

# Uma Análise de Desempenho de Redes Ad Hoc de Múltiplos Saltos Utilizando Antenas Direcionais

Rafael Rosa da Rocha, Luís Henrique Maciel Kosmalski Costa e José Ferreira de Rezende

**Resumo**—O uso de antenas direcionais em redes IEEE 802.11 pode aumentar a capacidade agregada da rede. Esta tecnologia possibilita a reutilização do espaço, aumentando o número de comunicações simultâneas em uma rede. Este artigo identifica um problema, a “surdez intrínseca”, na utilização de antenas direcionais em redes IEEE 802.11 no modo ad hoc em comunicações de múltiplos saltos. Um método simples é proposto para contornar este problema específico, o protocolo de acesso ao meio AHDMAC. A eficiência do AHDMAC é comprovada através de simulações. Com sua utilização é possível obter ganho em relação ao modo puramente direcional em situações onde não existe reutilização espacial. Onde a reutilização do espaço é possível, o AHDMAC consegue melhor desempenho inclusive do que o modo omnidirecional. Desta forma, este artigo propõe uma modificação simples do esquema clássico de redes com antenas direcionais possibilitando de forma eficiente que os ganhos com a reutilização espacial sejam predominantes sob outros efeitos negativos.

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

**Abstract**—The use of directional antennas can improve the aggregate capacity of IEEE 802.11 networks. This technology makes spatial reuse possible, increasing the number of simultaneous communications in a network. This paper identifies one problem, the “intrinsic deafness”, in the utilization of directional antennas in IEEE 802.11 ad hoc networks with multiple hops. One simple method is proposed to work out this specific problem, AHDMAC medium access control protocol. AHDMAC effectiveness is proved based on simulations. With its use it is possible to achieve improvement over purely directional mode in situations where spatial reuse does not exist. Where spatial reuse is possible, AHDMAC achieves better rates even than omnidirectional mode. Concluding, this paper proposes one simple modification for the classical directional antennas networks making possible for the spatial reuse gains to dominate over negative effects.

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

## I. INTRODUÇÃO

O uso de antenas direcionais em redes sem fio IEEE 802.11 no modo ad hoc vem sendo estudado há algum tempo. Sua principal motivação é o sucesso com que esta tecnologia é utilizada nas redes sem fio de telefonia celular. O principal benefício das antenas direcionais é a chamada reutilização do espaço, que pode ser definida como o aumento do número de comunicações simultâneas em um mesmo espaço. Uma transmissão direcional pode ser vista simplificada como

Rafael Rosa da Rocha, Luís Henrique Maciel Kosmalski Costa e José Ferreira de Rezende, Grupo de Teleinformática e Automação, PEE/COPPE - DEL/UF RJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, e-mails: rafael@gta.ufrj.br, luish@gta.ufrj.br, rezende@gta.ufrj.br. Este trabalho foi realizado com recursos da CAPES/PRODOC, RNP/FINEP/FUNTTTEL e do CNPq.

ocupando um setor circular, enquanto a comunicação omnidirecional utiliza o espaço correspondente a todo um círculo. A Figura 1 ilustra uma transmissão omnidirecional e uma direcional.

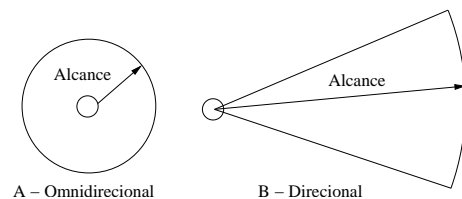


Fig. 1. Transmissão omnidirecional e direcional.

Outra vantagem das transmissões direcionais é que se gasta menos energia para obter o mesmo alcance. A energia é concentrada em uma região menor e, portanto, o gasto energético é menor. Contudo, o maior benefício trazido pelas antenas direcionais é o aumento de alcance decorrente da maior concentração da potência do rádio transmissor em uma determinada direção. Quando é fornecida a mesma potência de uma transmissão omnidirecional, o alcance da transmissão direcional é aumentado conforme ilustrado na Figura 1. Portanto, temos duas situações que podem ser exploradas na questão de energia com o uso de antenas direcionais. A primeira é manter o mesmo alcance nas transmissões omnidirecionais e direcionais e economizar energia, e a segunda é manter a mesma potência nas transmissões obtendo um alcance maior para o modo direcional. Numa comunicação ad hoc de múltiplos saltos, este aumento de alcance pode diminuir quebras na rede, bem como diminuir a latência devido ao menor número de saltos necessários a uma transmissão.

Os efeitos do uso das antenas direcionais são objeto de pesquisa devido a alguns comportamentos inesperados. Um grande problema relacionado com as antenas direcionais é a surdez. Quando um nó se encontra utiliza um feixe específico (uma direção específica), ele não consegue receber sinais nos outros feixes (outras direções). Diz-se, então, que o nó se encontra surdo para as direções diferentes da qual se encontra direcionado. Adicionalmente, o problema do terminal escondido é ampliado devido à assimetria das transmissões, tanto com relação à assimetria de ganho, quanto com relação às transmissões direcionais que fazem com que os nós não recebam sinais RTS (*Request to Send*) e CTS (*Clear to Send*).

Este artigo identifica um caso específico de surdez, a “surdez intrínseca”, que possui uma particularidade com relação aos casos comuns de surdez. Em uma comunicação com múltiplos saltos utilizando transmissões puramente direcio-

nais, a própria comunicação será prejudicada pela “surdez intrínseca” por ela produzida. O objetivo principal deste trabalho é melhorar a capacidade agregada da rede ad hoc para comunicações com múltiplos saltos, considerando o problema da “surdez intrínseca”. A abordagem do benefício da reutilização espacial é feita de forma isolada do aumento de alcance, sendo considerado o mesmo alcance para as transmissões direcionais e omnidirecionais. Neste trabalho, é proposta uma solução que possibilita aumentar a vazão agregada em redes utilizando antenas direcionais com relação às redes que utilizam transmissões omnidirecionais, graças à reutilização espacial. Além disto, em situações onde não ocorre a reutilização espacial, o esquema proposto consegue obter desempenho igual ou pouco inferior ao modo omnidirecional.

O restante deste artigo está organizado da seguinte forma. Os conceitos básicos relacionados às redes IEEE 802.11 e antenas direcionais são abordados na Seção II. Em seguida, a Seção III, detalha o problema da “surdez intrínseca”. A Seção IV propõe uma solução para este problema, o protocolo AHDMAC (*Ad Hoc Directional Medium Access Control*). Os resultados obtidos nas simulações, comprovando a eficácia desta proposta, são apresentados na Seção V. Trabalhos relacionados com antenas direcionais são apresentados na Seção VI. A Seção VII conclui o trabalho e indica direções de pesquisa.

## II. CONCEITOS BÁSICOS

### A. Redes IEEE 802.11

A norma IEEE 802.11 [1] define as funcionalidades para as camadas de controle de acesso ao meio (MAC) e física (PHY) para redes sem fio. Esta norma define dois modos de operação, o modo ad hoc e o modo infraestruturado. No modo infraestruturado a comunicação é centralizada nos chamados Pontos de Acesso (PA). O modo descentralizado, ou ad hoc, não possui pontos de acesso. Neste modo, a operação da rede é descentralizada e os nós constituintes da rede ad hoc são responsáveis pelo roteamento dos pacotes.

O modo ad hoc da norma IEEE 802.11 utiliza o método *Distributed Coordination Function* (DCF) de acesso ao meio, que é um método do tipo CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*). Desta forma, o DCF utiliza um canal de múltiplo acesso onde é realizada detecção de portadora. O tratamento de colisões é feito diferentemente do método utilizado nas redes locais cabeadas, onde a detecção de colisões é possível. Nas redes IEEE 802.11 todas as transmissões são reconhecidas através de quadros de reconhecimento (ACK - *Acknowledgment*), sendo a ausência do recebimento deste quadro indicativo da ocorrência de uma colisão. O esquema utilizado para evitar colisões funciona de forma estatística. Todo nó que deseja transmitir deve aguardar uma quantidade de tempo determinada, após este tempo, o emissor deve sortear um tempo de contenção, conhecido como janela de contenção (CW - *Contention Window*), e esperá-lo antes de iniciar uma transmissão.

O DCF possui outras particularidades. Para evitar o problema do terminal escondido são introduzidos os quadros de controle RTS (*Request to Send*) e CTS (*Clear to Send*). Estes

quadros são utilizados de forma análoga aos sinais homônimos utilizados em *modems*. O esquema básico de comunicação envolve apenas o envio de quadros de dados reconhecidos por quadros ACK. Com o uso do par de controle RTS/CTS, a comunicação passa a ter quatro etapas na seguinte sequência: RTS, CTS, dados, ACK. Ao enviar um quadro RTS o emissor notifica o receptor de sua intenção de transmissão. Um quadro CTS é enviado pelo receptor se o mesmo receber corretamente o RTS e estiver apto a receber o quadro de dados. Com o correto recebimento do CTS o emissor procede ao envio do quadro de dados. Após o correto recebimento deste quadro, o receptor o reconhece através do envio do quadro ACK. O envio dos quadros RTS e CTS avisa aos vizinhos tanto do emissor quanto do receptor que existe uma comunicação em andamento, impedindo-os de interferir na mesma. Assim, o uso destes quadros de controle evita o problema do terminal escondido.

Para iniciar uma transmissão, o emissor deve aguardar que o canal fique livre durante um tempo fixo DIFS (*Distributed InterFrame Space*) para então aguardar um tempo aleatório de contenção. O intervalo entre os outros quadros é de um tempo menor chamado SIFS (*Short InterFrame Space*). O motivo do tempo de espera DIFS ser maior é para que novas transmissões, através do envio de quadros RTS, possuam menor prioridade com relação às transmissões em andamento.

Todos estes quadros contêm a informação do tempo restante para o término da comunicação. Desta forma, o efeito desta informação de tempo é equivalente a uma detecção de portadora, e por isto chamado de Detecção Virtual de Portadora. Todos os nós mantêm esta contagem de tempo em um contador chamado NAV (*Network Allocation Vector*). Enquanto o NAV for um número maior que zero, a estação decrementa seu valor e somente poderá transmitir quando o seu valor for zero. Desta forma, a Detecção Virtual de Portadora aumenta a resistência do protocolo a colisões em adição à detecção real de portadora. Cabe observar que a detecção real de portadora é utilizada para a transmissão de todos os quadros com exceção do quadro ACK. O nó receptor transmite um ACK exatamente SIFS unidades de tempo após receber corretamente um quadro de dados, independentemente da detecção de portadora.

### B. Antenas Direcionais em Redes IEEE 802.11 no Modo Ad Hoc

O modelo de antena direcional utilizado neste artigo é ilustrado na Figura 1 e é similar ao modelo utilizado em [2], [3] e [4]. Neste modelo, o sistema possui N antenas direcionais, com formato de setor circular, que de forma simétrica cobrem os 360 graus equivalentes a uma antena omnidirecional. Os feixes são numerados em sentido anti-horário. A Figura 2 mostra um exemplo de nó com 4 feixes. Apesar de os nós serem equipados com múltiplas antenas direcionais, cada nó possui apenas um transmissor de rádio. Isto implica que cada nó somente pode transmitir ou receber um quadro por vez. Como exemplo, se um nó se encontra em estado de recepção através da antena 0, ele fica impossibilitado de receber um outro quadro na antena 3. Por outro lado, a transmissão recebida na antena 3 causaria interferência na comunicação

em andamento pela antena 0. Desta forma, a recepção diretiva aumenta a tolerância à interferência da rede.

Com o uso de antenas direcionais, são necessárias modificações na camada de controle de acesso ao meio (MAC). A principal modificação refere-se ao uso do mecanismo de detecção virtual da portadora, NAV, citado anteriormente. A adaptação do NAV para uso com antenas direcionais é chamada de DNAV (*Directional Network Allocation Vector*) [2], [3], [4], [5] e [6]. O conceito de DNAV consiste na associação de um contador NAV independente para cada um dos feixes direcionais que formam o sistema de transmissão do nó. Sem este mecanismo, não seria possível o ganho com a reutilização espacial. Por exemplo, sem o DNAV, se um nó escutar um quadro RTS por um feixe, ele ficaria impedido de transmitir por qualquer outro feixe. Com o uso do DNAV, o nó somente fica impedido de transmitir pelo feixe no qual foi recebido o RTS.

Vistos estes conceitos, o problema da surdez pode ser agora melhor entendido. Tome-se como exemplo a Figura 2 onde o nó 1 está se comunicando com o nó 2. O nó 1 utiliza sua antena 0 para se comunicar com o nó 2, que por sua vez utiliza sua antena 2. Assim, ambos os nós se encontram direcionados e portanto surdos nas outras antenas, ou outras direções. Em um certo momento, o nó 3 tenta iniciar uma comunicação com o nó 2 enviando um RTS através de sua antena 2. O nó 2 está direcionado com a antena 2 e portanto surdo para a antena 0. Desta forma, o nó 2 não responderá ao nó 3.

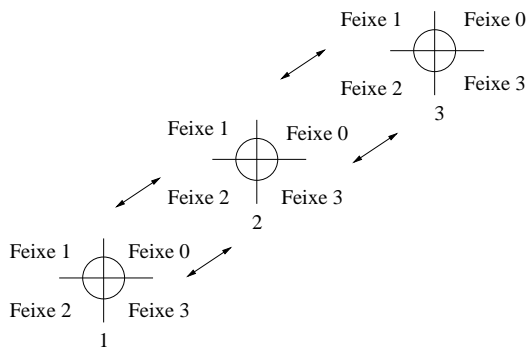


Fig. 2. Exemplo de surdez.

### III. A SURDEZ INTRÍNSECA

Wang e Garcia-Luna-Aceves [7] concluíram através de simulações que para que se possa maximizar os benefícios do uso de antenas direcionais não deve ser utilizado nenhum tipo de quadro de controle omnidirecional. Isto implica em algum mecanismo de localização dos nós, uma vez que para que um quadro RTS seja enviado direcionalmente a localização do destino deve ser conhecida previamente. A localização pode ser obtida de diversas formas, porém está fora do escopo deste artigo. Supõe-se, como em [5], que uma camada superior é capaz de fornecer um perfil de comunicação com as informações necessárias para que o feixe de transmissão seja devidamente selecionado. Desta forma, utiliza-se neste trabalho um DMAC (*Directional MAC*) similar ao de [5], onde

todos os quadros são transmitidos direcionalmente, como uma referência de rede direcional.

Nasipuri [2] considerou nas simulações que os destinos de cada quadro transmitido seriam sorteados independentemente. Esta hipótese não pode ser utilizada de forma generalizada uma vez que nas comunicações convencionais um par fonte-destino permanece o mesmo até o término da comunicação. Para considerar este tipo de situação, foi considerada uma relação fonte-destino estática em toda a simulação. O problema é ilustrado no cenário com três nós em fila mostrado na Figura 2, onde o nó 1 é a fonte para o nó 3.

O problema em questão irá ocorrer sempre que o emissor (nó 1) estiver congestionado, ou seja, sempre que a taxa de emissão for grande o suficiente para que este nó sempre possua um pacote a ser transmitido. Nesta situação, o nó 1 enviará um RTS que será devidamente respondido com um CTS pelo nó 2. Quando o quadro for devidamente recebido pelo nó 2, este irá imediatamente transmiti-lo para o destino (nó 3), desta forma ficando surdo para o nó 1. Como dito anteriormente, quando um nó está transmitindo direcionalmente em uma antena, ele fica surdo para todas as outras antenas. Neste caso, o nó 2 estará transmitindo um quadro ao nó 3 e portanto impossibilitado de ouvir o nó 1. O nó 1, por sua vez, possui vários pacotes na fila de transmissão e transmitirá um RTS para o nó 2, que não responderá. O nó 1 insistirá na retransmissão do quadro RTS até que estoure o número máximo de tentativas. Dependendo do tamanho do pacote, este ciclo poderá se repetir um certo número de vezes. Como resultado, o nó 1 aumentará sua janela de contenção CW de forma exponencial causando um desperdício do meio. O nó 1 poderá aguardar um tempo muito maior que o mínimo necessário, que o seria informado no quadro RTS omnidirecional enviado pelo nó 2. De forma geral, este problema não ocorrerá toda vez que quadros forem enviados consecutivamente pelo nó 1. Tanto o nó 1 quanto o nó 2 competirão pelo meio, como no caso do uso de antenas omnidirecionais, e o problema ocorrerá sempre que o nó 2 iniciar sua transmissão primeiro. A diferença deste caso de surdez para os relatados na literatura é que o próprio fluxo de múltiplos saltos causa uma situação de surdez nos nós intermediários. Devido a esta característica, chamou-se este comportamento de “surdez intrínseca”.

A Figura 3 ilustra a queda na vazão efetiva da comunicação no cenário referido para pacotes de 1500 bytes e distância de 240 metros entre os nós. O nó emissor envia uma série de quadros RTS para os quais não obtém resposta, aumentando sua janela de contenção e com conseqüente queda em sua vazão. Propõe-se medir este efeito nas simulações monitorando a razão de quadros RTS enviados para ACK recebidos. No mínimo, é necessário um quadro RTS para o envio de um quadro de dados. Desta forma, uma razão maior que 1 indica que na média foram enviados mais do que 1 quadro RTS para cada quadro de dados. Nas transmissões omnidirecionais o esperado é que esta razão seja próxima de 1 para os nós 1 e 2. Esta razão foi calculada para a simulação da Figura 3. Como esperado, para transmissões omnidirecionais, esta razão é muito próxima de 1, enquanto que com o uso do DMAC esta razão foi em torno de 3,4 para o nó 0 e 2,5 para o nó 1.

O problema da “surdez intrínseca” é o baixo desempenho

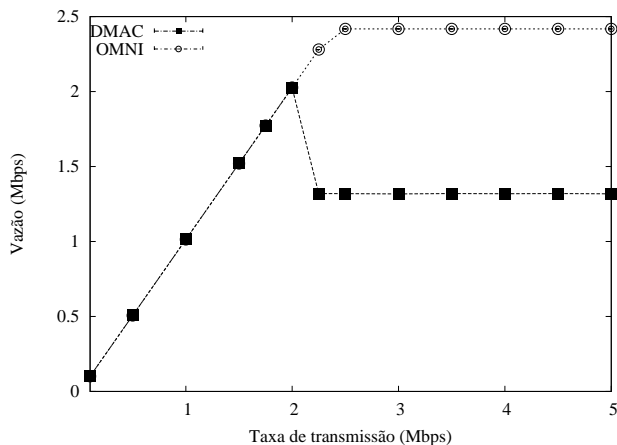


Fig. 3. Vazão na comunicação com três nós em linha.

das transmissões puramente direcionais com auxílio de mecanismos de localização como mostrado na Figura 3 devido ao aumento da janela de contenção por causa de quadros RTS enviados e não respondidos. O problema da surdez, não apenas intrínseca, pode ser analisado de forma quantitativa através da razão RTS enviados por ACK recebidos. Desta maneira, um dado quantitativo pode ser utilizado para identificar e quantificar o efeito da surdez.

#### IV. O PROTOCOLO AHDMAC

Como mostrado na seção anterior, a “surdez intrínseca” possui grande influência no desempenho das redes ad hoc utilizando antenas direcionais. Desta forma, foi desenvolvido um novo protocolo de acesso ao meio, chamado AHDMAC (*Ad Hoc Directional MAC*). O AHDMAC é simples e não introduz incompatibilidades demandando alterações nos protocolos. Nesta proposta, cada nó ao término do envio de um pacote, inicia a contagem de um DNAV no feixe onde este mesmo nó realizou a transmissão. O exemplo da Figura 2 ilustra o mecanismo proposto. A comunicação irá iniciar com o nó 1 enviando um RTS, recebendo um quadro CTS do nó 2 e então enviando seu quadro de dados. Após a recepção do quadro ACK, propõe-se que o nó 1 inicie uma contagem de DNAV permitindo que o nó 2 envie totalmente o mesmo quadro de dados para o nó 3. O tempo de contagem para o DNAV deve ser então:

$$DNAV = 32.slots + DIFS + t_{RTS} + SIFS + t_{CTS} + SIFS + t_{data} + SIFS + t_{ACK}$$

Onde  $t_{RTS}$ ,  $t_{CTS}$ ,  $t_{data}$  e  $t_{ACK}$  representam o tempo de envio dos respectivos quadros no meio físico. Deve ser notado que o tempo de envio do quadro de dados mencionado é o tempo de envio do quadro que o nó acabou de enviar e portanto que o próximo nó na cadeia de comunicação levará para enviá-lo. O fator “32 slots” é o tempo máximo de contenção acrescido de um slot. Este é utilizado para evitar uma possível disputa pelo meio, uma vez que o tempo máximo de contenção possível antes de uma transmissão é de 31 slots de tempo. Se fosse utilizado um fator com 31 slots de tempo haveria a

possibilidade do outro nó (nó 1 no exemplo) sortear 31 slots para sua contenção e disputar o meio com nó emissor (nó 0 no exemplo).

Como resultado da simulação do AHDMAC, tanto para o nó 0 quanto para o nó 1, a razão RTS/ACK fica mais próxima de 1 do que no caso omnidirecional. Por outro lado, o resultado (2,24 Mbps) da vazão obtida ainda é inferior quando comparado com o caso omnidirecional (2,41 Mbps).

Na tentativa de otimizar esta modificação outras variações do AHDMAC básico foram propostas e testadas em simulação. A primeira variação, AHDMAC3, funciona de forma muito semelhante ao AHDMAC. Nesta variação, o DNAV somente tem sua contagem iniciada se a fila de quadros do emissor contiver um ou mais quadros para envio. A motivação para o AHDMAC3 é intuitiva, já que a existência de quadros na fila de transmissão indica uma sobrecarga no nó e uma possível condição para a ocorrência de “surdez intrínseca”. Outra otimização possível é verificar a quantidade de nós que faltam para atingir o destino. Esta informação não é disponível para a camada MAC e deve ser retirada da camada IP, desta forma constitui-se uma “cross-layer optimization”. Nesta variação, AHDMAC2, o nó não inicia um DNAV se é o último salto antes do destino, inicia um DNAV se existe um salto intermediário antes do destino e dois DNAVs em todos os outros casos. O entendimento deste mecanismo não é tão intuitivo quanto o anterior. Porém, o mecanismo do AHDMAC2 pode ser entendido como uma forma de otimizar os tempos de espera do AHDMAC para que não exista contenção desnecessária. A última versão, AHDMAC4 combina as duas possibilidades de otimização. Nesta, primeiro verifica-se se existem quadros na fila de transmissão, e caso existam, um DNAV é iniciado conforme regra do AHDMAC2 verificando o número de saltos que faltam para o destino. As diferentes variações do AHDMAC são resumidas na Tabela I.

TABELA I  
VARIACIONES DO AHDMAC.

	DNAV	Verificação de fila
AHDMAC1	fixo	não
AHDMAC2	variável	não
AHDMAC3	fixo	sim
AHDMAC4	variável	sim

#### V. SIMULAÇÃO DO PROTOCOLO AHDMAC

##### A. Sobre as Simulações

As simulações foram realizadas utilizando o simulador NS-2 [8], que é um simulador orientado a eventos, muito utilizado na literatura, além de ser gratuito e de código aberto. Em todas as simulações foram realizadas várias rodadas de forma a se obter um intervalo de confiança de 95% para a faixa de erro mostrada nos gráficos. O NS-2 original não possui um módulo para simulação de antenas direcionais. Desta forma, foi utilizado um módulo de simulação completamente desenvolvido no Grupo de Teleinformática e Automação da COPPE/UFRJ. Neste módulo, foi acrescentada a proposta AHDMAC para antenas direcionais deste artigo.

**B. Resultados**

A Figura 4 mostra o desempenho das melhores variações do protocolo AHDMAC, o AHDMAC1 e AHDMAC4 para melhor visualização. As variações AHDMAC1 e AHDMAC3 possuem desempenho semelhante, sendo que o AHDMAC3 tem desempenho ligeiramente pior a partir de 7 nós em linha. Entre as variações AHDMAC2 e AHDMAC4 existe uma diferença pequena, mas já clara desde 4 nós em linha. Pode-se observar que o AHDMAC1 (também o AHDMAC3 não mostrado na figura) apresenta uma deficiência nas comunicações com apenas dois nós. Isto ocorre porque mesmo sem a necessidade de iniciar o DNAV de prevenção, no caso de apenas dois nós, o mesmo é iniciado acarretando em queda de eficiência na utilização do canal. Todas as variações perdem em desempenho para o caso OMNI com apenas 3 nós em linha mostrando que neste caso não existe reutilização do espaço.

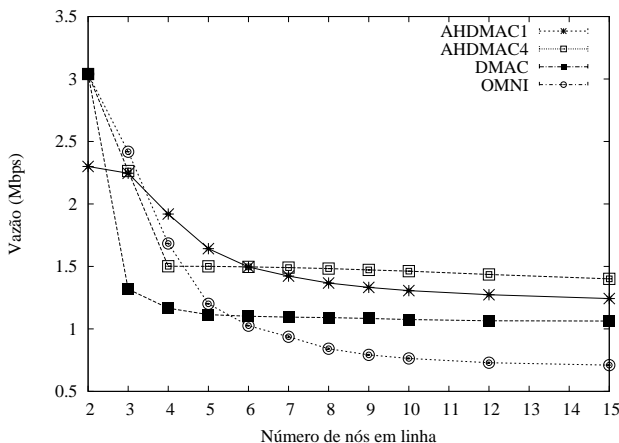


Fig. 4. Comunicação com um número crescente de nós em linha.

Como nenhuma das variações do AHDMAC se mostrou melhor em todos os casos, uma otimização pode ser obtida com a combinação das variações dos casos de melhor desempenho. Neste caso, o nó faz uma verificação do tamanho da rota para o destino e se comporta como o AHDMAC1 se a rota possui 4 ou 5 nós, incluindo o próprio nó emissor e o destino, e nos outros casos se comporta como o AHDMAC4. Esta versão combinada é chamada de AHDMAC-H (AHDMAC Híbrido) e seu desempenho pode ser comparado com os casos OMNI e DMAC na Figura 5. Desta forma, o AHDMAC-H consegue obter um desempenho igual ou melhor que o caso OMNI em todos os casos com exceção da comunicação com 3 nós em linha. Com apenas dois nós o desempenho é igual ao caso OMNI, já com 3 nós o desempenho é um pouco inferior já que não é possível nenhuma reutilização do espaço e já existe o problema de surdez. Para comunicações com mais de 9 saltos, o desempenho do AHDMAC é cerca de o dobro do obtido pelo modo omnidirecional e aproximadamente 50% maior que o DMAC.

Para verificar o ganho do AHDMAC em cenário de maior aleatoriedade foram realizadas simulações em cenários com os nós dispostos em uma grade e onde cada nó utiliza 10 feixes conforme o modelo de antena apresentado anteriormente. Na

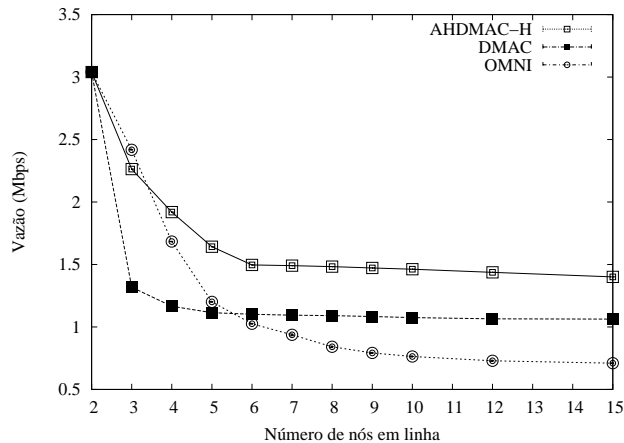


Fig. 5. Comunicação com um número crescente de nós em linha.

grade, os nós estão espaçados de forma equidistante, tanto na horizontal quanto na vertical, por uma distância de 240 metros. Este cenário é composto de 25 nós em cinco linhas de 5 elementos formando uma grade 5 por 5 simétrica. As comunicações neste cenário se dão com o nó mais à esquerda de cada linha transmitindo para o nó mais à direita desta mesma linha. A Figura 6 mostra o ganho obtido neste cenário. O protocolo AHDMAC conseguiu um desempenho mais de três vezes maior que o caso omnidirecional e mais de 40% maior do que o DMAC.

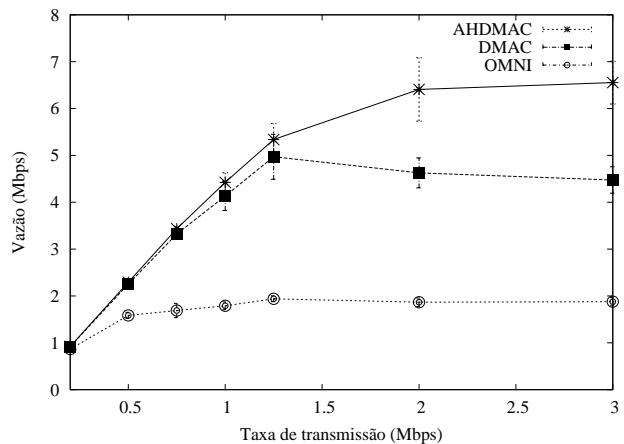


Fig. 6. Comunicação em uma grade 5x5.

**VI. TRABALHOS RELACIONADOS**

Nasipuri *et al.* [2] propõem o uso de transmissões direcionais apenas nos quadros de dados e ACK, sendo os quadros RTS e CTS transmitidos de forma omnidirecional. A questão da surdez intrínseca é contornada neste artigo baseando-se em uma premissa falsa para as comunicações tradicionais. O trabalho de Nasipuri *et al.* considerada que a fonte e o destino de cada quadro da simulação são sorteados independentemente para cada quadro a ser transmitido. Desta forma, a situação onde ocorre a “surdez intrínseca” não acontece. O trabalho de

Nasipuri *et al.* [2] é continuado em [3], onde se exploram as transmissões direcionais para diminuir a sobrecarga de roteamento ad hoc. Para isto utiliza-se a premissa de que quando um enlace é partido, o nó destino continua numa região próxima de sua localização anterior aliada com as transmissões direcionais para localizar as áreas de busca por rotas.

Choudhury *et al.* [5] admitem que a camada de roteamento é capaz de fornecer as informações necessárias para que a camada MAC transmita um quadro corretamente. Estas informações estariam contidas em um perfil de transmissão que conteria informações como potência e direção de transmissão. São propostos dois protocolos diferentes, o DMAC (*Directional MAC*) e o MMAC (*Multi-Hop RTS MAC*). Nas simulações realizadas o protocolo MMAC obteve melhor desempenho que o DMAC e que o modo omnidirecional. Contudo, o protocolo DMAC se mostrou muito dependente da topologia. Nas comunicações em linha, o mesmo não consegue superar o modo omnidirecional, sendo um dos motivos o não tratamento da “surdez intrínseca”. A proposta feita no presente trabalho se baseia em um protocolo similar ao DMAC com tratamento para a surdez intrínseca. Em um outro trabalho, Choudhury e Vaidya [6] introduzem o conceito de *sweeping*, ou varredura, que corresponde a fazer várias transmissões direcionais em torno do nó de forma a cobrir todo o seu entorno, simulando uma transmissão omnidirecional. A motivação deste conceito é aumentar o alcance de um quadro de difusão (*broadcast*) para a formação de rotas com menos saltos e com vizinhos mais distantes.

Um método de envio de RTS circular, similar ao conceito de *sweeping*, empregado em [6] é utilizado por Korakis *et al.* no artigo [4]. Neste trabalho os nós informam em seus quadros quais os feixes utilizados para transmissão e recepção. Como os nós são informados das comunicações em andamento e também dos feixes que cada nó está utilizando, é possível uma comparação com uma tabela mantida pelo próprio nó que contém a relação dos feixes utilizados para se comunicar com os vizinhos, e evitar interferir nas comunicações em andamento. Desta forma, a pura recepção de um quadro de controle não implica em uma condição de silêncio. Assim, o efeito da surdez, inclusive da “surdez intrínseca”, é reduzido uma vez que os nós são informados das transmissões que estão ocorrendo. Porém, o tratamento da surdez é feito às custas da introdução de incompatibilidade (acréscimo de dados nos quadros) no protocolo e com o aumento da complexidade do algoritmo executado por cada nó (manutenção de estado para cada vizinho).

## VII. CONCLUSÕES

Este artigo abordou não apenas qualitativamente o problema da surdez nas redes IEEE 802.11 utilizando antenas direcionais no modo ad hoc. Com esta abordagem foi possível identificar um problema específico ao uso de transmissões puramente diretivas, a “surdez intrínseca” e propor uma solução, o protocolo AHDMAC.

A solução proposta não apresenta ganho em casos onde a reutilização do espaço não é possível, como no caso da comunicação com 3 nós em linha, mas possibilita ganhos

significativos em situações onde a reutilização espacial é possível. Desta forma, foi dado um passo no sentido de fazer prevalecer o benefício da reutilização do espaço possibilitado pelas antenas direcionais. O protocolo AHDMAC consegue dobrar a vazão em comunicações com mais de 9 saltos com relação ao modo omnidirecional. Na simulação do cenário de grade deste artigo, o AHDMAC conseguiu triplicar o desempenho do modo omnidirecional.

Como trabalho futuro pretende-se analisar o efeito global da reutilização do espaço em conjunto com o aumento de ganho. Além disto, serão experimentados cenários com maior grau de aleatoriedade das simulações. Uma segunda etapa deste trabalho será a análise dos efeitos do uso de antenas direcionais em redes ad hoc no roteamento de pacotes.

## VIII. AGRADECIMENTOS

Agradecemos aos alunos Glauco Fiorott Amorim, Luiz Antonio Silva, Myrna C. M. dos Santos Amorim e Nilton C. N. da C. Braga que sob a orientação do professor José Ferreira de Rezende desenvolveram o módulo utilizado para simulação de antenas direcionais no NS-2.

## REFERÊNCIAS

- [1] IEEE 802.11, “Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications”, in *IEEE Standard 802.11*, 1999.
- [2] S. Y. J. Y. A. Nasipuri e R. E. Hiromoto, “A MAC Protocol for Mobile Ad Hoc Networks using Directional Antennas”, in *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, 2000.
- [3] H. M. Assis Nasipuri, Jothsna Mandava e R. E. Hiromoto, “On-Demand Routing Using Directional Antennas in Mobile Ad Hoc Networks”, in *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, 2000.
- [4] L. T. Thanasis Korakis, Gentian Jakllari, “A MAC protocol for full exploitation of Directional Antennas in Ad-hoc Wireless Networks”, in *ACM MobiHoc*, 2003.
- [5] R. R. Romit Roy Choudhury, Xue Yang e N. H. Vaidya, “Using directional antennas for medium access control in ad hoc networks”, in *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, 2000.
- [6] R. R. Choudhury e N. H. Vaidya, “Impact of Directional Antennas on Ad Hoc Networks Routing”, in *Personal and Wireless Communication (PWC)*, 2003.
- [7] Y. Wang e J. Garcia-Luna-Aceves, “Spatial Reuse and Collision Avoidance in Ad Hoc Networks with Directional Antennas”, in *IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM)*, 2002.
- [8] K. Fall e K. Varadhan, “The NS Manual. Technical Report”, in *The VINT Project*, 2002.