

Avaliação de oportunidades de transmissões secundárias com rádios *full duplex*

Luiz F. S. Oliveira, Diego Passos, Célio V. N. Albuquerque¹

¹Instituto de Computação – Universidade Federal Fluminense (UFF)

{lfoliveira, dpassos, celio}@ic.uff.br

Abstract. *A basic property of wireless networks is the half duplex nature of its links. However, previous work has already shown, with real prototypes of full duplex radios, to be possible for a node to transmit and receive at the same time. Nevertheless, the gains that stem from such techniques are not straightforward. In this work we analyze how frequent the full duplex transmissions are in typical wireless networks scenarios. Simulations were conducted in both infra-structured and ad hoc networks with several traffic patterns, and results show potential gains up to 99,96% and 36.93% in the infra-structured and ad hoc cases, respectively.*

Resumo. *Uma propriedade básica das redes sem fio é a natureza half duplex de seus enlaces. Porém, diversos trabalhos já mostraram ser possível, através de protótipos reais de rádios sem fio full duplex, transmitir e receber ao mesmo tempo. No entanto, os ganhos obtidos a partir do uso de tais técnicas não são imediatos. Neste trabalho fazemos uma análise de quão frequentes são as oportunidades de transmissões full duplex em cenários típicos de redes sem fio. Simulações foram feitas em redes infraestruturadas e ad hoc com diversos padrões de tráfego e resultados mostraram que em alguns cenários foi possível obter ganhos de até 99,96% e 36,93% nos casos infraestruturado e ad hoc, respectivamente.*

1. Introdução

Uma propriedade básica das redes sem fio é a natureza *half duplex* de seus enlaces, *i.e.* um nó não pode transmitir e receber ao mesmo tempo e na mesma frequência. Como o sinal de uma transmissão sem fio sofre grande atenuação a medida em que se propaga no espaço, é comum que o sinal recebido por um nó, gerado por um de seus vizinhos, seja várias ordens de grandeza mais fraco que um sinal de transmissão gerado no próprio nó. Por este motivo, receber um pacote enquanto se transmite é, em geral, considerado inviável.

No entanto, existem na literatura trabalhos que procuram mudar este cenário [Choi et al. 2010, Sen et al. 2010b, Radunovic et al. 2009, Gollakota and Katabi 2008, Katti et al. 2007, Sen et al. 2010a, Jain et al. 2011]. Tais trabalhos propõem técnicas que permitem transmissões e recepções simultâneas através de recursos de cancelamento de ruído que tentam remover do sinal recebido a parcela correspondente à transmissão gerada pelo próprio nó. Quando estas técnicas são bem sucedidas, elas apresentam o potencial de aumentar a capacidade das redes sem fio,

permitindo uma quantidade maior de transmissões simultâneas, já que um transmissor pode, simultaneamente, receber um pacote.

Os ganhos obtidos a partir do uso de tais técnicas, porém, não são diretos. Os protocolos de camada de enlace para redes sem fio, por via de regra, se baseiam em enlaces *half duplex*. Estes protocolos pró-ativamente implementam mecanismos, como o CSMA/CA, que evitam que nós tentem transmitir e receber ao mesmo tempo. Isso faz com que a simples utilização de um rádio com capacidade de transmissão *full duplex* seja insuficiente. Ao contrário, são necessárias adaptações nos protocolos de acesso ao meio para que os mesmos sejam capazes de extrair os potenciais ganhos resultantes desta tecnologia.

Uma questão importante, portanto, é se há, de fato, ganhos substanciais no emprego de rádios *full duplex* em cenários típicos de redes sem fio. Em outras palavras, é preciso investigar se os ganhos de desempenho advindos do uso de tais rádios são suficientemente grandes para justificar a maior complexidade envolvida nas decisões de acesso ao meio que eles acarretam.

Neste trabalho são apresentados resultados que objetivam responder a esta questão. Em primeiro lugar, são analisados os diferentes casos em que transmissões *full duplex* são possíveis, incluindo as restrições necessárias à correta ocorrência das mesmas. Em seguida, através da simulação de cenários típicos de redes sem fio infraestruturadas e *ad hoc*, é levantada a frequência de ocorrência típica de oportunidades de transmissão *full duplex*. Os resultados obtidos mostram que é possível obter ganhos de até 99,96% com cenários e condições de tráfego favoráveis.

O texto está organizado da seguinte forma. Na Seção 2 serão apresentadas as características principais de cada proposta de rádio *full duplex*. Em seguida, na Seção 3, é apresentada a ferramenta construída para encontrar oportunidades de transmissões *full duplex*. Na Seção 4 são apresentados os resultados obtidos através dessa ferramenta em redes infraestruturadas e *ad hoc*. Por fim, na Seção 5, são abordadas as conclusões finais e sugestões de trabalhos futuros.

2. Trabalhos Relacionados

Existem na literatura diversos trabalhos focados em construir rádios *full duplex* para redes sem fio. Uma primeira ideia para a construção deste tipo de rádio é a adoção de um circuito de cancelamento de ruído que subtraia o sinal gerado pelo transmissor do sinal recebido. No entanto, já foi demonstrado experimentalmente que tais circuitos não são eficazes na eliminação da auto-interferência, resultando em baixa sucesso na decodificação de sinal [Radunovic et al. 2009]. Já considerou-se também a utilização de técnicas como o ZigZag decoding [Gollakota and Katabi 2008] que tenta realizar o cancelamento de ruído no domínio digital. No entanto, os conversores analógico-digital atuais não possuem a resolução necessária para permitir a eliminação da interferência do sinal recebido.

Em [Choi et al. 2010], os autores apresentaram uma nova técnica de cancelamento de ruído, chamada de Cancelamento por Antena. Em uma implementação simples, o sinal a ser transmitido é distribuído em duas antenas transmissoras. Uma terceira antena, receptora, é posicionada a distâncias d e $(d + \lambda/2)$ das duas transmissoras, onde λ é o comprimento de onda do sinal. Essa disposição faz com que o sinal emitido pelas duas

antenas transmissoras combinados sejam destruídos nas proximidades da antena receptora por causa da diferença de fase. A interferência destrutiva é mais eficiente quando as amplitudes dos sinais das antenas transmissoras no receptor são semelhantes. Em outras palavras, quanto menor a atenuação sofrida pelo sinal da antena transmissora mais distante (devido à distância extra λ), maior a eficiência do método.

Os autores mostram que o cancelamento por antena provê aproximadamente 30 dB de cancelamento do sinal transmitido e, quando combinado com outras técnicas como circuito de cancelamento de ruído e o cancelamento digital, a redução chega a 60 dB, viabilizando que um nó transmita e receba ao mesmo tempo. No entanto, esta técnica apresenta algumas limitações na prática. Entre elas, pode-se citar: a necessidade de três antenas, a pouca eficiência para sinais com grande largura de banda (como o no IEEE 802.11) e a necessidade de um ajuste fino manual para cada cenário.

Em [Sen et al. 2010b], os autores apresentam um método de Cancelamento Sucessivo da Interferência. A ideia é que, em uma situação de colisão entre vários pacotes, se um dos sinais é consideravelmente mais forte que os demais, este pode ser decodificado e, em seguida, sua contribuição pode ser subtraída do sinal recebido. Desta forma, o sinal resultante poderia ser novamente decodificado, fazendo com que outro pacote possa ser recebido com sucesso. Esse pode ser um processo iterativo que se repete algumas vezes obtendo múltiplos pacotes através do cancelamento sucessivo de interferência. Os autores, no entanto, focam no caso mais simples, no qual são considerados apenas dois pacotes.

Em [Radunovic et al. 2009], os autores propõem utilizar circuitos analógicos de cancelamento de interferência tradicionais em conjunto com antenas especiais. Essas antenas são similares a antenas omnidirecionais comuns, porém elas evitam a propagação do sinal para uma região delimitada por um ângulo entre 10° e 15° no plano horizontal. Utilizando este tipo de antena para transmissão e posicionando a antena de recepção dentro desta região, os autores obtiveram uma redução na auto-interferência entre 25 dB e 30 dB, além dos 30 dB de cancelamento obtidos através do circuito analógico.

Outra técnica relevante, proposta em [Gollakota and Katabi 2008], é o ZigZag Decoding. Esta técnica não permite transmissão *full duplex*. Ao invés disso, o foco desta proposta é reduzir os efeitos do problema dos terminais escondidos, efetivamente permitindo que um nó receba dois pacotes simultaneamente, dadas certas condições. Os autores apresentam uma técnica de cancelamento de interferência no domínio digital que funciona no caso de duas ou mais colisões sucessivas do mesmo conjunto de pacotes. Quando dois pacotes colidem de maneira assíncrona (*i.e.*, o sinal do segundo pacote é recebido no meio da recepção do primeiro), a técnica proposta consegue detectar o prefixo do primeiro pacote que foi recebido corretamente (*i.e.*, antes do segundo pacote interferir). Este prefixo correto é armazenado e, quando uma nova colisão entre os mesmos dois pacotes ocorre, este prefixo é subtraído, ajudando a obter-se uma parte correta do segundo pacote. Este processo continua repetidamente, até que ambas as mensagens tenham sido completamente decodificadas. Além de depender de conversores analógico-digitais com resolução muito alta, o ZigZag só é aplicável em casos muito restritos.

O ANC, *Analog Network Coding*, descrito em [Katti et al. 2007], é outra proposta que permite que transmissões que seriam perdidas por conta de colisões em condições

normais sejam decodificadas corretamente. Em alguns casos estratégicos, quando um nó recebe dois sinais que colidem ele pode encaminhar o sinal resultante (a soma dos dois sinais colididos). Se o receptor conhece um dos pacotes envolvidos na colisão, ele pode cancelar o sinal correspondente ao pacote obtendo apenas o sinal referente ao outro pacote. Em experimentos realizados pelos autores, o ANC demonstrou ganhos significativos de vazão, entre 65% e 70% comparado a abordagens tradicionais.

Em [Sen et al. 2010a], os autores tentam criar um mecanismo análogo ao CSMA/CD para redes sem fio. Em redes cabeadas, o CSMA/CD detecta uma colisão durante a transmissão, e nesse caso faz com que ela seja abortada. Em redes sem fio, no entanto, isso é geralmente considerado inviável, por causa da grande interferência gerada pelo próprio sinal transmitido e pelo fato da colisão ser um evento relevante apenas no receptor (*i.e.*, o fato do transmissor detectar uma outra transmissão simultânea não significa que o receptor não será capaz de decodificar o pacote e vice-versa). Por essas razões, os autores apresentam uma técnica de detecção de colisão no receptor, chamada CSMA/CN. Além de detectar a colisão, esta técnica envia uma notificação ao transmissor para que ele interrompa a transmissão. Os transmissores devem possuir uma segunda antena responsável por efetuar a correlação de sinal para discernir o envio de uma notificação. O trabalho mostra que é possível detectar a notificação mesmo com a extrema auto-interferência proporcionada pela antena transmissora. Foi construído um protótipo usando GNU Radio que demonstrou seu bom desempenho na detecção antecipada de colisões e consequentemente na vazão.

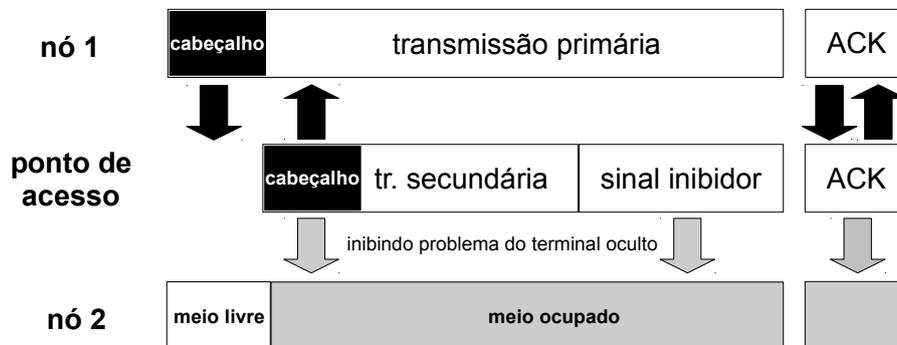


Figura 1. Esquema de transmissões em uma rede *full duplex*

Na Figura 1, adaptada de [Jain et al. 2011], pode-se ver como é a troca de pacotes em uma rede *full duplex*. Após a recepção do cabeçalho enviado pelo nó 1, o ponto de acesso já inicia uma transmissão secundária para o transmissor da transmissão primária. Mesmo que essa transmissão secundária tenha tempo de duração inferior ao da primária, o ponto de acesso continua enviando um sinal denominado inibidor até que a transmissão primária seja encerrada. Dessa maneira a vazão da rede pode ser aumentada, além de evitar o problema do terminal oculto. A transmissão secundária iniciada pelo ponto de acesso inibe o nó 2 de iniciar uma transmissão durante esse período, protegendo a transmissão primária realizada pelo nó 1.

3. Ferramenta de Avaliação

Para avaliar o potencial de ganho de desempenho do emprego de rádios *full duplex* em redes sem fio, foi utilizado o simulador de redes ns-2 [ns-2 2013]. No entanto, por se

tratar de uma tecnologia recente, o simulador ainda não provê suporte nativo a este tipo de rádio. Por este motivo, para efeito da avaliação do número de oportunidades de transmissão *full duplex*, foi desenvolvida uma ferramenta que pós-processa um arquivo de *trace* comum gerado por uma simulação no ns-2 e computa tais oportunidades. Nesta seção, os princípios utilizados na ferramenta são descritos.

3.1. Fluxo de Trabalho

O arquivo convencional de *trace* do ns-2 para simulações de rede sem fio é a entrada da ferramenta. Cada linha desse arquivo representa um evento, e faz-se necessário percorrê-lo com o intuito de encontrar oportunidades transmissões *full duplex*. As oportunidades adicionais de transmissão resultantes do uso de um rádio *full duplex* serão referenciadas como *transmissões secundárias*, em oposição às demais referenciadas como *transmissões primárias*.

Para determinar a viabilidade de uma transmissão secundária, deve-se inicialmente determinar se o receptor da transmissão primária possui pacotes na sua fila de transmissão naquele momento. Além disso, é preciso garantir que a transmissão secundária seja destinada a um nó que tenha como decodificar este novo quadro mesmo durante o uso do meio pela origem da transmissão primária. Por isso, decidiu-se restringir as transmissões secundárias aos quadros endereçados ao nó de origem das transmissões primárias, já que este nó seria capaz de cancelar o próprio sinal. A ferramenta, portanto, precisa analisar cada evento do arquivo de *trace* e manter estado sobre ações como enfileirar ou desenfileirar um pacote, e verificar existência de um pacote na fila de um dado nó.

3.1.1. Buscando oportunidades de transmissões secundárias

De posse de todas as informações das filas de transmissão de cada um dos nós, é possível detectar as oportunidades de transmissão *full duplex*. Cada vez que é reportada pelo ns-2 uma transmissão na camada de enlace, a ferramenta realiza as seguintes tarefas:

1. verifica se existem pacotes na fila de transmissão do nó de destino endereçados para o transmissor da transmissão primária;
2. em caso positivo confirma a possibilidade de uma transmissão secundária, e atualiza contadores para produção de estatísticas.

3.1.2. Caso especial: redes *ad hoc*

Em uma rede infraestruturada, todo o tráfego passa por um ponto de acesso. Então, pode-se afirmar que só existe uma transmissão feita com sucesso por vez. Porém, em uma rede *ad hoc* não existe um ponto que centraliza o tráfego. Por esse motivo, duas transmissões podem ser feitas com sucesso ao mesmo tempo, desde que uma delas não interfira no processo de decodificação da outra. No caso de redes *ad hoc*, antes de inferir que existe uma oportunidade de transmissão secundária, deve-se investigar se algum outro nó da rede está também realizando uma transmissão primária que impeça a realização da transmissão secundária. Para implementar esse controle, a ferramenta recebe em uma estrutura de dados a informação, para cada nó da simulação, de quais outros nós estão dentro do

seu raio de interferência. Para determinar se algum nó da rede realiza uma transmissão primária que impede a realização de uma dada transmissão secundária, a ferramenta faz as seguintes verificações:

1. verifica se vizinhos iniciaram uma transmissão durante o intervalo de tempo da transmissão primária;
2. verifica se houve alguma transmissão endereçada a vizinhos durante o intervalo de tempo da transmissão primária;
3. verifica se vizinhos iniciaram uma transmissão em um instante t , cuja duração ultrapassou o momento de início da transmissão primária;
4. verifica a existência de pacotes na fila de transmissão conforme descrito em 3.1.1

4. Avaliação de Desempenho

Foram realizadas avaliações tanto em redes infraestruturadas, utilizando uma topologia do tipo estrela, quanto em redes *ad hoc*, utilizando uma topologia do tipo linear [Souza and Albuquerque 2010a, Souza and Albuquerque 2010b, Gerk et al. 2009]. Além de variar o tipo de rede e topologia foram variadas as características do tráfego gerado. Em alguns experimentos foi utilizado um padrão de tráfego simétrico, *i.e.*, para qualquer fluxo na rede existe um fluxo no sentido inverso com a mesma taxa de transmissão. Em outros casos, utilizou-se um padrão de tráfego assimétrico, o qual é desbalanceado variando-se a taxa de transmissão em apenas um dos sentidos do fluxo.

4.1. Rede Infraestruturada com tráfego simétrico

Para essa simulação foi utilizada uma simples topologia com três nós em linha. Os nós 1 e 2 são transmissores/receptores e o nó 0 é o ponto de acesso responsável por encaminhar os pacotes entre os outros dois nós. Nesse primeiro experimento variou-se as taxas de transmissão dos nós 1 e 2 de 20 KB/s a 300 KB/s de forma homogênea em ambos os sentidos.

A Figura 2 mostra a quantidade de oportunidades de transmissões *full duplex* em função da taxa de transmissão. Esta quantidade é representada como a razão entre o número encontrado de oportunidades de transmissões secundárias pelo número de transmissões primárias que efetivamente ocorreram na simulação. Nota-se claramente que, com taxas de transmissão baixas, o percentual de oportunidades de transmissão secundária é baixo. Isso ocorre porque, para os casos em que a taxa de transmissão fica abaixo dos 120 KB/s, a rede tem capacidade para escoar todo o tráfego sem gerar altos níveis de enfileiramento. Desta forma, é comum que nós receptores de transmissões primárias não tenham em suas filas pacotes propícios para uma potencial transmissão secundária. A medida que a taxa de transmissão dos fluxos aumenta, o nível de enfileiramento dos nós sobe, fazendo com que as oportunidades de transmissão secundárias tendam a 100%.

4.2. Rede Infraestruturada com tráfego assimétrico

Para esse experimento foi utilizada a mesma topologia das simulações anteriores, porém o tráfego gerado pelos nós foi assimétrico. A taxa de transmissão do nó 1 foi variada de 20 KB/s a 300 KB/s enquanto a taxa de transmissão do nó 2 foi mantida em 50 KB/s durante todo o experimento.

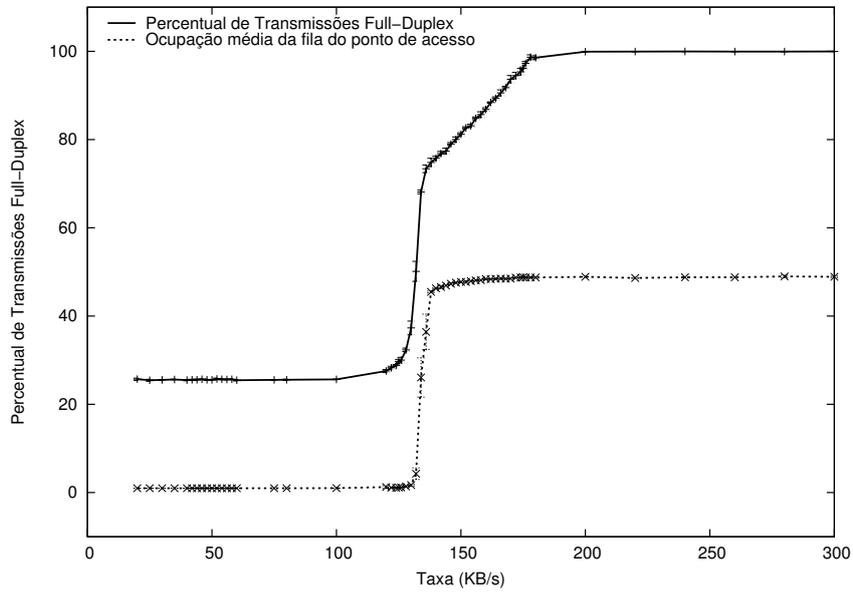


Figura 2. Evolução do percentual de transmissões *full duplex* em função da taxa de transmissão.

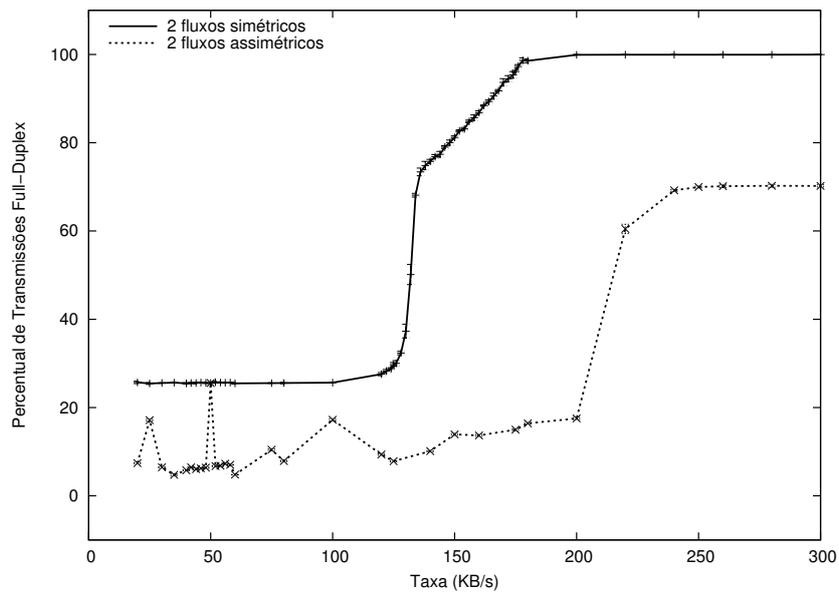


Figura 3. Comparativo entre percentual de transmissões *full duplex* nos experimentos com tráfego simétrico e assimétrico.

Na Figura 3 pode-se ver a comparação da eficiência dos rádios *full duplex* nos casos de tráfego simétrico (Seção 4.1) e assimétrico. Pode-se notar que, quando o tráfego é simétrico, o mecanismo encontra muito mais oportunidades de transmissão *full duplex*. Isso acontece porque em cada transmissão primária o nó terá em sua fila de transmissão algum pacote no sentido inverso com alta probabilidade. Quando a incidência de tráfego em algum dos sentidos é menor, a probabilidade de existência de pacotes na fila diminui, e com isso o percentual de oportunidades de transmissão *full duplex* também fica reduzido.

Nesse experimento existe também um outro fenômeno relevante. Mesmo nos momentos em que o índice de ocupação da fila foi baixo, o mecanismo encontrou mais oportunidades de transmissão para taxas 25 KB/s, 50 KB/s, 75 KB/s e 100 KB. Isso aconteceu devido à sincronização de pacotes. Para esses valores de taxa de transmissão a probabilidade das duas fontes gerarem pacotes no mesmo instante foi maior, e conseqüentemente a probabilidade de existir pacotes dessas fontes nas filas de transmissão no mesmo instante aumentou. O pico de oportunidades na região com baixo índice de ocupação da fila foi alcançando para a taxa de 50KB, caso no qual os fluxos eram simétricos em ambos os experimentos.

4.3. Rede Infraestruturada com topologia estrela e tráfego simétrico

A Figura 4 ilustra a topologia em estrela utilizada nesse experimento. Ela é composta por 9 nós, sendo 8 transmissores/receptores, além do ponto de acesso que encaminha pacotes. Os nós de 0 a 7 são transmissores/receptores e o nó 8 é o ponto de acesso. Nesse primeiro experimento variou-se as taxas de transmissão dos nós 0 a 7 de 25 KB/s a 300 KB/s de forma homogênea em ambos os sentidos.

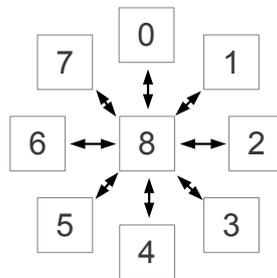


Figura 4. Rede Infraestruturada com topologia estrela.

Para avaliar melhor o comportamento do mecanismo em redes infraestruturadas, além da simulação com 8 nós transmissores/receptores, a simulação foi repetida para 2, 4 e 6 nós transmissores/receptores. O objetivo desses experimentos foi averiguar se a quantidade de nós transmissores/receptores influencia no surgimento de oportunidades de transmissões secundárias. A Figura 5 mostra o percentual de transmissões *full duplex* ao se variar a taxa de transmissão dos clientes para cada uma dos casos (número de transmissores/receptores).

Os resultados mostram que o percentual de transmissões secundárias potenciais não depende apenas da taxa de transmissão dos fluxos individuais, mas também da quantidade de nós transmissores/receptores. Quanto maior o número de transmissores/receptores, maior o tráfego agregado da rede e, conseqüentemente, maior o enfileiramento causado no ponto de acesso. Isso faz com que, para taxas mais baixas, os cenários

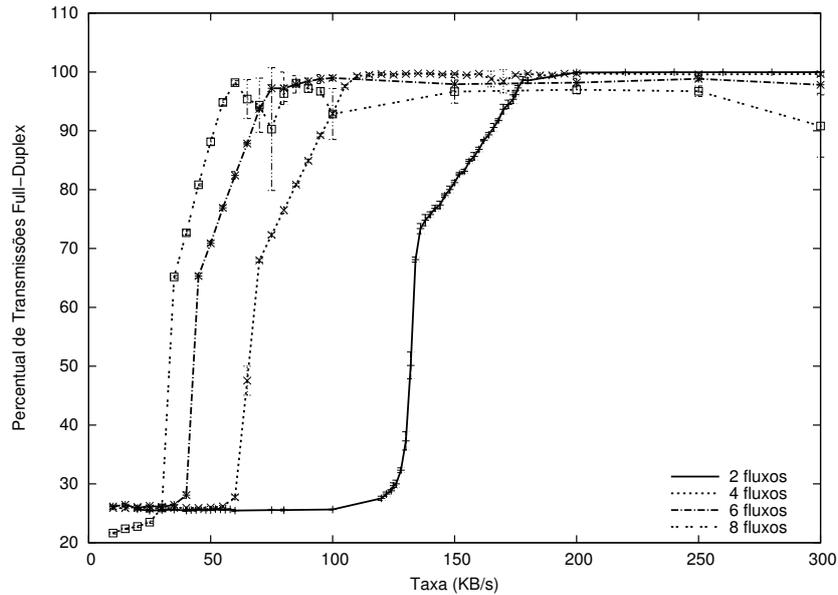


Figura 5. Percentual de transmissões *full duplex* em redes infraestruturada com fluxos simétricos de 2, 4, 6 e 8 clientes.

com mais transmissores/receptores já sejam capazes de atingir percentuais próximos a 100%. No entanto, como o tamanho da fila do ponto de acesso é limitado (neste experimento, em 50 pacotes), a medida que o número de transmissores/receptores aumenta, a probabilidade de que existam pacotes na fila de um determinado transmissor diminui, já que o espaço de armazenamento é compartilhado por todos os nós. Como consequência, o percentual máximo de oportunidades de transmissão secundária diminui com o aumento do número de transmissores/receptores.

4.4. Rede Infraestruturada com topologia estrela, tráfego simétrico e fluxos concorrentes

O próximo experimento realizado é similar ao anterior por possui a mesma topologia e tráfego simétrico. Porém esse tráfego simétrico acontece apenas entre dois nós. Os demais três nós transmissores da rede geram tráfegos não cruzados concorrentes para três nós receptores que não são oportunos para transmissões *full duplex*, como pode ser visto na Figura 6.

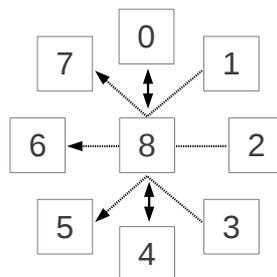


Figura 6. Rede Infraestruturada com topologia estrela e fluxos concorrentes.

A Tabela 1 resume a natureza dos cinco fluxos gerados nessa simulação. Os dois

primeiros são cruzados, com origem e destino sendo os nós 0 e 4, enquanto os três outros não são cruzados.

Tabela 1. Tráfego gerado na simulação de rede Infraestruturada com topologia estrela, tráfego simétrico e fluxos concorrentes.

Tráfego	Tipo
0 → 8 → 4	cruzado
4 → 8 → 0	cruzado
1 → 8 → 7	concorrente
2 → 8 → 6	concorrente
3 → 8 → 5	concorrente

Para que um fluxo seja cruzado, basta que o nó que esteja gerando esse tráfego tenha pacotes na fila de transmissão do ponto de acesso endereçados a ele. Não necessariamente esses pacotes devem ser oriundos do destino da transmissão primária, mas podem ser pacotes gerados por qualquer outro nó. Como todos pacotes gerados na rede passam pelo ponto de acesso, este sempre terá boas chances de possuir pacotes em sua fila para realizar transmissões *full duplex*.

Portanto, no caso de uma rede infraestruturada com apenas um ponto de acesso, para que um fluxo seja de fato, concorrente, o nó que está gerando esse tráfego deve ser apenas transmissor, não existindo então nenhum outro nó na rede que envie pacotes para ele. Nessa simulação os nós 1, 2 e 3 são apenas transmissores, e os nós 5, 6 e 7 são apenas receptores. Os nós 0 e 4 são transmissores/receptores de fluxos cruzados e simétricos a uma taxa fixa de 300 KB/s. Para analisar o efeito que o tráfego concorrente pode gerar em uma rede, optou-se por variar a taxa de transmissão dos 3 fluxos concorrentes, de 25 KB/s a 600 KB/s.

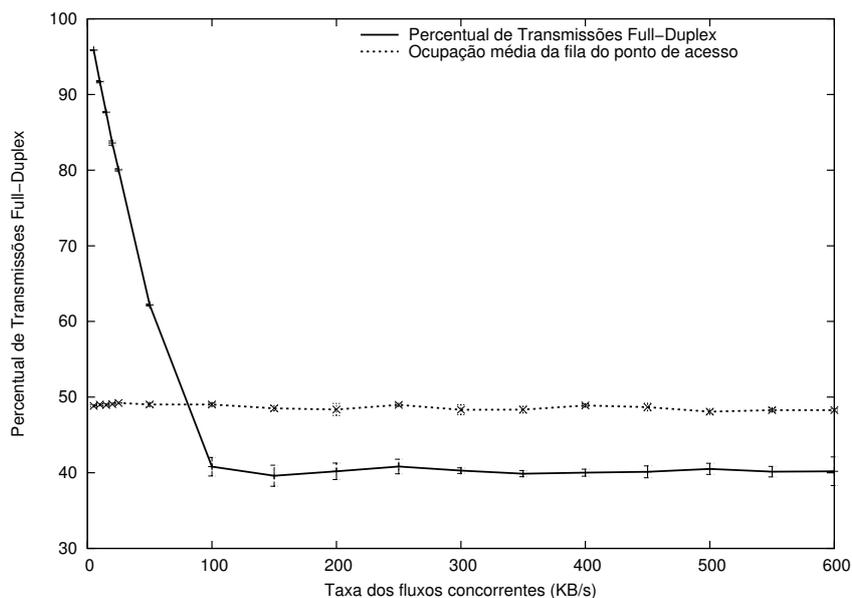


Figura 7. Percentual de transmissões *full duplex* em uma rede infraestruturada variando-se a taxa dos fluxos concorrentes.

Na Figura 7 pode ser visualizado o comportamento do mecanismo na presença de tráfego concorrente. O tráfego gerado pelos nós 1, 2 e 3 não tem nenhum potencial de geração de oportunidade de transmissões secundárias. Observe que no momento em que o nó 1 faz uma transmissão para o ponto de acesso, este verifica se tem pacotes destinados para o nó 1. Porém, o resultado dessa verificação é sempre negativo, pois nenhum dos nós da simulação está enviando pacotes para o nó 1. O mesmo acontece para os nós 2 e 3. Portanto, a medida que o tráfego concorrente aumenta, resta menos espaço na fila de transmissão do ponto de acesso para o tráfego gerado pelos nós 0 e 4, que possui potencial para gerar oportunidades de transmissões secundárias. Essa observação confirma que não basta observar o índice de ocupação da fila de transmissão, mas também o seu conteúdo. Basicamente, para se aumentar o potencial de transmissões *full duplex* em uma rede infraestruturada, os nós devem ser transmissores e receptores.

4.5. Rede *ad hoc* com topologia linear e tráfego simétrico

No que diz respeito à investigação de oportunidades de transmissões *full duplex* é muito importante avaliar o que acontece em redes *ad hoc*. Para isso foi realizado um experimento que envolve seis nós em uma topologia linear, conforme ilustra a Figura 8. Esses seis nós foram dispostos em linha com distâncias fixas entre um nó e outro, de tal forma que um pacote tenha que passar por todos os nós para trafegar do primeiro ao último nó da rede.



Figura 8. Rede *ad hoc* com topologia linear.

Na Figura 9 pode ser visualizado o desempenho do mecanismo variando-se a taxa de transmissão dos dois nós transmissores que estão situados nas extremidades da topologia. Pode-se ver que o percentual de transmissões *full duplex* cresce até a taxa de 75 KB/s. Porém após esse valor o percentual de oportunidades de transmissões *full duplex* diminui drasticamente. Em redes *ad hoc* as oportunidades de transmissão *full duplex* não possuem uma correlação direta apenas com o índice de ocupação da fila de transmissão. Antes que a fila de transmissão seja consultada, o mecanismo proposto na Seção 3.1.2 verifica a atividade da vizinhança. A medida que a taxa de transmissão aumenta a probabilidade de que um nó vizinho não esteja transmitindo algum pacote diminui, o que prejudica o surgimento de oportunidades *full duplex*. Porém mesmo assim ainda foi possível encontrar até 36,93% de oportunidades de transmissões *full duplex*.

Na Figura 10 pode ser visto ainda o percentual de oportunidades de transmissões *full duplex* para cada nó do experimento. Esse percentual é calculado pela razão entre as oportunidades de transmissões secundárias do nó e as transmissões primárias realizadas pelo nó. Os nós que mais tiveram oportunidades de realizar transmissões *full duplex* foram os nós 4, 1, 3, 2, 0 e 5, nesta ordem. O nó 4 teve até 51,45% de oportunidades de transmissões secundárias.

Na Tabela 2 pode-se ver com mais detalhes a participação dos nós e enlaces no total de transmissões *full duplex*. O valor percentual apresentado na tabela é calculado pela razão entre a quantidade de oportunidades de transmissões *full duplex* do nó ou enlace e a

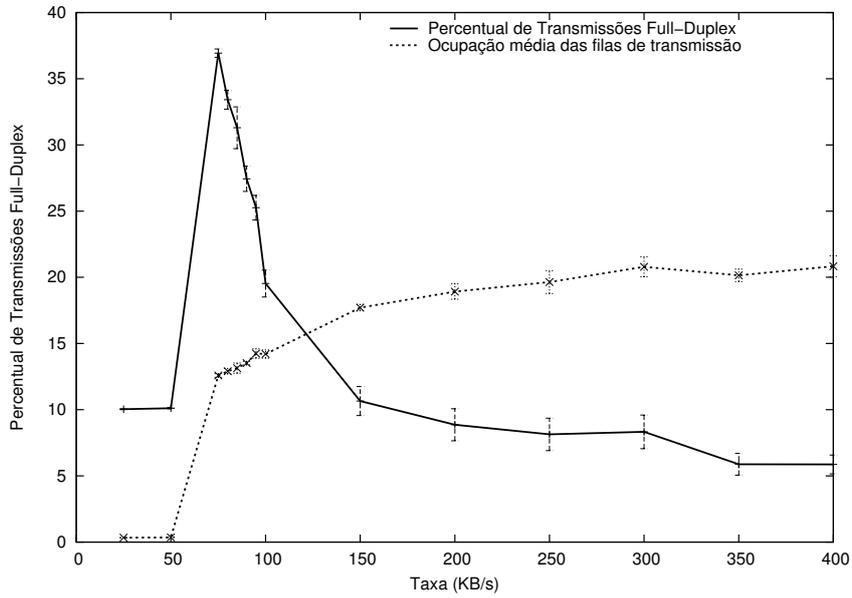


Figura 9. Percentual de transmissões *full duplex* em uma rede *ad hoc* variando-se a taxa de transmissão

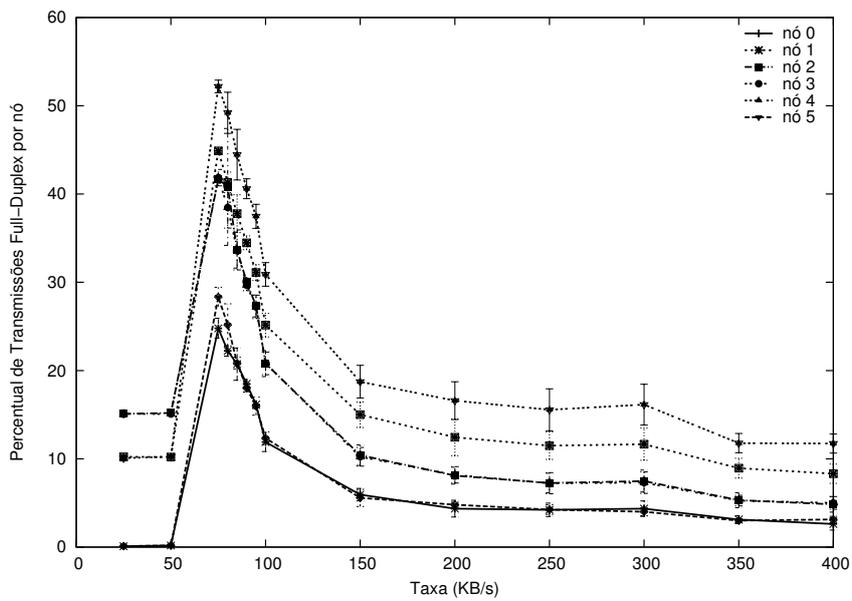


Figura 10. Percentual de transmissões secundárias por nó variando a taxa de transmissão dos nós das extremidades

Tabela 2. Participação dos nós e enlaces nas transmissões secundárias

Origem	Destino	Participação do nó (%)	Participação do enlace (%)
0	1	5,61	5,61
1	0	22,65	12,14
	2		10,52
2	1	19,76	10,70
	3		9,06
3	2	19,85	9,15
	4		10,70
4	3	26,29	10,59
	5		15,70
5	4	5,84	5,84

quantidade total de oportunidades de transmissões *full duplex* do experimento. Os valores exibidos na tabela 2 foram extraídos do experimento que fixou a taxa de transmissão em 75 KB/s. Através da tabela, pode-se afirmar que foram detectadas mais oportunidades de transmissões *full duplex* nos enlaces 4→5 e 1→0. Esses dois enlaces são formados pelos nós de origem dos fluxos na rede e seus vizinhos diretos. Este resultado é esperado, já que o número de pacotes de um fluxo que alcançam o *n-ésimo* salto do caminho é, geralmente, menor que para o salto anterior (por conta de perdas na camada de enlace e devido a enfileiramentos). Logo, há uma probabilidade maior de uma transmissão primária gerar oportunidades de transmissões secundárias no início do caminho dos fluxos.

5. Conclusões

Nesse trabalho foi abordada a questão dos benefícios do uso de rádios com capacidade de transmissão *full duplex* em cenários típicos de redes sem fio. Como foi discutido, existem diversas propostas de rádios com esta capacidade, com resultados práticos promissores. No entanto, para que os benefícios desta tecnologia sejam efetivamente atingidos, são necessárias alterações nos algoritmos de acesso ao meio. De fato, falta à literatura no tema um estudo dos benefícios que o emprego destes rádios *full duplex* poderiam apresentar em cenários comuns de redes sem fio. Este artigo tenta preencher esta lacuna fornecendo dados para quantificar o potencial destes benefícios, bem como para identificar as características dos cenários que são mais propícios.

Para isso, foi implementada uma ferramenta de avaliação capaz de encontrar oportunidades de transmissão *full duplex* com base em arquivos de *trace* padrão gerados pelo simulador ns-2. Foram avaliados tanto cenários de redes infraestruturadas quanto de redes *ad hoc*. Os resultados mostram que, sob condições adequadas, os ganhos podem chegar a 99,96%. O artigo demonstra ainda que existe uma correlação forte entre a quantidade de tráfego agregado na rede e o percentual de transmissões *full duplex* possíveis. Este resultado é encorajador, já que mostra que a eficiência dos rádios *full duplex* é maior justamente nos casos em que a rede se encontra nas situações mais críticas.

Como trabalho futuro, pode-se estudar a ocorrência de oportunidades para fluxos TCP, que implementam mecanismos de controle de fluxo e congestionamento.

Referências

- 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, Chicago, Illinois, USA. ACM.
- Gerk, L. F., Passos, D. G., Muchaluat-Saade, D. C., and Albuquerque, C. V. N. (2009). Infraestrutura de comunicação em malha sem fio para supervisão e controle de sistemas de transmissão de energia. In *Espaço Energia*, pages Volume 10, p.p. 1–10, Gramado, RS, Brasil.
- Gollakota, S. and Katabi, D. (2008). Zigzag decoding: combating hidden terminals in wireless networks. In *Proceedings of the ACM SIGCOMM 2008 conference on Data communication*, SIGCOMM '08, pages 159–170, Seattle, WA, USA. ACM.
- 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, Las Vegas, Nevada, USA. ACM.
- Katti, S., Gollakota, S., and Katabi, D. (2007). Embracing wireless interference: analog network coding. In *Proceedings of the 2007 conference on Applications, technologies, architectures, and protocols for computer communications*, SIGCOMM '07, pages 397–408, Kyoto, Japan. ACM.
- ns-2 (2013). Simulador de redes ns-2. Disponível em <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.
- Radunovic, B., Gunawardena, D., Key, P., Proutiere, A., Singh, N., Balan, H. V., and Dejean, G. (2009). Rethinking indoor wireless: Low power, low frequency, full-duplex. In *Technical Report MSR-TR-2009-148*, Redmond, Washington, USA. Microsoft Research.
- Sen, S., Roy Choudhury, R., and Nelakuditi, S. (2010a). Csm/cn: carrier sense multiple access with collision notification. In *Proceedings of the sixteenth annual international conference on Mobile computing and networking*, MobiCom '10, pages 25–36, Chicago, Illinois, USA. ACM.
- Sen, S., Santhapuri, N., Choudhury, R. R., and Nelakuditi, S. (2010b). Successive interference cancellation: a back-of-the-envelope perspective. In *Proceedings of the 9th ACM SIGCOMM Workshop on Hot Topics in Networks*, Hotnets-IX, pages 17:1–17:6, Monterey, California, USA. ACM.
- Souza, F. R. and Albuquerque, C. V. N. (2010a). Linear wireless mesh network planning. In *9th International Information and Telecommunication Technologies Symposium*, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Souza, F. R. and Albuquerque, C. V. N. (2010b). Planejamento de redes em malha sem fio lineares. In *XV Workshop de Gerência e Operação de Redes e Serviços*, Gramado, RS, Brasil.