



Universidade de Brasília

Instituto de Ciências Exatas
Departamento de Ciência da Computação

**Proposta de Técnicas para Reserva de Canal e
Atenuação do Problema de Surdez de Antenas em
Comunicações Direcionais**

Lucas de Melo Guimarães

Brasília

2013



Universidade de Brasília

Instituto de Ciências Exatas
Departamento de Ciência da Computação

**Proposta de Técnicas para Reserva de Canal e
Atenuação do Problema de Surdez de Antenas em
Comunicações Direcionais**

Lucas de Melo Guimarães

Dissertação apresentada como requisito parcial
para conclusão do Mestrado em Informática

Orientador
Prof. Dr. Jacir Luiz Bordim

Brasília
2013

Universidade de Brasília — UnB
Instituto de Ciências Exatas
Departamento de Ciência da Computação
Mestrado em Informática

Coordenadora: Prof. Dr.^a Mylène Christine Queiroz de Farias

Banca examinadora composta por:

Prof. Dr. Jacir Luiz Bordim (Orientador) — CIC/UnB
Prof. Dr. Eduardo Adilio Pelinson Alchieri — CIC/UnB
Prof. Dr. Marcelo Menezes de Carvalho — ENE/UnB

CIP — Catalogação Internacional na Publicação

Guimarães, Lucas de Melo

Proposta de Técnicas para Reserva de Canal e Atenuação do Problema de Surdez de Antenas em Comunicações Direcionais / Lucas de Melo Guimarães. Brasília : UnB, 2013.

78 p. : il. ; 29,5 cm.

Dissertação (Mestrado) — Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

1. Comunicações Direcionais, 2. Reserva de Canal, 3. Antenas Direcionais, 4. Protocolos MAC Direcionais, 5. Sinais *Pulse/Tone*, 6. Problema de Surdez de Antenas.

CDU 004.7

Endereço: Universidade de Brasília
Campus Universitário Darcy Ribeiro — Asa Norte
CEP 70910-900
Brasília-DF — Brasil

Dedicatória

Dedico este trabalho ao meus pais e irmãos, por seu apoio e amor incondicional.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus por ter colocado pessoas tão especiais em meu caminho, algumas das quais constam nesses agradecimentos. Agradeço aos meus pais José e Catarina, bem como aos meus irmãos Ígor, Hugo, Raquel e Pedro pelo carinho e apoio incondicional. Agradeço ainda a meu tio Jorge pelo incentivo e conselhos dados. Agradeço ainda a meus demais familiares pelos momentos tranquilos e felizes que vivemos juntos, neste período.

Agradeço também ao meu orientador, Jacir Luiz Bordim, por sua imensa disponibilidade, dedicação e pela brilhante orientação deste trabalho. Além disso, agradeço por sua amizade e compreensão nesse período em que trabalhamos juntos. Os resultados por nós obtidos certamente refletem sua inefável dedicação ao trabalho.

Agradeço ainda ao amigo Marcos Fagundes Caetano por seus valiosos conselhos, que juntamente aos membros do laboratório COMNET, Thiago, Felipe Santos, Juarez, Felipe Modesto, Lucas Saad, Ulisses, Paulo Júnior dividiram comigo momentos de estudo e de lazer, neste período. Agradeço efusivamente aos meus amigos Daniel Saad, Pedro Rogério, entre outros, por sua amizade sincera que me serviu de ânimo em momentos de cansaço. Agradeço ainda aos funcionários do departamento de Ciência da Computação que sempre deram o apoio necessário. Em especial, agradeço a Rosa Amariles, Samir Breiner, Amanda e Paula que foram sempre muito cordiais e eficientes nos assuntos tratados com a Secretaria de Pós Graduação.

Por fim, agradeço aos professores Marcelo Menezes de Carvalho (ENE/UnB) e Eduardo Adilio Pelinson Alchieri (CIC/UnB) por sua participação em minha banca de mestrado e por suas sugestões que contribuíram significativamente para a melhoria da dissertação de mestrado.

Resumo

O uso de antenas direcionais acopladas a dispositivos que permitam a comunicação sem fio tem sido considerada uma alternativa para melhorar a utilização do espaço aéreo, a vazão e a redução de interferência. Apesar de prover um melhor uso do espaço aéreo, a utilização de antenas direcionais possui algumas limitações. Tais limitações decorrem das próprias características das comunicações direcionais, assim como do fato de que a maioria dos protocolos de controle de acesso ao meio (MAC) projetados para comunicações direcionais serem baseados no padrão IEEE 802.11. Apesar do padrão em questão ser amplamente adotado na literatura correlata, ele foi projetado para suporte a comunicações omnidirecionais. Dessa forma, os protocolos MAC direcionais baseados no padrão IEEE 802.11 acabam herdando características do padrão que limitam o desempenho quando se considera o uso de comunicações direcionais. Este trabalho realiza um estudo e propõe melhorias para as técnicas relativas às comunicações direcionais. A principal contribuição deste trabalho é a proposta de uma técnica de reserva de canal otimizada para comunicações direcionais. A técnica proposta permite a realização da reserva de canal em menos tempo do que o gasto com o uso dos mecanismos tradicionais. Utilizando sinais *pulse* e *tone*, a técnica proposta (DPTCR) é avaliada tanto de maneira analítica como empírica. O DPTCR foi capaz de prover uma vazão até **40%** maior do que as técnicas existentes. A segunda contribuição deste trabalho está na proposta de integração do DPTCR com técnicas direcionais já existentes, permitindo assim um melhor aproveitamento das características das comunicações direcionais. A referida integração foi avaliada, indicando ganhos no que diz respeito à quantidade de transmissões simultâneas. Embora provenha diversos ganhos, a utilização de comunicações direcionais incorre em problemas ainda em estudo pela literatura correlata. Neste sentido, pode-se destacar o problema de surdez de antenas que pode acarretar situações de injustiça na distribuição dos recursos da rede. A terceira contribuição deste trabalho reside na proposta de um mecanismo (DPTCR-DA) que visa mitigar o problema de surdez em antenas direcionais. Este mecanismo de atenuação de surdez utiliza como base o DPTCR aliado à estimativa da ocorrência de surdez a partir de informações de fluxos de tráfego. Nas avaliações apresentadas, o DPTCR-DA revela o seu potencial tanto no que tange à justiça na distribuição dos recursos da rede, quanto no que diz respeito à vazão de comunicações iniciadas pelo receptor.

Palavras-chave: Comunicações Direcionais, Reserva de Canal, Antenas Direcionais, Protocolos MAC Direcionais, Sinais *Pulse/Tone*, Problema de Surdez de Antenas.

Abstract

The use of directional antennas attached to devices that enable wireless communications has been considered an alternative to improve spatial reuse and throughput. Although the use of directional antennas provides better spatial reuse, it also imposes constraints on network performance. These constraints are inherited from directional communications characteristics, as well as the fact that most medium access control (MAC) protocols designed for directional communications are based on the IEEE 802.11 standard. Although the IEEE 802.11 standard is widely used, it was designed for omnidirectional communications. Thus, the directional MAC protocols based on the IEEE 802.11 standard inherit characteristics that limit the performance when considering the use of directional communications. This work aims to perform a study and propose improvements to techniques related to directional communications. The main contribution of this work is to propose a channel reservation technique which is designed for directional communications. The proposed technique performs channel reservation in less time than traditional schemes. Based on pulse and tone signals, the proposed technique (DPTCR) is evaluated from empirical and analytical perspectives. The results show that DPTCR is able to provide a throughput up to **40%** higher than traditional schemes. Another contribution of this work is to incorporate packet scheduling techniques in order to better explore directional communications characteristics. The referred integration was evaluated, improving the amount of simultaneous transmissions. Despite of its advantages, directional communications also impose severe constraints which are commonly addressed in related works. One of these shortcomings is the deafness problem, which may lead to an unfair assignment of network resources. The third contribution of this work is to propose a deafness mitigation technique (DPTCR-DA) that aims to minimize the deafness problem. This technique is based on DPTCR coupled with the use of traffic flow information to estimate deafness occurrence. Performance evaluations reveal DPTCR-DA's potential in terms of fairness and throughput.

Keywords: Directional Communications, Channel Reservation, Directional Antennas, Directional MAC Protocols, Pulse/Tone Signals, Deafness Problem.

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Problema	2
1.2	Objetivos	3
1.3	Metodologia	3
1.4	Estrutura do Documento	4
2	Revisão Teórica	5
2.1	Padrão IEEE 802.11	6
2.1.1	Reserva de Canal	6
2.1.2	Detecção de Portadora Virtual	8
2.1.3	Algoritmo de <i>Backoff</i> Exponencial	8
2.1.4	Padrão IEEE 802.11e	9
2.1.5	APS/ACS	9
2.2	Comunicações Direcionais	10
2.2.1	Antenas Direcionais	11
2.2.2	Problema de Surdez de Antenas	13
2.3	Protocolos MAC Direcionais	14
2.3.1	Detecção de portadora virtual para comunicações direcionais	15
2.3.2	<i>Tone Directional MAC</i> (ToneDMAC)	16
2.3.3	<i>Receiver-initiated Directional MAC</i> (RI-DMAC)	16
2.3.4	<i>Control Window Directional MAC</i> (CW-DMAC)	18
2.3.5	<i>Memory Guided Directional MAC</i> (MDMAC)	18
2.3.6	<i>Dual Channel Directional MAC</i> (DC-DMAC)	19
2.3.7	<i>Directional Virtual Carrier Sensing with Deafness Avoidance</i> (DVCS-DA)	20
2.4	Discussão	22
3	Proposta de uma Técnica de Reserva de Canal em Comunicações Direcionais	24
3.1	DPTCR: Técnica de Reserva de Canal usando Sinais Pulse/Tone em Comunicações Direcionais	24
3.1.1	Comportamento da Técnica	25
3.1.2	Mecanismo de Predição da Origem, Destino e Duração do Sinal	26
3.1.3	Análise de Casos Críticos	27
3.1.4	Análise Probabilística da Técnica Proposta	28
3.2	Análise de Resultados	33

3.2.1	Avaliação Teórica	34
3.2.2	Avaliação Empírica	35
3.3	Integração entre DPTCR e APS/ACS	42
3.3.1	Comportamento da Técnica ACS	42
3.3.2	Comportamento da Técnica APS	43
3.4	Análise da Integração entre DPTCR e APS/ACS	44
3.5	Discussão	46
4	Proposta de Atenuação de Surdez de Antenas em Comunicações Direcionais	47
4.1	DPTCR-DA: Atenuação da Surdez de Antenas Baseada em Sinais <i>Pulse/Tone</i>	47
4.1.1	Mecanismo de Detecção da Ocorrência de Surdez	47
4.1.2	Comportamento do Protocolo	49
4.2	Análise de Resultados	51
4.2.1	Avaliação Teórica	52
4.2.2	Avaliação Empírica	54
4.3	Discussão	59
5	Conclusão e Trabalhos Futuros	60
	Referências	63

Lista de Figuras

2.1	Diagrama de camadas do modelo TCP/IP.	5
2.2	Problema do Terminal Escondido.	7
2.3	Diagrama de quadros quando se utiliza reserva de canal.	8
2.4	Diferentes esquemas de filas de pacotes.	10
2.5	Comparação entre antenas, adaptado de [3].	12
2.6	Tipos de antena existentes.	13
2.7	Cenário que ilustra o problema de surdez.	14
2.8	Topologia considerada.	15
2.9	Cenários do protocolo RI-DMAC	17
2.10	Lente de um par de nós distantes r um do outro, adaptado de [7].	20
2.11	Topologia exemplo do problema de surdez e do funcionamento da técnica DVCS-DA [13].	21
3.1	Topologia exemplo de comunicação usando a técnica de reserva de canal proposta [19].	25
3.2	Exemplo de caso em que uma colisão de sinais pode gerar aumento na potência do sinal recebido.	28
3.3	Área de coroa circular (colorida) onde a existência de dois nós pode causar erro de predição na origem do sinal.	33
3.4	Cenários Avaliados.	37
3.5	Comparação da vazão da técnica proposta com a obtida usando o IEEE 802.11b, sendo a capacidade do canal igual a 1Mbps.	38
3.6	Comparação da vazão da técnica proposta com a obtida usando o IEEE 802.11b, sendo a capacidade do canal igual a 2Mbps.	38
3.7	Comparação da vazão da técnica proposta com a obtida usando o IEEE 802.11b, sendo a capacidade do canal igual a 11Mbps.	39
3.8	Comparação da vazão da técnica proposta com a obtida usando o IEEE 802.11b, para canal de 1Mbps.	40
3.9	Comparação do variação do atraso da técnica proposta com a obtida usando o IEEE 802.11b, para canal de 2Mbps.	40
3.10	Comparação do atraso da técnica proposta com a obtida usando o IEEE 802.11b, para canal de 11Mbps.	41
3.11	Fila de pacotes do nó 3.	43
4.1	Funcionamento do DPTCR-DA, adaptado de [13] e [19].	50
4.2	Cenário avaliado: ocorre o problema de surdez nos nós 2 e 4.	55

Lista de Tabelas

2.1	Tabela Comparativa entre as soluções levantadas.	22
3.1	Notações.	29
3.2	Parâmetros usados para computar P_f	33
3.3	Tabela com o cálculo teórico de vazão do IEEE 802.11b.	35
3.4	Tabela com o cálculo teórico de vazão da técnica proposta.	36
3.5	Comparação da vazão obtida quando se combina diversas técnicas, para um canal de 1 Mbps.	45
3.6	Variação de atraso do Fluxo 3 \rightarrow 4 sem o uso de APS/ACS.	46
3.7	Variação de atraso do Fluxo 3 \rightarrow 4 com o uso de APS/ACS.	46
4.1	Exemplo de tabela de predição de fluxos de um nó.	48
4.2	Cálculo teórico de vazão do RI-DMAC para comunicações iniciadas pelo receptor.	52
4.3	Cálculo teórico de vazão do DPTCR-DA para comunicações iniciadas pelo receptor.	53
4.4	Vazão dos Fluxos e índice de justiça para a avaliação empírica do DPTCR-DA.	56
4.5	Vazão total da rede para avaliação empírica do DPTCR-DA.	57
4.6	Variação de atraso dos Fluxos para a avaliação empírica do DPTCR-DA.	58
4.7	Atraso dos Fluxos para a avaliação empírica do DPTCR-DA.	58

Lista de Acrônimos

Siglas

ACS	<i>Adaptive Carrier Sensing</i>
AOA	<i>Ângulo de chegada do sinal (Angle of Arrival)</i>
AODV	<i>Ad hoc On-demand Distance Vector</i>
APS	<i>Adaptive Packet Sending</i>
CBR	<i>Constant bit rate</i>
CSMA/CA	<i>Carrier-Sense Multiple Access with Collision Avoidance</i>
CTS	<i>Clear to Send</i>
CW-DMAC	<i>Control Window Directional MAC</i>
DBTMA	<i>Dual busy tone multiple access</i>
DC-DMAC	<i>Dual Channel Directional MAC</i>
DCTS	<i>Directional Clear to Send</i>
DIFS	<i>DCF Interframe Space</i>
DMAC	<i>Directional MAC Protocol</i>
DNAV	<i>Directional Network Allocation Vector</i>
DPTCR	<i>Directional Pulse/Tone Based Channel Reservation</i>
DPTCR-DA	<i>Directional Pulse/Tone Based Channel Reservation with Deafness Avoidance</i>
DRTS	<i>Directional Request to Send</i>
DSR	<i>Dynamic Source Routing</i>
DVCS	<i>Directional Virtual Carrier Sensing</i>
DVCS-DA	<i>Directional Virtual Carrier Sensing with Deafness Avoidance</i>
ESPAR	<i>Electronically Steerable Parasitic Array Radiator</i>
HTTP	<i>Hypertext Transfer Protocol</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
ISM	<i>Industrial, Scientific, and Medical</i>
MAC	<i>Medium Access Control</i>
MDMAC	<i>Memory Guided Directional MAC</i>
MTU	<i>Maximum Transmission Unit</i>
NAV	<i>Network Allocation Vector</i>
QoS	<i>Qualidade de Serviço (Quality of Service)</i>
RCA	<i>RTS Collision Avoidance</i>
RI-DMAC	<i>Receiver-initiated Directional MAC</i>
RSSI	<i>Received Signal Strength Indicator</i>
RTS	<i>Request to Send</i>
RTR	<i>Ready to Receive</i>
SIFS	<i>Short Interframe Space</i>
SMTP	<i>Simple Mail Transfer Protocol</i>
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>
TDM	<i>Time-division multiplexing</i>
ToneDMAC	<i>Tone Directional MAC</i>
TORA	<i>Temporally Ordered Routing Algorithm</i>
UDP	<i>User Datagram Protocol</i>
VoIP	<i>Voz sobre IP (Voice over IP)</i>

Capítulo 1

Introdução

A popularização da Internet, aliada à necessidade de mobilidade e acesso à informação, tem impulsionado a adoção de tecnologias de comunicação sem fio em diferentes cenários. As principais frequências utilizadas pelas redes locais 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. O funcionamento das camadas de enlace e física dos dispositivos que utilizam essa banda é controlado por padrões de redes sem fio, tais como os da família IEEE 802.11 [22]. Estes padrões utilizam técnicas de múltiplo acesso ao meio, tais como o CSMA/CA (*Carrier-Sense Multiple Access with Collision Avoidance*) [22].

Devido a sua simplicidade de instalação, configuração, baixo consumo de energia e custos atrativos, criou-se um cenário favorável para a utilização do padrão IEEE 802.11 nos mais diversos ambientes. O padrão IEEE 802.11 permite dois modos de operação: (i) com infraestrutura e (ii) sem infraestrutura. No primeiro modo, a comunicação entre os dispositivos se dá através de um elemento central, ou ponto de acesso. No segundo modo, também chamado modo *ad hoc*, a comunicação entre os dispositivos é viável mesmo sem a presença de uma infraestrutura preexistente. Neste caso, um nó da rede pode atuar como *host* ou como roteador, permitindo a conectividade com os nós vizinhos. Estas características tornam as redes *ad hoc* adequadas para apoiar comunicações em tarefas urgentes e temporárias, tais como reuniões, busca e salvamento, comunicação em ambientes hostis, entre outras aplicações. Este trabalho considera as redes sem fio sem infraestrutura, ou seja, as redes *ad hoc*.

Em redes sem fio, os nós geralmente trabalham com antenas omnidirecionais e se comunicam através de um canal compartilhado. Vale ressaltar que uma antena omnidirecional é aquela que irradia os sinais de rádio em todas as direções. A prevenção de perdas de desempenho na rede é fundamental neste cenário [29]. A elaboração de protocolos MAC eficientes para esse tipo de rede se tornou um desafio, sendo atualmente um tema de pesquisa muito explorado em trabalhos correlatos a redes sem fio. O objetivo de um protocolo MAC é permitir que vários nós de uma rede utilizem eficientemente um canal por eles compartilhado [29]. A maioria dos protocolos MAC existentes recorrem ao uso de quadros RTS/CTS (*Request to Send/Clear to Send*) para reservar o canal e minimizar o problema de terminal escondido em comunicações omnidirecionais [22] [38]. Entretanto, o uso de quadros RTS/CTS enviados em modo omnidirecional impedem um melhor reuso do espaço aéreo, bem como aumenta a latência da rede [5] [20]. Com a motivação de

melhor usar o espaço aéreo bem como aumentar a vazão das redes sem fio, surgiu a proposta da utilização de antenas direcionais [10] [28] [50]. Uma antena direcional consegue apontar seu feixe para a direção que maximiza a potência do sinal recebido [43]. Os principais benefícios relativos ao uso de antenas direcionais são: redução de interferência; aumento no alcance da transmissão; melhor qualidade do sinal e melhor uso do espaço aéreo [3]. Todavia, com o intuito de explorar todo o potencial das antenas direcionais, há a necessidade de protocolos MAC direcionais eficientes.

Apesar dos benefícios decorrentes de seu uso, a utilização de antenas direcionais incorre também em novos problemas e desafios a serem superados pelos protocolos MAC [32]. Em especial, pode-se destacar o problema de surdez de antenas que pode levar a uma distribuição injusta dos recursos da rede [32]. Diversos trabalhos da literatura têm tentado tratar o problema em questão [7] [9] [46] [47] [49]. Outro problema relativo ao uso de antenas direcionais reside no fato de que muitos dos protocolos MAC direcionais acabam por herdar alguns mecanismos do padrão IEEE 802.11 projetado para antenas omnidirecionais, em especial no que diz respeito à reserva de canal e sensoriamento do meio [6] [19]. Assim, os protocolos MAC direcionais muitas vezes não conseguem usar todo o potencial das comunicações direcionais.

Portanto, com base no exposto, este trabalho visa o estudo, avaliação e proposta de melhorias no que concerne às técnicas utilizadas em comunicações direcionais. Em especial, tais melhorias estão relacionadas aos protocolos de controle de acesso ao meio. Com isso, espera-se possibilitar uma melhor utilização de todo o potencial das antenas direcionais, melhorando o desempenho da rede em diversos aspectos, tais como vazão e justiça.

1.1 Problema

De maneira geral, os protocolos MAC direcionais utilizam como base o padrão IEEE 802.11. Por exemplo, isso ocorre com os protocolos descritos em [9] [48] [49]. Por herdar características do IEEE 802.11, estes protocolos possuem limitações que dificultam o uso do potencial das comunicações direcionais. Em especial, pode-se aproveitar melhor a capacidade das antenas direcionais de estimar o ângulo de chegada de um sinal bem como a potência do sinal recebido para se desenvolver um mecanismo menos oneroso de reserva de canal. Com relação ao sensoriamento do meio, seria possível utilizar melhor a capacidade da antena de sensoriar em modo direcional e não apenas em omnidirecional. Vale ressaltar que seria de grande interesse o desenvolvimento de técnicas aplicáveis a comunicações direcionais que melhor aproveitem suas características, como abordado neste trabalho.

Embora a utilização de antenas direcionais possua uma série de vantagens, ela incorre em novos problemas do terminal escondido e exposto, bem como o problema de surdez [32]. O problema direcional do terminal escondido, bem como o problema de surdez de antenas não possuem solução quando se considera um modelo de apenas uma antena e um canal em cada nó [47]. É importante mencionar que este modelo é muito considerado na literatura até pelos custos envolvidos em equipar um nó com mais de uma antena. Este trabalho também considera este modelo. O problema de surdez impacta negativamente no desempenho de uma rede [49]. Este impacto ocorre através de perdas decorrentes de elevado tempo de espera, situações de injustiça na distribuição dos recursos da rede e até mesmo situações específicas de *deadlock* identificadas na literatura [9] [32]. Portanto, seria

importante o desenvolvimento de técnicas que permitam atenuar os efeitos do problema de surdez de antenas, uma vez que não há solução para este problema, quando se considera o modelo de apenas uma antena e um canal. Em especial, essas técnicas deveriam combater a injustiça na distribuição dos recursos da rede, uma vez que este comportamento pode gerar casos de longa espera para o atendimento de um fluxo [50].

1.2 Objetivos

O objetivo geral desse trabalho é o estudo e a proposta de melhorias relacionadas às comunicações direcionais. Como objetivos específicos deste trabalho, destacam-se os seguintes:

- Realizar um estudo abrangente no que concerne às principais técnicas de comunicações direcionais existentes na literatura. Em especial, objetiva-se um estudo detalhado dos protocolos MAC direcionais que de alguma forma visam tratar os efeitos do problema de surdez de antenas;
- Propor melhorias relacionadas às características que os protocolos MAC direcionais em geral herdam do padrão IEEE 802.11 sem adaptar as peculiaridades das comunicações direcionais. Particularmente, visa-se através do uso de ângulo de chegada e potência do sinal recebido se propor um mecanismo de reserva de canal que traga menos latência às comunicações direcionais.
- Propor melhoria relacionada à atenuação dos efeitos do problema de surdez de antenas, uma vez que tal problema é um dos principais desafios decorrentes do uso de antenas direcionais [32].
- Avaliar as técnicas propostas, bem como aquelas levantadas como existentes na literatura, de maneira que as referidas avaliações sirvam como cerne para validação do impacto positivo nas comunicações direcionais das melhorias propostas.

1.3 Metodologia

A metodologia deste trabalho consiste no estudo, proposta e avaliação de técnicas relacionadas a comunicações direcionais. Com relação ao estudo, buscou-se realizar um levantamento do estado da arte englobando as técnicas e protocolos mais comumente utilizados na literatura, dando prioridade também às propostas mais recentes. Tendo sido realizado este levantamento do estado da arte, foram identificados alguns aspectos em que as soluções existentes são muito incipientes ou intrinsecamente ligadas a mecanismos que preconizam comunicações omnidirecionais. Dessa forma, visou-se propor melhorias em técnicas existentes, bem como explorar novas alternativas. Por fim, no que tange a avaliação dos protocolos, utilizou-se duas abordagens distintas: teórica e empírica. A primeira abordagem tem por objetivo mensurar o potencial das técnicas propostas quando comparadas a soluções utilizadas em larga escala na literatura. Entretanto, para validar este potencial indicado pela avaliação teórica, realizou-se simulações em cenários que visam apresentar o relevante potencial das técnicas propostas em diversas situações. Para isso,

utilizou-se o simulador EXata [44] que possibilita avaliações de protocolos MAC direcionais para diversas métricas, além de se tratar de um simulador bastante utilizado para avaliações desse tipo na literatura correlata. Com isso, espera-se ter realizado um trabalho sólido acerca do estudo, proposta e avaliação das técnicas relacionadas a comunicações direcionais.

1.4 Estrutura do Documento

Esse trabalho está organizado da seguinte forma:

- O Capítulo 2 apresenta uma explicação sobre as principais características do padrão IEEE 802.11, bem como uma revisão do estado da arte relativa a conceitos e protocolos projetados para o uso de comunicações direcionais. Por fim, apresenta-se uma análise comparativa entre estes protocolos.
- O Capítulo 3 apresenta a proposta de reserva de canal baseada no uso de sinais *pulse* e *tone*, ao invés do uso de quadros RTS/CTS. Este capítulo apresenta ainda as avaliações teórica e empírica da técnica proposta. Além disso, o capítulo ainda propõe e avalia via simulações uma possível integração da técnica de reserva de canal proposta com as técnicas APS/ACS (*Adaptive Packet Sending/Adaptive Carrier Sensing*) [6].
- O Capítulo 4 propõe uma técnica que tem por objetivo atenuar os efeitos do problema de surdez de antenas. Tal técnica se baseia no esquema de reserva de canal proposto no Capítulo 3, bem como em informações dos fluxos incidentes aos nós para realizar a predição da surdez. Esta técnica ainda preconiza a utilização de comunicações iniciadas pelo receptor para o tratamento do problema de surdez de antenas. Além disso, são apresentadas as avaliações teórica e empírica da técnica proposta, mostrando seu impacto nas comunicações direcionais.
- O Capítulo 5 finaliza este trabalho apresentando as conclusões obtidas após todas essas propostas e análises realizadas, ressaltando ainda as principais contribuições deste trabalho. Finalmente, são apontados alguns dos possíveis trabalhos futuros que podem ser conduzidos com base nos resultados apresentados neste trabalho.

Capítulo 2

Revisão Teórica

Neste capítulo, serão apresentadas algumas características acerca do padrão IEEE 802.11 [22], bem como será feita uma revisão do estado da arte no que concerne a conceitos e protocolos relativos às comunicações direcionais.

Em redes sem fio, considera-se um canal de transmissão único e compartilhado, isto é, quando dois ou mais nós transmitem dados neste canal, ocorre colisão [30]. Portanto, há a necessidade de se coordenar o acesso dos nós a este meio compartilhado. Os protocolos que coordenam o acesso dos nós ao meio compartilhado são denominados protocolos MAC (*Medium Access Control*) [29]. Estes protocolos têm por objetivo tornar possível o compartilhamento eficiente e justo do meio [8] [29]. Quando se trata de redes sem fio, a eficiência de um protocolo MAC é caracterizada como sendo proporcional à quantidade de transmissões que ocorrem com sucesso entre nós em um dado intervalo de tempo [43]. No que concerne ao conhecido modelo de camadas TCP/IP da Internet (Figura 2.1), explicado em detalhes por [30], este trabalho está mais relacionado à operação das camadas de enlace e física, especialmente a de enlace. O funcionamento das camadas de enlace e física dos dispositivos que utilizam redes sem fio é controlado por padrões, tais como os da família IEEE 802.11. Estes padrões utilizam protocolos de controle de acesso ao meio, ou seja, protocolos MAC tais como o CSMA/CA (*Carrier-Sense Multiple Access with Collision Avoidance*) [22]. Na seção a seguir, serão explicadas algumas características do padrão IEEE 802.11.

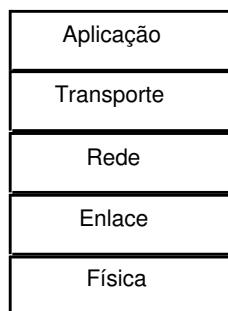


Figura 2.1: Diagrama de camadas do modelo TCP/IP.

2.1 Padrão IEEE 802.11

No que diz respeito aos ambientes que consideram as transmissões como sendo omnidirecionais, as técnicas de controle de acesso ao meio comumente utilizadas são aquelas definidas pelo padrão IEEE 802.11 [22]. Devido à grande extensão e nível de detalhe presentes no padrão IEEE 802.11, serão explicadas somente as técnicas utilizadas no padrão que estão mais relacionadas ao escopo deste trabalho, em especial no que tange às técnicas utilizadas pelos protocolos de acesso ao meio projetados para funcionar em ambientes que se utilizam de transmissões direcionais. As referidas técnicas são as seguintes:

- Reserva de Canal;
- Detecção de Portadora Virtual;
- Algoritmo de *Backoff* Exponencial.

Nas subseções seguintes, cada uma destas técnicas será melhor explicada.

2.1.1 Reserva de Canal

Colisões de pacotes de dados impactam negativamente na vazão da rede tanto em ambientes que utilizam comunicações direcionais quanto naqueles que utilizam comunicações omnidirecionais. Para prevenir que essas colisões ocorram mesmo na presença de terminais escondidos, o padrão IEEE 802.11 possibilita a utilização da técnica denominada reserva de canal [22]. Esta técnica é opcional a quem utiliza o padrão IEEE 802.11. Em geral, quando o pacote de dados é muito pequeno não se utiliza a reserva de canal pois nesse caso os ganhos decorrentes da prevenção da colisão de pacotes não compensa a latência introduzida pela reserva de canal [30].

A explicação do processo de reserva de canal será feito a luz da Figura 2.2a, que mostra três nós (A , B e C) que possuem o alcance de seu sinal representado pelos círculos que os cercam. Observando a Figura 2.2a, verifica-se que os nós A e C possuem um vizinho em comum, o nó B . Tendo em vista que não há um enlace de comunicação entre A e C , quando o nó A emite um sinal de rádio, este sinal não é recebido por C e vice-versa. Neste contexto, os nós A e C estão “escondidos” um do outro. O problema de terminal escondido será exemplificado a seguir. Considere o diagrama de mensagens da Figura 2.2b, ou seja, que A envia um pacote de dados a B . Entretanto, se durante essa transmissão C iniciar uma transmissão de pacote para B , uma colisão acontecerá. A fim de evitar esse tipo de problema, o protocolo IEEE 802.11 permite que um nó utilize os quadros RTS (*Request to Send*) e CTS (*Clear to Send*) para realizar a reserva do canal. Tais quadros carregam informações sobre quanto tempo a comunicação vai durar, dentre outras informações. A Figura 2.3 ilustra uma reserva de canal seguida de início de troca de pacotes entre os nós A e B . Considere a topologia da Figura 2.2a e que o nó A quer iniciar uma transmissão com o nó B . Então, 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. Note que ao receber o quadro CTS, o nó C considera o meio como ocupado por um tempo de

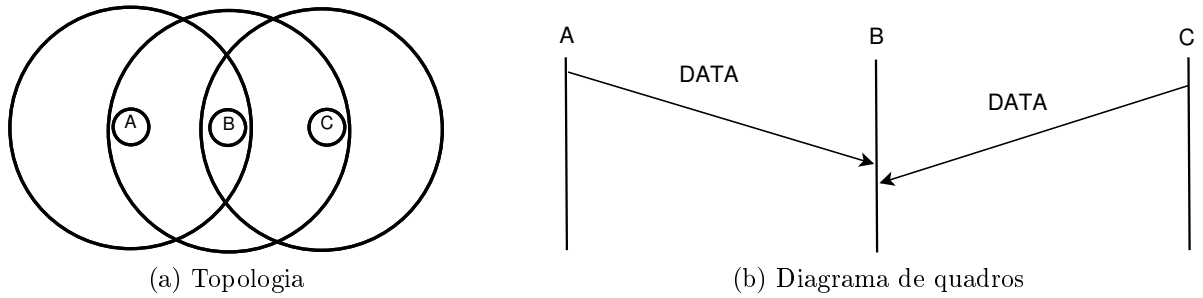


Figura 2.2: Problema do Terminal Escondido.

duração igual ao anunciado pelo pacote CTS. Assim, C não gerará colisão em B , como ocorreu no exemplo da Figura 2.2b. Portanto, os nós A e B podem se comunicar sem se preocupar com eventuais colisões. A comunicação é iniciada com o pacote DATA sendo enviado pelo nó A , conforme ilustrado na Figura 2.3. Com isso, a comunicação entre A e B flui normalmente com as trocas de pacotes DATA e ACK.

Apesar das vantagens do uso de quadros de controle (RTS/CTS) para a reserva de canal, estes quadros aumentam a latência das comunicações. Como mostrado em [5], quando um nó transmite um pacote de 128 *bytes* por um enlace de 1Mbps, o tempo gasto com a troca das mensagens RTS e CTS consome mais de 21% do tempo total de transmissão. A reserva de canal reduz a colisão entre pacotes de dados, no entanto ainda pode ocorrer colisão entre pacotes de controle. Neste sentido, o protocolo RCA (*RTS Collision Avoidance*) [45] recorre a sinais *pulse* e *tone* para prevenir a colisão entre os pacotes de controle. Como a colisão de pacotes RTS e CTS impacta consideravelmente na vazão de uma rede, o protocolo RCA preconiza um mecanismo de comunicação utilizando 6 mensagens (*pulse-tone-RTS-CTS-DATA-ACK*) para reduzir a probabilidade da colisão de pacotes de controle [45]. O uso de quadros RTS e CTS direcionais (DRTS/DCTS) foi explorado em [27]. Ao contrário do que ocorre com o RTS e o CTS omnidirecionais, a utilização dos quadros DRTS e DCTS permite que nós reservem o canal no setor de antena que cobre o transmissor e o receptor. Neste caso, nós que não recebem o DRTS nem o DCTS estão aptos a comunicar, aumentando o reuso do espaço aéreo. Uma grande quantidade de protocolos MAC direcionais recorrem ao uso de DRTS e DCTS para realizar a reserva de canal como uma forma de minimizar a colisão de pacotes [38]. Como estes protocolos geralmente se baseiam no padrão IEEE 802.11, estes protocolos acabam por herdar os mesmos problemas de reuso aéreo enfrentados pelos protocolos MAC omnidirecionais. Com o objetivo de reduzir as colisões de quadros de controle em comunicações direcionais, foi proposta ainda uma versão direcional do RCA, onde os sinais *pulse* e *tone* são enviados em modo direcional [35]. Em um contexto de utilização de sinais *pulse* e *tone* em modo direcional, é que esta dissertação propõe uma nova técnica de reserva de canal que os utiliza em detrimento dos quadros DRTS/DCTS, caracterizando uma comunicação iniciada com 4 mensagens (*pulse-tone-DATA-ACK*). Melhor explicada no Capítulo 3, esta técnica provê ganhos de até 40% na vazão teórica quando comparado com o esquema de DRTS/DCTS [19].

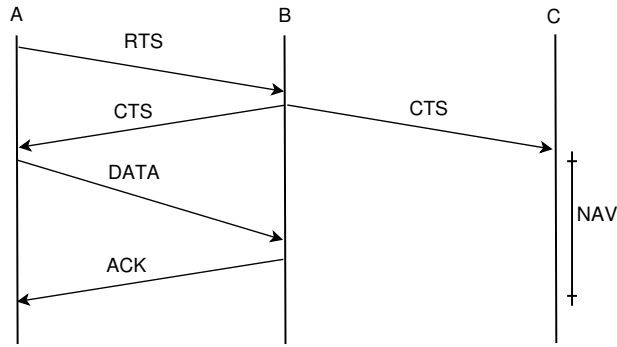


Figura 2.3: Diagrama de quadros quando se utiliza reserva de canal.

2.1.2 Detecção de Portadora Virtual

Para diminuir a quantidade de colisões, pode-se realizar a detecção de portadora, ou seja, verificar se o canal está ocioso ou ocupado em um dado momento. Tal funcionalidade no entanto 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 faz-se a referida detecção de maneira “virtual”, ou seja, via *software* [16]. 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), como ilustrado na Figura 2.3. Ao receber um quadro de controle (CTS) que tem outro nó como destino, o nó *C* atualiza o seu NAV, fazendo com que a situação de colisão ilustrada na Figura 2.2b não ocorra. Após o NAV ser estabelecido, ele vai sendo decrementado até que possua valor igual a zero. 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 [22].

2.1.3 Algoritmo de *Backoff* Exponencial

Uma outra técnica que visa diminuir a quantidade de colisões no meio é o algoritmo de *backoff* exponencial. Tal técnica é utilizada em diversos protocolos de acesso ao meio, tais como o protocolo CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access With Collision Avoidance*) [3]. O algoritmo em questão baseia-se em estabelecer um intervalo aleatório (denominado *backoff*) que cada nó deve esperar até tentar acessar o meio novamente. Com isso, é possível dar prioridade de acesso ao meio de maneira igualitária para todos os nós. A seguir está descrito um breve exemplo de funcionamento do algoritmo de *backoff* exponencial. Sejam *A* e *B* dois nós que sorteiam no instante *i* um intervalo aleatório, tal que *A* sorteia I_A e *B* sorteia I_B . Considere CW_i o máximo valor possível a ser sorteado para I_A e I_B no instante *i*. Se $I_A = I_B$, os nós *A* e *B* tentarão acessar o meio após $I_A = I_B$ slots de tempo e certamente gerarão uma colisão. Por isso, o mecanismo em questão faz com que em casos de colisão os próximos intervalos sorteados sejam maiores do que os anteriores (em geral se utiliza o dobro, ou seja, $CW_j = 2 * CW_i$, onde $j = i + I_A$), de maneira a minimizar casos onde $I_A = I_B$, uma vez que com o aumento de MAX_j , a probabilidade de que I_A seja igual a I_B diminui. Terminada essa explicação preliminar de conceitos,

será apresentada na próxima subseção uma revisão acerca das funcionalidades relativas a QoS (*Quality of Service*) que foram incorporadas ao padrão IEEE 802.11.

2.1.4 Padrão IEEE 802.11e

O padrão IEEE 802.11 possui uma alta imprevisibilidade do atraso no tempo em que os nós estão disputando o canal, impactando severamente na implementação de mecanismos de garantia de QoS [36]. Para incorporar compatibilidade com mecanismos dessa natureza, surgiu a proposta de priorização de determinados tipos de tráfego quando da proposição do padrão IEEE 802.11e [22]. Dessa forma, o padrão IEEE 802.11e preconiza que existam 8 diferentes filas de pacotes, de maneira que cada fila represente uma prioridade e por sua vez um determinado tipo de tráfego [22] [36]. Cada uma das filas em questão possui janelas mínimas de *backoff* diferentes, de maneira que quanto maior a prioridade da fila, menor o tamanho da sua janela mínima de *backoff*. Ainda com relação às filas de prioridade, elas são destinadas à quatro categorias de acesso. Em ordem crescente de prioridade, tais categorias são as seguintes:

- *Background* (AC_BK): Categoria de acesso destinada a tráfego menos sensível a latência da rede, tal como tráfego decorrente de uma ordem de impressão.
- *Best Effort* (AC_BE): Categoria de acesso destinada a tráfego razoavelmente sensível à latência da rede, por exemplo HTTP (*Hypertext Transfer Protocol*) e SMTP (*Simple Mail Transfer Protocol*).
- *Vídeo* (AC_VI): Categoria de acesso destinada a tráfego de vídeo, tais como tráfego de *streamings* de vídeo.
- *Voz* (AC_VO): Categoria de acesso com maior prioridade dentre todas, sendo relativa a tráfego de voz. Como exemplo, pode-se citar o tráfego gerado por aplicações de VoIP (*Voice over IP*).

A Figura 2.4 ilustra o funcionamento do padrão IEEE 802.11e quando comparado com as versões anteriores do padrão IEEE 802.11. Ao invés de apenas uma fila de pacotes e um contador de *backoff* (Figura 2.4a), o escalonador dispõe de 8 filas com um tempo de *backoff* diferente para cada uma delas de acordo com a prioridade da fila (Figura 2.4b). Quando um dos contadores de *backoff* chega a zero, o escalonador faz com que o pacote dessa fila seja agendado como o próximo a ser transmitido. Em caso de dois ou mais contadores chegarem a zero no mesmo instante, escolhe-se o pacote da fila de maior prioridade.

2.1.5 APS/ACS

Baseado no padrão IEEE 802.11e, diversas outras técnicas relativas a redes sem fio foram propostas, como o APS (*Adaptive Packet Sending*) [6]. Tal técnica se aplica em comunicações direcionais e propõe que diferentes setores de uma antena direcional possuam diferentes filas de pacotes, de maneira a conseguir prover uma maior vazão à rede em questão [6]. Para isso, o APS realiza uma detecção de portadora diferente da do DVCS que propõe uma escuta omnidirecional por parte dos nós. Na proposta do APS, a detecção de portadora denominada ACS (*Adaptive Carrier Sensing*) preconiza que cada nó realize a

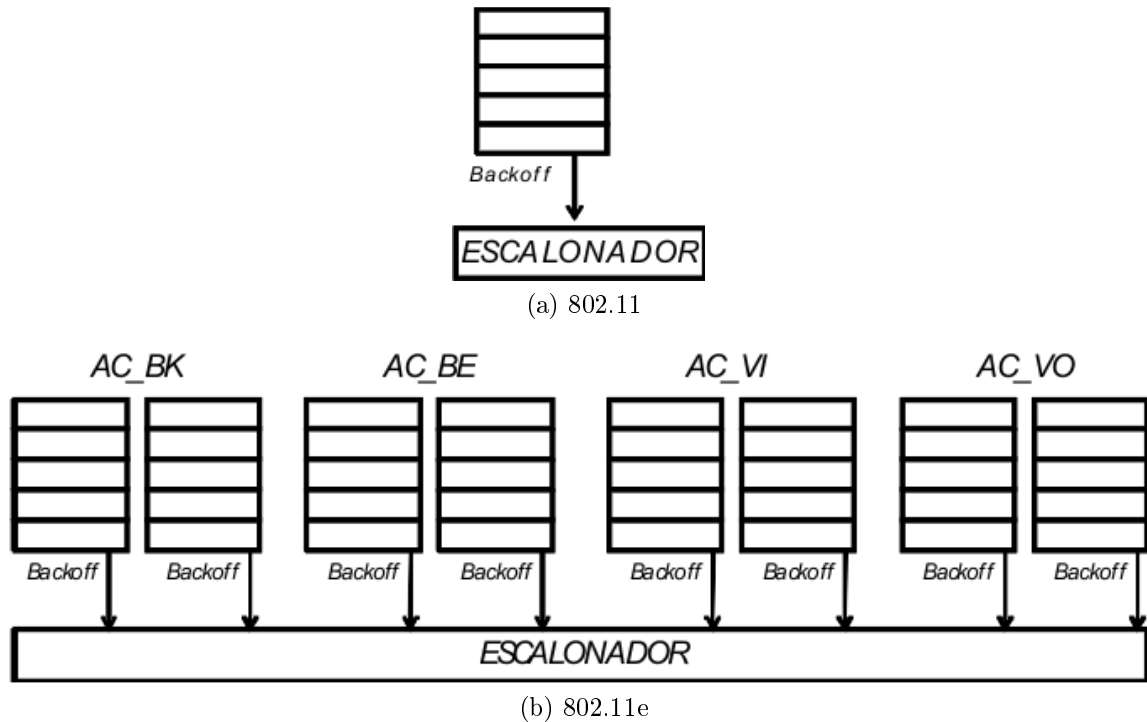


Figura 2.4: Diferentes esquemas de filas de pacotes.

escuta direcional apenas nos setores que estão com DNAV igual a zero, ou seja apenas nos setores tidos como livres [6]. O APS preconiza ainda um reescalonamento de pacotes que visa melhor aproveitar-se de algumas características das comunicações direcionais, em especial no que tange ao DNAV [6]. A implementação do APS pode ser baseada no esquema de múltiplas filas proposto pelo padrão IEEE 802.11e [6]. A explicação em mais detalhes das técnicas APS/ACS será retomada na Seção 3.3, onde inclusive será apresentado um exemplo de operação das mesmas.

Terminada a explicação sobre QoS no padrão IEEE 802.11e, bem como propostas derivadas do mesmo, será apresentada uma revisão de características, benefícios e desafios da utilização de comunicações direcionais.

2.2 Comunicações Direcionais

De maneira geral, os estudos correlatos a redes sem fio, partem da premissa de que os dispositivos da rede se comunicam utilizando antenas omnidirecionais [38]. Vale ressaltar que uma antena omnidirecional é aquela que irradia os sinais de rádio em todas as direções. Como as antenas desse tipo emitem radiação para todas as direções, elas impõem limitações no reuso espacial do canal, o que potencialmente diminui a eficiência do protocolo MAC, especialmente quando esta é caracterizada como sendo proporcional à quantidade simultânea de transmissões que ocorrem com sucesso [33].

Devido às restrições impostas pela utilização de antenas omnidirecionais no que diz respeito ao reuso espacial, novas linhas de pesquisa em redes sem fio surgiram de maneira a estudar um tipo de antena que permita que um nó transmita ou receba em uma direção específica. Tais antenas são denominadas na literatura como antenas direcionais e foram

avaliadas em diversos estudos, apresentando ganhos de vazão de mais de 30% quando utilizadas em redes *ad hoc* [43]. Na subseção a seguir, importantes aspectos relacionados às antenas direcionais serão discutidos.

2.2.1 Antenas Direcionais

Como mencionado anteriormente, as antenas direcionais tem a capacidade de focar seu feixe em uma direção, conforme pode-se observar na Figura 2.5b. Por isso, a utilização de tal antena provê diversos benefícios quando comparada à utilização de antenas omnidirecionais [3].

Os principais benefícios do uso de antenas direcionais serão explicados a seguir.

Maior reuso do espaço aéreo: A utilização de antenas direcionais permite que mais comunicações possam acontecer simultaneamente em um mesmo espaço aéreo [33]. Obtém-se uma melhora do reuso do espaço aéreo quando se compara com a utilização de antenas omnidirecionais [33]. A magnitude do ganho relativo ao reuso do espaço aéreo depende de aspectos como potência da antena, ângulo do feixe direcional, entre outros [3].

Maior alcance de transmissão: Uma antena direcional pode utilizar grande parte de sua energia para realizar a transmissão em uma direção específica, obtendo um maior alcance naquela direção quando comparada com antenas omnidirecionais. A Figura 2.5 ilustra exatamente essa situação onde estão representados dois nós vizinhos. Na Figura 2.5b, nota-se um alcance de transmissão bem maior do que aquele obtido em 2.5a, ilustrando o potencial ganho de alcance nas transmissões.

Melhor qualidade do sinal recebido: Como se possui um alcance de transmissão maior com o uso de antenas direcionais, a potência do sinal recebido (*RSSI – Received Signal Strength Indicator*) será maior do que aquela recebida quando do uso de transmissões omnidirecionais. Uma melhor qualidade do sinal incorre em maiores taxas de transmissão e um ganho de desempenho na rede [33].

Menor possibilidade de escuta passiva: Uma comunicação realizada com a utilização de antenas direcionais interfere em uma área menor do que aquela realizada usando antenas omnidirecionais [3]. Tal fato pode ser observado também na Figura 2.5. Portanto, um ouvinte passivo possui maior dificuldade para escutar o sinal do que quando se usa antenas omnidirecionais, embora o alcance obtido com antenas direcionais seja maior. Com uma área de interferência menor, a probabilidade de se ter um ouvinte passivo na área de propagação do sinal enviado em modo direcional, é menor do que quando se usa antenas omnidirecionais.

Uma outra característica das antenas direcionais diz respeito ao fato delas serem consideradas *half-duplex*, bem como as antenas omnidirecionais. Ou seja, as antenas direcionais em geral não possuem a capacidade de transmitir dados e receber ao mesmo tempo [8]. Existem maneiras possíveis de se implementar antenas capazes de transmitir dados e receber ao mesmo tempo, entretanto essas antenas possuem um nível de complexidade que as tornam inviáveis para cenários onde os nós são móveis e possuem limitações de bateria [16] [30]. Por isso, considera-se em geral que as antenas são *half-duplex*. Vale ressaltar

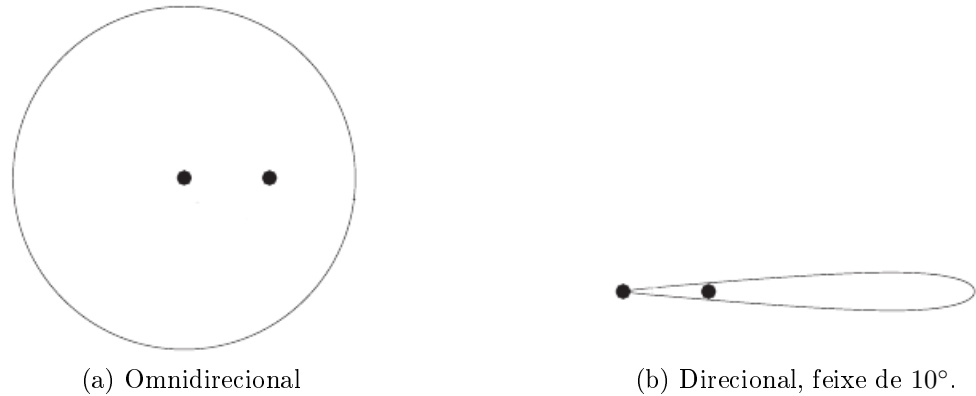


Figura 2.5: Comparação entre antenas, adaptado de [3].

que uma antena direcional pode realizar o sensoriamento do meio tanto em modo direcional quanto em modo omnidirecional. De forma análoga, uma antena direcional pode transmitir dados tanto em modo direcional quanto em modo omnidirecional.

Por fim, é ainda importante mencionar que na literatura correlata geralmente se considera a utilização de um dos seguintes tipos de antenas direcionais [28] [43]:

Steerable Beam: Uma antena direcional do tipo *steerable beam* é aquela em que é possível direcionar o feixe para qualquer direção de interesse, utilizando técnicas relativas a sinais e fases. Uma vantagem dessa antena é o fato dela ser mais flexível no que tange ao ajuste do feixe da antena e da potência, possibilitando uma melhor gerência do consumo de energia. No entanto, determinar de modo preciso o ângulo para o qual deve-se direcionar o feixe da antena é uma tarefa complexa e potencialmente cara. A Figura 2.6a ilustra o feixe de uma antena do tipo *steerable beam*.

Switched Beam: Uma antena direcional do tipo *switched beam* é dividida em n setores fixos, onde cada um aponta em uma direção. Desta maneira, cada setor cobre $360/n$ graus. Esse tipo de antena pode ser composto por várias antenas fixamente direcionadas, onde cada uma delas representa um setor. Como exemplo, uma antena direcional do tipo *switched beam* está ilustrada na Figura 2.6b, de maneira a ilustrar a definição apresentada. Como determinar de modo preciso o ângulo para o qual deve-se direcionar o feixe da antena é uma tarefa complexa e potencialmente cara, a antena do tipo *switched beam* é muito utilizada em trabalhos correlatos, tais como [7] [9] [13] [19] [47] e [49]. É importante mencionar que as técnicas de comunicação direcional apresentadas nesta dissertação de mestrado independem da antena ser do tipo *steerable beam* ou *switched beam*. Porém, nas avaliações apresentadas, considerou-se o uso de antenas do tipo *switched beam* para se manter alinhado com a maioria dos trabalhos correlatos.

Apesar de prover um melhor uso do espaço aéreo, a utilização de antenas direcionais possui algumas limitações. Uma das principais limitações relacionadas às comunicações direcionais é denominada problema de surdez de antenas. Tal problema se baseia no fato de que quando dois nós estão se comunicando de modo direcional, eles estão “surdos” para mensagens que não sejam provenientes da direção para a qual seu feixe de antena está

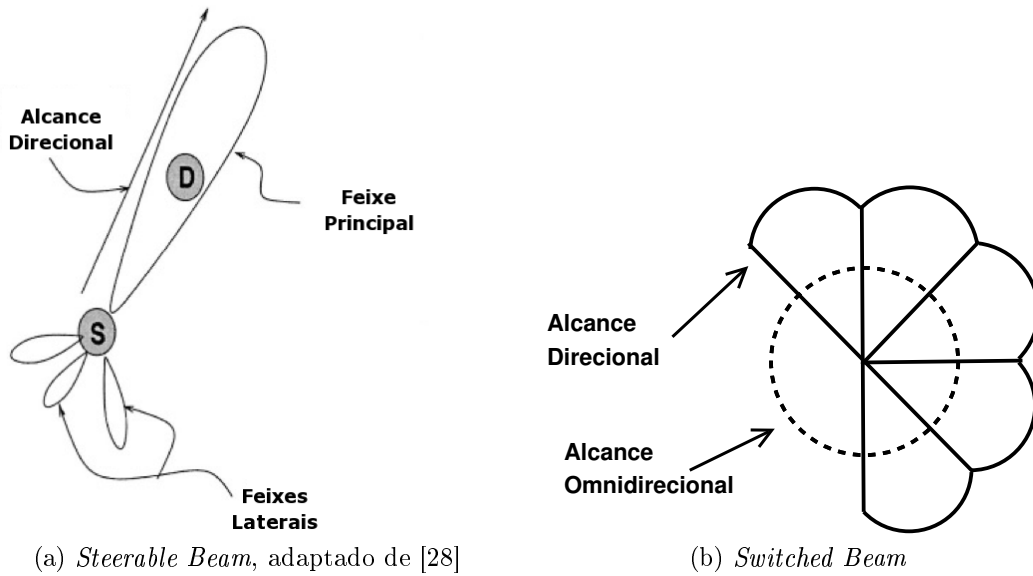


Figura 2.6: Tipos de antena existentes.

“apontando”. Desta forma, há perda de pacotes quando se tenta iniciar uma comunicação com um dos nós “surdos”. Diversos trabalhos da literatura têm tentado tratar o problema em questão [7] [9] [46] [47] de maneira a tentar melhorar a vazão total da rede. No entanto, tais propostas prejudicam a justiça da distribuição dos fluxos. Entretanto, existem algumas propostas que visam melhorias no que tange também à justiça, tais como as disponíveis em [13] e [49]. Espera-se possibilitar uma melhor utilização de todo o potencial das antenas direcionais, melhorando a justiça e a vazão, uma vez que em cenários de múltiplos saltos o problema de surdez deteriora bastante o desempenho de uma rede [49]. A seguir, o problema de surdez de antenas será melhor explicado.

2.2.2 Problema de Surdez de Antenas

Segundo Li *et. al.* [32], 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 provoca o chamado problema de surdez de antenas. Este problema foi identificado e denominado de surdez de antenas (do inglês *deafness*) [10]. A Figura 2.7 ilustra o problema em questão.

Considere o cenário ilustrado na Figura 2.7, 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 certamente 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 [49].

O problema de surdez pode reduzir bastante o desempenho da rede causando perda de pacotes devido a elevado tempo de espera, injustiça e até situações específicas de *deadlock*, tais como as apresentadas em [9] e [32]. Note que este tipo de comportamento deteriora o desempenho da rede. Portanto, seria importante o desenvolvimento de técnicas que permitam atenuar os efeitos do problema de surdez de antenas. Terminada a

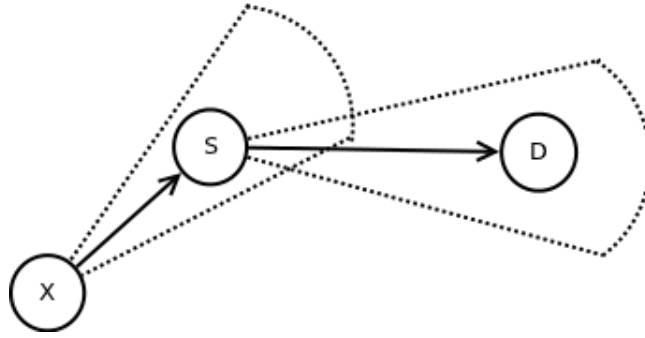


Figura 2.7: Cenário que ilustra o problema de surdez.

explicação de uma das principais limitações relativas às comunicações direcionais, serão explicados os protocolos de acesso ao meio pesquisados que consideram a utilização de antenas direcionais.

2.3 Protocolos MAC Direcionais

Esta seção tem por objetivo fazer uma revisão do estado da arte no que concerne a protocolos MAC projetados para a utilização de antenas direcionais, dando especial ênfase àqueles que possuem mecanismos que visam atenuar os efeitos do já descrito problema de surdez de antenas.

Um protocolo MAC direcional deve buscar explorar ao máximo os benefícios que as transmissões direcionais podem oferecer, como por exemplo, o reuso espacial e um maior alcance de transmissão. Além disso, dada a importância do problema de surdez, é primordial que o protocolo MAC direcional atenuar os efeitos desse problema. É nesse contexto que surgem diversas propostas de protocolos/técnicas de acesso ao meio que visam obter os potenciais benefícios do uso de transmissões direcionais. Será apresentada a seguir uma breve explicação acerca das motivações, características, vantagens e desvantagens de alguns protocolos existentes na literatura. Tais protocolos estão diretamente relacionados com o escopo deste trabalho. Ao final da apresentação dos protocolos, será apresentada uma comparação entre eles na Seção 2.4. Os referidos protocolos de acesso ao meio direcionais são os seguintes:

- *Directional Virtual Carrier Sensing* (DVCS – 2002) [48];
- *Directional MAC Protocol* (DMAC – 2002) [10];
- *Tone Directional MAC* (ToneDMAC – 2005) [9];
- *Receiver-initiated Directional MAC* (RI-DMAC – 2006) [49];
- *Control Window Directional MAC* (CW-DMAC – 2010) [47];
- *Memory Guided Directional MAC* (MDMAC – 2010) [46];
- *Dual Channel Directional MAC* (DC-DMAC – 2010) [7];
- *Directional Virtual Carrier Sensing with Deafness Avoidance* (DVCS-DA – 2012) [13];

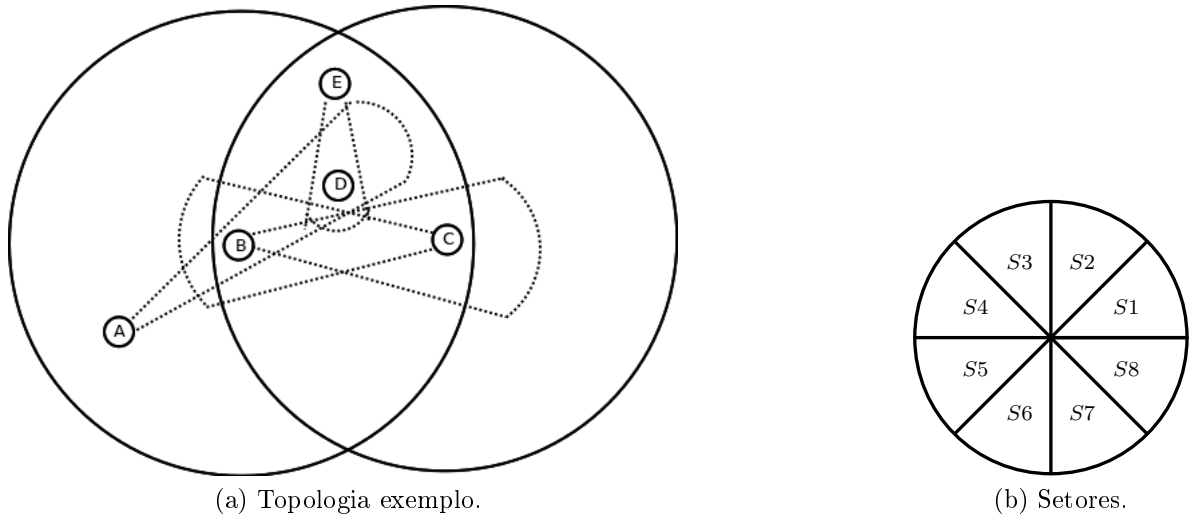


Figura 2.8: Topologia considerada.

Antes da explicação dos referidos protocolos, é necessário que se apresente o cenário que será usado como exemplo na explicação dos protocolos. Este cenário é composto pela topologia descrita na Figura 2.8a. Tal topologia possui 5 nós que utilizam antenas direcionais. O raio da transmissão direcional de cada nó está representado por linhas pontilhadas. Por sua vez, o raio de escuta e transmissão no modo omnidirecional dos nós B e C está representado por uma linha contínua. Exemplifica-se ainda uma possível divisão da antena em 8 setores, conforme a Figura 2.8b. Considera-se ainda que todos os nós escutam de modo omnidirecional quando estão ociosos. Apresentadas essas considerações acerca do cenário exemplo segue a explicação dos protocolos de acesso ao meio direcionais.

2.3.1 Detecção de portadora virtual para comunicações direcionais

Duas propostas usadas em contextos ligeiramente distintos, introduziram a realização da detecção direcional de portadora virtual (DNAV) que nada mais é do que uma versão direcional do NAV [10] [48]. Estas propostas são: a técnica *Directional Virtual Carrier Sensing* (DVCS) [48] e o protocolo *Directional MAC Protocol* (DMAC) [10]. Tais propostas funcionam de maneira bem semelhante, sendo ambas baseadas no padrão IEEE 802.11 [22]. 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.

A seguir, será apresentado um exemplo que independe da premissa de mobilidade, sendo portanto simultaneamente um exemplo de funcionamento tanto da técnica DVCS quanto do protocolo DMAC. Considere a topologia da Figura 2.8a, onde o nó B deseja iniciar uma comunicação com o nó A . O nó B envia um RTS para o nó A . O nó A por sua vez responde ao nó B com um CTS. O nó D ao escutar o CTS (por estar dentro do alcance da antena de A) estabelece o seu DNAV de maneira que aquela direção donde veio o CTS seja interpretada como estando “ocupada”. Portanto, o DNAV impedirá o nó D de tentar se comunicar naquela direção, enquanto a comunicação entre A e B durar. Todavia, note que o DNAV não interfere uma eventual comunicação entre D e E , uma vez

que essa direção está marcada no DNAV como “livre”. Com isso, tanto a técnica DVCS quanto o protocolo DMAC conseguem reduzir significativamente a quantidade de colisões em ambientes que utilizam antenas direcionais [10] [48].

2.3.2 *Tone Directional MAC (ToneDMAC)*

O ToneDMAC é um protocolo proposto para funcionar em ambientes que utilizam antenas direcionais. Tal protocolo teve seu projeto voltado para minimizar a ocorrência dos problemas de surdez e de terminal escondido. O referido protocolo visa obter um ganho com relação ao reuso de espaço aéreo possibilitado pelas antenas direcionais, sem que ocorra uma distribuição injusta dos recursos da rede [9]. O protocolo em questão faz uso de sinais *tone* o que é recorrente em propostas de técnicas correlatas, tais como o RCA (*RTS Collision Avoidance*) [45], o DBTMA (*Dual busy tone multiple access*) [21] e o DPTCR (*Directional Pulse/Tone Based Channel Reservation*) [19]. O ToneDMAC considera ainda que as duas premissas a seguir melhoram o desempenho de um protocolo de acesso ao meio em ambientes direcionais. As referidas premissas são as seguintes:

- Durante o tempo em que o nó está esperando o final de seu *backoff*, a escuta em modo omnidirecional permite que o nó tenha maior “conhecimento” acerca de quais transmissões estão ocorrendo a sua volta.
- Para aumentar ainda mais o “conhecimento” do nó com relação ao *status* das comunicações a sua volta, deve-se utilizar um canal de controle, de maneira que ao final de cada comunicação, um pequeno pacote (*tone*) seja enviado de modo omnidirecional neste canal de controle, sinalizando que o canal de dados está novamente disponível. Note que ainda podem ocorrer colisões no canal de controle, no entanto tais perdas são minimizadas pelo fato dos *tones* serem pacotes pequenos não onerando o canal de controle.

Por fim, é importante afirmar que o protocolo ToneDMAC incorpora esses dois aspectos no funcionamento de seu protocolo, de maneira a tentar conseguir cumprir melhor seus objetivos. A seguir, será descrito um breve exemplo de funcionamento do protocolo em questão. Considere a topologia apresentada na Figura 2.8a, onde os nós *B* e *C* estão se comunicando e *A* quer iniciar uma comunicação com *B*. Como *B* está se comunicando com *C*, ele está “surdo” para *A*. Assim, a comunicação entre *A* e *B* só é possível após a comunicação entre *B* e *C* se encerrar. Quando isso ocorre, para evitar que *A* ainda fique esperando pelo tempo de *backoff* que lhe resta, um *tone* é transmitido no canal de controle avisando que a comunicação entre *B* e *C* acabou. Feito isso, *A* zera seu contador de *backoff* e consegue se comunicar com *B*. Como resultado, o protocolo ToneDMAC consegue diminuir o tempo médio de *backoff* e o tamanho médio da janela de contenção [9].

2.3.3 *Receiver-initiated Directional MAC (RI-DMAC)*

Outra técnica relacionada ao tratamento do problema de surdez, está presente no protocolo *Receiver-initiated Directional MAC* (RI-DMAC) [49]. O RI-DMAC é um protocolo projetado para ser utilizado com antenas direcionais que possui como foco amenizar o problema de surdez, explicado anteriormente. Para isso, o RI-DMAC utiliza um esquema

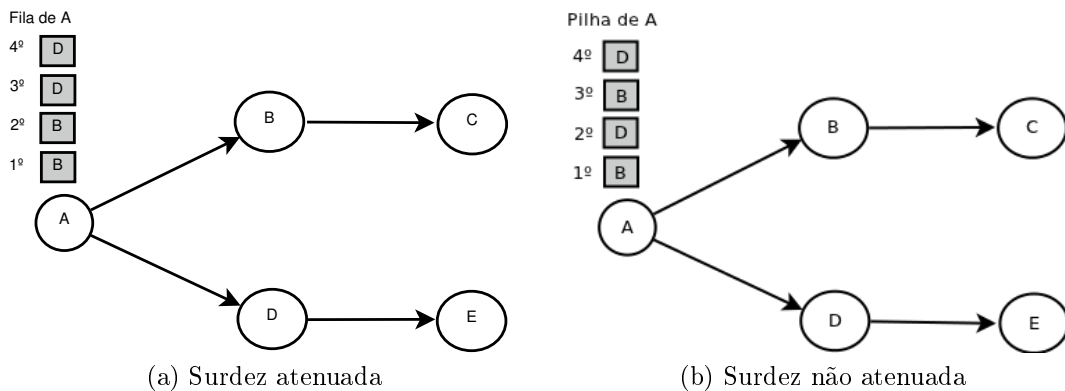


Figura 2.9: Cenários do protocolo RI-DMAC

diferente de detecção de portadora e uma abordagem inovadora de protocolo baseada em dois modos de operação: modo iniciado pelo transmissor (SI) que é o modo padrão, baseado no padrão IEEE 802.11; modo iniciado pelo receptor (RI) que é o modo secundário, sendo habilitado somente quando um nó detecta que um transmissor está sofrendo o problema de surdez. 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 [51], de maneira a iniciar a transmissão do pacote pelo nó receptor. O protocolo RI-DMAC possui ainda uma técnica de prever a ocorrência do problema de surdez baseada em informações de próximo pacote.

Com o objetivo de melhor elucidar o que foi explicado acima, pode-se tomar como exemplo a topologia apresentada na Figura 2.9a. Considere que os nós *A* e *B* finalizaram uma comunicação com sucesso. Isto implica que *B* tem conhecimento de quando ocorreu a última comunicação com *A*. Então, *B* iniciou uma comunicação com *C*, enquanto *A* se comunicou com *D* e, neste momento, *A* quer novamente se comunicar com *B*. A comunicação entre *B* e *C* continua normalmente, até que o nó *B* vai verificar que já faz muito tempo que não se comunica com *A*. Em seguida, *B* encerra a comunicação com *C* e envia um pacote RTR para o nó *A*. Com isso, a comunicação entre *A* e *B* é iniciada com sucesso. Assim, o RI-DMAC atenua o problema de surdez no cenário descrito, provendo justiça na distribuição dos recursos da rede.

Entretanto, em alguns cenários, o RI-DMAC não trata a surdez de maneira satisfatória. Isso ocorre no cenário da Figura 2.9b. O nó *A* ao se comunicar com *B* não atualiza a tabela usada pelo mecanismo de previsão de surdez de *B*, uma vez que o próximo pacote da pilha de *A* não está destinado a *B*. O mesmo ocorre quando *A* está se comunicando com *D*. Desta forma, a “previsão” realizada por *B* e *D* fica impossibilitada, fazendo com que *B* e *D* **nunca enviem um RTR para *A***. Nesse cenário, o problema de surdez não é tratado e o RI-DMAC se comporta de maneira idêntica ao DVCS. Portanto, no RI-DMAC, para que um nó consiga uma melhor previsão da ocorrência de surdez, os pacotes incidentes a esse nó devem estar em sequência na pilha IP, conforme o cenário ilustrado na Figura 2.9a.

2.3.4 *Control Window Directional MAC (CW-DMAC)*

O protocolo CW-DMAC foi proposto visando atenuar os efeitos do problema de surdez e terminal escondido em ambientes que utilizam antenas direcionais [47]. Deste modo, o protocolo espera aproveitar de modo mais efetivo as vantagens das antenas direcionais. O protocolo utiliza como base o padrão IEEE 802.11. Além disso, o protocolo propõe a utilização de mensagens RTS/CTS em modo omnidirecional. No entanto, tanto RTS quanto CTS possuem informações sobre o índice do setor da antena que se usará, de maneira que ao receber esse quadro de controle (RTS ou CTS), os demais nós estabeleçam aquela direção onde ocorrerá a transmissão como ocupada. Logo, o nó que está sofrendo do problema de surdez não tenta transmitir naquela direção até que a outra transmissão acabe. Para ilustrar o que foi explicado acima, pode-se tomar como exemplo a topologia apresentada na Figura 2.8a. Considere que os nós B e C possuem 8 setores de antena cada ($S_i, 1 \leq i \leq 8$, conforme Figura 2.8b) e que estão se comunicando, de maneira que B esteja usando seu setor S_1 e C o setor S_4 de sua antena. Considere ainda que A quer iniciar uma comunicação com B . Como B envia de modo omnidirecional seu RTS modificado, de maneira a incluir o setor a ser usado (no caso S_1), o nó A já recebeu essa mensagem antes de tentar iniciar sua comunicação com B . Logo, A passa a ter conhecimento de que B está direcionado para C . Com isso, A atualiza seu DNAV indicando que a direção para B está “ocupada”. Então, A espera até que a comunicação entre B e C acabe para que possa tentar iniciar sua comunicação com B . Repare que neste protocolo a detecção de portadora virtual direcional (DNAV) se torna mais eficiente no seu objetivo de auxiliar a minimização de colisões, pois as informações acerca da direção da transmissão estão incorporadas às mensagens RTS/CTS. Deste modo, o CW-DMAC obtém menos retransmissões de RTS e menor tamanho de janela de *backoff* no que concerne aos outros protocolos comparados em [47].

2.3.5 *Memory Guided Directional MAC (MDMAC)*

O protocolo MDMAC (*Memory-Guided Directional MAC*) [46] se insere em um contexto um pouco diferente dos demais, por ter sido proposto visando sua utilização em redes 60 GHz. Em tal banda, o problema de surdez chega a representar perdas comparáveis àquelas decorrentes de interferência. Portanto, tal protocolo é projetado de maneira a tentar minimizar ao máximo o problema de surdez, obtendo uma distribuição justa dos recursos da rede. O protocolo em questão utiliza um esquema de agendamento semelhante ao TDM (*Time-division multiplexing*), de maneira a maximizar a utilização do meio. No entanto, em determinadas situações como na de todos “*slots*” cheios, é necessário se “perturbar” o agendamento “*TDM-like*” de maneira a se tentar obter mais justiça minimizando os efeitos do problema de surdez. Tais mecanismos estão melhor explicados ao final desta subseção. O funcionamento simplificado do protocolo será exemplificado a seguir. Considere a topologia apresentada na Figura 2.8a, onde o nó B quer se comunicar com o nó C e o nó A quer se comunicar com o nó B . O nó B aloca todos seus *slots* livres para se comunicar com o nó C que faz o processo análogo com relação aos seus *slots* livres. Com isso, o nó A não consegue se comunicar com B , pois B já está com todos seus *slots* alocados. A reserva do fluxo $B \rightarrow C$ dura até que ocorra algum dos seguintes eventos:

1. B não tenha mais pacotes para enviar;

2. A transmissão de pacotes do fluxo $B \rightarrow C$ falhe;
3. Recebimento de um sinal explícito de cancelamento dessa reserva.

Essa abordagem simples já garante um comportamento semelhante ao TDM sem necessidade de coordenação entre os nós por meio do uso de mensagens [46]. Entretanto, essa abordagem leva o nó A a sofrer do problema surdez, por isso é necessária a “perturbação” do TDM. Os mecanismos responsáveis por esta mudança de comportamento são os seguintes:

Probabilistic State Reset: Probabilidade controlada pelo protocolo de um *slot* reservado para uma comunicação ser reiniciado como livre;

Explicit State Reset: Se a quantidade de slots comprometidos seja para receber ou transmitir ultrapassa uma percentagem P , então se marca como livre um dos *slots*, de maneira que esse *slot* estivesse reservado para o nó que tinha mais “reservas”.

Uso dos *Blocked Slots*: Se não há *slots* livres para uma transmissão, utiliza-se com baixa probabilidade, um dos bloqueados.

Persistence on packet loss on an existing schedule: Um nó após ter um quadro transmitido com erro dá uma “segunda chance” àquela transmissão durante aquele mesmo *slot*, antes de marcar os *slots* seguintes como *blocked*.

Per-neighbor packet queue backlog-based slot contention: Tentativa de alocação de mais *slots* para aquele nó com mais pacotes (*backlogged*) retidos;

Como esses mecanismos estão incorporados ao seu funcionamento, o protocolo MD-MAC acaba desalocando alguns dos *slots* reservados para o fluxo $B \rightarrow C$, possibilitando assim que A se comunique com B . Através da utilização dos mecanismos descritos para “perturbação” do TDM, o protocolo MDMAC provê justiça e uma vazão bastante razoável nos cenários pertinentes a redes 60 GHz [46].

2.3.6 *Dual Channel Directional MAC (DC-DMAC)*

O protocolo DC-DMAC foi proposto para operar em ambientes que utilizam antenas direcionais, de maneira a tentar desfrutar dos benefícios do uso dessas antenas, tais como maior reuso espacial, menor interferência e conseqüentemente maior vazão [7]. O protocolo em questão foi proposto visando à minimização da quantidade de retransmissões decorrentes do problema de surdez, além de também ter como objetivo a atenuação do problema do terminal escondido. Isto é feito de uma maneira distribuída por meio do uso de um canal de controle aliado ao uso de temporizadores que visam descobrir se um nó está na zona de interferência de outra comunicação. Logo, um nó ao descobrir que está em uma região onde está ocorrendo outra comunicação fica ocioso até que a transmissão acabe sem entrar em *backoff* exponencial e sem interferir na comunicação em curso.

O protocolo em questão utiliza os referidos temporizadores como base para identificar quando se está em uma região onde está ocorrendo outra comunicação. Tal método se baseia no fato de uma área de intersecção entre duas transmissões omnidirecionais ser

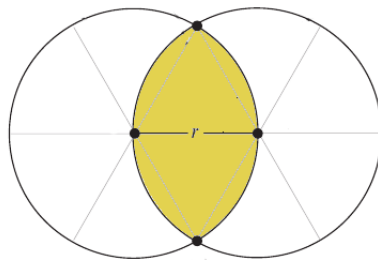


Figura 2.10: Lente de um par de nós distantes r um do outro, adaptado de [7].

relativamente grande (cerca de 58% da área da união das mesmas duas transmissões). Essa área de intersecção denominada lente está destacada na Figura 2.10.

Então, para cada nó n são definidos 2 temporizadores: O primeiro para quando uma transmissão ocorre na lente do nó (T_l^n); O segundo para quando uma transmissão é iniciada (T_i^n). Desta maneira, é possível inferir quando está ocorrendo comunicação na área da lente, evitando colisões. Isto é possível também graças à transmissão das mensagens RTS/CTS em modo omnidirecional em um canal exclusivo para controle, fazendo com que os nós possuam maior “informação” acerca das comunicações a sua volta.

Para ilustrar a situação descrita será apresentado um breve exemplo do funcionamento do protocolo DC-DMAC com o auxílio da Figura 2.8a. Suponha que exista uma comunicação em curso entre os nós B e C e que o nó D (presente na lente formada entre B e C) receba um RTS proveniente do nó E . De posse das informações dos temporizadores descritos, o nó D verifica se $T_i^E \geq T_l^D$, ou seja se E já tem “conhecimento” acerca da comunicação que criou a lente na qual D está inserido. Como isto ocorre, D responde com um CTS para E , fazendo com que a comunicação siga normalmente. Note que isso traz ganhos com relação a reuso espacial, e que no exemplo apresentado E teria conhecimento da lente em questão por estar dentro do alcance omnidirecional de B e C . Com os mecanismos descritos, o protocolo DC-DMAC minimiza os casos onde a surdez vai ocasionar retransmissões e aumento da janela de *backoff* e também atenua os efeitos do problema de terminal escondido [7].

2.3.7 *Directional Virtual Carrier Sensing with Deafness Avoidance* (DVCS-DA)

O DVCS-DA (*Directional Virtual Carrier Sensing with Deafness Avoidance*) é mais uma técnica que visa amenizar os efeitos do problema de surdez. Para isso, propõe-se um mecanismo que busca detectar quando um nó está sofrendo do problema de surdez, utilizando informações dos fluxos de dados incidentes aos nós [13]. Assim como o RI-DMAC, o DVCS-DA possui dois modos de operação:

- O **modo padrão** utiliza transmissões iniciadas pelo transmissor (*sender-initiated*) utilizando os quadros RTS e CTS para a reserva de canal como ocorre no DVCS;
- O **modo de tratamento de surdez** utiliza transmissões iniciadas pelo receptor (*receiver-initiated*). Novamente, faz-se uso do quadro RTR nas transmissões iniciadas

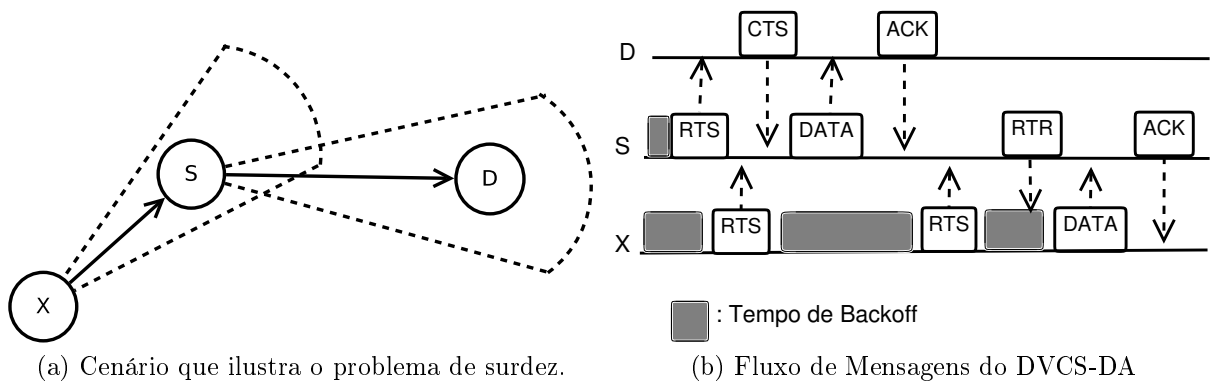


Figura 2.11: Topologia exemplo do problema de surdez e do funcionamento da técnica DVCS-DA [13].

adas pelo receptor. Vale ressaltar que as transmissões iniciadas pelo receptor são utilizadas somente para tratar o problema de surdez, quando este é detectado pelo mecanismo de detecção de surdez. É importante ainda mencionar que por meio das comunicações iniciadas pelo receptor é possível estabelecer uma maior justiça na distribuição dos recursos da rede [13].

O mecanismo de detecção de surdez do DVCS-DA determina dentre os fluxos incidentes ao nó qual está sofrendo o problema de surdez a mais tempo, ou seja, qual nó vizinho está esperando há mais tempo para enviar um quadro de dados. Para isso, a detecção de surdez depende do instante de recepção do último quadro e do limiar de surdez esperada de cada fluxo. Quando da estimativa de tal limiar, pode-se utilizar informações da camada de roteamento acerca dos fluxos incidentes ao nó, caracterizando uma solução *cross layer*, uma vez que se utilizam informações de outra camada. Note que essa abordagem de detecção de surdez baseada em fluxos e não em informações de próximo pacote faz com que o DVCS-DA não sofra do mesmo problema que o RI-DMAC quando se depara com um cenário de fluxos alternados (Figura 2.9b) [13].

Um exemplo que ilustra o funcionamento dos dois modos de operação do DVCS-DA está disponível na Figura 2.11. Neste cenário, assume-se que há os seguintes fluxos de dados: $X \rightarrow S$ e $S \rightarrow D$. Assume-se ainda que alguns pacotes de cada fluxo já foram transmitidos com sucesso, ou seja, o nó S tem conhecimento dos dois fluxos de dados existentes. Inicialmente, o nó S espera o seu tempo de *backoff* e tenta iniciar uma comunicação iniciada pelo transmissor (**modo padrão**) enviando um RTS para D . O nó D responde com um CTS, 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 iniciar uma comunicação iniciada pelo transmissor (**modo padrão**) com S por meio do envio de mensagens RTS. Note que como S está com o feixe de antena direcionado para D , S não responde aos quadros RTS enviados por X , fazendo com que X tenha seu tempo de *backoff* aumentado exponencialmente. Isso ocorre até que S verifica que não se comunicou com X por um período de tempo superior ao limiar de surdez estimado para o fluxo $X \rightarrow S$. Ou seja, S verifica que X possivelmente está sofrendo os efeitos do problema de surdez. Desta forma, S entra no **modo tratamento de surdez** e envia um quadro RTR (*Ready to Receive*) para X , de maneira a começar uma comunicação iniciada pelo

Tabela 2.1: Tabela Comparativa entre as soluções levantadas.

Protocolo	Tipo de Antena	Canal de Controle	Envio de RTS/CTS	Outros quadros/sinais	Possui Mecanismo que Atenua Surdez	Avalia Justiça
DVCS [48]	<i>Steerable Beam</i>	Não	Direcional	Não	Não	Não
DMAC [10]	<i>Steerable Beam</i>	Não	Direcional	Não	Não	Não
ToneDMAC [9]	<i>Switched Beam</i>	Sim	Direcional	<i>Tone</i>	Sim	Não
RI-DMAC [49]	<i>Switched Beam</i>	Não	Direcional	RTR	Sim	Sim
CW-DMAC [47]	<i>Switched Beam</i>	Não	Omnidirecional	Não	Sim	Não
MDMAC [46]	<i>Steerable Beam</i>	Não	Não há RTS/CTS	Não	Sim	Sim
DC-DMAC [7]	<i>Switched Beam</i>	Sim	Omnidirecional	Não	Sim	Não
DVCS-DA [13]	<i>Switched Beam</i>	Não	Direcional	RTR	Sim	Sim

receptor. Ao receber o quadro RTR, o nó X cancela o seu tempo de *backoff* e responde a S com um quadro de dados fazendo com que a comunicação prossiga normalmente. Dessa maneira, o DVCS-DA consegue relevantes ganhos de justiça quando comparado com o esquema utilizado pelo RI-DMAC [13].

Finalizada a explicação dos protocolos MAC direcionais será apresentada a seguir uma análise comparativa entre eles quando avaliados sob diversos aspectos.

2.4 Discussão

Neste capítulo, foram apresentadas importantes técnicas implementadas pelo padrão IEEE 802.11 que é utilizado em larga escala. Pode-se destacar a importância da reserva de canal para reduzir a ocorrência de colisões de dados, entretanto deve-se notar que esta reserva introduz uma considerável latência à rede. Foram apresentadas ainda alternativas para prover qualidade de serviço quando da utilização de redes sem fio, por meio da utilização do padrão IEEE 802.11e ou das técnicas APS/ACS (*Adaptive Packet Sending/Adaptive Carrier Sensing*). Discutiu-se ainda a respeito das principais motivações para a utilização de comunicações direcionais, bem como suas características e limitações, dentre as quais pode-se destacar o problema de surdez. À luz da relevância do problema em questão, foi realizada uma revisão do estado da arte no que tange às técnicas ou protocolos MAC que consideram a utilização de comunicações direcionais. É importante mencionar que em geral os protocolos MAC direcionais se baseiam no padrão IEEE 802.11. Todavia, este padrão foi projetado para comunicações omnidirecionais, fazendo com que os protocolos MAC direcionais que herdaram determinadas características do padrão IEEE 802.11 não aproveitem todo o potencial das comunicações direcionais. Está disponível na Tabela 2.1 uma análise comparativa resumida dentre os protocolos descritos ao longo do presente capítulo. A Tabela 2.1 apresenta informações acerca de atenuação do problema de surdez, tipo de antena considerado, utilização de canal de controle, avaliação da justiça na distribuição dos recursos da rede, tipos de quadros ou sinais usados pelos protocolos e seu modo de envio. De posse desta tabela, é possível se ter a noção das funcionalidades suportadas por cada um dos protocolos apresentados.

Dentre os diversos critérios presentes na Tabela 2.1, aquele mais relacionado com a dissertação de mestrado em questão é o critério de justiça na distribuição dos recursos da rede. Portanto, a análise comparativa dos protocolos será focada no critério de justiça

na distribuição dos fluxos. A justiça pode ser caracterizada como sendo proporcional à variação da vazão obtida por fluxos distintos. Ou seja, um protocolo injusto é aquele que não consegue atender os fluxos sem que um fique esperando muito mais do que outro para ser atendido, o que pode levar a uma situação de longa espera para atendimento de um dos fluxos [50].

Observando-se a Tabela 2.1 pode-se verificar que dentre os protocolos MAC direcionais pesquisados apenas três avaliam a justiça de distribuição dos fluxos. Porém, estes protocolos possuem algumas limitações neste sentido. O MDMAC só é aplicável na faixa de 60 GHz, onde a interferência não é um gargalo significativo possibilitando a não utilização das mensagens de reserva de canal (RTS e CTS). Já o RI-DMAC provê um mecanismo que visa estabelecer a justiça na distribuição dos fluxos, entretanto apresenta problemas em cenários de fluxos alternados (Figura 2.9b). É importante mencionar que tais problemas consistem do fato do mecanismo utilizado para atenuação do problema de surdez ser baseado em informações de próximo pacote. Logo, dentre as soluções pesquisadas, aquela que se comporta de maneira mais próxima à desejada é a técnica denominada DVCS-DA. Tal técnica provê ganhos consideráveis no quesito justiça mesmo em cenários de fluxos alternados (Figura 2.9b), no entanto possui algumas limitações inerentes à estimativa dos limiares de surdez de cada fluxo [13]. É importante ressaltar que em determinados casos uma melhora no critério de justiça pode reduzir a vazão total da rede [13].

Conforme explicado no Capítulo 1, o objetivo deste trabalho é a proposta de mecanismos que permitam melhorias no âmbito das comunicações direcionais. Tendo sido realizada a revisão teórica neste capítulo, pode-se citar alguns aspectos relativos a comunicações direcionais como pendentes de melhorias que serão abordados ao longo dos próximos capítulos.

Reserva de Canal: A reserva de canal reduz a ocorrência de colisões de quadros de dados, entretanto introduz uma latência às comunicações. Neste sentido, o Capítulo 3 apresenta uma nova técnica de reserva de canal (DPTR – *Directional Pulse/Tone Based Channel Reservation*) para comunicações direcionais que diminui a latência da reserva de canal, aumentando assim a vazão da rede [19]. Esta técnica tem como premissa que uma antena seja capaz de medir com precisão razoável a potência do sinal recebido bem como o ângulo de chegada do mesmo, o que torna o DPTCR bastante portátil. Com relação à portabilidade do DPTCR, uma possível integração entre este e a técnica APS/ACS será discutida no Capítulo 3, visando aumentar o desempenho das redes que utilizam comunicações direcionais.

Justiça na Distribuição de Fluxos: Conforme já explicado no levantamento de protocolos e técnicas relacionadas às comunicações direcionais, existem poucos protocolos projetados para antenas direcionais que possuem mecanismos para prover justiça na distribuição dos recursos da rede. Portanto, no Capítulo 4, será apresentado o DPTCR-DA (*Directional Pulse/Tone Based Channel Reservation with Deafness Avoidance*) que é uma adaptação da idéia apresentada no DVCS-DA combinada ao eficiente mecanismo de reserva de canal proposto no DPTCR. Devido a ser uma adaptação do DVCS-DA, espera-se obter ganhos de justiça sem perdas relevantes na vazão total, uma vez que se utiliza a técnica de reserva de canal DPTCR.

Capítulo 3

Proposta de uma Técnica de Reserva de Canal em Comunicações Direcionais

Este capítulo apresenta uma nova técnica de reserva de canal para comunicações direcionais que visa diminuir a latência imposta pela utilização de quadros de controle, com o objetivo de prover uma maior vazão à rede. Denominada DPTCR (*Directional Pulse/Tone Based Channel Reservation*) [19], esta técnica é apresentada na Seção 3.1. Em seguida, uma avaliação do DPTCR está disponível na Seção 3.2. Com o intuito de mostrar um melhor aproveitamento de algumas características das comunicações direcionais, a Seção 3.3 apresenta uma proposta de integração do DPTCR com os mecanismos de APS/ACS explicados no Capítulo 2. Uma avaliação do impacto desta integração está presente na Seção 3.4. Por fim, na Seção 3.5, são apresentadas as considerações finais sobre o que de mais relevante foi abordado ao longo deste capítulo.

3.1 DPTCR: Técnica de Reserva de Canal usando Sinais Pulse/Tone em Comunicações Direcionais

Esta seção apresenta uma nova técnica de reserva de canal em comunicações direcionais que utiliza sinais de *pulse* e *tone*, sendo denominada DPTCR [19]. O uso de sinais *pulse* e *tone* foi considerado para evitar o problema de terminal escondido em comunicações omnidirecionais [21]. Da mesma maneira, tais sinais foram explorados no contexto de comunicações direcionais nas propostas apresentadas em [9], [35] e [45]. No DPTCR, os sinais *pulse* e *tone* são utilizados para reduzir a latência da reserva de canal. Para tal fim, utilizam-se os sinais *pulse* e *tone* ao invés de quadros de controle como RTS e CTS quando da reserva de canal.

Os quadros RTS/CTS permitem ao nó identificar se o quadro recebido é ou não destinado a ele. Uma dificuldade quando se utiliza sinais *pulse* e *tone* é prover meios de realizar esta identificação, bem como de identificar a duração da comunicação. Como *pulse* e *tone* não carregam informação alguma, é necessária a utilização de um mecanismo de predição da origem, destino e duração do sinal que decodifica o sinal recebido de maneira a inferir a duração da comunicação em questão para se atualizar o DNAV (*Directional NAV*) corretamente. Tal mecanismo será explicado na Subseção 3.1.2. É importante mencionar que o DNAV é a versão direcional do NAV, conforme explicado no Capítulo 2 tendo a

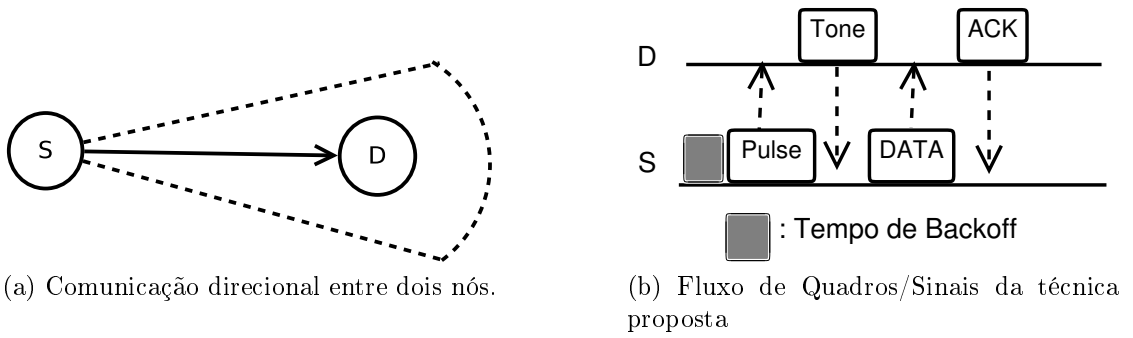


Figura 3.1: Topologia exemplo de comunicação usando a técnica de reserva de canal proposta [19].

mesma função descrita no capítulo anterior. O comportamento da técnica proposta e o mecanismo de predição da origem, destino e duração do sinal serão descritos a seguir.

3.1.1 Comportamento da Técnica

O DPTCR é baseado no padrão IEEE 802.11 aliado à técnica DVCS, com a diferença de que os quadros RTS e CTS não são utilizados, mas sim os sinais *pulse* e *tone* aliados ao mecanismo de predição da origem, destino e duração do sinal. Deste modo, objetiva-se conseguir ganhos de redução de colisões nos quadros de controle análogos aos obtidos por [35] no que diz respeito ao tempo de transmissão do sinal *pulse* ser bem menor do que o tempo de transmissão do RTS, sem no entanto sofrer o impacto do aumento da latência decorrente da utilização do RTS e do CTS. Seja R_c a taxa de transmissão do canal, um quadro RTS em geral leva em torno de $(192 + 20 * 8)/R_c \mu s$ para ser transmitido e um CTS leva em torno de $(192 + 14 * 8)/R_c \mu s$, que são tempos de transmissão bem maiores do que os necessários para sinais *pulse* e *tone*, conforme mostrado a seguir.

A Figura 3.1 ilustra por meio de um exemplo a sequência de sinais/mensagens trocadas pelos nós para que a reserva de canal ocorra corretamente quando do uso do DPTCR. No cenário do exemplo em questão, assume-se que há o seguinte fluxos de dados: $S \rightarrow D$. Assume-se ainda que o mecanismo de predição da origem, destino e duração do sinal (explicado na Subseção 3.1.2) opera com sucesso. Inicialmente, o nó S espera o seu tempo de *backoff* e então tenta iniciar uma comunicação enviando um *pulse* em modo direcional para D . É importante mencionar que o tempo de duração do *pulse* enviado (T_{pulse}) é tal que:

$$T_{pulse} = T_{sync} + \lceil \log_2 P_{sz} \rceil, \quad (3.1)$$

onde P_{sz} é o tamanho do pacote de dados a ser transmitido e T_{sync} é o tempo máximo que se deve esperar para que um sinal *pulse* ou *tone* seja detectado com sucesso. Este tempo é no máximo igual a $5\mu s$, conforme descrito em [45]. Portanto, este será considerado como sendo o valor de T_{sync} neste trabalho. O T_{pulse} é definido dessa maneira para o correto funcionamento do mecanismo de predição da origem, destino e duração do sinal. O nó D utiliza o mecanismo de predição da origem, destino e duração do sinal para saber que ele é o destinatário do *pulse* e que o nó que enviou este sinal foi o S . Em seguida, o nó D responde com um *tone* em modo direcional para S . O tempo de duração

do *tone* enviado (T_{tone}) é igual ao tempo de transmissão do *pulse* ($T_{tone} = T_{pulse}$) para o funcionamento do mecanismo de predição da origem, destino e duração do sinal. Da mesma forma, S utiliza o mecanismo de predição de origem, destino do sinal para saber que foi D quem enviou o sinal de *tone*. Assim, S envia o pacotes de dados para D que, por sua vez, confirma o recebimento de tal pacote por meio de uma mensagem ACK, fazendo com que a comunicação e o fluxo de envio de dados prossiga com sucesso. É importante mencionar que os sinais *pulse* e *tone* são senóides diferentes. Esta diferenciação pode ser por amplitude, frequência ou fase, como descrito em [52]. Alguns casos críticos, tais como colisão de sinais *pulse/tone*, bem como erro no funcionamento do mecanismo de predição de origem, destino e duração do sinal podem acontecer no DPTCR. Uma explicação acerca de como o DPTCR lida com esses eventos será apresentada na Subseção 3.1.3.

3.1.2 Mecanismo de Predição da Origem, Destino e Duração do Sinal

O mecanismo de predição da origem, destino e duração do sinal é parte essencial da técnica proposta. Tal mecanismo torna possível a realização da reserva de canal sem a utilização de quadros como RTS e CTS, usando apenas sinais da camada física (*pulse* e *tone*). Os cabeçalhos do RTS e CTS servem basicamente para indicar o nó origem do quadro, o nó destino e a duração da transmissão, de modo que o DNAV possa ser atualizado corretamente. O mecanismo de predição de origem, destino e duração do sinal permite a inferência de tais informações apenas com o uso de sinais *pulse* e *tone*. Isso ocorre, pois os algoritmos de roteamento no início de sua operação forçam a ocorrência de um *broadcast* para popular as tabelas de roteamento. De maneira análoga, é possível para os nós medir a potência do sinal recebido (RSSI – *Received Signal Strength Indicator*) e ângulo de chegada no sinal (AOA). Com base nessas informações, os nós podem estimar a origem do sinal recebido, estimando a posição de seus vizinhos. Este mecanismo também assume que uma antena é capaz de gerenciar sua potência de transmissão de modo proporcional a distância para o nó destino. Assim, ao receber um sinal, o nó pode verificar o ângulo de chegada e a potência do sinal recebido para inferir qual nó é a origem do sinal, da mesma forma que o RTS e CTS possuem um campo “origem” em seus cabeçalhos. Devido à referida gerência de potência de transmissão, se a potência do sinal recebido é alta, isso significa que o sinal tem como destino outro nó, possibilitando assim a identificação do nó destino, de maneira análoga à utilização do campo “destino” nos cabeçalhos dos quadros RTS e CTS.

Com relação ao campo “duração” do cabeçalho dos quadros RTS e CTS utilizado para atualizar o DNAV, a técnica proposta preconiza que $T_{pulse} = T_{tone}$ é proporcional ao logaritmo na base 2 do tamanho do pacote a ser transmitido. Logo, qualquer nó que recebe um *pulse* ou *tone* consegue atualizar seu DNAV corretamente, uma vez que a técnica proposta limita os possíveis tamanhos dos pacotes da seguinte forma:

- Todo pacote tem tamanho 2^i , $0 \leq i < 11$ ou tamanho igual a 1500.

Esta limitação de até 1500 *bytes* é devido ao MTU (*Maximum Transmission Unit*) do padrão Ethernet (IEEE 802.3) ser igual a 1492 ou igual a 1500 (Ethernet Versão 2), uma vez que em geral se assume o uso de Ethernet. Note ainda que em caso de sucesso no funcionamento do mecanismo de predição da origem e duração do sinal a técnica proposta

possui o mesmo comportamento da utilização de RTS e CTS, inclusive no que tange ao problema do terminal escondido. Entretanto, há de se considerar que a estimativa do ângulo de chegada do sinal (AOA) e da potência do sinal recebido (RSSI) possuem uma precisão associada. Em casos onde essa precisão não é suficiente para prever a origem do sinal, este mecanismo não funcionará corretamente. Todavia, conforme será mostrado a seguir, a probabilidade de dois nós estarem organizados tal que o mecanismo falhe não é alta, dada uma precisão razoável na estimativa da potência do sinal recebido (RSSI) e do ângulo de chegada do sinal (AOA).

3.1.3 Análise de Casos Críticos

Esta subseção visa descrever o comportamento do DPTCR, dada a ocorrência de determinados casos críticos, em especial no que diz respeito a decodificação de sinais *pulse/ tone*. Serão considerados os casos a seguir:

- (i) Quando um sinal *pulse* é recebido durante a decodificação de um *tone*, ou vice-versa, ocorre uma colisão, uma vez que os sinais *pulse/ tone* são diferenciados seja por fase, amplitude ou frequência [34] [52];
- (ii) De acordo com [53], quando dois (ou mais) sinais *pulse*, ou dois (ou mais) sinais *tone* são recebidos concorrentemente, a potência do sinal recebido é a soma da potência que seria recebida para cada um desses sinais.

Será mostrado que a técnica proposta possui comportamento semelhante ao do padrão IEEE 802.11 em ambos os casos descritos acima. No caso (i), o comportamento é idêntico ao do padrão IEEE 802.11, gerando uma colisão no receptor. Resta então mostrar o que ocorre no caso (ii). A Figura 3.2 ilustra um exemplo da situação descrita no caso (ii). Neste caso, suponha que o nó x escute a transmissão de i ($2 \leq i$) sinais provenientes de uma mesma direção, em um dado momento. Assuma que os nós que transmitiram nessa direção são os nós n_1, n_2, \dots, n_i . Assim, a potência do sinal recebido por todo nó x que escutar esses sinais será tal que:

$$R(x, n_z) = \sum_{j=1}^i R_{esp}(x, n_j), \forall z \leq i, \quad (3.2)$$

onde $R_{esp}(a, b)$ denota a medição esperada da potência do sinal recebido pelo nó a do sinal proveniente do nó b , enquanto $R(a, b)$ denota a potência do sinal recebido medida pelo nó a do sinal proveniente do nó b . Devido à Equação 3.2, tem-se que:

$$R(x, n_z) > R_{esp}(x, n_z), \forall z \leq i. \quad (3.3)$$

Isso significa que todo nó x que recebe o sinal nesse caso não identifica corretamente a origem daquele sinal, tendo em vista que a potência esperada da recebida para todo nó x . Dessa forma, todo nó x que recebe o sinal não responde a nenhum dos i nós transmissores. Assim, os nós transmissores entram em *backoff* de maneira similar ao que ocorre para o padrão IEEE 802.11. Note que caso exista um nó y vizinho de x tal que $R(x, n_z) = R_{esp}(x, y)$, o nó x responde a y . Os n_i nós transmissores escutam esse sinal com a potência $R_{esp}(y, x)$, sendo ignorado por eles. Note que neste caso os

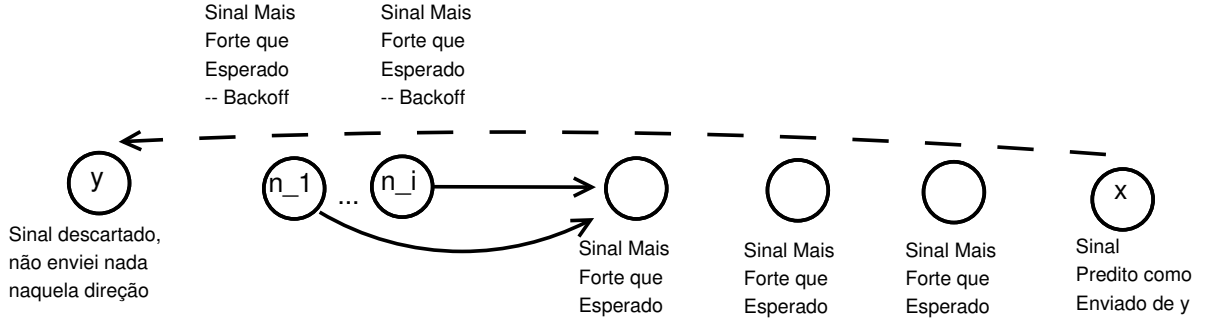


Figura 3.2: Exemplo de caso em que uma colisão de sinais pode gerar aumento na potência do sinal recebido.

n_i nós transmissores novamente entram em tempo de *backoff* para disputar o meio da mesma forma que acontece no padrão IEEE 802.11. Resta então verificar o que ocorre com y nesse cenário. O nó y vai descartar o sinal de x por não ter enviado nada naquela direção neste instante. Será provado por contradição que y não pode ter enviado um sinal para x no instante considerado. Suponha que y tenha enviado sinal para x no instante considerado. Então, y está entre os i nós que geraram a soma descrita na Equação 3.2. Note que estando entre os i nós o nó y deveria ignorar o sinal proveniente de x , entrando em *backoff*. Entretanto, isso contradiz a suposição de que y envie um sinal como resposta para x . Portanto, está provado por absurdo que y não enviou um sinal para x no instante considerado. Esse segundo caso está representado pela seta pontilhada na Figura 3.2.

Terminada essa análise relativa às colisões de sinais, será apresentada a seguir uma análise probabilística do DPTCR à luz da probabilidade de falha do mecanismo de predição de origem do sinal, uma vez que este está intimamente relacionado às precisões das medidas de potência do sinal recebido e do ângulo de chegada do sinal.

3.1.4 Análise Probabilística da Técnica Proposta

Para conveniência dos leitores, as principais notações usadas nesta subseção estão listadas na Tabela 3.1. Seja $R(a, b)$ a potência do sinal medido pelo nó a do sinal proveniente do nó b , $A(a, b)$ o ângulo de chegada medido pelo nó a do sinal oriundo do nó b , ϵ a precisão da medição do AOA ($^\circ$) e τ a precisão da medição do RSSI (dB). Então, sem perda de generalidade, suponha que o nó x tem pelo menos dois vizinhos y e z , tal que:

$$|R(x, z) - R(x, y)| < \tau; \quad (3.4)$$

$$|A(x, y) - A(x, z)| < \epsilon. \quad (3.5)$$

No caso em que as Expressões 3.4 e 3.5 ocorrem, o mecanismo de predição de origem do sinal de x pode identificar erradamente a origem do sinal, uma vez que não se poderia distinguir um sinal (*pulse* ou *tone*) proveniente de y ou z .

Note que este erro de predição de origem pode ocorrer de modo que se tenha mais do que duas opções de origem identificadas. A análise apresentada engloba esse caso, considerando todos os pares dos vizinhos de x como sendo candidatos a serem y e z . Portanto, a probabilidade de erro de predição da origem do sinal (P_f) é definida da

Tabela 3.1: Notações.

$R(a, b)$	RSSI medido pelo nó a do sinal proveniente do nó b .
$A(a, b)$	AOA medido pelo nó a do sinal oriundo do nó b .
ϵ	Precisão da medição do AOA ($^\circ$).
τ	Precisão da medição do RSSI (dB).
P_f	Probabilidade de erro de predição.
G	Grafo que representa a topologia da rede.
$\Delta(G)$	Maior grau do grafo G .
R_{Min}	Menor magnitude (em dB) de sinal detectável por uma antena.
R_{Max}	RSSI máximo.
$pow(x)$	A potência de transmissão do nó x .
$g(x)$	Ganho de antena do nó x .
sh_{med}	<i>Shadowing</i> médio do canal de propagação.
$lo(x)$	Perdas de sistema do nó x .
$P_l(a, b)$	Perda de potência do sinal devido a distância entre a e b .
$h(x)$	Altura da antena do nó x .
w	Razão entre a velocidade de propagação do canal e a velocidade da luz.
$d(a, b)$	Distância máxima onde b consegue detectar o sinal enviado por a com RSSI igual a $R(a, b)$.
A_{Max}	$\pi \cdot D_{Max}^2$.
D_{Max}	Distância calculada usando a Equação 3.12, considerando $R(a, b) = R_{Min}$.
$v(q)$	Distância calculada usando a Equação 3.12, considerando $R(a, b) = q - \tau$.
$C(r, q)$	Área da coroa circular de raio maior igual a r e raio menor igual a $v(q)$.
TMT	Vazão máxima teórica.
T_{RTS}	Tempo de transmissão do quadro RTS/DRTS.
T_{CTS}	Tempo de transmissão do quadro CTS/DCTS.
T_{DATA}	Tempo de transmissão do pacote de dados.
T_{ACK}	Tempo de transmissão do ACK.
T_{Bo}	Tempo de <i>backoff</i> esperado.
T_{DIFS}	Tempo de DIFS (<i>DCF Interframe Space</i>) do padrão IEEE 802.11b.
T_{SIFS}	Tempo de SIFS (<i>Short Interframe Space</i>) do padrão IEEE 802.11b.
P_{sz}	Tamanho do pacote de dados, descontados os cabeçalhos.
CW_{Min}	Tamanho da janela mínima de <i>backoff</i> .
T_{slot}	Tamanho de um <i>slot</i> de tempo.
R_c	Taxa de transmissão do canal.
T_{Pulse}	Tempo de transmissão do sinal <i>pulse</i> .
T_{Tone}	Tempo de transmissão do sinal <i>tone</i> .
T_{sync}	Tempo de detecção dos sinais <i>pulse/tone</i> .

seguinte forma:

$$P_f = ((|R(x, z) - R(x, y)| < \tau) \cap (|A(x, y) - A(x, z)| < \epsilon)). \quad (3.6)$$

Devido aos dois eventos descritos na Expressão 3.6 serem assumidos como independentes, pode-se afirmar que:

$$P_f = P(|R(x, z) - R(x, y)| < \tau) * P(|A(x, y) - A(x, z)| < \epsilon). \quad (3.7)$$

A probabilidade expressada pela Expressão 3.5 pode ser calculada de uma maneira equivalente àquela realizada para o problema clássico de probabilidade, denominado problema do aniversário. Tal problema foi descrito por [14], consistindo no cálculo da probabilidade de duas ou mais pessoas terem aniversário num mesmo dia do ano, dada uma quantidade h de pessoas e uma distribuição de probabilidade dos aniversários destas pessoas. Em geral, este problema assume o uso de uma distribuição uniforme na ocorrência dos aniversários das pessoas, ou seja, para todos os dias cada pessoa possui uma mesma probabilidade de ter aniversário neste dia [14]. Assumindo esta uniformidade, sejam M o evento em que duas ou mais pessoas tenham o aniversário no mesmo dia e Y a quantidade de dias em um ano, a probabilidade de M ocorrer pode ser definida da seguinte forma [39]:

$$P(M) = 1 - \frac{Y!}{Y^h \cdot (Y - h)!}. \quad (3.8)$$

A analogia da probabilidade expressa pela Expressão 3.5 com o problema do aniversário será explicada a seguir. Caso considere-se que a distribuição dos nós ocorre uniformemente, que um intervalo de tamanho ϵ representa um dia, que um ano possui $\frac{360}{\epsilon}$ ($Y = \frac{360}{\epsilon}$) e que há um universo de $\Delta(G)$ (Maior grau do grafo G que representa a topologia da rede) pessoas ($h = \Delta(G)$), tem-se exatamente a mesma semântica do problema do aniversário, uma vez que a probabilidade expressa pela Expressão 3.5 visa mensurar as chances de dois nós estarem na mesma medida de ângulo de chegada, dada a precisão ϵ da antena direcional em estimar o ângulo em questão. Assumindo que $\Delta(G) \leq \frac{360}{\epsilon}$, e dada a equivalência do problema do aniversário com a probabilidade expressa pela Expressão 3.5, esta pode ser reescrita da seguinte forma:

$$P(|A(x, y) - A(x, z)| < \epsilon) = 1 - \frac{(\frac{360}{\epsilon})!}{(\frac{360}{\epsilon})^{\Delta(G)} \cdot (\frac{360}{\epsilon} - \Delta(G))!} \quad (3.9)$$

Um argumento similar poderia ser usado no que tange a Expressão 3.4. Contudo, a distribuição de probabilidade do RSSI não é uniforme, uma vez que a probabilidade de existirem dois nós que satisfaçam a Expressão 3.4 aumenta quando se tem valores mais baixos de RSSI. Este fato ocorre devido à definição da potência do sinal recebido. Nesse caso, não é possível se aplicar uma adaptação da Equação 3.8. Diversas variações do problema do aniversário são estudadas na literatura correlata [11] [12] [15] [26] [37] [39], dentre as quais casos em que a distribuição de probabilidade do nascimento das pessoas não é exatamente uniforme. Com relação à definição de potência de sinal recebido, este considera o modelo de perda por propagação de canal denominado *Two-Ray*. Assim, seja $pow(x)$ a potência de transmissão do nó x , $g(x)$ o ganho de antena do nó x , sh_{med} o *shadowing* médio do canal de propagação, $lo(x)$ as perdas de sistema do nó x , $h(x)$

a altura da antena do nó x , w a razão entre a velocidade de propagação do canal e a velocidade da luz e $d(a, b)$ a distância máxima onde b consegue detectar o sinal enviado por a com RSSI igual a $R(a, b)$, o RSSI é definido como [34]:

$$R(a, b) = k - P_l(a, b), \quad (3.10)$$

$$k = pow(b) + g(b) + lo(b) + lo(a) + g(a) - sh_{med}$$

$$P_l(a, b) = \begin{cases} 0, \text{ se } \frac{d(a,b)^2}{h(a) \cdot h(b)} < 1, \frac{4 \cdot \pi \cdot d(a,b)}{w} < 1 \\ 20 \cdot \log_{10} \left(\max\left(\frac{d(a,b)^2}{h(a) \cdot h(b)}, \frac{4 \cdot \pi \cdot d(a,b)}{w}\right) \right), \text{ caso contrário.} \end{cases} \quad (3.11)$$

Da Equação 3.11, nota-se que para $P_l(a, b)$ ser igual a 0, a distância $d(a, b)$ deve ser muito pequena, isto é, deve valer que:

$$d(a, b) < \sqrt{h(a) \cdot h(b)}, \quad d(a, b) < \frac{w}{4 \cdot \pi}$$

Por definição, $w \leq 1$ logo:

$$\begin{aligned} d(a, b) &< \frac{w}{4 \cdot \pi} < \frac{1}{4 \cdot \pi} \\ d(a, b) &< \frac{w}{4 \cdot \pi} < 0,079 \end{aligned}$$

Ou seja, para $P_l(a, b)$ ser igual a 0, a distância $d(a, b)$ entre dois nós deveria ser menor do que 8 cm. Considera-se esta distância como sendo desprezível, quando da formulação da equação que relaciona distância e potência do sinal recebido. Logo, a partir das Equações 3.10 e 3.11, obtém-se que:

$$d(a, b) = \begin{cases} 0, \text{ se } R(a, b) = k \\ \frac{w * 10^{\frac{k-R(a,b)}{20}}}{4 * \pi}, \text{ se } R(a, b) > k - lim \\ \sqrt{h(a) * h(b)} * 10^{\frac{k-R(a,b)}{40}}, \text{ caso contrário.} \end{cases} \quad (3.12)$$

$$lim = 40 * \log_{10} \frac{\sqrt{h(a) * h(b)} * 4 * \pi}{w}$$

É importante mencionar que lim foi calculado levando em conta a definição de $P_l(a, b)$ no que diz respeito ao $(\max(\frac{d(a,b)^2}{h(a) \cdot h(b)}, \frac{4 \cdot \pi \cdot d(a,b)}{w}))$.

O problema do aniversário para distribuições não uniforme é tema de pesquisa na área de probabilidade, como descrito em [39]. Seja p uma distribuição não uniforme de probabilidade de nascimento de pessoas, a probabilidade de M pode ser definida como [39]:

$$P(M; p) = 1 - (h! \cdot S_{h,Y}(p)), \quad (3.13)$$

onde

$$S_{h,Y}(p) = S_{h,Y-1}(p_1, \dots, p_{Y-1}) + p_Y \cdot S_{h-1,Y-1}(p_1, \dots, p_{Y-1}) \quad (3.14)$$

com as seguintes condições iniciais:

$$S_{1,j} (p_1, \dots, p_j) = \sum_{z=1}^j p_z,$$

$$S_{j,j} (p_1, \dots, p_j) = \prod_{z=1}^j p_z,$$

$$j = 1, 2, \dots, n.$$

Note que a probabilidade expressa pela Expressão 3.4 é equivalente ao problema do aniversário com distribuição de probabilidade não uniforme. Para utilizar esta equivalência de maneira a se realizar o cálculo da probabilidade apresentada na Expressão 3.4, considere-se que: cada intervalo de tamanho τ representa um dia; um ano possui $\frac{R_{max}-R_{min}}{\tau}$ dias ($Y = \frac{R_{max}-R_{min}}{\tau}$), onde R_{Min} denota a menor magnitude (em dB) de sinal detectável por uma antena (sensibilidade da antena) e R_{max} denota o RSSI máximo. Portanto, seja D_{Max} a distância calculada usando a Equação 3.12, considerando $R(a, b) = R_{Min}$, A_{Max} igual a $\pi \cdot D_{Max}^2$ e $v(q)$ a distância calculada usando a Equação 3.12, considerando $R(a, b) = q - \tau$, a Expressão 3.4 ser escrita da seguinte forma:

$$P(|R(x, z) - R(x, y)| < \tau) = P(M; p) = 1 - (\Delta(G)! \cdot S_{\Delta(G), \frac{R_{max}-R_{min}}{\tau}}(p)), \quad (3.15)$$

onde

$$p_i = \frac{C(d(x, z), R_{min} + (\tau * i))}{A_{Max}}, \quad i = 1, 2, \dots, \frac{R_{max} - R_{min}}{\tau},$$

$$C(r, q) = \pi \cdot (r^2 - (v(q))^2).$$

A seguir, será apresentado um exemplo do que foi discutido acima com o auxílio da Figura 3.3. A figura ilustra três áreas diferentes, coloridas de preto (B), amarelo (Y) e magenta (M). Conforme o explicado, um erro de predição de origem ocorreria quando dois nós (y e z) estivessem na mesma área colorida. Nesse caso, ao receber um sinal de um desses nós, x não poderia distinguir se a origem do sinal foi y ou z o que pode gerar perdas e colisões. Isso aconteceria, uma vez que as áreas representadas na Figura 3.3 cobrem um setor circular de no máximo ϵ graus e valeria a seguinte desigualdade: $R(x, z) - R(x, y) < \tau$.

Para concluir a presente análise probabilística sobre o DPTCR no que diz respeito a precisão das medidas de ângulo de chegada (AOA) e potência do sinal recebido (RSSI), foi realizado um cálculo numérico desta probabilidade de falha com o auxílio das Equações 3.7, 3.9 e 3.15. Para este cálculo, utilizou-se o *software* livre Octave [18] e os parâmetros disponíveis na Tabela 3.2. A Tabela 3.2 discrimina os diversos parâmetros apresentados, mostrando seus valores para o nó transmissor, para o nó receptor e para o meio no qual ocorre a comunicação, no caso o meio sem fio. Além disso, considerou-se $\Delta(G) = 5$. A precisão relacionada à medição do RSSI é considerada na literatura como sendo não mais que 0.1 dB [1]. Conforme [17] [31], a estimativa de AOA alcança uma precisão melhor do que a de 1° para o modelo de antena considerado nesta dissertação. Neste caso ($\epsilon = 1$, $\tau = 0.1$), calculou-se a probabilidade de falha na predição da origem do sinal (P_f), obtendo o valor de aproximadamente $4,4 \cdot 10^{-3}$. É importante mencionar

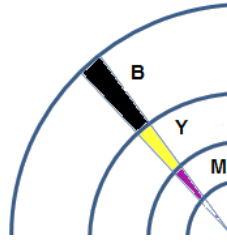


Figura 3.3: Área de coroa circular (colorida) onde a existência de dois nós pode causar erro de predição na origem do sinal.

que no cálculo apresentado de P_f , foi considerado que G é um grafo regular de grau $\Delta(G)$ o que tende a aumentar suavemente P_f . Portanto, o valor de P_f é ainda menor do que $4,4 \cdot 10^{-3}$, que já representava uma probabilidade praticamente desprezível. Essas considerações encerram a apresentação e a análise probabilística relacionadas ao DPTCR. A próxima seção apresenta tanto resultados teóricos quanto resultados empíricos com relação ao DPTCR.

3.2 Análise de Resultados

Esta seção avalia o desempenho da técnica proposta, comparando-a com o padrão IEEE 802.11b em sua versão direcional com a técnica de DVCS [48]. Utilizou-se tal protocolo como base de comparação, uma vez que este preconiza a reserva de canal com a utilização de quadros RTS/CTS direcionais. A referida avaliação de desempenho da técnica proposta, ocorreu de duas formas distintas:

- **Teórica:** A avaliação teórica consiste em calcular o valor máximo previsto de vazão da técnica proposta e compará-lo com o valor máximo de vazão prevista para o padrão IEEE 802.11b.
- **Empírica:** A avaliação experimental se deu por simular o funcionamento da técnica proposta e do DVCS em alguns cenários (Figura 3.4), de modo a verificar a vazão obtida, bem como a variação do atraso e o atraso fim a fim. Compara-se os valores

Tabela 3.2: Parâmetros usados para computar P_f .

Parâmetro	Transmissor	Receptor	Meio
pow	15 dBm	N/A	N/A
g	0 dB	0 dB	N/A
lo	1,4691 dB	1,4691 dB	N/A
h	1,5 m	1,5 m	N/A
R_{min}	-94 dBm	-94 dBm	N/A
R_{max}	0 dBm	0 dBm	N/A
sh_{med}	N/A	N/A	4 dB
w	N/A	N/A	0,125

obtidos com os valores da análise teórica, validando assim a técnica proposta e seus ganhos quando contraposta com o esquema de RTS/CTS.

3.2.1 Avaliação Teórica

Essa seção apresenta a avaliação teórica do DPTCR e contrapõe a sua vazão máxima com aquela obtida pelo padrão IEEE 802.11b. Para realizar tal avaliação baseou-se na análise descrita em [25] acerca do padrão IEEE 802.11b. A análise em questão consiste basicamente em estimar a vazão (TMT) máxima dado o tempo de transmissão médio (T_{tot}). Para o padrão IEEE 802.11b [25], considerando a notação descrita na Tabela 3.1, o tempo de transmissão médio (T_{tot}) pode ser definido da seguinte forma:

$$T_{tot} = T_{RTS} + T_{CTS} + T_{DATA} + T_{ACK} + T_{DIFS} + 3 \cdot T_{SIFS} + T_{Bo}, \quad (3.16)$$

onde

$$\begin{aligned} T_{RTS} &= 192 + \frac{20 \cdot 8}{R_c}, \\ T_{CTS} &= 192 + \frac{14 \cdot 8}{R_c}, \\ T_{DATA} &= 192 + \frac{(P_{sz} + 62) \cdot 8}{R_c}, \\ T_{ACK} &= 192 + \frac{14 \cdot 8}{R_c}, \text{ e} \\ T_{Bo} &= \frac{CW_{min}}{2} * T_{slot}. \end{aligned}$$

É importante mencionar que se está considerando o envio dos cabeçalhos do IP (*Internet Protocol*, cabeçalho de 20 bytes) e do UDP (*User Datagram Protocol*, cabeçalho de 8 bytes) no T_{DATA} , uma vez que as simulações foram feitas utilizando CBR. Além disso, considerou-se que o tempo de propagação é desprezível e portanto não consta no cálculo da Equação 3.16. Então, pode-se calcular a vazão teórica (TMT) em Mbps através da seguinte forma:

$$TMT = \frac{8 * P_{sz}}{T_{tot}} \quad (3.17)$$

Calculou-se a vazão teórica do padrão IEEE 802.11b de acordo com a Equação 3.17. O resultado desses cálculos está disponível na Tabela 3.3, quando variou-se a taxa de transmissão do canal usando os valores de 1, 2 e 11 Mbps e variou-se o tamanho de pacote com os seguintes tamanhos: 128, 256, 512, 1024 e 1500 bytes. De maneira análoga, procedeu-se com a técnica proposta, entretanto o tempo de transmissão médio (T_{tot}) é definido agora da seguinte maneira:

$$T_{tot} = T_{Pulse} + T_{Tone} + T_{DATA} + T_{ACK} + T_{DIFS} + 3 \cdot T_{SIFS} + T_{Bo}, \quad (3.18)$$

onde

$$T_{Pulse} = T_{sync} + \lceil \log_2 P_{sz} \rceil = T_{Tone}.$$

Tabela 3.3: Tabela com o cálculo teórico de vazão do IEEE 802.11b.

P_{sz} (bytes)	R_c (Mbps)	T_{RTS} (μs)	T_{DIFS} (μs)	T_{SIFS} (μs)	T_{CTS} (μs)	T_{DATA} (μs)	T_{ACK} (μs)	T_{Bo} (μs)	T_{tot} (μs)	TMT (Mbps)
128	1	352	50	10	304	1712	304	310	3062	0,3344
256	1	352	50	10	304	2736	304	310	4086	0,5012
512	1	352	50	10	304	4784	304	310	6134	0,6678
1024	1	352	50	10	304	8880	304	310	10230	0,8008
1500	1	352	50	10	304	12688	304	310	14038	0,8548
128	2	272	50	10	248	952	248	310	2110	0,4853
256	2	272	50	10	248	1464	248	310	2622	0,7811
512	2	272	50	10	248	2488	248	310	3646	1,1234
1024	2	272	50	10	248	4536	248	310	5694	1,4387
1500	2	272	50	10	248	6440	248	310	7598	1,5793
128	11	206,54	50	10	202,18	330,18	202,18	310	1331,09	0,7693
256	11	206,54	50	10	202,18	423,27	202,18	310	1424,18	1,4380
512	11	206,54	50	10	202,18	609,45	202,18	310	1610,36	2,5435
1024	11	206,54	50	10	202,18	981,82	202,18	310	1982,73	4,1317
1500	11	206,54	50	10	202,18	1328	202,18	310	2328,9091	5,1526

Isto posto, calculou-se a vazão teórica da técnica proposta variando-se a taxa de transmissão do canal para os valores de 1, 2 e 11 Mbps e variando o tamanho de pacote com os seguintes tamanhos: 128, 256, 512, 1024 e 1500 bytes. Os valores calculados estão disponíveis na Tabela 3.4. Esta tabela também apresenta o ganho percentual de vazão da técnica proposta com relação ao IEEE 802.11b. Note que houve ganho em todos os casos testados, uma vez que para qualquer variação de parâmetros temos que:

$$T_{Pulse} + T_{Tone} < T_{RTS} + T_{CTS}. \quad (3.19)$$

Esse ganho da técnica proposta aumenta quando o pacote é pequeno e/ou a taxa de transmissão é maior, uma vez que nesse caso o tempo dispendido com RTS e CTS representa uma fração maior de T_{tot} . Conforme a Tabela 3.4, o ganho da técnica proposta chega a ser de até **40,6%** mostrando o potencial da técnica proposta. A seguir, será apresentada a avaliação empírica da técnica em questão.

3.2.2 Avaliação Empírica

A avaliação empírica da técnica proposta será apresentada nesta subseção. Tal avaliação se deu por realizar simulações nos cenários ilustrados nas Figura 3.4. Cada um destes cenários possui um objetivo que visa validar a relevância da técnica proposta, conforme será discutido quando da explicação destes cenários. No que diz respeito às métricas utilizadas para avaliar o DPTCR, considerou-se o uso das seguintes:

Vazão Total da Rede: É a soma das vazões individuais de todos os fluxos, ou seja, se a rede possui n fluxos, a vazão total da rede será o somatório desses n fluxos. Esta métrica é comumente utilizada em trabalhos correlatos, tais como [9] [13] [19] [48] [49].

Tabela 3.4: Tabela com o cálculo teórico de vazão da técnica proposta.

P_{sz} (bytes)	R_c (Mbps)	T_{Pulse} (μs)	T_{DIFS} (μs)	T_{SIFS} (μs)	T_{Tone} (μs)	T_{DATA} (μs)	T_{ACK} (μs)	T_{Bo} (μs)	T_{tot} (μs)	TMT (Mbps)	Ganho (%)
128	1	12	50	10	12	1712	304	310	2430	0,4214	26,0082
256	1	13	50	10	13	2736	304	310	3456	0,5926	18,2292
512	1	14	50	10	14	4784	304	310	5506	0,7439	11,4057
1024	1	15	50	10	15	8880	304	310	9604	0,8530	6,5181
1500	1	16	50	10	16	12688	304	310	13414	0,8946	4,6518
128	2	12	50	10	12	952	248	310	1614	0,6344	30,7311
256	2	13	50	10	13	1464	248	310	2128	0,9624	23,2142
512	2	14	50	10	14	2488	248	310	3154	1,2987	15,5992
1024	2	15	50	10	15	4536	248	310	5204	1,5741	9,4158
1500	2	16	50	10	16	6440	248	310	7110	1,6878	6,8636
128	11	12	50	10	12	330,18	202,18	310	946,36	1,0820	40,6532
256	11	13	50	10	13	423,27	202,18	310	1041,45	1,9665	36,7493
512	11	14	50	10	14	609,45	202,18	310	1229,64	3,311	30,9626
1024	11	15	50	10	15	981,82	202,18	310	1604	5,1072	23,6114
1500	11	16	50	10	16	1328	202,18	310	1952,18	6,1470	19,2978

Vazão Individual: A vazão individual de cada fluxo provê um diagnóstico mais particular de cada um dos fluxos o que permite uma melhor identificação de diversos comportamentos, como a ocorrência do problema de surdez de antenas [13].

Atraso: O atraso fim a fim é uma importante métrica que também é bastante utilizada em trabalhos relacionados, tais como [7] [46]. Esta métrica facilita ainda a identificação de alguns comportamentos da rede, como *starvation*.

Variação do Atraso: Esta métrica tem por objetivo medir a variação do atraso na chegada dos pacotes. Em alguns cenários tal informação é de vital importância, como por exemplo quando se trata de tráfego gerado para prover o funcionamento de VoIP (*Voice over IP*) [2] [54].

Para a realização da avaliação empírica, utilizou-se o simulador EXata [44] na sua versão 2.0. O EXata é a versão mais recente do simulador Qualnet com mais funcionalidades, englobando também aquelas do antigo simulador GloMoSim [44]. É importante mencionar que os 3 ambientes de simulação mencionados são frequentemente utilizados na literatura correlata. O EXata é um simulador orientado a eventos discretos que possibilita a obtenção dos valores relativos às métricas explicadas além de implementar diversos protocolos e funcionalidades de cada uma das camadas da pilha TCP/IP [44]. O IEEE 802.11b acoplado à técnica DVCS já está implementada na versão 2.0 do EXata. Então, implementou-se a técnica DPTCR no EXata de maneira que esta avaliação empírica pudesse ser executada. A avaliação apresentada contrapõe a técnica proposta (DPTCR) com o padrão IEEE 802.11b acoplado à técnica DVCS, analisando os valores obtidos para as métricas explicadas anteriormente. Assumiu-se o uso de antenas do tipo setorial (*switched beam*) com 8 setores de 45° cada, embora a técnica proposta funcione de maneira independente ao tipo de antena direcional utilizada. Variou-se a taxa de transmissão do canal usando os valores de 1, 2 e 11 Mbps e variou-se o tamanho de pacote com os

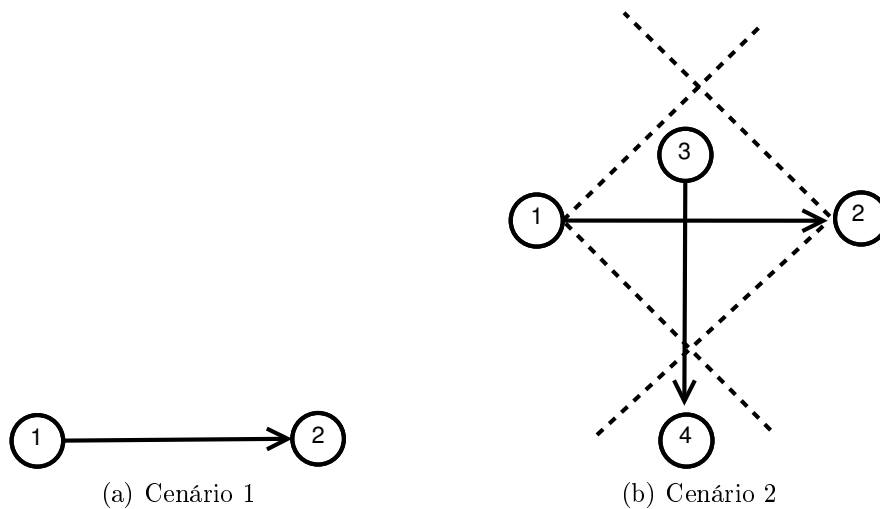


Figura 3.4: Cenários Avaliados.

seguintes tamanhos: 128, 256, 512, 1024 e 1500 *bytes*. Não assumiu-se mobilidade dos nós, assim como a maioria dos outros protocolos MAC direcionais, tais como [35] [49]. Os demais parâmetros relevantes de simulação do EXata [44] para esse cenário tem os valores descritos na Tabela 3.2. Todos os resultados apresentados neste capítulo são resultados da média de 20 simulações. A seguir, serão apresentados os cenários considerados, seus objetivos e resultados obtidos.

Cenário 1

Conforme ilustrado na Figura 3.4a, o cenário 1 é composto de apenas 2 nós. O cenário em questão possui apenas o seguinte fluxo de dados: $1 \rightarrow 2$. Tal fluxo simula uma situação que o nó 1 sempre possui dados para mandar ao nó 2. Para este fluxo, utilizou-se uma taxa de transmissão constante CBR (*constant bit rate*). O intervalo entre geração de pacotes utilizado foi de $1ms$. Deste modo, espera-se simular uma situação de canal saturado, fazendo com que o valor de vazão obtida para o fluxo $1 \rightarrow 2$ seja próximo ao valor teórico da vazão, calculados na Tabela 3.3. para o DVCS e na Tabela 3.4 para o DPTCR. Como o objetivo deste cenário é validar a análise teórica realizada bem como a implementação do DPTCR, não se discorrerá sobre os resultados relativos a atraso e variação do atraso obtidos neste cenário.

Com as variações de tamanho de pacote e capacidade de transmissão do canal, foram obtidos os gráficos apresentados nas Figuras 3.5, 3.6 e 3.7. Tais gráficos contrapõem os valores de vazão obtidos através de simulações quando se utiliza a técnica proposta e os valores obtidos quando se utiliza o esquema de quadros RTS e CTS para a reserva de canal.

Os valores simulados quando se utiliza sinais *pulse/ tone* ficaram bem próximos aos teóricos apresentados na Tabela 3.4. Situação análoga ocorreu quando se utilizou quadros RTS/CTS, uma vez que os valores obtidos foram bem semelhantes aos disponíveis na Tabela 3.3. Conforme é possível depreender da observação das Figuras 3.5, 3.6 e 3.7, sempre há ganho quando se utiliza a técnica proposta, uma vez que conforme já explicado vale o que está descrito na Equação 3.19. O ganho máximo que foi medido na simulações

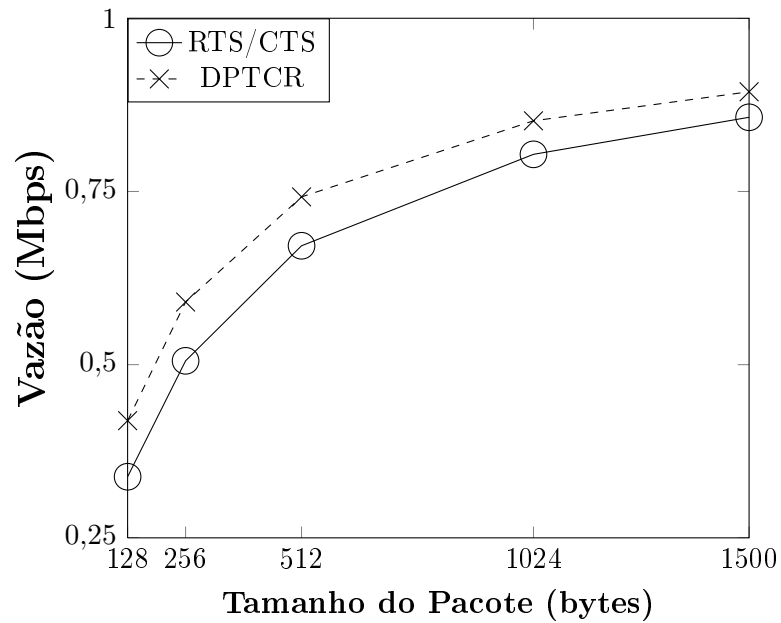


Figura 3.5: Comparação da vazão da técnica proposta com a obtida usando o IEEE 802.11b, sendo a capacidade do canal igual a 1Mbps.

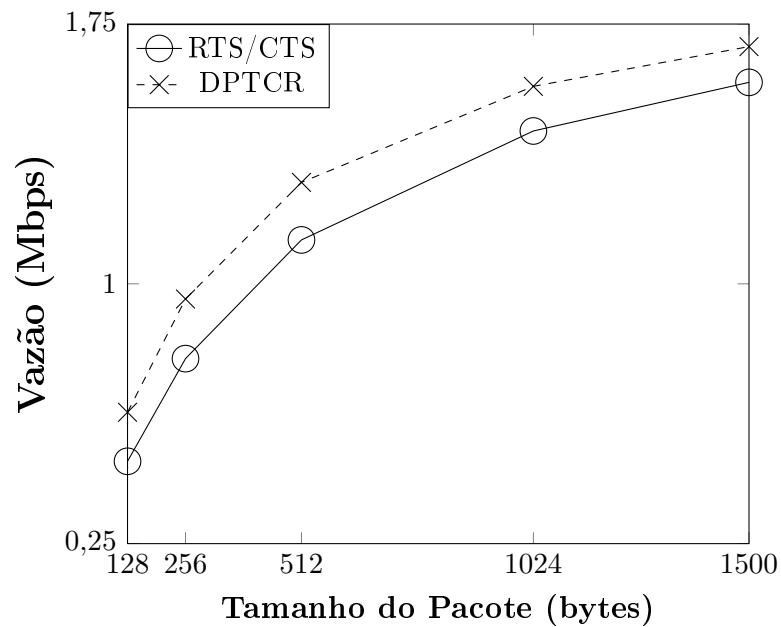


Figura 3.6: Comparação da vazão da técnica proposta com a obtida usando o IEEE 802.11b, sendo a capacidade do canal igual a 2Mbps.

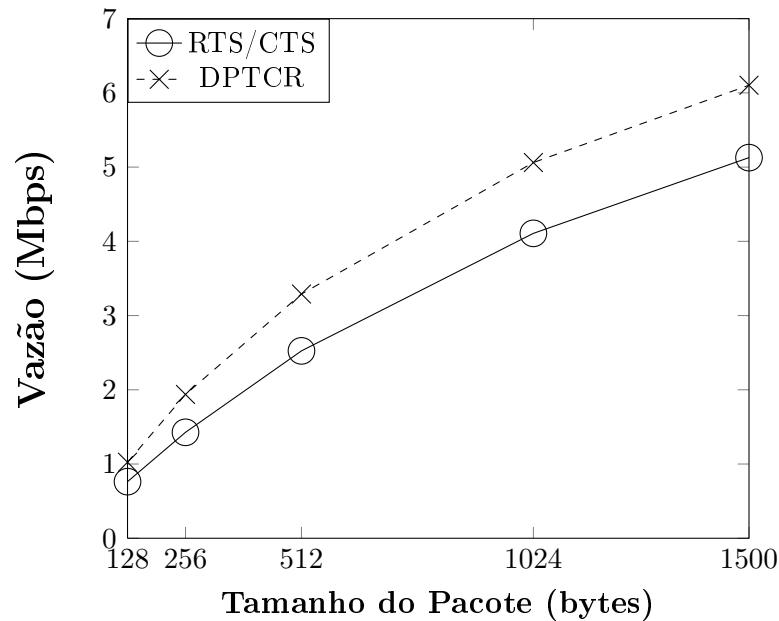


Figura 3.7: Comparação da vazão da técnica proposta com a obtida usando o IEEE 802.11b, sendo a capacidade do canal igual a 11Mbps.

em questão chegou a **35%** no que tange a vazão total da rede. Portanto, a análise teórica aliada à análise empírica valida a técnica proposta, comprovando assim sua relevância e potencial para as comunicações direcionais.

Cenário 2

Conforme pode ser observado na Figura 3.4b, o cenário 2 é composto de 4 nós em um formato que se assemelha ao de uma cruz. A Figura 3.4b ilustra ainda o feixe direcional dos nós 1 e 2, mostrando que o nó 3 escuta as mensagens trocadas entre os nós 1 e 2, enquanto o nó 4 não as escuta. O referido cenário possui os seguintes fluxos de dados: $1 \rightarrow 2$ e $3 \rightarrow 4$. O objetivo deste cenário é mostrar o correto funcionamento do mecanismo de predição de origem e sinal, pois o nó 3 escuta os quadros trocados entre 1 e 2 e percebe que nenhum destes é destinado a ele. Essa verificação é possível com base no mecanismo de predição de origem, destino e duração do sinal, explicado na Subseção 3.1.2. Portanto, a troca de quadros entre 1 e 2 não deveria prejudicar a operação do nó 3, que deveria ficar trocando quadros com o nó 4. Neste cenário para os dois fluxos existentes, utilizou-se uma taxa de transmissão constante CBR (*constant bit rate*). O intervalo entre geração de pacotes utilizado foi de $1ms$.

Com as variações de tamanho de pacote e capacidade de transmissão do canal (1, 2 e 11 Mbps), foram obtidos os gráficos apresentados nas Figuras 3.8, 3.9 e 3.10. Estes gráficos comparam os valores obtidos quando se usa o DPTCR ou o RTS/CTS em cada fluxo no que se refere a vazão, variação do atraso e atraso fim a fim.

O gráfico da Figura 3.8 apresenta a vazão individual dos fluxos obtida quando se considera um canal de 1 Mbps. Note que a vazão obtida quando se utiliza o DPTCR é maior do que quando se utiliza o RTS/CTS. Tal ganho chega a ser de até 20% para o fluxo $1 \rightarrow 2$ e de até 23% para o fluxo $3 \rightarrow 4$. É importante mencionar que a vazão dos

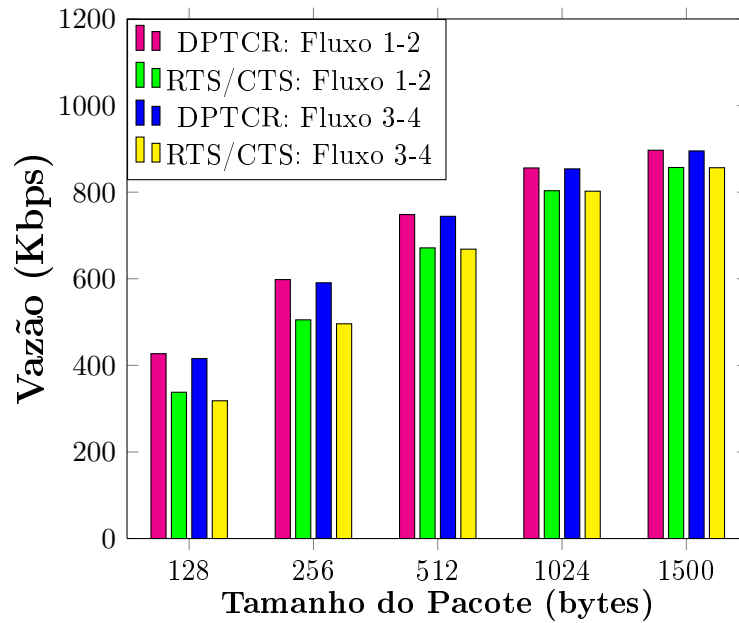


Figura 3.8: Comparação da vazão da técnica proposta com a obtida usando o IEEE 802.11b, para canal de 1Mbps.

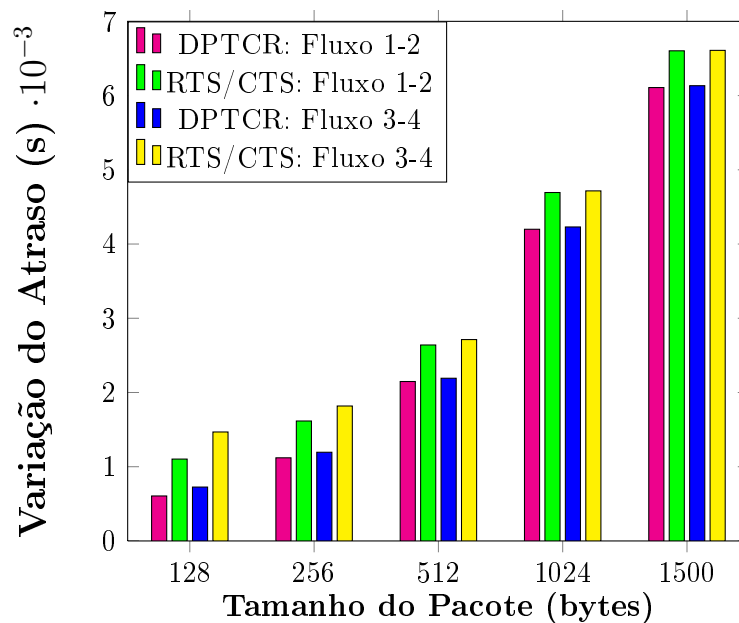


Figura 3.9: Comparação do variação do atraso da técnica proposta com a obtida usando o IEEE 802.11b, para canal de 2Mbps.

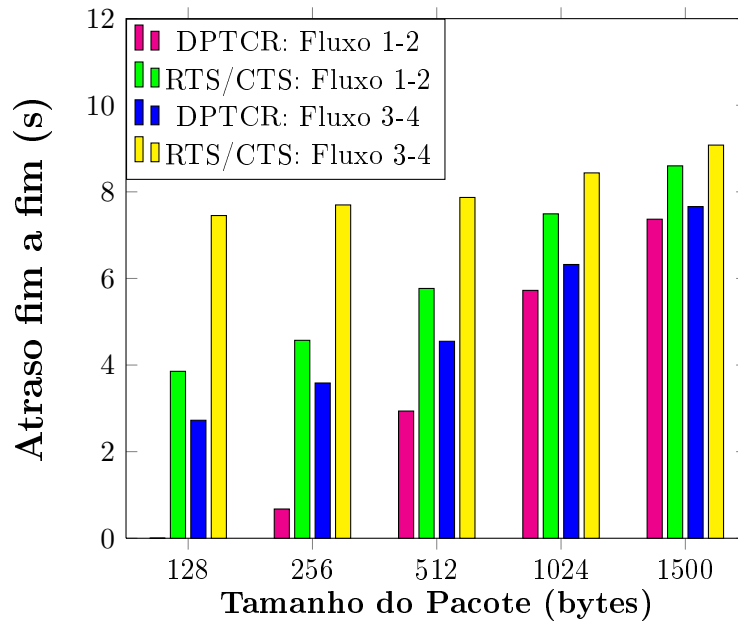


Figura 3.10: Comparação do atraso da técnica proposta com a obtida usando o IEEE 802.11b, para canal de 11Mbps.

fluxos $3 \rightarrow 4$ e $1 \rightarrow 2$ apresentaram valores muito próximos, uma vez que o intervalo entre geração de pacotes utilizado foi o mesmo para os dois fluxos.

Por sua vez, a Figura 3.9 mostra a variação do atraso dos fluxos para um canal de 2 Mbps. Da observação desta figura, pode-se afirmar que a variação do atraso obtido quando se utiliza o DPTCR é menor do que o obtido quando se usa o RTS/CTS. A redução na variação do atraso obtida chega a ser de até 45% para o fluxo $1 \rightarrow 2$ e de até 50% para o fluxo $3 \rightarrow 4$. Com relação aos fluxos $1 \rightarrow 2$ e $3 \rightarrow 4$, eles apresentaram valores bem próximos de variação do atraso.

Por fim, a Figura 3.10 apresenta o atraso fim a fim assumindo um canal de 11 Mbps. Neste caso, o valor obtido para pacote de tamanho 128 *bytes* quando se usa o DPTCR é praticamente desprezível para o fluxo $1 \rightarrow 2$. Neste cenário, o atraso obtido com o uso do RTS/CTS é até 576% maior do que quando se usa DPTCR para o fluxo $1 \rightarrow 2$ e até 173% maior para o fluxo $3 \rightarrow 4$. Nota-se ainda que o atraso do fluxo $1 \rightarrow 2$ é consideravelmente menor do que o do fluxo $3 \rightarrow 4$. O atraso do fluxo $1 \rightarrow 2$ chega a ser de até 93% maior do que o do fluxo $3 \rightarrow 4$ para o RTS/CTS quando se considera um pacote de 128 *bytes*. Com relação ao DPTCR, o atraso do fluxo $1 \rightarrow 2$ é até 470% maior do que o do fluxo $3 \rightarrow 4$ no caso do pacote ter tamanho igual a 256 *bytes*.

Tendo sido apresentados todos estes dados, pode-se verificar que o mecanismo de predição de origem e sinal funciona corretamente, uma vez que o nó 3 não envia um *tone* para 1 quando escuta um *pulse* que está sendo enviado de 1 para 2. Note que se o mecanismo de predição de origem e sinal não funcionasse corretamente, haveriam colisões em 1 e perdas na vazão do fluxo $1 \rightarrow 2$, o que não é o caso. Note inclusive que o fluxo $1 \rightarrow 2$ possui desempenho melhor ou igual ao fluxo $3 \rightarrow 4$ nas avaliações ilustradas nas Figuras 3.8, 3.9 e 3.10.

O fluxo $3 \rightarrow 4$ possui um atraso consideravelmente maior do que o fluxo $1 \rightarrow 2$ quando se considera um canal de 11 Mbps, pois tanto o DPTCR quanto o IEEE 802.11b acoplado

ao DVCS fazem um sensoriamento omnidirecional, não aproveitando completamente o potencial das antenas direcionais. Esta piora do desempenho do $3 \rightarrow 4$ em relação ao fluxo $1 \rightarrow 2$ se dá especialmente quando o tempo total de transmissão diminui, como pode ser observado nas Figuras 3.8, 3.9 e 3.10. Isto ocorre pois nesse caso há mais disputas pelo canal e mais pacotes são conseqüentemente transmitidos ao longo da simulação realizada, fazendo com que o comportamento explicado a seguir se repita mais vezes.

Conforme explicado na Subseção 2.2.1, as antenas direcionais são *half-duplex*, ou seja, não possuem a capacidade de enviar e receber quadros ao mesmo tempo. Quando a antena do nó 3 está escutando em modo omnidirecional, ela capta os quadros trocados entre 1 e 2, inclusive os de dados e ACK que em nada servem para atualização do DNAV do nó 3. Dessa forma, o nó 3 dispende tempo processando estes pacotes, postergando o envio de quadros para o nó 4, uma vez que as antenas direcionais destes nós são consideradas *half-duplex*. Neste cenário, note que caso o nó 3 esteja com seu DNAV marcando um setor como ocupado, não é necessário ficar escutando os pacotes de dados que venham a passar por este setor, uma vez que estes quadros são mais longos do que os de controle e não auxiliam na atualização do DNAV.

A luz do problema explicado que decorre do sensoriamento omnidirecional por parte dos nós, há uma proposta na literatura que preconiza justamente que o sensoriamento seja feito de modo direcional e apenas nas direções que estão marcadas como livre pelo DNAV. Tal proposta é denominada ACS (*Adaptive Carrier Sensing*) [6] e preconiza também um diferente esquema de escalonamento de pacotes (APS – *Adaptive Packet Sending*), conforme brevemente explicado no Capítulo 2.

Com base no exposto, esta dissertação de mestrado propõe então uma integração entre DPTCR e APS/ACS como uma alternativa para melhor explorar em comunicações direcionais, tanto no que tange a reserva de canal como no que concerne a sensoriamento. Nas seções seguintes, a referida integração será explicada e avaliada.

3.3 Integração entre DPTCR e APS/ACS

Esta seção apresenta uma proposta de integração entre a técnica de reserva de canal proposta nesta dissertação (DPTCR) e as técnicas APS/ACS que visam melhorar o desempenho de comunicações direcionais por aproveitar determinadas características do DNAV que possibilitam o aumento do número de comunicações direcionais simultâneas [6]. As técnicas APS e ACS serão explicadas a seguir.

3.3.1 Comportamento da Técnica ACS

O ACS (*Adaptive Carrier Sensing*) é uma técnica de sensoriamento adaptativa que visa melhorar o desempenho decorrente do uso de comunicações direcionais [6]. Tal técnica se baseia na seguinte regra:

- O sensoriamento do meio é feito apenas nas direções marcadas como livre pelo DNAV.

Embora a implementação da técnica ACS envolva alguma interação entre as camadas MAC e física quando se considera o modelo TCP/IP, há diversas maneiras de se imple-

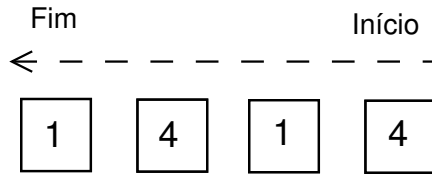


Figura 3.11: Fila de pacotes do nó 3.

mentar tal técnica [6]. Alguns tipos de antena inclusive possuem mecanismos que facilitam o sensoriamento direcional necessário para a implementação da técnica ACS [6] [40].

Para exemplificar a motivação para o uso de ACS, considere uma topologia de rede como a que está ilustrada na Figura 3.4b. Tal topologia possui 4 nós equipados com antenas direcionais, e será considerada a existência dos seguintes fluxos: $1 \rightarrow 2$ e $3 \rightarrow 4$. Na topologia em questão, o fluxo $1 \rightarrow 2$ consegue ser iniciado sem problemas. Porém, como o nó 3 faz o seu sensoriamento omnidirecional, ele acaba por escutar os quadros de dados e ACK trocados entre 1 e 2, atrasando o início de sua comunicação com o nó 4. Neste contexto que se propõe a integração com a técnica ACS, uma vez que tal técnica preconiza que os setores marcados pelo DNAV como ocupados não sejam sensoreados. Usando a técnica ACS, este atraso do fluxo $3 \rightarrow 4$ decorrente de sensoriamento não aconteceria. Com isso, quando do uso da técnica ACS, os fluxos $1 \rightarrow 2$ e $3 \rightarrow 4$ poderiam ocorrer simultaneamente, melhorando assim a vazão da rede.

3.3.2 Comportamento da Técnica APS

O APS (*Adaptive Packet Sending*) é uma técnica de escalonamento adaptativo de pacotes. Esta técnica tem por objetivo melhor aproveitar-se de algumas características das comunicações direcionais, em especial no que se refere ao DNAV [6]. A técnica APS pode ter seu funcionamento sintetizado em uma regra, apresentada a seguir:

- Ao se detectar que a direção do próximo pacote a ser enviado está marcada como ocupado pelo DNAV, deve-se realizar um reescalonamento de pacotes de maneira a verificar se há algum pacote a ser enviado com uma direção marcada como livre pelo DNAV.

Há algumas maneiras de se implementar esta técnica. Uma delas preconiza a interação da camada MAC com as camadas de rede e transporte para que o reescalonamento seja realizado [6]. Outra solução é a utilização de múltiplas filas de pacotes, uma em cada setor, de uma maneira semelhante a usada pelo padrão IEEE 802.11e [6]. Este padrão foi explicado na Subseção 2.1.4.

Segue um exemplo do funcionamento da técnica APS. Para este exemplo, considere novamente a topologia disponível na Figura 3.4b. Serão considerados como existentes os seguintes fluxos de dados relativos aos nós desta topologia: $1 \rightarrow 2$, $3 \rightarrow 4$ e $3 \rightarrow 1$. Será considerado ainda o uso da técnica ACS nos 4 nós desta topologia. O fluxo $1 \rightarrow 2$ consegue iniciar normalmente. Por sua vez, há mais de um fluxo que possui o nó 3 como origem. Esta situação faz com que a fila de pacotes de 3 possua estes fluxos de modo intercalado, conforme ilustrado na Figura 3.11. Quando o primeiro pacote da fila do nó 3 for destinado a 4, ele é atendido sem problemas, uma vez que com o uso de ACS os fluxos $1 \rightarrow 2$ e $3 \rightarrow 4$

podem ocorrer simultaneamente sem colisões. Entretanto, quando o primeiro pacote da fila do nó 3 for destinado a 1, há de se esperar o término da comunicação entre 1 e 2, uma vez que o DNAV do nó 3 marca a direção do nó 1 como ocupada. Isso ocorre para que se evite colisões em 1. O problema é que esta espera acabar por aumentar também o atraso do fluxo $3 \rightarrow 4$, embora o meio estivesse livre para que ocorresse a comunicação entre 3 e 4. Neste contexto, a técnica APS preconiza que em tal situação se faça um reescalamento de pacotes de modo que se tente enviar então o próximo pacote da fila, o que vai aumentar a vazão do fluxo $3 \rightarrow 4$, sem prejudicar o fluxo $3 \rightarrow 1$. Com o objetivo de mostrar esse referido ganho de vazão da rede, será apresentada uma análise empírica da integração realizada entre DPTCR e APS/ACS.

3.4 Análise da Integração entre DPTCR e APS/ACS

Esta seção apresenta uma análise empírica da integração entre DPTCR e APS/ACS. Esta análise foi realizada via simulações com o auxílio do simulador EXata. A análise em questão consiste em simular o cenário ilustrado na Figura 3.4b e obter os valores relativos a vazão, variação do atraso e atraso fim a fim dos fluxos. Para isso, foi necessário implementar as técnicas APS/ACS no EXata de maneira a realizar as simulações com as seguintes combinações de técnicas:

1. DPTCR: Contempla a técnica de reserva de canal proposta, no entanto sem usar APS nem ACS.
2. DVCS: IEEE 802.11b acoplado a técnica DVCS sem a utilização das técnicas APS e ACS.
3. DPTCR + APS/ACS: Contempla a integração proposta nesta dissertação de mestrado entre as técnicas DPTCR, APS e ACS.
4. DVCS + APS/ACS: IEEE 802.11b junto a técnica DVCS com a utilização das técnicas APS e ACS.

Conforme mencionado, o cenário usado para realizar esta análise empírica é aquele ilustrado na Figura 3.4b que possui 4 nós, cada um equipado com uma antena direcional do tipo *switched beam* com 8 setores de 45° cada. Considerou-se um canal de 1 Mbps, além da existência dos seguintes fluxos CBR:

- Fluxo $1 \rightarrow 2$: Este fluxo foi considerado como tendo pacotes de tamanho igual a 1024 *bytes* e o intervalo de geração de pacotes foi considerado como sendo igual a 0,5ms.
- Fluxo $3 \rightarrow 4$: Fluxo de tamanho de pacote igual a 256 *bytes* e o intervalo de geração de pacotes foi considerado como sendo igual a 1ms.
- Fluxo $3 \rightarrow 1$: O tamanho do pacote foi considerado igual a 256 *bytes* e o intervalo de geração de pacotes foi considerado como sendo igual a 1ms.

Tabela 3.5: Comparação da vazão obtida quando se combina diversas técnicas, para um canal de 1 Mbps.

Técnica	Fluxo 3 → 1 (Kbps)	Fluxo 1 → 2 (Kbps)	Fluxo 3 → 4 (Kbps)	Total (Kbps)
DPTCR	52,34	789,90	52,33	894,57
DVCS	49,29	733,13	49,29	831,71
DPTCR + APS/ACS	57,74	781,82	135,41	974,97
DVCS + APS/ACS	53,00	727,16	125,93	906,09

Os demais parâmetros de simulação relevantes do EXata utilizados para este cenário estão disponíveis na Tabela 3.2. Os resultados apresentados a seguir são fruto da média da execução de 20 simulações. Os resultados obtidos estão disponíveis nas Tabelas 3.5, 3.6 e 3.7. A Tabela 3.5 contrapõe a vazão individual de cada um dos fluxos, quando se varia a combinação das técnicas utilizadas. Da observação da Tabela 3.5, nota-se que a integração entre DPTCR e APS/ACS produz relevantes ganhos. Isto ocorre, pois a utilização do DPTCR sempre impõe ganhos quando comparada ao DVCS como fica evidente no fluxo 1 → 2. Além disso, a utilização de APS/ACS se mostra capaz de mitigar as perdas decorrentes do sensoriamento omnidirecional, bem como aquelas que decorrem do fato do nó 3 esperar o tempo de DNAV, mesmo possuindo pacotes para o nó 4, o que pode ser observado pelo aumento da vazão do fluxo 3 → 4. Quando se utilizou a integração entre DPTCR e APS/ACS, o fluxo 3 → 4 teve uma vazão 174%, 158% e 7% maior do que quando se usou as combinações DVCS, DPTCR e DVCS + APS/ACS, respectivamente. A perda de vazão no fluxo 1 → 2 foi de apenas 1%. Entretanto, nota-se que esta perda foi só relativa ao DPTCR, mostrando que a integração mesmo nesse fluxo foi capaz de prover uma melhor vazão do que às combinações que usam DVCS. Essa perda ocorreu devido ao aumento da vazão do fluxo 3 → 1 em 17,1%, 10,3% e 8,9%, em comparação com as combinações DVCS, DPTCR e DVCS + APS/ACS, respectivamente. Como os fluxos 3 → 1 e 1 → 2 não podem ocorrer simultaneamente, suas vazões serão sempre inversamente proporcionais. O uso da integração aumentou a vazão do fluxo 3 → 1, devido a atender mais pacotes do nó 3 com destino igual a 4 durante a ocorrência do fluxo 1 → 2. Dessa forma, quando os nós 1 e 2 forem tentar reservar o canal, na média aumentará a quantidade de vezes em que o nó 1 será o primeiro da fila do nó 3, devido ao uso da integração com APS/ACS atender mais pacotes do nó 3 com destino igual a 4 durante a ocorrência do fluxo 1 → 2. Note ainda que a integração proposta entre DPTCR e APS/ACS obteve o maior valor de vazão total da rede dentre as combinações avaliadas, conforme exposto na Tabela 3.5. A vazão total da rede da integração proposta foi 17,2%, 8,9% e 7,6% maior do que quando se usou as combinações DVCS, DPTCR e DVCS + APS/ACS, respectivamente.

A Tabela 3.6 mostra o valor da variação do atraso quando não se usa o APS/ACS, enquanto a Tabela 3.7 apresenta o valor da variação do atraso quando se usa o APS/ACS, bem como a redução obtida no que se refere à variação de atraso quando da utilização

Tabela 3.6: Variação de atraso do Fluxo 3 → 4 sem o uso de APS/ACS.

Técnica	Variação de atraso do Fluxo 3 → 4 (s)
DPTCR	$3,7914 \cdot 10^{-2}$
DVCS	$4,0380 \cdot 10^{-2}$

Tabela 3.7: Variação de atraso do Fluxo 3 → 4 com o uso de APS/ACS.

Técnica	Variação de atraso do Fluxo 3 → 4 (s)	Redução da variação de atraso (%)
APS/ACS + DPTCR	$1,4127 \cdot 10^{-2}$	62,7394
APS/ACS + DVCS	$1,5272 \cdot 10^{-2}$	62,1793

de APS/ACS. Note que essa redução de variação de atraso do fluxo 3 → 4 é de mais de 62%. A integração entre DPTCR e APS/ACS obteve ainda uma redução de variação de atraso de cerca de 7,5% quando comparada à combinação DVCS + APS/ACS. Os resultados de variação de atraso dos outros fluxos, bem como os de atraso fim a fim não apresentaram variações significativas que mereçam destaque e por isso foram omitidos. Pelos resultados acima expostos, espera-se ter validado o relevante potencial da integração entre as técnicas DPTCR e APS/ACS nas comunicações direcionais.

3.5 Discussão

Neste capítulo, foram apresentadas algumas das propostas desta dissertação de mestrado para a melhoria do desempenho de redes que utilizam comunicações direcionais. Em especial, foi apresentada a técnica de reserva de canal proposta, denominada DPTCR. Tal técnica utiliza sinais *pulse* e *tone*, ao invés de quadros RTS e CTS. Conforme a análise teórica apresentada, o DPTCR provê ganhos na vazão de até 40% quando comparado com o esquema de reserva de canal baseado nos quadros RTS e CTS. Em seguida, foram apresentadas simulações realizadas com o auxílio do simulador EXata para validar a análise teórica, bem como a relevância da técnica proposta. A análise empírica mostrou um caso onde o sensoriamento omnidirecional prejudica o desempenho da rede. Por isso, foi feito um estudo de como integrar o DPTCR com as técnicas APS/ACS que fazem uso de sensoriamento direcional do meio com base no DNAV. A integração proposta foi avaliada e obteve significativos ganhos de vazão e redução de variação de atraso, em especial em cenários como o da Figura 3.4b. A integração em questão que foi exposta neste capítulo encerra as propostas de melhorias do desempenho das comunicações direcionais voltadas ao aumento de vazão que serão apresentadas nesta dissertação. No entanto, ainda vai se apresentar uma proposta de atenuação do problema de surdez que visa melhorar o desempenho de redes que usam comunicações direcionais no que se refere ao aspecto de justiça na distribuição dos fluxos. Esta proposta, bem como sua avaliação serão apresentadas no capítulo que se segue.

Capítulo 4

Proposta de Atenuação de Surdez de Antenas em Comunicações Direcionais

Este capítulo apresenta uma nova técnica de atenuação do problema de surdez de antenas em comunicações direcionais que visa prover uma melhor justiça na distribuição dos recursos da rede entre os fluxos. Denominada de DPTCR-DA (*Directional Pulse/Tone Based Channel Reservation with Deafness Avoidance*), tal técnica faz uso de sinais *pulse* e *tone*, bem como de comunicações iniciadas pelo receptor. O DPTCR-DA é apresentado na Seção 4.1. A Seção 4.2 apresenta uma avaliação do DPTCR-DA. Finalmente, a Seção 4.3 destaca as questões mais importantes abordadas neste capítulo.

4.1 DPTCR-DA: Atenuação da 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 predizer a ocorrência do problema de surdez e posteriormente tratá-lo utilizando transmissões iniciadas pelo receptor com auxílio de um sinal *tone-ri*. É importante mencionar que assim como ocorre com os sinais *pulse/tone*, o sinal *tone-ri* se constitui de uma senóide, podendo ser diferenciado dos demais sinais por amplitude, frequência ou fase, como descrito em [52].

O DPTCR-DA baseia-se em informações locais de um nó sobre os fluxos incidentes a este para predizer a ocorrência de surdez, tal como ocorre com a técnica DVCS-DA, descrita por [13]. A seguir, serão explicados o mecanismo de detecção da ocorrência de surdez, bem como o comportamento da técnica DPTCR-DA.

4.1.1 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, se $E_i > T_i$. Caso mais de um fluxo esteja sofrendo do problema de surdez, o fluxo com maior tempo de espera (E_i) será o escolhido. Para auxiliar a escolha do fluxo que sofre do problema de surdez, utiliza-se a estrutura de tabela de predição de fluxos que será explicada a seguir.

A tabela de predição de fluxos está presente em cada nó, armazenando informações acerca dos fluxos incidentes a esse nó. Vale ressaltar que se utiliza uma política de *cache* das entradas da tabela similar à utilizada pelo DVCS no que diz respeito ao ângulo de chegada [48]. Cada fluxo presente na tabela possui as seguintes informações:

- Identificador único para o fluxo: Este identificador nada mais é do que o identificador do nó remetente do fluxo;
- Tamanho predito dos pacotes: Representa o tamanho do pacote de dados que um quadro provavelmente irá carregar, já descontado o tamanho dos cabeçalhos;
- Instante de recepção do último quadro de dados: Momento em que o último quadro de dados foi corretamente recebido;
- Limiar de predição de surdez: Representa o tempo máximo de espera de recepção de um quadro do fluxo.

O tamanho predito dos pacotes é utilizado para determinar a duração do *tone-ri* enviado quando uma transmissão iniciada pelo receptor é realizada. A referida duração é importante para a atualização do DNAV de maneira correta. A Tabela 4.1 apresenta um exemplo da tabela de predição de fluxos de um nó que possui dois fluxos A e B incidentes a ele.

Tabela 4.1: Exemplo de tabela de predição de fluxos de um nó.

Identificador único do fluxo	A	B
Tamanho predito dos pacotes	L_A	L_B
Instante de recepção do último quadro	I_A	I_B
Limiar de predição de surdez	T_A	T_B

O limiar de surdez presente na tabela de predição de fluxos é uma função que depende do valor esperado do intervalo entre pacotes (I_{esp}^i). Seja α um fator de correção, o limiar de surdez é definido como:

$$T_i = \alpha * I_{esp}^i \quad (4.1)$$

É importante mencionar que há a necessidade de um melhor estudo relacionado à parametrização de α de modo a atender às variações do estado dos nós e enlaces de uma rede sem fio. Para cada fluxo i , o valor esperado do intervalo entre pacotes (I_{esp}^i) pode

ser estimado com base nas informações da tabela de fluxos ativos do nó ou de outras maneiras, conforme descrito a seguir.

Alguns protocolos de roteamento para redes *ad hoc*, como DSR (*Dynamic Source Routing*) [24], AODV (*Ad hoc On-demand Distance Vector*) [42] e TORA (*Temporally Ordered Routing Algorithm*) [41] possuem mecanismos relativos à descoberta e estabelecimento de rotas para fluxos entre dois nós [38]. Em geral, estes mecanismos são baseados em pacotes de controle transmitidos em comunicações do tipo *broadcast* realizadas no início da operação da rede [38]. Uma possível modificação consiste em incluir a taxa de geração de pacotes do fluxo em questão em seus pacotes de controle, de maneira que o protocolo MAC utilize essas informações para atualizar sua tabela de predição de fluxos. Dessa forma, $\forall i > 0$, I_{esp}^i pode ser obtido com informações da camada de roteamento, caracterizando uma solução “*cross layer*”. Uma outra possível maneira de estimar o intervalo entre pacotes é fazer com que todo nó calcule o tempo médio entre pacotes recebidos, para cada um de seus fluxos. Então, pode-se estimar o tempo entre pacotes com base no tempo calculado. Por fim, é possível ainda a utilização de uma abordagem híbrida entre informações da camada de roteamento e cálculo do tempo médio entre pacotes [13]. Note que as demais informações da tabela de predição dos fluxos podem ser atualizadas de modo análogo ao explicado para o limiar de predição de surdez.

4.1.2 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 na Seção 3.1. Logo, 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, como mostrado pela Equação 3.19 que consta na Subseção 3.2.1. 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 na Subseção 3.1.2. No mais, o modo padrão de operação se assemelha ao DVCS, com as exceções explicadas a seguir. Da mesma forma descrita por [13], 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. No caso de receber um *pulse*, ocorre o início de comunicação em 4 vias (*Pulse-Tone-DATA-ACK*), conforme ilustrado na Figura 4.1b. Caso um sinal *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. Essa verificação é possível com base no mecanismo de predição de origem, destino e duração

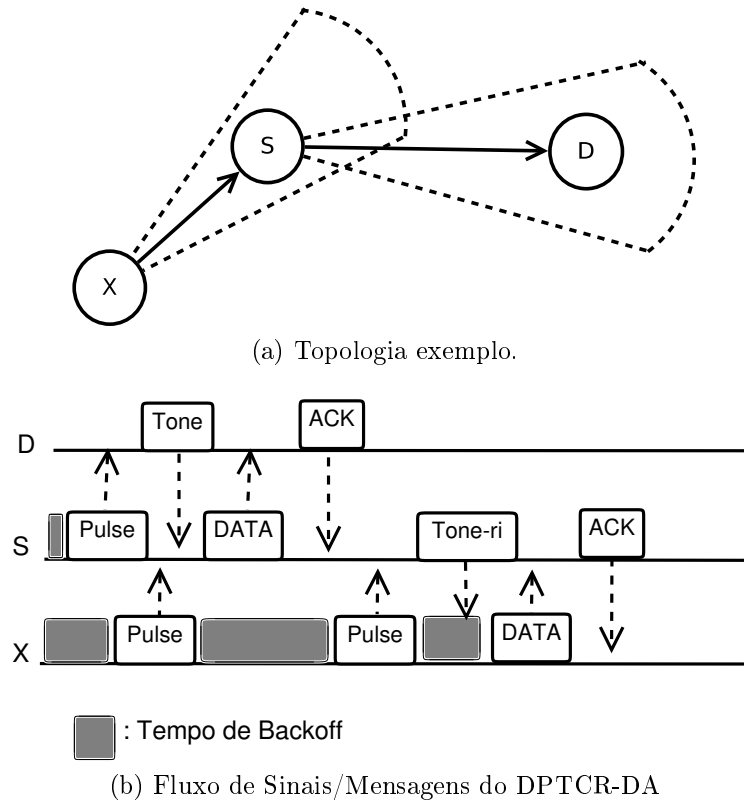


Figura 4.1: Funcionamento do DPTCR-DA, adaptado de [13] e [19].

do sinal, explicado na Subseção 3.1.2. Nesse caso, o pacote é enviado e espera-se por um quadro de confirmação ACK.

O **modo de tratamento de surdez** é ativado somente quando o procedimento de detecção de surdez indicar que um nó vizinho está sofrendo do problema de surdez. Seu comportamento consiste em enviar um *tone-ri* para o nó que está sofrendo do problema de surdez, como ilustrado na Figura 4.1b. Nesta situação, o processo de início de comunicação ocorre em três vias (*Tone-ri*-*DATA*-*ACK*). A seguir, serão descritos alguns importantes detalhes do modo de tratamento de surdez. O sinal *tone-ri* 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-ri* ($Y_{tone-ri}$) enviada nesse caso é tal que: $Y_{tone-ri} = Y_{sync} + \lceil \log_2 P_{sz} \rceil$, 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-ri* é necessária para o correto funcionamento do mecanismo de predição da origem e duração do sinal. Tal mecanismo possibilita que o DNAV seja atualizado corretamente no DPTCR-DA. Vale ressaltar que o tempo de sincronização de $5\mu s$ é suficiente para um sinal *tone-ri* [45]. É importante ainda mencionar que não ocorre retransmissão de *tone-ri* quando se está no modo tratamento de surdez.

Um exemplo que ilustra o funcionamento dos dois modos de operação do DPTCR-DA está disponível na Figura 4.1. 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 tenta realizar uma comunicação iniciada pelo transmissor (**modo padrão**) enviando um *pulse* para D . O nó D verifica que aquele *pulse* é para ele (por meio do mecanismo de predição de origem, destino e duração do sinal, descrito na Subseção 3.1.2) e responde com um *tone*, fazendo com que S envie o pacotes de dados para D que por sua vez confirma o recebimento de tal pacote por meio do quadro 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-ri* para X , de maneira a começar uma comunicação iniciada pelo receptor. Logo ao receber o sinal *tone-ri*, o nó X verifica que aquele *tone-ri* é para ele, cancelando o seu tempo de *backoff* e enviando a S um quadro de dados. Assim, a comunicação entre X e S continua normalmente. É importante mencionar que periodicamente se atualiza a tabela de fluxos, de maneira a evitar que ocorra uma situação em que S fique enviando *tone-ri* para X , enquanto X não possui mais dados para enviar a S . Note que por meio das comunicações iniciadas pelo receptor é possível estabelecer uma maior justiça na vazão dos fluxos, conforme será melhor explicado na Seção 4.2. Concluída a apresentação do DPTCR-DA, serão apresentados resultados que validam sua relevância.

4.2 Análise de Resultados

Esta seção avalia o desempenho da técnica de atenuação de surdez proposta (DPTCR-DA), comparando-a com o padrão IEEE 802.11b em sua versão direcional acoplado à técnica de DVCS [48], bem como comparando com o RI-DMAC que também tem por objetivo atenuar o problema de surdez.

A referida avaliação de desempenho da técnica proposta, ocorreu de duas formas distintas:

- **Teórica:** A avaliação teórica consiste em calcular o tempo gasto quando da reserva de canal realizada por comunicações iniciadas pelo receptor. Com isso, se consegue calcular a vazão das comunicações iniciadas pelo receptor. Em seguida, compara-se os valores obtidos para o DPTCR-DA e para o RI-DMAC.
- **Empírica:** A avaliação experimental se deu por simular o funcionamento do DPTCR-DA, do DVCS e do RI-DMAC. Esta avaliação é feita em um cenário onde ocorre surdez, de maneira a verificar o índice de justiça obtido, bem como a vazão, a variação de atraso e o atraso fim a fim. Compara-se os valores da técnica proposta com os obtidos pelo DVCS e o RI-DMAC, validando o DPTCR-DA e seu impacto nas comunicações direcionais. É importante mencionar que o índice de justiça utilizado foi o índice de Jain [23]. 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.

Tabela 4.2: Cálculo teórico de vazão do RI-DMAC para comunicações iniciadas pelo receptor.

P_{sz} (bytes)	R_c (Mbps)	T_{RTR} (μs)	T_{DIFS} (μs)	T_{SIFS} (μs)	T_{DATA} (μs)	T_{ACK} (μs)	T_{tot} (μs)	TMT_{ri} (Mbps)
128	1	352	50	10	1712	304	2438	0,4200
256	1	352	50	10	2736	304	3462	0,5916
512	1	352	50	10	4784	304	5510	0,7434
1024	1	352	50	10	8880	304	9606	0,8528
1500	1	352	50	10	12688	304	13414	0,8946
128	2	272	50	10	952	248	1542	0,6641
256	2	272	50	10	1464	248	2054	0,9971
512	2	272	50	10	2488	248	3078	1,3307
1024	2	272	50	10	4536	248	5126	1,5981
1500	2	272	50	10	6440	248	7030	1,7069
128	11	206,54	50	10	330,18	202,18	808,91	1,2659
256	11	206,54	50	10	423,27	202,18	902	2,2705
512	11	206,54	50	10	609,45	202,18	1088,18	3,7641
1024	11	206,54	50	10	981,82	202,18	1460,55	5,6089
1500	11	206,54	50	10	1328	202,18	1806,73	6,6418

4.2.1 Avaliação Teórica

Essa seção apresenta a avaliação teórica do DPTCR-DA no tocante a comunicações iniciadas pelo receptor. Quanto às comunicações iniciadas pelo transmissor, o DPTCR-DA quando comparado ao DVCS e ao RI-DMAC provê os mesmos ganhos que o DPTCR provê em relação ao DVCS. Conforme explicado na Subseção 3.2.1, tais ganhos chegam a ser de até 40% no que concerne à vazão. Como o modo de tratamento de surdez do DPTCR-DA tem algumas características semelhantes ao padrão IEEE 802.11b, novamente utilizou-se a análise descrita em [25] como base. A análise apresentada a seguir consiste basicamente em estimar a vazão (TMT_{ri}) máxima obtida para as comunicações iniciadas pelo receptor. Para o RI-DMAC, considerando a notação descrita na Tabela 3.1, o tempo de transmissão (T_{tot}) para uma comunicação iniciada pelo receptor pode ser definido da seguinte forma:

$$T_{tot} = T_{DIFS} + T_{RTR} + 2 \cdot T_{SIFS} + T_{DATA} + T_{ACK}, \quad (4.2)$$

onde

$$T_{RTR} = 192 + \frac{20 \cdot 8}{R_c}.$$

T_{DATA} e T_{ACK} são definidos da mesma forma que ocorre na Subseção 3.2.1. Novamente, o tempo de propagação foi considerado desprezível. Note que o tempo de *backoff* não é incluído na conta, uma vez que o nó cancela o seu tempo de *backoff* ao escutar

Tabela 4.3: Cálculo teórico de vazão do DPTCR-DA para comunicações iniciadas pelo receptor.

P_{sz} (bytes)	R_c (Mbps)	$T_{Tone-ri}$ (μs)	T_{DIFS} (μs)	T_{SIFS} (μs)	T_{DATA} (μs)	T_{ACK} (μs)	T_{tot} (μs)	TMT_{ri} (Mbps)	Ganho (%)
128	1	12	50	10	1712	304	2098	0,4880	16,2059
256	1	13	50	10	2736	304	3123	0,6558	10,8549
512	1	14	50	10	4784	304	5172	0,7919	6,5352
1024	1	15	50	10	8880	304	9269	0,8838	3,6357
1500	1	16	50	10	12688	304	13078	0,9175	2,5692
128	2	12	50	10	952	248	1282	0,7987	20,2808
256	2	13	50	10	1464	248	1795	1,1409	14,4290
512	2	14	50	10	2488	248	2820	1,4525	9,1489
1024	2	15	50	10	4536	248	4869	1,6825	5,2783
1500	2	16	50	10	6440	248	6774	1,7715	3,7792
128	11	12	50	10	330,18	202,18	614,36	1,6670	31,6670
256	11	13	50	10	423,27	202,18	708,45	2,8907	27,3194
512	11	14	50	10	609,45	202,18	895,64	4,5732	21,4982
1024	11	15	50	10	981,82	202,18	1269	6,4555	15,0942
1500	11	16	50	10	1328	202,18	1616,18	7,4249	11,7898

um quadro RTR. Então, calculou-se a vazão teórica máxima obtida para comunicações iniciadas pelo receptor (TMT_{ri}) em Mbps através da seguinte equação:

$$TMT_{ri} = \frac{8 * P_{sz}}{T_{tot}} \quad (4.3)$$

Com isso, foi possível calcular a vazão do RI-DMAC ao utilizar o mecanismo de transmissão iniciada pelo receptor. O resultado dos referidos cálculos está disponível na Tabela 4.2, quando variou-se os valores da taxa de transmissão do canal e do tamanho de pacote da mesma forma realizada na Subseção 3.2.1.

Analogamente, foi realizado o cálculo da vazão teórica máxima obtida para comunicações iniciadas pelo receptor. Contudo, o tempo de transmissão (T_{tot}) é definido agora da seguinte maneira:

$$T_{tot} = T_{DIFS} + T_{Tone-ri} + T_{DATA} + T_{ACK} + 2 \cdot T_{SIFS}, \quad (4.4)$$

onde

$$T_{Tone-ri} = T_{sync} + \lceil \log_2 P_{sz} \rceil.$$

As equações acima permitem realizar o cálculo da vazão teórica máxima para comunicações iniciadas pelo receptor, quando se usa o DPTCR-DA. Assim como ocorreu no cálculo anterior, o tempo de propagação foi considerado desprezível e o tempo de *backoff* não é incluído na conta, pois ao escutar um sinal *tone-ri* o nó cancela o seu tempo de *backoff* restante. Os resultados deste cálculo estão disponíveis na Tabela 4.3. Novamente, os valores de taxa de transmissão do canal e tamanho de pacote são os mesmos usados na Subseção 3.2.1. A Tabela 4.3 apresenta ainda o ganho percentual de vazão do DPTCR-

DA em relação ao RI-DMAC para casos em que a comunicação é iniciada pelo receptor. Houve ganho em todos os casos avaliados, pois para qualquer combinação de parâmetros avaliados, tem-se que:

$$T_{Tone-ri} < T_{RTR}. \quad (4.5)$$

Da mesma forma que ocorre com o DPTCR, o ganho de vazão quando se usa o DPTCR-DA aumenta quando o pacote é pequeno e/ou a taxa de transmissão é maior, pois nesse caso o tempo gasto com RTR representa uma fração maior de T_{tot} . Como pode-se depreender da observação da Tabela 4.3, o ganho de vazão nas comunicações iniciadas pelo receptor decorrente do uso do DPTCR-DA chega a ser de até **31,6%**. Em seguida, será apresentada a avaliação empírica do DPTCR-DA.

4.2.2 Avaliação Empírica

Esta seção tem por objetivo apresentar uma análise empírica da técnica de atenuação do problema de surdez proposta nesta dissertação de mestrado. Assim como ocorreu no Capítulo 3, utilizou-se o simulador EXata para auxiliar na realização da avaliação empírica. Esta análise consiste em simular o cenário ilustrado na Figura 4.2. É importante mencionar que este cenário tem sido utilizado para avaliações em outros trabalhos, tais como [13]. Este cenário foi escolhido para esta análise empírica, uma vez que apresenta o problema de surdez nos nós 2 e 4, fazendo com que os fluxos provenientes do nó 1 sofram perdas significativas. Além disso, o referido cenário engloba uma situação em que há fluxos alternados no nó que está sofrendo os efeitos do problema de surdez, no caso o nó 1. Portanto, este cenário tem por objetivo mostrar que o DPTCR-DA atenua os efeitos do problema de surdez mesmo quando em cenários de fluxo alternados, como o da Figura 4.2. Isso ocorre pelo fato do DPTCR-DA não se basear em informações de próximo pacote, como ocorre com o RI-DMAC que fora descrito na Subseção 2.3.3. Por sua vez, o DPTCR-DA baseia-se em informações dos fluxos de dados incidentes aos nós bem como o DVCS-DA, explicado na Subseção 2.3.7. É importante mencionar que o DVCS-DA preconiza o uso de informações dos fluxos de dados incidentes aos nós para atenuar o problema de surdez em cenários de fluxos intercalados [13].

O cenário avaliado (Figura 4.2) possui 5 nós. Considera-se que cada um deles está equipado com uma antena direcional do tipo *switched beam* com 8 setores de 45° cada. Considera-se neste cenário a existência dos seguintes fluxos de dados:

- 1 → 2
- 2 → 3
- 1 → 4
- 4 → 5

Os parâmetros relativos a todos os fluxos de dados do cenário em questão foram considerados com as seguintes características:

- O tamanho do pacote de dados foi considerado como sendo igual a 1024 *bytes*.

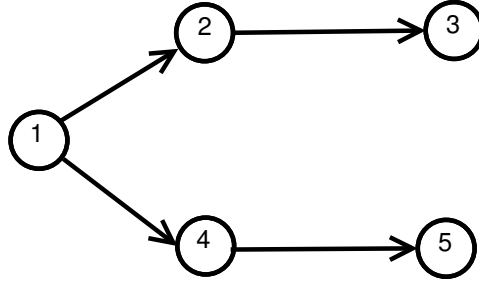


Figura 4.2: Cenário avaliado: ocorre o problema de surdez nos nós 2 e 4.

- O canal foi considerado como tendo capacidade de 2 Mbps.
- O intervalo entre geração de pacotes (I_g) foi variado entre os seguintes valores: 4, 5 e 6 ms.
- Com relação ao limiar de surdez usado para o DPTCR-DA e o DVCS-DA, considerou-se um limiar fixo tal que: $T_i = 1,3 \cdot I_{esp}^i \forall i, i > 0$. Este limiar foi utilizado para se manter alinhado com [13]. Entretanto, há ainda a necessidade de um melhor estudo relacionado à parametrização desse limiar de modo a atender às variações do estado dos nós e enlaces de uma rede sem fio.

Com relação às métricas de desempenho da rede, utilizou-se as seguintes nesta avaliação: vazão total, vazão individual dos fluxos, variação de atraso dos fluxos e atraso fim a fim dos fluxos. Para realizar esta avaliação, foi necessário implementar o DPTCR-DA, o DVCS-DA, além do RI-DMAC no simulador EXata, de maneira a se obter os valores destas métricas. Logo, a avaliação realizada com o auxílio do EXata contempla as seguintes técnicas:

1. DPTCR-DA: Técnica de atenuação de surdez proposta nesta dissertação de mestrado.
2. RI-DMAC: Técnica de atenuação de surdez baseada em informações de próximo pacote [49].
3. DVCS-DA: Técnica de atenuação de surdez baseada em informações dos fluxos de tráfego [13].
4. DVCS: IEEE 802.11b acoplado a técnica DVCS [48]. Tal técnica já vem implementada na versão 2.0 do simulador EXata [44].

Os demais parâmetros de simulação relevantes do EXata utilizados para este cenário estão disponíveis na Tabela 3.2. Os resultados apresentados a seguir são fruto da média da execução de 20 simulações. Os resultados para índice de justiça e vazão individual estão disponíveis na Tabela 4.4. Por sua vez, os resultados relativos à vazão total da rede, variação de atraso e atraso fim a fim estão disponíveis nas Tabelas 4.5, 4.6 e 4.7, respectivamente.

Os resultados de uma forma geral mostram que o protocolo RI-DMAC apresenta um comportamento idêntico ao protocolo DVCS, como esperado neste cenário. Nos resultados

Tabela 4.4: Vazão dos Fluxos e índice de justiça para a avaliação empírica do DPTCR-DA.

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
DPTCR-DA	4	418, 4422	578, 1706	418, 5690	576, 2043	0, 9752
DVCS-DA	6	201, 9479	715, 3552	203, 9188	714, 1751	0, 7627
DVCS-DA	5	220, 9440	684, 5304	220, 0439	684, 5900	0, 7918
DVCS-DA	4	303, 3805	604, 4089	302, 9907	604, 2895	0, 9008
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

de vazão individual e de índice de justiça, os valores dos protocolos RI-DMAC e DVCS são praticamente iguais. Note que o mesmo ocorre nos resultados de vazão total (Tabela 4.5), variação de atraso (Tabela 4.6) e atraso fim a fim (Tabela 4.7). Apesar de possuir uma vazão total superior ao DPTCR-DA (Tabela 4.5), o RI-DMAC bem como o DVCS possuem uma distribuição injusta da vazão entre os fluxos, conforme mostrado na Tabela 4.4. 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 Subseção 2.3.3, essa situação ocorre porque nesse cenário os pacotes da pilha 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. Note que se fossemos considerar um cenário de múltiplos saltos, não adianta haver uma maior vazão total em detrimento de uma má distribuição dos fluxos, uma vez que o gargalo se tornaria aquele fluxo de menor vazão. Nesse sentido, o DPTCR-DA consegue um melhor resultado que o RI-DMAC. O DVCS-DA apresenta um resultado intermediário entre o DPTCR-DA e o RI-DMAC, uma vez que atenua o problema de surdez, mas possui desempenho inferior ao obtido pelo DPTCR-DA.

A vazão total da rede quando se usa o DPTCR-DA é mais baixa do que quando se utiliza RI-DMAC ou DVCS, conforme os resultados da Tabela 4.5. Apesar disso, devido ao uso de sinais *pulse/tone* ao invés de quadros RTS/CTS houve ganhos com relação ao DVCS-DA. As perdas que ocorreram na vazão total da rede possuem as seguintes causas:

- Detecção de surdez em um momento em que a mesma não ocorria, fazendo com que se dispendesse tempo que seria atendendo aos fluxos 2 → 3 e 4 → 5 sem obter ganhos de vazão total neste caso. Note que ainda há necessidade de um estudo mais aprofundado acerca da parametrização do limiar de surdez utilizado, conforme discutido em [13]. Vale ressaltar que o RI-DMAC também pode sofrer deste problema.
- Perda do sinal *tone-ri* enviado para tratamento de surdez. Isso pode ocorrer na seguinte situação. Suponha que em um dado momento 1 esteja se comunicando

Tabela 4.5: Vazão total da rede para avaliação empírica do DPTCR-DA.

Técnica/Protocolo	I_g (ms)	Vazão Total da Rede (Kbps)
DPTCR-DA	6	2080, 5663
DPTCR-DA	5	2014, 9306
DPTCR-DA	4	1991, 3861
DVCS-DA	6	1835, 397
DVCS-DA	5	1810, 1083
DVCS-DA	4	1815, 0696
RI-DMAC	6	2779, 1743
RI-DMAC	5	2780, 1956
RI-DMAC	4	2779, 1053
DVCS	6	2787, 0137
DVCS	5	2784, 6139
DVCS	4	2785, 4253

com 2. Porém, neste mesmo momento, o nó 4 prediz que o nó 1 está sofrendo do problema de surdez e envia um *tone-ri* a ele. Este *tone-ri* não será corretamente processado pelo nó 1, uma vez que ele tem sua antena direcionada para o nó 2, podendo até mesmo causar colisão no nó 1, além de dispendar desnecessariamente o tempo do nó 4. Note que nesse caso, 4 poderia estar aproveitando o seu tempo para se comunicar com 5, o que certamente impacta na vazão total da rede. Novamente, é importante mencionar que o mesmo problema pode ocorrer com o RI-DMAC no caso em que um RTR é perdido. Entretanto, isso não aconteceu com o RI-DMAC, pois ele não trata o problema de surdez neste cenário.

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 4.4, onde se verifica uma distribuição mais igual da vazão entre os fluxos. Note que a vazão dos fluxos $1 \rightarrow 2$ e $1 \rightarrow 4$ é mais do que 4, 5 vezes (350%) superior àquela obtida 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 Jain até 76% maior o que caracteriza uma distribuição mais justa dos recursos da rede. 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 [23]:

$$\frac{(\sum_{i=1}^n th_i)^2}{n \cdot \sum_{i=1}^n th_i^2} \quad (4.6)$$

No que concerne à variação de atraso, quando se usa o DPTCR-DA, os fluxos $1 \rightarrow 2$ e $1 \rightarrow 4$ possuem variação de atraso até 85% menor do que quando se usa RI-DMAC ou DVCS, no caso destacado na Tabela 4.6. Entretanto, assim como ocorre com a vazão, os fluxos $2 \rightarrow 3$ e $4 \rightarrow 5$ possuem um desempenho inferior ao obtido quando do uso de RI-DMAC ou DVCS.

Tabela 4.6: Variação de atraso dos Fluxos para a avaliação empírica do DPTCR-DA.

Técnica/ Protocolo	I_g (ms)	Variação de atraso do Fluxo 1 → 2 (s)	Variação de atraso do Fluxo 2 → 3 (s)	Variação de atraso do Fluxo 1 → 4 (s)	Variação de atraso do Fluxo 4 → 5 (s)
DPTCR-DA	6	0,0166	0,0111	0,0165	0,0112
DPTCR-DA	5	0,0188	0,0085	0,0189	0,0086
DPTCR-DA	4	0,0210	0,0063	0,0209	0,0062
DVCS-DA	6	0,0335	0,0056	0,0332	0,0056
DVCS-DA	5	0,0315	0,0069	0,0318	0,0069
DVCS-DA	4	0,0230	0,0095	0,0230	0,0095
RI-DMAC	6	0,1170	0,0032	0,1163	0,0032
RI-DMAC	5	0,1111	0,0022	0,1137	0,0022
RI-DMAC	4	0,1153	0,0012	0,1167	0,0012
DVCS	6	0,1235	0,0032	0,1197	0,0032
DVCS	5	0,1129	0,0022	0,1128	0,0022
DVCS	4	0,1104	0,0012	0,1209	0,0012

Tabela 4.7: Atraso dos Fluxos para a avaliação empírica do DPTCR-DA.

Técnica/ Protocolo	I_g (ms)	Atraso do Fluxo 1 → 2 (s)	Atraso do Fluxo 2 → 3 (s)	Atraso do Fluxo 1 → 4 (s)	Atraso do Fluxo 4 → 5 (s)
DPTCR-DA	6	12,7109	11,8034	12,7089	11,8123
DPTCR-DA	5	12,3863	10,2246	12,3664	10,2354
DPTCR-DA	4	12,0136	8,3448	12,0209	8,3493
DVCS-DA	6	12,3614	7,1795	12,3980	7,1668
DVCS-DA	5	12,6152	8,7627	12,7176	8,7686
DVCS-DA	4	12,6894	10,5169	12,6797	10,5975
RI-DMAC	6	14,3829	7,7548	14,3385	7,7517
RI-DMAC	5	14,4015	5,3078	14,2632	5,3229
RI-DMAC	4	14,1756	2,9031	14,2974	2,8731
DVCS	6	14,6670	7,7059	14,6966	7,7217
DVCS	5	14,2693	5,3293	14,3723	5,2949
DVCS	4	14,0397	2,8788	14,2293	2,8219

Com relação ao atraso fim a fim, quando se utiliza o DPTCR-DA ocorre uma perda nos fluxos $2 \rightarrow 3$ e $4 \rightarrow 5$ que são beneficiados pelo RI-DMAC e DVCS, uma vez que neste caso eles não atenuam o problema de surdez. No que tange aos fluxos que sofrem os efeitos do problema de surdez, ou seja os fluxos $1 \rightarrow 2$ e $1 \rightarrow 4$, o DPTCR-DA consegue obter um atraso até 15% menor do que quando se usa o RI-DMAC ou o DVCS conforme está destacado na Tabela 4.7.

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 comunicações iniciadas pelo receptor, conforme mostrado na avaliação teórica. Por fim, serão apresentadas as considerações finais relativas ao que foi discutido neste capítulo.

4.3 Discussão

Este capítulo apresentou uma proposta de atenuação do problema de surdez que visa melhorar o desempenho de redes que usam comunicações direcionais no que se refere ao aspecto de justiça na distribuição dos fluxos. Esta proposta é denominada DPTCR-DA e possui dois modos de operação: modo padrão e modo de tratamento de surdez. O primeiro modo se baseia no mecanismo DPTCR utilizando sinais *pulse* e *tone* para realizar a reserva de canal, enquanto o segundo se baseia em predição de surdez baseada em informações de fluxo de tráfego como preconiza o DVCS-DA aliada a utilização de comunicações iniciadas pelo receptor por meio da utilização do sinal *tone-ri*. Após a apresentação do DPTCR-DA, foi realizada uma avaliação teórica do mesmo. Tal avaliação concluiu que ambos os modos do DPTCR-DA possuem uma vazão teórica maior que a obtida pelo RI-DMAC e DVCS-DA. O modo padrão (comunicações iniciadas pelo transmissor) possui uma vazão até 40% maior do que o RI-DMAC e o DVCS-DA. Por sua vez o modo tratamento de surdez do DPTCR-DA (comunicações iniciadas pelo receptor) possui uma vazão teórica até 31,6% maior do que as referidas técnicas. Em seguida, apresentou-se uma análise empírica do DPTCR-DA. Esta análise ressaltou o fato de que o DPTCR-DA é capaz de atenuar o problema de surdez em casos onde o RI-DMAC não consegue, tais como o de fluxos intercalados ilustrado na Figura 4.2. Assim, o DPTCR-DA provê uma melhor distribuição dos recursos da rede para os fluxos, de modo a obter um índice de justiça até 76% melhor do que quando se utiliza o RI-DMAC. Além disso, a análise realizada mostra que por tratar o problema de surdez, o DPTCR-DA melhora também o desempenho relativo à variação de atraso e atraso fim a fim dos fluxos que sofrem dos efeitos do problema de surdez. Com base no exposto, espera-se ter validado a relevância da proposta denominada DPTCR-DA. Este capítulo encerra as propostas e análises apresentadas nesta dissertação de mestrado. O próximo capítulo apresenta uma conclusão da mesma, bem como uma indicação de possíveis trabalhos futuros.

Capítulo 5

Conclusão e Trabalhos Futuros

Este capítulo se destina a realizar uma conclusão do presente trabalho. Tal conclusão consiste da realização de uma breve revisão acerca do que foi apresentado ao longo deste trabalho, bem como de suas principais contribuições. Por fim, será ainda realizada uma indicação a respeito de possíveis trabalhos futuros a serem efetuados.

Neste trabalho, foi feita um criterioso estudo no que concerne a comunicações direcionais. Primeiramente, no Capítulo 1, apresentou-se a motivação, os objetivos e a metodologia conduzida por este trabalho. A análise em si foi iniciada no Capítulo 2, onde foi apresentado um levantamento do estado da arte relativo a comunicações direcionais e protocolos MAC direcionais, abordando importantes aspectos como o problema de surdez de antenas e a latência imposta pela reserva de canal.

A luz desse estudo relacionado a comunicações direcionais, o Capítulo 3 propôs uma nova técnica de reserva de canal chamada DPTCR. O DPTCR faz uso de sinais *pulse* e *tone* ao invés de quadros RTS/CTS para efetuar a reserva do canal e evitar colisões de pacotes de dados. O DPTCR consegue realizar a reserva de canal dessa maneira por fazer uso da capacidade das antenas direcionais de estimar o ângulo de chegada de um sinal, assim como a potência do sinal recebido. Foi realizada uma análise probabilística baseada na precisão da estimativa do ângulo de chegada de um sinal e da potência do sinal recebido, mostrando que o DPTCR possui uma probabilidade de falha na reserva de canal praticamente desprezível. O DPTCR foi avaliado ainda de duas formas: teórica e empírica. Na primeira avaliação, constatou-se que o DPTCR provê ganhos de vazão teórica em todos os casos analisados quando comparado com o padrão IEEE 802.11b acoplado ao DVCS. Estes ganhos chegam a ser de até **40%**. Na avaliação empírica realizada com o auxílio do simulador EXata [44], obteve-se ganhos de até **35%**, com relação ao DVCS. Para melhor aproveitar as informações do DNAV, propôs-se uma integração entre as técnicas APS/ACS e o DPTCR. Neste contexto, foram feitas simulações acerca da referida integração. Os resultados indicaram ganhos para o fluxo que era prejudicado pelas características omnidirecionais do DVCS herdadas do padrão IEEE 802.11. Este ganho foi de até **174%** em vazão e houve uma redução de até **62%** quando se avaliou a variação de atraso do fluxo. Além disso, os outros fluxos não sofreram impactos negativos quando da integração entre DPTCR e APS/ACS. Dessa forma, validou-se um relevante mecanismo que melhora o desempenho de redes que utilizam comunicações direcionais.

Com o objetivo de melhorar a justiça na distribuição dos recursos da rede entre os fluxos, o Capítulo 4 propôs uma técnica de atenuação do problema de surdez de antenas

em comunicações direcionais chamada DPTCR-DA. Esta técnica se baseia na reserva de canal proposta pelo DPTCR e na predição do problema de surdez baseada em informações de fluxo de tráfego, como preconizado pelo DVCS-DA [13]. O DPTCR-DA faz uso ainda de comunicações iniciadas pelo receptor de um modo inovador utilizando o sinal *tone-ri* ao invés do quadro RTR. Isso novamente é possível graças a capacidade da antena direcional estimar o ângulo de chegada do sinal e a potência do sinal recebido. O DPTCR-DA é avaliado tanto de modo teórico quanto empírico. A avaliação teórica mostra que as comunicações iniciadas pelo receptor com o uso do DPTCR-DA oferecem uma vazão teórica até **31,6%** maior do que quando se usa o quadro RTR. A avaliação empírica mostra que o DPTCR-DA provê ganhos consideráveis de justiça, tendo um impacto positivo em ambientes que utilizam comunicações direcionais. Por fim, pode-se citar as seguintes contribuições deste trabalho:

1. Mecanismo de reserva de canal para comunicações direcionais (DPTCR) que impõe uma latência bem menor àquela imposta pelo esquema de RTS/CTS. Vale ressaltar que este mecanismo pode ser facilmente adaptado para comunicações iniciadas pelo receptor, como ocorre no DPTCR-DA;
2. Integração entre o DPTCR e APS/ACS;
3. Técnica que atenua o problema de surdez de antenas (DPTCR-DA), provendo maior justiça na distribuição dos recursos da rede.

É importante mencionar que as publicações realizadas a respeito do trabalho corrente estão apresentadas a seguir:

Artigos Publicados

1. P.R.V Dias, L. de M. Guimarães, L.S.N. Nunes, M.F. Caetano, and J.L. Bordim. 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, 2012.
2. L. de M. Guimarães and J.L. Bordim. Utilização de pulse/tone como mecanismo de reserva de canal em comunicações direcionais. In *XXXVIII Conferência Latinoamericana en Informática*, pages 515–523. Centro Latinoamericano de Estudios en Informática, 2012.

Artigos Aceitos

1. L. de M. Guimarães, and J.L. Bordim, Directional pulse/tone based channel reservation, To appear in 27th International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA 2013). IEEE, 2013.

Artigos Submetidos

1. L. de M. Guimarães, and J.L. Bordim Employing Pulse/Tone Signals to Improve Channel Reservation on Directional Communications. *IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems*, 2013.

2. L. de M. Guimarães, and J.L. Bordim Atenuando o Problema de Surdez de Antenas em Comunicações Direcionais com a Utilização de Tones na Reserva de Canal. In *31º Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores - SBRC 2013*, 2013.
3. L. de M. Guimarães, and J.L. Bordim Directional Pulse/Tone Based Channel Reservation with Deafness Avoidance. *CLEI ELeTRonic Journal*, 2013.

No que diz respeito a trabalhos futuros, seria relevante melhorar a parametrização do limiar de predição de surdez utilizado no DPTCR-DA, de maneira a prover ganhos ainda mais significativos relacionados à justiça. Ainda com relação ao DPTCR-DA, poderia se utilizar um diferente mecanismo de escolha de qual nó vai receber um *tone-ri* de maneira a iniciar uma comunicação pelo receptor. A justificativa para essa modificação reside no fato de trabalhos na literatura apresentarem estudos que apontam maneiras mais eficientes de se fazer esta escolha, como descrito em [4]. Avaliações dos ganhos de consumo de energia da técnica de reserva de canal proposta também devem ser considerados em trabalhos futuros.

Referências

- [1] A. Amiri Sani, L. Zhong, and A. Sabharwal. 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, 2010.
- [2] P.H. Azevêdo, M.F. Caetano, and J.L. Bordim. A packet aggregation mechanism for real time applications over wireless networks. *International Journal of Networking and Computing*, 2(1):18–40, 2012.
- [3] S. Basagni, M. Conti, S. Giordano, and I. Stojmenović. *Mobile ad hoc networking*. Wiley-IEEE Press, 2004.
- [4] T. da S. Bonfim and M. M. Carvalho. Reversing the IEEE 802.11 backoff algorithm for receiver-initiated MAC protocols. In *Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), 2012 8th International*, pages 269–274. IEEE, 2012.
- [5] J.L. Bordim, A.V. Barbosa, M.F. Caetano, and P.S. Barreto. IEEE802. 11b/g standard: Theoretical maximum throughput. In *Networking and Computing (ICNC), 2010 First International Conference on*, pages 197–201. IEEE, 2010.
- [6] J.L. Bordim, T. Hunziker, and K. Nakano. Adaptive carrier sensing and packet sending-an alternative to boost the performance in directional communications. In *Parallel and Distributed Computing, Applications and Technologies, 2005. PDCAT 2005. Sixth International Conference on*, pages 274–279. IEEE, 2005.
- [7] J.L. Bordim and K. Nakano. Deafness resilient mac protocol for directional communications. *IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems*, 93(12):3243–3250, 2010.
- [8] A. Chandra, V. Gummalla, and J.O. Limb. Wireless medium access control protocols. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 3(2):2–15, 2000.
- [9] R.R. Choudhury and N.H. Vaidya. 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, 2005.
- [10] R.R. Choudhury, X. Yang, R. Ramanathan, and N.H. Vaidya. 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, 2002.

- [11] A. DasGupta. The matching, birthday and the strong birthday problem: a contemporary review. *Journal of statistical planning and inference*, 130(1):377–389, 2005.
- [12] P. Diaconis and S. Holmes. A Bayesian peek into Feller volume I. *Sankhyā: The Indian Journal of Statistics, Series A*, 64(A):820–841, 2002.
- [13] P.R.V Dias, L. de M. Guimarães, L.S.N. Nunes, M.F. Caetano, and J.L. Bordim. 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, 2012.
- [14] W. Feller. *An introduction to probability theory and its applications*, volume 1. John Wiley & Sons, 2008.
- [15] S.D. Galbraith and M. Holmes. A non-uniform birthday problem with applications to discrete logarithms. *Discrete Applied Mathematics*, 160:1547–1560, 2012.
- [16] M. Gast. *802.11 wireless networks: the definitive guide*. O’Reilly Media, 2002.
- [17] G. Giorgetti, S. Maddio, A. Cidronali, SKS Gupta, and G. Manes. Switched beam antenna design principles for angle of arrival estimation. In *Wireless Technology Conference, 2009. EuWIT 2009. European*, pages 5–8. IEEE, 2009.
- [18] GNU. GNU Octave. URL: <http://www.gnu.org/software/octave/>, 2011.
- [19] L. de M. Guimarães and J.L. Bordim. 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, 2012.
- [20] P. Gupta and P.R. Kumar. The capacity of wireless networks. *IEEE Transactions on Information Theory*, 46(2):388–404, 2000.
- [21] Z. J. Haas and J. Deng. Dual busy tone multiple access (DBTMA)-a multiple access control scheme for ad hoc networks. *IEEE Transactions on Communications*, 50(6):975–985, 2002.
- [22] IEEE. 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, December 2007.
- [23] R. Jain, D. Chiu, and W. Hawe. *A quantitative measure of fairness and discrimination for resource allocation in shared computer system*. Eastern Research Laboratory, Digital Equipment Corporation, 1984.
- [24] D.B. Johnson and D.A. Maltz. Dynamic source routing in ad hoc wireless networks. *Mobile computing*, 353:153–181, 1996.

- [25] J. Jun, P. Peddabachagari, and M. Sichitiu. Theoretical maximum throughput of IEEE 802.11 and its applications. In *Second IEEE International Symposium on Network Computing and Applications, 2003. (NCA 2003)*, pages 249–256. IEEE, 2003.
- [26] J. Klotz. The Birthday Problem with Unequal Probabilities. Technical Report 591, University of Wisconsin, November 1979.
- [27] Y. Ko, V. Shankarkumar, and N.H. Vaidya. Medium access control protocols using directional antennas in ad hoc networks. In *Proceedings of Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM 2000)*, volume 1, pages 13–21. IEEE, 2000.
- [28] P. Krishnamurthy and S. Krishnamurthy. Use of smart antennas in ad hoc networks. In *AD HOC NETWORKS: technologies and protocols*, volume 1, chapter 7, pages 197–226. Springer, 2005.
- [29] S. Kumar, V.S. Raghavan, and J. Deng. Medium Access Control protocols for ad hoc wireless networks: A survey. *Ad Hoc Networks*, 4(3):326–358, 2006.
- [30] J.F. Kurose, K.W. Ross, and W.L. Zucchi. *Redes de computadores e a Internet: uma abordagem top-down*. Pearson Addison Wesley, 2006.
- [31] J. Lee, D. Kim, C. K. Toh, T. Kwon, and Y. Choi. A Table-driven AOA Estimation Algorithm for Switched-beam Antennas in Wireless Networks. In *11th European Wireless Conference 2005-Next Generation Wireless and Mobile Communications and Services (European Wireless)*, pages 1–6. VDE, 2005.
- [32] G. Li, L.L. Yang, W.S. Conner, and B. Sadeghi. Opportunities and challenges for mesh networks using directional antennas. In *Proceedings of First IEEE Workshop Wireless Mesh Networks (WiMesh'05)*, pages 106–116. IEEE, 2005.
- [33] J. Li, C. Blake, D.S.J. De Couto, H.I. Lee, and R. Morris. Capacity of ad hoc wireless networks. In *Proceedings of the 7th annual international conference on Mobile computing and networking*, pages 61–69. ACM, 2001.
- [34] J.C. Liberti and T.S. Rappaport. *Smart antennas for wireless communications: IS-95 and third generation CDMA applications*. Prentice Hall PTR, 1999.
- [35] J. Ma, H. Sekiya, A. Nagasaki, N. Komuro, and S. Sakata. MAC Protocol for Ad Hoc Networks Using Smart Antennas for Mitigating Hidden and Deafness Problems. *IEICE TRANSACTIONS on Communications*, E95-B(11):3545–3555, 2012.
- [36] S. Mangold, S. Choi, P. May, O. Klein, G. Hiertz, and L. Stibor. IEEE 802.11e Wireless LAN for Quality of Service. In *8th European Wireless Conference 2002-Next Generation Wireless and Mobile Communications and Services (European Wireless)*, volume 2, pages 32–39. EUREL, 2002.
- [37] S. Mase. Approximations to the birthday problem with unequal occurrence probabilities and their application to the surname problem in japan. *Annals of the Institute of Statistical Mathematics*, 44(3):479–499, 1992.

- [38] P. Mohapatra and S. Krishnamurthy. *AD HOC NETWORKS: technologies and protocols*. Springer, 2005.
- [39] T.S. Nunnikhoven. A birthday problem solution for nonuniform birth frequencies. *The American Statistician*, 46(4):270–274, 1992.
- [40] T. Ohira and K. Gyoda. Electronically steerable passive array radiator antennas for low-cost analog adaptive beamforming. In *Proceedings of IEEE International Conference on Phased Array Systems and Technology*, pages 101–104. IEEE, 2000.
- [41] V.D. Park and M.S. Corson. A highly adaptive distributed routing algorithm for mobile wireless networks. In *Proceedings of Sixteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM 97)*, volume 3, pages 1405–1413. IEEE, 1997.
- [42] C.E. Perkins and E.M. Royer. Ad-hoc on-demand distance vector routing. In *Proceedings of Second IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications (WMCSA'99)*, pages 90–100. IEEE, 1999.
- [43] R. Ramanathan. Antenna Beamforming and Power Control for Ad Hoc Networks. In *Mobile ad hoc networking*, volume 1, chapter 5, pages 139–173. Wiley-IEEE Press, 2004.
- [44] Scalable Network Technologies. Simulador EXata. URL: <http://www.scalable-networks.com/exata/>, 2011.
- [45] K.P. Shih, W.H. Liao, H.C. Chen, and C.M. Chou. On avoiding RTS collisions for IEEE 802.11-based wireless ad hoc networks. *Computer Communications*, 32(1):69–77, 2009.
- [46] S. Singh, R. Mudumbai, and U. Madhow. Distributed coordination with deaf neighbors: efficient medium access for 60 ghz mesh networks. In *Proceedings of 29th IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM, 2010)*, pages 1–9. IEEE, 2010.
- [47] A. P. Subramanian and S. R. Das. Addressing deafness and hidden terminal problem in directional antenna based wireless multi-hop networks. *Wireless Networks*, 16(6):1557–1567, 2010.
- [48] M. Takai, J. Martin, R. Bagrodia, and A. Ren. 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, 2002.
- [49] M. Takata, M. Bandai, and T. Watanabe. A receiver-initiated directional MAC protocol for handling deafness in ad hoc networks. In *IEEE International Conference on Communications (ICC'06)*, volume 9, pages 4089–4095. IEEE, 2006.
- [50] M. Takata, M. Bandai, and T. Watanabe. RI-DMAC: a receiver-initiated directional MAC protocol for deafness problem. *International Journal of Sensor Networks*, 5(2):79–89, 2009.

- [51] F. Talucci, M. Gerla, and L. Fratta. 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, 2002.
- [52] A. Tanenbaum. *Computer Networks*. Prentice Hall Professional Technical Reference, 4th edition, 2002.
- [53] J. Yu, H. Roh, W. Lee, S. Pack, and D. Du. Cooperative bridges: topology control in cooperative wireless ad hoc networks. In *INFOCOM, 2010 Proceedings IEEE*, pages 1–9. IEEE, 2010.
- [54] H. Zhai, J. Wang, and Y. Fang. Providing statistical QoS guarantee for voice over IP in the IEEE 802.11 wireless LANs. *IEEE Wireless Communications*, 13(1):36–43, 2006.