso, técnicas de diferenciação de serviços que provêm diferentes prioridades no acesso ao meio são apresentadas. Avaliações do desempenho da injustiça, da instabilidade e das técnicas de diferenciação são realizadas através de simulações.

Palavras-chave: Comunicação sem-fio, Qualidade de Serviço (QoS), redes 802.11

1 Introdução

As redes sem-fio estão sendo cada vez mais utilizadas na comunicação entre dispositivos dos mais variados tipos e tamanhos (computadores pessoais, portáteis e de mão, telefones, eletrodomésticos, máquinas industriais, sensores e outros) em diferentes ambientes, como residências, edifícios, cidades, florestas e campos de batalha. Por permitirem a mobilidade, estas redes facilitam a ubiqüidade do poder computacional, tornando transparente a disseminação da informação e a cooperação dos dispositivos na realização das mais variadas tarefas. Diferentes padrões e tecnologias de rede sem-fio surgiram nos últimos anos para acomodar esta vasta gama de aplicações e coberturas. Foram concebidas das redes celulares de larga cobertura, passando pelas redes locais (WLANs), até as redes PANs (*Personal Area Networks*) usadas na comunicação de equipamentos pessoais, como PDAs (*Personal Digital Assistants*), câmeras digitais, computadores e celulares.

Neste cenário, o padrão 802.11 [1] obteve um enorme sucesso. Estima-se um total de 2 milhões de placas de rede 802.11 instaladas até o final 2002. Pela sua diversidade em termos de capacidade e cobertura e devido ao baixo custo dos dispositivos de rede, o padrão 802.11 tem sido usado nos mais variados cenários, desde redes de acesso para redes celulares 2G/3G, como solução para redes residenciais e de campus (redes locais e metropolitanas), ou mesmo, em enlaces ponto-a-ponto de média distância em soluções corporativas. Esta vasta aplicabilidade do padrão 802.11 tem sido a chave do seu sucesso comercial.

O padrão 802.11 especifica o protocolo de controle de acesso ao meio (MAC) e diferentes camadas físicas de alcance e velocidades diversas. Avanços recentes nas técnicas de processamento de sinais permitem que se atinjam taxas de transmissão de até 54 Mbps no padrão 802.11a [2] que opera na banda de 5 Ghz. Apesar do aumento contínuo da capacidade dessas redes, as especificações atuais oferecem um suporte limitado à Qualidade de Serviço (QoS). Mais especificamente, a camada MAC do 802.11 oferece, em uma configuração com infraestrutura, um método centralizado de controle de acesso baseado em consulta, onde os pontos de acesso são responsáveis pela alocação de banda passante e pela limitação da latência das estações. O desempenho deste modo de acesso está diretamente ligado aos algoritmos de consulta utilizados, os quais buscam um compromisso entre a eficiência na utilização da banda passante e a capacidade em oferecer garantias estritas de desempenho aos tráfegos sensíveis ao tempo. Numa configuração de rede sem infra-estrutura, ou *ad-hoc*, o controle distribuído de acesso ao meio tem como objetivo fornecer um compartilhamento justo da banda passante, no qual todas as estações recebem o mesmo tratamento independentemente dos seus requisitos de QoS. Assim, redes *ad-hoc* que utilizam o padrão 802.11 seguem o modelo de serviço de melhor esforço, não oferecendo nenhuma garantia de QoS ao tráfego transportado. Protocolos e mecanismos específicos ao 802.11, usados em diferentes abordagens e arquiteturas, foram propostos com o objetivo de prover QoS em redes *ad-hoc* [3, 4, 5]. No final de 2000, o grupo tarefa 802.11e iniciou o estudo e a especificação de mecanismos de suporte à QoS na camada MAC, seguindo a abordagem adotada pela arquitetura de diferenciação de serviços do IETF.

Alguns problemas inerentes às redes sem-fio, como o compartilhamento do meio, a necessidade de mecanismos de controle de erro nó-a-nó e os problemas de terminal escondido e exposto, dificultam a provisão de QoS nestas redes. Este artigo discute as principais questões relacionadas à provisão de QoS em redes 802.11, fornece uma classificação das propostas de acordo com a abordagem e os mecanismos empregados e avalia e compara o desempenho via simulação de alguns problemas relacionados à qualidade de serviço e dos mecanismos de diferenciação.

Este trabalho está organizado da seguinte forma. Na Seção 2, o padrão 802.11 é apresentado detalhadamente. Na Seção 3, são descritos os principais problemas relativos à QoS no MAC 802.11 e algumas técnicas de diferenciação de serviços em redes 802.11. Na Seção 4, são apresentados os resultados de simulações de avaliação de problemas na provisão de QoS no MAC 802.11 e das técnicas de diferenciação de serviços.

2 O Padrão IEEE 802.11

O IEEE, em 1999, definiu uma norma para redes locais sem-fio chamada “Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications” [1]. O padrão IEEE 802.11, como todos os protocolos da família 802.x, especifica as camadas física e de controle de acesso ao meio (MAC). Esse padrão continua em desenvolvimento através de vários grupos de trabalho que têm como objetivo prover melhorias no desempenho e novas aplicações.

2.1 A Arquitetura do 802.11

A arquitetura do IEEE 802.11 consiste em vários componentes que interagem para prover uma rede local sem-fio com suporte à mobilidade de estações de modo transparente para as camadas superiores.

O conjunto básico de serviços (*Basic Service Set* - BSS) é o bloco fundamental de construção da arquitetura do 802.11 [1]. Um BSS é definido como um grupo de estações que estão sobre o controle direto de uma única função de coordenação (Seção 2.3), que determina quando uma estação pode transmitir e receber dados.

No 802.11 existem dois tipos de redes sem fio: *ad-hoc* ou infra-estruturada. Uma rede *ad-hoc* é composta somente por estações dentro de um mesmo BSS que se comunicam entre si sem a ajuda de uma infra-estrutura. Qualquer estação pode estabelecer uma comunicação direta com outra estação no BSS sem a necessidade que a informação passe por um ponto de acesso centralizado [6]. O padrão 802.11 refere-se a uma rede *ad-hoc* como um BSS independente. Já em uma rede infra-estruturada, é utilizado um ponto de acesso que é responsável por quase toda a funcionalidade de rede. De modo a aumentar a cobertura de uma rede infra-estruturada, vários pontos de acesso podem ser interligados através de um *backbone* chamado sistema de distribuição (*distribution system*). O conjunto dos pontos de acesso e dos sistemas de distribuição é definido com um conjunto estendido de serviços (*Extended Service Set* - ESS).

2.2 A Camada Física do 802.11

O padrão 802.11 [1] define três tipos de camada física: espalhamento de espectro por salto em frequências (*Frequency Hopping Spread Spectrum* - FHSS), espalhamento de espectro por seqüência direta (*Direct Sequence Spread Spectrum* - DSSS) e infravermelho. Todas as camadas físicas do 802.11 incluem a provisão de um sinal de avaliação de canal livre (*Clear Channel Assessment signal* - CCA) que é utilizado pela camada MAC (Seção 2.3) para indicar se o meio está livre. Além disso, cada camada física oferece uma taxa de 1 ou 2 Mbps.

O FHSS é uma técnica de espalhamento de espectro que divide a banda passante total em vários canais de pequena banda e faz com que o transmissor e o receptor fiquem em um desses canais por um certo tempo e depois saltem para outro canal. Com isso, permite-se a coexistência de várias redes em uma mesma área através da separação dessas redes por diferentes padrões pseudo-aleatórios de uso do canal chamados seqüências de saltos. O FHSS usa a banda ISM (*Industrial, Scientific and Medical*) de 2,4000 a 2,4835 GHz. Nos EUA e em quase toda a Europa, são definidos 79 canais. O primeiro canal tem uma frequência central de 2,402 GHz e os canais subseqüentes estão separados por 1 MHz. Cada canal possui uma banda de 1 Mbps. Três diferentes conjuntos com 26 seqüências de saltos são definidos. As diferentes seqüências de saltos permitem que vários BSSs coexistam em uma mesma área geográfica e os três conjuntos de saltos existem para evitar períodos de colisões entre diferentes seqüências de saltos em um conjunto [6]. O acesso básico de 1 Mbps usa uma modulação gaussiana por chaveamento de frequência *Gaussian Frequency Shift Keying* (GFSK) de dois níveis, na qual o dado passa por um filtro gaussiano em banda base e é modulado em frequência (um 1 lógico é codificado usando uma frequência $F_c + f$ e um 0 lógico usa uma frequência $F_c - f$). A taxa de acesso opcional de 2 Mbps usa um GFSK de quatro níveis, no qual dois bits são codificados por vez usando quatro frequências.

O DSSS é um método alternativo de espalhamento de espectro, no qual códigos são separados. O DSSS também usa a banda ISM de 2,4 GHz. A taxa básica de 1 Mbps é gerada através de uma modulação diferencial binária por chaveamento de fase (*Differential Binary Phase Shift*

Keying - DBPSK) e a taxa de 2 Mbps usa uma modulação diferencial quaternária por chaveamento de fase (*Differential Quadrature Phase Shift Keying* - DQPSK). O espalhamento é feito através da divisão da banda disponível em 11 subcanais, cada um com 11 MHz, e do espalhamento de cada símbolo de dados usando uma seqüência de Barker de 11 chips dada por (+1,-1,+1,+1,-1,+1,+1,+1,-1,-1,-1). A largura de um canal DSSS é de 20 MHz, ou seja, no máximo três canais não sobrepostos podem ser usados.

A especificação de infravermelho utiliza comprimentos de onda de 850 a 950 nm. O infravermelho foi projetado para ser usado em áreas fechadas e opera com transmissões não direcionadas com alcance máximo de aproximadamente 10 m caso não existam fontes de calor ou luz do sol interferindo ou 20 m caso sejam utilizados receptores mais sensíveis. As estações podem receber dados em suas linhas de visada e por transmissões refletidas. A codificação da taxa básica de 1 Mbps é realizada através de uma modulação por posição de pulso (*16-Pulse Position Modulation* - PPM), na qual quatro bits de dados são mapeados em 16 bits codificados para transmissão [1]. A taxa opcional de 2 Mbps usa uma 4-PPM, na qual dois bits de dados são mapeados em 4 bits codificados para transmissão.

Os padrões 802.11a [2] e 802.11b [7] alteram a camada física do 802.11 [1] para proverem taxas de transmissão mais altas. O padrão 802.11b [7] especifica taxas de transmissão mais altas na banda de 2,4 GHz, através da alteração de alguns pontos da norma básica 802.11. Taxas de 1, 2, 5,5 e 11 Mbps são providas nesse padrão através do uso de um chaveamento de código complementar (*8-chip Complementary Code Keying* - CCK) no DSSS. O padrão 802.11a [2] utiliza a banda de 5 GHz para poder prover bandas de até 54 Mbps. Esse padrão também altera a norma básica 802.11 em alguns pontos. A camada física utiliza uma multiplexação por divisão ortogonal em frequência (OFDM). O sistema usa 52 subportadoras que são moduladas usando BPSK ou QPSK, modulação 16-QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*) ou 64-QAM.

2.3 A Camada MAC do 802.11

A 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 em um ponto (*Point Coordination Function* - PCF).

2.3.1 A Função de Coordenação Distribuída - DCF

O DCF, mecanismo básico de acesso ao meio no 802.11, é de modo simples, um acesso múltiplo com detecção de portadora evitando colisões (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance* - CSMA/CA) com reconhecimento positivo. Embora o método de acesso CSMA/CD (CSMA com detecção de colisão) seja muito utilizado nas redes IEEE 802.3, ele não é adequado às redes 802.11 pois nesse caso a detecção de colisões é muito difícil por assumir que todas as estações ouvem as outras, por requerer um rádio *full-duplex* de custo elevado e porque a taxa de erro de bit na camada MAC do 802.11 é de 10^{-5} [8].

Existem dois tipos de DCF no padrão: o baseado em CSMA/CA (obrigatório) e outro (opcional) que também utiliza pedidos e permissões para transmitir dados (*Request To Send* - RTS e *Clear To Send* - CTS). O funcionamento básico do DCF é apresentado na Figura 1.

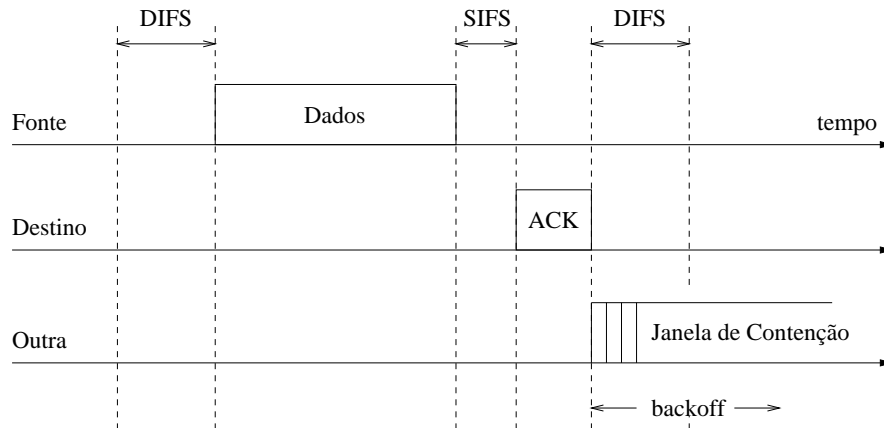


Figura 1: Esquema básico de acesso no DCF.

Uma estação que quer transmitir algum quadro, ouve o meio (detecta ou não a portadora). Caso o meio esteja livre após um determinado tempo chamado espaço distribuído entre quadros (*Distributed Interframe Space* - DIFS), a estação transmite. Caso contrário, a transmissão é adiada e inicia-se um processo de *backoff*, no qual a estação escolhe um tempo aleatório uniformemente distribuído entre zero e o tamanho da janela de contenção (CW), evitando assim colisões, e cria um temporizador de *backoff*. Esse método é conhecido como *backoff* exponencial binário. Este temporizador é decrementado periodicamente quando o meio está livre por mais de DIFS segundos, ou seja, não há nenhuma estação transmitindo. O período de decremento é dado pelo tempo de *slot* que corresponde ao atraso máximo de ida e volta dentro de um BSS. O temporizador é parado quando alguma transmissão é detectada no meio. Quando o temporizador expira, a estação envia o seu quadro.

A estação receptora usa o método de verificação cíclica (CRC) para detectar erros e caso o pacote pareça estar correto, envia um pacote de reconhecimento (ACK). Esse ACK é enviado um tempo chamado espaço pequeno entre quadros (*Short Interframe Space* - SIFS) após o recebimento do quadro anterior. Por definição, SIFS é menor que DIFS, ou seja, a estação receptora ouve o meio por SIFS para enviar o ACK (Figura 1). Caso a estação transmissora não receba o ACK, deduzirá que houve uma colisão, escalonará uma retransmissão e entrará no processo de *backoff*. Para reduzir a probabilidade de colisões, a janela de contenção começa com um valor mínimo igual a 7 dado por CW_{min} 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 de 255 chamado CW_{max} . Caso um número máximo de transmissões seja alcançado (sete), o pacote é descartado. Para evitar a captura do meio, caso a estação transmissora tenha mais algum pacote a transmitir, ela entra na fase de *backoff*.

O segundo tipo de DCF (Figura 2), que é opcional, inclui pacotes RTS e CTS para evitar problemas gerados por terminais “escondidos”. Esse tipo de problema surge, por exemplo, quando uma estação *B* é capaz de receber quadros de dois diferentes transmissores, *A* e *C*, porém estes transmissores 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 resulta em colisão no receptor *B*.

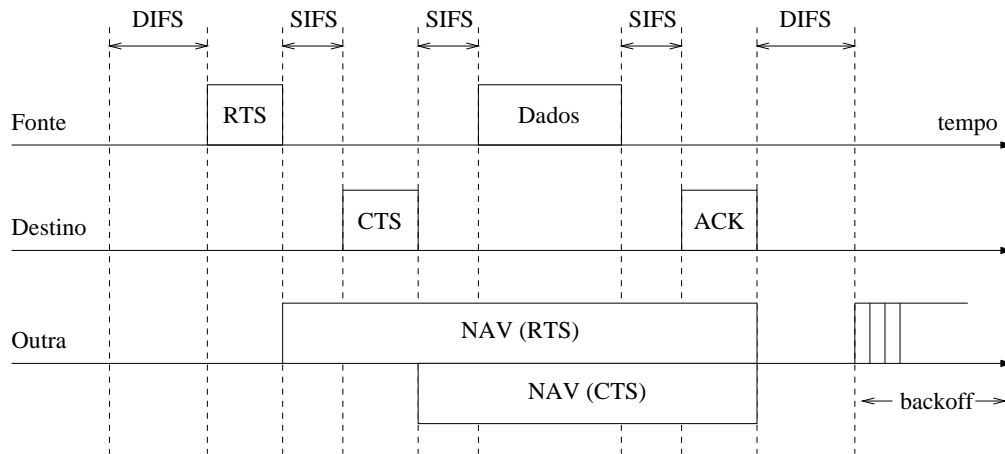


Figura 2: DCF utilizando RTS e CTS.

Nesse tipo de DCF, a detecção de portadora pode ser feita através de mecanismos físico (CCA) e virtual. O mecanismo de detecção virtual usa uma distribuição de informação de reserva do meio através da troca de quadros RTS e CTS antes do envio do dado. 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. O uso de RTS e CTS é controlado por estação através de um limiar de RTS ($RTS_{threshold}$), através do qual uma estação pode não usar o RTS e o CTS, pode sempre utilizá-los ou ainda usá-los somente na transmissão de quadros maiores que o tamanho predeterminado. Uma estação envia um RTS, após sentir o meio livre por pelo menos DIFS segundos, ao receptor antes da transmissão de um quadro para reservar o meio (Figura 2). A colisão de um quadro RTS de 20 bytes é menos severa e menos provável que uma colisão de quadros de dados que podem ter até 2346 bytes. O receptor responde com um CTS, após o meio estar livre por SIFS segundos, caso esteja pronto para receber. Todas as estações que ouvirem o RTS, o CTS, ou ambos, irão utilizar a informação da duração relativa ao pacote de dados para atualizar o vetor de alocação de rede (*Network Allocation Vector* - NAV), que é utilizado para uma detecção virtual da portadora (Figura 2). Essa informação indica o período de tempo pelo qual uma transmissão não é iniciada pela estação, não importando se o CCA indique que o meio está livre. Desse modo, qualquer terminal escondido poderá adiar a sua transmissão para evitar colisões. Ao receber o CTS e esperar o meio estar livre por SIFS segundos (Figura 2), o transmissor inicia o envio do quadro, como no DCF básico. Caso não receba o CTS, o transmissor entra na fase de *backoff* e retransmite o RTS.

2.3.2 Função de Coordenação em um Ponto - PCF

Outro tipo de acesso da camada MAC do 802.11 é o PCF. Apesar da implementação do DCF ser obrigatória pelo padrão, esse não é o caso do PCF. No modo PCF, um único ponto controla o acesso ao meio, através de consulta a cada estação, proporcionando a oportunidade de transmitir sem contenção.

O coordenador de ponto, que pertence ao ponto de acesso, divide o tempo de acesso em períodos de superquadros. Cada superquadro compreende um período livre de contenção (modo PCF) e um período com contenção (modo DCF), como na Figura 3. Durante os períodos nos quais as estações estão no modo PCF, o coordenador de ponto consulta se cada estação tem algo a transmitir. As estações recebem dados quando são consultadas pelo coordenador de ponto.

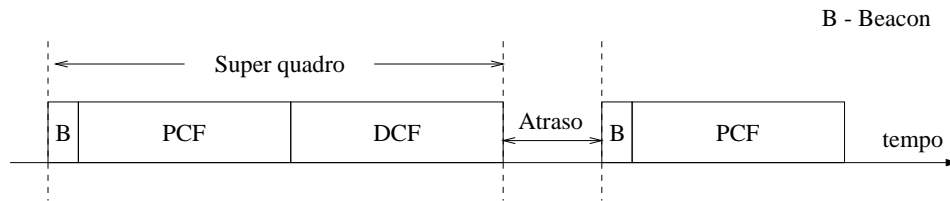


Figura 3: Modos PCF e DCF operando juntos.

O coordenador de ponto inicia e controla o tempo livre de contenção. Ele escuta o meio por PIFS (*Point Coordination Interframe Space*) segundos e então começa um período livre de contenção (*Contention Free Period* - CFP) através da difusão de um sinal de *beacon* (Figura 3). Como, por definição, PIFS é menor que DIFS, nenhuma estação pode começar a enviar dados no modo DCF antes do coordenador de ponto. Todas as estações adicionam a duração máxima do período de contenção ($CFP_{maxduration}$) aos seus respectivos NAVs. O período livre de contenção pode terminar a qualquer momento através do envio de um pacote CF_{end} pelo coordenador de ponto. Isso ocorre frequentemente quando a rede está com pouca carga. Além disso, o início de um período livre de contenção pode ser adiado por causa da transmissão de alguma estação no modo DCF (atraso na Figura 3).

Quando chega a vez de uma estação transmitir, o coordenador de ponto envia um pacote de dados caso exista algum a ser enviado dentro de um pacote de consulta (*piggyback*). O receptor envia de volta um ACK, também com dados se for o caso, depois de SIFS segundos. Após encerrar a transmissão a todas as estações contidas em uma lista de consultas, o coordenador de ponto reinicia o processo de consulta após PIFS segundos. Os usuários que estão sem transmitir por alguns ciclos são retirados da lista de consultas e são consultados de novo no início do próximo período livre de contenção.

2.4 Fragmentação

De modo a diminuir a probabilidade de erros devido ao enfraquecimento do sinal e ao ruído, quadros pequenos devem ser transmitidos. O MAC 802.11 provê suporte para a fragmentação de quadros em transmissões ponto-a-ponto e é responsável por remontar o quadro, o que torna o processo transparente para a camada superior. O padrão obriga que todos os receptores tenham suporte a fragmentação mas deixa como opcional a fragmentação nos transmissores. Um limiar de fragmentação ($Fragmentation_{threshold}$) é estabelecido, ou seja, um quadro é fragmentado se for maior que o limiar e o tamanho máximo de um fragmento também é dado por $Fragmentation_{threshold}$.

Caso não haja interrupção devido a limitação de ocupação do meio para uma camada física, os fragmentos de um quadro são enviados em rajada durante um período de contenção, utilizando uma única invocação do procedimento de acesso ao meio do DCF. Um fragmento é enviado SIFS segundos após o recebimento do ACK relativo ao fragmento anterior. A informação da duração no pacote de um fragmento indica o tempo necessário para a recepção do ACK do próximo fragmento, fazendo com que as outras estações que obtiverem essa informação não transmitam. O campo duração nos quadros de dados e no ACK especifica a duração total do próximo fragmento e do seu ACK. No caso do período livre de contenção, os fragmentos são enviados como quadros individuais.

3 MAC 802.11 e QoS

Com o intuito de apresentar de forma clara o problema da provisão de QoS em redes 802.11, primeiramente são apresentados os problemas relacionados à utilização do TCP em redes 802.11. Nessa parte, aborda-se a interação dos mecanismos de controle de erro da camada MAC e do TCP, o problema da injustiça no compartilhamento da banda passante disponível e a instabilidade provocada no TCP. Em uma segunda parte, o problema da diferenciação de serviços em redes 802.11 é apresentado.

3.1 Injustiça

O uso do MAC 802.11 quando a carga de tráfego é alta pode causar diversos problemas de injustiça no acesso ao meio e de instabilidade em conexões TCP.

O DCF tem como objetivo fornecer um compartilhamento justo da banda passante, no qual todas as estações recebem o mesmo tratamento. Porém, vários problemas relacionados à injustiça no acesso ao meio, principalmente em redes de múltiplos saltos, são descritos em [9, 10, 3, 11]. Esses problemas não estão relacionados à injustiça do TCP causada por diferenças no tempo de ida-e-volta [11].

Tang e Gerla [9] descobriram que a interação entre o TCP e os temporizadores de *backoff* da camada MAC em redes de múltiplos saltos causam injustiça devido à captura do meio, ou seja, algumas estações obtêm acesso ao meio enquanto outras não. Quando duas estações estão competindo pelo meio e uma é “rechaçada” pelos temporizadores, o *backoff* exponencial binário utilizado no MAC e no TCP torna a situação cada vez pior para a estação que não ganhou o acesso ao meio [9], ou seja, a última estação que transmitiu com sucesso é sempre privilegiada [10]. Bensaou et al. [10] e Vaidya et al. [3] também descrevem o problema de injustiça causado pelo *backoff* exponencial binário.

Xu e Sadawi [11] apresentam um problema do TCP em redes 802.11 com múltiplos saltos chamado injustiça de um salto. Esse problema ocorre devido a falhas de alcançabilidade de um nó em relação ao seu nó adjacente. Caso o nó adjacente seja um nó intermediário, este nó irá descartar todos os pacotes que já estão na fila de transmissão e indicará uma falha de rota. Até que uma rota seja encontrada, nenhum pacote poderá ser enviado, o que provavelmente irá causar um estouro de temporizador no transmissor da conexão TCP. A falha de roteamento pode ocorrer devido à camada MAC, por causa de colisões e do problema do terminal escondido. Nesse caso, o nó intermediário não pode se comunicar com o vizinho. Uma solução para esse problema é limitar o envio de pacotes sem reconhecimento, ou seja, diminuir o tamanho máximo da janela do transmissor [11].

3.2 Instabilidade

Ao se utilizar o protocolo TCP sobre redes sem fio de múltiplos saltos, pode ocorrer um problema de instabilidade em conexões que reflete-se em bandas passantes que variam bastante mesmo quando uma só conexão é aberta e a condição da rede não muda [11].

Através da análise de traços de saída de simulações, Xu e Saadawi [11] descobriram que esse problema também ocorre devido a falhas de alcançabilidade de um nó em relação ao seu nó adjacente. Uma solução para esse problema é limitar o envio de pacotes sem reconhecimento, ou seja, diminuir o tamanho máximo da janela do transmissor [11].

3.3 Diferenciação de Serviços no MAC 802.11

Diferentes propostas surgiram nos últimos anos para permitir a diferenciação de serviços entre as estações no padrão 802.11. Esta diferenciação se traduz por diferentes prioridades no acesso ao meio dada às estações que disputam a banda passante oferecida pela rede. Estas propostas sugerem modificações tanto no método de acesso PCF, quanto no método DCF. Dentro de cada método de acesso, diferentes técnicas foram utilizadas para realizar a diferenciação. Estas técnicas serão descritas a seguir.

No método de acesso com contenção (DCF), estas técnicas podem ser classificadas de acordo com o parâmetro utilizado para alcançar a diferenciação. Dentre esses parâmetros, destacam-se o DIFS, o *backoff*, o tamanho do pacote e o RTS/CTS.

A técnica baseada no DIFS consiste em configurar as estações com valores diferentes para DIFS de acordo com a prioridade que se queira atribuir a cada uma delas. Quanto maior o DIFS, menor prioridade de acesso ao meio recebe uma estação. Em outras palavras, as estações de maior prioridade têm uma maior probabilidade de acesso ao meio. Para evitar a disputa entre estações com prioridades diferentes, garantindo que não haja colisões entre elas, o tamanho máximo da janela de contenção de uma estação com prioridade j somada ao $DIFS_j$ pode ser escolhida de tal forma que nunca seja maior do que $DIFS_{j+1}$ (menor prioridade). Isto garante que uma estação de maior prioridade nunca tenha quadros à enviar quando uma estação de menor prioridade inicia sua transmissão e faz com que estações menos prioritárias nunca transmitam em caso de haver pacotes a serem enviados pelas estações mais prioritárias.

A técnica baseada no *backoff* consiste na escolha de intervalos diferenciados para as janelas de contenção de cada estação. O cálculo destes intervalos varia de acordo com objetivo que se quer alcançar. Em [3], o intervalo de *backoff* calculado é proporcional ao tamanho do pacote a ser enviado e inversamente proporcional ao peso atribuído ao fluxo ao qual pertence o pacote. Este cálculo faz com que estações de maior peso (maior prioridade) escolham tempos de *backoff* menores. A inclusão do tamanho pacote faz com que o compartilhamento da banda passante ponderado pelo peso seja justo. Este esquema implementa, de maneira distribuída, o mecanismo de escalonamento *fair-queuing*. Na proposta [4], os intervalos da janela de contenção são calculados de acordo com a prioridade estabelecida para cada estação. Em [5], os autores propõem um esquema onde a prioridade do próximo pacote a ser enviado é incluída nos pacotes RTS, CTS, Dados e ACK. Assim, cada estação mantém uma tabela com os pacotes presentes na cabeça da fila de todas as estações em disputa pelo meio. O intervalo da janela de contenção é então calculado por cada estação de acordo com a posição (*rank*) do seu pacote, em termos de prioridade, nessa tabela. Bensaou et al. [10] apresentam um esquema de *backoff* diferente no qual cada estação ajusta a sua janela de contenção de acordo com a estimativa do seu compartilhamento do meio e do compartilhamento das outras estações. A idéia é permitir que todas as estações transmitam normalmente se a carga total das estações for menor do que a capacidade do meio, mas, caso isso não ocorra, cada estação deve obter um acesso ao meio proporcional a um índice de compartilhamento previamente estabelecido no controle de admissão.

As duas últimas técnicas são mais grosseiras no estabelecimento da diferenciação. Na técnica baseada no tamanho do pacote, estações com maior prioridade utilizam pacotes de maior tamanho nas suas transmissões. Isto garante uma maior tempo de utilização do meio cada vez que uma estação ganha a disputa. 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.

No método de acesso sem contenção (PCF), algumas técnicas foram propostas para atingir a

diferenciação. Como este método exige a presença de um ponto de acesso, a função de diferenciação recai neste elemento. As técnicas podem ser classificadas de acordo com o mecanismo empregado: baseadas na consulta e em alocação distribuída de *slots* de tempo. As técnicas baseadas em consulta consistem no emprego de mecanismos de consulta às estações que levam em conta a prioridade destas estações. Nas técnicas baseadas em alocação de *slots*, o ponto de acesso determina, também através de consulta, os *slots* de tempo atribuídos a cada uma das estações. Uma vez feita esta atribuição, esta técnica não necessita mais da intervenção do ponto de acesso.

4 Resultados de Simulações

Com o intuito de verificar os problemas da injustiça e da instabilidade e o nível de diferenciação oferecido por algumas técnicas apresentadas na seção anterior, foram realizadas avaliações de desempenho utilizando-se a ferramenta de simulação ns-2 [12].

4.1 Problemas de Injustiça e de Instabilidade

Na Figura 4 são apresentados os dois cenários utilizados nas simulações para a verificação da injustiça. Nesses cenários, as linhas com setas indicam os tráfegos entre as estações e a linha pontilhada representa que as estações estão sob o alcance de comunicação de cada uma mas não há tráfego entre elas. Não há movimentação dos nós que estão distantes 200 m entre si.

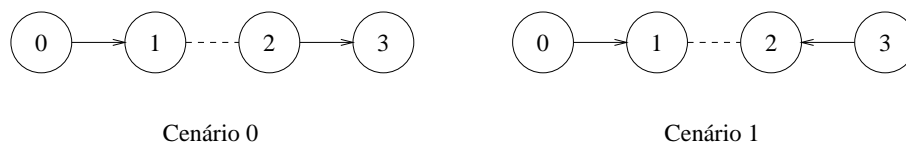


Figura 4: Cenários utilizados nas simulações.

De modo a avaliar a justiça, os gráficos indicam o índice de justiça dado por:

$$IJ = \frac{(\sum_f V_f)^2}{num.fluxos * \sum_f (V_f)^2}, \quad (1)$$

onde *num.fluxos* é o número de fluxos e V_f é a vazão do fluxo f . Para dois fluxos, se o índice de justiça é 1, o compartilhamento do canal é totalmente justo e se o índice é 0,5, uma das estações conseguiu monopolizar o acesso ao meio.

Tráfegos CBR com tamanho de pacotes igual a 1000 bytes foram utilizados. Os dois fluxos CBR possuem uma mesma taxa que foi variada nas simulações. A comunicação entre 0 e 1 inicia-se em $t = 0s$ e em $t = 5s$ começa a transmissão entre os nós 2 e 3. Os resultados são obtidos para os protocolos de roteamento DSDV (*Destination-Sequenced Distance Vector*) e DSR (*Dynamic Source Routing*) [13].

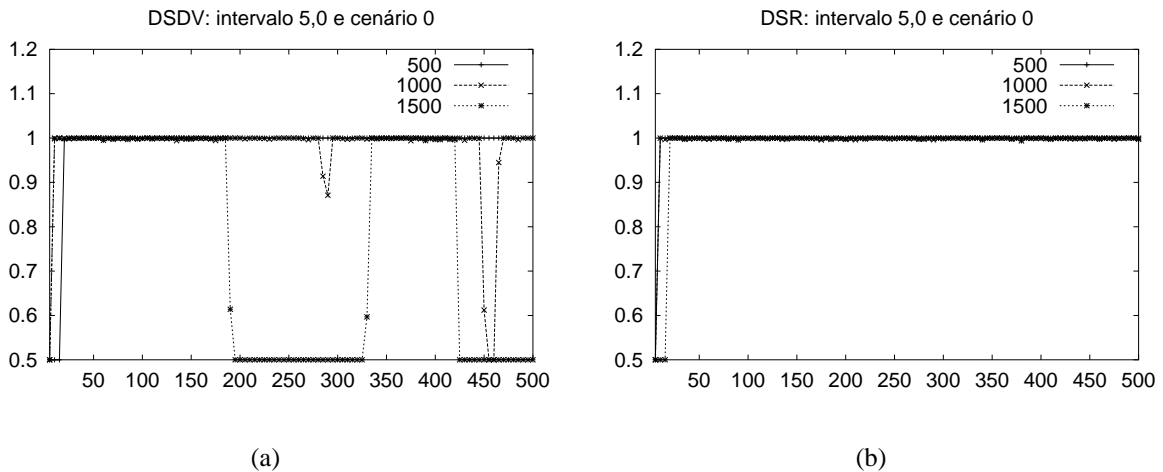


Figura 5: Cenário 0: DSDV (a) e DSR (b).

Nas Figuras 5(a) e 5(b), são apresentados os resultados para o cenário 0. Para os dois protocolos de roteamento, quando a taxa agregada dos dois fluxos CBR não ultrapassa a capacidade do canal, que é de aproximadamente 1,6 Mbps, há justiça no compartilhamento do canal. Para o protocolo DSR, pode-se dizer que há justiça de um modo geral, mesmo que a taxa seja alta. Para o DSDV, de acordo com traços gerados nas simulações, ocorrem seguidos estouros do temporizador de atualização de rota quando são utilizados os tráfegos CBR de 1000 e 1500 kbps, ou seja, o nó 2 não tem uma rota para transmitir para o nó 3. Com isso, vários pacotes são perdidos até que uma nova rota seja encontrada.

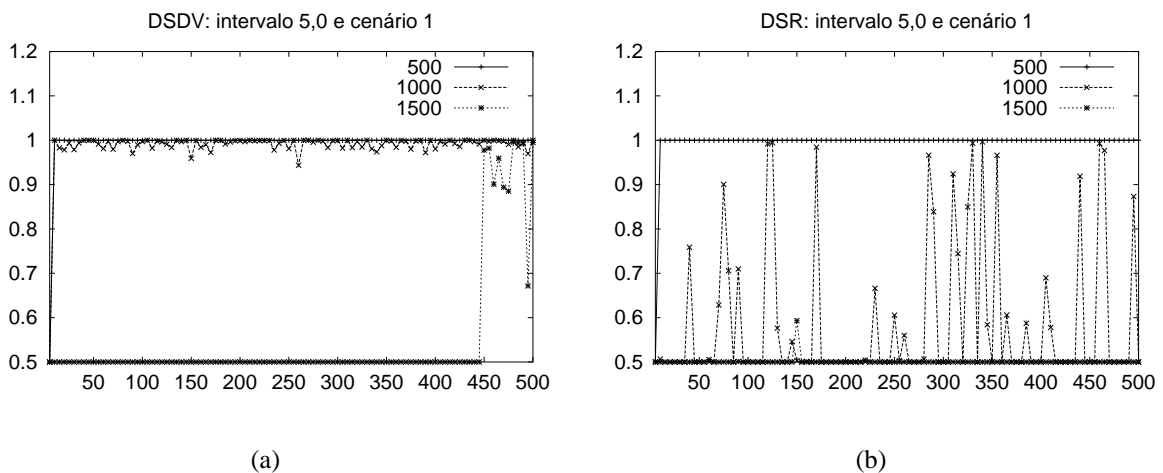


Figura 6: Cenário 1: DSDV (a) e DSR (b).

No cenário 1, novamente se a taxa agregada dos fluxos é menor que a capacidade do meio, há justiça no compartilhamento. No caso do DSDV, a injustiça surge quando a taxa de transmissão de cada fonte CBR é de 1500 kbps, conforme a Figura 6(a). Os resultados mostram que há uma maior injustiça quando o DSR é utilizado pois nesse cenário as perdas de rotas são mais

acentuadas que no cenário anterior, fazendo com que somente uma estação consiga transmitir durante uma parte da simulação e o outro nó assuma o controle do meio no restante do tempo.

Em relação ao problema da instabilidade de conexões TCP, foram realizadas simulações em um cenário de quatro nós de topologia igual a dos cenários apresentados anteriormente. Uma conexão que envia pacotes TCP de 1460 *bytes* é aberta entre o nó 0 e o nó 3 e uma aplicação FTP que sempre tem dados a enviar é utilizada. O protocolo DSR é usado e a janela máxima de transmissão do TCP é variada na simulação.

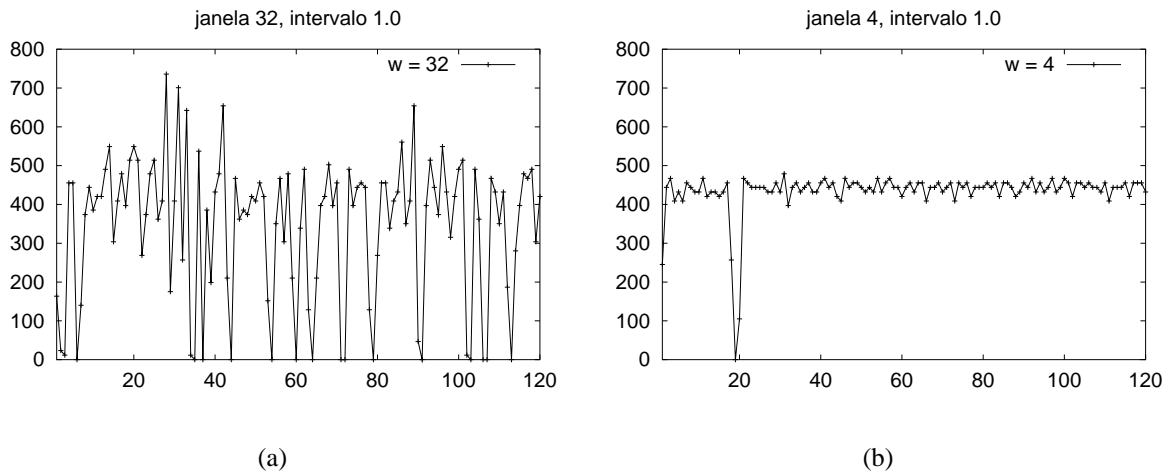


Figura 7: Vazão com a janela do TCP igual a 32 (a) e 4 (b).

De acordo com as Figuras 7(a) e 7(b), pode-se observar que para a janela igual a 4, só ocorre um período no qual o nó 0 não consegue transmitir nenhum pacote pois nesse caso o número máximo de pacotes transmitidos de uma única vez (*back-to-back*) é quatro. Com isso, há uma menor probabilidade de um nó intermediário falhar na obtenção do meio e por conseguinte, uma quebra de enlace devido a essa falha é menos provável.

4.2 Diferenciação

A topologia dos experimentos realizados consiste em três estações 802.11 transmitindo para um única estação (Figura 8). Todas as estações utilizam tráfego CBR com uma taxa de 1,7 Mbps cada, ou seja, uma taxa maior que a capacidade do canal. A distância entre as estações transmissoras e a receptora é de 50 m e o protocolo utilizado foi o DSDV. As estações 1, 2 e 3 iniciam suas transmissões nos tempos 0, 10 s e 20 s, respectivamente. Uma avaliação da vazão obtida por cada estação ao longo tempo foi realizada.

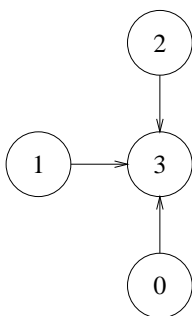


Figura 8: Cenário utilizado nas simulações de diferenciação.

Em um primeiro experimento, nenhum mecanismo de diferenciação foi empregado. A Figura 9 mostra a vazão obtida por cada estação em intervalos de 1 s. A banda passante do canal é compartilhada de forma justa entre todas as estações.

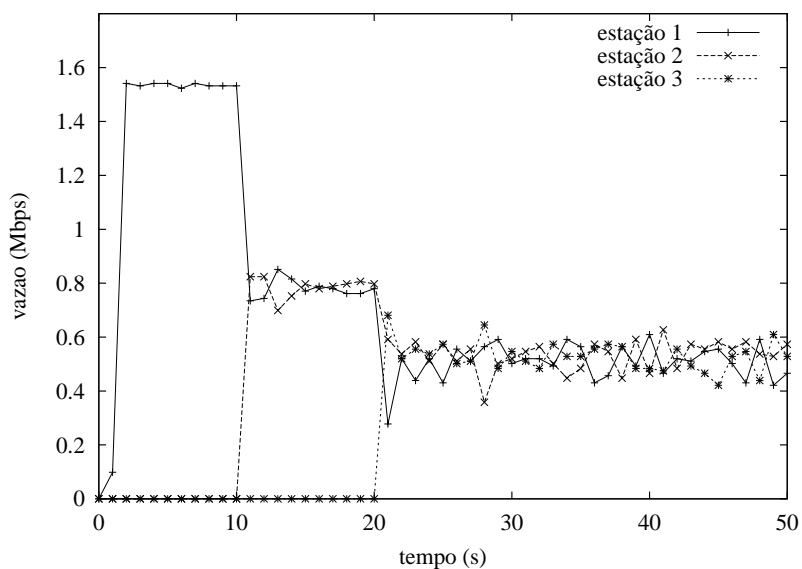


Figura 9: Vazão sem diferenciação de serviço.

Em um segundo experimento, as estações 1, 2 e 3 tiveram seus DIFS configurados com os valores 2, 4 e 6 slots, respectivamente. Assim como na figura anterior, a Figura 10 mostra a vazão obtida por cada uma das estações. Pode-se observar que há uma diferenciação entre as vazões obtidas.

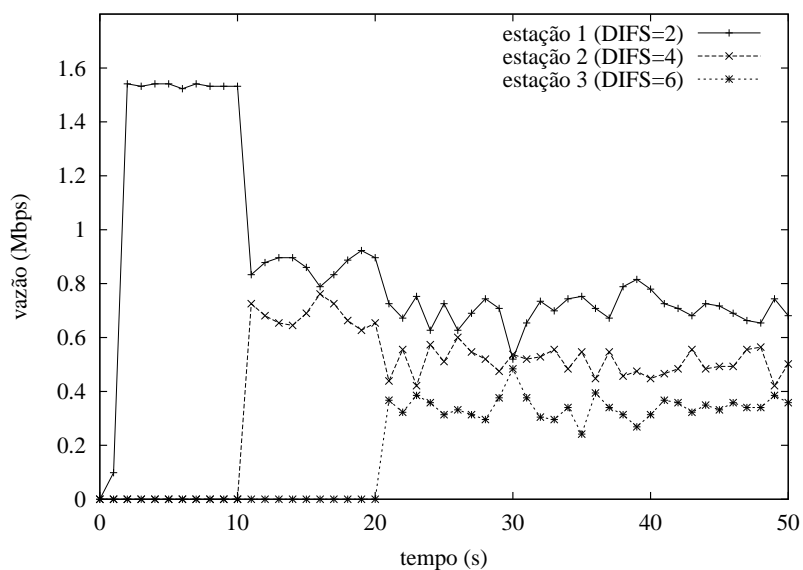


Figura 10: Vazão com alteração do DIFS.

Em seguida, as estações tiveram seus intervalos para as janelas de contenção alterados para [31:1023], [63:2047] e [127:4095], respectivamente. A Figura 11 mostra as vazões obtidas. A estação 1 por ter o menor intervalo para a janela de contenção, obtém mais banda passante que as outras.

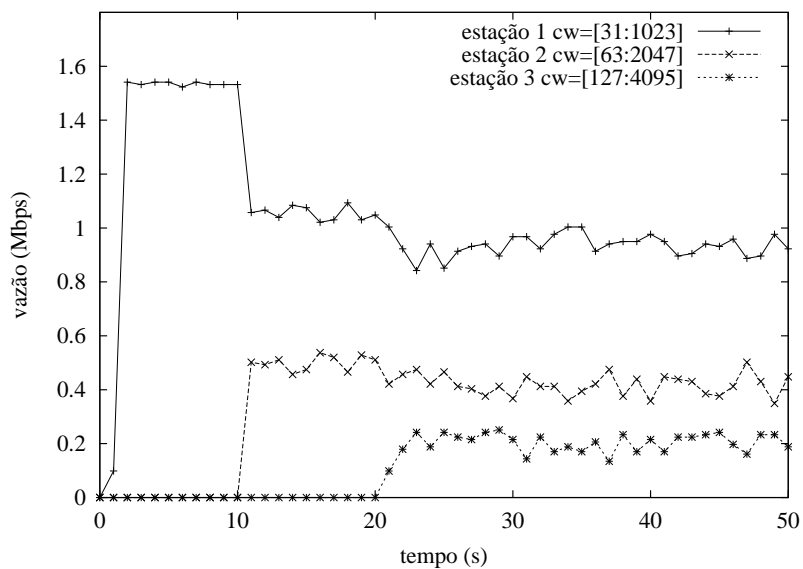


Figura 11: Vazão com alteração dos intervalos para a janela de contenção.

5 Conclusão

Este trabalho apresentou os principais problemas da provisão de qualidade de serviço em redes locais sem-fio IEEE 802.11. Foram realizadas avaliações do desempenho através de si-

mulações dos problemas da provisão da qualidade de serviço e das técnicas de diferenciação. Os resultados indicam uma forte influência do protocolo de roteamento no problema da injustiça no compartilhamento da banda passante disponível devido à sucessivas falhas de roteamento que têm origem na camada MAC. Quanto às técnicas de diferenciação, os resultados mostram que pode-se prover prioridades no acesso ao meio caso sejam utilizados um DIFS menor ou um intervalo para a janela de contenção menor.

Agradecimentos

Este trabalho foi realizado com recursos da UFRJ, FUJB, CNPq, CAPES, COFECUB e REENGE. Agradecimentos especiais à FAPERJ por ter alocado uma bolsa de fixação de pesquisador ao Prof. Marcelo Rubinstein durante a execução deste trabalho no Departamento de Engenharia Eletrônica e de Computação da UFRJ.

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: High-speed physical layer in the 5 GHz band”. IEEE Standard 802.11a, 1999.
- [3] N. H. Vaidya, P. Bahl e S. Gupta, “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.
- [4] I. Aad e C. Castelluccia, “Differentiation mechanisms for IEEE 802.11”, in *Infocom’2001*, Anchorage, Alasca, abril de 2001.
- [5] V. Kanodia, C. Li, A. Sabharwal, B. Sadeghi e E. Knightly, “Distributed multi-hop scheduling and medium access with delay and throughput constraints”, in *ACM The Seventh Annual Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom’01)*, Roma, Itália, julho de 2001.
- [6] B. P. Crow, I. Widjaja, J. G. Kim e P. T. Sakai, “IEEE 802.11 wireless local area networks”, *IEEE Communications Magazine*, vol. 35, no. 9, pp. 116–126, setembro de 1997.
- [7] “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.
- [8] J. Schiller, *Mobile Communications*. Addison-Wesley, 1st ed., 2000. ISBN 0201398362.
- [9] K. Tang e M. Gerla, “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.
- [10] B. Bensaou, Y. Wang e C. C. Ko, “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.

- [11] S. Xu e T. Saadawi, “Does the IEEE 802.11 MAC protocol work well in multihop wireless ad hoc networks?”, *IEEE Communications Magazine*, vol. 39, no. 6, pp. 130–137, junho de 2001.
- [12] K. Fall e K. Varadhan, “The NS Manual”, relatório técnico, The VINT Project, janeiro de 2002.
- [13] J. Broch, D. A. Maltz, D. B. Johnson, Y.-C. Hu e J. Jetcheva, “A performance comparison of multi-hop wireless ad hoc network routing protocols”, in *ACM The Forth Annual Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'98)*, Dallas, EUA, outubro de 1998.