

A INTERFERÊNCIA EM REDES AD HOC
COM ANTENAS DIRECIONAIS

Italo Ramella

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS
EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

Aprovada por:

Prof. José Ferreira de Rezende, Dr.

Prof. Aloysio de Castro Pinto Pedroza, Dr.

Prof. Paulo Cardieri, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

ABRIL DE 2006

RAMELLA, ITALO

A Interferência em Redes Ad Hoc com Antenas Direcionais [Rio de Janeiro] 2006

XIII, 68 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia Elétrica, 2006)

Dissertação - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE

1. Interferência
2. Redes ad hoc
3. Antenas Direcionais

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

*A todos que lutam por seus objetivos e jamais sucumbem. Esses aprenderam a conversar
com o silêncio.*

Agradecimentos

A Deus, que me permitiu nascer.

A meus pais, Mariza e Ivan, que me permitiram crescer, caminhar, ver, que me mostraram como encontrar a matéria-prima das realizações, me ensinaram a ouvir as palavras que os olhos balbuciam para que encontrasse o tom correto da vida harmoniosa.

A minha saudosa avó Arlete, a vovó, que me deu um grande exemplo de dedicação, de amor que transcende a limitação física.

A minha irmã, Liane, que, junto a mim desde o ventre materno, tornou-se cúmplice da minha trajetória, coadjuvante dos meus sucessos.

A minha esposa, Daniela, mãe de dois tesouros inestimáveis, nossos filhos Bruna e Bernardo. Ser marido, pai, revelou-se a maior, a mais incontestável prova de evolução que o âmago de um homem pode ter.

A meus sogros, César e Áurea, que me ajudaram a enxergar que o homem transcende a matéria.

Aos professores do GTA, mais amigos do que professores, Otto, Aloysio, Leão e Luis Henrique, que conseguiram ensinar como se deve realmente aprender.

Aos colegas do GTA, que me ajudaram nessa caminhada: Elkind, Guilherme, Sérgio, Igor, Bicudo, Miguel, Aurélio, Doc, Kleber, Glauco, Mirna, Rafael, Lafs, Rubi, Célio, Marcel, Rodrigo, Yuri, Henrique, Otávio, Fabiana, Laila e a todos os ICs.

A meu orientador, professor Rezende, modelo de competência e dedicação, pela confiança, amizade, objetividade e tranquilidade no relacionamento, ingredientes do sucesso.

À Marinha do Brasil, e ao Comte Assis, por terem sempre acreditado que meu objetivo seria alcançado.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

A INTERFERÊNCIA EM REDES AD HOC
COM ANTENAS DIRECIONAIS

Italo Ramella

Abril/2006

Orientador: José Ferreira de Rezende

Programa: Engenharia Elétrica

A interferência é um grande problema em redes *ad hoc*. Pesquisas recentes indicam o uso de antenas direcionais, que concentram a radiação em uma região do espaço, como uma forma de naturalmente reduzi-la. Entretanto, a necessidade de se resolverem outros problemas que surgem com a radiação direcional desviou a atenção acerca de quão influente ainda é a interferência. Este trabalho demonstra essa influência e mostra, através da geometria, que a radiação direcional, aliada ao emprego de um mecanismo de reserva do meio, pode ser bem mais eficiente em reduzir a interferência sempre que algumas condições forem respeitadas. Entre essas condições, destaca-se a necessidade de as antenas implementarem um número mínimo de feixes direcionais, o que torna o tipo de antena usado e a posição dos nós irrelevantes em qualquer cenário estático. As condições encontradas são as bases de um conjunto de regras, elaboradas conforme o cenário *ad hoc*, para se minimizar a interferência. Simulações mostraram que a observação dessas regras melhora bastante o desempenho das comunicações. Esses resultados são genéricos, pioneiros e podem ser usados por muitos trabalhos com antenas direcionais em redes *ad hoc*, especialmente os que desenvolvem subcamadas MAC direcionais.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

THE INTERFERENCE IN AD HOC
NETWORKS WITH DIRECTIONAL ANTENNAS

Italo Ramella

April/2006

Advisor: José Ferreira de Rezende

Department: Electrical Engineering

Interference is a big problem on the performance of ad hoc networks. Recent researches suggest the use of directional antennas, radiating in a portion of space, as a straight manner to reduce it. However, the need to solve other problems appearing due to the directional radiation has neglected how influent the interference still is. This work broadly investigates this influence and shows, through geometry, that the directional radiation coupled to some mechanism of medium reservation reduces interference whenever some conditions are respected. The main condition is to make antennas employ a minimum number of beams. Under this condition, the antenna type and the nodes positions are irrelevant at any static scenario. All conditions are the basis of a set of rules, regarding the ad hoc scenario, to minimize interference. Simulations showed that the application of these rules contently improves the network performance. These results are novel and broad, and most works with directional antennas in ad hoc networks, specially the ones designing directional MAC sublayers, can benefit from them.

Sumário

Resumo	v
Abstract	vi
Lista de Figuras	x
Lista de Tabelas	xii
Lista de Acrônimos	xiii
1 Introdução	1
1.1 Motivação	2
1.2 Objetivo	3
1.3 Contribuições	3
1.4 Organização	4
2 Fundamentos Teóricos	5
2.1 Conceitos sobre Antenas Direcionais	5
2.1.1 O Modelo de Antena Adotado	7
2.1.2 Como Operam Antenas AA e SB	7

2.2	O Protocolo IEEE 802.11	9
2.3	Reserva do Meio	11
2.4	Classificação da Interferência	12
2.5	Modelo de Propagação do Sinal	13
2.6	Trabalhos Relacionados	15
3	Condições de Redução da Interferência	16
3.1	A Distância Mínima (d_{min}) entre os Nós Comunicantes	17
3.2	Exploração da Geometria	18
3.3	A Distância Máxima (d_{max}) entre os Nós Comunicantes	21
3.4	O Número Mínimo (Nm) de Feixes Direcionais	22
3.4.1	Influência de S e n	23
3.5	O Máximo Afastamento Angular (PA) entre os Nós	24
3.5.1	Modos 1 e 3	25
3.5.2	Modo 2	26
3.5.3	Influência de S e n	28
4	Análise	31
4.1	Regras de Cobertura	32
4.1.1	Cenários Estáticos com Posicionamento Aleatório de Nós	33
4.1.2	Cenários Estáticos com Posicionamento Conhecido de Nós	34
4.1.3	Cenários Dinâmicos	35
4.2	Simulações	36
4.2.1	Cenário 1	39

Avaliação do Desempenho de Cada Antena	40
Comparação do Desempenho das Antenas	44
4.2.2 Cenário 2	46
4.3 O Alcance de Detecção de Portadora (d_C)	50
4.4 A influência dos Lóbulos Secundários de uma Antena Direcional	51
5 Conclusões	53
Referências Bibliográficas	57
A Implementações no NS-2.28	60
A.1 Os Parâmetros de Simulação	60
A.2 O Módulo de Antenas Direcionais	62
A.2.1 Interação com o <i>Script</i> TCL	66
A.2.2 Interação com a Classe <i>Propagation/PathLoss</i>	66
A.2.3 Interação com a Classe <i>Phy/WirelessPhy</i>	67
A.2.4 Interação com a Classe <i>Mac/802_11-dir</i>	67

Lista de Figuras

2.1	Exemplos de padrões de radiação.	6
2.2	O modelo de antena direcional adotado.	7
2.3	Modos de operação das antenas SB.	8
2.4	Períodos de tempo e quadros de informação do modo DCF do IEEE 802.11.	11
3.1	Considerações iniciais sobre o uso da radiação direcional.	17
3.2	Antenas no Modo 1.	18
3.3	Antenas no Modo 2.	19
3.4	Antenas no Modo 3.	20
3.5	Considerações sobre d_{max}	21
3.6	Quando Nm não pode ser calculado.	24
3.7	Curvas de PA para os Modos 1 e 3. As curvas começam na abscissa $d_{min} = 0.56d_T$	25
3.8	Curvas de PA para os Modo 2. As curvas começam em $d_{min} = 0.56d_T$	27
3.9	As curvas deslocam-se para a direita quando $n = 5$	28
3.10	As curvas deslocam-se para a esquerda quando $n = 3$	29
3.11	As curvas deslocam-se mais para a esquerda quando $S = 16$ e $n = 3$	29
3.12	As curvas deslocam-se bastante para a esquerda quando $n = 2$	30

3.13	As curvas tornam-se verticais em d_{max} quando N é aumentado (21 e 61 feixes). Uma variação de aproximadamente 400% em N gera um aumento de menos de 10% em d	30
4.1	Fluxograma da aplicação das RC em Cenários Estáticos com Posicionamento Aleatório de Nós.	34
4.2	Fluxograma da aplicação das RC em Cenários Estáticos com Posicionamento Conhecido de Nós.	36
4.3	O Cenário 1 e as primeiras curvas de desempenho.	40
4.4	O restante das curvas de desempenho do Cenário 1.	41
4.5	Posições das regiões cinza com antenas AA de 3, 4 e 5 feixes.	41
4.6	Comunicação com antenas SB no Modo 1.	42
4.7	Comunicação com antenas SB no Modo 2.	43
4.8	Comunicação com antenas SB no Modo 3.	44
4.9	Colisões em R quando todas as FPIs enviam DADO e usam EIFS.	46
4.10	O segundo cenário <i>ad hoc</i> estático, com $S = 10$ e n variável.	46
4.11	Resultado das simulações do Cenário 2 com antenas AA de 6 e 8 feixes.	47
4.12	Colisões em R com EIFS.	49
4.13	Representação do Alcance de Interferência Primária referente aos lóbulos secundários.	51
A.1	Os relacionamentos interno, entre métodos e atributos, e externo, com objetos de outras Classes, da Classe <i>Antenna/DirAntenna</i>	64

Lista de Tabelas

3.1	Nm para alguns valores de S e n	23
4.1	Alguns parâmetros de configuração dos nós.	38
A.1	Parâmetros de entrada para as simulações.	60
A.2	Limiar de Recepção (RxT) e de Detecção de Portadora (CsT), conforme o Fator de Perda no Caminho (n), para $d_T = 17.5m$, $d_C = 35m$, $P_T = 100mW$ e $d_0 = 1m$	60
A.3	Outros parâmetros de configuração dos nós.	61
A.4	Instante (em segundos) de início dos fluxos CBR. As simulações duram 3.2s.	61
A.5	Métodos e atributos da Classe <i>Antenna/DirAntenna</i>	63

Lista de Acrônimos

AA :	<i>Adaptive Array;</i>
ACK :	<i>Acknowledgment;</i>
AoA :	<i>Angle of Arrival;</i>
CTS :	<i>Clear To Send;</i>
CBR :	<i>Continuous Bit Rate;</i>
DCF :	<i>Distributed Coordination Function;</i>
DIFS :	<i>DCF Interframe Space;</i>
DMAC :	<i>Directional MAC;</i>
EIFS :	<i>Extended Interframe Space;</i>
IEEE :	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers;</i>
LoS :	<i>Line of Sight;</i>
MAC :	<i>Medium Access Control;</i>
NAV :	<i>Network Allocation Vector;</i>
NS-2.28 :	<i>Network Simulator 2.28;</i>
PA :	<i>Prevenção Angular;</i>
RC :	<i>Regras de Cobertura;</i>
RTS :	<i>Request To Send;</i>
SB :	<i>Switched Beam;</i>
SIFS :	<i>Short Interframe Space;</i>
SINR :	<i>Signal to Interference plus Noise Ratio;</i>
SPI :	<i>Source of Primary Interference;</i>
SSI :	<i>Source of Secondary Interference;</i>
TCL :	<i>Tool Command Language.</i>

Capítulo 1

Introdução

AS REDES *ad hoc* tradicionalmente operam com antenas omnidirecionais em seus cenários. Entretanto, a radiação omnidirecional limita o desempenho devido ao insuficiente reuso espacial, aos requisitos de múltiplos saltos em longos enlaces e às perdas de energia decorrentes da emissão de sinal em direções diferentes da desejada. O emprego de antenas direcionais (na verdade um sistema de antenas ou antenas "inteligentes"), já antigo em telefonia celular, mas recente nas redes *ad hoc*, surgiu para aumentar o desempenho [1, 2]. Tais antenas são capazes de concentrar a energia eletromagnética numa direção, o que aumenta o alcance de transmissão e ainda permite um maior número de comunicações concomitantes. Essas condições são suficientes para diminuir no número de saltos em enlaces distantes e melhorar o reuso do meio.

Independentemente do uso de antenas direcionais ou omnidirecionais, a essência das redes *ad hoc* é a ausência de uma infra-estrutura que coordene a comunicação. Sem esse ponto de coordenação, os nós precisam disputar o acesso ao meio e geram interferências, outro fator de redução do desempenho das redes que o emprego adequado das antenas direcionais também consegue evitar.

A interferência é melhor compreendida se for classificada em primária e secundária. A primária sempre causa a perda de pacotes de dados e é conhecida como colisão. Qualquer nó que sozinho consiga gerar uma colisão é chamado de FPI (Fonte Primária de Interferência). A interferência secundária, diferentemente da primária, não gera uma

colisão, mas aumenta o nível de ruído no meio. É possível mostrar que, em determinadas condições, um nó interferente será uma FPI sempre que a distância entre ele e o nó receptor não ultrapassar um certo limite. Além desse limite, ele será uma fonte de interferência que só aumenta o nível de ruído no meio.

Quando do emprego de antenas omnidirecionais, já se usava um procedimento para a redução da interferência: o mecanismo de reserva do meio, que consiste em manter as potenciais fontes de interferência cientes da comunicação em andamento. Exemplo de tal mecanismo é a troca de pacotes RTS/CTS do protocolo IEEE 802.11 [3]. Embora a influência da interferência seja menor com antenas direcionais, as colisões ainda podem reduzir bastante o desempenho das redes em alguns casos. Existe, entretanto, uma forma simples e eficiente de reduzir consideravelmente a interferência: usar adequadamente as antenas direcionais para garantir que a reserva do meio atinja todas as possíveis FPIs, inibindo seus efeitos.

1.1 Motivação

Em redes *ad hoc*, o emprego de antenas direcionais, que concentram o sinal irradiado em determinada direção, naturalmente reduziu o número de possíveis FPIs. Entretanto, surgiram alguns problemas [4] antes inexistentes quando as antenas operavam de forma apenas omnidirecional. A solução de tais problemas, para que o potencial das antenas direcionais fosse satisfatoriamente explorado, exigiu esforços na adaptação da subcamada MAC e de outras camadas da pilha de protocolos. Esses esforços e o fato de já haver menos interferência por causa da natural redução do número de FPIs desviaram a atenção acerca da influência que as remanescentes FPIs ainda poderiam causar. O resultado foi o surgimento de protocolos MAC direcionais vulneráveis às FPIs. Após ampla pesquisa, não foi encontrado qualquer trabalho que revelasse quando as FPIs prejudicam as comunicações direcionais e o que fazer para eliminar tal influência. Além disso, algumas regras geométricas que surgem apenas com a radiação direcional mostraram que, em determinadas circunstâncias, seria possível e simples colocar todas as FPIs dentro da área de reserva do meio: bastaria que alguns parâmetros das antenas direcionais, como o tipo de antena e

o número de feixes direcionais que ela implementa, fossem corretamente usados.

1.2 Objetivo

O objetivo deste trabalho é encontrar meios de se eliminar o efeito das FPIs. A principal meta é explorar a geometria para definir em quês condições todas as FPIs ficam dentro da área de reserva do meio e tornar esses resultados o mais possível abrangentes. Para isso, consideraram-se os principais tipos de antenas direcionais, a influência das perdas de propagação conforme o meio e a influência da relação sinal-ruído-mais-interferência. Uma meta alternativa, que se pode empregar nos casos em que é impossível explorar apenas a geometria, é promover mudanças na duração das comunicações e nos protocolos MAC.

1.3 Contribuições

Mostram-se todas as condições que devem ser respeitadas para que as FPIs fiquem cobertas pela área de reserva do meio. A mais importante delas é fazer as antenas implementarem um número mínimo (Nm) de feixes direcionais, independentemente da posição dos nós e do próprio tipo de antena usado. Outra condição, alternativa à primeira, é permitir que as antenas implementem menos do que Nm feixes se, entretanto, os nós mantiverem um afastamento angular máximo (PA). Como o afastamento angular é o ângulo entre a linha de visada dos nós e a direção na qual as antenas estão apontadas, o tipo de antena usado e a posição dos nós tornam-se muito relevantes. As condições de cobertura das FPIs são as bases do que se chamou de Regras de Cobertura, elaboradas conforme o cenário *ad hoc*, que definem quando é possível colocar todas as FPIs dentro da área de reserva do meio e o que fazer para que isso aconteça. Complementos às Regras de Cobertura, quando elas mostram que é impossível manter todas as FPIs cobertas, também foram desenvolvidos, o que permite eliminar o efeito das FPIs em quaisquer circunstâncias. Simulações realizadas no NS-2.28 [5] mostraram que a eliminação das colisões geradas por FPIs melhorou o desempenho das comunicações em até 70%. Esses

resultados são genéricos, pioneiros e podem ser usados por muitos trabalhos com antenas direcionais em redes *ad hoc*, especialmente os que desenvolvem subcamadas MAC direcionais.

1.4 Organização

O Capítulo 2 fornece os fundamentos teóricos necessários à compreensão do trabalho. Assim, é possível rever conceitos básicos sobre interferência, antenas direcionais, mecanismo de reserva do meio e propagação. Definem-se importantes conceitos como FPI, os modos de operação das antenas, entre outros. Ainda são mencionados alguns trabalhos tomados como referência. O Capítulo 3 mostra como surgem e o que significam todas as condições de cobertura das FPIs, entre elas Nm e PA , e revela como considerar a influência do tipo de antena e a influência das perdas de propagação conforme o meio. O Capítulo 4 condensa as condições de cobertura das FPIs nas Regras de Cobertura, a serem seguidas para que se eliminem as colisões geradas por FPIs, e mostra também os resultados das simulações, que definem os complementos das Regras de Cobertura. Finalmente o Capítulo 5 apresenta as conclusões e cita os trabalhos futuros.

Capítulo 2

Fundamentos Teóricos

ESTE capítulo fornece os conceitos básicos necessários à compreensão do restante do trabalho. Aqui se definem interferências primária e secundária, fontes primária e secundária de interferência, os tipos de antenas direcionais usados e como opera cada tipo, a reserva do meio com um enfoque em antenas direcionais, o modelo de propagação e suas implicações.

2.1 Conceitos sobre Antenas Direcionais

Originalmente, um simples dipolo tem sido usado como antena nas redes *ad hoc*. A sua estratégia omnidirecional (Figura 2.1(a)), irradiando e recebendo bem em todas as direções, inunda o meio com o sinal transmitido e atinge o destino com uma pequena parcela da potência transmitida. A potência restante funciona como sinal interferente em outras direções.

Como solução ao espalhamento de sinal no meio, pode ser construída uma simples antena com direção fixa e preferencial de transmissão e recepção, criando um feixe de radiação (Figura 2.1(b)). Isso não funcionaria nas redes *ad hoc*, onde um nó precisa estar apto a estabelecer comunicação em qualquer direção. Portanto, as antenas direcionais empregadas devem ser suficientemente inteligentes para alterar sua direção de operação, posicionando seu feixe de radiação conforme o necessário. Entretanto, antenas não são

inteligentes; sistemas o são.

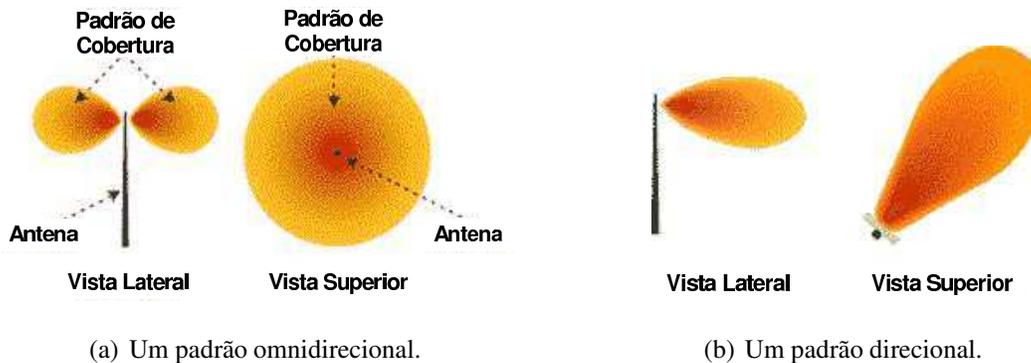


Figura 2.1: Exemplos de padrões de radiação.

As antenas direcionais inteligentes são na verdade um sistema [6, 7] formado por um Processador Digital de Sinais (PDS) [8] acoplado a um conjunto de irradiadores elementares. Tais irradiadores são dipolos de onda e estão separados entre si por distâncias menores do que uma fração do comprimento da onda do sinal irradiado. O PDS usa os irradiadores para receber e transmitir múltiplas cópias de um mesmo sinal. A forma de atuação do PDS, tratando as defasagens dos sinais recebidos e defasando os sinais enviados, confere às antenas inteligência suficiente para rastrear sinais, determinando o ângulo de chegada (*Angle of Arrival* - AoA), e transmitir nessa direção. Outras capacidades adquiridas são a eliminação dos efeitos dos múltiplos caminhos e a alteração do padrão do diagrama de radiação.

Conforme as estratégias de transmissão, as antenas direcionais, ou simplesmente antenas, classificam-se em dois tipos: Feixe Chaveado (*Switched Beam* - SB) ou Arranjo Adaptativo (*Adaptive Array* - AA). As antenas SB apontam seu feixe de radiação em N direções, portanto a Linha de Visada (*Line of Sight* - LoS) do enlace raramente está sobre a bissetriz dos feixes. Por outro lado, as antenas AA apontam seu feixe em qualquer direção e rastreiam o AoA, portanto o LoS dos enlaces está sempre sobre a bissetriz dos feixes e diz-se que as antenas estão alinhadas. As antenas AA são capazes também de adaptar seu diagrama de radiação para evitar uma potencial interferência. A Figura 2.2(b) mostra como esses dois tipos de antena operariam conforme o modelo de antena adotado.

2.1.1 O Modelo de Antena Adotado

Para os propósitos deste trabalho, adota-se um modelo de antena cujo diagrama de radiação possui um lóbulo principal (também chamado de feixe direcional, ou simplesmente feixe) de largura $2\pi/N$ e ganho uniforme e lóbulos secundários desprezíveis, como mostra a Figura 2.2(a). N é o número de vezes que o feixe cabe em 360° sem sobreposição, o que permite dizer que a antena está implementando N feixes. **Apontar o feixe em uma direção significa apontar a bissetriz do feixe nessa direção.** Por simplificação, assume-se que o padrão do feixe (largura e ganho) mantém-se sempre constante, independentemente do tipo de antena usado.

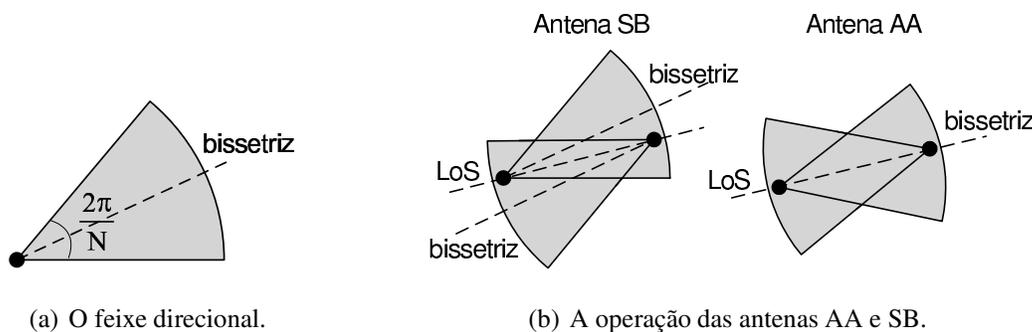


Figura 2.2: O modelo de antena direcional adotado.

2.1.2 Como Operam Antenas AA e SB

Quando a antena SB é usada, as N direções nas quais o feixe direcional pode apontar permitem que ele cubra 360° (não há sobreposição com o modelo adotado), portanto elas também são chamadas de feixe e numeradas de 1 a N (feixe 1 a feixe N). Diz-se que o feixe m está ativo ou que ele está se comunicando quando a antena aponta seu feixe direcional nessa direção. Essa nomenclatura será usada por simplicidade.

A orientação e o número de feixes N influenciam a forma como as antenas SB operam. A orientação é um conceito espacial, diz em que direção o feixe m sempre aponta e surge porque se supõe que as antenas sejam capazes de corrigir a direção do feixe m independentemente da posição e do movimento dos nós. Quando as antenas não corrigem a posição do feixe m , não há orientação. Nesse caso, a posição e o movimento dos nós alteram a direção na qual o feixe m aponta. Esses conceitos, associados a um N

ímpar ou par, produzem três modos de operação das antenas SB. Na verdade, tais modos são originários deste trabalho e foram introduzidos com o intuito de mostrar o que se deve considerar quando antenas SB forem aplicadas. Ainda não se havia encontrado na literatura qualquer referência a esses modos de operação, apesar de suas relevâncias.

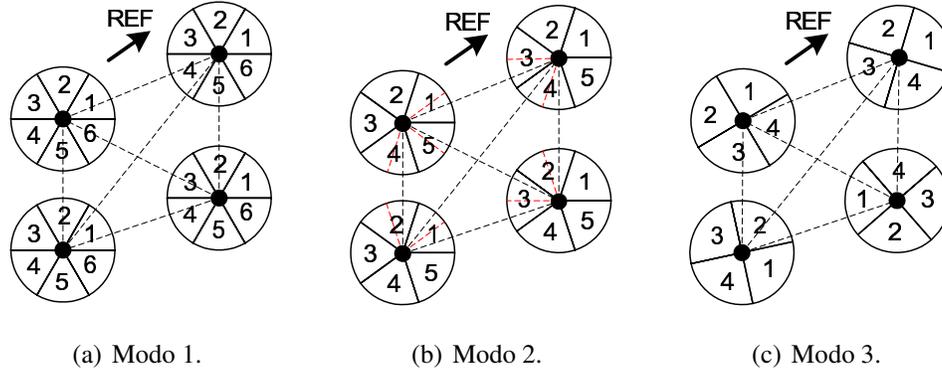


Figura 2.3: Modos de operação das antenas SB.

Modo 1 (Orientação com N Par). Nessas condições, o feixe m de uma antena comunica-se somente com o feixe p de outra antena. Na mesma antena, m e p formam ângulos opostos pelo vértice. A Figura 2.3(a) mostra os possíveis enlaces entre antenas de 6 feixes. A orientação adotada foi apontar o feixe 1 na direção *REF*. O Modo 1 é bem comportado e foi usado em muitos trabalhos com antenas direcionais [4, 9–15] em redes *ad hoc*.

Modo 2 (Orientação com N Ímpar). Nessas condições, o feixe m de uma antena pode se comunicar com o feixe x ou com o feixe y de uma outra antena. Na mesma antena, o feixe m e as bissetrizes dos feixes x e y , que são adjacentes, formam ângulos opostos pelo vértice. Na verdade, supondo-se o sentido anti-horário e que $x < y$, a primeira metade de m se comunica com a segunda metade de x , enquanto que a segunda metade de m se comunica com a primeira metade de y . Essa forma peculiar de comunicação dá ao Modo 2 uma interessante característica discutida no Capítulo 3. A Figura 2.3(b) mostra os possíveis enlaces entre antenas de 5 feixes. A orientação adotada foi também apontar o feixe 1 na direção *REF*.

Modo 3 (Sem Orientação). Nessas condições, independentemente do uso de um N ímpar ou par, não existe regra para a comunicação do feixe m de uma antena e o par de feixes comunicantes dependerá da posição das antenas. A ausência de orientação permite

que o feixe 1 seja apontado em qualquer direção, garantindo uma grande diversidade no par de feixes ativos. A Figura 2.3(c) mostra os possíveis enlaces entre antenas de 4 feixes.

As antenas AA operam sempre alinhadas, independentemente da condição ímpar ou par de N , e o conceito de orientação não se aplica nesse caso. É importante observar que, nos Modos 1 e 3, os nós podem assumir posições em que as antenas operem alinhadas. Assim, o modo de operar da antena AA é considerado um caso especial dos Modos 1 e 3. Essa conclusão é fundamental para a aplicação dos resultados do próximo Capítulo.

2.2 O Protocolo IEEE 802.11

Este trabalho procura estabelecer normas genéricas de redução da interferência, que possam ser observadas independentemente do protocolo MAC usado, desde que ele implemente algum mecanismo de reserva do meio. Não obstante, alguns conceitos básicos do protocolo IEEE 802.11 serão revisados, pois as simulações da Seção 4.2 usam o 802.11 na camada MAC e porque, na verdade, o 802.11 é o protocolo mais usado pela maioria das pesquisas como base para os protocolos MAC direcionais (*Directional MACs* - DMACs).

O método fundamental de acesso do IEEE 802.11, que é usado nas redes *ad hoc*, é uma Função de Coordenação Distribuída (*Distributed Coordination Function* - DCF) conhecida como Acesso Múltiplo por Detecção de Portadora com Prevenção de Colisão (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance* - CSMA/CA). Nesse método, um nó A da rede, antes de transmitir, escuta o meio (tenta detectar a presença de uma frequência portadora do sinal modulado) para determinar se outro nó já está transmitindo. Se o meio for interpretado como ocupado (existência de portadora), o nó A não transmitirá e aguardará o final da transmissão em andamento. Na verdade, uma comunicação entre dois nós é composta por duas ou mais transmissões de quadros de informação. O CSMA/CA requer que um nó interprete o meio como livre (ausência de portadora) por um período de tempo mínimo antes de transmitir e iniciar uma comunicação com outro nó, pois é necessário assegurar que toda a comunicação anterior entre outros dois nós tenha efetivamente terminado. Após esse tempo mínimo, que pode ser DIFS ou EIFS, o nó que está aguardando ainda precisa interpretar o meio como livre por mais um pe-

ríodo de tempo, dessa vez aleatório, chamado de *Backoff*. Esse procedimento ajuda a evitar colisões, pois DIFS e EIFS têm durações fixas e, sem *Backoff*, outros nós também aguardando estariam aptos a transmitir no mesmo instante. Durante uma comunicação, os nós envolvidos aguardam um tempo chamado SIFS entre as transmissões dos quadros de informação que compõem a comunicação. Todos esses tempos, exceto o EIFS, estão discriminados na Figura 2.4 e explicados a seguir:

- SIFS (*Short Interframe Space*) - Tempo de espera entre a troca dos quadros de informação (RTS, CTS e DADO) que compõem uma comunicação;
- DIFS (*DCF Interframe Space*) - Tempo mínimo de espera em que o meio deve ser interpretado como livre depois do final de uma comunicação cujos quadros de informação foram corretamente decodificados;
- EIFS (*Extended Interframe Space*) - Tempo mínimo de espera em que o meio deve ser interpretado como livre depois do final do recebimento de um quadro que não pôde ser decodificado. Como, nesse caso, não é possível extrair a informação sobre a duração da comunicação em andamento, os nós que pretendem transmitir precisam aguardar um período de tempo suficiente para que a comunicação acabe. Como a espera por EIFS é acionada sempre que um quadro não pode ser decodificado, o EIFS não está mostrado na Figura 2.4. EIFS tem um valor fixo e, dependendo da duração de toda a comunicação, ele e *Backoff* podem não ser suficientes, o que aumentaria a probabilidade de colisões.

A comunicação entre dois nós no modo DCF do 802.11 compõe-se das seguintes transmissões: RTS, CTS, DADO e ACK ou simplesmente DADO e ACK. Os quadros RTS (*Request to Send*) e CTS (*Clear to Send*) são os chamados **pacotes de reserva do meio**, pois carregam a informação sobre o tempo de duração de toda a comunicação. Com essa informação, os demais nós acionam uma espera automática chamada NAV (*Network Allocation Vector*), também conhecida como detecção virtual de portadora, pois não é necessário escutar o meio (detectar fisicamente a portadora) para saber se ele está ocupado. RTS e CTS são uma tentativa de se eliminar o problema do terminal escondido. Não se justifica usar RTS e CTS quando a duração do DADO for comparável à duração do

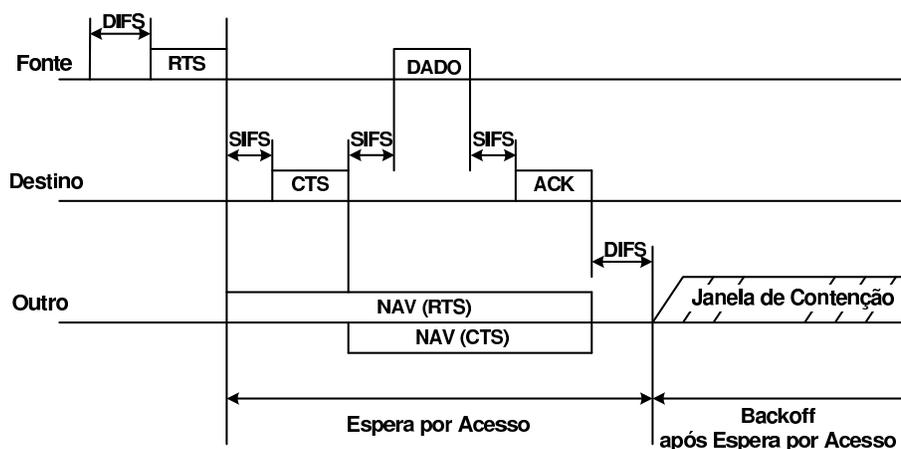


Figura 2.4: Períodos de tempo e quadros de informação do modo DCF do IEEE 802.11.

RTS; nessa situação, usam-se apenas DADO e ACK. O quadro ACK (*Acknowledgment*) é o reconhecimento de que o DADO foi recebido. Todos esses quadros estão mostrados na Figura 2.4.

2.3 Reserva do Meio

O mecanismo de reserva do meio é essencial para manter os nós cientes de uma comunicação em andamento. A reserva do meio é um mecanismo através do qual os nós comunicantes avisam seus vizinhos acerca da comunicação que vai se iniciar para que qualquer transmissão alheia seja postergada, o que evita colisões. Para isso, antes do efetivo início da comunicação, são enviados os chamados pacotes de reserva do meio, que contém informações necessárias a tal reserva.

Quando são usadas antenas direcionais, a região externa ao feixe direcional do nó transmissor (supondo-se o modelo de antena adotado, sem lóbulos secundários) transforma-se numa região de silêncio. Se a reserva do meio ocorresse apenas na região entre os nós comunicantes, uma grande região de silêncio poderia surgir e alguns vizinhos potencialmente interferentes não estariam cientes da comunicação, aumentando a probabilidade de colisões. Os efeitos dessa região podem ser minimizados se os pacotes de reserva do meio forem transmitidos em todas as direções, de forma a cobrir uma região circular centrada nos nós comunicantes. Esse procedimento é característico dos DMACs e é co-

nhecido como varredura (*sweeping*) [14, 15]. Este trabalho segue essa filosofia e assume que os pacotes de reserva do meio são chamados de RTS e CTS em alusão ao protocolo IEEE 802.11. A forma como a reserva circular do meio é executada pelas antenas é uma característica dos DMACs e não será aqui considerada.

2.4 Classificação da Interferência

Formalmente, a interferência é indiretamente medida através da relação sinal-ruído-mais-interferência (*Signal to Interference plus Noise Ratio* - SINR) no nó receptor. A Equação 2.1 calcula SINR, que indica quantas vezes a potência do sinal recebido (P_R) é maior do que a soma das potências (P_I) da interferência e do ruído presentes no meio. Geralmente, a SINR é expressa em dB.

$$SINR = \frac{P_R}{P_I} \quad (2.1)$$

Quando P_I assume um valor significativo, a SINR fica abaixo de um limiar (S), que é o valor mínimo para que se decodifiquem corretamente os pacotes de dados recebidos. Assim, por razões didáticas, a interferência é aqui classificada como primária ou secundária, o que vai permitir avaliar a capacidade de uma fonte de interferência de prejudicar uma comunicação.

A **interferência primária**, que causa a perda de pacotes e é também conhecida como **colisão**, ocorre sempre que o aumento do valor de P_I é suficiente para fazer a SINR ficar abaixo de S . A **interferência secundária**, entretanto, ocorre quando o aumento do valor de P_I ainda mantém a SINR acima de S , permitindo que os pacotes de dados continuem sendo corretamente decodificados.

Em virtude dessa classificação da interferência, torna-se possível classificar suas fontes. Uma **Fonte Primária de Interferência** (FPI) é aquela que, independentemente do nível de ruído presente, tem potência suficiente para sempre causar uma interferência primária no receptor. Por outro lado, uma **Fonte Secundária de Interferência** (FSI) é aquela que, desconsiderando-se o nível de ruído presente, só tem potência para causar

uma interferência secundária no receptor. Nota-se, entretanto, que duas ou mais FSIs concomitantes, ou apenas uma FSI num meio com nível de ruído bastante alto, também podem gerar uma interferência primária no receptor.

Conforme mostrado na Seção 2.5, em determinadas condições, as FPIs encontram-se a uma distância máxima do nó receptor. Além dessa distância, a fonte é apenas uma FSI. Uma forma de eliminar uma grande parcela da interferência é concentrar esforços na eliminação da influência das FPIs e garantir que qualquer colisão seja causada apenas por FSIs.

2.5 Modelo de Propagação do Sinal

Empregou-se o *Log-distance Path Loss* [16], um modelo de propagação semi-empírico que leva em consideração a influência do ambiente nas perdas de propagação, condição muito importante para que se produzam resultados mais conclusivos e abrangentes.

A parte analítica do modelo pode ser simplificada pela equação 2.2, onde P_R é a potência recebida por um nó quando outro está transmitindo um sinal de potência P_T . A influência do ambiente é dada pelo Fator de Perda no Caminho n ($n = 2$ para espaço livre), d é a distância entre os nós comunicantes e k sumariza a influência da frequência, do ganho das antenas e da distância de referência (relacionada à região de *Fraunhofer*).

$$P_R = \frac{P_T k}{d^n} \quad (2.2)$$

Quando dois nós se comunicam, surgem os seguintes alcances.

Alcance de Transmissão (d_T): distância ao redor do transmissor dentro da qual um pacote por ele transmitido pode ser corretamente decodificado.

Alcance de Portadora (d_C): distância ao redor do transmissor dentro da qual apenas a portadora do sinal transmitido pode ser identificada.

Alcance de Interferência Primária (d_I): distância ao redor do receptor dentro da qual um único nó interferente é sempre considerado uma FPI por causar uma interferência

primária no receptor.

Uma expressão para d_I pode ser encontrada. Assume-se um meio sem ruídos, onde todos os nós usam o mesmo padrão de antena (tipo e número de feixes) e transmitem com a mesma potência P_T . Quando dois nós distantes d estão se comunicando, a transmissão de um nó interferente distante r do receptor causa nele uma colisão se a SINR do receptor ficar abaixo de S . Através de (2.1) e (2.2), tem-se:

$$\frac{P_T k}{d^n} \bigg/ \frac{P_T k}{r^n} < S$$

Isso implica que é necessário $r < d \sqrt[n]{S}$ para que ocorra colisão no receptor. Assim:

$$d_I = d \sqrt[n]{S} \quad (2.3)$$

Portanto, todas as FPIs estão a uma distância menor do que d_I . Além de d_I , as fontes são apenas FSIs. Quando d_I é menor do que d_T , as FPIs podem decodificar os pacotes RTS ou CTS. A partir de (2.3), a condição $d_I < d_T$ implica que:

$$d < \frac{d_T}{\sqrt[n]{S}} \quad (2.4)$$

A Equação 2.4 mostra qual a maior distância entre os nós comunicantes para que todas as FPIs fiquem dentro do alcance de transmissão dos pacotes RTS ou CTS, i.e., dentro da região de reserva do meio. Nessa condição, portanto, as FPIs ficam cientes da comunicação em andamento e postergam suas transmissões. Esse é um resultado analítico, que independe do tipo de radiação (omnidirecional ou direcional) empregado. Se $S = 10$, $n = 4$ produz $d < 0.56d_T$ e $n = 2$ produz $d < 0.32d_T$. Isso indica que a distância entre os nós comunicantes não pode atingir o alcance de transmissão, o que pode reduzir a eficiência da rede.

2.6 Trabalhos Relacionados

[17] despendeu esforços para colocar as FPIs dentro do alcance dos pacotes RTS/CTS, usando antenas omnidirecionais sob o IEEE 802.11. Considerando $S = 10$ e usando o modelo de propagação *Two Ray Ground* ($n = 4$), a solução proposta assume que $d_I = 1.78d$ e rejeita qualquer tentativa de se estabelecer uma comunicação quando a distância entre os nós for maior do que $0.56d_T$. Isso faz d_I ser menor do que d_T , mas pode reduzir a eficiência da rede por demandar um maior número de saltos para se alcançar um determinado destino.

Depois que as antenas direcionais foram introduzidas nas redes *ad hoc*, surgiram importantes conceitos, DVCS (*Directional Virtual Carrier Sense*) e DNAV (*Directional NAV*) [18, 19], acerca de seu uso. Os mais recentes DMACs [14, 15] desenvolvidos, tidos como uma boa evolução dos anteriores, usaram DVCS, DNAV, introduziram o *sweeping* e são eficientes quanto à solução de alguns problemas críticos e peculiares ao emprego da radiação direcional. Entretanto, esses DMACs não consideraram a influência das FPIs e são vulneráveis quanto aos seus efeitos.

O trabalho aqui desenvolvido cobre e complementa os trabalhos em [20] e [21]. Em [20], foi dado o primeiro passo no sentido de se estabelecerem regras para a criação de cenários *ad hoc* imunes às influências das FPIs; as regras, entretanto, são pouco genéricas porque se abordou apenas o Modo 1 das antenas SB, usou-se o modelo de propagação *Two Ray Ground*, que não permite avaliar a influência das perdas de sinal conforme o meio, e não se avaliou a influência do limiar (S) da SINR. Em [21], estabeleceram-se, até agora, as regras mais genéricas para que todas as possíveis FPIs fiquem cobertas pelas áreas de reserva do meio; abordaram-se todos os modos (1, 2 e 3) de operação das antenas SB e foram avaliadas a influência das perdas de sinal conforme o meio e a influência do limiar (S) da SINR, mas não se mostrou como inibir o efeito das FPIs quando a regras mostram ser impossível cobrir o alcance de interferência primária.

Capítulo 3

Condições de Redução da Interferência

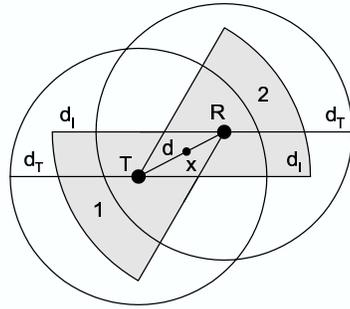
As condições de redução da interferência são aquelas que devem garantir que todas as FPIs fiquem dentro da área de reserva do meio. Existem quatro condições: d_{min} , d_{max} , Nm e PA . Todas serão claramente definidas ao longo deste capítulo.

No Capítulo 2, foram introduzidos os conceitos discriminados abaixo e torna-se necessário compreendê-los corretamente, pois todos serão exaustivamente usados nas demonstrações do presente Capítulo:

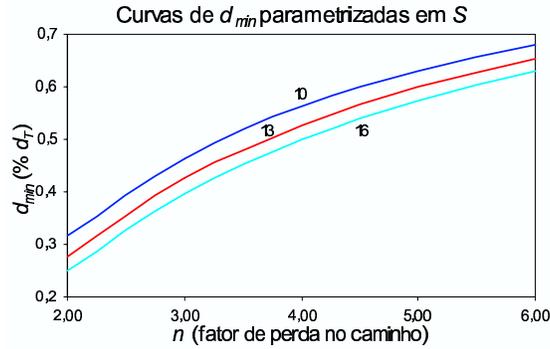
S	limiar de SINR	Seção 2.4
Modos 1, 2 e 3	modos de operação das antenas SB	Seção 2.1
N	número de feixes direcionais	Seção 2.1
n	Fator de Perda no Caminho	Seção 2.5
d_T	Alcance de Transmissão	Seção 2.5
d_I	Alcance de Interferência Primária	Seção 2.5

Em todas as figuras que serão apresentadas, T e R são dois nós distantes d que se comunicam com antenas direcionais idênticas depois que a reserva do meio foi executada. Os círculos de raio d_T centrados em T e R referem-se às áreas de reserva do meio. As regiões cinza são arcos de círculo de raio d_I (Equação 2.3), que têm a forma dos feixes direcionais das antenas e contém as FPIs que podem perturbar T e R . Como já mencionado, só são FPIs os nós interferentes dentro das regiões cinza. É necessário lembrar que as colisões são evitadas sempre que as FPIs podem decodificar os pacotes de reserva do meio, o que implicaria manter as regiões cinza completamente cobertas pelos círculos.

3.1 A Distância Mínima (d_{min}) entre os Nós Comunicantes



(a) Dois nós comunicando-se com antenas direcionais.



(b) Curvas de d_{min} .

Figura 3.1: Considerações iniciais sobre o uso da radiação direcional.

A Figura 3.1(a), onde $S = 10$ e $n = 4$, mostra que o uso das antenas direcionais produz resultados interessantes. O ponto x está a uma distância de $0,56d_T$ do nó T , limite para d_I ser menor do que d_T (conforme a Equação 2.4), mas R está além desse ponto. Isso realmente gera $d_I > d_T$, pois o círculo centrado em R não cobre a região 1 que, entretanto, está todo coberto pelo círculo centrado em T . A mesma análise pode ser feita para a região 2. Conclui-se que a radiação direcional permite que os nós estejam mais distantes do que o limite imposto por (2.4), e isso acontece por claras razões geométricas.

Quando os círculos cobrem as regiões cinza, é possível dizer que d_T cobre d_I , embora analiticamente ocorra $d_T < d_I$. Se as regiões 1 e 2 transformarem-se em círculos, simulando uma comunicação omnidirecional, d_T nunca cobrirá d_I e R deverá estar antes do ponto x e respeitar (2.4). Isso mostra quão limitado é o emprego de antenas omnidirecionais. Na verdade, x indica o limiar d_{min} , expresso pela Equação 3.1, acima do qual a distância entre os nós gera $d_I > d_T$ e exige o uso de antenas direcionais para se manter d_I coberto. Abaixo de d_{min} , ocorre $d_I < d_T$ e apenas uma antena omnidirecional seria necessária. Verifica-se que d_{min} é função de d_T e depende também dos parâmetros S e n , cuja combinação torna d_{min} mais próximo ou mais distante de d_T . A Figura 3.1(b) mostra o comportamento de d_{min} , expresso como um percentual de d_T , quando n varia. As curvas são parametrizadas em S .

$$d_{min} = \frac{d_T}{\sqrt[n]{S}} \quad (3.1)$$

Entretanto, d_I cresce conforme d cresce. Na Figura 3.2(a), os círculos não cobrem completamente as regiões cinza, que ficam ainda mais descobertas se a largura dos feixes aumenta, conforme as regiões de bordas tracejadas. Essa situação é perigosa porque as FPIs descobertas do receptor estariam fora do feixe direcional do transmissor, o que as tornaria fontes ativas de colisão por não conseguirem detectar a portadora do sinal transmitido. Um procedimento simples para cobrir d_I novamente e evitar tal situação é diminuir a largura do feixe direcional.

3.2 Exploração da Geometria

Dependendo dos modos de operação (Modos 1, 2 e 3) das antenas SB, surgem diferentes regras geométricas que influenciam a relação entre d_T e d_I . Todos esses Modos serão considerados no cálculo das outras três condições de redução da interferência que ainda não foram explicadas: d_{max} , Nm e PA . Os resultados produzidos também podem ser aplicados às antenas AA, cuja forma de operar é um caso especial dos Modos 1 e 3.

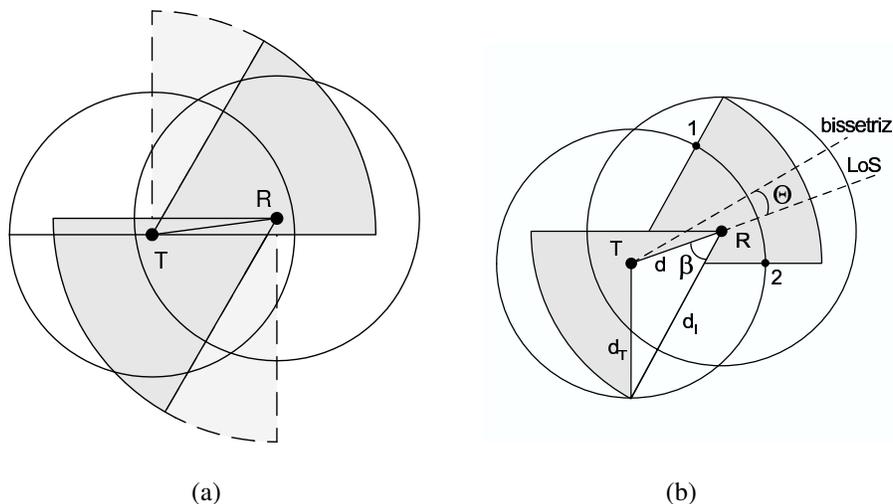


Figura 3.2: Antenas no Modo 1.

Na Figura 3.2, as antenas operam no **Modo 1**, portanto os dois feixes que estão envolvidos na comunicação geram apenas duas regiões cinza. Nota-se que as bordas horizontais

dessas regiões são paralelas. O mesmo acontece para as bordas inclinadas. Esse paralelismo está sempre presente no Modo 1 e implica, por razões geométricas, que ambas as regiões cinzas estão cobertas pelos círculos (Figura 3.2(b)) ou ambas estão descobertas (Figura 3.2(a)), revelando importante simetria. A Figura 3.2(b) mostra como a geometria pode ser explorada para definir as condições em que d_T sempre cobre d_I .

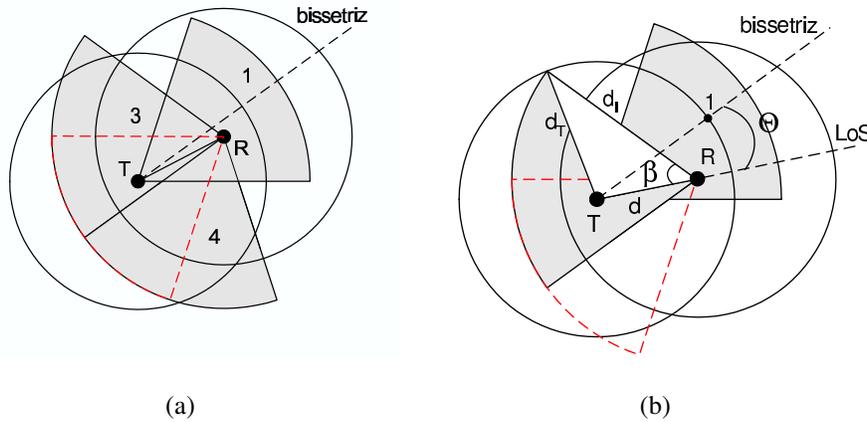


Figura 3.3: Antenas no Modo 2.

Na Figura 3.3, as antenas operam no **Modo 2**. Lembrando que nesse modo o feixe m de uma antena pode se comunicar com o feixe x ou com o feixe y de uma outra antena, surgem três possíveis regiões cinza na Figura 3.3(a): as regiões 3 ou 4, perturbando R , e a região 1, perturbando T . A região 1 está sempre ativa. Entretanto, a região 3 fica ativa quando R encontra-se abaixo da bissetriz; se R encontra-se acima da bissetriz, é a região 4 que fica ativa. Está claro que as fronteiras das regiões ativas nunca são paralelas, então não é possível concluir que ambas estejam cobertas ou descobertas. Isso é mostrado na figura, onde as regiões 1 e 3 estão ativas. Conclui-se que é necessário estabelecer uma condição (que também se aplica à região 4) para cobrir a região 3 e uma outra para cobrir a região 1 e, em seguida, combiná-las. A Figura 3.3(b) mostra como a geometria pode ser explorada para definir as condições que garantem a região 3 sempre coberta. Em relação à região 1, vê-se que ela e a de bordas pontilhadas (cujas fronteiras são as bissetrizes das regiões 3 e 4) têm a simetria já investigada no Modo 1. Portanto, a Figura 3.2(b) já revelou o caminho para definir as condições de cobertura da região 1. Assim, o Modo 2 deve ser considerado um modo dual porque precisa respeitar também as condições de cobertura do Modo 1.

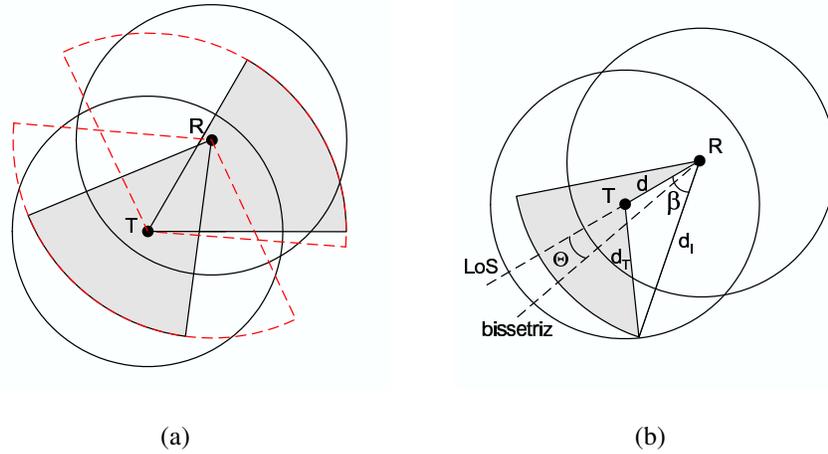


Figura 3.4: Antenas no Modo 3.

Na Figura 3.4, as antenas operam no **Modo 3**. As linhas pontilhadas na Figura 3.4(a) delimitam as áreas dentro das quais as regiões cinza podem estar inseridas. O limite para inseri-las é o limite para os nós se comunicarem, o que ocorre sempre que a borda esquerda ou a direita das regiões cinza estiverem sobre os nós. O posicionamento dos nós ocorre de forma independente, descartando que sempre ocorra paralelismo entre as bordas das regiões cinza. Portanto, não é regra que ambas as regiões cinzas estejam cobertas ou descobertas. A Figura 3.4(b) mostra como a geometria pode ser explorada para definir as condições que garantem apenas uma região cinza sempre coberta. No Modo 3, a geometria é explorada da mesma maneira que no Modo 1, mas, no Modo 3, os nós devem respeitar as condições de cobertura individualmente para que ocorra a cobertura total desejada.

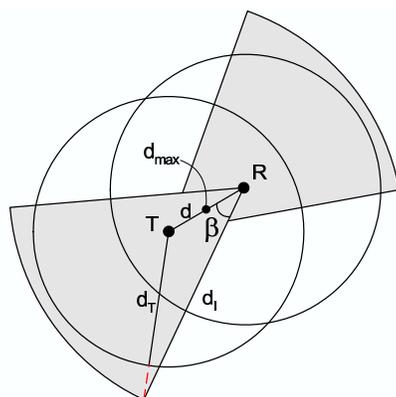
Nas Figuras 3.2(b), 3.3(b) e 3.4(b), as antenas estão implementando N feixes de largura $2\pi/N$. Em todas elas, exceto na 3.3(b) devido ao seu modo dual, os círculos cobrem as regiões cinza, o que significa que todas as FPIs podem decodificar os quadros de reserva do meio. Notório é o mesmo padrão com o qual a geometria é explorada: β representa o ângulo entre os segmentos d e d_I , enquanto θ , o ângulo entre o LoS e a bissetriz mostrada, i.e., a separação angular dos nós. As antenas estão alinhadas sempre que a bissetriz está sobre o LoS, o que significa que θ é zero. β assume um valor entre π/N e $2\pi/N$. Aplicando-se a Lei dos Cosenos ao triângulo $dd_I d_T$, tem-se:

$$\cos(\beta(d)) = \frac{d^2 + d_I^2 - d_T^2}{2dd_I}$$

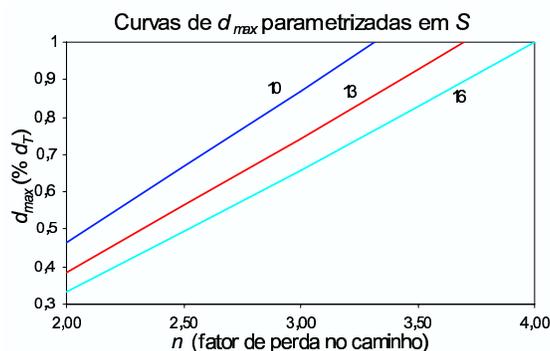
Com (2.3) eliminando d_I , encontra-se a Equação 3.2, que estabelece o valor que β deve assumir para que as regiões cinza fiquem completamente cobertas quando a distância entre os nós vale d . Se d diminui, β aumenta. Fica mais fácil compreender tal fato através das figuras: quando d diminui, d_I também diminui, tornando menores as regiões cinza e permitindo que β aumente. Na verdade, β nada mais é do que um simples artifício para calcular o máximo valor que θ , o deslocamento angular entre os nós, pode assumir sem que as regiões cinza fiquem descobertas. Existe uma relação matemática entre β e θ , que será oportunamente mencionada na Seção 3.5.

$$\beta(d) = \cos^{-1} \left(\frac{1 + \sqrt[3]{S^2 - (d_T/d)^2}}{2\sqrt[3]{S}} \right) \quad (3.2)$$

3.3 A Distância Máxima (d_{max}) entre os Nós Comunicantes



(a) Interpretação geométrica da impossibilidade de calcular β quando $d > d_{max}$.



(b) Curvas de d_{max} .

Figura 3.5: Considerações sobre d_{max} .

S e n são parâmetros também da Equação (3.2) e podem assumir valores que tornem impossível calcular β em determinado d . Isso acontece quando S e n geram, com os nós separados por uma distância d , regiões cinza tão grandes que não possam ser cobertas pelos círculos, tornando impossível formar o triângulo $dd_I d_T$ e, portanto, calcular β . A Figura 3.5(a) mostra essa situação, onde o cateto oposto a β deve ser maior do que d_T .

para que o triângulo se forme. Nessas circunstâncias, a única solução para o problema é reduzir o tamanho das regiões cinza através da redução da distância d entre os nós (lembrando a Equação 2.3). Na verdade, d não pode ultrapassar um certo limite, d_{max} , que está indicado também na Figura 3.5(a). Se $d \geq d_{max}$, não existe β e as regiões cinza estão sempre descobertas. Se $d < d_{max}$, é possível calcular β para cobrir as regiões cinza.

Analicamente, β não pode ser calculado quando for maior do que 1 o argumento do \cos^{-1} da Equação 3.2. Se a expressão for resolvida, encontra-se d_{max} :

$$d_{max} = \frac{d_T}{\sqrt{1 + \sqrt[n]{S^2} - 2\sqrt[n]{S}}} \quad (3.3)$$

A Figura 3.5(b) mostra o comportamento de d_{max} , expresso como um percentual de d_T , quando n varia. As curvas são parametrizadas em S (foram omitidas as parametrizações em 11, 12, 14 e 15, cujas curvas ficam muito próximas das mostradas). Nota-se que d_{max} pode ser maior do que d_T , resultado muito importante pois, para tais valores de S e n , **a distância entre os nós pode assumir o alcance de transmissão.**

3.4 O Número Mínimo (Nm) de Feixes Direcionais

Nm é o número mínimo de feixes com o qual d_T sempre cobre d_I independentemente da posição dos nós. A melhor forma de calcular Nm é determinar as posições que T e R devem assumir nas Figuras 3.2(b), 3.3(b) e 3.4(b) para que se produzam regiões cinza descobertas ao máximo e, em seguida, aplicar em (3.2) os correspondentes valores de d e β . Esse procedimento garante que as regiões cinza permanecerão cobertas em qualquer outra posição que os nós ocupem. Por simplicidade, R assumirá as posições desejadas, enquanto T permanecerá imóvel. No Modo 1, a Figura 3.2(b) mostra os pontos 1 e 2 como os alvos. No Modo 2, apenas as regiões 3 e 4 devem ser consideradas (lembrando seu modo dual e que as condições do Modo 1 já foram estabelecidas), portanto o alvo é apenas o ponto 1 na Figura 3.3(b). No Modo 3, a Figura 3.4(b) não mostra qualquer ponto específico, portanto os alvos ocorrem sempre que R está posicionado no alcance de transmissão e uma das bordas da região cinza está sobre o LoS. Para todos os alvos encontrados, vê-se facilmente que $d = d_T$ e $\beta = 2\pi/N$, implicando que d_I e β assu-

mem seus máximos. Aplicando-se esses valores em (3.2) e usando-se o operador \lceil para fornecer um número inteiro, encontra-se a Equação 3.4, onde N passa a se chamar Nm . Observa-se, analiticamente, que (3.4) depende apenas de n e S , portanto a posição dos nós é realmente irrelevante. Esse resultado contempla todos os Modos das antenas SB e as antenas AA.

$$Nm = \lceil \left(2\pi / \cos^{-1} \left(\frac{\sqrt[n]{S}}{2} \right) \right) \rceil \quad (3.4)$$

3.4.1 Influência de S e n

Tabela 3.1: Nm para alguns valores de S e n .

$n \backslash S$	10	11	12	13	14	15	16
6	9	9	9	10	10	10	10
5	10	10	11	11	12	12	13
4	14	15	17	20	25	36	∞
3.9	15	17	19	24	35	*	*
3.8	16	19	23	24	*	*	*
3.7	17	22	31	*	*	*	*
3.6	20	28	83	*	*	*	*
3.5	24	50	*	*	*	*	*
3.4	36	*	*	*	*	*	*
3.3	*	*	*	*	*	*	*

A Tabela 3.1 mostra os valores que Nm assume para diferentes valores de n e S . Quando $S = 16$ e $n = 4$, $\cos(2\pi/Nm) = 1$, portanto Nm é matematicamente impossível. Isso significa que, mesmo que as antenas implementem um feixe extremamente estreito, as regiões cinza não podem estar sempre cobertas porque $d_I = 2d_T$ (Equação 2.3) quando $d = d_T$. Isso está ilustrado na Figura 3.6(a), onde a largura do feixe deveria ser zero para que a região cinza se transformasse numa linha e coubesse dentro do círculo. As posições da tabela preenchidas com o símbolo $*$ podem ser compreendidas da mesma forma. Entretanto, para esses valores de n e S , (3.4) não pode ser resolvida porque $\cos(2\pi/Nm) > 1$, i.e., $d_I > 2d_T$ quando $d = d_T$, como ilustrado na Figura 3.6(b).

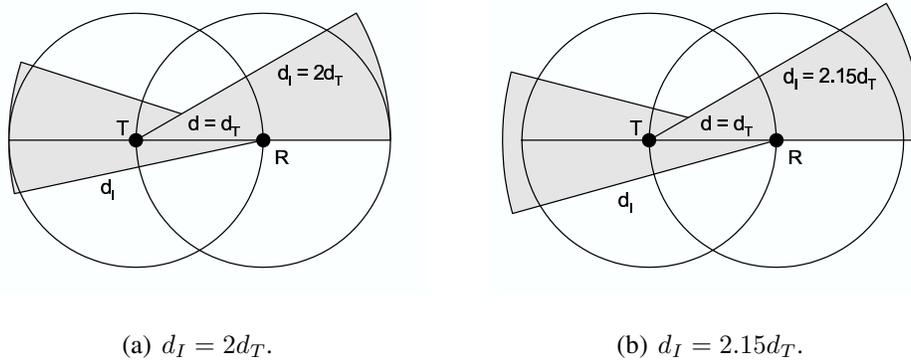


Figura 3.6: Quando Nm não pode ser calculado.

Nota-se que Nm não pode ser calculado toda vez que a combinação de S e n gerar $d_I \geq 2d_T$, o que acontece sempre que $n \leq 3.3$ (Tabela 3.1). Conforme [16], $n \leq 3$ expressa ambientes do tipo *Free Space* ou *In Building LoS*, onde, portanto, é impossível ter d_T sempre cobrindo d_I .

Analicamente, Nm deriva de 3.2 quando $d = d_T$. Se, dados S e n , Nm não existir, a Equação 3.2 com $d = d_T$ não tem solução e $d_{max} \leq d_T$; se Nm existir, a Equação 3.2 com $d = d_T$ tem solução e $d_{max} > d_T$. Portanto, **conseguir calcular Nm é uma forma simples de dizer se as comunicações podem atingir o alcance de transmissão.**

3.5 O Máximo Afastamento Angular (PA) entre os Nós

A Tabela 3.1 mostra que Nm pode assumir altos valores e tornar-se não factível, o que exige que as antenas implementem menos do que Nm feixes. Entretanto, a posição dos nós passa a ser relevante. Essa restrição é melhor compreendida se novamente forem observadas as Figuras 3.2(b), 3.3(b) e 3.4(b), onde θ , a separação angular entre os nós, assume um valor que produz regiões cinza cobertas (exceto na Figura 3.3(b) por causa da dualidade do Modo 2). Se a distância d entre os nós aumenta e θ permanece constante, d_I cresce e as regiões cinza ficam descobertas. Como a largura do feixe não pode ser ajustada, a única forma de novamente cobrir as regiões cinza é reduzir θ . Portanto, para o novo d estabelecido, há um novo θ revelando qual a máxima separação angular que os nós podem ter. Esse limiar para θ é PA (Prevenção Angular), que exerce agora a função de Nm e indiretamente diz quês posições os nós podem assumir sem descobrir d_I . Todos

os desenhos mostram que θ assume um valor entre 0 e π/N (metade da largura do feixe), entretanto PA requer uma análise mais elaborada, que será feita conforme os Modos das antenas SB.

3.5.1 Modos 1 e 3

As Figuras 3.2(b) e 3.4(b) mostram θ assumindo o limiar PA para um dado d . Uma expressão para θ pode ser facilmente encontrada através da geometria: $\theta = \beta - \pi/N$. Com (3.2) substituindo β , surge:

$$PA(d) = \cos^{-1} \left(\frac{1 + \sqrt[n]{S^2 - (d_T/d)^2}}{2\sqrt[n]{S}} \right) - \frac{\pi}{N} \quad (3.5)$$

Com (3.5), é possível traçar curvas em função de d e parametrizadas em N . A Figura 3.7 mostra algumas dessas curvas quando $S = 10$ e $n = 4$. Nas abscissas, a distância d entre T e R é dada em percentuais de d_T . Nas ordenadas, $PA(d)$ também é dado em valores percentuais (100% significa $PA = \pi/N$, o máximo valor que θ pode assumir) para que as curvas possam ser comparadas. É necessário lembrar que as curvas de N ímpar referem-se ao Modo 3 e não podem ser usadas no Modo 1, que considera apenas N par.

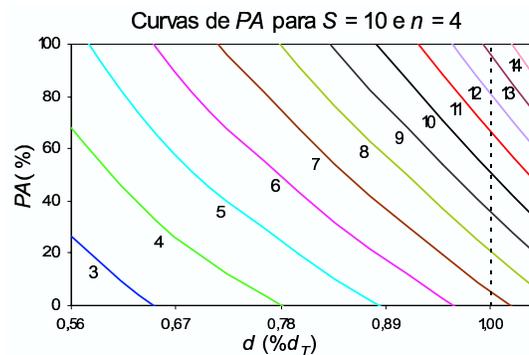


Figura 3.7: Curvas de PA para os Modos 1 e 3. As curvas começam na abscissa $d_{min} = 0.56d_T$.

As curvas auxiliam a compreender os valores que PA pode assumir em algum $d = \delta$.

- Se $PA(\delta) > 0$, d_T cobre d_I em $d = \delta$ sempre que $\theta \leq PA(\delta)$. Quando $PA(\delta) \geq$

100%, θ pode assumir seu máximo, mostrando que as regiões cinza ficam todo cobertas mesmo que os nós se comuniquem com o deslocamento angular máximo; se δ diminui, $PA(\delta)$, que já era maior do que 100%, cresce. Portanto, quando $PA(\delta) \geq 100\%$, as posições de R e T tornam-se irrelevantes desde que a distância entre eles fique abaixo de δ . Nesse caso, N pode ser considerado um "Nm virtual" para $d \leq \delta$. Esse resultado pode ser bastante útil. Na Figura 3.7, qualquer $N \geq 5$ pode ser considerado um "Nm virtual". Seguindo esse raciocínio, se N é tal que $PA(d_T) \geq 100\%$, a posição dos nós torna-se irrelevante e a antena já está implementando mais do que Nm feixes, como mostra a Figura 3.7 quando $N \geq 14$; esse resultado é ratificado pela Tabela 3.1, que mostra $Nm = 14$.

- Se $PA(\delta) = 0$, d_T só cobre d_I em $d = \delta$ se $\theta = 0$, mostrando que as antenas devem estar alinhadas. Se $d > \delta$, $PA(\delta) < 0$, implicando que δ é a maior distância que os nós podem ter.
- Se $PA(\delta) < 0$, d_T não cobre d_I em $d = \delta$ e a distância entre os nós deve diminuir.

Diante da análise acima, fica mais fácil avaliar o desempenho das curvas da Figura 3.7. A performance das antenas de 3 e 4 feixes é muito fraca: suas curvas não têm $PA(d) = 100\%$ e ainda mostram que $PA(0.65d_T) = 0$ com 3 feixes e $PA(0.78d_T) = 0$ com 4 feixes, o que significa que os nós não podem usar todo o alcance de transmissão. Quanto maior o número de feixes, melhor o desempenho, como mostram as curvas de 7, 8, 9, 10, 11 e 12 feixes, onde $PA(d_T) > 0$. Para esses valores de N , os nós atingem o alcance de transmissão se $\theta \leq PA(d_T)$. 13 feixes já são quase Nm .

3.5.2 Modo 2

A Figura 3.3(b) mostra θ assumindo o limiar PA para um dado d . Como já discutido, o procedimento para que todas as regiões cinza fiquem cobertas é determinar as condições de cobertura de cada uma e combiná-las em seguida. A condição de cobertura da região que perturba T refere-se ao Modo 1 e já resultou em PA . A avaliação seguinte destina-se à condição de cobertura da região que perturba R . Se θ diminui, d_I fica descoberto, mas ele fica mais coberto se θ aumenta, o que revela uma importante característica: o limiar

PA estabelece o valor mínimo (não mais o valor máximo como no Modo 1) que o ângulo θ pode assumir para que d_T cubra d_I . A geometria revela $\theta = 2\pi/N - \beta$. Com (3.2) substituindo β , produz-se uma nova expressão chamada PA_{dual} .

$$PA_{dual}(d) = \frac{2\pi}{N} - \cos^{-1} \left(\frac{1 + \sqrt[3]{S^2 - (d_T/d)^2}}{2\sqrt[3]{S}} \right) \quad (3.6)$$

Agora a dualidade do Modo 2 é melhor compreendida: para uma dada distância d entre os nós, θ deve ser maior do que PA_{dual} e menor do que PA . Essa característica é um importante fator redutor do desempenho das antenas que operam no Modo 2, já que os limiares podem estar bem próximos ou, em alguns casos, PA_{dual} pode exceder PA , forçando os nós a reduzirem d .

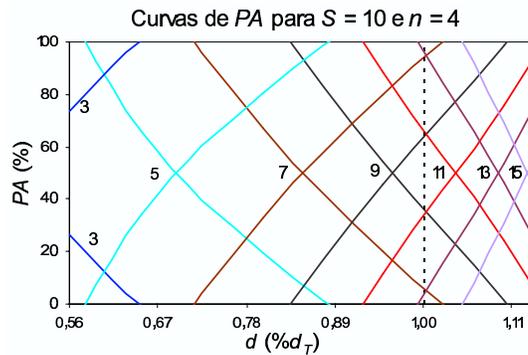


Figura 3.8: Curvas de PA para os Modo 2. As curvas começam em $d_{min} = 0.56d_T$.

Com (3.5) e (3.6), também é possível traçar curvas em função de d e parametrizadas em N . Na Figura 3.8, onde $S = 10$ e $n = 4$, as curvas de coeficiente angular negativo são PA e as de coeficiente angular positivo, PA_{dual} . Cada ponto de junção dessas curvas fornece o valor máximo (d_{jp}) que d pode assumir com N feixes para que a dualidade do Modo 2 seja respeitada. Abaixo de d_{jp} , θ deve estar entre as curvas. A Figura 3.8 mostra que a antena de 3 feixes nunca fornece a cobertura total exigida, enquanto a de 11 feixes consegue fornecê-la até em $d = d_T$.

A natureza de PA e PA_{dual} mostra que suas curvas são perfeitamente simétricas em relação a d_{jp} . Igualando-se (3.5) e (3.6), surge $PA = \pi/2N$, ou seja, o ponto de junção sempre ocorre em $PA = 50\%$. Resolvendo (3.5) ou (3.6) com $PA = \pi/2N$, produz-se uma expressão para d_{jp} :

$$d_{jp} = \frac{d_T}{\sqrt{1 + \sqrt[n]{S^2} - 2\sqrt[n]{S}\cos(3\pi/2N)}}$$

As restrições impostas por PA_{dual} referem-se apenas aos valores que θ pode assumir e não influenciam as condições de existência de um "Nm virtual" ou de $N \geq Nm$. Portanto, será "Nm virtual" em $d \leq \delta$ todo aquele N onde $PA(\delta) \geq \pi/N$ ou $PA_{dual}(\delta) \leq 0$. Da mesma forma, ocorre $N \geq Nm$ se $PA(d_T) \geq \pi/N$ ou $PA_{dual}(d_T) \leq 0$. A Figura 3.8 mostra que qualquer $N \geq 5$ é um "Nm virtual" e que $N \geq Nm$ quando $N \geq 15$.

3.5.3 Influência de S e n

As Figuras 3.7 e 3.8 serão **figuras-base** e servirão de referência para que se avalie a influência de S e n sobre as curvas de PA . É necessário ter em mente que, assim como Nm , PA deriva de (3.2) e suas curvas não existem quando $d > d_{max}$. Todos os gráficos têm d_{min} como abscissa inicial.

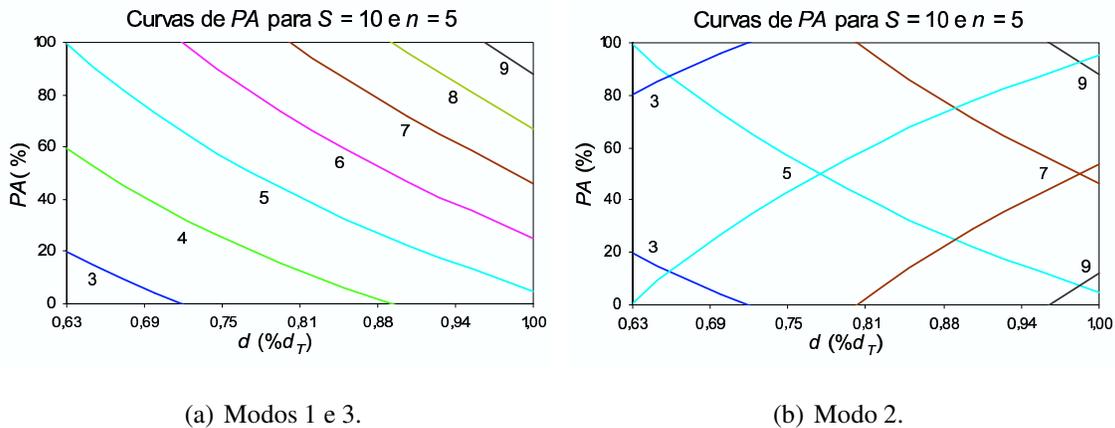


Figura 3.9: As curvas deslocam-se para a direita quando $n = 5$.

Se S diminui ou n aumenta, as curvas das **figuras-base** deslocam-se para a direita e criam melhores condições para que as regiões cinza fiquem cobertas. Como $S = 10$ é um valor bastante usual nos circuitos de comunicação, a Figura 3.9 mostra os deslocamentos para a direita quando apenas n varia e assume o valor 5. Nota-se que $d_{max} > d_T$ porque as curvas atingem d_T .

Entretanto, se S aumenta ou n diminui, as curvas das figuras-base deslocam-se para a

esquerda e criam piores condições para que as regiões cinza fiquem cobertas. As Figuras 3.10, 3.11 e 3.12 mostram esses deslocamentos para a esquerda com algumas combinações de valores de S e n que sempre geram $d_{max} < d_T$.

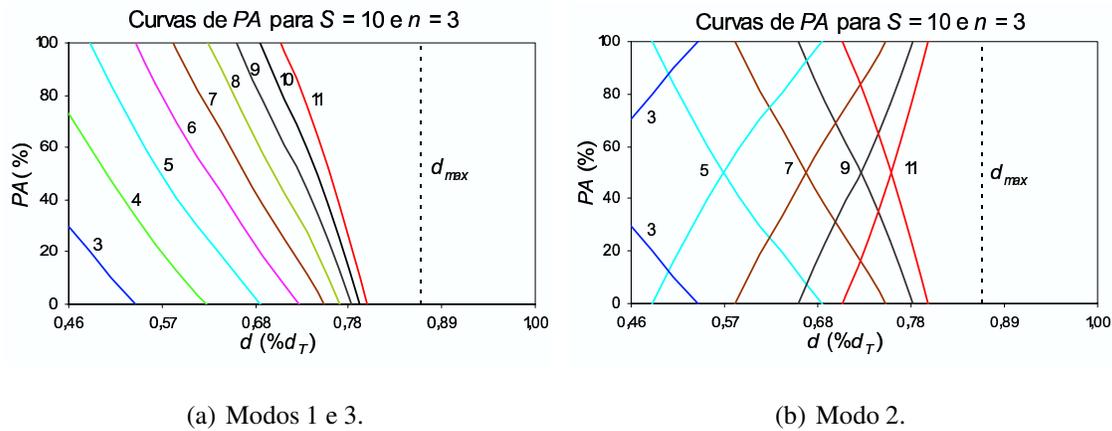


Figura 3.10: As curvas deslocam-se para a esquerda quando $n = 3$.

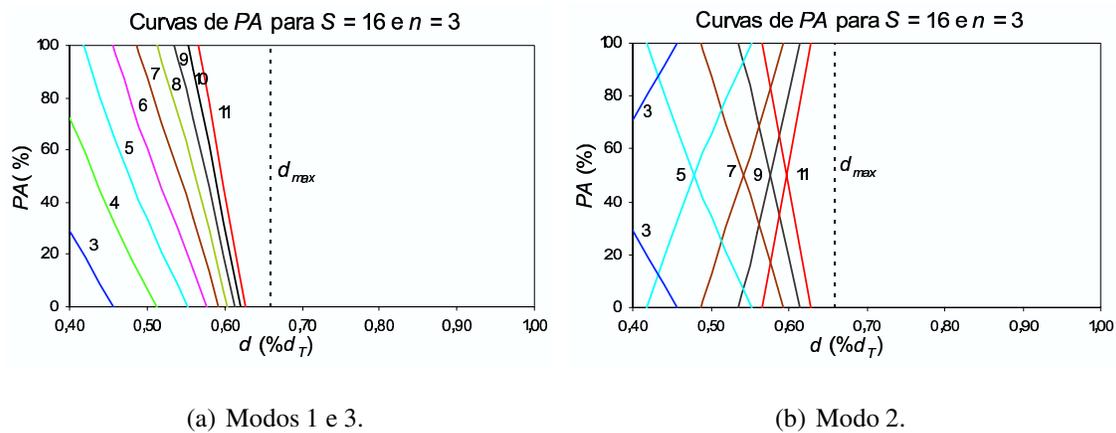


Figura 3.11: As curvas deslocam-se mais para a esquerda quando $S = 16$ e $n = 3$.

Quando $d_{max} < d_T$, nota-se que as curvas de PA cruzam as abscissas em valores anteriores a d_{max} , implicando que só é possível eliminar o efeito das FPIs se a distância entre os nós for ainda menor do que d_{max} . Aumentar o número de feixes N realmente faz a correspondente curva deslocar-se para a direita até que ela se torne vertical em d_{max} . Entretanto, N deve assumir valores muito grandes para que isso aconteça, fugindo da filosofia de PA , que funciona como uma alternativa à necessidade de implementar um N grande. A Figura 3.13, onde o Modo 2 foi escolhido por encerrar os dois tipos de curva de PA , ratifica que as curvas tornam-se verticais em d_{max} com o aumento de N , mas mostra que, proporcionalmente, é desprezível o aumento na distância entre os nós.

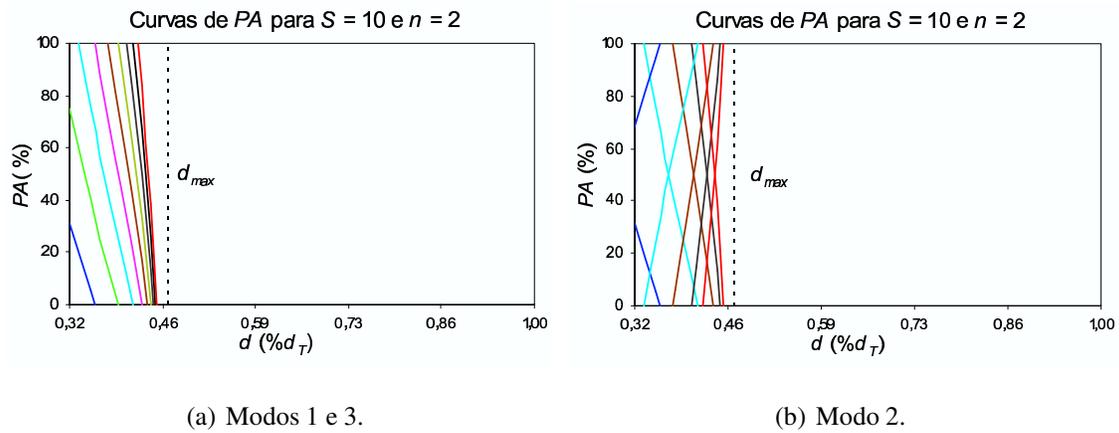


Figura 3.12: As curvas deslocam-se bastante para a esquerda quando $n = 2$.

A melhor solução é respeitar o que fornecem as curvas de PA com N pequeno. Quando d_{max} aproxima-se de d_{min} (Figura 3.12), as curvas aglomeram-se e realmente não há praticidade no aumento de N .

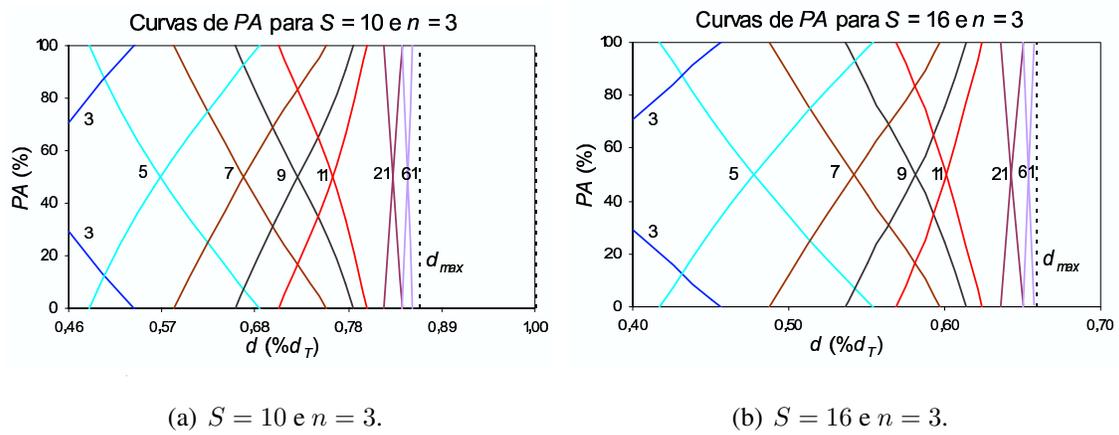


Figura 3.13: As curvas tornam-se verticais em d_{max} quando N é aumentado (21 e 61 feixes). Uma variação de aproximadamente 400% em N gera um aumento de menos de 10% em d .

Capítulo 4

Análise

ESTE capítulo sintetiza os conceitos do Capítulo 3 em procedimentos que devem ser adotados para que se garanta que os cenários *ad hoc* não sejam influenciados pelas colisões geradas por FPIs.

As Regras de Cobertura da Seção 4.1 indicam, quando possível, o tipo de antena e o número de feixes que devem ser usados em determinado cenário *ad hoc* para manter o Alcance de Transmissão (d_T) sempre cobrindo o Alcance de Interferência Primária (d_I), garantindo que qualquer FPI fique dentro do alcance dos pacotes de reserva do meio. As simulações da Seção 4.2 mostram alguns resultados interessantes: um deles é o porquê da necessária adequação dos DMACs para assegurar que as FPIs respeitem a reserva do meio; outro resultado importante, que serve como complemento das Regras de Cobertura, é a possibilidade de ainda se evitarem as colisões geradas por FPIs quando d_I estiver apenas parcialmente coberto por d_T . A Seção 4.3 revela a influência do Alcance de Detecção de Portadora (d_C) quando d_I está ou não coberto por d_T . Por fim, a Seção 4.4 mostra como os lóbulos secundários das antenas direcionais podem influenciar o surgimento de FPIs fora do lóbulo principal e explica o porquê de as antenas terem sido modeladas sem lóbulos secundários.

Antes do efetivo início das análises, torna-se bastante didático reiterar as condições de redução da interferência e mais alguns conceitos, todos introduzidos no Capítulo 3 e extremamente importantes para a perfeita compreensão do presente Capítulo. São eles:

- d_{min} Distância mínima entre os nós comunicantes para que seja necessário o uso de antenas direcionais. Abaixo de d_{min} , antenas omnidirecionais são suficientes (Seção 3.1).
- d_{max} Distância máxima que os nós comunicantes podem assumir. Acima de d_{max} , não há antena ou número de feixes direcionais que cubram d_I com a área de reserva do meio (Seção 3.3).
- Nm Número mínimo de feixes que a antena direcional deve implementar para que a área de reserva do meio cubra d_I independentemente do tipo de antena usado e da posição dos nós. A impossibilidade de calcular Nm mostra que os nós não podem usar todo o alcance de transmissão porque d_{max} torna-se menor do que d_T (Seção 3.4).
- PA Alternativa ao uso de Nm feixes quando Nm assumir valores grandes e não factíveis. PA mostra o máximo afastamento angular que os nós comunicantes podem ter para que d_I ainda permaneça dentro da área de reserva do meio. PA depende da distância entre os nós e do número de feixes direcionais que a antena implementa (Seção 3.5).
- PA_{dual} Mínimo afastamento angular que os nós comunicantes devem ter. Deve ser usado apenas no Modo 2 das antenas SB, em complemento a PA (Seção 3.5.2).
- d_{jp} Ponto de interseção das curvas de PA e PA_{dual} (Seção 3.5.2).
- θ Afastamento angular entre os nós comunicantes (Seção 3.2).
- d Distância entre os nós comunicantes.

4.1 Regras de Cobertura

Com os parâmetros S e n previamente determinados, as Regras de Cobertura (RC) são, simplesmente, uma forma de usar adequadamente os conceitos Nm , PA , d_{min} e d_{max} , inserindo-os numa sequência de procedimentos que devem ser seguidos, conforme o cenário *ad hoc*, para determinar quando e como d_T cobre d_I . Quando d_T pode cobrir d_I , as RC mostram se são suficientes antenas omnidirecionais ou definem, quando antenas

direcionais forem necessárias, o tipo (AA ou SB) a usar e o número (N) de feixes direcionais a implementar. Esse resultado deve ser respeitado por todos os nós da rede, ou seja, **todos os nós devem usar a mesma antena com o mesmo número de feixes**¹.

É necessário lembrar que as antenas AA mantêm-se sempre alinhadas, garantido $\theta = 0$ e podendo ser usadas sempre que $PA(d) > 0$. Por outro lado, as antenas SB não garantem um valor fixo para θ e só podem ser usadas quando $PA(d) > \theta$.

4.1.1 Cenários Estáticos com Posicionamento Aleatório de Nós

Nesse tipo de cenário, d e θ assumem qualquer valor e podem atingir seus máximos d_T e π/N respectivamente. Como não é possível garantir que $d < d_{min}$, antenas direcionais devem ser usadas.

Se Nm pode ser calculado e $N \geq Nm$, qualquer tipo de antena (AA ou SB em qualquer Modo) pode ser usado.

Se Nm pode ser calculado e $N < Nm$, θ deve estar sempre abaixo de PA . Antenas AA podem ser usadas com N que forneça $PA(d_T) > 0$. Antenas SB só podem ser usadas com N que forneça $PA(d_T) > 100\%$, mas, nessa condição, conforme a análise de PA da Seção 3.5.1, tem-se que $N \geq Nm$ e há uma contradição pois supõe-se que $N < Nm$. Portanto, é impossível usar antenas SB.

Se Nm não pode ser calculado, ocorre $d_{max} < d_T$. Como d pode atingir d_T e ser maior do que d_{max} , é impossível garantir que o cenário tem d_T cobrindo d_I em todos os nós comunicantes.

Todo esse procedimento acima está sumarizado na Figura 4.1.

¹O uso de antenas diferentes gera ganhos também diferentes de recepção e transmissão, que passariam a integrar a Equação 2.3, alterando o cálculo de d_I . Isso não permitiria que se considerassem os Modos 1 e 2 de operação das antenas SB, que passariam a ser um caso especial do Modo 3 quando as antenas fossem iguais, e exigiria uma readaptação das Regras de Cobertura. Este trabalho não cobre explicitamente o uso de antenas diferentes nos nós, mas tem a base teórica pronta para uma satisfatória extensão, que será sugerida como trabalhos futuros.

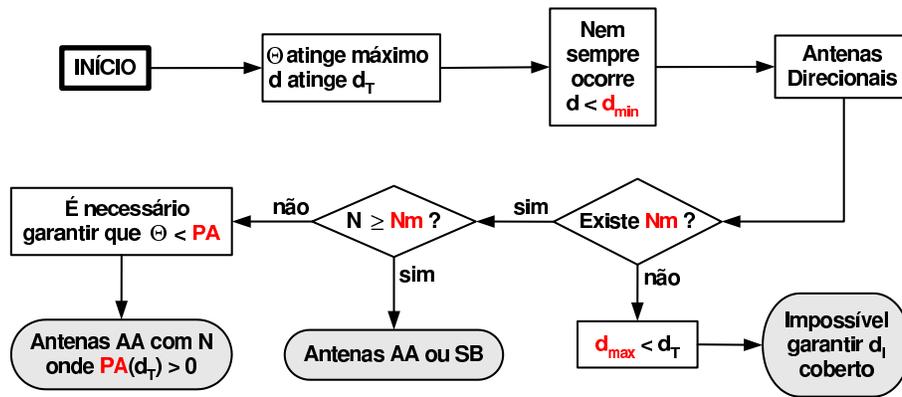


Figura 4.1: Fluxograma da aplicação das RC em Cenários Estáticos com Posicionamento Aleatório de Nós.

4.1.2 Cenários Estáticos com Posicionamento Conhecido de Nós

Nesse tipo de cenário, d e θ são valores conhecidos. Primeiramente é necessário computar a distância (δ_i) entre cada par de nós comunicantes e encontrar a maior delas (D). Se $D < d_{min}$, apenas antenas omnidirecionais em todos os enlaces são necessárias. Se $D > d_{min}$, antenas direcionais devem ser usadas.

Se Nm pode ser calculado e $N \geq Nm$, qualquer tipo de antena (AA ou SB em qualquer Modo) pode ser usado.

Se Nm pode ser calculado e $N < Nm$, θ deve estar sempre abaixo de PA . Antenas AA podem ser usadas com N que forneça $PA(D) > 0$. Antenas SB podem ser usadas com N que forneça $PA(D) > 100\%$, i.e., com N que seja considerado um "Nm virtual" em D , mas esse procedimento superavalia o valor de N , que pode assumir valores menores se o seguinte procedimento ótimo for adotado:

1. Definir o modo de operação (1,2 ou 3) das antenas SB;
2. Encontrar o menor N que forneça um dos dois resultados seguintes, conforme o modo de operação escolhido:
 - $PA(D) > 0$ (Modos 1 e 3); ou
 - $D < d_{jp}$ (Modo 2);

3. Calcular a separação angular θ_i para cada δ_i computado (esse passo depende de N e também da posição do feixe 1); no Modo 3, para cada δ_i , é necessário calcular dois θ_i , uma para cada nó comunicante, o que gera θ_{i1} e θ_{i2} ;
4. Conforme o modo de operação escolhido, verificar se a respectiva condição é satisfeita e retornar ao passo anterior se a verificação falhar:
 - $\forall i, \theta_i < PA(\delta_i)$ (Modo 1); ou
 - $\forall i, \theta_{i1} < PA(\delta_i)$ e $\theta_{i2} < PA(\delta_i)$ (Modo 3); ou
 - $\forall i, PA_{dual}(\delta_i) \leq \theta_i \leq PA(\delta_i)$ (Modo 2);
5. Ratificar N como o número de feixes a implementar.

Como exemplo, em um cenário com $S = 10$ e $n = 4$, há dois pares de nós comunicantes usando antenas SB. Os valores supostos de δ_i são $\delta_1 = 0.76$ e $\delta_2 = 0.80$, portanto $D = 0.80$. Se o Modo 2 (passo 1) for usado, a Figura 3.8 mostra 7 como o menor valor de N que fornece $0.80 < d_{jp}$ (passo 2). Os valores supostos para θ_i são $\theta_1 = 40\%$ e $\theta_2 = 50\%$ (passo 3). A Figura 3.8 mostra que $PA_{dual}(0.76) \leq 40\% \leq PA(0.76)$ e que $PA_{dual}(0.80) \leq 50\% \leq PA(0.80)$, então nenhuma verificação falha (passo 4) e ratifica-se que $N = 7$ (passo 5).

Se Nm não pode ser calculado, ocorre $d_{max} < d_T$. Se $D < d_{max}$, as regras anteriores ainda podem ser aplicadas. Se $D > d_{max}$, o cenário certamente não possui d_T cobrindo d_I em todos os nós comunicantes.

Todo esse procedimento acima, exceto o procedimento ótimo das antenas SB, está sumarizado na Figura 4.2.

4.1.3 Cenários Dinâmicos

Nesse tipo de cenário, há movimento de nós e, portanto, a reserva do meio não consegue sempre assumir uma forma circular centrada neles. Na verdade, ela pode assumir qualquer forma. Dependendo do tamanho das regiões cinza, da duração das transmissões

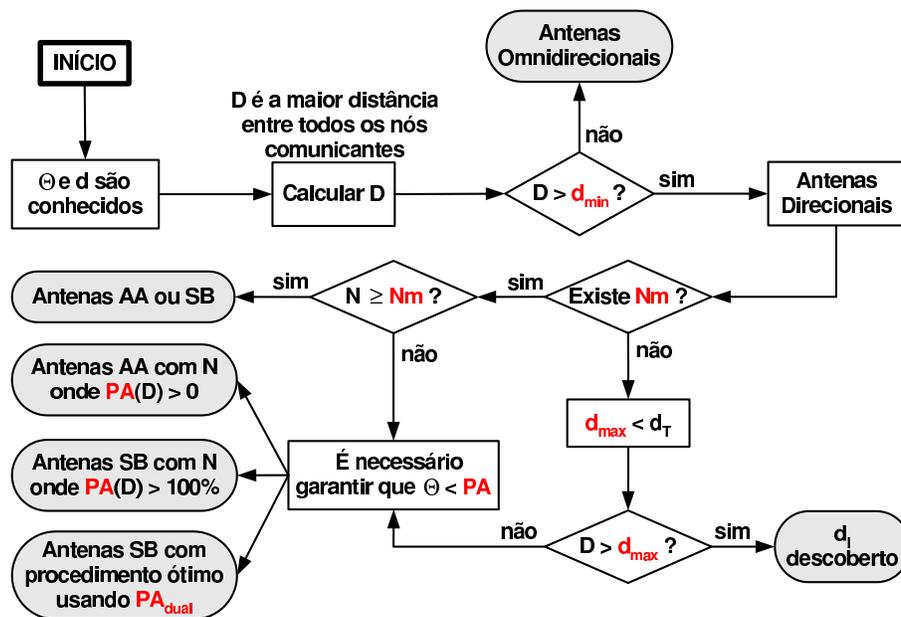


Figura 4.2: Fluxograma da aplicação das RC em Cenários Estáticos com Posicionamento Conhecido de Nós.

e da característica do movimento (velocidade e direção), é possível manterem-se cobertas as regiões cinza. Entretanto, quantificar esses parâmetros é uma tarefa complicada e demanda análises adicionais. Embora seja difícil aplicar os resultados deste trabalho a cenários dinâmicos, pode-se certamente afirmar que as antenas AA são aquelas que eventualmente poderiam proporcionar a mais eficiente eliminação da influência das FPIs.

4.2 Simulações

As simulações têm como objetivos:

1. mostrar que as FPIs que estão cobertas por d_T e que respeitam a reserva do meio não geram colisões;
2. mostrar que os protocolos MAC devem se adaptar para sempre garantir que as FPIs cobertas posterguem suas transmissões, senão ocorrem colisões;
3. mostrar que as FPIs descobertas por d_T podem gerar muitas colisões e prejudicar o desempenho das comunicações;

4. ratificar que o comportamento peculiar das antenas AA e SB causam resultados diferentes num mesmo cenário *ad hoc*;
5. mostrar que, quando d_I estiver apenas parcialmente coberto por d_T , ainda é possível ter cenários livres de colisões se todas as FPIs permanecerem cobertas por d_T ;
6. mostrar que, quando d_I estiver apenas parcialmente coberto por d_T e houver FPIs descobertas, a redução da duração das transmissões ou alterações nos protocolos MAC tendem a diminuir o número de colisões geradas por FPIs, o que cria a possibilidade de eliminá-las;
7. ratificar que n , o Fator de Perda no Caminho, influencia d_I ;

A ferramenta utilizada para executar as simulações foi o NS2 [5] em sua versão 2.28, que originalmente trabalha apenas com antenas omnidirecionais.

Conforme a demanda deste trabalho, desenvolveu-se um módulo de antenas direcionais bastante versátil, que simula antenas SB com e sem orientação e antenas AA, o que permite que os três modos de operação das antenas SB sejam avaliados. Entre outros recursos, as antenas são capazes de se comportar de forma direcional ou omnidirecional segundo a necessidade da camada MAC. O Apêndice A.2 explica o funcionamento do módulo e mostra todos os recursos que as antenas possuem.

Na camada MAC, foi o usado o protocolo IEEE 802.11 [3] com uma pequena adaptação capaz de lhe permitir gerenciar as antenas direcionais em cenários simples. Basicamente, a MAC faz as antenas assumirem o comportamento direcional apenas para enviar os pacotes DADO e ACK em comunicações que usam RTS e CTS. Isso mantém o 802.11 com quase todas as suas características originais. Cenários complexos, onde muitas antenas comportam-se direcionalmente ao mesmo tempo, exigem o uso de um DMAC, apto a solucionar alguns problemas [4] peculiares ao uso da radiação direcional. Uma outra mudança simples na implementação do IEEE 802.11 foi eliminar o tempo EIFS que os nós aguardam depois de apenas detectarem a portadora de uma transmissão (o EIFS foi mantido quando ocorria colisão). Isso aumenta o número de colisões e cria melhores condições para os testes. O Apêndice A.2.4 mostra como o módulo do 802.11 foi alterado e como essas poucas alterações foram efetuadas.

Foram utilizados dois cenários *ad hoc* do tipo Estático com Posicionamento Conhecido de Nós. Em ambos, há um par de nós comunicantes, R e T , e algumas fontes de interferência. Todos os nós operam com o mesmo tipo de antena e com a mesma potência de transmissão. R e T usam RTS e CTS, sem os quais seria impossível a reserva do meio. Para se manter a simplicidade do cenário, de modo que não fosse exigido uso de um DMAC, as fontes de interferência foram configuradas para não enviar RTS e CTS, logo suas antenas comportam-se sempre omnidirecionalmente. Um extrato dos parâmetros de configuração dos cenários pode ser observado na Tabela 4.1; em detalhes, esses parâmetros podem ser consultados nas tabelas do Apêndice A.1. O Limiar de SINR, S , foi sempre mantido como 10 (ou 10dB), pois esse valor é usual nos circuitos de comunicação.

Tabela 4.1: Alguns parâmetros de configuração dos nós.

Valor	Semântica
11M	taxa de dados do 802.11
2M	taxa básica do 802.11
10	limiar (S) da SINR
0.1	potência de transmissão (P_T) em Watts
2.4e+9	frequência de operação
500	tamanho em Kb do DADO enviado por T
100	tamanho em Kb do DADO enviado pelas fontes de interferência
6000	taxa em Kb/s de todos os fluxos CBR
17.5	Alcance de Transmissão (d_T) em metros
35	Alcance de Detecção de Portadora (d_C) em metros

Considerou-se que o ganho direcional e o ganho omnidirecional das antenas são exatamente iguais e valem 1, o que permite que:

- o alcance de transmissão (d_T) seja sempre o mesmo independentemente do tipo de comportamento das antenas;
- sejam sempre consideradas FPIs, mesmo transmitindo omnidirecionalmente, todas as fontes de interferência situadas dentro do Alcance de Interferência Primária (d_I);

se o ganho omnidirecional fosse menor do que o direcional, as fontes de interferência próximas ao limite de d_I poderiam agir apenas como FSIs;

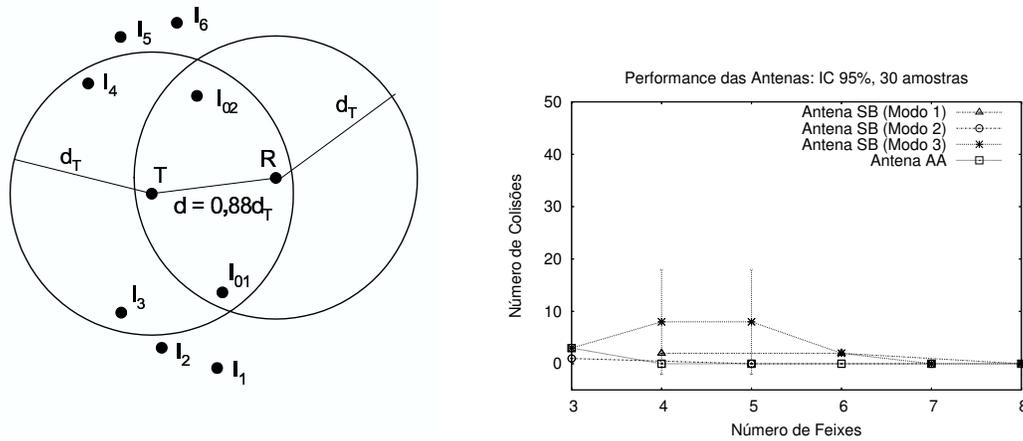
- antenas com diferentes números de feixes (N) tenham o mesmo alcance de transmissão (d_T), o que mantém a distância d entre os nós comunicantes sempre valendo o mesmo percentual de d_T ; isso permite que diversas antenas sejam testadas no mesmo cenário.

Em todas as figuras que mostram resultados de simulação, cada um dos pontos que geraram as curvas é a média de 30 amostras com intervalo de confiança de 95%. A primeira amostra é sempre obtida com a semente 12345 (*default*) do Gerador de Números Aleatórios (RNG) [22] do NS2. A segunda amostra é obtida com a semente do próximo *substream* do RNG e assim sucessivamente. Esse procedimento permite que os resultados sejam comparados porque garante que a diferença seja consequência apenas do parâmetro externo ao NS2 que está sendo testado (por exemplo, o número de feixes N e o Fator de Perda no Caminho n), já que todos os parâmetros internos ao NS2 que usam o RNG serão iguais.

4.2.1 Cenário 1

O Cenário 1 permite que as simulações atinjam os objetivos 1, 2, 3, 4 e 5.

A Figura 4.3(a) mostra o Cenário 1, onde $S = 10$ e $n = 4$. Os círculos centrados em T e R , distantes $0.88d_T$, são a representação da reserva do meio. Todos os outros nós são fontes de interferência. Durante toda a simulação, as comunicações sempre acontecem da seguinte forma: T transmite a R ; $I1$, $I2$ e $I3$ transmitem a $I01$; $I4$, $I5$ e $I6$ transmitem a $I02$. Todos os transmissores são fluxos CBR (*Constant Bit Rate*) contínuos e concomitantes. Foram usadas em todos os nós antenas AA e SB (nos três modos de operação) que implementaram de 3 a 8 feixes. Os nós $I01$, $I02$, $I3$ e $I4$ são FPIs cobertas pelas áreas de reserva do meio e não devem gerar colisões em T ou R . Os demais nós, que estão fora dos círculos, serão FPIs conforme o número de feixes que está sendo implementado e devem gerar colisões.



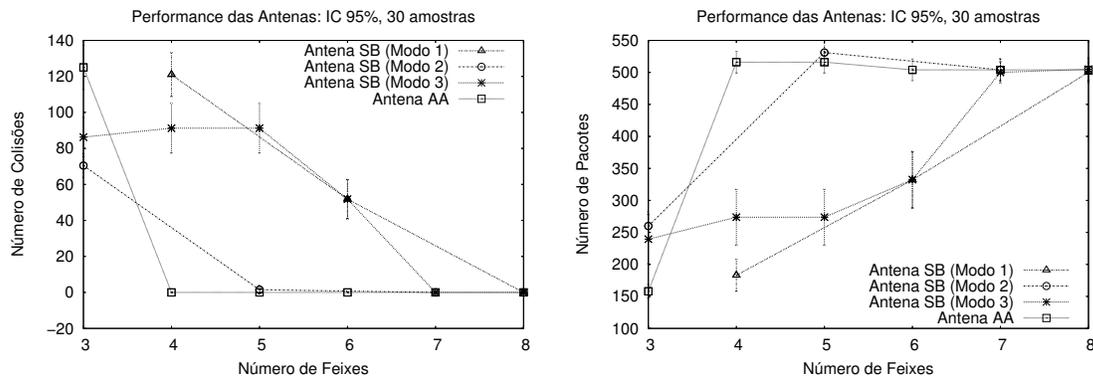
(a) A posição dos nós e a reserva do meio. (b) Colisões em R quando as FPIs descobertas apenas respondem aos pacotes de roteamento.

Figura 4.3: O Cenário 1 e as primeiras curvas de desempenho.

As figuras 4.3(b) e 4.4(a) mostram o desempenho das antenas através do número de colisões registradas em R , durante as transmissões de DADO de T , i.e., depois que a reserva do meio foi executada. Antes de qualquer avaliação, desligaram-se I_1, I_2, I_5 , e I_6 e constatou-se, conforme o previsto, que I_3 e I_4 , cobertos pelos círculos, não provocaram colisões. Depois, ligaram-se I_1, I_2, I_5 , e I_6 , mas eles foram configurados para apenas responderem às descobertas de rotas. Notaram-se as colisões da Figura 4.3(b). A partir de então, todos os transmissores enviaram DADO, o que aumentou bastante o número de colisões, conforme a Figura 4.4(a). Como consequência dessas colisões, o número de pacotes recebidos por R é mostrado na Figura 4.4(b). Nota-se que, com antenas AA de 3 feixes e antenas SB de 4 feixes, a influência das FPIs reduz o desempenho em aproximadamente 70%.

Avaliação do Desempenho de Cada Antena

Para que se avalie o desempenho de cada antena separadamente, o cenário da Figura 4.3(a) foi reproduzido nas Figuras 4.5, 4.6(a), 4.7(a) e 4.8(a). Em todas elas, as regiões cinza de bordas pontilhadas contém as FPIs que perturbam R , enquanto as de bordas contínuas, as FPIs que perturbam T . A largura das regiões cinza diminui conforme o aumento do número de feixes. O raio das regiões cinza é d_I e vale $1,56d_T$, conforme a



(a) Colisões em R quando todas as FPIs enviam DADO. (b) Desempenho, conforme o número de pacotes recebidos em R .

Figura 4.4: O restante das curvas de desempenho do Cenário 1.

Equação 2.3. As posições delas também variam conforme o tipo de antena (com antenas SB, variam com seu modo de operação) e o número de feixes. Foram empregados no máximo 8 feixes, menos do que Nm feixes (que vale 14 para $S = 10$ e $n = 4$), o que implica que os limites impostos por PA devem ser respeitados.

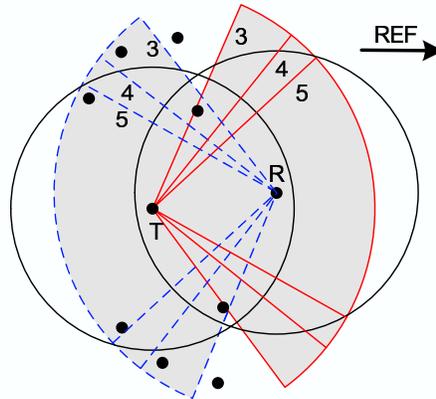
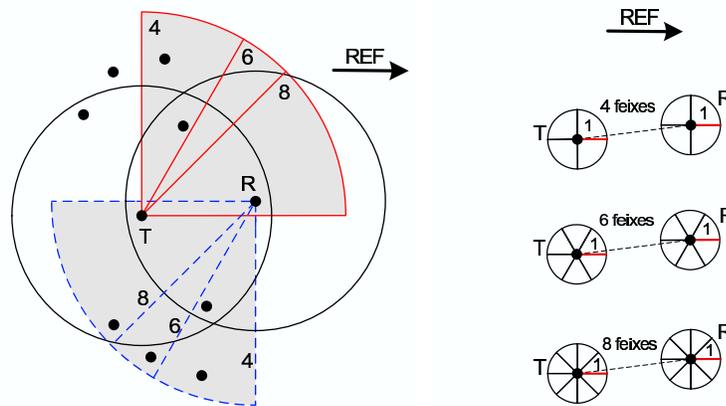


Figura 4.5: Posições das regiões cinza com antenas AA de 3, 4 e 5 feixes.

A Figura 4.5 mostra as posições das regiões cinza quando antenas AA são usadas. É fácil perceber que as antenas estão sempre alinhadas, característica de operação das antenas AA. Embora tenham sido empregados até 8 feixes nas simulações, as regiões cinza a partir de 6 feixes já ficam completamente cobertas e foram omitidas. Nota-se que, com 3 feixes, há FPIs descobertas e, com 4 ou mais feixes, todas elas já estão cobertas.

Isso explica o comportamento da curva da antena AA da Figura 4.4(a). Se as RC fossem respeitadas, seria necessário ter no mínimo $N = 5$, que retorna $PA(0.88d_T) \geq 0$ (Figura 3.7). Entretanto, o cenário permite $N = 4$, pois as partes descobertas das regiões cinza não possuem FPIs. Embora o conceito de orientação não se aplique às antenas AA, o simulador precisa de uma referência para posicionar as antenas. Adotou-se a direção REF do cenário como 0° .



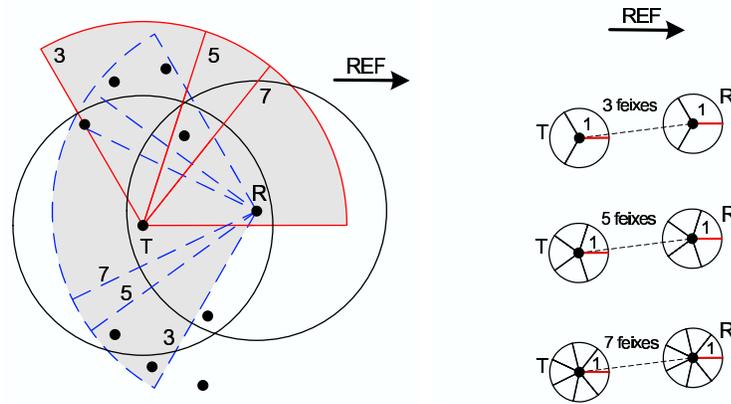
(a) Posições das regiões cinza com 4, 6 e 8 feixes. (b) Quê feixes são usados quando são empregados 4, 6 e 8 feixes.

Figura 4.6: Comunicação com antenas SB no Modo 1.

A Figura 4.6(a) mostra a posição das regiões cinza quando antenas SB no Modo 1 são usadas com 4, 6 e 8 feixes. A orientação adotada foi sempre apontar a borda inferior do feixe 1 na direção REF, que também é o marco 0° para o simulador. A Figura 4.6(b), que mostra por quê feixes as antenas se comunicam, auxilia a compreender as posições das regiões cinza. Nota-se que, com 4 e 6 feixes, há FPIs descobertas (em maior número com 4 feixes), mas, com 8 feixes, todas elas estão cobertas, o que explica o comportamento da curva da antena SB (Modo 1) da Figura 4.4(a). A aplicação das RC exige o cálculo² de θ . Eles valem 84.4%, 76.6% e 66.7% para 4, 6 e 8 feixes respectivamente. As RC mostram que apenas $N = 8$ fornece $\theta < PA(0.88d_T)$ (Figura 3.7). Nesse caso, o cenário realmente exige que as RC sejam respeitadas, i.e., que todas as regiões cinza fiquem cobertas.

A Figura 4.7(a) mostra a posição das regiões cinza quando antenas SB no Modo 2 são

²O cálculo de θ é simples, mas manualmente trabalhoso; portanto, a MAC foi programada para automaticamente fornecer θ para cada N

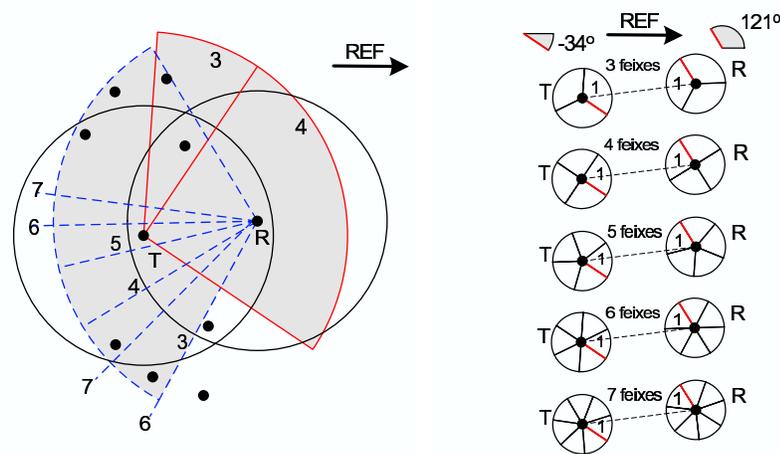


(a) Posições das regiões cinza com 3, 5 e 7 feixes. (b) Quê feixes são usados quando são empregados 3, 5 e 7 feixes.

Figura 4.7: Comunicação com antenas SB no Modo 2.

usadas com 3, 5 e 7 feixes. A orientação adotada foi a mesma do Modo 1. A Figura 4.7(b) também auxilia a compreender as posições das regiões cinza conforme o número de feixes empregados. É necessário lembrar que se deve respeitar a dualidade do Modo 2 para que ocorra toda a cobertura desejada e, portanto, as RC indicam no mínimo $N = 9$, cujo $d_{jp} > 0.88d_T$ (Figura 3.8). Entretanto, o cenário é um ótimo exemplo da possibilidade de não observar as RC, pois só há FPIs descobertas com 3 feixes; com 5 e 7 feixes, apesar das regiões cinza estarem consideravelmente descobertas, todas as FPIs estão cobertas. Explica-se, com essa análise, porque a curva da antena SB (Modo 2) da Figura 4.4(a) só apresenta colisões com 3 feixes.

A Figura 4.8(a) mostra a posição das regiões cinza quando antenas SB no Modo 3 são usadas. Nas simulações, foram empregados até 8 feixes, mas só foram mostradas as regiões cinza de T e R que ficaram descobertas e que possuíam FPIs. Como o Modo 3 não possui orientação, as antenas podem ser posicionadas em qualquer direção. Convencionou-se que a borda inferior do feixe 1 das antenas de R e T estariam posicionadas em 121° e -34° , respectivamente. Mais uma vez, adotou-se a direção REF como 0° . A Figura 4.8(b) é imprescindível para que se compreenda a posição das regiões cinza. É notório que todas as FPIs só estão cobertas a partir de 7 feixes e que o número de FPIs descobertas diminui conforme aumenta o número de feixes, o que explica a tendência da curva da antena SB (Modo 3) da Figura 4.4(a). Se as RC fossem aplicadas, seria neces-



(a) Posições das regiões cinza com 3, 4, 5, 6 e 7 feixes. (b) Quê feixes são usados conforme o número de feixes empregados.

Figura 4.8: Comunicação com antenas SB no Modo 3.

sário no mínimo $N = 7$ para que se alcançasse a cobertura total. O cenário, nesse caso, também exige que as RC sejam respeitadas.

Comparação do Desempenho das Antenas

A Figura 4.4(a) e a avaliação individual de cada antena mostram que as antenas AA cobrem as regiões cinza com um menor número de feixes, o que lhes atribui o melhor desempenho. Com regiões cinza descobertas, entretanto, a melhor antena a ser empregada é a que registra o menor número de colisões, mas prever esse número é uma tarefa praticamente impossível. Nem mesmo avaliar quê antena e qual número de feixes geram o menor número de FPIs descobertas, apesar de ser esse um fator bastante relevante, pode ser considerado o melhor caminho. Esse procedimento demanda análises geométricas manuais e trabalhosas, como as das Figuras 4.5, 4.6(a), 4.7(a) e 4.8(a), requer o conhecimento prévio da posição de todos os nós no cenário e ainda está sujeito a outros fatores. As Regras de Cobertura foram elaboradas para que se evite tudo isso e para garantir todas as FPIs cobertas.

A avaliação do que acontece com 3 feixes é uma tarefa que merece destaque porque também revela um dos objetivos das simulações: a necessária adaptação dos protocolos MAC. São FPIs descobertas e potenciais geradoras de colisões em R com 3 feixes:

- I_2 e I_5 , com antenas AA (Figura 4.5);
- I_2 , I_5 e I_6 , com antenas SB no Modo 2 (Figura 4.7(a));
- I_2 , I_5 e I_6 , com antenas SB no Modo 3 (Figura 4.8(a));

Nota-se que o maior número de FPIs descobertas no Modo 2 gerou o menor número de colisões. Isso aconteceu porque I_5 e I_6 são também FPIs de T e detectam a portadora do DADO transmitido por T , o que as impede de tentar disputar o meio durante a recepção de R . Portanto, R só possui uma FPI atuante, I_2 , no Modo 2. Pelo mesmo motivo, o Modo 3 só possui I_2 e I_5 como FPIs atuantes, mas, uma FPI a mais do que o Modo 2, logo mais colisões.

Se I_2 , I_3 , I_4 , I_5 , I_6 e I_{02} forem desligadas, as situações do Modo 3 (Figura 4.8(a)) e das antenas AA (Figura 4.5) ficam exatamente iguais: I_{01} é uma FPI coberta e I_1 é uma fonte de interferência que não é FPI. Nesse contexto, não poderia haver colisões. Entretanto, houve quase 60 colisões em R com antenas AA, o que mostra que I_{01} , embora coberta, foi a causa de todas elas. I_{01} só não causou colisões no Modo 3 por uma sutileza: o feixe direcional de R no Modo 3 não cobre I_{01} . A inesperada atividade de I_{01} , que ignorou a reserva do meio, é uma característica do próprio IEEE 802.11: enviar ACK independentemente das condições do meio. Mostra-se, portanto, que os protocolos MAC devem garantir que as FPIs cobertas não interfiram na comunicação. O IEEE 802.11 funcionaria adequadamente se as FPIs também operassem com RTS e CTS (I_1 enviaria RTS, mas I_{01} respeitaria a reserva do meio e não responderia com CTS). Essa característica também explica por quê, com todas as fontes de interferência atuando, as antenas AA tiveram o maior número de colisões com 3 feixes.

Quando o 802.11 volta a operar com EIFS, retornando à sua condição normal quanto à temporização, o número de colisões diminui, pois esse é o objetivo do EIFS. A Figura 4.9 mostra essa redução e pode ser comparada com a Figura 4.4(a). Nota-se que o uso de EIFS gerou quase a mesma performance com 3 feixes, divergindo das análises do parágrafo anterior e ratificando a dificuldade em se avaliar a performance das antenas com FPIs descobertas.

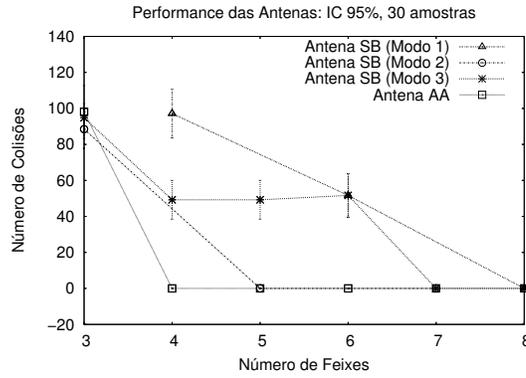


Figura 4.9: Colisões em R quando todas as FPIs enviam DADO e usam EIFS.

4.2.2 Cenário 2

O Cenário 2 permite que as simulações atinjam os objetivos 6 e 7, i.e., mostrar que transmissões menores e mudanças na camada MAC conseguem inibir o efeito de FPIs que não podem estar cobertas; e mostrar que n (Fator de Perda no Caminho) influencia d_I .

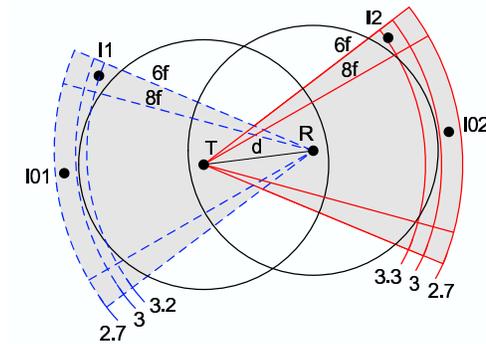


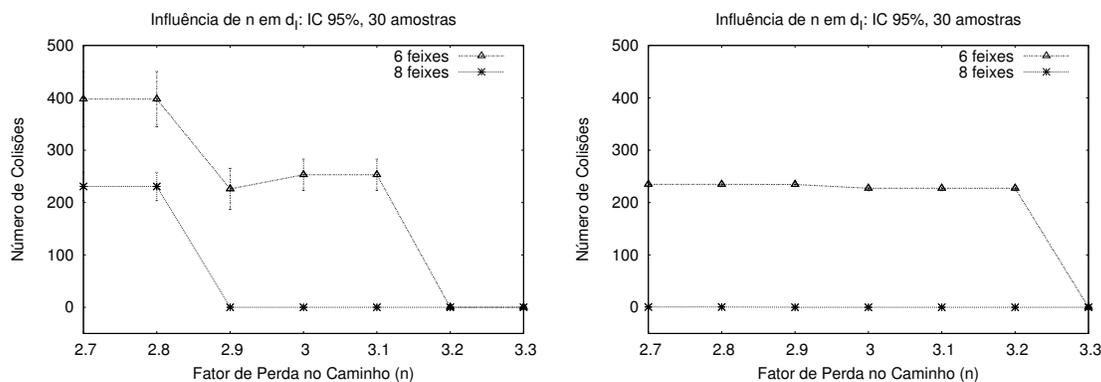
Figura 4.10: O segundo cenário *ad hoc* estático, com $S = 10$ e n variável.

A Figura 4.10 mostra o Cenário 2, onde $S = 10$ e n varia. Os círculos centrados em T e R , distantes $d = 0.88d_T$, são relativos à reserva do meio. A região cinza de bordas pontilhadas e a de bordas contínuas são, respectivamente, o Alcance de Interferência Primária (d_I) de R e T quando antenas AA de 6 e 8 feixes são empregadas. Nota-se que d_I varia conforme o valor de n (Equação 2.3). Está desenhado o d_I relativo a R quando n vale 2.7, 3 e 3.2 e o relativo a T quando n vale 2.7, 3 e 3.3. Conforme n e o número de feixes, os nós $I01$ e $I1$ serão FPIs de R e os nós $I02$ e $I2$, FPIs de T : quando $n = 3$, $I01$ e $I02$ ficam fora das regiões cinza, transformando-se em FSIs, o que também ocorre com $I1$ e $I2$ quando se empregam 8 feixes. Quando FPIs, as fontes de interferência são potenciais

geradoras de colisões porque não estão cobertas pelos círculos. Durante as simulações, T transmite a R , $I1$ transmite a $I01$ e $I2$ transmite a $I02$. Todos os transmissores são fluxos CBR contínuos e concomitantes.

A variação de n também altera d_T . Isso mudaria completamente as condições de teste porque a distância entre T e R é dada em função de d_T . Poderiam até surgir FPIs cobertas. Para se evitar tal problema, usou-se o artifício de não permitir que d_T variasse. Portanto, para cada valor de n , alteraram-se os valores dos limiares de recepção e de detecção de portadora para que d_T permanecesse constante. O Apêndice A.1 mostra essas relações.

Para mostrar que o número de colisões tende a diminuir quando se reduz o tamanho da informação transmitida ao receptor ou se altera a camada MAC (objetivo 6 das simulações), os testes foram realizados em duas etapas. Na primeira etapa, ligaram-se $I1$ e $I01$, mantiveram-se $I2$ e $I02$ desligados e mediu-se o número de colisões em R , que recebe DADO. Na segunda etapa, ligaram-se $I2$ e $I02$, desligaram-se $I1$ e $I01$ e mediu-se o número de colisões em T , que recebe ACK. Em ambas as etapas, as colisões foram medidas para diferentes valores de n . Os resultados estão resumidos nas curvas da Figura 4.11, que também comprovam a influência de n em d_I (objetivo 7): as quedas bruscas no número de colisões em determinado n mostram que as regiões cinza diminuíram e passaram a ter menos FPIs ou ficaram livres delas.



(a) Etapa 1: quantidade de colisões em R .

(b) Etapa 2: quantidade de colisões em T .

Figura 4.11: Resultado das simulações do Cenário 2 com antenas AA de 6 e 8 feixes.

A Figura 4.11(a) mostra o número de colisões em R . Quando $n \leq 2.8$, há quase o dobro de colisões com 6 feixes porque $I01$ e $I1$ são ambas FPIs, enquanto apenas $I01$ é FPI com 8 feixes. Quando $n \geq 2.9$, não há colisões com 8 feixes porque não há mais

FPIs. Entretanto, com 6 feixes, quando $2.9 \leq n \leq 3.1$, as colisões diminuem, mas não desaparecem, porque $I1$ ainda é FPI; a redução em d_I só é suficiente para excluir $I1$ e eliminar as colisões quando $n \geq 3.2$.

A Figura 4.11(b) mostra o número de colisões em T . Com 8 feixes, apenas $I02$ é FPI quando $n < 3$, entretanto não foram registradas colisões. Com 6 feixes, $I02$ e $I2$ são ambas FPIs quando $n < 3$, $I2$ é a única FPI quando $3 \leq n \leq 3.2$ e não há mais FPIs quando $n > 3.2$; apesar disso, quando $n \leq 3.2$, só há registro de colisões geradas por apenas uma FPI. Esses resultados evidenciam que $I02$ não foi capaz de gerar colisões, apesar de ter sido FPI quando $n < 3$. A causa de tal incapacidade é o fato de o ACK recebido em T ser menor do que o DADO recebido em R , ou seja, $I02$, que responde à transmissão de $I2$, não teve tempo de gerar colisão. Isso fica claro com a análise dos seguintes eventos: t_T (tempo em que o meio ficou ocioso durante a transmissão de T), tx_{dadoT} (tempo que T gasta para enviar DADO), t_{I1} (tempo para $I1$ começar a transmitir), tx_{dadoI} (tempo que $I1$ ou $I2$ gastam para enviar seu DADO), t_{I01} (tempo para $I1$ transmitir e $I01$ começar a responder), t_R (tempo em que o meio ficou ocioso durante a transmissão de R), tx_{ACK} (tempo que R gasta para enviar ACK), t_{I2} (tempo para $I2$ começar a transmitir) e t_{I02} (tempo para $I2$ transmitir e $I02$ começar a responder). Conforme os parâmetros de simulação (Apêndice A.1), esses tempos³ valem:

$$t_T = SIFS + tx_{dadoT}$$

$$= (10 + 590.545)\mu s$$

$$= 600.545\mu s$$

$$t_{I1} = DIFS + backoff$$

$$= (50 + backoff)\mu s$$

$$t_{I01} = DIFS + backoff + tx_{dadoI} + SIFS$$

$$= (50 + backoff + 299.636 + 10)\mu s$$

$$= (backoff + 359.636)\mu s$$

$$t_R = SIFS + tx_{ACK}$$

³Foi desprezado o tempo de propagação ($\approx 50ns$).

$$\begin{aligned}
 &= (10 + 248)\mu s \\
 &= 258\mu s \\
 t_{I2} &= t_{I1} \\
 t_{I02} &= t_{I01}
 \end{aligned}$$

As expressões acima ratificam que, quando FPIs:

- $I1$ pode gerar colisão em R se $backoff < (600.545 - 50)\mu s$;
- $I01$ pode gerar colisões em R se $backoff < (600.545 - 359.636)\mu s$;
- $I2$ pode gerar colisão em T se $backoff < (258 - 50)\mu s$;
- $I02$ não pode gerar colisão em T porque $t_{I02} > t_R$.

Se DIFS fosse substituído por EIFS ($364\mu s$), o que faria o 802.11 funcionar em sua característica original quanto à temporização, $I01$ não teria tempo de gerar colisões em R , $I02$ e $I2$ não teriam tempo de gerar colisões em T e $I1$ só geraria colisão em R se $backoff < (600.545 - 364)\mu s$. O resultado da substituição de DIFS por EIFS pode ser visto na Figura 4.12, que mostra o número de colisões em R . Nota-se que, com 8 feixes, apenas $I01$ é FPI e não houve colisão em R . O gráfico referente a T não foi mostrado porque não se registrou qualquer colisão em T .

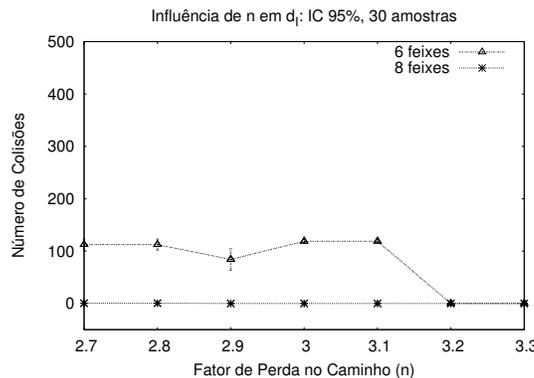


Figura 4.12: Colisões em R com EIFS.

Pode-se explorar esses resultados para adaptar os protocolos MAC e torná-los aptos a inibir o efeito das FPIs. Isso pode ser uma boa alternativa em situações críticas, onde

as RC identificam a impossibilidade de d_T cobrir d_I e onde é impossível garantir que não haja FPIs descobertas. Exemplos de tais situações críticas são os Cenários Dinâmicos e os Cenários Estáticos com Posicionamento Aleatório de Nós em ambientes em que n assume valores baixos e faz d_{max} valer uma fração de d_T .

4.3 O Alcance de Detecção de Portadora (d_C)

A capacidade de decodificar um sinal ou apenas detectar sua portadora é uma característica dos circuitos de recepção. A decodificação ocorre quando o nível de potência do sinal recebido ultrapassa determinado valor, chamado Limiar de Recepção (RxT). Por outro lado, só a portadora do sinal recebido pode ser detectada quando seu nível de potência fica abaixo de RxT e acima de outro limite, o Limiar de Detecção de Portadora (CsT). Sinais com nível de potência abaixo de CsT não podem ser detectados, o que faz o meio ser interpretado como livre. Tanto RxT quanto CsT já estão estabelecidos nos circuitos de recepção⁴.

Apesar de o CsT ser uma característica dos circuitos de recepção, existe a possibilidade de se configurar a camada MAC para que ela adote um CsT virtual, acima do CsT real, o que traria para a própria camada MAC a decisão de considerar o meio livre ou ocupado e permitiria reduzir d_C virtualmente. Alguns trabalhos [17, 23] com antenas omnidirecionais usaram essa estratégia para aumentar o reuso do meio e melhorar a capacidade da rede.

Com antenas direcionais, haveria também a possibilidade de se adotar um CsT virtual. Quando d_I estivesse sempre coberto por d_T , d_C não precisaria ser maior do que d_T , já que todas as FPIs poderiam decodificar os pacotes de reserva do meio. Com $d_C = d_T$, o CsT virtual valeria RxT. Se d_T não cobrisse d_I , seria necessário que d_C cobrisse d_I (FPIs descobertas pelo alcance de transmissão precisam usar a detecção de portadora para interpretarem o meio como ocupado e postergarem suas transmissões). Para isso, o CsT virtual deveria ser ajustado de modo que ocorresse $d_C = d_I$.

⁴Alguns circuitos possuem opções para RxT e CsT.

Usar um CsT virtual com antenas direcionais certamente aumenta o reuso espacial, que já é maior com a radiação direcional. Entretanto, limitar d_C a d_I pode eliminar o único recurso disponível, a detecção física de portadora, para combater o efeito das FSIs, ainda não quantificado. Como a radiação direcional naturalmente já promove um bom reuso espacial, sugere-se que o CsT virtual não seja usado em redes *ad hoc* com antenas direcionais.

4.4 A influência dos Lóbulos Secundários de uma Antena Direcional

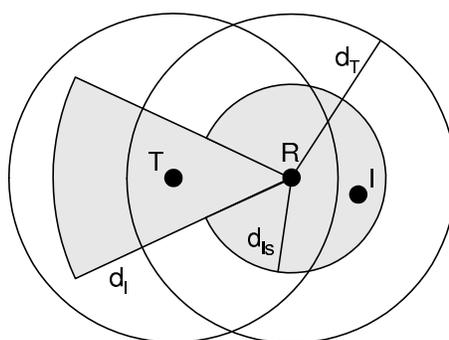


Figura 4.13: Representação do Alcance de Interferência Primária referente aos lóbulos secundários.

O diagrama de radiação de uma antena real possui lóbulos secundários, em geral mais de um, que também têm ganho, embora menores do que o do lóbulo principal. Não é fácil prever a direção dos lóbulos secundários, que varia conforme a largura do lóbulo principal, nem mesmo qual dos lóbulos secundários tem o maior ganho. Por esses motivos, os lóbulos secundários podem ser representados por um círculo com abertura complementar à do lóbulo principal. Representação similar pode ser encontrada em [18].

Como os lóbulos secundários têm ganho diferente de zero, uma antena real pode sofrer interferência de sinais captados por eles. Para se avaliar o grau dessa influência, pode-se determinar o Alcance de Interferência Primária referente aos lóbulos secundários. Na Figura 4.13, onde T e R são os nós comunicantes, estão representados os dois Alcances

de Interferência Primária⁵: o referente ao lóbulo principal, d_I , já amplamente discutido, e o referente aos lóbulos secundários, chamado de d_{Is} . As FPIs, portanto, concentram-se em uma área maior do que a já estudada.

Uma expressão para d_{Is} é gerada com as mesmas considerações usadas para a geração da Equação 2.3. Entretanto, a fonte de interferência vem dos lóbulos secundários e não do principal, o que força a uma expansão da Equação 2.2 para que se revele o ganho de recepção (G_R) da antena. Portanto:

$$P_R = \frac{P_T G_R k'}{d^n}$$

Supondo-se que Gd e gd são respectivamente os ganhos de recepção do lóbulo principal e dos lóbulos secundários da antena, e que a única fonte de interferência (nó I na Figura 4.13) vem dos lóbulos secundários, o cálculo de d_{Is} surge de $P_R/P_I < S$, onde P_R é a potência de recepção com Gd e P_I , a potência de recepção com gd . Portanto:

$$d_{Is} = d \sqrt[n]{\frac{gd}{Gd} S} \quad (4.1)$$

Pela Figura 4.13, a reserva do meio de R é a única que pode cobrir integralmente d_{Is} , portanto é necessário sempre ocorrer $d_{Is} < d_T$ para que as FPIs referentes aos lóbulos secundários fiquem cobertas. Conforme (4.1), uma forma de sempre garantir $d_{Is} < d_T$ é assegurar $\frac{gd}{Gd} S < 1$, ou seja:

$$\frac{Gd}{gd} > S$$

A expressão acima mostra que o ganho do lóbulo principal deve ser S vezes maior do que o maior ganho dos lóbulos secundários. Este trabalho considerou que o processamento digital presente no sistema que compõem as antenas inteligentes usa técnicas capazes de gerar diagramas de radiação onde $Gd > Sgd$. Essa suposição impede que as colisões geradas por FPIs sejam provenientes dos lóbulos secundários, o que permitiu que eles fossem desprezados no diagrama de radiação do modelo de antena direcional usado. Apesar dessa simplificação para se avaliarem as interferências geradas por FPIs, a influência dos lóbulos secundários jamais pode ser desprezada em se avaliando as interferências geradas por FSIs.

⁵A análise referente a T foi omitida.

Capítulo 5

Conclusões

NEGLIGENCIAR os efeitos da interferência pode provocar consideráveis perdas de desempenho nas redes *ad hoc*; por isso este trabalho fez um amplo estudo de como surgem nas redes *ad hoc* as colisões geradas por uma única fonte de interferência e de como eliminá-las através do uso das antenas direcionais. Observar esses resultados deveria ser o primeiro passo de qualquer novo trabalho empregando a radiação direcional, principalmente daqueles que se incumbem de produzir DMACs eficientes.

A **primeira contribuição** desta pesquisa é a classificação da interferência em primária, a que gera colisões, e secundária, a que só contribui para prejudicar a SINR no receptor. Isso permitiu que as fontes de interferência fossem separadas em dois grupos: as FPIs, que individualmente causam interferência primária, e as FSI, que individualmente só causam a secundária, mas que podem causar a primária se agirem em conjunto.

O primeiro esforço na redução da interferência é a eliminação do efeito das FPIs, onde este trabalho é eficaz por conseguir mapear o Alcance de Interferência Primária (d_I), a área que concentra todas as possíveis FPIs, e usar basicamente a geometria para cobri-lo com a área de reserva do meio, i.e., com o Alcance de Transmissão (d_T) dos nós comunicantes. Esse enfoque puramente geométrico na eliminação do efeito das FPIs resume-se em cobrir d_I através do uso do tipo correto de antena direcional e do adequado número de feixes, sem a necessidade de consideráveis mudanças na camada MAC (na verdade, mostrou-se que os protocolos MAC devem adaptar-se para garantir que FPIs cobertas jamais transmitam durante o tempo de reserva do meio). Desenvolveram-se, então, as

Regras de Cobertura (RC), a **segunda contribuição** desta pesquisa. A essência das RC é o enfoque geométrico, mas elas também revelam que, em determinadas condições, a geometria não pode sozinha eliminar o efeito das FPIs porque não haveria antena direcional ou número de feixes capazes de fazer d_I ficar coberto. Nesses casos, mostrou-se que, se houver FPIs descobertas, transmissões curtas e mudanças nos protocolos MAC diminuem seus efeitos e podem até eliminá-los. Isso serviria como complemento das RC e permitiria que meios como o espaço livre ou o interior de construções com linha de visada [16], onde as RC revelam que apenas o enfoque geométrico é insuficiente, pudessem ficar livres do efeito das FPIs.

O âmago desta pesquisa é o enfoque geométrico, a essência das RC, na eliminação do efeito das FPIs. As RC são simplesmente um conjunto de instruções de como usar corretamente todas as condições necessárias a cobrir d_I . Essas condições são tão abrangentes que até revelam quando é impossível cobrir d_I . Tal abrangência só foi possível porque se avaliou a influência do limiar (S) da SINR, a influência das diferentes perdas de propagação (n) conforme o meio e se consideraram os principais tipos de antenas direcionais, as antenas *Switched Beam* (SB) em seus três modos de operação e as antenas *Adaptive Array* (AA). Vale enumerar e definir sucintamente as condições de cobertura de d_I :

d_{min} Distância que exige o uso de antenas direcionais.

d_{max} Distância máxima entre os nós comunicantes.

Nm Número mínimo de feixes direcionais.

PA Máximo afastamento angular entre os nós comunicantes.

Dentre as condições acima, as RC revelam ser Nm a mais importante, o ponto de partida de qualquer análise. Valores altos de Nm podem gerar antenas fisicamente grandes na faixa ISM (*Industrial, Scientific and Medical*), de 2.4GHz, impraticáveis para o uso doméstico, principalmente em computadores portáteis. Entretanto, na faixa de 5.8GHz, as antenas podem ter a metade do tamanho. Conforme a frequência aumenta, a implementação de Nm feixes torna-se mais factível.

As RC também revelam que as antenas AA são as mais eficientes para prover a total cobertura de d_I , não só pelo menor número de feixes que elas precisam implementar, mas principalmente pela simplicidade em lhes aplicar as RC em qualquer cenário estático e

por elas serem a única alternativa para cobrir d_I com posicionamento aleatório de nós.

Embora o âmago desta pesquisa seja o enfoque geométrico, não se poderia restringí-la às RC, senão a eliminação dos efeitos das FPIs só aconteceria quando d_I estivesse coberto. Mostrou-se, então, um caminho interessante no complemento das RC: o uso de transmissões mais curtas, mudanças na camada MAC e a detecção física de portadora. Torna-se possível, portanto, sempre eliminar o efeito das FPIs, o que pode ser considerado a **terceira contribuição** deste trabalho. Notou-se a grande importância do Alcance de Detecção de Portadora (d_C) no complemento das RC.

O segundo e definitivo esforço na redução da interferência seria a eliminação do efeito das colisões geradas pela ação conjunta das FSIs, mas é impossível usar o mesmo enfoque geométrico que mapeou d_I porque as FSIs podem estar a qualquer distância do nó receptor, gerando ruídos de maior ou menor intensidade. Fora do Alcance de Transmissão, a portadora do sinal transmitido é o elemento para combater a interferência. Para inibir o efeito das FSIs dentro de d_C , se podem aplicar os mesmos recursos do complemento das RC usados para inibir o efeito das FPIs descobertas, mas existe um limite para d_C conforme as características dos circuitos de recepção, o que ainda permitiria que algumas FSIs gerassem ruído. Isso torna necessário um estudo mais aprofundado acerca do nível de influência das FSIs fora de d_C quando a radiação direcional for empregada.

Muitas perspectivas surgem com os resultados desta pesquisa. São elas:

- Estudar o impacto sobre o cálculo de d_I , e conseqüentemente sobre as condições de cobertura e sobre as Regras de Cobertura, quando:
 - os nós empregarem antenas diferentes;
 - o lóbulo principal das antenas tiver diagrama de radiação real, com ganho variável;
 - forem consideradas as perdas de pequena e larga escalas no modelo de propagação;
- Avaliar quantitativamente qual seria a perda de desempenho de um cenário *ad hoc* se as Regras de Cobertura não fossem respeitadas, i.e., se fosse permitido que d_T não cobrisse d_I .

- Desenvolver um protocolo DMAC para antenas AA, que se revelaram as mais eficientes para cobrir d_I . Até agora, só se encontraram registros de DMACs para antenas SB. O novo DMAC já contemplaria as RC e seus complementos.
- Quantificar o efeito das FSIs descobertas por d_C quando as antenas direcionais forem empregadas e avaliar quão eficientes em minimizar o efeito total das FSIs são os recursos que complementam as RC.
- Estudar os cenários dinâmicos e tentar minimizar-lhes a interferência. Um ponto de partida é usar apenas os recursos dos complementos das RC, já que é muito difícil cobrir d_I com a reserva do meio quando os nós movimentam-se.

Todas essas perspectivas de trabalhos são desafios difíceis, mas também extremamente necessários para se estender o uso das antenas direcionais em redes *ad hoc*.

Referências Bibliográficas

- [1] WANG, Y. E GARCIA-LUNA-ACEVES, J. J. Spatial Reuse and Collision Avoidance in Ad Hoc Networks with Directional Antennas. Em *GLOBECOM 2002 - IEEE Global Telecommunications Conference* (novembro de 2002), pp. 113–117.
- [2] HU, C., HONG, Y. E HOU, J. On Mitigating the Broadcast Storm Problem with Directional Antennas. Em *ICC 2003 - IEEE International Conference on Communications* (maio de 2003), pp. 104–110.
- [3] IEEE. IEEE standard 802.11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. Padrão, 1999.
- [4] CORDEIRO, C. M., GOSSAIN, H., CAVALCANTI, D. E AGRAWAL, D. P. The Deafness Problems and Solutions in Wireless Ad Hoc Networks Using Directional Antenna. Em *IEEE Globecom* (2004).
- [5] The network simulator ns-2. <http://www.isi.edu/nsnam/ns>, 2006.
- [6] IEC. Smart Antenna Systems. International Engineering Consortium, On-Line Education, http://www.iec.org/online/tutorials/acrobat/smart_ant.pdf, 2005.
- [7] COOPER, M. E GOLDBURG, M. Intelligent Antennas: Sspatial Division Multiple Access. Em *Annual Review of Communications* (1996), pp. 999–1002.
- [8] Altera - Advanced DSP Techniques - Smart Antennas. <http://www.altera.com/end-markets/wireless/advanced-dsp/beamforming/wir-beamforming.html>, 2006.

- [9] KORAKIS, T., JAKLLARI, G. E TASSIULAS, L. A MAC Protocol for Full Exploitation of Directional Antennas in Ad-hoc Wireless Networks. Em *ACM Mobihoc* (junho de 2003).
- [10] CHOUDHURY, R. R. E VAIDYA, N. Impact of Directional Antennas on Ad Hoc Routing. Em *8th Conference on Personal and Wireless Communication (PWC)* (2003).
- [11] JOSHI, T., CORDEIRO, C. M., VOGETY, S., YIN, J., GOSSAIN, H. E AGRAWAL, D. P. Broadcasting over Switched Single Beam Antenna Systems. Em *IEEE ICON* (2004).
- [12] DA ROCHA, R. R., COSTA, L. H. M. K. E DE REZENDE, J. F. Antenas Direcionais em Redes Ad Hoc IEEE 802.11 com Múltiplos Saltos. Em *XXI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações* (setembro de 2004).
- [13] GOSSAIN, H., CORDEIRO, C. M., JOSHI, T. E AGRAWAL, D. P. Cross-Layer Directional Antenna Mac and Routing Protocols for Wireless Ad Hoc Networks. Em *Wiley Wireless Communications and Mobile Computing (WCMC) Journal* (2004). Special Issue on Ad Hoc Wireless Networks.
- [14] CORDEIRO, C. M., GOSSAIN, H. E AGRAWAL, D. P. A Directional Antenna Medium Access Control Protocol for Wireless Ad Hoc Networks. Em *Brazilian Telecommunications Society* (2005). Special Issue on Sensors and Ad Hoc Networks.
- [15] CORDEIRO, C. M., GOSSAIN, H. E AGRAWAL, D. P. MDA: A Novel MAC Protocol for Directional Antennas over Wireless Ad Hoc Networks. Em *IEEE Transactions on Mobile Computing* (2005).
- [16] RAPPAPORT, T. *Wireless Communications: Principles and Practice*. Prentice Hall - New Jersey, 1996.
- [17] XU, K., GERLA, M. E BAE, S. How Effective is the IEEE 802.11 RTS/CTS Handshake in Ad Hoc Networks? Em *IEEE GLOBECOM* (novembro de 2002), vol. 1, pp. 17–21.
- [18] RAMANATHAN, R. On the Performance of Ad Hoc Networks with Beamforming Antennas. Em *ACM MobiHoc* (outubro de 2001).

- [19] TAKAI, M., MARTIN, J., REN, A. E BAGRODIA, R. Directional Virtual Carrier Sensing for Directional Antennas in Mobile Ad Hoc Networks. Em *ACM MobiHoc* (junho de 2002).
- [20] RAMELLA, I. E DE REZENDE, J. F. Minimizando a Interferência em Redes Ad Hoc com Antenas Direcionais. Em *SBrT* (setembro de 2005).
- [21] RAMELLA, I. E DE REZENDE, J. F. Evitando Interferências Primárias em Redes Ad Hoc com Antenas Direcionais. Aprovado no 24° Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores, SBRC 2006.
- [22] The ns Manual (formely ns Notes and Documentation. http://www.isi.edu/nsnam/ns/doc/ns_doc.pdf, fevereiro de 2006.
- [23] VASAN, A., RAMJEE, R. E WOO, T. ECHOS - Enhanced Capacity 802.11 Hots-pots. Em *Proceedings of INFOCOM* (março de 2005).

Apêndice A

Implementações no NS-2.28

A.1 Os Parâmetros de Simulação

Tabela A.1: Parâmetros de entrada para as simulações.

Valores Possíveis	Semântica
3, 4, 5, 6, 7, 8	número de feixes direcionais
0(SB), 1(AA)	tipo de antena
2.7, 2.8, 2.9, 3, 3.1, 3.2, 3.3	Fator de Perda no Caminho (n)

Tabela A.2: Limiar de Recepção (RxT) e de Detecção de Portadora (CsT), conforme o Fator de Perda no Caminho (n), para $d_T = 17.5m$, $d_C = 35m$, $P_T = 100mW$ e $d_0 = 1m$.

n	RxT(w)	CsT(w)	n	RxT(w)	CsT(w)
2.7	4.3571e-9	6.7053e-10	3.1	1.3867e-9	1.6173e-10
2.8	3.2726e-9	4.6990e-10	3.2	1.0415e-9	1.1334e-10
2.9	2.4580e-9	3.2931e-10	3.3	7.8230e-10	7.9428e-11
3.0	1.8462e-9	2.3078e-10	4.0	1.0550e-10	6.5936e-12

Tabela A.3: Outros parâmetros de configuração dos nós.

Valor	Semântica
AODV	protocolo de roteamento
100	tamanho máximo da fila
11M	taxa de dados do 802.11
2M	taxa básica do 802.11
10	limiar (S) da SINR
0.1	potência de transmissão (P_T) em Watts
2.4e+9	frequência de operação
500	tamanho em Kb do DADO enviado por T
100	tamanho em Kb do DADO enviado pelas fontes de interferência
6000	taxa em Kb/s de todos os fluxos CBR
0	ganho do lóbulo secundário das antenas direcionais
1	ganho do lóbulo principal das antenas direcionais
1	ganho omnidirecional das antenas direcionais
17.5	Alcance de Transmissão (d_T) em metros
35	Alcance de Detecção de Portadora (d_C) em metros
1	distância de referência (d_0) em metros do modelo de propagação

Tabela A.4: Instante (em segundos) de início dos fluxos CBR. As simulações duram 3.2s.

	T	$I1$	$I2$	$I3$	$I4$	$I5$	$I6$
Cenário 1	1.0	1.3	1.5	1.1	1.2	1.6	1.4
Cenário 2	1.0	1.2	1.2	-	-	-	-

A.2 O Módulo de Antenas Direcionais

O módulo de antenas direcionais define a Classe *Antenna/DirAntenna* e resume-se nos arquivos `~mobile/dir-antenna.[h,cc]`.

A Classe *Antenna/DirAntenna* permite que sejam simuladas antenas direcionais dos tipos AA e SB. As antenas podem comportar-se de forma direcional ou omnidirecional e operam inicialmente em apenas duas dimensões. Quando na forma omnidirecional, as antenas irradiam com ganho uniforme em todas as direções, tendo um círculo como diagrama de radiação. Quando na forma direcional, as antenas simulam um lóbulo principal de abertura α e um lóbulo secundário de abertura complementar. Ambos os lóbulos têm ganho uniforme, com o ganho do lóbulo principal bem maior do que o do secundário, o que produz um diagrama de radiação com dois arcos de círculo de raios diferentes.

Os objetivos básicos do módulo de antenas direcionais são:

- calcular o AoA do sinal recebido; com o AoA, o nó identificará a direção dos seus vizinhos;
- posicionar o lóbulo principal, quando transmitindo ou recebendo, na direção desejada, mas, com antenas SB, isso não é possível e é necessário corrigir a posição do lóbulo principal; posicionar o lóbulo principal significa colocar sua bissetriz apontando na direção desejada.

Para que se alcancem esses objetivos básicos, a Classe *Antenna/DirAntenna* possui os recursos sumarizados em seus métodos, atributos e no relacionamento entre eles. A Tabela A.5 mostra os métodos e atributos e a Figura A.1, o funcionamento completo do módulo, ou seja, como se relacionam métodos e atributos e quais são as outras Classes cujos objetos interagem com a *Antenna/DirAntenna* neste trabalho.

Tabela A.5: Métodos e atributos da Classe *Antenna/DirAntenna*.

(a) Os métodos.

Nome	Semântica	Acesso
DirAntenna()	construtor da classe	público
getTxGain()	retorna o ganho de transmissão da antena	público
getRxGain()	retorna o ganho de recepção da antena	público
getAOA()	retorna o ângulo de chegada do sinal	público
setBehavior()	muda a forma de comportamento da antena	público
setBeamPos()	direciona a bissetriz do lóbulo principal	público
command()	promove uma das interfaces com o <i>script</i> TCL	privado
normalize()	corrige a direção do lóbulo principal	privado
getGain()	retorna o ganho da antena	privado
calcALOS()	calcula o ângulo da linha de visada	privado

(b) Os atributos.

Nome	Semântica	Acesso
type_	tipo de antena: AA ou SB	privado
nbeams_	número de feixes direcionais	privado
behavior	forma de comportamento da antena: dir ou omni	privado
Go	ganho omnidirecional da antena	privado
Gd	ganho do lóbulo principal da antena	privado
gd	ganho do lóbulo secundário da antena	privado
beam_1_pos	posição da borda inferior do feixe 1 com antenas SB	privado
beam_pos	posição da bissetriz do lóbulo principal	privado
beam_halfwidth	largura da metade do lóbulo principal	privado
AOA	ângulo de chegada do sinal	privado

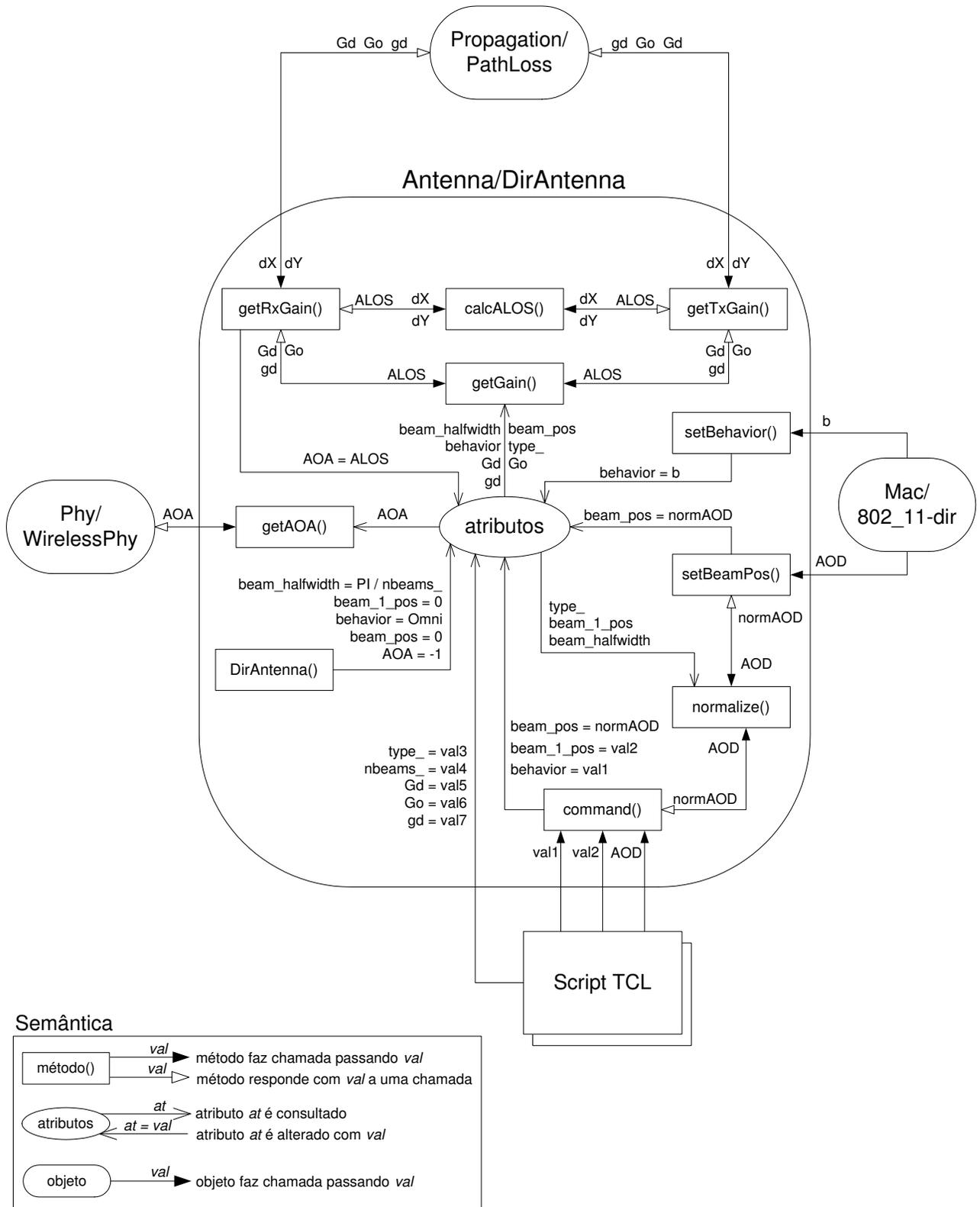


Figura A.1: Os relacionamentos interno, entre métodos e atributos, e externo, com objetos de outras Classes, da Classe *Antenna/DirAntenna*.

Pela Figura A.1, é possível identificar quais são os métodos que acessam os atributos, quês variáveis são passadas entre os métodos e qual a sequência de chamada entre os métodos. Portanto, para calcular o ganho de recepção da antena, um objeto da Classe *Propagation/PathLoss* chama o método *getRxGain()* e passa as coordenadas dX e dY ; *getRxGain()* repassa-as a *calcALOS()*, que calcula *ALOS* e o retorna a *getRxGain()*, que carrega o atributo *AOA* com *ALOS* e repassa *ALOS* a *getGain()*, que consulta muitos atributos para escolher entre Gd , Go e gd ; a escolha é retornada a *getRxGain()*, que finalmente a envia ao objeto da Classe *Propagation/PathLoss*. Todas as relações seguem a mesma filosofia. O construtor da Classe, o método *DirAntenna()*, estabelece o valor inicial de alguns atributos.

Dentre todos os métodos, os que merecem destaque são:

- *calcALOS()*: calcula o *ALOS*, o ângulo da linha de visada, de um nó em relação a seu vizinho em função das coordenadas dos vetores que os unem. É preciso passar corretamente essas coordenadas, pois, se A e B forem vizinhos, o vetor AB, que fornece o *ALOS* de A em relação a B, tem sentido oposto ao vetor BA, que fornece o *ALOS* de B em relação a A.
- *getGain()*: retorna o ganho (atributos Gd , gd ou Go) com que a antena se comunica. Se a antena estiver no comportamento direcional, o método verifica a direção em que o lóbulo principal está posicionado e o *ALOS*; se o *ALOS* estiver dentro do lóbulo principal, o ganho é Gd , senão, o ganho é gd .
- *normalize()*: corrige a direção do lóbulo principal com antenas SB, pois ele só assume direções determinadas, os chamados feixes (*beams*) da antena. As direções do lóbulo principal são dadas conforme a posição da borda inferior do feixe 1 (atributo *beam_1_pos*) e da largura de feixe (dobro do atributo *beam_halfwidth*). Como exemplo, numa antena de 4 feixes onde a borda inferior do feixe 1 está em 0° , direcionar o lóbulo principal para 100° significa colocá-lo em 135° , a posição da bissetriz do feixe 2; direcionar o lóbulo principal para 90° significa colocá-lo também em 135° (convencionou-se que a borda superior de um feixe pertence ao feixe seguinte). O método *normalize()* deve ser sempre usado antes de se posicionar o

lóbulo principal, mesmo se antenas AA forem usadas (nesse caso, o método mantém a direção escolhida). A orientação dos Modos 1 e 2 das antenas SB é simulada posicionando-se a borda inferior do feixe 1 de todas as antenas na mesma direção. O Modo 3 (sem orientação) é simulado¹ quando cada antena coloca a borda inferior de seu feixe 1 em posições diferentes.

A.2.1 Interação com o *Script* TCL

A interação com *script* TCL faz-se através dos atributos de ligação (as variáveis do tipo *bind*) e do método *command()*. São variáveis *bind*, conforme a Figura A.1, os atributos *Gd*, *gd*, *Go*, *nbeams_* e *type_*. A interação com o método *command()* faz-se através dos seguintes comandos:

- *kind-behavior*: altera a forma de operação (direcional ou omnidirecional) da antena;
- *beam-position*: direciona o lóbulo principal para uma posição em graus;
- *beam-1-position*: direciona a borda inferior do feixe 1 para uma posição em graus (não interfere no funcionamento das antenas AA). Esse comando permite implementar o Modo 3 das antenas SB ou alterar a referência dos Modos 1 e 2.

A.2.2 Interação com a Classe *Propagation/PathLoss*

A Classe *Propagation/PathLoss*², que simula o modelo de propagação utilizado neste trabalho, interage com a Classe *Antenna/DirAntenna* através dos métodos *getRxGain()* e *getTxGain()* (Figura A.1), passando as coordenadas $\{d_X, d_Y\}$ dos vetores que unem os dois nós comunicantes, para obter os ganhos de transmissão e recepção de suas antenas. Na verdade, qualquer Classe do NS-2.28 que simule um modelo de propagação pode interagir com a *Antenna/DirAntenna*, bastando que d_X e d_Y sejam corretamente passados.

¹O módulo não está preparado para simular o Modo 3 em cenários dinâmicos, pois o feixe 1 não acompanha as mudanças de coordenadas dos nós.

²Originalmente, a Classe *Propagation/PathLoss* não se encontrava implementada. Seu código, resumido também nos arquivos *~mobile/propagation.[h,cc]*, é muito parecido com o da Classe *Propagation/FreeSpace*; a única diferença é a inserção da influência das perdas conforme o meio.

Isso significa que, se T é um nó transmissor de coordenadas $\{x_T, y_T\}$ e R , um nó receptor de coordenadas $\{x_R, y_R\}$:

- o ganho de transmissão é obtido passando-se as coordenadas do vetor TR, i.e., $dX = x_R - x_T$ e $dY = y_R - y_T$;
- o ganho de recepção é obtido passando-se as coordenadas do vetor RT, i.e., $dX = x_T - x_R$ e $dY = y_T - y_R$.

A.2.3 Interação com a Classe *Phy/WirelessPhy*

A Classe *Phy/WirelessPhy* interage com a Classe *Antenna/DirAntenna* através do método *getAOA()* (Figura A.1), que retorna o atributo AoA de um pacote que está sendo recebido. A *Phy/WirelessPhy* marca esse pacote com o AoA para permitir que a camada MAC o consulte. Portanto, é necessário implementar duas mudanças:

- criar um campo no pacote recebido para que seja colocado seu AoA;
- acrescentar no método *sendUp()* da *Phy/WirelessPhy* o comando para carregar o AoA no pacote recebido.

A.2.4 Interação com a Classe *Mac/802_11-dir*

Apesar de seu nome sugestivo, a Classe *Mac/802_11-dir* não pode ser considerada um DMAC por não conseguir gerenciar adequadamente cenários complexos, onde muitos nós operam direcionalmente. Ela é uma simples adaptação da Classe original (*Mac/802_11*), seu código está resumido nos arquivos `~mac/mac-802_11-dir.[h,cc]` e as mudanças são suficientes para cumprir os objetivos deste trabalho: fazer as antenas comportarem-se direcionalmente para enviar DADO e ACK em uma comunicação com RTS e CTS.

A interface com a Classe *Antenna/DirAntenna* faz-se pelos métodos *setBehavior()* e *setBeamPos()*, conforme a Figura A.1, e indicam que a camada MAC só posiciona o feixe direcional da antena e comanda sua forma de comportamento. A camada MAC deve

também conhecer o ALOS em relação a todos os seus vizinhos para que possa direcionar corretamente a antena. O ALOS, na verdade, é o AoA marcado no pacote recebido de um vizinho. Assim, a MAC monta um vetor de AoA, que é atualizado sempre que um vizinho envia um pacote de DADO.

Pode-se dividir em 3 funções a gerência que a camada MAC exerce sobre as antenas direcionais. Cada função pode ser executada por mais de um método da *Mac/802_11-dir* e todos eles estão discriminados abaixo:

- Função 1: Gerenciar o AoA;
 - método *command()*: monta o vetor de AoA e pega o endereço do objeto *Antenna/DirAntenna* do nó;
 - método *Mac802_11Dir()*: carrega valores iniciais no vetor de AoA;
 - método *recvDATA()*: atualiza o vetor de AoA com a chegada de um pacote de DADO;
- Função 2: Fazer a antena assumir o comportamento direcional e direcionar o feixe;
 - método *txHandler()*: depois que o RTS ou o CTS forem enviados;
- Função 3: Fazer a antena assumir o comportamento omnidirecional;
 - método *send_pktTx()*: se for impossível mandar o DADO depois de SIFS;
 - método *send_timer()*: se ocorrer o *timeout* do RTS, do CTS ou do DADO, mostrando que não se completou a comunicação;
 - método *recvACK()*: depois que o ACK for recebido, mostrando que se completou a comunicação;
 - método *txHandler()*: depois que o ACK for enviado, mostrando que se completou a comunicação;

A camada MAC convencional, a Classe *Mac/802_11*, também pode operar com as antenas direcionais, mas não as gerenciar, pois não há interação com a *Antenna/DirAntenna*. Nesse caso, a configuração das antenas ocorre apenas através do *script* TCL, o que as faz comportar-se direcional ou omnidirecionalmente durante toda a simulação.