

# Atenuando o Problema de Surdez de Antenas em Comunicações Direcionais com a Utilização de Tones na Reserva de Canal

Lucas de Melo Guimarães<sup>1</sup>, Jacir Luiz Bordim<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Ciência da Computação – Universidade de Brasília (UnB)  
Campus Universitário Darcy Ribeiro  
Caixa postal 4466 – 70.910-900 – Brasília – DF – Brasil

{lucasmg,bordim}@cic.unb.br

**Abstract.** *The use of directional antenna in support of MANET operations has been considered a promising alternative to improve space division, throughput and reduce interferences. However, the use of directional antenna has a number of challenges to be overcome such as deafness problem. This work proposes a deafness avoidance technique based on traffic flow information coupled with a promising channel reservation technique which is based on pulse and tone signals. This technique was evaluated through simulations using the EXata network simulator. When compared against other protocols and deafness avoidance mechanisms, the proposed technique was able to increase fairness up to 76% and individual flow throughput up to 350%.*

**Resumo.** *O uso de antenas direcionais em redes móveis ad hoc (MANETs) tem sido considerado uma alternativa para melhorar a utilização do espaço aéreo, a vazão e reduzir interferências. Apesar de prover um melhor uso do espaço aéreo, a utilização de antenas direcionais ainda possui alguns problemas, tais como o de surdez. É neste contexto que este trabalho propõe uma técnica de atenuação do problema de surdez baseada nas informações dos fluxos de tráfego aliada a uma técnica inovadora de reserva de canal baseada em sinais pulse e tone. Quando comparado com outros trabalhos, a técnica proposta obteve ganhos de até 350% em vazão por fluxo e 76% em justiça nos cenários avaliados.*

## 1. Introdução

Na última década, houve um grande aumento no uso das redes sem fio e no desenvolvimento de suas tecnologias. As redes sem fio são aquelas que utilizam o espectro eletromagnético para a transmissão de dados entre dispositivos fixos ou móveis. As principais frequências utilizadas pelas redes locais (LAN – *Local Area Network*) que fazem uso da tecnologia de rede sem fio fazem parte da chamada banda ISM (*Industrial, Scientific, and Medical*), isto é, uma banda livre destinada a uso não comercial nas áreas industrial, científica e médica. Dentre as tecnologias que permitiram este avanço está o padrão IEEE 802.11 (*WiFi*), que tinha como objetivo principal permitir a conectividade sem fio entre dispositivos de uma LAN. O padrão IEEE 802.11 permite ainda o funcionamento de redes *ad hoc*, ou seja, aquelas redes que não necessitam de um elemento central preexistente

como um ponto de acesso. Padrões como o IEEE 802.11 utilizam protocolos de controle de acesso ao meio, ou seja, protocolos MAC (*Medium Access Control*) tais como o CSMA/CA (*Carrier-Sense Multiple Access with Collision Avoidance*) [IEEE 2007].

O principal objetivo de um protocolo MAC é permitir que vários nós de uma rede utilizem de maneira eficiente, um canal por eles compartilhado, conforme [Kumar et al. 2006]. Por sua vez, no que concerne a redes sem fio, a eficiência de um protocolo MAC é caracterizada como sendo proporcional a quantidade de transmissões que ocorrem com sucesso entre nós em um dado intervalo de tempo [Ramanathan 2004].

De maneira geral, os estudos correlatos a redes sem fio, partem da premissa de que os dispositivos da rede se comunicam utilizando antenas omnidirecionais [Mohapatra and Krishnamurthy 2005]. Vale ressaltar que uma antena omnidirecional irradia os sinais de rádio em todas as direções. No entanto, a utilização de antenas omnidirecionais associado a um mecanismo de acesso ao meio que realiza a reserva de espaço aéreo através de pacotes de controle RTS/CTS (*Request to Send/Clear to Send*) impõe severas restrições a utilização do espaço aéreo. Estas restrições, por sua vez, refletem na vazão e no atraso [Bordim et al. 2010]. Por isso, a comunidade científica vem explorando alternativas para aumentar a vazão e reduzir atraso nestes ambientes. Uma destas alternativas é o emprego de antenas direcionais/setoriais [Krishnamurthy and Krishnamurthy 2005]. Uma antena direcional possui a capacidade de direcionar o feixe de transmissão para o setor da antena que maximiza a potência do sinal de interesse [Ramanathan 2004]. Entre os benefícios do uso de antenas direcionais, pode-se citar: redução de interferência; aumento do alcance da transmissão e da qualidade do sinal; melhoria do reuso espacial. Para o melhor aproveitamento destes benefícios, o protocolo de acesso ao meio utilizado deve ser capaz de explorar de modo eficiente as características da antena direcional. Como pode ser constatado em [Choudhury et al. 2002, Takata et al. 2009, Bordim and Nakano 2010, Amiri Sani et al. 2010], a tarefa de desenvolver um protocolo de acesso ao meio eficiente para antenas direcionais não é simples devido aos problemas de *surdez de antena e terminal exposto/escondido*. É neste contexto que a proposta deste trabalho está inserida. Mais precisamente, este trabalho propõe uma nova técnica de atenuação do problema de surdez baseada nas informações dos fluxos de tráfego aliada a uma técnica inovadora de reserva de canal baseada em sinais *pulse e tone*. Para a validação da técnica proposta, foram realizadas simulações utilizando o simulador de redes EXata [Scalable Network Technologies 2011]. Quando comparado com outros trabalhos, a técnica proposta obteve ganhos de mais de 350% em vazão por fluxo e até 76% em justiça (*fairness*) nos cenários avaliados.

O restante do texto está organizado da seguinte forma: na Seção 2 é apresentada uma revisão teórica acerca do padrão IEEE 802.11 e de comunicações direcionais, dando especial ênfase às técnicas de tratamento do problema de surdez existentes. Na Seção 3, é apresentada a técnica proposta neste trabalho que visa atenuar o problema de surdez. Em seguida, na Seção 4, é especificado o ambiente de simulação utilizado, bem como são apresentados os resultados obtidos. Por fim, na Seção 5, retoma-se uma discussão acerca dos aspectos mais importantes abordados ao longo deste trabalho, destacando suas contribuições, bem como possíveis trabalhos futuros.

## 2. Padrão IEEE 802.11 e Comunicações Direcionais

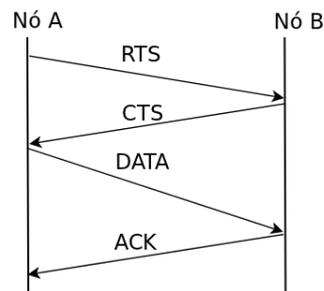
Esta seção apresenta uma revisão teórica no que diz respeito a antenas direcionais e omnidirecionais, explicando um pouco sobre o padrão IEEE 802.11 [IEEE 2007] e conceitos associados ao padrão em questão. Além disso, são apresentados os diversos benefícios provenientes da utilização de antenas direcionais. Por fim, expõe-se uma explicação detalhada do problema de surdez de antenas.

### 2.1. Padrão IEEE 802.11

No que diz respeito aos ambientes que utilizam transmissões omnidirecionais, um protocolo de acesso ao meio que visa resolver os problemas de terminal escondido é o padrão IEEE 802.11. Devido à grande extensão e nível de detalhe presentes no padrão IEEE 802.11, serão explicadas somente as técnicas utilizadas no padrão que estão diretamente relacionadas com este trabalho, em especial técnicas utilizadas pelos protocolos de acesso ao meio projetados para funcionar em ambientes que se utilizam de transmissões direcionais. As referidas técnicas são: reserva de canal e detecção de portadora virtual.

#### 2.1.1. Reserva de Canal

Consiste em reservar o recurso antes de usá-lo, evitando colisões de pacotes de dados. Para realizar a reserva de canal, utilizam-se pacotes de controle como os pacotes *Request to Send* (RTS) e *Clear to Send* (CTS). Tais pacotes carregam informações sobre a duração da comunicação, dentre outras. A Figura 1 ilustra uma reserva de canal seguida de início de troca de pacotes entre os nós *A* e *B*. Na Figura 1, o nó *A* envia um RTS de maneira que qualquer outro nó que escute o RTS fique sem mandar mensagens por um período tal que a transmissão entre *A* e *B* acabe. Após receber o RTS, o nó *B* responde com uma mensagem CTS. O argumento análogo vale também para o CTS, isto é, qualquer outro nó que escute o CTS deve ficar sem mandar mensagens por um período tal que a transmissão entre *A* e *B* acabe. Com isso, o nó *A* pode enviar o pacote de dados para *B* com menor risco de sofrer colisões. Assim, a comunicação entre *A* e *B* flui normalmente com as trocas de pacotes DATA e ACK. Apesar das vantagens do uso dessa técnica de reserva de canal, o envio das mensagens de controle RTS e CTS aumenta consideravelmente a latência da rede [Bordim et al. 2010]. Além disso, tal técnica minimiza a colisão entre pacotes de dados, no entanto pode ocorrer colisão entre pacotes de controle. Por isso, foi proposto o protocolo RCA [Shih et al. 2009] (*RTS collision avoidance*) que antes do envio do RTS envia um pulso (*pulse*) na camada física e aguarda uma resposta (sinal *tone* na camada física) de maneira que esse tempo de envio do *pulse* é bem menor do que o de RTS. Dessa forma, sem aumentar muito a latência da rede, consegue-se evitar colisões de RTS [Shih et al. 2009]. Ainda com o intuito de reduzir a latência introduzida pelo uso dos quadros RTS/CTS na reserva de canal, foi proposta a técnica DPTCR (*Directional Pulse/Tone Based Channel Reservation*) que utiliza um *4-way handshake* com os sinais *pulse/ tone* ao invés dos quadros RTS/CTS para a reserva de canal. Devido ao uso de *pulse/ tone*, o DPTCR obtém ganhos de até 30% de vazão quando comparado com o esquema de RTS/CTS [Guimarães and Bordim 2012].



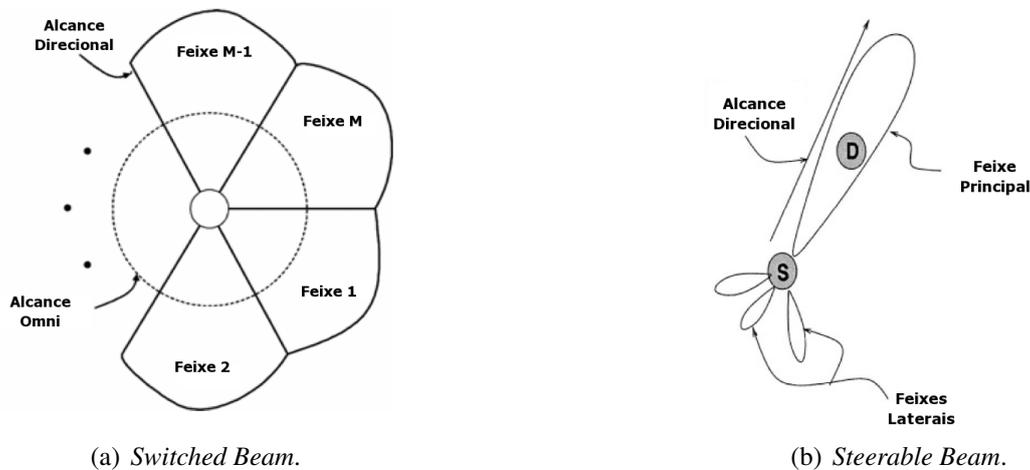
**Figura 1. 4 way handshake do padrão IEEE 802.11 no modo DCF, quando o nó A quer enviar dados ao nó B.**

### 2.1.2. Detecção de Portadora Virtual

Para diminuir a quantidade de colisões, pode-se verificar se o canal está ocioso ou ocupado em um dado momento. Este processo é denominado de detecção de portadora. Tal funcionalidade está intimamente relacionada à camada física e necessitaria de *hardware* que possibilitasse a detecção em questão. Na prática, tal solução possui elevado custo e por isso realiza-se a detecção de portadora de maneira “virtual” [Gast 2002]. A detecção “virtual” é implementada usando uma estrutura denominada vetor de alocação de rede (*Network Allocation Vector – NAV*). O NAV é constituído de um contador que indica por quanto tempo o meio ainda estará ocupado. O NAV é atualizado utilizando informações embutidas nas mensagens de controle nos protocolos de acesso ao meio (RTS e CTS). Após o estabelecimento do NAV, ele vai sendo decrementado até que possua valor nulo. Quando isso ocorre, significa que o meio está ocioso. Utilizando o NAV é possível verificar o estado do canal de modo “virtual”, reduzindo as colisões em ambientes onde as transmissões ocorrem de modo omnidirecional [IEEE 2007]. Neste contexto, duas propostas usadas em cenários ligeiramente distintos, introduziram a realização da detecção direcional de portadora virtual (DNAV) que nada mais é do que uma versão direcional do NAV [Choudhury et al. 2002] [Takai et al. 2002]. Estas propostas são: a técnica *Directional Virtual Carrier Sensing (DVCS)* [Takai et al. 2002] e o protocolo *Directional MAC Protocol* [Choudhury et al. 2002]. Tais propostas funcionam de maneira bem semelhante, sendo ambas baseadas no padrão IEEE 802.11. A principal diferença entre elas é que a técnica DVCS não requer conhecimento prévio da posição dos nós vizinhos e suporta interoperabilidade entre nós com antenas direcionais e omnidirecionais. É importante mencionar que a grande maioria dos protocolos atualmente projetados para antenas direcionais são baseados no padrão IEEE 802.11 com a utilização de DVCS. Terminada essa explicação preliminar de conceitos, será apresentada uma revisão de características, benefícios e desafios da utilização de antenas direcionais.

### 2.2. Comunicações Direcionais

Conforme citado na Seção 1, o uso de antenas direcionais possibilita diversas vantagens com relação a reuso do espaço aéreo, menor interferência entre os nós, melhor intensidade e qualidade do sinal enviado [Choudhury et al. 2002, Ramanathan 2004]. Isso ocorre uma vez que pode-se direcionar o feixe de transmissão da antena para uma direção específica. Porém, isto não é possível em antenas cuja transmissão ocorre apenas em modo omnidirecional, pois nesse tipo de antena os sinais eletromagnéticos são irradiados em todas as direções. O comportamento descrito pode ser observado na Figura 2(a). Enquanto as



**Figura 2. Tipos de antena direcionais mais utilizadas na literatura, adaptado de [Krishnamurthy and Krishnamurthy 2005] e [Takata et al. 2009]**

antenas direcionais podem direcionar seu feixe, as omnidirecionais irradiam o sinal para todas as direções. O ganho relativo a reuso do espaço aéreo fica ainda mais evidente quando se observa que as antenas direcionais irradiam sinal em uma área bem menor do que as antenas omnidirecionais para realizar a mesma comunicação, conforme ilustrado na Figura 2(a). Devido a esse maior reuso do espaço aéreo, há uma diminuição nas perdas por interferência. Quando bem explorado, o aumento da quantidade de transmissões simultâneas reduz o atraso médio nas comunicações da rede, o que exemplifica o relevante potencial da utilização de antenas direcionais. Há ainda ganhos na qualidade do sinal que chega no destino com maior intensidade e ganhos na segurança da comunicação, pois quanto menor a área irradiada com sinais eletromagnéticos, mais difícil se torna interceptar uma comunicação [Basagni et al. 2004]. É ainda importante mencionar que na literatura correlata geralmente se considera a utilização de um dos seguintes tipos de antenas direcionais [Krishnamurthy and Krishnamurthy 2005, Ramanathan 2004]:

1. *Switched Beam*: Consiste de  $n$  setores fixos, onde cada um aponta em uma direção e cada setor cobre  $360/n$  graus, conforme ilustrado na Figura 2(a).
2. *Steerable Beam*: Permite direcionar o feixe para qualquer direção de interesse. Uma vantagem dessa antena é o fato dela ser mais flexível no que concerne ao ajuste do feixe da antena. Um exemplo de antena deste tipo está disponível na Figura 2(b).

Entretanto, conforme exposto na Seção 1, a utilização de antenas direcionais também impõe limitações e incorre em problemas tais como de surdez de antenas. A seguir, será apresentada uma explicação mais detalhada acerca deste problema.

### 2.2.1. Problema de Surdez de Antenas

Conforme descrito em [Li et al. 2005], um nó que utiliza uma antena direcional é considerado “surdo” em todas as direções com exceção da direção do seu feixe de recepção principal, ou seja, ele escuta somente na direção do feixe. Essa característica juntamente com

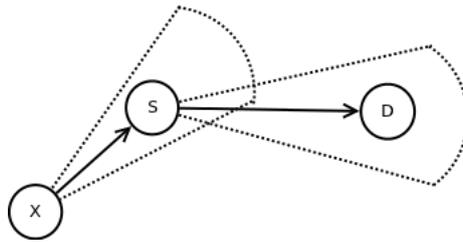


Figura 3. Cenário que ilustra o problema de surdez.

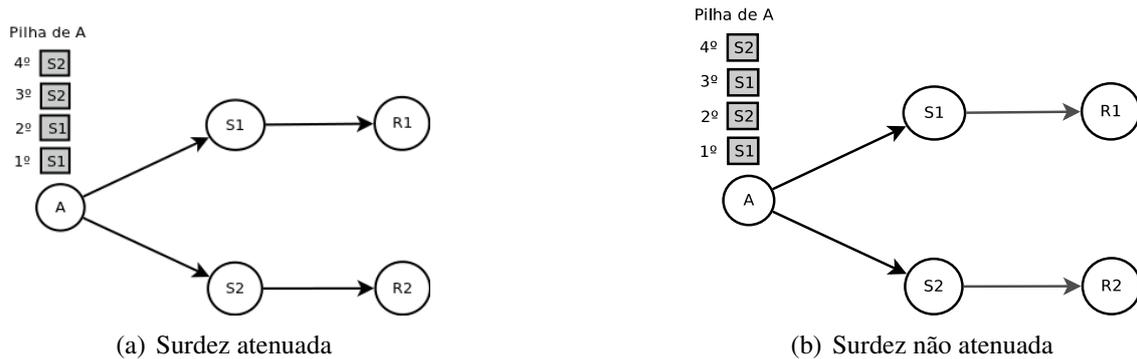


Figura 4. Cenários do protocolo RI-DMAC

o fato das antenas serem *half-duplex* provoca o chamado problema de surdez de antenas. Este problema foi identificado e denominado de *deafness* por [Choudhury et al. 2002]. A Figura 3 ilustra o problema em questão.

Considere o cenário ilustrado na Figura 3, onde todas as transmissões são consideradas direcionais. O nó  $X$  deseja se comunicar com o nó  $S$ . No entanto, o nó  $S$  está transmitindo dados para  $D$ , estando assim “surdo” para  $X$ . A situação descrita gera uma considerável perda de vazão e aumento no tempo de transmissão para cada pacote que  $X$  vai transmitir. É importante mencionar que quando o problema de surdez é recorrente em um mesmo nó, essa situação é denominada de surdez persistente (*persistent deafness*) [Takata et al. 2006].

O problema de surdez pode reduzir significativamente o desempenho da rede causando perda de pacotes devido a elevado tempo de espera, atrasos elevados, injustiça e até situações específicas de *deadlock*, conforme [Choudhury and Vaidya 2005] e [Li et al. 2005]. Por isso, torna-se evidente a necessidade de se minimizar os efeitos do problema de surdez de antenas. A seguir, serão brevemente descritos alguns protocolos MAC e técnicas relativas a comunicações direcionais.

### 2.2.2. Técnicas e Protocolos para Comunicações Direcionais

O DVCS é uma técnica de detecção de portadora utilizada por protocolos MAC para detectar a disponibilidade do meio em uma direção específica, quando estes fazem uso de antenas direcionais na camada física. Ao contrário de outros estudos realizados com antenas direcionais, o DVCS não requer conhecimento prévio da posição dos nós vizinhos e suporta interoperabilidade entre nós com antenas direcionais e omnidirecionais. Vale

ressaltar que o DVCS é uma técnica e não um protocolo, podendo ser utilizada ou adaptada para funcionar com diversos protocolos de camada MAC. Na proposta da técnica em questão [Takai et al. 2002], apresenta-se o DVCS funcionando em conjunto com o padrão IEEE 802.11 utilizando-se antenas direcionais na camada física. Por isso, quando da comparação de protocolos MAC, este trabalho considera a técnica DVCS utilizada em conjunto com o padrão IEEE 802.11.

Há diversas propostas para tratamento do problema de surdez como as apresentadas por [Bordim and Nakano 2010, Choudhury and Vaidya 2005, Subramanian and Das 2010]. Entretanto, tais propostas não avaliam nem obtêm justiça (*fairness*) na distribuição dos recursos aos fluxos incidentes aos nós. Portanto, estas propostas não serão avaliadas neste trabalho. Uma outra proposta que avalia e obtêm justiça em alguns casos é o protocolo *Receiver-initiated Directional MAC* (RI-DMAC) [Takata et al. 2006]. Para isso, o RI-DMAC utiliza uma abordagem de protocolo baseada em dois modos de operação: modo *sender-initiated* (SI) que é o modo padrão, baseado no padrão IEEE 802.11; modo *receiver-initiated* (RI) que é o modo secundário, sendo habilitado somente quando um nó detecta que o transmissor está sendo afetado pela surdez de antenas. Nesse modo, utiliza-se um quadro de controle do tipo *Ready to Receive* (RTR) para tratar o problema de surdez detectado. Esse tipo de quadro foi introduzido pelo protocolo MACA-BI [Talucci et al. 2002], de maneira a iniciar a transmissão do pacote pelo nó receptor.

Para um nó detectar se algum outro está sofrendo o problema de surdez por conta de uma comunicação direcional em andamento, cada nó insere informações de próximo pacote de sua fila IP. Portanto, no RI-DMAC, para que um nó consiga uma boa predição da ocorrência de surdez, os pacotes incidentes a esse nó devem estar em sequência na fila IP, conforme o cenário ilustrado na Figura 4(a). Em cenários onde essa premissa não ocorre, como na Figura 4(b), o RI-DMAC não atenua os efeitos do problema de surdez. Neste contexto, surge uma outra técnica que visa atenuar o problema de surdez que é o DVCS-DA (*Directional Virtual Carrier Sensing with Deafness Avoidance*) [Dias et al. 2012]. O DVCS-DA por sua vez se baseia em informações dos fluxos incidentes ao nó, ao invés de se basear em informações de próximo pacote. Dessa forma, o DVCS-DA consegue atenuar os efeitos do problema de surdez em cenários de fluxos intercalados, provendo assim uma melhora no que tange a justiça (*fairness*) na distribuição da vazão dos fluxos incidentes a um nó [Dias et al. 2012]. Entretanto, para prover esses ganhos relativos a justiça, tanto o DVCS-DA como o RI-DMAC apresentam uma vazão total da rede menor do que quando se utiliza apenas o DVCS. Para atenuar o problema de surdez e evitar essa queda na vazão total da rede, este trabalho propõe uma nova técnica de tratamento do problema de surdez baseada no DVCS-DA [Dias et al. 2012] e no DPTCR [Guimarães and Bordim 2012] que será melhor explicado na seção a seguir.

### **3. DPTCR-DA: Técnica de Atenuação do Problema de Surdez de Antenas Baseada em Sinais *Pulse/Tone***

Nesta seção, é apresentada a técnica DPTCR-DA (*Directional Pulse/Tone Based Channel Reservation with Deafness Avoidance*) que busca amenizar o problema de surdez, se utilizando de uma diferente forma de reservar o canal. O DPTCR-DA utiliza um mecanismo para prever a ocorrência do problema de surdez e posteriormente tratá-lo utilizando transmissões iniciadas pelo receptor com auxílio de um sinal *tone*. O mecanismo

em questão baseia-se em informações locais de um nó sobre os fluxos incidentes a este para prever a ocorrência de surdez, tal como ocorre com a técnica DVCS-DA, descrita por [Dias et al. 2012].

### 3.1. Mecanismo de Detecção da Ocorrência de Surdez

O mecanismo de detecção da ocorrência do problema de surdez determina dentre os fluxos incidentes ao nó qual está sofrendo do problema de surdez a mais tempo, ou seja, qual nó vizinho está esperando há mais tempo para enviar um quadro de dados com sucesso. Por isso, a detecção de surdez depende do instante de recepção do último quadro e do limiar de surdez esperado ( $T_i$ ) para cada fluxo  $i$ , onde  $i$  representa o índice do fluxo. A detecção é feita verificando-se, para cada fluxo  $i$  incidente ao nó, há quanto tempo um quadro não chega desse fluxo, ou seja, verificando-se o tempo de espera de recepção desse fluxo ( $E_i$ ).

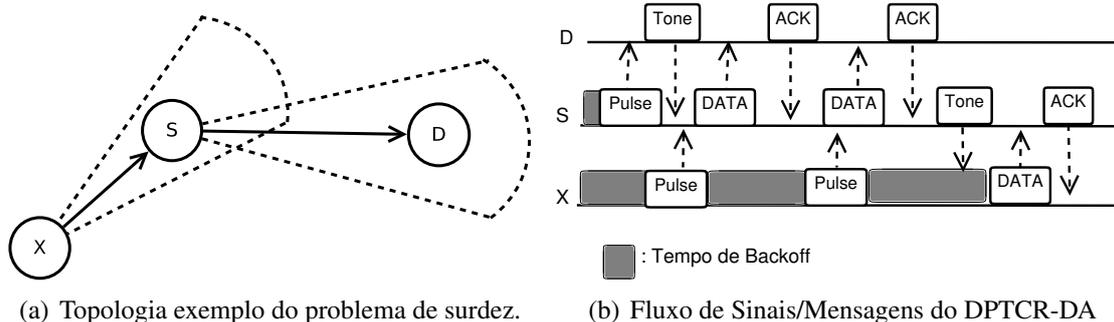
Um fluxo  $i$  é identificado como aquele que está sofrendo do problema de surdez se o tempo de espera  $E_i$  for superior a um limiar de detecção de surdez ( $T_i$ ), isto é, caso  $E_i > T_i$ . Caso mais de um fluxo esteja sofrendo do problema de surdez, o fluxo com maior tempo de espera ( $E_i$ ) será o escolhido.

Note que o limiar de surdez é uma função que depende do valor esperado do intervalo entre pacotes ( $I_{esp}^i$ ). Seja  $\alpha$  um fator de correção, o limiar de surdez é definido como:  $T_i = \alpha * I_{esp}^i$ . Para cada fluxo  $i$ , o fator de correção ( $\alpha$ ) pode ser estimado com base nas informações da tabela de fluxos ativos do nó ou de outras maneiras, conforme descrito por [Dias et al. 2012].

### 3.2. Comportamento do Protocolo

Assim como ocorre com o RI-DMAC e o DVCS-DA, o DPTCR-DA possui dois modos de operação: o **modo padrão** que utiliza comunicações iniciadas pelo transmissor (*sender-initiated*) e o **modo de tratamento de surdez** que utiliza comunicações iniciadas pelo receptor (*receiver-initiated*). As comunicações iniciadas pelo receptor são utilizadas somente para tratar o problema de surdez, quando este é detectado.

O **modo padrão** de operação do DPTCR-DA é baseado na técnica de reserva de canal denominada DPTCR, descrita por [Guimarães and Bordim 2012]. Dessa forma, a reserva de canal passa a utilizar sinais *pulse* e *tone* enviados de modo direcional ao invés dos quadros RTS e CTS visando obter ganhos de vazão, uma vez que o tempo de transmissão de sinais *pulse* e *tone* é inferior ao dispendido para transmitir quadros RTS e CTS [Guimarães and Bordim 2012]. Para o correto funcionamento da reserva de canal é necessário o uso do mecanismo de predição de origem e duração do sinal. O mecanismo usado no DPTCR-DA é o mesmo descrito por [Guimarães and Bordim 2012]. No mais, o modo padrão de operação se assemelha ao DVCS, com as exceções explicadas a seguir. Da mesma forma descrita por [Dias et al. 2012], após a correta transmissão de um quadro de dados, o nó transmissor realiza o já descrito procedimento de detecção de surdez. Em caso de detecção do problema de surdez, o nó transmissor vai para o modo tratamento de surdez. No que diz respeito ao nó receptor, a mudança reside no fato dele tratar com os sinais *pulse* e *tone* a ele direcionados, ao invés de pacotes RTS e CTS o que se torna possível com o uso do mecanismo de predição de origem e duração do sinal, descrito por [Guimarães and Bordim 2012]. No caso de receber um *pulse*, ocorre o *4-way handshake* (Pulse-Tone-DATA-ACK), conforme ilustrado na Figura 5(b). Caso um sinal



**Figura 5. Funcionamento do DPTCR-DA, adaptado de [Dias et al. 2012] e [Guimarães and Bordim 2012].**

*tone* seja recebido, é verificado se o nó que o enviou é o destino do pacote atual que se encontra no *buffer* da camada MAC. Nesse caso, o pacote é enviado e espera-se por um quadro de confirmação ACK.

O **modo de tratamento de surdez** é ativado somente no caso em que o procedimento de detecção de surdez indicar que um nó vizinho está sofrendo do problema de surdez. Seu comportamento consiste em enviar um *tone* para o nó que está sofrendo do problema de surdez, como ilustrado na Figura 5(b). Neste caso, o processo de início de comunicação ocorre em três vias (Tone-DATA-ACK). A seguir, serão descritos alguns importantes detalhes do modo de tratamento de surdez. O sinal *tone* enviado para iniciar uma comunicação em três vias é utilizado para atualizar o DNAV dos nós vizinhos. A duração de tempo da transmissão do sinal *tone* ( $Y_{tone}$ ) enviada nesse caso é tal que:  $Y_{tone} = Y_{sync} + \lceil \log_2 P_{sz} \rceil$ , onde  $Y_{sync}$  é um tempo de sincronização e  $P_{sz}$  é o tamanho predito do pacote de dados pelo mecanismo de detecção da ocorrência de surdez. Essa duração do *tone* é necessária para o correto funcionamento do mecanismo de predição da origem e duração do sinal, descrito em [Guimarães and Bordim 2012]. Tal mecanismo é necessário para o correto funcionamento do DNAV no DPTCR-DA. Vale ressaltar que o tempo de sincronização de  $5\mu s$  é suficiente para um sinal *tone* [Shih et al. 2009]. É importante mencionar que não ocorre retransmissão de *tones* no modo tratamento de surdez.

Um exemplo que ilustra o funcionamento dos dois modos de operação do DPTCR-DA está disponível na Figura 5. Neste cenário, assume-se que há os seguintes fluxos de dados:  $X \rightarrow S$  e  $S \rightarrow D$ . Assume-se ainda que todos pacotes e sinais são enviados no modo direcional e que alguns pacotes de cada fluxo já foram transmitidos com sucesso, ou seja o nó  $S$  tem conhecimento dos dois fluxos de dados. No início, o nó  $S$  espera o seu tempo de *backoff* e então tenta realizar uma comunicação iniciada pelo transmissor (**modo padrão**) enviando um *pulse* para  $D$ . O nó  $D$  verifica que aquele *pulse* é para ele e responde com um *tone*, fazendo com que  $S$  envie pacotes de dados para  $D$  que por sua vez confirma o recebimento de tais pacotes por meio de mensagens ACK. Enquanto isso,  $X$  tenta também realizar uma comunicação iniciada pelo transmissor (**modo padrão**) com  $S$  por meio do envio de sinais *pulse*. Por  $S$  estar com o feixe de antena direcionado para  $D$ ,  $S$  não processa os sinais enviados por  $X$ , causando um aumento exponencial no tempo de *backoff* do nó  $X$ . Essa situação persiste até que  $S$  verifica que  $E_j > T_j$ , onde  $j$  corresponde ao índice do fluxo  $X \rightarrow S$ . Isso significa que  $S$  verificou que  $X$  possui pacotes pendentes para  $S$  (identificados como surdez para  $S$ ). Então,  $S$  entra no

**modo tratamento de surdez** e envia um sinal *tone* para  $X$ , de maneira a começar uma comunicação iniciada pelo receptor. Logo ao receber o sinal *tone*, o nó  $X$  verifica que aquele *tone* é para ele, cancelando o seu tempo de *backoff* e enviando a  $S$  um quadro de dados. Dessa forma, a comunicação entre  $X$  e  $S$  continua normalmente. Note que por meio das comunicações iniciadas pelo receptor é possível estabelecer uma maior justiça (*fairness*) na vazão dos fluxos, conforme será melhor explicado na Seção 4. Concluída a apresentação do DPTCR-DA, serão apresentados resultados que validam sua relevância.

#### 4. Resultados

Nessa seção, avaliou-se o desempenho do DPTCR-DA comparando-o com outros dois protocolos de acesso ao meio: o padrão IEEE 802.11 DCF em sua versão direcional acoplado à técnica DVCS; o protocolo RI-DMAC. Com este fim, utilizou-se a versão 2.0 do simulador EXata. O EXata é o antigo simulador Qualnet com mais funcionalidades, englobando também as funcionalidades do simulador GloMoSim [Scalable Network Technologies 2011]. É importante mencionar que os 3 ambientes de simulação mencionados são frequentemente utilizados na literatura correlata.

Nas simulações realizadas, foram considerados dois cenários distintos, ilustrados na Figura 6. O primeiro cenário (Figura 6(a)) visa validar os ganhos obtidos pelo DPTCR-DA quando opera somente no modo padrão, uma vez que em tal cenário não ocorre surdez. O segundo cenário (Figura 6(b)) é referente a uma situação de fluxos alternados como fora mencionado na Seção 2. Embora tenha-se realizado simulações para o DPTCR-DA em diversos outros cenários, estes resultados não serão apresentados por limitação de espaço. Entretanto, os cenários apresentados já validam o impacto positivo do uso do DPTCR-DA em comunicações direcionais. Para cada fluxo de dados presente nos cenários apresentados, utilizou-se uma taxa de transmissão constante CBR (*constant bit rate*), que foi variada durante as baterias de simulações modificando-se o intervalo entre pacotes. Assumiu-se uma taxa de transmissão do canal de 2Mbps e tamanho de pacote de 1024 bytes. Não considerou-se mobilidade dos nós, uma vez que os trabalhos correlatos não avaliam tal prisma, considerando que a mobilidade deve ser tratada pelas camadas superiores. Assumiu-se o uso de antenas do tipo setorial (*switched beam*) com 8 setores de 45° cada. Para o DPTCR-DA, utilizou-se um limiar fixo tal que:  $T_i = 1,3 \cdot I_{esp}^i \forall i, i \geq 0$ . Este limiar foi o utilizado com base nos estudos apresentados em [Dias et al. 2012].

Utilizou-se como métrica a vazão individual de cada fluxo existente nos cenários ilustrados na Figura 6. Embora a vazão seja uma métrica comumente usada na literatura para se comparar a eficiência de dois protocolos, esta não é uma métrica adequada para identificar ou medir o problema de surdez [Choudhury et al. 2002]. Por isso, utilizou-se também como métrica o índice de justiça de Jain [Jain et al. 1984]. O índice de Jain provê valores no intervalo  $[0, 1]$ , de maneira que um valor alto de índice de justiça representa uma maior justiça na distribuição dos recursos do meio. Seja  $th_i$  a vazão do fluxo de índice  $i$  e  $n$  a quantidade de fluxos da rede, o índice de justiça (índice de Jain) pode ser calculado com base na seguinte equação [Jain et al. 1984]:

$$\frac{(\sum_{i=1}^n th_i)^2}{n \cdot \sum_{i=1}^n th_i^2} \quad (1)$$

Cada um dos resultados apresentados é fruto da média de 10 simulações. A seguir,



**Figura 6. Cenários Avaliados.**

**Tabela 1. Comparação de vazão e justiça dos fluxos no cenário 1.**

Técnica	Fluxo 1 → 2 (Kbps)	Fluxo 1 → 2 (Kbps)	Índice de Justiça
DVCS	1440,8621	1433,8156	0,999994
DPTCR-DA	1576,7975	1567,8636	0,999992

serão apresentados os cenários utilizados, bem como os resultados obtidos para cada um deles.

#### 4.1. Cenário 1

O cenário 1 possui quatro nós e dois fluxos, indicados respectivamente pelos círculos e setas na Figura 6(a). Este cenário tem por objetivo avaliar o funcionamento dos protocolos quando não ocorre situação de surdez. Como em casos que não ocorre surdez o RI-DMAC é igual ao DVCS, seu resultado neste cenário foi omitido. Desta forma, comparou-se o DPTCR-DA em seu modo padrão com o DVCS. A comparação em questão ocorreu quando se tem um intervalo de geração de pacotes igual a 1ms, uma vez que tal intervalo já é suficiente para saturar o canal de 2 Mbps com pacotes de 1024 *bytes*. Os resultados obtidos para vazão individual de cada fluxo estão apresentados na Tabela 1.

Quanto aos resultados, pode-se observar que o DPTCR-DA provê ganhos de aproximadamente 9% de vazão tanto para o fluxo 1 → 2 quanto para o fluxo 3 → 4, o que mostra que o modo padrão de funcionamento do DPTCR-DA é mais eficiente do que o DVCS. Esse ganho ocorre pois o DPTCR-DA realiza a reserva de canal usando sinais *pulse* e *tone*, ao invés de quadros RTS e CTS. Conforme descrito em [Guimarães and Bordim 2012], essa forma de reservar o canal possui um impacto bastante positivo nas comunicações direcionais. Tal impacto positivo faz com que o uso de *pulse/tone* possua uma vazão teórica maior do que o uso de RTS/CTS. É importante ainda mencionar que esse ganho teórico varia de acordo com o cenário e pode ser de até 42%, segundo [Guimarães and Bordim 2012]. Com relação ao índice de justiça, os resultados apontam uma justiça ligeiramente melhor para o DVCS, embora os resultados sejam bastante próximos. Todavia, este cenário não é muito relevante para a aferição de índice de justiça entre técnicas, uma vez que neste cenário não há ocorrência de surdez. Estas medições de índice de justiça são mais relevantes no cenário 2 (Figura 6(b)), onde a surdez ocorre.

**Tabela 2. Vazão dos Fluxos e índice de justiça para o cenário 2.**

Técnica/ Protocolo	$I_g$ (ms)	Vazão do Fluxo 1 → 2 (Kbps)	Vazão do Fluxo 2 → 3 (Kbps)	Vazão do Fluxo 1 → 4 (Kbps)	Vazão do Fluxo 4 → 5 (Kbps)	Índice de Justiça
DPTCR-DA	6	311, 1105	725, 7313	313, 5964	730, 1281	0, 8624
DPTCR-DA	5	357, 5906	651, 6369	357, 9443	647, 7588	0, 9225
<b>DPTCR-DA</b>	<b>4</b>	<b>418, 4422</b>	<b>578, 1706</b>	<b>418, 5690</b>	<b>576, 2043</b>	<b>0, 9752</b>
RI-DMAC	6	66, 8295	1321, 9703	66, 5679	1323, 8066	0, 5503
RI-DMAC	5	68, 6008	1321, 3789	68, 5395	1321, 6764	0, 5517
RI-DMAC	4	69, 3540	1319, 3879	68, 0835	1322, 2799	0, 5519
DVCS	6	67, 4337	1324, 8763	65, 8449	1328, 8588	0, 5501
DVCS	5	70, 1337	1322, 2012	69, 2376	1323, 0414	0, 5525
DVCS	4	67, 0369	1325, 5814	68, 2906	1324, 5164	0, 5509

#### 4.2. Cenário 2

Conforme ilustrado na Figura 6(b), o cenário 2 possui cinco nós e quatro fluxos, onde os nós 2 e 3 ficam surdos para o nó 1. Este cenário tem por objetivo mostrar que o DPTCR-DA atenua o problema de surdez quando há fluxos alternados tendo como origem um mesmo nó, nesse caso o 1. Os resultados para índice de justiça e vazão individual estão disponíveis na Tabela 2. Estes resultados variam o intervalo de geração de pacotes nos valores de 4, 5 e 6ms.

Os resultados mostram que o protocolo RI-DMAC apresenta um comportamento idêntico ao protocolo DVCS, como esperado. Nos resultados de vazão individual e de índice de justiça, os valores dos protocolos RI-DMAC e DVCS são praticamente iguais. O RI-DMAC bem como o DVCS possuem uma distribuição injusta da vazão entre os fluxos, conforme mostrado na Tabela 2. Este comportamento decorre do problema de surdez que acontece nos nós 2 e 4, causando uma baixa vazão nos fluxos 1 → 2 e 1 → 4 e uma alta vazão nos demais. Conforme descrito na Seção 2, essa situação ocorre porque nesse cenário os pacotes da fila IP do nó 1 estão intercalados. Portanto, nesse caso, o RI-DMAC não envia informações de próximo pacote, conseqüentemente não atenuando o problema de surdez.

Contudo, a técnica proposta (DPTCR-DA) consegue atenuar o problema de surdez e distribuir de maneira mais justa a vazão entre os fluxos. Isso pode ser observado na Tabela 2, onde se verifica uma distribuição mais igual da vazão entre os fluxos. Note que a vazão dos fluxos 1 → 2 e 1 → 4 é mais do que 4, 5 vezes maior (350% maior) do que quando se usa o DVCS ou o RI-DMAC. Quanto aos valores de índice de justiça, o DPTCR-DA obteve resultados melhores que o RI-DMAC e o DVCS em todos os casos, chegando a se obter um índice de justiça até 76% maior. Dessa forma, espera-se ter validado o impacto positivo do uso do DPTCR-DA em comunicações direcionais, uma vez que tal técnica atenua o problema de surdez como mostra esse cenário, além de aumentar a vazão teórica em casos onde a surdez não ocorre, conforme mostrado no cenário 1. Por fim, será apresentada uma breve conclusão deste trabalho.

#### 5. Conclusão

Este trabalho apresentou o contexto em que se propõe a utilização de antenas direcionais, mostrando suas vantagens bem como os problemas decorrentes de seu uso. Dentre es-

ses problemas, um possui destaque especial: o problema de surdez. Por isso, o presente trabalho apresentou uma breve revisão do estado da arte acerca dos protocolos e técnicas existentes para se atenuar o problema de surdez. Então, esse trabalho apresenta a proposta de uma nova técnica de tratamento do problema de surdez (DPTCR-DA) baseada nas informações dos fluxos de tráfego para prever a ocorrência de surdez, bem como baseada em uma inovadora maneira de se reservar o canal por meio do uso de sinais *pulse/tone*. O DPTCR-DA foi validado com o auxílio do simulador de redes EXata. Quando comparado às demais técnicas, o DPTCR-DA apresenta ganhos de mais de 350% em vazão por fluxo e até 76% em justiça. Por fim, com relação a trabalhos futuros, identificou-se que seria relevante realizar uma melhor parametrização do limiar  $T$  visando uma melhora no desempenho da técnica proposta.

### Agradecimentos

Este trabalho foi parcialmente financiado pelo CNPq e CIC/DPP/UnB.

### Referências

- Amiri Sani, A., Zhong, L., and Sabharwal, A. (2010). Directional antenna diversity for mobile devices: characterizations and solutions. In *Proceedings of the sixteenth annual international conference on Mobile computing and networking*, pages 221–232. ACM.
- Basagni, S., Conti, M., Giordano, S., and Stojmenović, I. (2004). *Mobile ad hoc networking*. Wiley-IEEE Press.
- Bordim, J., Barbosa, A., Caetano, M., and Barreto, P. (2010). IEEE802.11b/g standard: Theoretical maximum throughput. In *Networking and Computing (ICNC), 2010 First International Conference on*, pages 197–201. IEEE.
- Bordim, J. and Nakano, K. (2010). Deafness resilient mac protocol for directional communications. *IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems*, 93(12):3243–3250.
- Choudhury, R. and Vaidya, N. (2005). Deafness: A MAC problem in ad hoc networks when using directional antennas. In *Network Protocols, 2004. ICNP 2004. Proceedings of the 12th IEEE International Conference on*, pages 283–292. IEEE.
- Choudhury, R., Yang, X., Ramanathan, R., and Vaidya, N. (2002). Using directional antennas for medium access control in ad hoc networks. In *Proceedings of the 8th annual international conference on Mobile computing and networking*, pages 59–70. ACM.
- Dias, P., Guimarães, L., Nunes, L., Caetano, M., and Bordim, J. (2012). Proposta de tratamento do problema de surdez de antenas em comunicações direcionais. In *XXX Simpósio Brasileiro de Telecomunicações*, pages 540–544. Sociedade Brasileira de Telecomunicações.
- Gast, M. (2002). *802.11 wireless networks: the definitive guide*. O’Reilly Media.
- Guimarães, L. and Bordim, J. (2012). Utilização de pulse/tone como mecanismo de reserva de canal em comunicações direcionais. In *XXXVIII Conferencia Latinoamericana en Informática*, pages 515–523. Centro Latinoamericano de Estudios en Informática.

- IEEE (2007). IEEE Standard for information technology-telecommunications and information exchange between systems-local and metropolitan area networks - specific requirements - part 11: Wireless lan medium access control (mac) and physical layer (phy) specifications. IEEE Standard 802.11, Institute of Electrical and Electronics Engineers.
- Jain, R., Chiu, D., and Hawe, W. (1984). *A quantitative measure of fairness and discrimination for resource allocation in shared computer system*. Eastern Research Laboratory, Digital Equipment Corporation.
- Krishnamurthy, P. and Krishnamurthy, S. (2005). Use of smart antennas in ad hoc networks. In *AD HOC NETWORKS: technologies and protocols*, volume 1, page 197. Springer.
- Kumar, S., Raghavan, V., and Deng, J. (2006). Medium Access Control protocols for ad hoc wireless networks: A survey. *Ad Hoc Networks*, 4(3):326–358.
- Li, G., Yang, L., Conner, W., and Sadeghi, B. (2005). Opportunities and challenges for mesh networks using directional antennas. In IEEE, editor, *Proc. First IEEE Workshop Wireless Mesh Networks (WiMesh'05)*, pages 106–116.
- Mohapatra, P. and Krishnamurthy, S. (2005). *AD HOC NETWORKS: technologies and protocols*. Springer.
- Ramanathan, R. (2004). Antenna beamforming and power control for ad hoc networks. In *Mobile ad hoc networking*, volume 1, pages 139–173. Wiley-IEEE Press.
- Scalable Network Technologies (2011). Simulador exata. <http://www.scalable-networks.com/exata/>.
- Shih, K., Liao, W., Chen, H., and Chou, C. (2009). On avoiding rts collisions for ieee 802.11-based wireless ad hoc networks. *Computer Communications*, 32(1):69–77.
- Subramanian, A. and Das, S. (2010). Addressing deafness and hidden terminal problem in directional antenna based wireless multi-hop networks. *Wireless Networks*, 16(6):1557–1567.
- Takai, M., Martin, J., Bagrodia, R., and Ren, A. (2002). Directional virtual carrier sensing for directional antennas in mobile ad hoc networks. In *Proceedings of the 3rd ACM international symposium on Mobile ad hoc networking & computing*, pages 183–193. ACM.
- Takata, M., Bandai, M., and Watanabe, T. (2006). A receiver-initiated directional MAC protocol for handling deafness in ad hoc networks. In *Communications, 2006. ICC'06. IEEE International Conference on*, volume 9, pages 4089–4095. IEEE.
- Takata, M., Bandai, M., and Watanabe, T. (2009). RI-DMAC: a receiver-initiated directional MAC protocol for deafness problem. *International Journal of Sensor Networks*, 5(2):79–89.
- Talucci, F., Gerla, M., and Fratta, L. (2002). MACA-BI (MACA by invitation)-a receiver oriented access protocol for wireless multihop networks. In *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 1997.'Waves of the Year 2000'. PIMRC'97., The 8th IEEE International Symposium on*, volume 2, pages 435–439. IEEE.