

# Evitando Interferências Primárias em Redes Ad Hoc com Antenas Direcionais

Italo Ramella<sup>1,2</sup>, José Ferreira de Rezende<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Grupo de Teleinformática e Automação (GTA) - PEE/COPPE - UFRJ

<sup>2</sup>Diretoria de Telecomunicações da Marinha (DTM) - Marinha do Brasil

**Abstract.** *Interference is a big problem on the performance of ad hoc networks. Recent researches suggest the use of directional antennas as a way to reduce the interference and provide greater spatial reuse and better connectivity. This paper classifies interference as primary and secondary and shows that the primary one may be avoided whenever a minimum number of beams ( $Nm$ ) is used. The very same result can be obtained with an inferior number of beams if some special conditions are respected. These results allow us to elaborate a set of rules to be followed to avoid the primary interference in ad hoc scenarios. Some simulations showed that the application of those rules eliminates the primary interference and improves the network performance up to 70%.*

**Resumo.** *A interferência é um grande problema para o desempenho das redes ad hoc. Pesquisas recentes indicam o uso de antenas direcionais como uma forma de reduzir a interferência e aumentar o reuso espacial e a conectividade. Este artigo classifica a interferência em primária e secundária e mostra que a primária pode ser evitada se as antenas apenas implementarem um número mínimo ( $Nm$ ) de feixes direcionais. O mesmo resultado pode ser obtido com um número menor de feixes se determinadas restrições forem respeitadas. Isso nos permitiu elaborar um conjunto de regras, conforme o cenário ad hoc, para evitar a interferência primária. Algumas simulações mostraram que a observação dessas regras elimina a interferência primária e melhora em até 70% o desempenho das comunicações.*

## 1 Introdução

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 podem gerar colisões, um nível de interferência que causa a perda de pacotes de dados. Formalmente, a interferência em um nó receptor é indiretamente medida através de sua relação sinal-ruído-mais-interferência (*Signal to Interference plus Noise Ratio* - SINR), que indica quantas vezes a potência do sinal recebido é maior do que a soma das potências da interferência e do ruído presentes no meio. Para que a informação seja corretamente interpretada no nó receptor, sua SINR deve sempre ficar acima de um limiar ( $S$ ), senão ocorre uma colisão. Por razões didáticas, classificamos uma fonte de interferência como primária ou secundária. Uma Fonte Primária de Interferência (FPI) é capaz de sempre fazer a SINR ficar abaixo de  $S$  e gera uma colisão, independentemente do ruído presente. Por outro lado, uma Fonte Secundária de Interferência (FSI) é aquela que nunca seria capaz de fazer a SINR ficar abaixo de  $S$  se não existisse ruído; portanto, a FSI só

contribui para elevar o nível de ruído já presente no meio. Entretanto, duas ou mais FSI's concomitantes, ou apenas uma FSI conforme o nível de ruído, podem gerar uma colisão. Mantendo-se o ensejo, uma colisão pode ser classificada como interferência primária, e um simples aumento do nível de ruído, como interferência secundária.

Mostraremos na Seção 2.3 que é uma FPI qualquer fonte de interferência que esteja a uma distância máxima do nó receptor. Além dessa distância, a fonte de interferência passa a ser uma FSI. Então, uma forma de evitar a interferência primária é concentrar esforços na eliminação da influência das FPI's e garantir que a interferência primária seja causada apenas por FSI's. Isso pode ser feito se os nós comunicantes usarem algum mecanismo de reserva do meio que mantenha todas as FPI's cientes da comunicação em andamento. A troca de pacotes RTS/CTS do protocolo IEEE 802.11 [IEEE 1999] é um exemplo de tal mecanismo.

Quando os nós empregam antenas direcionais, a potência do sinal irradiado é concentrada em um setor do espaço, o que já naturalmente reduz o número de fontes de interferência. Além disso, algumas regras geométricas, que surgem apenas com a radiação direcional, mostram que todas as FPI's ficam dentro da área de reserva do meio se apenas o tipo de antena, a abertura do feixe direcional e a posição dos nós comunicantes forem corretamente ajustados, sem a necessidade de qualquer alteração na subcamada MAC.

Este artigo, portanto, explora a geometria para definir em que condições todas as FPI's ficam dentro da área de reserva do meio. A primeira e mais importante condição é fazer as antenas implementarem um número mínimo de feixes direcionais ( $Nm$ ), independentemente da posição dos nós. A segunda condição é permitir que as antenas implementem menos do que  $Nm$  feixes, exigindo, entretanto, que os nós mantenham um afastamento angular máximo, chamado de Prevenção Angular ( $PA$ ). O afastamento angular é o ângulo entre a linha de visada (*Line of Sight* - LOS) dos nós e a direção na qual as antenas estão apontadas. Se  $PA$  for ultrapassado, algumas FPI's podem ficar fora da área de reserva do meio e gerar colisões. Com  $Nm$  e  $PA$ , estabelecemos regras que devem ser seguidas em cenários *ad hoc* para que a interferência primária seja evitada. Essas regras definem o tipo de antena a ser usado e quantos feixes direcionais devem ser implementados. Algumas simulações realizadas no NS-2.28 [ns2 2006] mostraram que as FPI's não geram colisões quando estão cobertas pela reserva do meio. A ausência de colisões melhorou o desempenho das comunicações em até 70% no cenário testado.

No restante deste artigo, a Seção 2 dá uma visão geral sobre antenas direcionais e sobre o mecanismo de reserva do meio, enumera os trabalhos relacionados e introduz alguns conceitos relevantes sobre o modelo de propagação adotado. Na Seção 3,  $Nm$  e  $PA$  são calculados e o desempenho das antenas é avaliado em função desses parâmetros. A Seção 4 enumera as regras a serem seguidas para que se evite a interferência primária e mostra os resultados das simulações. Finalmente, a Seção 5 conclui o artigo e cita trabalhos futuros.

## 2 Nivelamento

Esta Seção fornece os conceitos básicos necessários à compreensão do restante do artigo. Chamamos a atenção para a forma como operam as antenas direcionais consideradas e para o modelo de propagação, que permite avaliar a influência de diversos ambientes nas perdas de sinal.

## 2.1 Conceitos sobre Antenas Direcionais

As antenas direcionais [IEC 2005] são capazes de formar um feixe direcional e apontá-lo em uma direção desejada, concentrando sua atividade (envio e recebimento de sinal) em apenas um setor do espaço. As antenas direcionais são na verdade um sistema formado por um Processador Digital de Sinais (PDS) [dsp 2006] acoplado a um conjunto de irradiadores elementares (dipolos de onda). A forma de atuação do PDS confere às antenas inteligência suficiente para moldar o feixe direcional, determinar o ângulo de chegada (*Angle of Arrival* - AOA) do sinal recebido, entre outras facilidades. Para nossos propósitos, podemos considerar que as antenas possuem um lóbulo principal (também chamado de feixe) de largura  $2\pi/N$ , que recebe e irradia com ganho uniforme na sua região de cobertura, como mostrado na Figura 1(a). Os lóbulos secundários, presentes num diagrama real de radiação, não serão considerados.  $N$  é o número de vezes que o feixe cabe em  $360^\circ$  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.

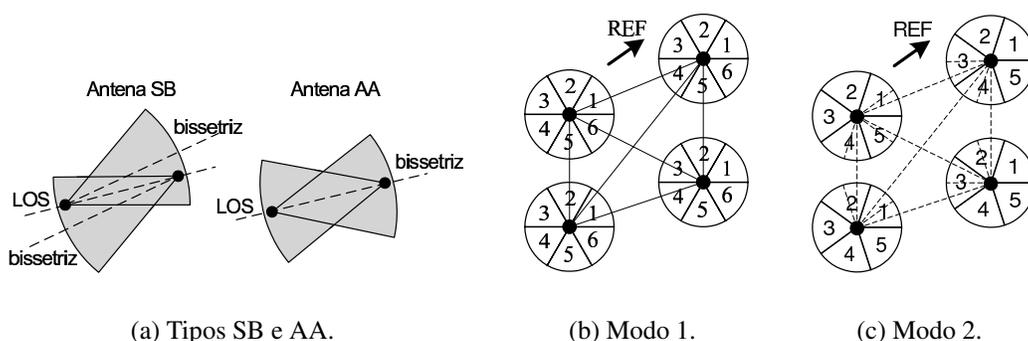


Figure 1. Antenas direcionais.

Este artigo considera dois tipos de antenas direcionais (Figura 1(a)): Feixe Chaveado (*Switched Beam* - SB) e Arranjo Adaptativo (*Adaptive Array* - AA). Quando o tipo SB é usado, o feixe aponta em apenas  $N$  direções, na verdade naquela que cobre o AOA, portanto o LOS dos nós raramente está sobre a bissetriz dos feixes. Quando o tipo AA é usado, o feixe aponta em qualquer direção e rastreia o AOA, portanto o LOS dos nós está sempre sobre a bissetriz dos feixes e diz-se que as antenas estão alinhadas. Em ambos os tipos, assumimos que o padrão do feixe (largura e ganho) se mantém constante, independentemente da direção na qual ele aponta.

Quando o tipo SB é usado, as  $N$  direções nas quais o feixe pode apontar permitem que ele cubra  $360^\circ$  sem sobreposição, portanto elas também são chamadas de feixe e numeradas de 1 a  $N$  (feixe 1 a feixe  $N$ ). Dizemos que o feixe  $m$  está ativo ou que ele está se comunicando quando a antena aponta seu feixe nessa direção. No restante do artigo, essa nomenclatura será usada por simplicidade. A orientação e o número de feixes  $N$  influenciam a forma como as antenas operam. A orientação é um conceito espacial e diz em que direção a bissetriz do feixe  $m$  sempre aponta, independentemente da posição e do movimento dos nós. Quando não há orientação, não existe referência para o feixe  $m$  e a posição e o movimento dos nós alteram a direção na qual ele aponta. Esses conceitos, associados a um  $N$  ímpar ou par, produzem os Modos 1, 2 e 3 de operação das antenas SB. Na verdade, tais Modos são originários deste artigo e foram introduzidos com o intuito

de mostrar o que se deve considerar quando antenas SB forem aplicadas. Ainda não havíamos encontrado na literatura qualquer referência a esses Modos de operação, apesar de suas relevâncias.

**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 1(b) 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 [Cordeiro et al. 2005a, Cordeiro et al. 2005b, Joshi et al. 2004, Cordeiro et al. 2004, Korakis et al. 2003].

**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  $y$  formam ângulos opostos pelo vértice. Na verdade, supondo o sentido anti-horário e que  $x < y$ , a primeira metade de  $m$  comunica-se com a segunda metade de  $x$ , enquanto que a segunda metade de  $m$  comunica-se com a primeira metade de  $y$ . A Figura 1(c) mostra os possíveis enlaces entre antenas de 5 feixes. A orientação adotada foi também apontar o feixe 1 na direção *REF*. Essa forma peculiar de comunicação dá ao Modo 2 uma interessante característica discutida na próxima Seção.

**Modo 3 (Sem Orientação).** Nessas condições, independentemente do uso de um  $N$  ímpar ou par, o feixe  $m$  de uma antena pode se comunicar com qualquer feixe de outra antena. A ausência de orientação permite que o feixe 1 seja apontado em qualquer direção, garantindo uma grande diversidade na comunicação entre os feixes.

Quando o tipo AA é usado, as antenas operam alinhadas, independentemente da condição ímpar ou par de  $N$ , e o conceito de orientação não se aplica. É importante observar que, nos Modos 1 e 3 da antena SB, os nós podem assumir posições em que as antenas operem alinhadas. Assim, a operação da antena AA é considerada um caso especial dos Modos 1 e 3 da antena SB. Essa conclusão é fundamental para a aplicação dos resultados da próxima Seção.

## 2.2 Reserva do Meio

O mecanismo de reserva do meio é essencial para manter os nós cientes de uma comunicação em andamento. Quando são usadas antenas direcionais, conforme o modelo de antena adotado, a região fora do feixe direcional do nó transmissor não é alcançada pelo sinal transmitido e transforma-se numa região de silêncio. 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 conhecido como varredura (*sweeping*) [Cordeiro et al. 2005a] dos protocolos MAC direcionais (DMACs). Nosso 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, o mais usado pela maioria das pesquisas como base para os DMACs. A forma como a reserva circular do meio é executada pelas antenas direcionais é uma característica dos DMACs e está fora do escopo do nosso trabalho.

## 2.3 Propagação

Empregamos o *Log-distance Path loss* [Rappaport 1996], um modelo de propagação semi-empírico que leva em consideração a influência de diversos ambientes para calcular

as perdas de propagação, condição muito importante para que nossos resultados sejam mais conclusivos e abrangentes. A parte analítica do modelo pode ser simplificada pela equação  $P_R = \frac{P_T k}{d^n}$ , 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*).

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 tem potência suficiente para ser corretamente decodificado. **Alcance de Interferência Primária** ( $d_I$ ): distância ao redor do receptor dentro da qual um nó interferente é considerado uma FPI por sempre causar uma interferência primária no receptor.

Podemos encontrar uma expressão para  $d_I$ . Assumimos que dois nós distantes  $d$  estejam se comunicando e, ao mesmo tempo, um nó interferente, distante  $r$  do receptor, comece a transmitir. Supondo que todos os nós usem o mesmo padrão de antena e que os transmissores transmitam com a mesma potência  $P_T$ , uma colisão no receptor ocorrerá se sua SINR ficar abaixo de  $S$ . Usando a equação do modelo de propagação, temos  $r^n/d^n < S$  e, então,  $r < d \sqrt[n]{S}$ . Isso produz:

$$d_I = d \sqrt[n]{S} \quad (1)$$

Quando  $d_I$  for menor do que  $d_T$ , todas as FPIs poderão decodificar os pacotes RTS/CTS. A partir de (1),  $d_I < d_T$  implica  $d < \frac{d_T}{\sqrt[n]{S}}$ . Supondo  $S = 10$ , temos  $d < 0.56d_T$  (para  $n = 4$ ) e  $d < 0.32d_T$  (para  $n = 2$ ). Essas condições indicam que  $d$  (a distância entre os nós comunicantes) deve ser menor do que  $d_T$ , o que pode reduzir a eficiência da rede.

## 2.4 Trabalhos Relacionados

[Xu et al. 2002] 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  $d$  (a distância entre os nós comunicantes) for maior do que  $0.56d_T$ . Isso pode reduzir a eficiência da rede por demandar um maior número de saltos para se alcançar um determinado destino.

Com antenas direcionais, [Ramella and de Rezende 2005] deu o primeiro passo no sentido de se estabelecerem regras para a criação de cenários *ad hoc* imunes às influências das FPIs. Esse trabalho já introduziu os conceitos de *Nm* e *PA*, mas só abordou o Modo 1 das antenas SB e usou o modelo de propagação *Two Ray Ground*, que não permitiu que se avaliasse a influência das perdas de propagação conforme o meio. Portanto suas regras ficam muito restritas a determinadas condições. Nosso artigo corrige essas deficiências, permitindo-nos criar regras muito mais genéricas e eficientes para evitar a interferência primária em redes *ad hoc*.

Os mais recentes protocolos DMACs [Cordeiro et al. 2005a, Cordeiro et al. 2005b] desenvolvidos observaram importantes problemas quando do uso de antenas direcionais [Ramanathan 2001, Takai et al. 2002], mas não seguiram as regras aqui discriminadas e são vulneráveis quanto aos efeitos das FPIs.

### 3 Calculando $Nm$ e $PA$

Em todas as figuras desta Seção,  $T$  e  $R$  são dois nós que se comunicam com antenas iguais depois que a reserva do meio foi executada. Os círculos de raio  $d_T$  centrados em  $T$  e  $R$  referem-se à reserva do meio. As regiões cinza são arcos de círculo de raio  $d_I$ , dado pela Equação 1, e contêm as FPIs que perturbam  $T$  e  $R$ . O feixe das antenas, já direcionado para permitir a comunicação, gera a forma das regiões cinza.

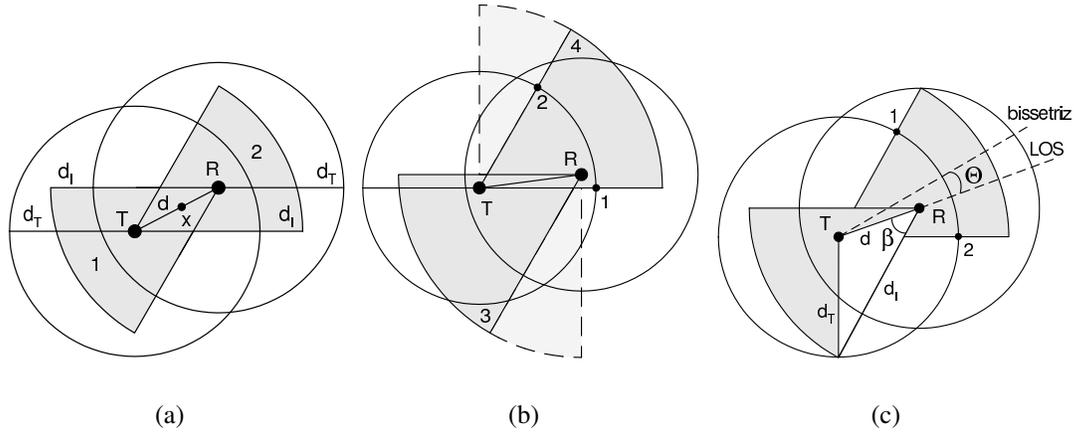


Figure 2. Antenas no Modo 1.

A Figura 2 mostra que o uso das antenas direcionais produz resultados interessantes. Na Figura 2(a), o ponto  $x$  é o limite para  $d_I$  ser menor do que  $d_T$ , mas  $R$  está além desse ponto. Isso realmente gera  $d_I$  maior do que  $d_T$ , pois o círculo centrado em  $R$  não cobre a região 1 que, entretanto, está completamente coberta pelo círculo centrado em  $T$ . A mesma análise pode ser feita para a região 2. Concluímos que a radiação direcional permite que os nós estejam mais distantes. Quando os círculos cobrem as regiões cinza, podemos dizer que  $d_T$  cobre  $d_I$ . Se as regiões 1 e 2 transformarem-se em círculos, reproduzindo uma comunicação omnidirecional,  $d_T$  nunca cobrirá  $d_I$  e  $R$  deverá estar antes do ponto  $x$ . Isso mostra quão limitado é o emprego de antenas omnidirecionais. Na verdade,  $x$  indica o limiar  $d_{min}$ , expresso pela Equação 2, acima do qual a distância entre os nós exige o uso de uma antena direcional para manter  $d_I$  coberto. Abaixo de  $d_{min}$ , apenas uma antena omnidirecional seria necessária. Entretanto,  $d_I$  cresce conforme  $d$  cresce. Na Figura 2(b), as regiões 3 e 4 estão fora dos círculos. A situação piora se a largura do feixe aumenta, conforme as regiões de bordas tracejadas. Um procedimento simples para cobrir  $d_I$  novamente é diminuir a largura do feixe.

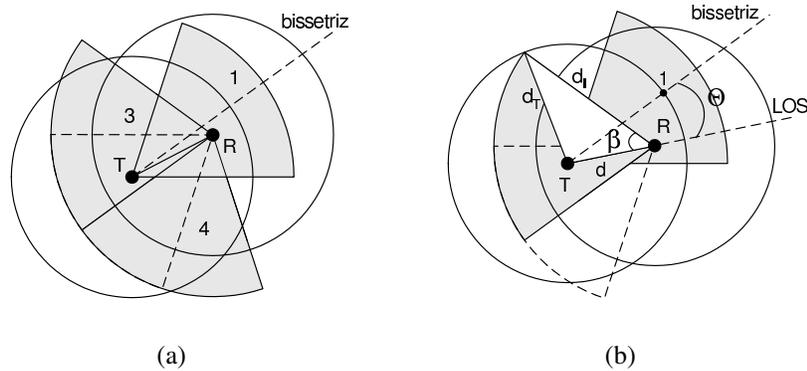
$$d_{min} = \frac{d_T}{\sqrt{S}} \quad (2)$$

#### 3.1 Modos de Operação e Exploração da Geometria

Dependendo do Modo de operação da antena SB, surgem diferentes regras geométricas que influenciam a relação entre  $d_T$  e  $d_I$ . Todos esses Modos serão considerados no cálculo de  $Nm$  e  $PA$ . Os resultados produzidos também podem ser aplicados à antena AA, cuja forma de operar é um caso especial dos Modos 1 e 3.

Na Figura 2, as antenas operam no Modo 1, portanto os dois feixes que estão envolvidos na comunicação geram apenas duas regiões cinza. Notemos 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 (Figuras 2(a) e 2(c)) ou ambas estão descobertas (Figura 2(b)), revelando importante simetria. A Figura 2(c) mostra como a geometria pode ser explorada no Modo 1 para definir as condições que permitirão a  $d_T$  sempre cobrir  $d_I$ .



**Figure 3. Antenas no Modo 2.**

Na Figura 3, as antenas operam no Modo 2. Nesse Modo, a peculiaridade dos enlaces entre os feixes origina três possíveis regiões cinza: as regiões 3 e 4, perturbando  $R$ , e a região 1, perturbando  $T$  (Figura 3(a)). Essas regiões são ativadas em pares conforme a posição dos nós. Pela figura, os pares das regiões que podem estar ativas são 1-3 e 1-4. A região 1 está sempre ativa, enquanto a 3 está ativa quando  $R$  está abaixo da bissetriz e a 4, ativa quando  $R$  está acima dela. No caso, o par 1-3 é o ativo. As fronteiras das regiões de ambos os pares nunca são paralelas, então não podemos concluir que as regiões ativas estão ambas cobertas ou ambas descobertas, como ilustrado na figura. Concluímos 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(b) mostra como a geometria pode ser usada para garantir que a região 3 fique coberta. Já que a região 1 e a de bordas pontilhadas (que abrange a metade inferior da região 3 e a metade superior da região 4) têm a simetria que investigamos no Modo 1, a condição para cobrir a região 1 já foi definida na Figura 2(c). Portanto, o Modo 2 deve ser considerado um modo dual porque ele precisa respeitar também as condições do Modo 1.

Na Figura 4, as antenas operam no Modo 3. As linhas pontilhadas na Figura 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 está 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 cinza estejam descobertas ou cobertas. A Figura 4(b) mostra como a geometria pode ser explorada para revelar as condições que garantirão uma região cinza sempre coberta. Essas condições são efetivamente as mesmas do Modo 1, mas no Modo 3 os nós devem respeitá-las individualmente para que ocorra a cobertura total desejada.

Nas Figuras 2(c), 3(b) e 4(b), as antenas estão implementando  $N$  feixes de largura  $2\pi/N$ . Em todas elas, exceto na 3(b) devido ao seu modo dual, os círculos cobrem as

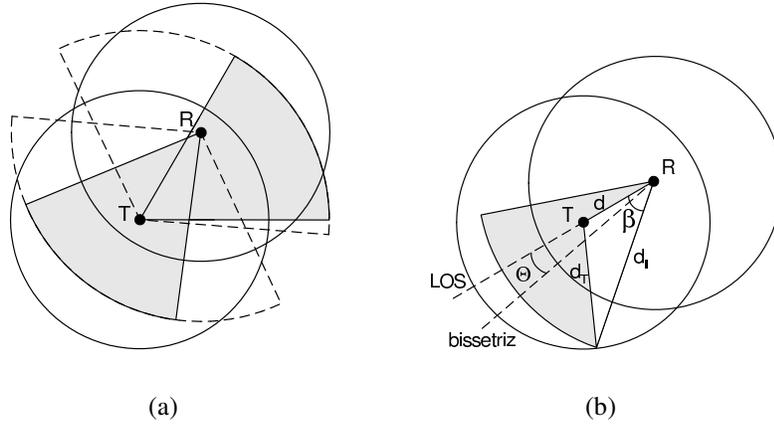


Figure 4. Antenas no Modo 3.

regiões cinza, o que significa que todas as FPIs podem decodificar os quadros RTS/CTS. Notório é o mesmo padrão com o qual a geometria é explorada:  $\beta$  representa o ângulo entre os segmentos  $d$  e  $d_I$ , e  $\theta$ , 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  $\theta$  é zero.  $\beta$  assume um valor entre  $\pi/N$  e  $2\pi/N$ . Aplicando a Lei dos Cosenos ao triângulo  $dd_I d_T$ , temos  $\cos(\beta(d)) = \frac{d^2 + d_I^2 - d_T^2}{2dd_I}$ . Usando (1) para eliminar  $d_I$ , encontramos a Equação 3, que estabelece um valor para  $\beta$ . Na verdade,  $\beta$  nada mais é do que um artifício para o cálculo de  $\theta$  (as equações que relacionam esses dois ângulos serão mostradas na Seção 3.3) e indiretamente mostra a máxima separação angular que os nós podem ter para que as regiões cinza permaneçam cobertas.

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

$S$  e  $n$  são também parâmetros da Equação (3) e podem assumir valores que tornem impossível calcular  $\beta$  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, forçando os nós a reduzir  $d$  para que  $d_I$  também diminua. Na verdade, a distância entre os nós ( $d$ ) não pode ultrapassar um certo limite,  $d_{max}$ . Analiticamente,  $\beta$  não poderá ser calculado quando for maior do que 1 o argumento do  $\cos^{-1}$  da Equação 3. Se a expressão for resolvida, encontrar-se-á  $d_{max}$ , que poderá ser menor, igual ou maior do que  $d_T$ .

$$d_{max} = \frac{d_T}{\sqrt{1 + \sqrt[n]{S^2} - 2\sqrt[n]{S}}} \quad (4)$$

### 3.2 Calculando $Nm$

$Nm$  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 analisar novamente as Figuras 2(c), 3(b) e 4(b) para determinar as posições que  $T$  e  $R$  devem assumir para produzir regiões cinza descobertas ao máximo. Em seguida, aplicamos os correspondentes valores de  $d$  e  $\beta$  em (3). 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 2(c) 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(b). No Modo 3, a Figura 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, vemos facilmente que  $d = d_T$  e  $\beta = 2\pi/N$ . Isso fornece a  $d_I$  seu valor máximo e  $\beta$  assume a largura do feixe. Aplicando esses valores em (3) e usando o operador  $\lceil$  para fornecer um número inteiro, encontramos a Equação 5, que finalmente fornece  $Nm$ . Observamos que (5) depende apenas de  $n$  e  $S$ , portanto a posição dos nós é realmente irrelevante. Esse resultado aplica-se às antenas SB em qualquer Modo de operação e às antenas AA.

$$Nm = \lceil \left( 2\pi / \cos^{-1} \left( \frac{\sqrt[n]{S}}{2} \right) \right) \quad (5)$$

**Influência de  $S$  e  $n$ .** A Tabela 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  $d_I$  não pode ser sempre coberto por  $d_T$  mesmo que as antenas implementem um feixe extremamente fino. As posições da tabela preenchidas com o símbolo  $\star$  podem ser compreendidas da mesma forma. Entretanto, para esses valores de  $n$  e  $S$ , (5) não pode ser resolvida porque  $\cos(2\pi/Nm) > 1$ . Isso faz com que  $Nm$  tenha uma estreita relação com  $d_{max}$ : se  $Nm$  pode ser calculado,  $d_{max} > d_T$ , senão,  $d_{max} < d_T$ . Para  $n \leq 3$ , expressando ambientes do tipo *Free Space* ou *In Building LOS* (como definidos em [Rappaport 1996]),  $Nm$  nunca pode ser calculado.

**Table 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
4	14	15	17	20	25	36	$\infty$
3.6	20	28	83	$\star$	$\star$	$\star$	$\star$
3.3	$\star$						

### 3.3 Calculando $PA$

A Tabela 1 mostra que os altos valores de  $Nm$  e a impossibilidade de calculá-lo exigem que as antenas implementem menos do que  $Nm$  feixes. Entretanto, a posição dos nós passa a ser relevante. Essa restrição é melhor compreendida se observarmos novamente as Figuras 2(c), 3(b) e 4(b), onde  $\theta$  assume um valor que produz regiões cinza cobertas (exceto na Figura 3(b) por causa da dualidade do Modo 2). Se a distância  $d$  aumentar e  $\theta$  permanecer constante,  $d_I$  crescerá e as regiões cinza ficarão descobertas. Como a largura do feixe não pode ser ajustada, a única forma de novamente cobrir as regiões cinza é reduzir  $\theta$ . Portanto, para o novo  $d$  estabelecido, há um novo  $\theta$  revelando qual a máxima separação angular que os nós podem ter. Esse limiar para  $\theta$  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  $\theta$  assume um valor entre 0 e  $\pi/N$  (metade da largura do feixe), entretanto  $PA$  requer uma análise mais elaborada, que será feita de acordo com os Modos 1, 2 e 3.

**Modos 1 e 3.** As Figuras 2(c) e 4(b) mostram  $\theta$  assumindo o limiar  $PA$  para um dado  $d$ . Uma expressão para  $\theta$  pode ser facilmente encontrada através da geometria:  $\theta = \beta - \pi/N$ . Usando (3) para substituir  $\beta$ , temos:

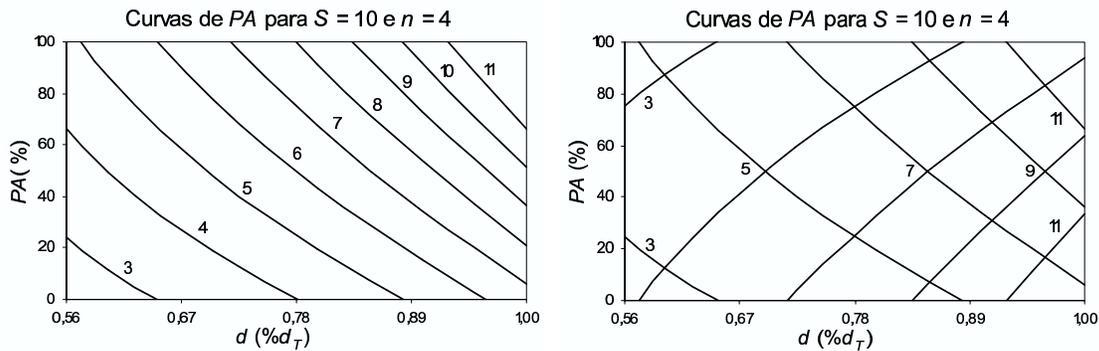
$$PA = \cos^{-1} \left( \frac{1 + \sqrt[3]{S^2 - (d_T/d)^2}}{2\sqrt[3]{S}} \right) - \frac{\pi}{N} \quad (6)$$

**Modo 2.** A Figura 3(b) mostra  $\theta$  assumindo o limiar  $PA$  para um dado  $d$ . Como já discutimos no início da Seção, 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 avaliação de  $PA$  para cobrir a região que perturba  $T$  refere-se ao Modo 1 e já foi considerada. A avaliação seguinte destina-se à cobertura da região que perturba  $R$ . Se  $\theta$  diminuir,  $d_I$  ficará descoberto, mas ele ficará mais coberto se  $\theta$  aumentar, 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  $\theta$  pode assumir para cobrir a região cinza. A geometria revela  $\theta = 2\pi/N - \beta$ . Usando (3) para substituir  $\beta$ , produzimos uma nova expressão que chamaremos de  $PA_{dual}$ .

$$PA_{dual} = \frac{2\pi}{N} - \cos^{-1} \left( \frac{1 + \sqrt[3]{S^2 - (d_T/d)^2}}{2\sqrt[3]{S}} \right) \quad (7)$$

Agora podemos compreender melhor a dualidade do Modo 2: para uma dada distância  $d$  entre os nós,  $\theta$  deve ser maior do que  $PA_{dual}$  e menor do que  $PA$ . Essa característica é um importante fator redutor do desempenho das antenas SB 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  $d$ .

Com (6) e (7) podemos traçar curvas que facilitarão a análise do desempenho de uma antena de  $N$  feixes. A Figura 5 mostra as curvas para  $N$  variando de 3 a 11 feixes quando  $S = 10$  e  $n = 4$ . Nas abscissas, a distância  $d$  entre  $T$  e  $R$  é dada em percentuais de  $d_T$ . Como cada antena tem sua própria largura de feixe  $2\pi/N$  (o valor máximo que  $\theta$  assume é  $\pi/N$ ), as ordenadas mostram  $PA$  em valores percentuais (100% significa  $PA = \pi/N$ ). Todas as curvas começam na abscissa  $0.56d_T$  ( $d_{min}$ ).



(a) Modos 1 e 3.

(b) Modo 2.

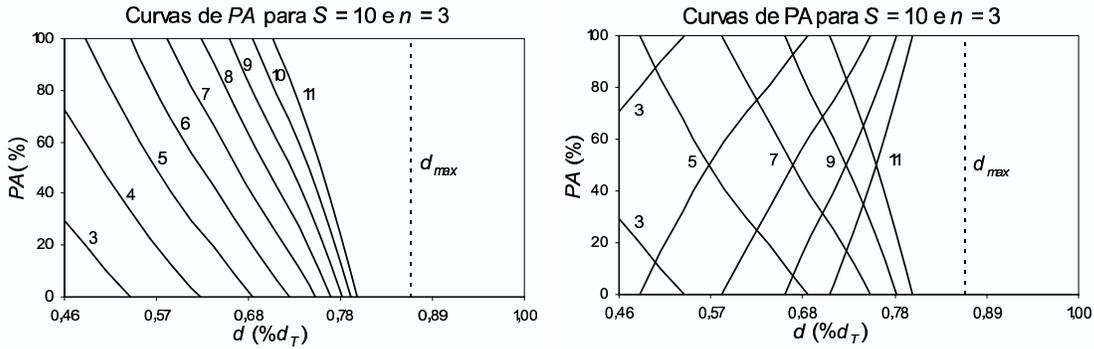
**Figure 5. Curvas de  $PA$  parametrizadas em  $N$ .**

A Figura 5(a) avalia  $PA$  nos Modos 1 e 3.  $PA(\delta) \geq 100\%$  implica  $PA(\delta) \geq \pi/N$ , então essa antena de  $N$  feixes sempre garante  $d_I$  coberto para qualquer  $d \leq \delta$ . As curvas de  $N$  ímpar referem-se ao Modo 3 e não podem ser usadas no Modo 1, que

considera apenas  $N$  par. Os valores de  $d$  que geram  $PA$  acima de 100% e  $PA$  igual a zero são boas referências para avaliarmos o desempenho das antenas. A performance das antenas de 3 e 4 feixes é muito fraca: suas curvas não têm  $PA(d) = 100\%$  e ainda mostram que  $PA(0.65d_T) = 0$  (3 feixes) e  $PA(0.78d_T) = 0$  (4 feixes), o que significa que os nós não podem usar todo o seu alcance de transmissão. Quanto maior o número de feixes, melhor o desempenho, como mostram as curvas de 7, 8, 9, 10 e 11 feixes, cujo  $PA(d)$  nunca vale 0. Para esses valores de  $N$ ,  $d$  pode valer  $d_T$  se  $\theta \leq PA(d_T)$ .

A Figura 5(b) avalia o Modo 2. As curvas de coeficiente angular positivo são  $PA$  e as de coeficiente angular negativo,  $PA_{dual}$ . Cada ponto de junção das 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  $d_{jp}$ ,  $\theta$  deve estar entre as curvas. Assim, a figura mostra que 3 feixes nunca fornecem a cobertura total exigida, enquanto 11 feixes conseguem fornecê-la até em  $d = d_T$ . O ponto de junção sempre ocorre em  $PA = 50\%$  e deriva da combinação das Equações 6 e 7. Em valores absolutos, 50% fornece  $PA = \pi/2N$ . Se introduzirmos esse valor em (6), encontraremos  $d_{jp} = \frac{d_T}{\sqrt{1 + \sqrt[n]{S^2 - 2\sqrt[n]{S} \cos(3\pi/2N)}}}$ .

**Influência de  $S$  e  $n$ .** A Figura 5 serve de base para avaliarmos a influência de  $S$  e  $n$ . Se  $S$  diminui ou  $n$  aumenta, as curvas de  $PA$  deslocam-se para a direita e criam melhores condições para que as regiões cinza fiquem cobertas. Entretanto, se  $S$  aumenta ou  $n$  diminui, as curvas de  $PA$  deslocam-se para a esquerda e criam piores condições. A Figura 6, onde  $d_{max} < d_T$ , mostra esses deslocamentos para a esquerda quando  $n = 3$ .



(a) Modos 1 e 3.

(b) Modo 2.

**Figure 6. Deslocamento à esquerda das curvas de  $PA$ .**

## 4 Análise

Esta Seção mostra as regras que devem ser seguidas para se tentar manter  $d_I$  sempre coberto por  $d_T$ , situação em que todas as FPIs estariam decodificando os pacotes de reserva do meio. As simulações realizadas no NS-2.28 ratificam que FPIs cobertas não geram colisões.

### 4.1 Regras de Cobertura (RC)

As RC são um conjunto de procedimentos relacionando  $d_{min}$ ,  $d_{max}$ ,  $Nm$  e  $PA$  para identificar se é possível manter  $d_I$  coberto por  $d_T$ . Sendo isso possível, as RC definem o tipo de antena a usar e o número de feixes ( $N$ ) a implementar.

### Cenário Estático com Posicionamento Aleatório de Nós.

Nesse tipo de cenário,  $d$  e  $\theta$  assumem qualquer valor e podem atingir seus máximos  $d_T$  e  $\pi/N$ , respectivamente. Como não é possível garantir que  $d < d_{min}$ , antenas direcionais devem ser usadas. Sendo possível calcular e implementar  $Nm$ , qualquer tipo de antena (SB em qualquer Modo ou AA) pode ser usado. Sendo possível calcular  $Nm$  e impossível implementá-lo,  $\theta$  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  $PA(d_T) > 100\%$ , o que implica  $N \geq Nm$  e gera uma contradição, pois se supõe que  $N < Nm$ ; portanto, é impossível usar antenas SB. Sendo impossível calcular  $Nm$ ,  $d_{max} < d_T$ . Como  $d$  pode atingir  $d_T$  e ser maior do que  $d_{max}$ , é impossível estabelecermos um cenário onde  $d_T$  sempre cubra  $d_I$ .

### Cenário Estático com Posicionamento Conhecido de Nós.

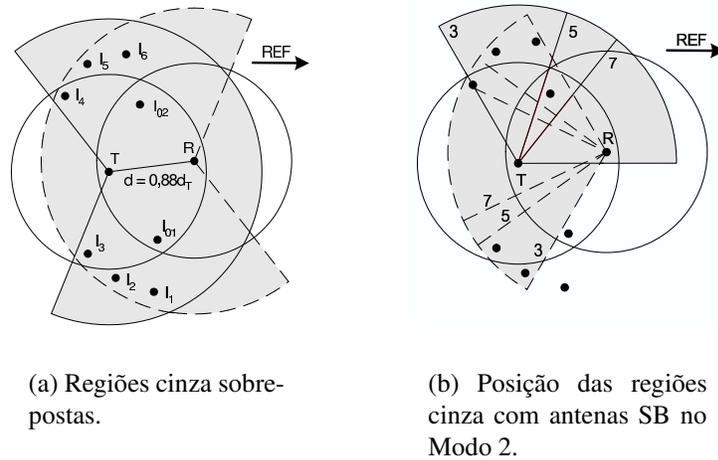
Nesse caso,  $d$  e  $\theta$  são valores conhecidos. Primeiramente é necessário computar a distância ( $\delta_i$ ) entre cada par de nós comunicantes e encontrar a maior delas ( $D$ ). Se  $D < d_{min}$ , apenas antenas omnidirecionais são necessárias. Se  $D > d_{min}$ , antenas direcionais devem ser usadas. Sendo possível calcular e implementar  $Nm$ , qualquer tipo de antena (SB em qualquer Modo ou AA) pode ser usado. Sendo possível calcular  $Nm$  e impossível implementá-lo,  $PA$  deve ser respeitado. Antenas AA podem ser usadas com  $N$  que forneça  $PA(D) > 0$ . Antenas SB podem ser usadas com  $N$  que forneça  $PA(D) > 100\%$ , entretanto, o procedimento seguinte consegue calcular um  $N$  menor: **1)** Definir o Modo de operação; **2)** Encontrar o menor  $N$  que forneça:  $PA(D) > 0$  (Modos 1 e 3); ou  $D < d_{jp}$  (Modo 2); **3)** Calcular a separação angular  $\theta_i$  para cada  $\delta_i$  computado (esse passo depende de  $N$  e também da posição do feixe 1); no Modo 3, para cada  $\delta_i$ , é necessário calcular dois  $\theta_i$ , uma para cada nó comunicante, o que gera  $\theta_{i1}$  e  $\theta_{i2}$ ; **4)** Verificar que:  $\forall i, \theta_i < PA(\delta_i)$  (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); retornar ao passo anterior se a verificação falhar; **5)** Ratificar  $N$  como o número de feixes a implementar. Sendo impossível calcular  $Nm$ , as regras anteriores podem ser aplicadas se  $D < d_{max}$ . Se  $D > d_{max}$ , é impossível sempre estabelecermos um cenário livre da influência das FPIs.

**Cenários Dinâmicos.** Nesse caso, os nós estão se movendo, portanto a reserva do meio não consegue assumir uma forma circular centrada neles. Na verdade, ela assume qualquer forma. Dependendo do tamanho das regiões cinza, da duração das transmissões e de quão rápido é o movimento, há uma chance de se manterem cobertas as regiões cinza. Entretanto, quantificar esses três parâmetros é uma tarefa difícil e demanda análises adicionais.

## 4.2 Simulações

As simulações usaram o NS-2.28, onde desenvolvemos um módulo de antenas direcionais que simula antenas AA e SB e também permite que a antena opere de forma omnidirecional. Usamos o IEEE 802.11, que foi adaptado para fazer as antenas operarem de forma direcional apenas para enviar DADO e ACK; os pacotes de reserva, RTS e CTS, são enviados omnidirecionalmente.

A Figura 7 mostra o cenário *ad hoc* estático, implementado com  $S = 10$  e  $n = 4$ , onde  $T$  e  $R$  são os nós comunicantes e todos os demais nós são fontes de interferência.



**Figure 7. O cenário *ad hoc* estático das simulações.**

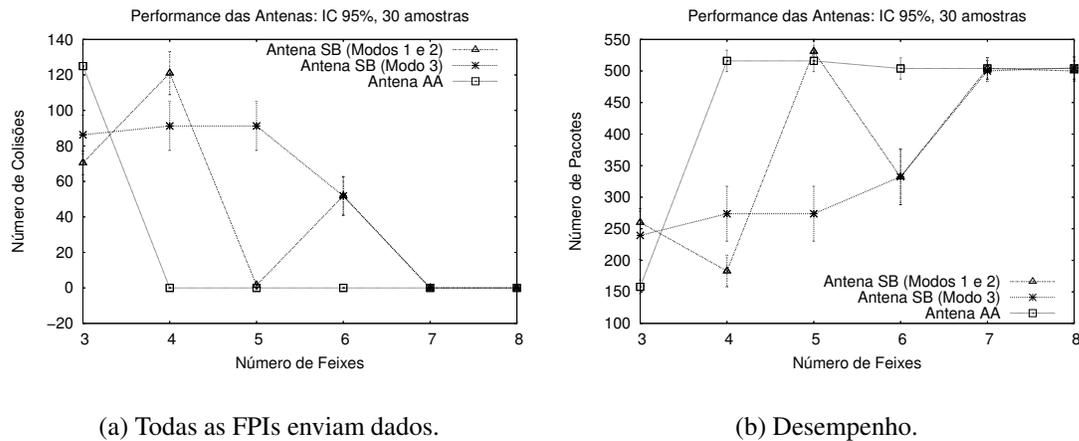
O objetivo das simulações é mostrar que FPIs cobertas pela reserva do meio não geram colisões e que FPIs descobertas, entretanto, podem gerar muitas colisões e prejudicar as comunicações. Para isso, foram usadas em  $T$  e  $R$  antenas AA e SB que implementaram de 3 a 8 feixes. Por simplicidade, as antenas das fontes de interferência sempre operam de forma omnidirecional.

As comunicações ocorrem da seguinte forma:  $T$  transmite a  $R$ ;  $I1$ ,  $I2$  e  $I3$  transmitem a  $I01$ , enquanto  $I4$ ,  $I5$  e  $I6$  transmitem a  $I02$ . Todos os transmissores são fluxos CBR contínuos e concomitantes e as transmissões duram 2 segundos.  $T$  e  $R$  enviam respectivamente RTS e CTS e depois, DADO e ACK. As fontes de interferência foram configuradas para não enviar RTS e CTS, portanto  $I1$ ,  $I2$ ,  $I3$ ,  $I4$ ,  $I5$  e  $I6$  enviam DADO e  $I01$  e  $I02$  respondem com ACK. Os círculos centrados em  $T$  e  $R$  representam a reserva do meio (RTS/CTS), enquanto que as regiões cinza, arcos de círculo também centrados em  $T$  e  $R$ , representam seus alcances de interferência primária. Esses arcos têm aberturas conforme o número de feixes que as antenas implementam, mas, na Figura 7(a), as regiões cinza são o resultado de todos os arcos sobrepostos. Isso basta para que mostremos que  $I1$ ,  $I2$ ,  $I5$  e  $I6$  serão FPIs descobertas pela reserva do meio e geradoras de colisões em  $T$  e  $R$  conforme o tipo de antena usado e o número de feixes empregados. A Figura 7(b) mostra a posição das regiões cinza, conforme o número de feixes implementados, quando as antenas operam no Modo 2; é possível notar que apenas  $I2$ ,  $I5$  e  $I6$  são FPIs com 3 feixes. Com muitos feixes, independentemente da antena usada, as regiões cinza diminuem suas aberturas angulares, fazendo com que  $I1$ ,  $I2$ ,  $I5$  e  $I6$  deixem de ser FPIs e não gerem mais colisões.

Como parâmetros relevantes de simulação, temos: taxa de dados do 802.11 (11Mb/s), taxa básica do 802.11 (2Mb/s), taxa dos fluxos CBR (6000Kb/s), alcance de transmissão (17.5m), alcance de detecção de portadora (35m), tamanho do DADO enviado por  $T$  (500kb), tamanho do DADO enviado pelas fontes de interferência (100kb), frequência de operação (2.4GHz). O ganho omnidirecional e o ganho direcional das antenas, independentemente do número de feixes empregados, valem sempre 1 (isso permite que o cenário seja o mesmo para os diversos números de feixes; com ganhos direcionais

diferentes, deveríamos reposicionar os nós de modo que suas posições relativas se mantivessem). Com esses parâmetros, o DADO enviado por  $T$  a  $R$  dura  $590.545\mu s$ , portanto as FPIs, que só detectam a portadora das transmissões de  $T$  e  $R$ , têm tempo para aguardar EIFS ( $364\mu s$ ) + backoff depois do envio do CTS de  $R$  e transmitir, colidindo com o DADO que ainda está sendo recebido em  $R$ .

Medimos, portanto, o número de colisões em  $R$  enquanto ele recebia DADO de  $T$ . Antes de qualquer avaliação, desligamos  $I1$ ,  $I2$ ,  $I5$ , e  $I6$  e constatamos que  $I3$ ,  $I4$ ,  $I01$  e  $I02$ , cobertas pelos círculos, não provocaram colisões. Depois, ligamos  $I1$ ,  $I2$ ,  $I5$ , e  $I6$ , mas só permitimos que elas respondessem às descobertas de rotas. Registramos um pequeno número de colisões. A partir de então, todas as FPIs enviaram dados, o que aumentou bastante o número de colisões, conforme a Figura 8(a). Como consequência dessas colisões, o número de pacotes recebidos por  $R$  é mostrado na Figura 8(b). Notamos, em alguns casos, que a influência das FPIs reduziu o desempenho em quase 70%. A Figura 8(a) mostra que, quanto maior o número de feixes implementados, menor é o número de colisões em todas as antenas testadas. Isso ocorre porque o número de feixes implementados pelas antenas se aproxima do determinado pelas Regras de Cobertura para que as regiões cinza fiquem completamente cobertas pela reserva do meio. Ocorre, entretanto, uma peculiaridade com a curva da antena SB nos Modos 1 e 2: com 5 feixes (Modo 2) não há colisões, mas com 6 feixes (Modo 1) elas reaparecem. Isso se deve às posições dos feixes no Modo 2, que mantém as regiões cinza ainda descobertas, mas cobrem todas as FPIs, conforme mostra a Figura 7(b).



(a) Todas as FPIs enviam dados.

(b) Desempenho.

**Figure 8. Resultados das simulações.**

## 5 Conclusões

Pelo nosso conhecimento, nenhum trabalho estudara de forma tão abrangente (considerando também a influência das perdas de propagação conforme o meio) como eliminar a influência das FPIs usando apenas a radiação direcional e algum mecanismo de reserva do meio.  $Nm$ ,  $PA$ ,  $d_{min}$  e  $d_{max}$  são conceitos importantes que nos permitiram criar as Regras de Cobertura (RC), um conjunto de procedimentos, de acordo com o cenário *ad hoc* estático, para que todas as FPIs fiquem cobertas pela área de reserva do meio e não gerem colisões. Nossos resultados são genéricos e podem ser usados por qualquer trabalho com antenas direcionais em redes *ad hoc*, o que tornaria os próximos DMACs mais eficazes.

Nossos resultados mostram que as antenas AA apresentam melhor desempenho, não só pela simplicidade em aplicar-lhes as RC, mas principalmente pelo menor número de feixes que elas precisam implementar. Apesar dessa evidência, só encontramos DMACs que operem com antenas SB. É uma grande necessidade desenvolver um DMAC que opere também com antenas AA, e já começamos um promissor trabalho com esse objetivo. Também faz parte de nossos trabalhos futuros estudar uma forma de evitar a interferência secundária e, principalmente, estudar os cenários dinâmicos, dois desafios muito difíceis, mas também extremamente necessários para estender o uso das antenas direcionais em redes *ad hoc*.

## References

- (2006). Altera - Advanced DSP Techniques - Smart Antennas. <http://www.altera.com/end-markets/wireless/advanced-dsp/beamforming/wir-beamforming.html>.
- (2006). The network simulator ns-2. <http://www.isi.edu/nsnam/ns>.
- Cordeiro, C. M., Gossain, H., and Agrawal, D. P. (2005a). A Directional Antenna Medium Access Control Protocol for Wireless Ad Hoc Networks. In *Brazilian Telecommunications Society*. Special Issue on Sensors and Ad Hoc Networks.
- Cordeiro, C. M., Gossain, H., and Agrawal, D. P. (2005b). MDA: A Novel MAC Protocol for Directional Antennas over Wireless Ad Hoc Networks. In *IEEE Transactions on Mobile Computing*.
- Cordeiro, C. M., Gossain, H., Cavalcanti, D., and Agrawal, D. P. (2004). The Deafness Problems and Solutions in Wireless Ad Hoc Networks Using Directional Antenna. In *IEEE Globecom*.
- IEC (2005). Smart Antenna Systems. International Engineering Consortium, On-Line Education, [http://www.iec.org/online/tutorials/acrobat/smart\\_ant.pdf](http://www.iec.org/online/tutorials/acrobat/smart_ant.pdf).
- IEEE (1999). IEEE standard 802.11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. Padrão.
- Joshi, T., Cordeiro, C. M., Vogety, S., Yin, J., Gossain, H., and Agrawal, D. P. (2004). Broadcasting over Switched Single Beam Antenna Systems. In *IEEE ICON*.
- Korakis, T., Jakllari, G., and Tassioulas, L. (2003). A MAC Protocol for Full Exploitation of Directional Antennas in Ad-hoc Wireless Networks. In *ACM Mobihoc*.
- Ramanathan, R. (2001). On the Performance of Ad Hoc Networks with Beamforming Antennas. In *ACM MobiHoc*.
- Ramella, I. and de Rezende, J. F. (2005). Minimizando a Interferência em Redes Ad Hoc com Antenas Direcionais. In *SBrT*.
- Rappaport, T. (1996). *Wireless Communications: Principles and Practice*. Prentice Hall - New Jersey.
- Takai, M., Martin, J., Ren, A., and Bagrodia, R. (2002). Directional Virtual Carrier Sensing for Directional Antennas in Mobile Ad Hoc Networks. In *ACM MobiHoc*.
- Xu, K., Gerla, M., and Bae, S. (2002). How Effective is the IEEE 802.11 RTS/CTS Handshake in Ad Hoc Networks? In *IEEE GLOBECOM*, volume 1, pages 17–21.