

# Mecanismo de Controle de Acesso ao Meio para Redes Sem Fio com Rádios Full-Duplex\*

Marcel William Rocha da Silva<sup>1</sup>, José Ferreira de Rezende<sup>2</sup>

<sup>1</sup> DCC – IM – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ)

<sup>2</sup>COPPE – Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)

marcelsilva@ufrrj.br, rezende@land.ufrj.br

**Abstract.** *Recently, the construction of full-duplex radios became a reality due to advances obtained in the self-interference cancellation area. However, the potential performance gains from this new type of radio could be explored only by using a specific medium access control mechanism. This work aims to propose and evaluate the performance of a new media access protocol to wireless networks using full-duplex radios. The proposed mechanism uses the basis of the IEEE 802.11 protocol, striving to efficiently explore opportunities for bidirectional communication provided by the use of full-duplex radios.*

**Resumo.** *Há pouco tempo, a construção de rádios full-duplex se tornou realidade devido aos avanços obtidos na área de cancelamento de auto-interferência. Entretanto, os potenciais ganhos de desempenho obtidos com este novo tipo de rádio somente são explorados com o uso de um mecanismo de controle de acesso ao meio específico. Este trabalho tem como objetivo propor e avaliar o desempenho de um novo protocolo de acesso ao meio para redes sem fio que utilizam rádios full-duplex. O mecanismo proposto utiliza como base o protocolo IEEE 802.11 e busca explorar de maneira eficiente oportunidades de comunicação bidirecional disponibilizadas pela utilização dos rádios full-duplex.*

## 1. Introdução

Avanços recentes nas técnicas de cancelamento de auto-interferência (*self-interference cancellation*) permitiram a implementação de rádios full-duplex [Choi et al. 2010, Jain et al. 2011, Choi and Lim 2012, Sen et al. 2012]. Com isso, tornou-se viável a construção de rádios que transmitem e recebem simultaneamente em um único canal. Teoricamente, esses rádios permitem dobrar a capacidade das redes sem fio atuais. No entanto, esses ganhos dependem drasticamente de um protocolo de controle de acesso ao meio (MAC) que permita aproveitar ao máximo as oportunidades de transmissão bidirecional e seja capaz de lidar com problemas de justiça no compartilhamento da banda, do terminal escondido e exposto, os quais são ainda maiores nas redes com comunicação bidirecional.

Trabalhos atuais na literatura propõem protocolos MAC que lidam com esses problemas [Singh et al. 2011, Sahai et al. 2011, Zhou et al. 2013, Xie and Zhang 2014]. No entanto, percebe-se uma grande complexidade envolvida nos mecanismos de acesso ao

---

\*Este trabalho recebeu recursos da FAPERJ.

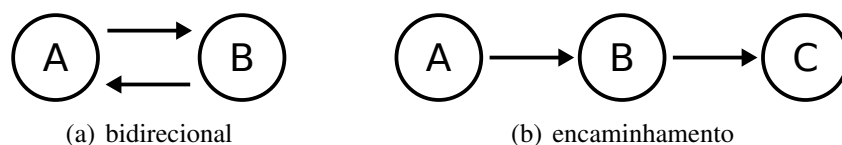
meio propostos nesses trabalhos, o que pode inviabilizar a implementação desses protocolos. A necessidade desses protocolos em manter um conhecimento da vizinhança e estatísticas associadas a cada um dos vizinhos, adiciona uma alta complexidade aos nós sem fio. Além disso, a maioria das propostas requer que o transmissor busque na fila de quadros a serem transmitidos aquele a ser transmitido a cada instante, diferente daquele quadro que ocupa a cabeça da fila.

Neste trabalho, propomos um protocolo MAC full-duplex, baseado no mecanismo DCF do 802.11, que permite aproveitar as oportunidades em enlaces bidirecionais simétricos, garantindo um certo nível de justiça no compartilhamento do meio. Na concepção desse protocolo foi adotado um compromisso entre desempenho e simplicidade para garantir a sua implementabilidade em dispositivos comerciais de baixo custo. Desta forma, este protocolo MAC full-duplex, denominado FDMAC, usa uma máquina de estados simplificada e não requer a manutenção de estados da vizinhança. Essa última propriedade garante o bom funcionamento do protocolo mesmo em caso de mobilidade dos nós. A avaliação de desempenho do protocolo proposto foi realizada através de simulações, as quais mostram os potenciais ganhos do emprego de rádios full-duplex em conjunto com um protocolo MAC de acesso aleatório.

O texto a seguir está estruturado da seguinte forma. Na Seção 2, será apresentado um breve resumo dos trabalhos relacionados existentes. O protocolo MAC proposto neste trabalho será descrito na Seção 3. Em seguida, a Seção 4 apresenta o ambiente de simulação e analisa os resultados obtidos na avaliação de desempenho realizada. Por fim, a Seção 5 apresenta as conclusões e as perspectivas deste trabalho.

## 2. Trabalhos relacionados

Recentemente, vários protocolos MAC full-duplex foram propostos na literatura [Singh et al. 2011, Sahai et al. 2011, Zhou et al. 2013, Xie and Zhang 2014]. Do ponto de vista do protocolo MAC, enlaces full-duplex podem operar em dois modos como descrito em [Xie and Zhang 2014]: modo bidirecional e modo de encaminhamento [Xie and Zhang 2014]. O primeiro modo permite a um par de nós transmitirem um ao outro simultaneamente, enquanto o segundo modo permite que um nó receptor reencaminhe quadros a outro nó vizinho ao mesmo tempo (Figura 1).



**Figura 1. Modos de operação full-duplex.**

Em [Singh et al. 2011], esses dois modos são classificados em enlaces duais simétricos e assimétricos, respectivamente. O uso destes dois modos de operação permite um melhor aproveitamento das oportunidades de transmissão simultânea. Uma oportunidade assimétrica é mais frequente que a bidirecional pois basta que o receptor (nó B) tenha quadros a serem transmitidos a um de seus vizinhos (nó C). No entanto, essa oportunidade assimétrica se torna real apenas quando a interferência causada no nó C pelo transmissor primário seja inferior a um determinado limiar. Assim, a detecção dessas oportunidades exige um grande aumento na complexidade do protocolo MAC [Singh et al. 2011].

Outra questão com relação à complexidade diz respeito à necessidade de uma busca por quadros fora da ordem na fila de transmissão. Ou seja, para o aproveitamento dessas oportunidades é necessário que o nó seja capaz de percorrer a sua fila de quadros de transmissão para detectar a presença de um quadro destinado a um de seus vizinhos. Esse tipo de mecanismo deve levar em conta a possibilidade de quadros na cabeça da fila sofrerem maiores atrasos no acesso ao meio ou até mesmo sofrerem de inanição (*starvation*). Por exemplo, em [Singh et al. 2011], os autores propõem, para a seleção do quadro a ser transmitido, o uso de uma lista dos vizinhos ranqueada pela taxa de sucesso das últimas  $x$  ( $=10$ ) transmissões. Além disso, a escolha desse quadro deve ser feita rapidamente de modo a não afetar a transmissão simultânea com um quadro em recepção.

Em [Xie and Zhang 2014], os autores apresentam um modelo analítico para quantificar o ganho em capacidade fornecido pelo uso de rádios full-duplex em relação ao uso de rádios half-duplex. Os resultados obtidos por uma análise assintótica em redes de larga-escala mostram que os efeitos do reuso espacial e da disputa assíncrona pelo meio prejudicam drasticamente os ganhos dos rádios full-duplex. Como conclusões desse trabalho, algumas diretrizes para a concepção de protocolos MAC full-duplex são fornecidas.

O protocolo FD-MAC, proposto em [Sahai et al. 2011], foi concebido especialmente para redes infra-estruturadas. Diversos mecanismos são propostos nesse protocolo para aumentar as possibilidades de uso do full-duplex. Esses mecanismos vão desde a troca de informação entre dois nós sobre os contadores a serem usados nos *backoffs* até a descoberta da topologia para a formação de enlaces duais assimétricos, passando pela busca de quadros fora da ordem na fila de transmissão.

Alguns desses protocolos propõem o uso do tom de ocupado (*busy tone*) proposto originalmente no protocolo BTMA [Tobagi and Kleinrock 1975]. O tom de ocupado, quando transmitido pelo receptor, permite evitar os problemas do terminal escondido e exposto. Diferentemente do BTMA, onde o tom de ocupado é transmitido em outro canal, nos protocolos MAC full-duplex, onde ocorre o cancelamento da auto-interferência, o tom de ocupado é transmitido no mesmo canal. Quando o receptor tem um quadro a ser transmitido, ele precisa apenas transmitir o tom de ocupado ao final da transmissão caso a duração do quadro sendo transmitido seja inferior ao do quadro em recepção. No caso do receptor não ter nenhum a quadro a ser transmitido simultaneamente, ele transmite o tom de ocupado durante toda a recepção do quadro. Em todos os casos, a recepção é protegida de potenciais terminais escondidos. Apesar das aparentes vantagens trazidas pelo uso do tom de ocupado, o seu uso é considerado por alguns autores como um acréscimo de complexidade que não traz ganhos significativos, sem contar com os gastos de energia incorridos na sua utilização e o aumento da interferência co-canal gerada em uma rede de larga-escala.

Um outro problema bastante relevante na concepção de novos protocolos MAC full-duplex está relacionado à justiça no compartilhamento da banda pelos múltiplos nós. Um grande número de trabalhos apontam para o compartilhamento injusto fornecido pelo mecanismo DCF do 802.11, o qual está relacionado a diversos fatores tais como à captura do meio por parte de alguns nós, às condições topológicas e ao uso do espaçamento entre quadros EIFS. Desta forma, a maioria das propostas de protocolos MAC full-duplex atacam o problema da justiça, definindo mecanismos que levam a um melhor comparti-

lhamento do meio.

### 3. Proposta

O protocolo MAC para rádios full-duplex proposto neste trabalho, denominado FDMAC, consiste em modificações ao mecanismo DCF do padrão IEEE 802.11 para permitir o aproveitamento das oportunidades de comunicação. O FDMAC utiliza apenas as oportunidades simétricas, não realizando o reordenamento da fila de transmissão. Assim, ao iniciar a recepção de um quadro, cada nó espera a chegada completa do cabeçalho e então verifica se ele tem um quadro na cabeça da fila a ser transmitido ao transmissor do quadro em recepção. Nesse caso, ele transmite o quadro simultaneamente. Caso contrário, apenas a transmissão em um sentido é realizada. Este funcionamento é exemplificado na Figura 2, onde vemos ao longo do tempo a transmissão simultânea de dois quadros entre os nós A e B.

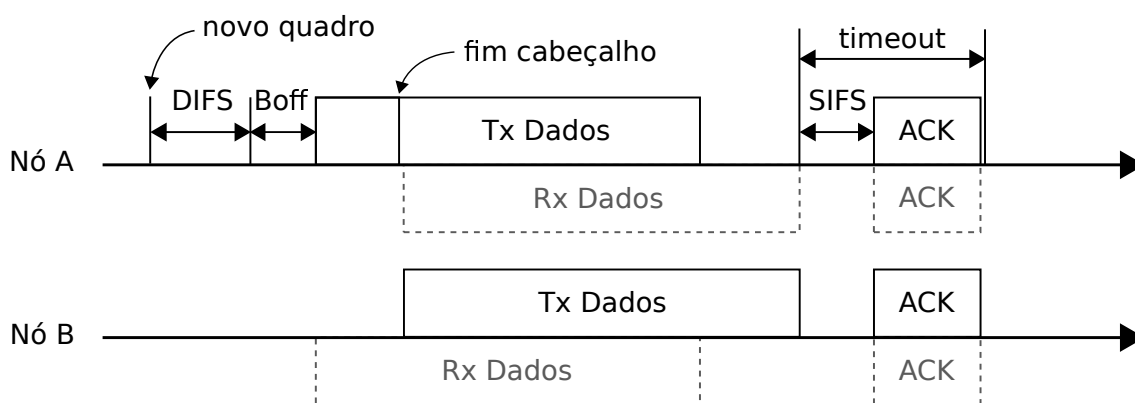


Figura 2. Exemplo de comunicação bidirecional.

Na transmissão simultânea (modo bidirecional), ao término da recepção de um quadro, o nó apenas pode enviar um reconhecimento (ACK) quando a sua transmissão tiver sido finalizada. Assim, em caso de transmissões simultâneas, os nós podem ter que adiar a transmissão de ACKs. Esse procedimento exige que o transmissor inicialize o temporizador usado para detectar a não recepção do ACK em diferentes instantes de tempo. Quando ele estiver apenas transmitindo, ele deve inicializar o temporizador ao final da transmissão do quadro (caso do nó B na Figura 2). No caso em que ele estiver ainda em modo de recepção (caso do nó A na Figura 2), ele deve inicializar este temporizador apenas ao final da recepção do quadro. Em ambos os casos, o temporizador será inicializado com um valor igual ao tempo de espaçamento entre quadros SIFS adicionado ao tempo de transmissão do ACK e ao tempo máximo de propagação ida e volta, como mostrado na Figura 2. Desta forma, pode ser notado que quando duas transmissões acontecem simultaneamente, uma sincronização no envio dos ACKs ocorre, pois o envio de um dos reconhecimentos será sempre adiado.

Como explicado na seção anterior, os protocolos MAC full-duplex derivados do DCF ressaltam ainda mais o problema de injustiça no compartilhamento da banda. Para minimizar o problema, alguns mecanismos foram acrescentados ao protocolo FDMAC. Como descrito anteriormente, a sincronização dos ACKs entre um par de nós em uma comunicação bidirecional, apesar de corretamente decodificados por ambos os nós, é

percebido como uma colisão por um terceiro nó que se encontra na vizinhança de ambos os nós em comunicação. De acordo com a especificação do DCF do padrão IEEE 802.11 [802.11 1999], sempre que uma colisão ocorre e o nó não consegue decodificar uma transmissão, ele utiliza o espaçamento entre quadros EIFS antes de iniciar a decrementar o *backoff* para acessar o meio. Este espaçamento EIFS possui valor correspondente à soma de: SIFS, DIFS e o tempo de transmissão do ACK. Como este valor é superior ao valor de DIFS, que normalmente é utilizado antes do *backoff* aleatório, o par de comunicação que obteve o meio pela primeira vez continua transmitindo, caso ele sempre tenha quadros a transmitir, sem permitir que um outro nó capture o meio. Esse comportamento leva a uma grande injustiça na utilização da banda.

Para resolver esse problema, a seguinte solução foi empregada no FDMAC. Sempre que o receptor se sincroniza para a decodificação de um quadro, ele guarda o instante de tempo ( $t_{inicio}$ ) em que essa sincronização ocorreu. Ao final da recepção ( $t_{fim}$ ), se o nó não consegue decodificar o quadro corretamente, ele estima o tempo em que ficou nesse estado ( $t_{colisao} = t_{fim} - t_{inicio}$ ). Se este tempo  $t_{colisao}$  estimado é próximo ao tempo de transmissão de um ACK ( $T_{ack}$ ), ele considera que houve uma colisão de ACKs e espera DIFS, ao invés de EIFS, antes de uma nova tentativa de acessar ao meio. Como o EIFS foi concebido exatamente para se evitar a colisão de ACKs [802.11 1999], a não utilização desse espaçamento não traria nenhum malefício, uma vez que a colisão já ocorreu.

A Figura 3 apresenta um diagrama de tempo onde uma colisão de ACKs em uma transmissão bidirecional entre os nós A e B é percebida por um terceiro nó C. Neste cenário, inicialmente o nó C percebe uma colisão (representadas em cinza na figura) com duração longa, a qual é maior que o tempo de transmissão de um ACK. Neste caso, a ação padrão de esperar EIFS antes de decrementar o *backoff* é executada. Após um intervalo de tempo SIFS, uma nova colisão é percebida por C, desta vez uma colisão de ACKs. Neste caso, logo após o nó C ao perceber que a duração da colisão foi equivalente ao tempo de transmissão de um ACK, uma espera de DIFS é realizada antes de decrementar o *backoff* aleatório. Como isso, pode-se perceber que o nó C consegue disputar o acesso ao meio com os nós A e B em igualdade de condições. Isso é importante para que algum par de comunicação não utilize exclusivamente o meio em detrimento aos demais nós sem fio presentes na região.

Fica evidente que para o funcionamento correto do mecanismo apresentado anteriormente é importante a identificação de uma colisão de ACKs apenas através de sua duração, já que os ACKs não poderão ser decodificados. Logo, a percepção do meio ocupado e em colisão por um intervalo de tempo curto provocado por quadros de dados, não pode ser confundida com o meio ocupado por uma colisão de ACKs. De sorte, o tempo de transmissão de quadros de dados que encapsulam datagramas IP de qualquer tamanho é bem superior ao tempo necessário para transmitir um ACK [Xiao and Rosdahl 2002].

#### 4. Ambiente de Simulação e Resultados Numéricos

Para avaliar o desempenho da proposta foram realizados experimentos com o simulador ns-2 [NS-2 2007]. Para a implementação do protocolo FDMAC nesse simulador a eventos discretos, utilizou-se como base o seu módulo de camada MAC 802.11 original, onde diversas modificações foram realizadas, dentre elas: a remoção dos quadros de controle RTS/CTS; a remoção das restrições que impediam as transmissões full-duplex; o acrés-

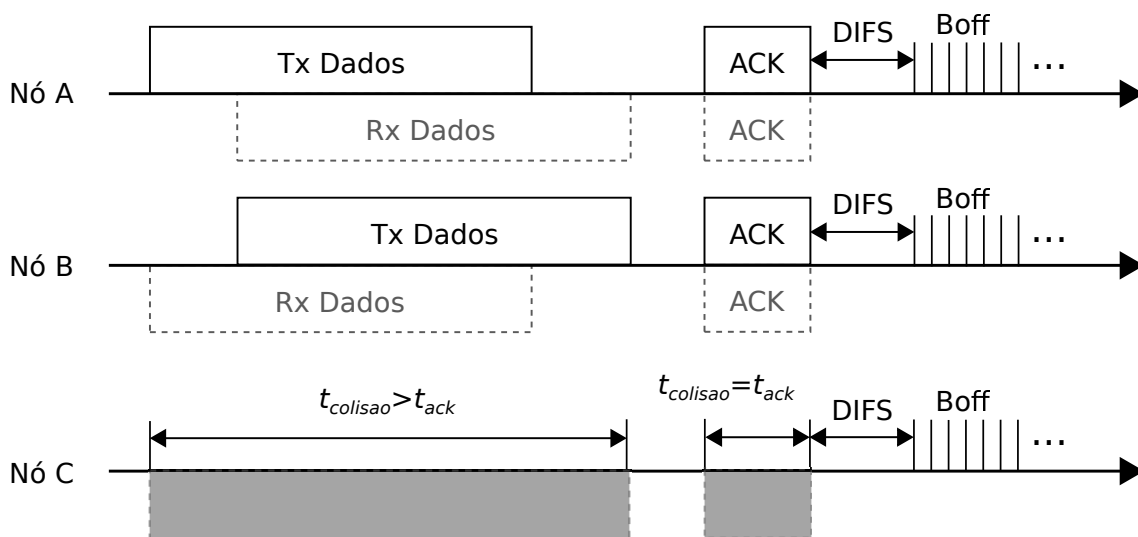


Figura 3. FDMA em cenário de colisão de ACKs bidirecionais.

cimo de um novo estado na máquina de estados do protocolo para o tratamento simultâneo de espera e envio de ACKs; o acréscimo de um temporizador para o processamento ao final da recepção do cabeçalho MAC; a modificação dos temporizadores para a sincronização no envio dos ACKs bidirecionais, a implementação do mecanismo de justiça na colisão dos ACKs explicado na Seção 3, e a inclusão da verificação de restrições adicionais para o correto funcionamento do simulador.

Além disso, outra modificação importante adicionada ao ns-2 foi a representação da influência entre as transmissões dos nós sem fio através de um modelo de interferência mais realista do que aquele presente no ns-2. Neste novo modelo, a interferência acumulada durante a recepção dos quadros é contabilizada, e somente são recebidos corretamente quadros cuja SINR ficou acima de um limite mínimo definido. Os valores utilizados neste modelo foram: SINR mínima de 10 dB e potência de transmissão dos rádios de 10 dBm. Associado à este modelo de interferência utilizou-se o modelo de propagação *log-distance* [Rappaport 2001], com parâmetro  $\alpha = 5$ , para estimar a perda de potência no percurso. Com estes parâmetros o alcance de recepção correta de um quadro é de aproximadamente 95 metros para uma taxa de transmissão de dados de 11 Mbps. Tais características equivalem a um ambiente urbano *indoor*.

As simulações realizadas foram divididas em dois conjuntos de experimentos distintos, os quais serão apresentados em detalhe a seguir.

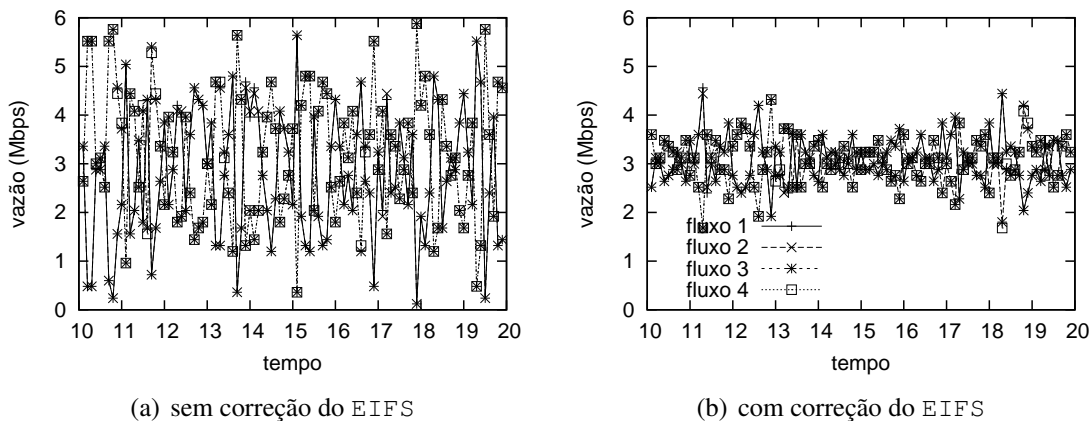
#### 4.1. Avaliação do Mecanismo de Correção do EIFS do Protocolo FDMA

O primeiro conjunto foi executado em um cenário ilustrativo simples, no qual o objetivo era avaliar o funcionamento do mecanismo de justiça na colisão dos ACKs proposto para o protocolo FDMA. Para tal, dois pares de nós sem fio foram posicionados próximos uns aos outros, com alcance suficiente para a decodificação dos quadros. Apesar de ilustrativo, este é um tipo de arranjo muito comum em ambientes urbanos *indoor*, onde residências ou escritórios próximos possuem pontos de acesso sem fio com poucos clientes cada.

Cada par  $(a, b)$  de nós sem fio utilizado na simulação gera um fluxo de dados

bidirecional, ou seja, um fluxo do nó  $a$  para o nó  $b$  e outro do nó  $b$  para o nó  $a$ . Estes fluxos de dados consistem de pacotes de 1500 bytes que são gerados a uma taxa constante (CBR) e suficientemente grande para garantir que os *buffers* de camada MAC sempre possuam pelo menos um quadro a ser transmitido, ou seja, operem na saturação.

Nos gráficos das Figuras 4 e 5 são apresentadas as vazões de cada fluxo de dados ao longo do tempo calculadas com intervalos de tempo de 0, 1 e 0, 5 segundos, respectivamente. Em ambos os casos, são apresentadas as vazões instantâneas dos fluxos com e sem o mecanismo de correção do EIFS. Apesar de simples, estas simulações mostram bem o mecanismo em funcionamento. Nos casos onde o mecanismo não está habilitado (Figuras 4(a) e 5(a)), pode se perceber uma maior variabilidade das vazões dos fluxos ao longo do tempo. A causa desta variação é a injustiça na disputa pelo acesso ao meio em curtas escalas de tempo. Quando um par sem fio acessa o meio de comunicação, ele tem maior probabilidade de conseguir acessar novamente nas próximas tentativas, já que estes nós sem fio aguardam apenas  $DIFS+backoff$  para transmitir novamente. O outro par possui uma chance menor de acessar o meio de comunicação, já que após a colisão dos ACKs bidirecionais vai aguardar  $EIFS+backoff$  antes de transmitir. Eventualmente, o par que acessa o meio escolhe um valor de *backoff* grande e permite que o outro par transmita. Entretanto, por períodos de tempo significativos, da ordem de centenas de milissegundos, um dos pares transmite enquanto o outro fica impossibilitado de acessar o meio.



**Figura 4. Vazão de cada fluxo a intervalo de 0.1 segundos.**

Os efeitos desta injustiça em curtas escalas de tempo pode ser especialmente prejudicial para o desempenho das aplicações. A demora para conseguir acesso ao meio sem fio fará com que as filas de transmissão fiquem cheias, o que pode ocasionar perdas de pacotes, aumento do atraso e da variação do atraso. Desta forma, aplicações do tipo tempo-real ficam prejudicadas e também aplicações que utilizam transferência confiável de dados com o protocolo TCP, já que as perdas de pacotes na fila podem prejudicar o mecanismo de controle de congestionamento. Voltaremos a discutir este assunto no próximo conjunto de experimentos.

#### 4.2. Avaliação do Desempenho do Protocolo FDMAC em Cenários Aleatórios

O segundo conjunto de experimentos consistiu na distribuição aleatória de pares de nós sem fio em uma área quadrada. Neste posicionamento aleatório, garantiu-se apenas que

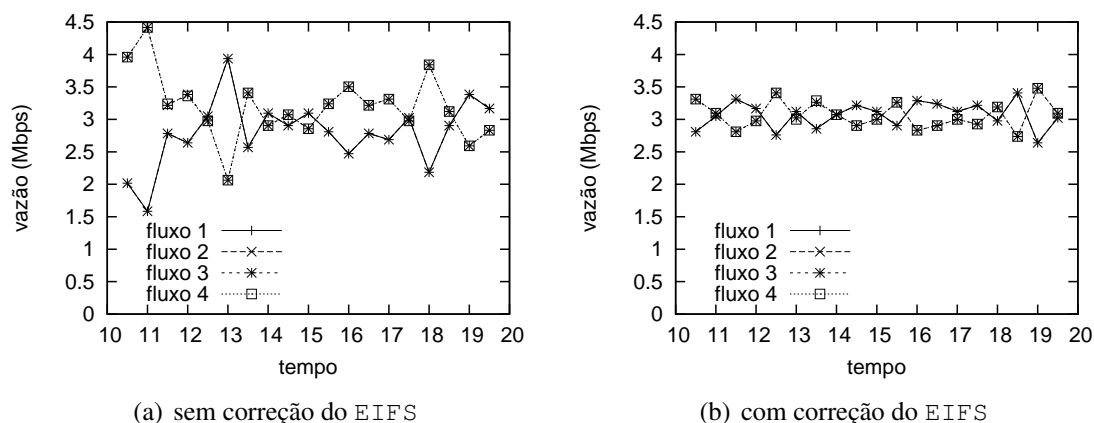


Figura 5. Vazão de cada fluxo a intervalo de 0.5 segundos.

os nós sem fio de um mesmo par estivessem dentro do alcance de recepção um do outro. Foram realizadas simulações com uma quantidade de pares de nós sem fio variando de 1 até 11 em áreas quadradas de 100, 500 e 1000 metros de lado. Além disso, dois tipos de tráfego distintos foram utilizados nas simulações: tráfego CBR, semelhante ao utilizado na seção anterior, e tráfego TCP de longa-duração, usado na transferência de grandes arquivos, durante toda a simulação. O objetivo era avaliar o desempenho do protocolo proposto em diferentes situações de carga e disposição dos nós de forma a permitir o reuso espacial do canal.

O desempenho para os dois tipos de camada MAC são apresentados nos gráficos: o algoritmo **DCF 802.11 original** e o algoritmo **FDMAC proposto**, como descrito na Seção 3. Para os resultados do FDMAC dois conjuntos de simulações foram realizadas: com e sem o mecanismo de correção do EIFS avaliado na seção anterior.

Para cada possível configuração, ou seja, cada combinação de quantidade de pares de nós e de tamanho do lado da área quadrada, foram executadas 30 rodadas de simulação com 100 segundos de duração. Cada rodada utilizou um posicionamento aleatório diferente dos pares de nós sem fio, como mencionado anteriormente. Em todos os gráficos apresentados a seguir, os pontos representam os valores médios das 30 rodadas de simulação executadas para cada configuração, e as barras de erro correspondem a intervalos de confiança de 95%.

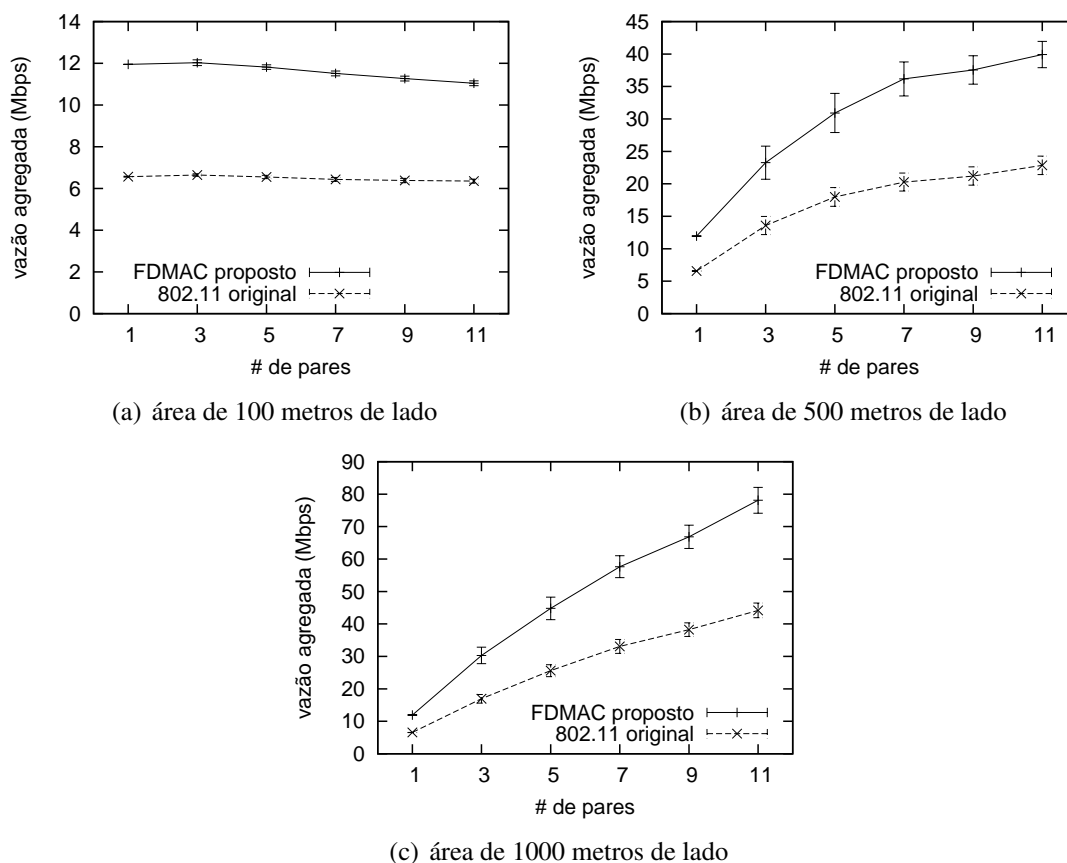
As métricas de desempenho avaliadas nestas simulações foram a **vazão agregada** e o **índice de justiça**. A vazão agregada é o somatório das vazões individuais dos fluxos de dados existentes na simulação, e fornece uma medida do quanto da capacidade do meio de comunicação está sendo utilizada pelos pares comunicantes. Já o índice de justiça (*fairness index*) [Jain et al. 1984] é uma métrica, com valores no intervalo  $[0, 1]$ , a qual mede o nível de proximidade de um conjunto de amostras. O cálculo do valor do índice de justiça é dado pela equação  $\frac{(\sum x_i)^2}{n \sum (x_i^2)}$ , a qual fornece a justiça entre os  $n$  valores  $x_i$ .

Neste novo conjunto de experimentos, o desempenho do protocolo FDMAC proposto com ou sem o mecanismo de correção do EIFS habilitado forneceu resultados semelhantes, com exceção dos cenários com tráfego TCP de longa duração e área quadrada de lado 100 metros. Isso já era esperado, uma vez que as métricas avaliadas nestas simu-



lações medem o desempenho médio dos protocolos a longo prazo, mascarando os efeitos prejudiciais da injustiça no acesso ao meio em curtas escalas de tempo. Desta forma, por questão de melhorar a apresentação dos resultados, os casos onde o mecanismo de correção do EIFS não gerou diferenças significativas foram omitidos. Já os resultados no caso onde a diferença de desempenho é pronunciada estão incluídos e serão discutidos a seguir.

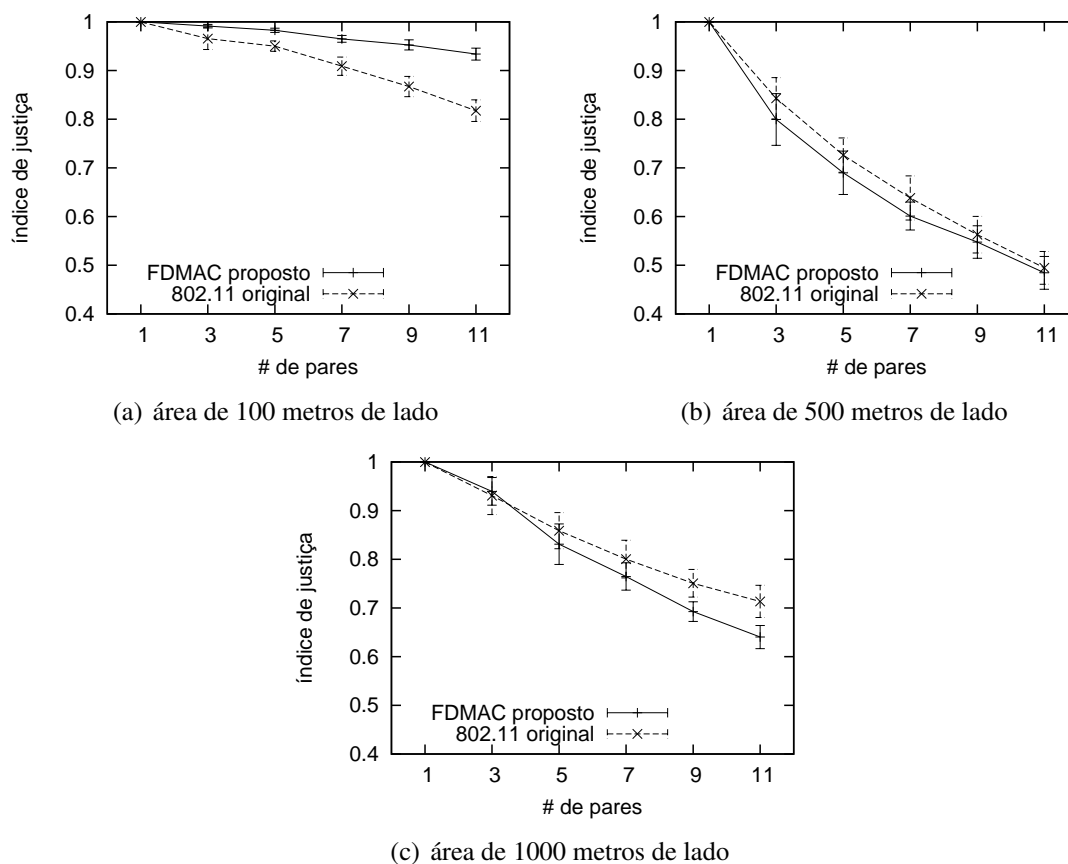
Os gráficos da Figura 6 apresentam a vazão agregada em Mbps para os protocolos 802.11 original e FDMAC em cenários de tráfego CBR. De acordo com os resultados, pode-se perceber que a utilização do protocolo FDMAC forneceu ganhos de desempenho significativos na vazão agregada, independente da quantidade de pares de comunicação e também do tamanho da área. Tais ganhos em grande parte dos cenários são próximos do ganho máximo teórico de 2 vezes que seria possível pela adoção de rádios full-duplex. Este resultado se justifica já que os experimentos criam um cenário favorável ao mecanismo FDMAC, onde todos os nós sem fio possuem quadros a ser transmitidos e podem aproveitar as oportunidades de transmissão bidirecional.



**Figura 6. Vazão agregada com tráfego CBR e com mecanismo de correção do EIFS.**

Ainda a respeito dos experimentos utilizando o tráfego CBR, a Figura 7 apresenta os resultados obtidos para o índice de justiça. De acordo com estes gráficos, pode-se perceber que o protocolo FDMAC proposto forneceu ganhos na justiça entre as vazões dos fluxos quando operando em cenários densos (Figura 7(a)) onde, por conseguinte, não

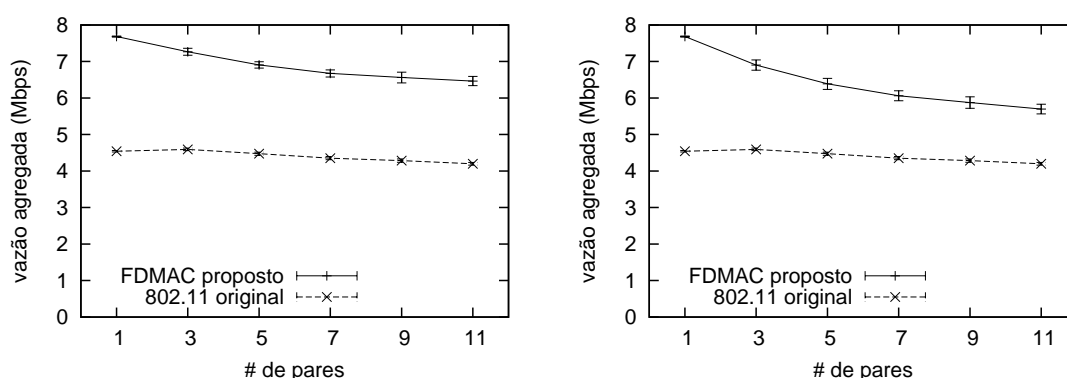
existe reuso espacial. Isso se explica em parte pelo melhor aproveitamento das oportunidades de transmissão, pois agora quando um nó sem fio ganha o acesso ao meio, uma oportunidade de transmissão bidirecional é gerada também para o seu par de comunicação. Desta forma, os fluxos de dados bidirecionais em um mesmo par de comunicação tendem a obter vazões próximas. Além disso, este acoplamento gerado pelas transmissões bidirecionais faz com que a disputa pelo acesso ao meio aconteça entre os pares de comunicação, ao invés de entre nós sem fio independentes. Logo, a alternância no acesso ao meio ocorre em uma escala de tempo menor, o que faz com que a espera no acesso ao meio seja menor.



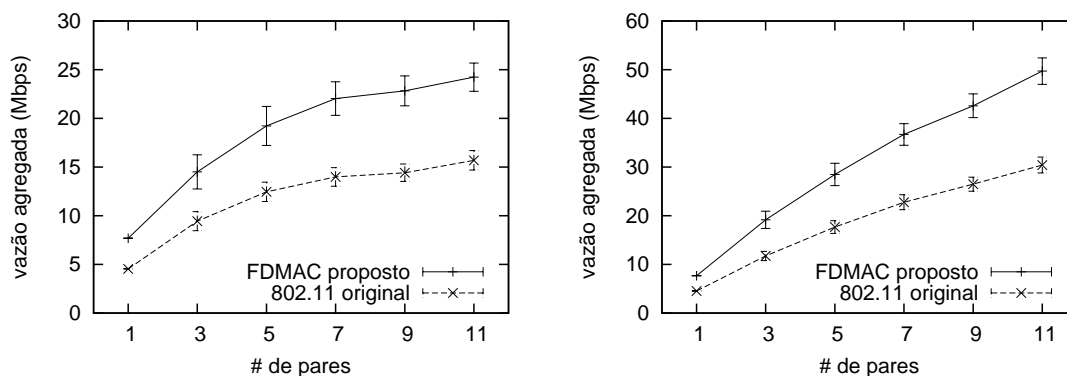
**Figura 7. Índice de justiça com tráfego CBR e com mecanismo de correção do EIFS.**

Os próximos conjuntos de gráficos da Figura 8 apresentam a vazão agregada nos experimentos com fluxos bidirecionais TCP. Para estes novos cenários de tráfego, percebe-se que os ganhos obtidos com o uso do FDMAC não são tão pronunciados quanto aqueles obtidos no caso do tráfego CBR. Isto se justifica, pois o protocolo TCP envia, além dos dados da aplicação, mensagens de confirmação de camada de transporte (ACKs TCP). Com isso, as transmissões bidirecionais, frequentemente, consistem na combinação de um segmento de dados TCP e um ACK TCP. Esta característica do funcionamento do protocolo TCP faz com que nem todas as oportunidades de transmissão bidirecional sejam aproveitadas para o envio de dados da aplicação e torna o aproveitamento da capacidade do meio de comunicação menos eficiente.

Além do problema mencionado no parágrafo anterior, a utilização do tráfego TCP de longa-duração torna a comunicação mais sensível à perdas de mensagens quando comparada ao tráfego CBR. Isto se deve principalmente ao mecanismo de controle de congestionamento do protocolo TCP, que precisa retransmitir mensagens quando estas são perdidas pela camada MAC. Este efeito fica mais evidente quando analisamos os resultados para o cenário denso, com área quadrada de 100 metros de lado (Figuras 8(a) e 8(b)). Neste caso, o aumento do número de pares de comunicação causa uma redução da vazão agregada, devido ao aumento da quantidade de colisões entre transmissões de pares distintos e, conseqüentemente, a perda de quadros na camada MAC. Entretanto, vale ressaltar que, ainda assim, em todos os experimentos foram obtidos ganhos de desempenho significativos pelo uso do protocolo FDMAC.



(a) área de 100 metros de lado, sem mecanismo de correção do EIFS (b) área de 100 metros de lado, com mecanismo de correção do EIFS

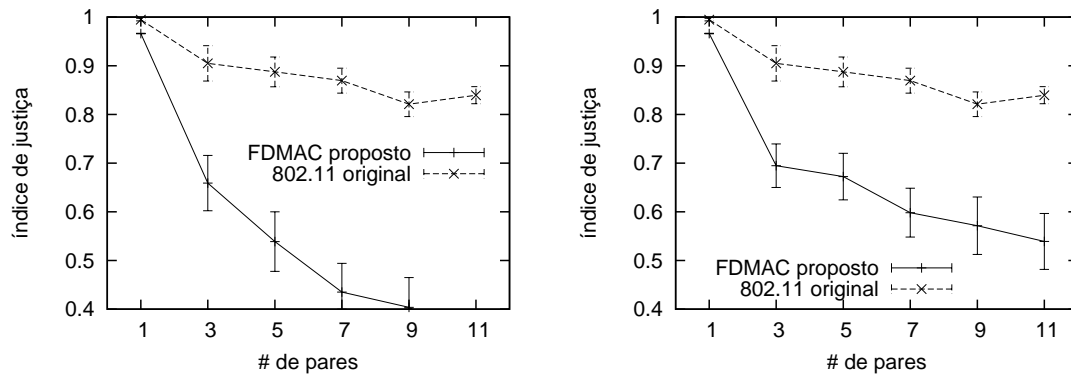


(c) área de 500 metros de lado, com mecanismo de correção do EIFS (d) área de 1000 metros de lado, com mecanismo de correção do EIFS

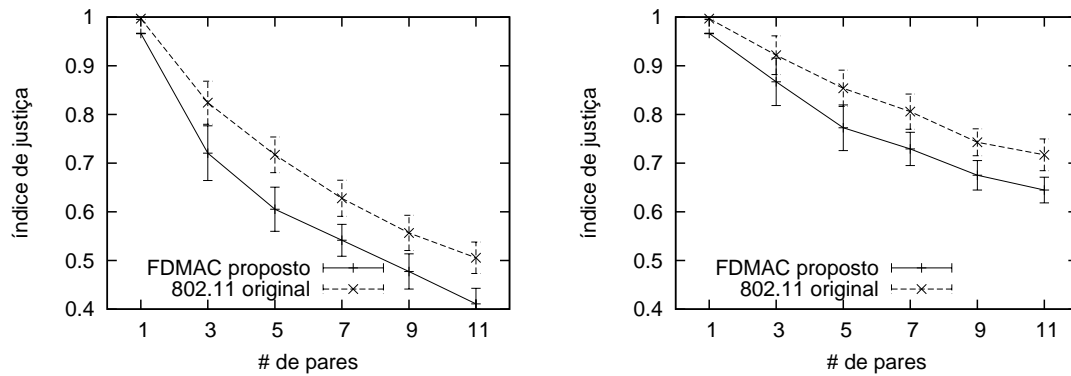
**Figura 8. Vazão agregada com tráfego TCP.**

O próximo conjunto de resultados apresentado na Figura 9 mostra o índice de justiça entre as vazões individuais nos experimentos com fluxos TCP. Nestes resultados, vemos que a justiça entre os fluxos com o uso do FDMAC é inferior quando comparada ao 802.11 original. Nos cenários de área quadrada com 100 metros de lado (Figura 9(a)) a piora na justiça é ainda mais expressiva. Entretanto, ao comparar os gráficos das Figuras 9(a) e 9(b), pode-se notar que o uso do mecanismo de correção do EIFS ameniza um pouco a injustiça. Isso ocorre, pois a maior frequência na alternância do acesso ao meio torna mais regular o intervalo de envio das mensagens de dados e ACK do protocolo

TCP por um único nó sem fio e, conseqüentemente, melhora a justiça entre as vazões individuais.



(a) área de 100 metros de lado, sem mecanismo de (b) área de 100 metros de lado, com mecanismo de correção do EIFS



(c) área de 500 metros de lado, com mecanismo de (d) área de 1000 metros de lado, com mecanismo de correção do EIFS

**Figura 9. Índice de justiça com tráfego TCP.**

## 5. Conclusões e Trabalhos Futuros

Os avanços obtidos na área de cancelamento de auto-interferência permitiram uma quebra de paradigma nas comunicações sem fio: a realização de comunicação full-duplex em uma única faixa de frequências. Esta técnica tem o potencial de ampliar a capacidade das comunicações sem fio em diversos cenários. Entretanto, muitos avanços ainda são necessários para que todo o potencial dos rádios full-duplex possa ser explorado na prática. Um dos problemas existentes são os protocolos de camada MAC de acesso aleatório, como o utilizado pelas redes do padrão IEEE 802.11. Tal protocolo foi pensado inicialmente para o uso de rádios half-duplex e não consegue explorar as oportunidades de transmissão simultânea fornecidas pelos rádios full-duplex.

Neste trabalho, apresentamos um protocolo de camada MAC full-duplex simples, denominado FDMAC, que utiliza rádios full-duplex para explorar as oportunidades de comunicação bidirecional. No protocolo proposto, detectou-se a necessidade de modificar a ação padrão utilizada pelo 802.11 para reagir à colisões, que seria aguardar o tempo  $EIFS+backoff$  antes de transmitir novamente. Devido à natureza da comunicação bidirecional, a colisão entre quadros de ACK é muito provável, e seria injusto esperar um tempo

longo neste caso. O mecanismo auxiliar do FDMAC proposto identifica esta situação e toma uma ação mais justa, o que é importante para garantir justiça em curtas escalas de tempo, que poderiam prejudicar o desempenho das comunicações.

A avaliação de desempenho mostrou que, na maioria dos cenários, o protocolo FDMAC proposto consegue aumentar a vazão agregada sem comprometer a justiça entre as vazões dos fluxos de dados individuais. Este é um resultado muito satisfatório, que mostra que a utilização de protocolos de acesso ao meio aleatório em conjunto com rádios full-duplex é viável. Além disso o mecanismo de correção do EIFS se mostrou eficiente para solucionar problemas de justiça em curtas escalas de tempo e também melhorar a justiça do FDMAC em redes densas. Entretanto, alguns dos resultados obtidos comprovam o que foi constatado na literatura, que a justiça em protocolos full-duplex de acesso ao meio é um desafio a ser estudado.

Como trabalhos futuros pretende-se realizar novas avaliações de desempenho com o protocolo FDMAC. Dentre as avaliações pretendidas estão experimentos utilizando redes infra-estruturadas, redes de múltiplos saltos e experimentos envolvendo mobilidade dos nós sem fio. Para isso, será necessário estender o protocolo FDMAC para dar suporte ao modo de encaminhamento além do modo bidirecional como descrito na Seção 2. Além disso, pretende-se explorar também questões relacionadas ao aprimoramento da justiça no acesso ao meio com o protocolo FDMAC.

## Referências

- 802.11 (1999). Wireless lan medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications. IEEE Standard.
- Choi, J. I., Jain, M., Srinivasan, K., Levis, P., and Katti, S. (2010). Achieving single channel, full duplex wireless communication. In *Proceedings of the Sixteenth Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, MobiCom '10*, pages 1–12, New York, NY, USA. ACM.
- Choi, W. and Lim, H. (2012). Immediate acknowledgement for single-channel full-duplex wireless networks. In *Mobile Adhoc and Sensor Systems (MASS), 2012 IEEE 9th International Conference on*, pages 477–478.
- Jain, M., Choi, J. I., Kim, T., Bharadia, D., Seth, S., Srinivasan, K., Levis, P., Katti, S., and Sinha, P. (2011). Practical, real-time, full duplex wireless. In *Proceedings of the 17th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, MobiCom '11*, pages 301–312, New York, NY, USA. ACM.
- Jain, R., Chiu, D., and Hawe, W. (1984). A quantitative measure of fairness and discrimination for resource allocation in shared computer systems. Technical Report Report TR-301, DEC Research.
- NS-2 (2007). The network simulator - ns-2. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>. Último acesso em 15/12/2014.
- Rappaport, T. (2001). *Wireless Communications: Principles and Practice*. Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, NJ, USA, 2nd edition.
- Sahai, A., Patel, G., and Sabharwal, A. (2011). Pushing the limits of full-duplex: Design and real-time implementation. *CoRR*, abs/1107.0607.

- Sen, S., Choudhury, R., and Nelakuditi, S. (2012). CSMA/CN: Carrier sense multiple access with collision notification. *Networking, IEEE/ACM Transactions on*, 20(2):544–556.
- Singh, N., Gunawardena, D., Proutiere, A., Radunovic, B., Balan, H., and Key, P. (2011). Efficient and fair MAC for wireless networks with self-interference cancellation. In *Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks (WiOpt), 2011 International Symposium on*, pages 94–101.
- Tobagi, F. and Kleinrock, L. (1975). Packet switching in radio channels: Part II—the hidden terminal problem in carrier sense multiple-access and the busy-tone solution. *Communications, IEEE Transactions on*, 23(12):1417–1433.
- Xiao, Y. and Rosdahl, J. (2002). Throughput and delay limits of IEEE 802.11. *Communications Letters, IEEE*, 6(8):355–357.
- Xie, X. and Zhang, X. (2014). Does full-duplex double the capacity of wireless networks? In *INFOCOM, 2014 Proceedings IEEE*, pages 253–261.
- Zhou, W., Srinivasan, K., and Sinha, P. (2013). RCTC: Rapid concurrent transmission coordination in full duplex wireless networks. In *Network Protocols (ICNP), 2013 21st IEEE International Conference on*, pages 1–10.