

# Minimizando a Interferência em Redes Ad Hoc com Antenas Direcionais

Italo Ramella e José Ferreira de Rezende

**Resumo**— Um grande problema para o desempenho das redes *ad hoc* é o distúrbio que a interferência pode gerar na comunicação entre dois terminais. O emprego de antenas direcionais reduz naturalmente o número de fontes de interferência e este artigo mostra que, se a antena implementar um número mínimo ( $Nm$ ) de feixes e operar sob o IEEE 802.11, as chances de haver interferência diminuem ainda mais, pois ela só ocorre se duas ou mais fontes agirem em conjunto. O mesmo resultado é obtido com menos do que  $Nm$  feixes se forem respeitadas algumas condições, também mostradas e analisadas neste artigo.

**Palavras-Chave**— Antenas direcionais, redes *ad hoc*, IEEE 802.11, interferência.

**Abstract**— A great problem in the performance of ad hoc networks is the interference disturbing a communication between two nodes. The only employment of directional antennas spontaneously reduces the number of interference sources and this paper shows that, if the antenna employes a minimum number of beams ( $Nm$ ) under IEEE 802.11, there is a reduction in interference chances as two or more interference sources acting together are necessary to generate interference. The same result is achieved with fewer than  $Nm$  beams if some conditions, also showed here, are respected.

**Keywords**— Directional antennas, ad hoc networks, IEEE 802.11, interference.

## I. INTRODUÇÃO

As redes *ad hoc* caracterizam-se pela ausência de uma infraestrutura que coordene a troca de dados entre as estações e determine o momento em que cada uma deve usar o meio sem fio. Sem um ponto de coordenação, há mais versatilidade e flexibilidade, mas surge um grande problema das redes *ad hoc*, a interferência, pois cada estação é uma potencial candidata a acessar o meio a qualquer momento. Usando os protocolos da camada física e da subcamada MAC, as estações gerenciam de forma distribuída o acesso ao meio, controlando assim a ocorrência de interferências, mantendo-a em níveis aceitáveis. Eliminá-las, entretanto, é bastante difícil sem que haja uma perda significativa no desempenho das redes *ad hoc*, especialmente quando se usam antenas

omnidirecionais.

A influência de uma interferência na comunicação entre duas estações é caracterizada pela relação sinal-ruído (*Signal to Noise Ratio* – SNR) no receptor, que é expressa em dB e mede a razão entre a potência do sinal de informação e a potência do sinal de interferência. Como a potência desses dois sinais varia com o tempo, a SNR no receptor também é variável e o sinal de informação recebido só será considerado válido se o valor da SNR permanecer sempre acima de um limiar (*SNR Threshold* –  $SNR_T$ ), que em geral vale 10dB.

Por questões didáticas, este trabalho classifica uma interferência como primária ou secundária. A interferência primária é aquela que tem potência suficiente para tornar a SNR menor do que a  $SNR_T$ . A secundária é aquela cuja energia só diminui a SNR, mas não a torna menor do que a  $SNR_T$ .

Uma fonte de interferência é, portanto, classificada como primária ou secundária. É interessante notar que a soma das potências de duas ou mais fontes secundárias pode gerar uma interferência primária.

Antenas direcionais caracterizam-se por prover cobertura, irradiando e coletando sinal, somente em determinada região do espaço. Isso significa que, se as estações de uma rede *ad hoc* empregarem antenas direcionais, só haverá interferência se suas fontes localizarem-se na região de cobertura das antenas. Nota-se que o número de fontes de interferência diminui naturalmente, sem qualquer alteração nos protocolos de acesso ao meio.

Considerando o protocolo IEEE 802.11 [1] em seu modo DCF, este trabalho mostra que, se as antenas direcionais empregarem um número mínimo de feixes  $Nm$ , calculado em função da  $SNR_T$ , uma fonte de interferência só gera individualmente interferência primária se ela estiver dentro do alcance dos pacotes RTS e CTS. Fora dessa região, ela será fonte de interferência secundária. Interpretando RTS e CTS, que guardam a duração da comunicação em andamento, as fontes de interferência adiam suas transmissões. Consegue-se, portanto, que a interferência primária seja causada apenas por fontes secundárias que ajam em conjunto. Assim, elimina-se uma grande parcela das interferências em redes *ad hoc*.

O mesmo resultado é obtido se a antena implementar um número de feixes menor do que  $Nm$ , mas, para isso, é necessário que o afastamento angular entre transmissor ( $T$ ) e receptor ( $R$ ), medido a partir do alinhamento de suas antenas direcionais, não exceda um valor máximo, que é definido aqui como Abertura de Imunidade a Fontes de Interferência Primária (AIFIP). Mostra-se que a AIFIP varia em função da distância entre  $T$  e  $R$ .

Com  $Nm$  e AIFIP, é possível construir cenários *ad hoc* estáticos e dinâmicos imunes às fontes de interferência

primária, o que torna mais eficiente o desempenho das subcamadas MAC direcionais recentemente desenvolvidas sobre o IEEE 802.11.

No restante do artigo, a Seção II explica sucintamente o modelo de antena direcional e as adaptações criadas pelas recentes MAC direcionais; a Seção III cita trabalhos relacionados; a Seção IV define e relaciona alcances de transmissão, de interferência por fonte primária e de detecção de portadora; a Seção V calcula  $Nm$  e AIFIP; a Seção VI analisa o emprego de antenas e a Seção VII conclui o artigo e mostra as perspectivas de trabalhos.

## II: NIVELAMENTO

### A. Modelo de Antena Direcional

As antenas direcionais usadas em redes *ad hoc* são, na verdade, um sistema formado por um Processador Digital de Sinais (*Digital Signal Processor - DSP*) acoplado a um conjunto de elementos irradiadores (em geral dipolos de onda) que opera em modo direcional ou omnidirecional conforme a defasagem empregada pelo DSP ao sinal que alimenta cada elemento irradiador. O sistema, independente do modo de operação, consegue determinar o Ângulo de Chegada (*Angle of Arrival - AOA*), ângulo em que o sinal recebido é mais forte. No modo direcional, o diagrama de radiação do sistema terá um lóbulo principal e lóbulos secundários. A forma de posicionamento do lóbulo principal classificará o sistema como Arranjo Adaptativo (onde o lóbulo principal assume qualquer posição angular) ou como Feixe Chaveado (onde o lóbulo principal assume posições angulares fixas).

Este artigo usa o modelo de antena direcional que os trabalhos atuais [2, 4, 5, 6] têm empregado: um sistema que opera, conforme o instante da comunicação, em modo omnidirecional ou em modo direcional.

Quando em modo omnidirecional, a antena transmite e recebe em todas as direções com ganho  $G_o$ , expresso em dB.

Quando em modo direcional, a antena transmite e recebe em apenas um setor do espaço e tem diagrama de radiação formado por um lóbulo principal, de ganho  $G_d$  (maior do que  $G_o$ ) uniforme e abertura angular  $2\pi/N$ , e um lóbulo secundário, de ganho também uniforme  $-g_d$  e abertura angular complementar, conforme ilustra a Figura 1a.  $G_d$  e  $-g_d$  são também expressos em dB. Em três dimensões, o lóbulo principal tem o formato de um cone e o secundário, o de uma esfera incompleta. O número  $N$  indica quantas vezes o lóbulo principal (também chamado feixe direcional) cabe de forma não superposta em  $360^\circ$ .

Se a antena é do tipo Arranjo Adaptativo, o lóbulo principal do modo direcional pode assumir qualquer posição angular. Se a antena é do tipo Feixe Chaveado, o lóbulo principal assume sempre posições angulares fixas, numeradas de 1 a  $N$  a partir de  $0^\circ$  (Figura 1b). Supõe-se que, nessa condição, a antena direcional consiga manter a orientação, com o marco  $0^\circ$  apontando sempre para leste, independente da posição que a estação sem fio ocupe no espaço.

A seleção do modo de operação (direcional ou omnidirecional) da antena é definida pela subcamada MAC usada. As MAC direcionais que operam com o IEEE 802.11 são unânimes em selecionar o modo omnidirecional sempre

que a estação estiver em estado passivo (*idle*), apenas para receber RTS, e o direcional para todos os outros passos da comunicação.

Embora as demonstrações das seções IV e V usem antenas de Feixe Chaveado, os resultados obtidos são também observados com antenas de Arranjo Adaptativo.

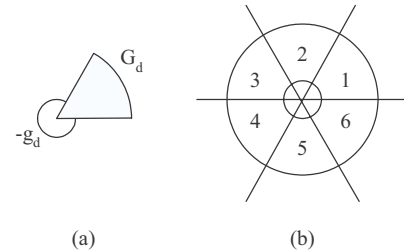


Fig. 1. a) Diagrama de radiação do conjunto direcional para 6 feixes. b) Distribuição dos feixes em Sistemas de Feixe Chaveado.

### B. Subcamadas MAC Direcionais

Como o uso de antenas direcionais em redes *ad hoc* é fato recente e ainda pouco explorado, as pesquisas concentram esforços em adaptar a subcamada MAC para que os recursos do modo DCF do IEEE 802.11 sejam eficientemente usados e para que sejam sanados os problemas peculiares que as comunicações direcionais fazem surgir.

[4] propõe o DVCS (*Directional Virtual Carrier Sensing*), que é capaz de armazenar o AOA da portadora recebida e acionar o DNAV (*Directional NAV*) para a região coberta pelo feixe direcional. Uma estação terá um DNAV para cada setor do espaço (para cada feixe, com antenas de Feixe Chaveado). Assim, os pacotes RTS e CTS podem ser enviados de forma direcional e ficam adaptadas as detecções física e virtual de portadora.

[5] propõe o DAMA (*Directional Antenna Medium Access*) e o EDAMA (*Extended DAMA*) e [6] propõe o MDA (*MAC protocol for Directional Antennas*). Esses trabalhos usam o DVCS e são os mais recentes com antenas direcionais baseados no IEEE 802.11, embora usem apenas antenas de Feixe Chaveado. Entre as inovações apresentadas, as mais importantes são o envio direcional dos pacotes RTS e CTS ao redor de transmissor e receptor, implementando uma varredura circular com alcance direcional, e o acréscimo de informação nos pacotes RTS e CTS que mostra o feixe da antena do transmissor e do receptor por onde a comunicação se estabelece, permitindo que uma fonte de interferência identifique os feixes de sua antena através dos quais qualquer transmissão causaria interferência.

## III: TRABALHOS RELACIONADOS

O estudo em [3] prova que antenas omnidirecionais e o protocolo IEEE 802.11 trazem as fontes de interferência primária para dentro do alcance dos pacotes RTS e CTS quando a distância entre transmissor e receptor é menor do que 0.56 vezes o alcance de transmissão, considerando  $SNR_T = 10$  e usando o modelo analítico de propagação *Two Ray Ground*. O artigo propõe uma MAC simples, baseada no IEEE 802.11, que procura evitar o estabelecimento da comunicação quando a distância entre transmissor e receptor

ultrapassa esse limite. A solução proposta reduz a conectividade e o desempenho da rede.

Os trabalhos com antenas direcionais sob o IEEE 802.11 ainda não se preocuparam em estabelecer critérios que definam, em função do cenário *ad hoc* criado, que tipo de antena direcional (Feixe Chaveado ou Arranjo Adaptativo) usar e quantos feixes ela deve empregar para que o cenário ofereça boa imunidade a interferências. Este artigo procura preencher essa lacuna.

#### IV: RELAÇÃO ENTRE OS ALCANCES

Supondo que a comunicação *ad hoc* entre duas estações,  $T$  e  $R$ , estabeleça-se em espaço livre que permita considerar reflexões apenas no plano terra, pode ser empregado um modelo de propagação analítico de dois raios (*Two Ray Ground*) para calcular as perdas de propagação [7]:

$$P_R = P_T G_T G_R \frac{h_T^2 h_R^2}{d^4} \quad (1)$$

Em (1),  $P_T$  é a potência do sinal transmitido,  $P_R$  é a potência do sinal recebido,  $G_T$  e  $G_R$  são os ganhos das antenas de transmissão e recepção,  $h_T$  e  $h_R$  são as alturas das antenas e  $d$  é a distância entre o transmissor e o receptor.

Desprezando os efeitos de ruído térmico no receptor, podemos identificar três alcances na comunicação entre  $T$  e  $R$ :

- Alcance de Transmissão ( $d_T$ ): distância dentro da qual o sinal recebido tem potência maior do que o limiar ( $RXThreshold$ ) estabelecido pelo circuito de recepção para a correta decodificação da informação transmitida, supondo que não há fontes de interferência;

- Alcance de Detecção de Portadora ( $d_c$ ): distância dentro da qual o sinal recebido tem potência menor do que o  $RXThreshold$ , mas maior do que o limiar ( $CSThreshold$ ) estabelecido pelo circuito de recepção para a detecção da portadora de um sinal transmitido;

- Alcance de Interferência de Fonte Primária ( $d_i$ ): distância dentro da qual as fontes de interferência são individualmente consideradas primárias, isto é, o sinal transmitido por elas tem potência suficiente para inviabilizar a correta decodificação da informação que está sendo recebida..

Para calcular  $d_i$ , considera-se que o SNR *Threshold* vale  $SNR_T$  e que, paralelamente à comunicação entre  $T$  e  $R$ , uma terceira estação  $I$ , distante  $r$  de  $R$ , inicia uma transmissão que atinge  $R$  com potência  $P_I$ . Supondo que  $I$  usa uma antena igual a de  $T$  e transmite também com potência  $P_T$ , o sinal em  $R$  só será válido se  $P_R / P_I \geq SNR_T$ . Aplicando (1):

$$\frac{r^4}{d^4} \geq SNR_T \Rightarrow r \geq d \sqrt[4]{SNR_T} \Rightarrow d_i = d \sqrt[4]{SNR_T} \quad (2)$$

De (2) concluímos que  $I$  só gera interferência primária em  $R$  se ambos estiverem separados por uma distância menor do que  $d_i$ . Concluímos também que:

$$d \leq \frac{d_T}{\sqrt[4]{SNR_T}} \Rightarrow d_i \leq d_T \quad (3)$$

A equação (3) mostra a condição matemática necessária para que  $d_i$  fique sempre dentro de  $d_T$ . Com  $SNR_T = 10$ ,

$d \leq 0.56d_T$ , isto é,  $T$  e  $R$  devem estar muito próximos e essa é uma condição bastante restrita, que diminui consideravelmente a conectividade e o desempenho da rede.

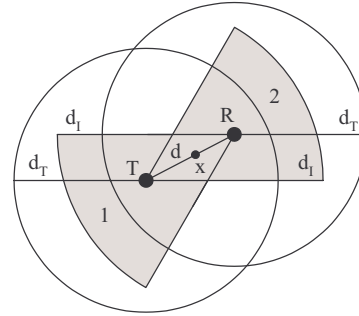


Fig. 2. Relação espacial entre  $d$ ,  $d_i$  e  $d_T$ , com  $d_i$  coberto por  $d_T$ .

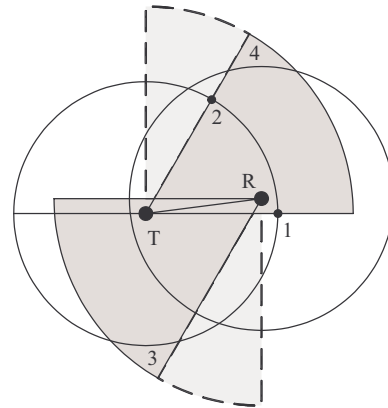


Fig. 3. Relação espacial entre  $d$ ,  $d_i$  e  $d_T$ , com  $d_i$  descoberto por  $d_T$ .

Quando são usadas antenas direcionais, a capacidade de interferir na comunicação diminui bastante. Na Figura 2,  $T$  e  $R$  comunicam-se com  $SNR_T = 10$ . Nota-se que, para a abertura do feixe da antena direcional usada, o setor circular 1, com centro em  $R$ , cujo raio  $d_i$  é calculado pela equação 2, é a única região onde as fontes de interferência são individualmente capazes de gerar interferência primária em  $R$ . Supondo que ocorra a varredura circular de RTS e CTS [5, 6] (círculos de raio  $d_T$  centrados em  $T$  e  $R$ ), o setor 1, apesar de não ser coberto pelos pacotes CTS, é completamente coberto pelos pacotes RTS. A mesma análise pode ser feita em relação a  $T$  com o setor 2, que é a única região onde as fontes de interferência são individualmente capazes de gerar interferência primária em  $T$ . Conclui-se que, por causa da geometria da comunicação direcional, não é necessário respeitar sempre a equação 3 e, mesmo que  $d$  seja maior do que  $0.56d_T$  (ponto  $x$  na Figura 2), as regiões das fontes de interferência primária podem ser completamente cobertas pelos alcances de transmissão de  $T$  e  $R$ , ficando  $d_i$  sempre dentro de  $d_T$ . Se o setores 1 e 2 fossem transformados em circunferências, simulando uma comunicação omnidirecional, os círculos de raio  $d_T$  jamais cobririam os de raio  $d_i$  e a equação 3 deveria ser sempre respeitada, mostrando a limitação do emprego das antenas omnidirecionais.

Entretanto, conforme  $d$  cresce,  $d_i$  também cresce. Na Figura 3, quando  $R$  aproxima-se dos pontos 1 e 2, que são os limites para haver comunicação, as regiões 3 e 4 ficam fora dos

círculos de raio  $d_T$ , e  $d_I$  não é mais coberto por  $d_T$ . A região 3, que interfere em  $R$ , é muito perigosa, pois só consegue perceber a portadora dos sinais de ACK enviados por  $R$ , o que pode gerar silêncio por um período maior do que DIFS. A situação piora se o feixe direcional possuir maior abertura, conforme mostra a região limitada por linhas pontilhadas, que simula o restante da abertura de uma antena de 4 feixes. Para solucionar o problema, bastaria que a abertura do feixe direcional diminuísse até que  $d_I$  voltasse a ficar coberto por  $d_T$ .

## V. CÁLCULO DE $Nm$ E AIFIP

### A. Caso Geral

A Figura 4 mostra uma antena direcional com feixe de abertura  $2\pi/N$ , onde  $N$  é o número de feixes que a antena implementa. Quando  $R$  está posicionado na bissetriz do feixe de  $T$ ,  $\beta$ , que mede o ângulo entre os segmentos  $d$  e  $d_I$ , vale  $\pi/N$  e diz-se que as antenas estão alinhadas. Se  $R$  sai da bissetriz, surge  $\Theta$ , que mede o afastamento angular em relação à bissetriz. Quando  $R$  aproxima-se do ponto 2 (limite para se comunicar com  $T$ )  $\beta$  e  $\Theta$  tendem a seus valores máximos,  $2\pi/N$  e  $\pi/N$  respectivamente. Portanto  $\pi/N \leq \beta \leq 2\pi/N$  e  $0 \leq \Theta \leq \pi/N$ . Essas observações são importantes para a análise a seguir, que será feita em função do ponto 2. A análise com  $R$  acima da bissetriz, em função do ponto 1, é perfeitamente simétrica e será omitida.

Na Figura 4,  $T$  e  $R$  usam uma antena de  $N$  feixes, adotam um SNR *Threshold* de valor  $SNR_T$  e estão separados por uma distância  $d$  que não respeita a equação 3, mas que ainda mantém  $d_I$  dentro de  $d_T$ . Usando a Lei dos Cosenos no triângulo  $dd_I d_T$  e assumindo  $d$  como o parâmetro variável, temos:

$$\cos \beta(d) = \frac{d^2 + d_I^2 - d_T^2}{2dd_I} \quad (4)$$

Inserindo (2) em (4):

$$\beta(d) = \cos^{-1} \left[ \frac{1}{2} \cdot \frac{1 + \sqrt{SNR_T} - \left( \frac{d_T}{d} \right)^2}{\sqrt[4]{SNR_T}} \right] \quad (5)$$

Não é difícil provar também que:

$$\Theta(d) = \beta(d) - \pi/N \quad (6)$$

Estabelecidos o SNR *Threshold* e o número de feixes  $N$  da antena direcional, a Equação 6 calcula, em função de  $d$ , o afastamento angular máximo,  $\Theta(d)$ , entre  $R$  e  $T$ , medido a partir do alinhamento das antenas (bissetriz), para que  $d_I$  ainda seja mantido dentro de  $d_T$ , portanto para que haja imunidade às fontes de interferência primária.

A análise da Figura 4 comprova o resultado de (6): se  $R$  deslocar-se para cima ao longo do arco de raio  $d$  (linha pontilhada), o que não faz variar o tamanho da região de interferência,  $\Theta$  diminui e  $d_I$  permanece coberto, mas, se  $R$  deslocar-se para baixo,  $\Theta$  aumenta e  $d_I$  fica descoberto. Se  $d$  variar, variando também o tamanho da região de interferência,

(6) calcula um novo  $\Theta$ , que aumenta se  $d$  diminui e diminui se  $d$  aumenta.

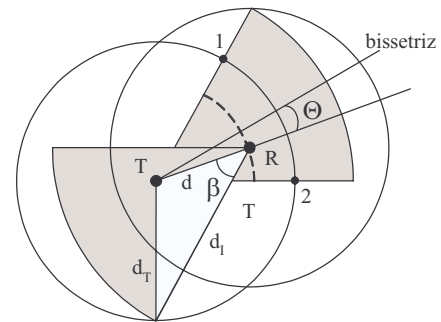


Fig. 4. Condições para ter  $d_I$  dentro de  $d_T$  com  $T$  e  $R$  separados por uma distância  $d > d_T / \sqrt[4]{SNR_T}$ .

### B. Definição, Cálculo e Análise de $Nm$

Se  $R$  posicionar-se no ponto 2 da Figura 4 (limite para a comunicação com  $T$ ),  $d$  valerá  $d_T$  e serão máximos  $d_I$  e a área que contem as fontes de interferência primária. Para garantir imunidade a essas fontes, portanto  $d_I$  sempre coberto por  $d_T$ , (6) deve ser usada com  $\Theta(d_T) = \pi/N$ , o que fornece  $\beta(d_T) = 2\pi/N$ . Aplicando (5), tem-se:

$$2\pi/N = \cos^{-1} \left( \frac{\sqrt[4]{SNR_T}}{2} \right) \quad (7)$$

O valor de  $N$  da Equação 7 é, portanto, o número mínimo de feixes que a antena direcional deve empregar para que  $d_I$  esteja sempre coberto por  $d_T$ , independentemente da posição que  $R$  ocupe na comunicação com  $T$ . Entretanto  $N$  é um número real e, na prática, deve-se aplicar a função  $\Pi(N)$ , que calcula o primeiro inteiro maior do que  $N$ . Tem-se a expressão final do número mínimo de feixes ( $Nm$ ) que a antena deve empregar:

$$Nm = \Pi \left( 2\pi / \cos^{-1} \left( \frac{\sqrt[4]{SNR_T}}{2} \right) \right) \quad (8)$$

Quando as antenas respeitam a equação (8), basta que o Alcance de Detecção de Portadora ( $d_C$ ) valha  $d_T$  (na prática, o *CSThreshold* é característico do circuito de recepção), pois a radiação de qualquer estação além desse limite é considerada individualmente uma interferência secundária e não precisa ser detectada isoladamente. Com  $d_C = d_T$ , há teoricamente o maior reuso espacial possível.

A Tabela 1 mostra que as antenas devem ter uma quantidade de feixes muito grande para ter  $d_I$  sempre dentro de  $d_T$ . Com  $SNR_T \geq 16$ , isso já é matematicamente impossível. Uma antena direcional com lóbulo principal muito estreito teria comprimento de alguns metros para operar na Banda ISM (2.4GHz), o que já torna não factível o uso de 11 feixes. As pesquisas recentes geralmente adotam antenas direcionais de no máximo 10 feixes para validar as MAC direcionais com o IEEE 802.11. Entretanto, é necessário notar que a inobservância da equação (8) não previne a interferência



gerada por fontes primárias independentemente da posição de  $R$  em relação a  $T$ .

TABELA 1.  
 $Nm$  EM FUNÇÃO DE  $SNR_T$ .

$SNR_T$	10	11	12	13	14	15	16
$Nm$	14	15	17	20	25	36	$\infty$

### C. Definição, Cálculo e Análise de AIFIP

Quando a antena direcional usa  $N < Nm$ , é necessário definir a distância  $d = \delta$  entre  $T$  e  $R$  e calcular  $\Theta(\delta)$ , conforme (6), para que seja mostrada a condição espacial de imunidade. Por questões semânticas, a função  $\Theta(d)$  passa a ser chamada de Abertura de Imunidade a Fontes de Interferência Primária (AIFIP), e  $AIFIP(d)$  nunca valerá  $\pi/N$  quando  $d = d_T$ .

Se  $AIFIP(\delta) > 0$ , existe abertura de imunidade em  $d = \delta$ . Se  $AIFIP(\delta) > \pi/N$ , existe folga na abertura máxima e  $\delta$  pode aumentar (Figura 5a).

Se  $AIFIP(\delta) = 0$ , só há imunidade em  $d = \delta$  se as antenas estiverem alinhadas. Essa situação é o limiar de imunidade e  $AIFIP(d)$  torna-se positivo, se  $d < \delta$ , e negativo, se  $d > \delta$  (Figura 5b).

Se  $AIFIP(\delta) < 0$ , não existe imunidade em  $d = \delta$  e  $R$  deve aproximar-se de  $T$  (Figura 5c).

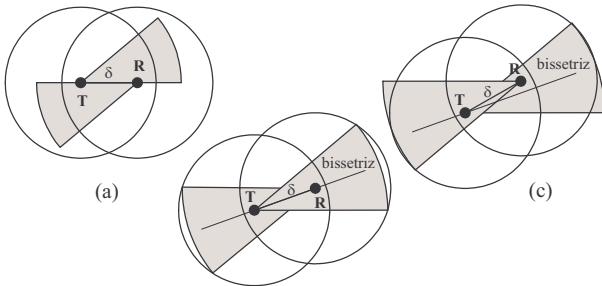


Fig. 5. Interpretação gráfica de  $AIFIP(\delta)$ . a)  $AIFIP(\delta) > \pi/N$ , pois  $R$  e  $T$  estão no limite para haver comunicação e os setores de raio  $d_i$  ainda estão cobertos pelos círculos de raio  $d_T$ . b)  $AIFIP(\delta) = 0$ , pois  $R$  e  $T$  estão alinhados e os setores de raio  $d_i$  estão no limite de cobertura dos círculos de raio  $d_T$ . c)  $AIFIP(\delta) < 0$ , pois os setores de raio  $d_i$  estão descobertos pelos círculos de raio  $d_T$  e permanecerão nessa situação mesmo se  $R$  voltar à bissetriz mantendo  $\delta$ .

Sempre que não houver completa imunidade às fontes de interferência primária, porque (8) não foi observada e o limite estabelecido por  $AIFIP(d)$  foi ultrapassado em algum  $d = \delta$ , o Alcance de Detecção de Portadora ( $d_C$ ) deverá valer o calculado por (2) com  $d = d_T$ , isto é,  $d_C = d_T \sqrt[4]{SNR_T}$ , pois as fontes de interferência são primárias a essa distância.

## VI. AVALIAÇÕES

### A. Desempenho das Antenas

As curvas da Figura 6 comparam a imunidade fornecida por 4 antenas direcionais diferentes. Cada antena tem seu próprio  $N$ , com  $AIFIP$  máximo valendo  $\pi/N$ . Assim é fornecido o percentual de  $AIFIP$  em relação a seu máximo para que as

curvas possam ser comparadas. Nota-se que todas as antenas têm máxima abertura de imunidade para  $d = 0.56d_T$ , conforme (3). Entretanto, o desempenho da antena de 4 feixes é muito fraco e o seu emprego vai depender muito dos cenários *ad hoc* criados. Com posicionamento aleatório de nós, onde não se garante afastamento angular máximo entre  $T$  e  $R$ , as antenas da Figura 6 estão sempre sujeitas a interferência por fontes primárias.

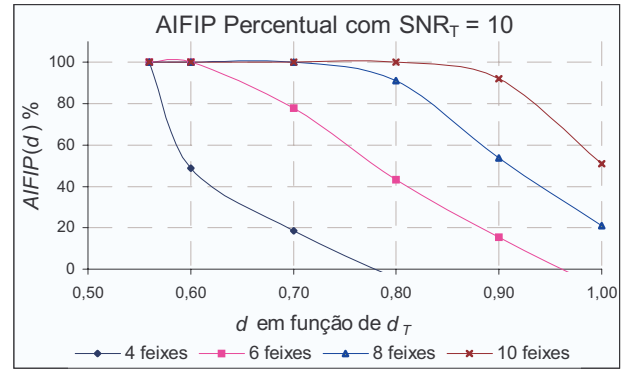


Fig. 6. AIFIP percentual para antenas de 4, 6, 8 e 10 feixes, com  $SNR_T = 10$ . O primeiro ponto de todas as curvas ocorre em  $0.56d_T$ .

O estabelecimento de uma comunicação faz-se com  $T$  em modo direcional e  $R$  em modo omnidirecional e o restante dela com ambos em modo direcional, conforme explicado na Seção II. Essa peculiaridade, quando não há mobilidade, produz cenários onde o máximo afastamento entre  $T$  e  $R$  vale uma fração de  $d_T$  (alcance de transmissão com  $T$  e  $R$  em modo direcional). Considerando os diagramas de radiação do modelo proposto de antena (Seção II) e lembrando que o ganho de uma antena é função da densidade de potência radiada, pode-se provar que a distância máxima entre  $T$  e  $R$  vale:

$$d_{MAX} = k d_T \quad \therefore \quad k = \sqrt{\cos(\pi/N)} \quad (9)$$

A Equação 9 fornece os seguintes valores de  $k$ : 0.71 (4 feixes), 0.87 (6 feixes), 0.92 (8 feixes), 0.95 (10 feixes). O resultado não melhora significativamente o desempenho das antenas, mas mostra, através da Figura 6, que  $AIFIP(d)$  nunca valerá zero e que existe imunidade a fontes de interferência primária sempre que uma comunicação for estabelecida, bastando que  $T$  e  $R$ , separados por uma distância  $\delta$ , tenham afastamento angular inferior a  $AIFIP(\delta)$ . Isso permite criar cenários estáticos imunes com antenas de Feixe Chaveado de 4 feixes se o posicionamento dos nós for controlado.

A Figura 7 avalia a antena de 8 feixes para diversos valores de  $SNR_T$ . Os valores são absolutos e nota-se que, com  $SNR_T = 10$ , a antena tem  $AIFIP$  máxima até  $0.78d_T$  e, considerando o resultado de (9),  $AIFIP$  mínima de aproximadamente  $10^\circ$  para cenários estáticos. Com  $SNR_T \geq 14$ , mesmo em cenários estáticos,  $AIFIP$  pode assumir valores negativos.

Em cenários dinâmicos,  $d$  assume qualquer valor menor ou igual a  $d_T$ . Quando (8) não é respeitada, não é possível garantir que a comunicação estará sempre imune às fontes de interferência primária, pois o afastamento angular entre  $T$  e  $R$  pode variar de 0 até  $\pi/N$  (afastamento angular máximo) durante o movimento. Um exemplo seria  $R$  girando ao redor

de  $T$ . Nesse cenário, antenas de Arranjo Adaptativo, que tendem a se manterem alinhadas, sempre fornecerão imunidade a fontes de interferência primária se elas tiverem taxa de correção angular maior ou igual à taxa de variação do afastamento angular entre  $T$  e  $R$  e se  $AIFIP(d) \geq 0$ , para  $d \leq d_T$ .

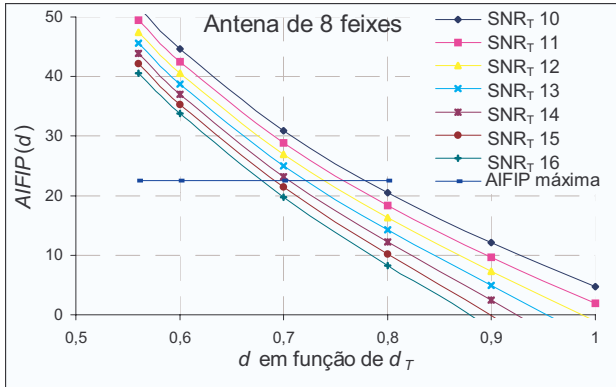


Fig. 7. Curvas parametrizadas de AIFIP para a antena de 8 feixes. O primeiro ponto de todas as curvas ocorre em  $0,56d_T$ . A linha horizontal corresponde à abertura de imunidade máxima,  $22,5^\circ$ .

### B. Curva de Afastamento Angular do Cenário Ad Hoc Estático

Em cenários estáticos com posicionamento conhecido de nós, pode-se verificar se a antena a ser empregada fornece imunidade. A distância e o afastamento angular entre cada par de nós vizinho são usadas para construir a Curva de Afastamento Angular (CAA), que será comparada às curvas parametrizadas de AIFIP da antena. Se, na  $SNR_T$  estabelecida, a CAA ficar sempre abaixo da AIFIP, a antena oferece imunidade no cenário.

Avaliando a antena de 6 feixes, os valores do cenário *ad hoc* da Figura 8 geraram a CAA que foi inserida na Figura 9.

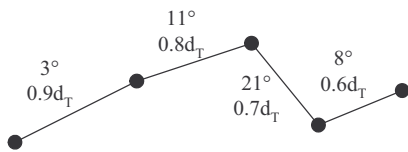


Fig. 8. Distância e afastamento angular entre vizinhos com antenas de 6 feixes.

Pela Figura 9, só há imunidade a fontes de interferência primária se  $SNR_T = 10$ . Em outra  $SNR_T$ , o cenário deve ser reorganizado para que o afastamento angular entre os nós diminua.

### C. Síntese das Condições de Imunidade

Estabelecida a  $SNR_T$ , a comunicação estará sempre imune às fontes de interferência primária se a antena implementar  $Nm$  feixes, independentemente do cenário *ad hoc* criado e do tipo de antena escolhida.

Se, por limitações físicas, não for factível o uso de uma antena de  $Nm$  feixes, as curvas de  $AIFIP(d)$  devem ser analisadas e as seguintes regras devem ser respeitadas:

1. Em cenários *ad hoc* dinâmicos, devem ser usadas antenas de Arranjo Adaptativo com  $AIFIP(d) \geq 0$ ,  $\forall d \leq d_T$ ;
2. Em cenários *ad hoc* estáticos com posicionamento aleatório de nós, devem ser usadas antenas de Arranjo Adaptativo com  $AIFIP(d) \geq 0$ ,  $\forall d \leq k d_T$ ,  $k$  dado por (9);
3. Em cenários *ad hoc* estáticos com posicionamento conhecido de nós, podem ser usadas antenas de Feixe Chaveado se a CAA estiver sempre abaixo da  $AIFIP(d)$ .

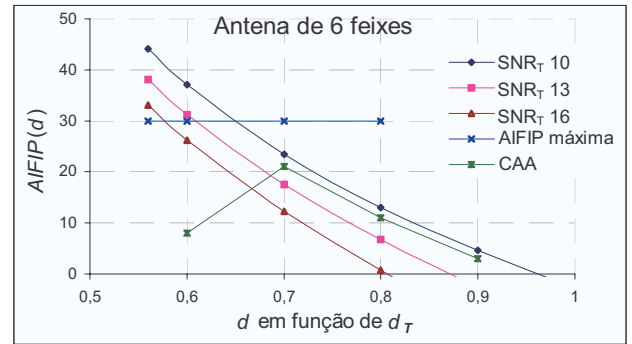


Fig. 9. CAA do cenário da Figura 8 com as curvas de AIFIP parametrizadas da antena de 6 feixes.

## VII. CONCLUSÕES

Os resultados deste artigo podem ser observados por todas as pesquisas com antenas direcionais em redes *ad hoc* IEEE 802.11, independentemente das implementações da subcamada MAC. A imunidade às fontes de interferência primária torna mais confiável a análise dos testes de validação de um novo protocolo.

As antenas de Arranjo Adaptativo são mais versáteis e oferecem imunidade às fontes de interferência primária em qualquer cenário *ad hoc*.

Em redes *ad hoc* com antenas direcionais, maior imunidade a interferência pode ser conseguida se as fontes de interferência secundária também forem evitadas. Entretanto, não é possível explorar mais a geometria das antenas direcionais e mudanças na subcamada MAC são necessárias. Trabalhos com esse foco já estão em andamento.

## VIII. REFERÊNCIAS

- [1] IEEE Std. 802-11. "IEEE Standard for Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specification," June 1997.
- [2] R. Ramanathan, "On the performance of Ad Hoc Networks with Beamforming Antennas," in *ACM MobiHoc*, October 2001.
- [3] K. Xu, M. Gerla, S. Bae, "How Effective is the IEEE 802.11 RTS/CTS Handshake in Ad Hoc Networks?," *IEEE GLOBECOM '02*, Vol. 1, pp.17-21, Nov. 2002.
- [4] M. Takai, J. Martin, A. Ren, R. Bagrodia "Directional Virtual Carrier Sensing for Directional Antennas in Mobile Ad Hoc Networks," in *ACM MobiHoc*, June 2002.
- [5] C. M. Cordeiro, H. Gossain, and D. P. Agrawal, "A Directional Antenna Medium Access Control Protocol for Wireless Ad Hoc Networks," in *the Journal of the Brazilian Telecommunications Society*, Special Issue on Sensors and Ad Hoc Networks, to Appear (Invited Paper).
- [6] H. Gossain, C. M. Cordeiro, and D. P. Agrawal, "MDA: A Novel MAC Protocol for Directional Antennas over Wireless Ad Hoc Networks," submitted to *IEEE Transactions on Mobile Computing*.
- [7] T. Rappaport, "Wireless Communications: Principles and Practice," Prentice Hall, New Jersey, 1996.