

UM MECANISMO PARA EVITAR A SURDEZ INTRÍNSECA EM REDES AD HOC
DE MÚLTIPLOS SALTOS UTILIZANDO ANTENAS DIRECIONAIS

Rafael Rosa da Rocha

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

Aprovada por:

Prof. José Ferreira de Rezende, Dr.

Prof. Luís Henrique Maciel Kosmowski Costa, Dr.

Prof. Otto Carlos Muniz Bandeira Duarte, Dr. Ing.

Prof. Célio Vinicius Neves Albuquerque, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MARÇO DE 2006

ROCHA, RAFAEL ROSA DA

Um Mecanismo Para Evitar a Surdez In-
trínseca Em Redes Ad Hoc De Múltiplos Sal-
tos Utilizando Antenas Direcionais [Rio de Ja-
neiro] 2006

XV, 104 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc.,
Engenharia Elétrica, 2006)

Dissertação - Universidade Federal do Rio
de Janeiro, COPPE

1. Redes sem fio IEEE 802.11
2. Redes ad hoc
3. Antenas direcionais

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

Aos meus pais, Ricardo e Jamila, e aos meus avós, Pedro, Enid e Rosa.

Agradecimentos

Aos meus pais, que não apenas me deram a existência, mas amor, educação, carinho, saúde e caráter.

Aos meus avós pelo apoio, estímulo e carinho.

À minha namorada Valéria, pelo companheirismo e compreensão pelos finais de semana e feriados de sacrifício e trabalho.

Aos meus amigos de graduação, Saulo, Guilherme, Zeca, D'ajuz, Sérgio e Flávia. As muitas horas de estudo, trabalho e convivência deixaram marcas para toda vida.

Aos meus orientadores Luís Henrique e Rezende, pela orientação, apoio, idéias e compreensão.

Aos professores do GTA, Otto, Aloysio e Leão, pelos ensinamentos e por terem me aceito no programa de seleção.

Aos meus companheiros de estrada durante o mestrado, Aurélio, Luis Antônio, Glauco, Myrna, Ingrid, Andréa e Nilton pela amizade e coleguismo. Em especial para o Miguel, pela ajuda e troca de idéias.

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 aqui utilizado e estendido para simulação de antenas direcionais no NS-2.

Ao professor Célio por ter aceito participar da banca examinadora.

À UFRJ e à COPPE pelos anos de estudo e formação.

À CAPES pelo financiamento do trabalho.

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

UM MECANISMO PARA EVITAR A SURDEZ INTRÍNSECA EM REDES AD HOC
DE MÚLTIPLOS SALTOS UTILIZANDO ANTENAS DIRECIONAIS

Rafael Rosa da Rocha

Março/2006

Orientadores: Luís Henrique Maciel Kosmowski Costa

José Ferreira de Rezende

Programa: Engenharia Elétrica

O uso de antenas direcionais em redes IEEE 802.11 pode aumentar a capacidade agregada da rede. Esta tecnologia possibilita maior reutilização do espaço, aumentando o número de comunicações simultâneas em uma rede. Devido à diretividade, o maior ganho de transmissão proporciona um aumento de alcance que possibilita a formação de rotas com menores quantidades de saltos. Este trabalho identifica dois problemas na utilização de antenas direcionais em redes IEEE 802.11 no modo ad hoc em comunicações de múltiplos saltos, a *surdez intrínseca* e o *efeito EIFS*. Um indicador de surdez, o *índice de surdez* é proposto para mensurar este efeito. Uma solução é proposta para contornar estes problemas, o protocolo de acesso ao meio AHDMAC, cuja eficiência é comprovada através de simulações. Com sua utilização é possível obter ganho em relação ao modo puramente direcional tradicional 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 trabalho propõe uma modificação simples no esquema clássico de redes com antenas direcionais possibilitando de forma eficiente que os ganhos com a utilização de antenas direcionais sejam predominantes sob outros efeitos negativos.

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

A MECHANISM TO AVOID THE INTRINSIC DEAFNESS IN MULTIHOP AD HOC NETWORKS WITH DIRECTIONAL ANTENNAS

Rafael Rosa da Rocha

March/2006

Advisors: Luís Henrique Maciel Kosmalski Costa

José Ferreira de Rezende

Department: Electrical Engineering

The use of directional antennas can improve the aggregate capacity of IEEE 802.11 networks. This technology allows greater spatial reuse, increasing the number of simultaneous communications in a network. Because of directiveness, a greater transmission power can be achieved leading to an increase in reach making fewer hops routes. This work identifies two problems, the *intrinsic deafness* and the *EIFS effect*, in the utilization of directional antennas in IEEE 802.11 multihop ad hoc networks. An indicator of deafness, the *deafness indices* is proposed to measure this effect. A solution is proposed to overcome these problems, AHDMAC medium access control protocol, whose 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 work proposes one simple modification for the classical directional antennas networks making possible for the directional antennas gains to dominate over negative effects.

Sumário

Resumo	v
Abstract	vi
Lista de figuras	x
Lista de tabelas	xiv
Lista de acrônimos	xv
1 Introdução	1
1.1 Motivação	2
1.2 Trabalhos Relacionados	3
1.3 Objetivos	6
1.4 Organização da Dissertação	7
2 Redes Sem Fio IEEE 802.11	8
2.1 A Norma IEEE 802.11	8
2.2 Redes IEEE 802.11 Ad Hoc	10
2.2.1 Transmissão Direcional	15

<i>SUMÁRIO</i>	viii
2.2.2 Quadros de Controle e Localização	19
2.2.3 Mecanismo de Transmissão e Recepção	19
2.2.4 DNAV - Directional Network Allocation Vector	20
2.2.5 Protocolo de Roteamento - AODV	21
2.3 Uso de Antenas Direcionais	22
2.3.1 Benefícios do Uso de Antenas Direcionais	22
2.3.2 Problemas do Uso de Antenas Direcionais	24
3 Protocolo AHDMAC	27
3.1 Ambiente de Simulação	27
3.2 Surdez	31
3.2.1 Surdez Intrínseca	33
3.2.2 Quantificando a Surdez: Índice de Surdez	36
3.3 O Protocolo AHDMAC	37
3.4 Simulações para Ajuste de Parâmetros Básicos	40
3.5 Efeitos do AHDMAC	47
4 Simulação do Protocolo AHDMAC	52
4.1 Teste de Sanidade	52
4.2 Simulação do Protocolo AHDMAC	55
4.2.1 Cenários de Linha	55
4.2.2 Análise de Aumento de Alcance	59
4.2.3 Cenário em Linha Crescente	71
4.2.4 Cenários em Grade: Modo Linhas	74

<i>SUMÁRIO</i>	ix
4.2.5 Cenários em Grade: Modo Colunas	79
4.2.6 Cenários em Grade: Modo Aleatório	86
4.2.7 Cenários Aleatórios	92
5 Conclusão	96
5.1 Trabalhos Futuros	99
Referências Bibliográficas	101

Lista de Figuras

1.1	Transmissão omnidirecional e direcional.	3
2.1	Problema do terminal escondido.	11
2.2	Sequência de quadros no tempo.	12
2.3	Zonas de recepção e interferência.	13
2.4	Modelo de antena direcional.	16
2.5	Comunicações alternadas utilizando antenas omnidirecionais.	23
2.6	Comunicações simultâneas utilizando antenas direcionais.	24
2.7	Comunicação omidirecional com múltiplos saltos.	25
2.8	Comunicação direcional direta entre fonte e destino.	25
2.9	Comunicação direcional em topologia de linha.	26
3.1	Cenário de comunicação com três nós em linha.	34
3.2	Vazão na comunicação com três nós em linha.	35
3.3	Índice de surdez RTS/ACK do Nó A na comunicação com três nós em linha.	36
3.4	Índice de surdez na comunicação com três nós em linha.	37
3.5	Influência do N_{dnav} na comunicação com três nós em linha.	41
3.6	Influência do N_{dnav} na comunicação com cinco nós em linha.	42

3.7	Influência do <i>Nqueue</i> na comunicação com três nós em linha.	43
3.8	Influência do <i>Nqueue</i> na comunicação com cinco nós em linha.	44
3.9	Influência do <i>Nslots</i> na comunicação com três nós em linha.	45
3.10	Influência do <i>Nslots</i> na comunicação com cinco nós em linha.	46
3.11	Vazão na comunicação com três nós em linha.	47
3.12	Índice de surdez do Nó A na comunicação com três nós em linha.	48
3.13	Índice de surdez do Nó A na comunicação com três nós em linha.	49
3.14	Índice de surdez na comunicação com três nós em linha.	50
3.15	Índice de surdez na comunicação com três nós em linha.	51
3.16	Vazão na comunicação com três nós em linha e aumento de alcance.	51
4.1	Alcance obtido sem aumento de alcance.	53
4.2	Aumento de alcance com oito feixes.	54
4.3	Aumento de alcance com quatro feixes.	54
4.4	Ilustração da comunicação com cinco nós.	55
4.5	Vazão na comunicação com cinco nós em linha.	56
4.6	Índice de surdez na comunicação com cinco nós em linha.	57
4.7	Índice de surdez na comunicação com cinco nós em linha.	58
4.8	Vazão na comunicação com cinco nós em linha.	58
4.9	Vazão na comunicação com três nós em linha.	60
4.10	Quantidade de saltos na comunicação com três nós em linha.	61
4.11	Vazão na comunicação com três nós em linha.	63
4.12	Número de saltos na comunicação com três nós em linha.	64

4.13	Vazão na comunicação com três nós em linha.	65
4.14	Vazão na comunicação com três nós em linha.	66
4.15	Vazão na comunicação com cinco nós em linha.	66
4.16	Número de saltos na comunicação com cinco nós em linha.	67
4.17	Vazão na comunicação com aumento de alcance e cinco nós em linha. . .	67
4.18	Saltos na comunicação com aumento de alcance e cinco nós em linha. . .	68
4.19	Vazão na comunicação com aumento de alcance e cinco nós em linha. . .	70
4.20	Vazão na comunicação com aumento de alcance e cinco nós em linha. . .	70
4.21	Vazão na comunicação em linha de tamanho crescente.	72
4.22	Vazão na comunicação em linha de tamanho crescente.	73
4.23	Quantidade de saltos na comunicação em linha de tamanho crescente. . .	73
4.24	Ilustração do cenário grade modo linhas.	74
4.25	Vazão na comunicação do cenário grade modo linhas.	75
4.26	Vazão na comunicação do cenário em grade no modo linhas.	76
4.27	Vazão na comunicação do cenário grade modo linhas.	77
4.28	Vazão na comunicação do cenário grade modo linhas.	78
4.29	Vazão na comunicação do cenário grade modo linhas.	78
4.30	Ilustração do modo grade em coluna.	79
4.31	Vazão na comunicação do cenário grade modo coluna.	80
4.32	Vazão na comunicação do cenário grade modo coluna.	81
4.33	Vazão na comunicação do cenário grade modo coluna.	81
4.34	Vazão na comunicação do cenário grade modo coluna.	82
4.35	Vazão na comunicação do cenário grade modo coluna.	83

4.36	Vazão na comunicação do cenário grade modo coluna.	84
4.37	Vazão na comunicação do cenário grade modo coluna.	85
4.38	Vazão na comunicação do cenário grade modo coluna.	85
4.39	Ilustração do modo grade aleatório.	86
4.40	Vazão na comunicação do cenário grade modo aleatório.	87
4.41	Vazão na comunicação do cenário grade modo aleatório.	88
4.42	Vazão na comunicação do cenário grade modo aleatório.	89
4.43	Vazão na comunicação do cenário grade modo aleatório.	90
4.44	Vazão na comunicação do cenário grade modo aleatório.	90
4.45	Vazão na comunicação do cenário grade modo aleatório.	91
4.46	Quantidade de saltos na comunicação do cenário grade modo aleatório.	91
4.47	Vazão na comunicação do cenário aleatório.	93
4.48	Quantidade de saltos na comunicação do cenário aleatório.	94
4.49	Vazão na comunicação do cenário aleatório.	94
4.50	Quantidade de saltos na comunicação do cenário aleatório.	95
4.51	Quantidade de saltos na comunicação do cenário aleatório.	95

Lista de Tabelas

2.1	Série de valores possíveis para CW.	15
2.2	Variáveis do modelo de propagação.	17
2.3	Aumento de alcance X quantidade de feixes.	19
3.1	Parâmetros de Simulação.	30
3.2	Parâmetros do AHDMAC.	40

Lista de Acrônimos

ACK :	<i>Acknowledgment;</i>
AHDMAC :	<i>Ad Hoc Directional MAC;</i>
AP :	<i>Access Point;</i>
AODV :	<i>Ad Hoc On Demand Distance Vector;</i>
CSMA/CA :	<i>Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance;</i>
CSMA/CD :	<i>Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection;</i>
CTS :	<i>Clear To Send;</i>
CSThresh :	<i>Carrier Sense Threshold;</i>
CW :	<i>Contention Window;</i>
DCF :	<i>Distributed Coordination Function;</i>
DIFS :	<i>DFC InterFrame Space;</i>
DMAC :	<i>Directional MAC;</i>
DNAV :	<i>Distributed Network Allocation Vector;</i>
EIFS :	<i>Extended InterFrame Space;</i>
IEEE :	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers;</i>
MAC :	<i>Medium Access Control;</i>
NAV :	<i>Network Allocation Vector;</i>
NS :	<i>Network Simulator;</i>
PCF :	<i>Point Coordination Function;</i>
RTS :	<i>Request To Send;</i>
RXThresh :	<i>Receiving Threshold;</i>
SIFS :	<i>Short InterFrame Space.</i>

Capítulo 1

Introdução

AS redes sem fio vem sendo utilizadas com grande sucesso na comunicação entre computadores nos últimos anos. As redes sem fio foram inicialmente utilizadas em salas de reunião ou ambientes de diretoria de empresas devido à comodidade da mobilidade proporcionada. Em uma etapa posterior, as necessidades de alguns negócios começaram a requerer mobilidade. Aplicações onde a mobilidade são um requerimento, e não uma comodidade, passaram a ser muito comuns. Para o comércio e a indústria de transportes e armazenagem, as redes sem fio possibilitaram sistemas móveis para controle de estoque, inventário e rastreamento de produtos. Nos hospitais, foi possível fazer com que os médicos tivessem acesso rápido às informações dos pacientes permitindo uma rápida tomada de decisão. Talvez o uso mais comum hoje para as redes sem fio seja os acessos públicos, os chamados *hot spots*, que são os acessos em aeroportos, cafés, hotéis, centros de convenção, que podem cobrar pelo serviço ou disponibilizá-lo como um diferencial dos serviços prestados.

O IEEE definiu um padrão para o uso de redes sem fio, o padrão IEEE 802.11 [1], de forma que a comunicação destas redes seja compatível com os padrões Ethernet (IEEE 802.3) [2]. A norma define dois modos de operação, o PCF (*Point Coordination Function*) e o DCF (*Distributed Coordination Function*). O PCF é o modo centralizado, onde os PAs (Ponto de Acesso) funcionam como pontos de concentração da comunicação entre os nós finais. Para um nó final se comunicar com outro, o primeiro transmite seus quadros para o PA, que os retransmite para o nó destinatário. O modo DCF, também chamado de modo

ad hoc, é totalmente distribuído, portanto, neste modo não existe a função do PA. Todos os nós executam a mesmas funções, a transmissão dos quadros é direta entre a fonte e o destino, não havendo a comunicação intermediária com o PA. Contudo, o destino pode não estar dentro do alcance da origem. Neste caso, os nós intermediários fazem a reencaminhamento dos quadros de forma a permitir a comunicação entre fonte e destino. Este tipo de rede é chamada de rede *ad hoc* de múltiplos saltos.

As redes *ad hoc* de múltiplos saltos possuem diversas aplicações, sendo o seu uso muito associado a aplicações militares. Como as redes *ad hoc* não necessitam de nenhuma infra-estrutura, estas permitem que uma rede de comunicação seja formada em locais onde tenha ocorrido um desastre natural, no campo de batalha ou em lugares inóspitos. Grupos de trabalho podem formar uma rede *ad hoc* para permitir o trabalho em rede sem a necessidade de equipamentos especiais.

1.1 Motivação

O uso de antenas direcionais em redes sem fio IEEE 802.11 [1] no modo *ad hoc* vem sendo estudado há algum tempo. A principal motivação é o sucesso com que esta tecnologia é utilizada nas redes sem fio de telefonia celular ([3] e [4]). 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 físico. Uma transmissão direcional pode ser vista simplificada como ocupando um setor circular, enquanto a comunicação omnidirecional utiliza o espaço correspondente a todo um círculo. A figura 1.1 ilustra uma transmissão omnidirecional e outra 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 empregada a mesma potência de uma transmissão omnidirecional, o alcance da transmissão direcional é aumentado conforme ilustrado na figura 1.1. Portanto, temos duas situações que podem ser exploradas na questão de

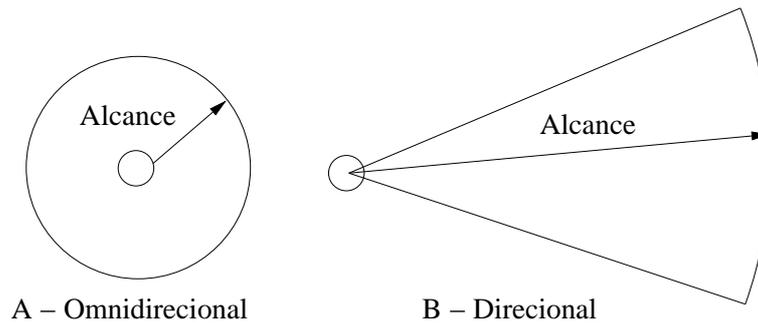


Figura 1.1: Transmissão omnidirecional e direcional.

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. Em uma comunicação *ad hoc* de múltiplos saltos, este aumento de alcance pode proporcionar a conectividade entre redes isoladas, bem como diminuir a latência devido ao menor número de saltos necessários a uma transmissão.

A utilização de antenas direcionais em redes *ad hoc* é objeto de pesquisa devido aos grandes benefícios que o seu uso pode acarretar, contudo, alguns comportamentos inesperados são observados e existem dificuldades para a sua utilização. Um grande problema relacionado com as antenas direcionais é um fenômeno conhecido como surdez. Quando um nó está utilizando um feixe específico (neste trabalho é utilizado o termo: direcionado no feixe), ele não consegue receber sinais nas outras direções. Diz-se, então, que o nó se encontra surdo para as direções diferentes da qual se encontra direcionado. A definição de surdez na literatura pode ser resumida como a influência negativa em uma comunicação que se estabelece com um nó participante de uma outra comunicação anteriormente em andamento. Este trabalho identifica e define a “surdez intrínseca”, um caso específico de surdez, que acontece com apenas uma comunicação.

1.2 Trabalhos Relacionados

Nasipuri *et al.* [5] 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 trabalho baseando-se em uma premissa falsa para as comunicações tradicionais. Em uma comunicação real, o par fonte/destino permanece o mesmo até que a comunicação tenha fim. O trabalho de Nasipuri *et al.* considera que a fonte e o destino de cada quadro da simulação são sorteados independentemente para cada quadro a ser transmitido. O trabalho de Nasipuri *et al.* [5] é continuado em [6], onde se exploram as transmissões direcionais para diminuir a sobrecarga de roteamento *ad hoc* quando um enlace é quebrado devido ao movimento dos nós. Para tanto, utiliza-se a premissa de que quando um enlace é quebrado, o nó destino continua em uma região próxima de sua localização anterior. Transmissões direcionais são utilizadas para restringir a área de busca de formação da rota de forma a compreender um semi-círculo com centro no emissor.

Choudhury *et al.* assumem em [7] e [8] 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 com as 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 DMAC 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 [9][10] introduzem um protocolo de roteamento direcional, o DDSR (*Directional DSR*), que é uma versão do DSR [11] (*Dynamic Source Routing*). que utiliza 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 para o *sweeping* é aumentar o alcance de um quadro de difusão (*broadcast*) para a formação de rotas com menos saltos e com vizinhos mais distantes. Foi concluído que a utilização de antenas direcionais não é adequada para redes com topologias densas ou lineares, contudo, os resultados em redes com topologias esparsas ou aleatórias são positivos.

Um método de envio de RTS circular, similar ao conceito de *sweeping* empregado em [9], é utilizado por Korakis *et al.* no trabalho [12]. 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 contenção, visto que a mesma depende também da verificação da tabela mantida pelo nó com informação das transmissões em andamento. 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 informações nos quadros) no protocolo e com o aumento da complexidade do algoritmo executado por cada nó (manutenção de estado para cada vizinho).

Wang e Garcia-Luna-Aceves [13] concluíram através de simulações com o software GlomoSim [14] que para 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 dos nós pode ser obtida de diversas formas, porém está fora do escopo de [13] e também desta dissertação. Supõe-se, como no trabalho de Choudhury [7], 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 [7], onde todos os quadros são transmitidos direcionalmente, como uma referência de rede direcional.

Um estudo focado em modelos realísticos de rádio e propagação foi feito por Ram Ramanathan em [15]. Neste trabalho, foram realizadas simulações utilizando o software OPNET [16] com foco em explorar o aumento de alcance e a redução de interferência possibilitada pelas antenas direcionais. São analisados sistemas direcionais do tipo *switched beam*, e do tipo *steered beam*. No primeiro tipo, feixes de transmissão são produzidos com uma localização fixa. Desta forma, uma determinada quantidade de nós, com posi-

ção fixa, possibilita a transmissão em qualquer uma direção. Para um sistema de 4 feixes, cada um corresponde a um semi-círculo, como nos quadrantes trigonométricos. Já os sistemas do tipo *steered beam*, são sistemas que podem focar em praticamente qualquer direção. O sistema é capaz de determinar a melhor direção para realizar a transmissão e posicionar o centro do feixe no eixo entre a fonte e o destino. Dentre as conclusões deste artigo, uma é de particular interesse para este trabalho, o uso de antenas do tipo *steered beam* ou *switched beam* para redes *ad hoc* produz praticamente o mesmo efeito. Os resultado das simulações obtiveram uma melhora entre 28 e 118% de vazão agregada dependendo da densidade do cenário e uma redução por um fator de 28 no atraso.

Em [17], Mineo *et al.* introduziram o DVCS (*Directional Virtual Carrier Sensing for Directional Antenna in Mobile Ad Hoc Networks*). Esta proposta formaliza o método de detecção de portadora para utilização em redes com antenas direcionais, o que é de extrema importância para a implementação do DNAV. A modelagem do modelo de propagação foi feita com a utilização do software MATLAB [18] e simulações foram realizadas com o programa Qualnet [19] para comparar o desempenho do DVCS com o método tradicional para antenas omnidirecionais. Os resultados das simulações mostraram que a capacidade da rede pode ser aumentada entre 3 e 4 vezes para uma rede *ad hoc* de 100 nós. A importância da interoperabilidade do sistema direcional com o omnidirecional é enfatizada para que a adoção do uso de antenas direcionais em redes IEEE 801.11 seja viável. Esta conclusão é retirada do paralelo traçado com a adoção de antenas direcionais em redes de telefonia celular onde a interoperabilidade permitiu a adoção de antenas direcionais de forma gradual e opcional.

1.3 Objetivos

Este trabalho 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 direcionais, a comunicação entre fonte e destino será prejudicada pela “surdez intrínseca” por ela mesma produzida. O objetivo principal deste trabalho é melhorar a capacidade agregada da rede *ad hoc* para comunica-

ções com múltiplos saltos, considerando o problema da “surdez intrínseca”. Para tanto, foi proposto um novo protocolo MAC para uso com antenas direcionais, o AHDMAC. Para verificar a eficácia da proposta deste trabalho, foram realizadas diversas simulações onde o AHDMAC é comparado com outros protocolos MAC em diferentes cenários. Os cenários mais simples são de comunicação em uma linha de três nós, passando por cenários de comunicação em grade e terminando em cenários de comunicação completamente aleatória. As análises são feitas em duas etapas. Primeiramente, a abordagem do benefício da reutilização espacial é feita de forma isolada do aumento de alcance, sendo o mesmo considerado em uma etapa seguinte. Com isto, verificou-se que a proposta deste trabalho possibilita aumentar a vazão agregada em redes *ad hoc* utilizando antenas direcionais com relação às redes que utilizam transmissões omnidirecionais, graças à reutilização espacial. Além disso, em situações onde não ocorre a reutilização espacial, o esquema proposto consegue obter desempenho igual ou pouco inferior ao modo omnidirecional.

1.4 Organização da Dissertação

O capítulo 2 contém uma breve explanação do padrão IEEE 802.11 para redes sem fio no modo *ad hoc*, em seguida são expostas propostas difundidas na literatura científica para adaptação do padrão IEEE 802.11 para uso de antenas direcionais. O capítulo termina com uma discussão dos efeitos esperados com a utilização de antenas direcionais em redes *ad hoc*. O capítulo 3 detalha o problema da surdez identificando um caso particular de surdez aqui batizado de “surdez intrínseca”. Com base nesta constatação, o protocolo AHDMAC é proposto e o capítulo 3 termina com uma comparação entre as versões aqui propostas do AHDMAC. Os resultados de sua simulação em diversos cenários são discutidos com detalhes no capítulo 4. O capítulo 5 conclui esta dissertação e identifica possíveis trabalhos futuros e linhas de pesquisa relacionadas com o tema em questão.

Capítulo 2

Redes Sem Fio IEEE 802.11

NESTE capítulo é feita uma rápida descrição do padrão IEEE 802.11 nos modos infra-estruturado e *ad hoc*. Os conceitos utilizados de antenas direcionais e uma adaptação do NAV, o DNAV, são abordados. Os alcances esperados para sistemas com antena direcional e diversas quantidades de feixes são apresentados juntamente com os seus cálculos conforme o modelo de propagação utilizado. O capítulo termina com uma discussão dos efeitos positivos e negativos do uso de antenas direcionais em redes *ad hoc* IEEE 802.11. O modelo de redes *ad hoc* com antenas direcionais é detalhado.

2.1 A Norma 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 permitindo taxas de até 2 Mbps na banda de 2,4 GHz. O padrão IEEE 802.11a [20] determina os padrões para a comunicação na banda de 5 GHz para taxas de até 54 Mbps, já o padrão IEEE 802.11b [21] foi elaborado para funcionar na faixa de 2,4 GHz e taxas de até 11 Mbps. Posteriormente, foi definido o padrão para taxas de 54 Mbps na frequência de 2,4 GHz na norma IEEE 802.11g [22]. Nas simulações desta dissertação foi utilizada a norma IEEE 802.11b [21]. Contudo, o AHDMAC pode ser utilizado em qualquer uma das versões do IEEE 802.11, pois o mecanismo que o AHDMAC introduz não é baseado em nenhuma

particularidade de uma versão, mas no mecanismo de acesso ao meio comum a todas.

A norma IEEE 802.11 define dois modos de operação, o modo *ad hoc* e o modo infra-estruturado. No modo infra-estruturado a comunicação é centralizada nos chamados Pontos de Acesso (PAs). O modo infra-estruturado é o mais utilizado em redes comerciais de escritórios, escolas, etc. Neste, os nós finais, *notebooks* por exemplo, se conectam à rede sem fio através de um equipamento especializado que é o PA. Como em uma rede de telefonia celular, o PA recebe a transmissão do nó final para que o mesmo seja encaminhado na rede. A rede poderá ser totalmente sem fio, onde os PAs concentram a comunicação de uma região, como em uma célula da comunicação de redes celulares. Para haver a comunicação entre dois nós em células diferentes, o encaminhamento entre os nós é realizado pelos respectivos PAs. Caso um nó sem fio precise se comunicar com um nó pertencente à rede cabeada, o PA faz a interligação entre a rede sem fio e a rede cabeada servindo de *bridge*.

Numa rede IEEE 802.11 infra-estruturada, em termos de encaminhamento de pacotes, existe uma distinção clara entre os nós finais, usuários da rede, e os nós intermediários, que realizam o encaminhamento dos pacotes da rede. Os nós finais são as fontes e os destinos dos pacotes, em última instância são os computadores dos usuários da rede. De outro lado, os roteadores são equipamentos especializados utilizados para o fim específico de roteamento dos pacotes, ou seja, fazer com que os pacotes cheguem aos nós de destino.

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. Neste modo não existe diferenciação entre os nós e a tarefa de roteamento não possui elementos designados para este fim, ao invés disso, esta tarefa é distribuída entre todos os elementos componentes de uma rede *ad hoc*. Na rede *ad hoc* todos os elementos são móveis, desta forma, a rede *ad hoc* é potencialmente muito mais dinâmica que as redes infra-estruturadas que possuem elementos fixos. Como somente existe um tipo de nó, todos os nós devem possuir um mecanismo de encaminhamento de pacotes para um outro nó qualquer da rede, o que torna os nós mais complexos. A tarefa de encaminhamento é distribuída de forma igual entre todos os nós. Este trabalho é focado na utilização de antenas direcionais em redes IEEE 802.11 no modo *ad hoc*.

Embora existam antenas direcionais para uso em redes IEEE 802.11, o uso das mesmas se restringe atualmente a utilização em enlaces ponto a ponto. As redes *ad hoc* ainda não são utilizadas comumente e a utilização de antenas direcionais em redes *ad hoc* ainda é objeto de pesquisa. Os trabalhos [23] de Choudhury *et al.* e [24] de Ramanathan *et al.* estão entre os primeiros a implementar um *testbed* para verificação da utilização de antenas direcionais em redes *ad hoc* de múltiplos saltos. Como não existem interfaces de rede com antena direcional comerciais para uso em computadores, portáteis ou não, no *testbed* foi necessária a utilização de uma antena externa à interface de rede. Um dos motivos de ainda não existirem interfaces de rede equipadas com antena direcional é a ausência de padronização e sistemas completos para o uso destas antenas em redes *ad hoc* de múltiplos saltos.

2.2 Redes IEEE 802.11 Ad Hoc

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 cabeadas, é utilizado um método do tipo CSMA/CD (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection*), onde as colisões são detectadas através da medição de níveis de potência maiores que o transmitido pelo próprio nó transmissor. Como nas redes sem fio IEEE 802.11, a detecção de colisão não é possível, 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 *backoff* e esperá-lo antes de iniciar uma transmissão.

O esquema básico de comunicação envolve apenas o envio de quadros de dados reconhecidos por quadros ACK. No esquema básico de comunicação existe o problema do

terminal escondido que é ilustrado na figura 2.1. Este problema acontece quando uma fonte está transmitindo para um destino e um terminal escondido inicia uma transmissão para o mesmo destino interferindo na sua recepção e causando uma colisão. Isto acontece quando o terminal escondido está fora do alcance da transmissão do emissor, contudo o destino está dentro do seu alcance.

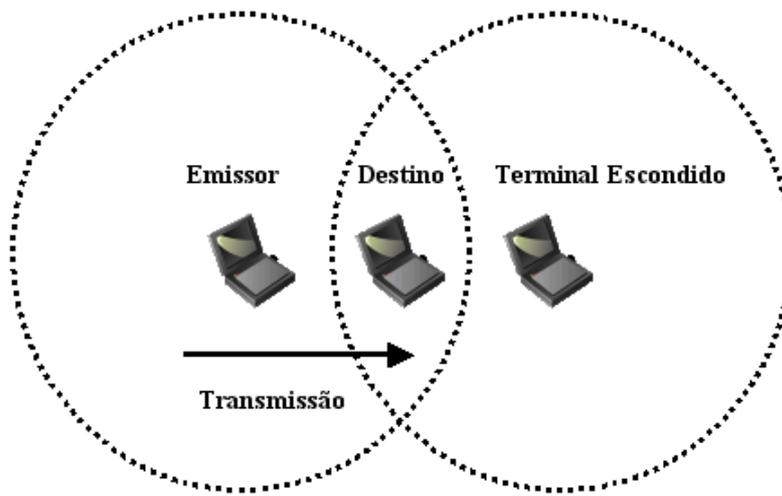


Figura 2.1: Problema do terminal escondido.

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*. Com o uso do RTS/CTS, a comunicação passa a ter quatro etapas na seqüência mostrada na figura 2.2: RTS, CTS, dados, ACK. Ao enviar um quadro RTS o emissor indica ao receptor 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, avisando-os para não interferir na mesma. Assim, o uso destes quadros de controle evita o problema do terminal escondido.

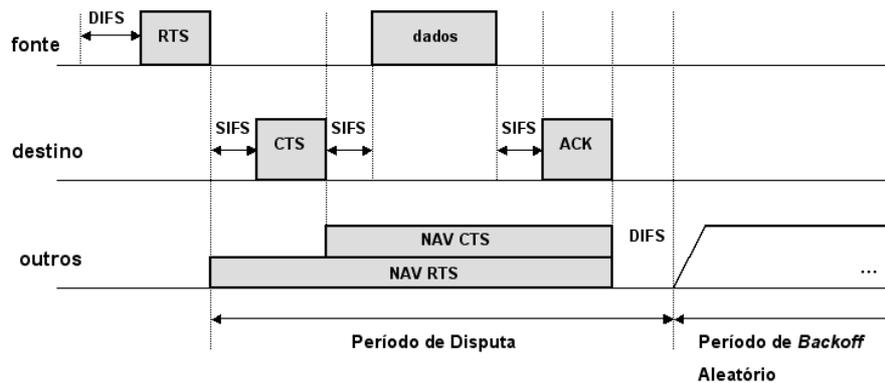


Figura 2.2: Sequência de quadros no tempo.

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 *backoff*. 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 maior que zero, a estação decrementa seu valor e somente poderá transmitir quando este chegar a zero. Desta forma, a Detecção Virtual de Portadora ajuda o protocolo a evitar colisões em conjunto com a 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.

Podem ser definidas duas áreas diferentes com relação a um sinal transmitido por um nó sem fio que estão representadas na figura 2.3. A primeira área corresponde a um círculo em volta do transmissor dentro do qual a potência recebida por um receptor é

suficiente para o correto recebimento dos dados. Para distâncias maiores com relação ao emissor forma-se a zona de interferência, onde a potência recebida não é suficiente para se decodificar os dados da transmissão, apenas para que a portadora seja detectada.

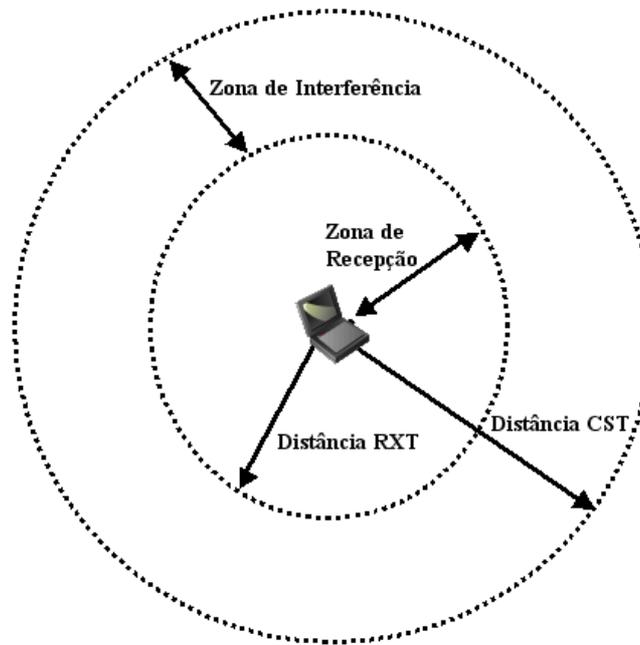


Figura 2.3: Zonas de recepção e interferência.

Dentro da zona de recepção a potência recebida deve ser maior do que o limite $RXThresh$ (*Receiving Threshold*) para permitir o correto recebimento de um quadro. Neste trabalho, o raio da zona de recepção será chamado de distância RXT, em outras palavras, a distância RXT define o alcance da transmissão. A zona de interferência é definida como a área na qual a potência recebida é menor que $RXThresh$, mas maior que $CSThresh$ (*Carrier Sense Threshold*). Como a potência recebida nesta região é menor que $RXThresh$, não é possível receber corretamente a informação transmitida. Contudo, como a potência recebida é maior que $CSThresh$, é possível identificar que existe uma transmissão em andamento com a detecção de portadora. O raio da zona de interferência será chamado de distância CST nesta dissertação.

O mecanismo de acesso ao meio previsto no padrão IEEE 802.11 contém um período de *backoff* aleatório antes da transmissão de um quadro que está representado na figura 2.2. Quando um nó deseja transmitir um quadro ele deve esperar um tempo DIFS

em que o canal fique desocupado para invocar o mecanismo de *backoff* aleatório e ao término deste poder iniciar sua transmissão. Contudo, caso um nó em uma zona de interferência tenha recebido um quadro incorretamente, este deve aguardar um tempo EIFS antes de iniciar o mecanismo de *backoff* aleatório. Este período de *backoff* é motivado supondo que a interferência tenha sido causada por um quadro de dados e evitar colisões com um quadro ACK que deveria se seguir. O tempo de espera EIFS total corresponde a um intervalo SIFS, somado ao tempo de transmissão de um quadro ACK e somado a um intervalo DIFS conforme a equação 2.1.

$$EIFS = SIFS + t_ACK + DIFS \quad (2.1)$$

A norma estabelece que o tempo de *backoff* é uma quantidade inteira que deverá ser multiplicada pelo *slot* de tempo específico para a taxa de transmissão/norma utilizada. A equação 2.2 ilustra a função do tempo de *backoff*.

$$Backoff = Random(0, CW) \cdot Slot \quad (2.2)$$

A função *Random* sorteia um inteiro pseudo-aleatório entre zero e CW. Na primeira tentativa de transmissão, CW assume o seu valor mínimo CW_{mín}, e a cada nova tentativa seu valor é incrementado até atingir o valor máximo CW_{máx}. A seqüência de valores de CW são formadas com a seguinte regra: potências de dois consecutivas, diminuídas de uma unidade, sendo que na sexta tentativa CW assume seu valor máximo. Portanto, os valores possíveis para CW formam uma série finita de números crescentes e são dependentes da taxa de transmissão. Para o IEEE 802.11b, utilizado neste trabalho, a seqüência de valores para CW é mostrada na tabela 2.1.

Uma estação irá tentar a transmissão de um quadro sucessivas vezes até que a quantidade máxima de tentativas estabelecida pela norma seja alcançada, quando então o quadro é descartado. Para este fim, cada nó possui dois contadores, o SLRC (*Station Long Retry Count*) e o SSRC (*Station Short Retry Count*). Ambos os contadores iniciam com valores nulos na transmissão de um quadro, e quando um destes atinge seu valor máximo, a transmissão é abortada. Para o padrão IEEE 802.11 (incluindo o IEEE 802.11b),

o valor máximo para SLRC é 4 e o valor máximo para SSRC é 7. O SLRC é incrementado quando uma transmissão utilizando RTS/CTS falha, enquanto que o SSRC é incrementado quando estes quadros de controle não são utilizados. Como neste trabalho está sempre sendo utilizado o modo de transmissão com os quadros RTS/CTS, o máximo de tentativas é 7.

Tabela 2.1: Série de valores possíveis para CW.

Tentativa	CW
1	31
2	63
3	127
4	255
5	511
6	1023
7	1023

2.2.1 Transmissão Direcional

O modelo de antena direcional utilizado nesta dissertação é ilustrado na figura 2.4 e é similar ao modelo utilizado em [5], [6] e [12]. Neste modelo do tipo *switched beam*, o sistema possui n feixes 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 2.4 mostra um exemplo de nó com n feixes. Apesar de os nós serem equipados com uma antena direcional com múltiplos feixes, 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 feixe 0, ele fica impossibilitado de receber um outro quadro na feixe 3. Por outro lado, a transmissão recebida na feixe 3 causaria interferência na comunicação em andamento pela feixe 0.

Embora antenas direcionais do tipo *steerable beam* possuam vantagens em relação às

antenas *switched beam*, foi mostrado em [15] que ambas possuem desempenhos semelhantes em redes *ad hoc*, portanto, não existe uma vantagem significativa em utilizar este tipo de antena mais cara e mais complexa.

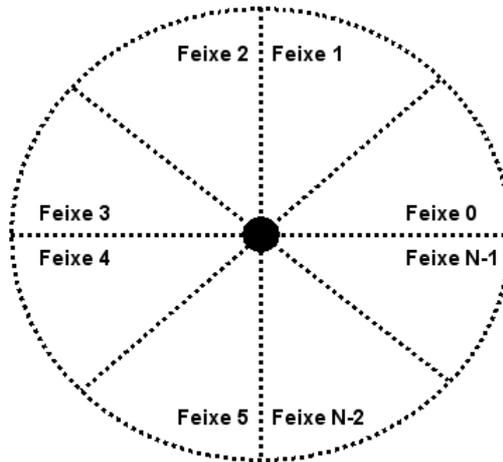


Figura 2.4: Modelo de antena direcional.

Neste trabalho, adotou-se o modelo de transmissão com formatos de setores circulares, de forma semelhante, pode-se modelar a potência de transmissão obtida neste setor circular. Considerando que o transmissor de rádio possui potência de transmissão constante, o aumento na potência transmitida será exclusivamente devido ao aumento do ganho de transmissão. Nesta dissertação considera-se que o ganho de transmissão será o fator n do modelo de antena direcional. Esta premissa é admitida porque a potência de transmissão é concentrada em setor circular de ângulo n vezes menor que um círculo correspondente a uma transmissão omnidirecional.

Para que o alcance das transmissões seja calculado, deve-se ter em conta o modelo de transmissão. Neste trabalho foi utilizado o modelo *Two-Ray Ground*, conforme sua implementação no NS-2 [25]. De forma a prover um melhor entendimento dos cálculos aqui apresentados, a tabela 2.3 contém um resumo de cada sigla adotada e seu significado.

Neste modelo, é utilizado o modelo de propagação no espaço livre, onde a transmissão atinge diretamente o destino através da visada direta, sem obstáculos ou reflexões. Nesta condição, a potência recebida P_r é calculada conforme a chamada equação de *Friis* detalhada em 2.3. O ganho de recepção G_r e o ganho de transmissão G_t possuem um valor

Tabela 2.2: Variáveis do modelo de propagação.

Sigla	Significado
Pr	Potência de recepção
Pt	Potência de transmissão
Gr	Ganho de recepção
Gt	Ganho de transmissão
Λ	Comprimento de onda eletromagnética
π	Constante matemática
d	Distância entre fonte e destino
hr	Altura da antena de recepção
ht	Altura da antena de transmissão

unitário em uma rede com antenas omnidirecionais.

$$Pr = Pt.Gt.Gr.\Lambda^2/(4.\pi.d)^2 \quad (2.3)$$

Contudo, a hipótese de uma transmissão sem nenhuma reflexão é demasiadamente simplificada e somente é utilizada para pequenas distâncias. Para se obter melhores resultados, o modelo *Two-Ray Ground* adota para distâncias maiores que um limiar (distância de corte), a equação 2.4.

O modelo *Two-Ray Ground* determina que a potência recebida será uma combinação de duas componentes, a transmissão direta e uma reflexão no solo. A potência total recebida nesta situação apresenta uma maior queda com relação a distância entre fonte e destino, e é expressa na equação 2.4.

$$Pr = Pt.Gt.Gr.hr^2.ht^2/d^4 \quad (2.4)$$

Nas simulações desta dissertação, as distâncias são maiores que a distância de corte e a equação 2.4 é utilizada para o cálculo da potência de recepção e conseqüentemente do alcance. A distância de corte é uma função das alturas das antenas de transmissão e

recepção e da frequência de transmissão.

Nesta dissertação o parâmetro $RXThresh$ é ajustado para um alcance de 250 metros, enquanto que o parâmetro $CSThresh$ é ajustado para uma distância de 500 metros. Desta forma, pode-se fazer o cálculo das distâncias RXT e CST quando da utilização de antenas direcionais. Nesta situação o ganho de transmissão será aumentado pelo fator n que é a quantidade de feixes. Os parâmetros $RXThresh$ e $CSThresh$ são constantes do sistema, portanto, não são alterados com a utilização de antenas direcionais. Para o cálculo das distâncias RXT e CST com um sistemas de n feixes, pode-se fazer uma igualdade dos termos constantes para o cálculo das distâncias obtidas com antenas direcionais. A equação 2.5 mostra a relação que pode ser feita para o cálculo das distâncias RXT e CST com a utilização de antenas direcionais.

$$Gt(omnidirecional)/d(omnidirecional)^4 = Gt(direcional)/d(direcional)^4 \quad (2.5)$$

Como exemplo, para um sistema de dois feixes, a distância RXT pode ser calculada da forma mostrada na equação 2.6. O ganho omnidirecional é unitário ($GtOmni$), a distância RXT obtida omnidirecionalmente é 250 metros, conseqüentemente, a distância RXT para um sistema com antena direcional de dois feixes é 297 metros. Desta mesma forma, as distância RXT e CST podem ser calculadoas para diferentes quantidades de feixes.

$$1/250 = 2/RXT^4 \quad (2.6)$$

A tabela 2.3 apresenta os valores das distâncias RXT e CST para 1 (omnidirecional), 2, 4, 8 e 16 feixes de transmissão. A seção 4.1 apresenta uma verificação da correção das simulações com relação a teoria aqui exposta de forma resumida.

Cabe ressaltar que como as distâncias nas simulações deste trabalho são maiores que a distância de corte, o modelo adotado é o *Two-Ray Ground*. Neste modelo, a potência recebida é inversamente proporcional à quarta potência da distância. Portanto, para que se dobre o alcance, é necessário que seja utilizada uma potência de transmissão 16 vezes

Tabela 2.3: Aumento de alcance X quantidade de feixes.

Qtde Feixes	Alcance (Distância RXT)	Distância CST
1 (omni)	250 m	500m
2	297 m	594 m
4	353 m	707 m
8	420 m	841 m
16	500 m	1.000 m

maior, o que pode ser obtido com um sistema de 16 feixes conforme tabela 2.3.

2.2.2 Quadros de Controle e Localização

Para que os benefícios do uso de antenas direcionais sejam plenamente alcançados, todos os quadros de controle (RTS, CTS e ACK) devem ser transmitidos de forma direcional como concluído em [13]. De uma forma resumida, se os quadros de controle RTS e CTS forem transmitidos omnidirecionalmente, a recepção destes quadros irá causar tempo de espera em uma mesma região de um sistema puramente omnidirecional. Para que um nó saiba em qual feixe deve realizar uma transmissão, é necessário que este obtenha a informação da direção do seu destino. Desta forma, é necessário um mecanismo de localização para que os quadros sejam transmitidos de forma direcional corretamente. Nesta dissertação, como em [7], é suposto que uma camada superior é capaz de suprir as informações necessárias de localização. O escopo deste trabalho não inclui a análise do mecanismo de localização, sendo uma premissa que a informação de localização é fornecida para a camada MAC para o correto envio de quadros. Neste trabalho, usou-se que para todo envio de quadro é utilizado o esquema RTS/CTS/dados/ACK.

2.2.3 Mecanismo de Transmissão e Recepção

A seção anterior detalha como o uso de antena direcional influencia com aumento de alcance as transmissões. O objetivo desta seção é detalhar o modelo utilizado de comuni-

cação com antenas direcionais.

Primeiramente, cabe ressaltar que todos os quadros de *broadcast* são transmitidos omnidirecionalmente. Desta forma, o funcionamento dos protocolos de roteamento é assegurado tal como nos sistemas omnidirecionais.

Por outro lado, os quadros *unicast* são transmitidos direcionalmente. Neste trabalho são considerados dois casos para as transmissões direcionais, no primeiro o alcance é o mesmo obtido na transmissão omnidirecional, no segundo o aumento de alcance é proporcional a quantidade de feixes do sistema conforme detalhamento da seção anterior.

Quando um nó vai transmitir um quadro direcionalmente, o mesmo se utiliza do seu mecanismo de localização de forma a utilizar o feixe na direção do destino. Por outro lado, o destino não sabe que um quadro será enviado para si, nem tão pouco em qual feixe o mesmo será recebido. Portanto, para que a recepção ocorra, o receptor deverá realizar uma recepção omnidirecional. Uma vez que o receptor determine o feixe utilizado para a recepção, o mesmo pode restringir a recepção de sinais ao feixe que está sendo utilizado. Neste trabalho será utilizado o termo “o nó está direcionado” para designar esta situação. Quando um nó está direcionado em determinado feixe, o mesmo somente é capaz de receber sinais neste feixe específico. Desta forma, uma eventual transmissão que alcance os demais feixes não irá interferir na recepção em andamento no feixe no qual o nó está direcionado.

2.2.4 DNAV - Directional Network Allocation Vector

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*) [5], [6], [7], [9] e [12]. 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.

2.2.5 Protocolo de Roteamento - AODV

Neste trabalho foi utilizado o protocolo de roteamento AODV (*Ad Hoc On Demand Distance Vector* [26]) nas simulações. Entretanto, a sua utilização é devido ao fato de não ser possível realizar simulações no NS-2 sem a utilização de um protocolo de roteamento. Para que se anule o efeito do protocolo de roteamento nas simulações realizadas, o tempo inicial de computação da vazão obtida nas simulações é ajustado para o instante de formação das rotas. Desta forma, o período anterior a formação das rotas é eliminado do resultado das simulações, eliminando a influência do período de formação de rotas e portanto do protocolo de roteamento.

O AODV é um protocolo de roteamento que foi desenvolvido para redes *ad Hoc* pelo grupo de trabalho MANET (*Mobile Ad Hoc Network*) do IETF (*Internet Engineering Task Force*). O AODV é do tipo reativo, ou seja, as rotas são formadas sob demanda quando são necessárias. A formação da rota é iniciada pelo nó de origem quando da necessidade de transmissão através do envio em *broadcast* de um quadro de pedido de rota RREQ (*Route Request*). Todos os nós que recebem este quadro o re-transmitem de forma que o mesmo alcance o destino. Esta difusão é limitada por um parâmetro *Expanding Ring Search* que limita a quantidade máxima de re-transmissões. Quando o destino recebe o RREQ, ele responde para o emissor deste quadro em *unicast* com um quadro RREP (*Route Reply*). Um nó intermediário que conheça a rota para o destino pode responder com um RREP para a formação da rota. Os nós intermediários que recebem um RREQ ou um RREP armazenam as rotas reversas informadas. A manutenção das rotas é feita com a utilização de quadro RERR (*Route Error*) que podem ser utilizados para informar quando o rota não estiver mais disponível.

2.3 Uso de Antenas Direcionais

O uso de antenas direcionais em redes IEEE 802.11 *ad hoc* possui algumas vantagens que podem ser potencialmente muito positivas. Contudo, surgem alguns novos problemas e outros existentes são agravados. Nesta seção estas questões são brevemente expostas, o seu detalhamento e análise, através de simulações, é objeto do capítulo 4.

2.3.1 Benefícios do Uso de Antenas Direcionais

A principal vantagem no uso de antenas direcionais é o que se chama na literatura de reutilização do espaço. Retornando a figura 1.1, as antenas direcionais não irradiam sinal em todo o entorno do nó, como acontece com as antenas omnidirecionais. Portanto, o meio de transmissão pode ser mais bem aproveitado quando se está considerando uma rede com diversos nós se comunicando ao mesmo tempo. O melhor aproveitamento permite um maior número de comunicações simultâneas na rede, aumentando a vazão agregada da rede como um todo. A figura 2.5 mostra uma rede *ad hoc* utilizando antenas omnidirecionais onde o nó A necessita se comunicar com o nó B e o nó C com o nó D. Claramente nota-se a limitação da transmissão omnidirecional porque somente uma destas comunicações pode ocorrer por vez, embora em cada comunicação esteja envolvido um par de nós diferentes. Toda vez que A desejar transmitir para B, C também estará recebendo a transmissão de A, o impossibilitando de transmitir para D ou receber quadros de D.

Por outro lado, com a utilização de antenas direcionais, A pode se comunicar com B ao mesmo tempo em que C se comunica com D, o que a literatura chamou de reutilização do espaço. O nó A utiliza seu feixe 0 para se comunicar com o nó B que por sua vez está utilizando o feixe 2. O nó C transmitindo com o feixe 3 possibilita que o nó D receba os sinais com o seu feixe 1. A figura 2.6 ilustra como ambas as comunicações podem ocorrer ao mesmo tempo, sem que uma interfira na outra, aumentando a vazão agregada da rede.

Retomando os conceitos de transmissão apresentados, a quantidade de feixes é proporcional à distância máxima alcançada. Logo, quanto mais diretiva a antena, maior será

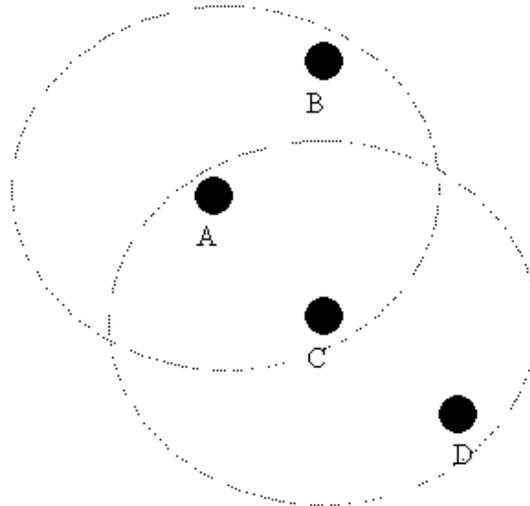


Figura 2.5: Comunicações alternadas utilizando antenas omnidirecionais.

o seu alcance. Com isto, é possível obter rotas com menores quantidades de saltos entre dois nós em determinadas topologias. Tome-se a figura 2.7 como exemplo, onde o nó A necessita se comunicar com o nó E. Com a utilização de antenas omnidirecionais, a rota entre A e E constitui-se de B-C-D, ou seja, são necessários três saltos de comunicação intermediários para que um quadro enviado por A seja recebido por E.

Na comunicação com antenas direcionais o alcance do nó A é suficientemente grande para que a transmissão de A seja recebida diretamente por E sem a necessidade de saltos intermediários conforme ilustrado na figura 2.8.

De uma forma geral, o uso de antenas direcionais diminui o nível de interferência na rede, permitindo maiores taxas agregadas como mostrado em [5]. Como a energia transmitida é focada na direção do destino, o nível de interferência tende a diminuir em uma rede com antenas direcionais. Por fim, a questão de gasto de energia pode ser melhorada com o uso de antenas direcionais. Com o uso de antenas omnidirecionais, a maior parte da energia utilizada na transmissão é desperdiçada. As antenas direcionais permitem que a energia seja concentrada na direção do destino diminuindo o gasto de energia e aumentando a eficiência. Contudo, para que isto ocorra, deve haver um controle da potência de transmissão. Caso a mesma potência de transmissão seja constante ao longo

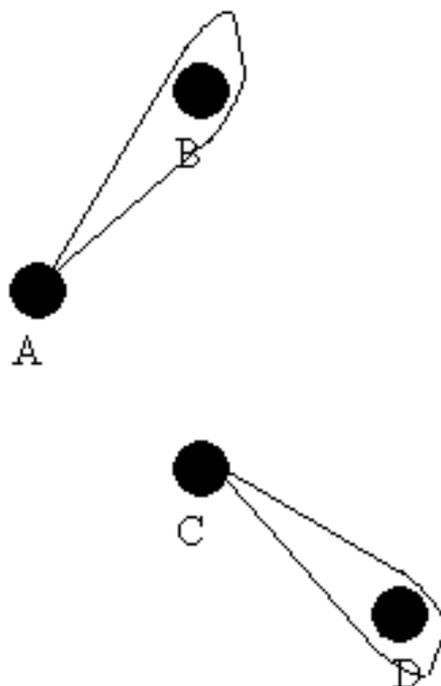


Figura 2.6: Comunicações simultâneas utilizando antenas direcionais.

do tempo, não haverá ganho em termos de energia para o nó transmissor. Portanto, para que se possa combinar a reutilização do espaço, com maximização do gasto de energia, as técnicas de antenas direcionais devem ser utilizadas em conjunto com as técnicas de controle de potência de transmissão. Nesta dissertação, os aspectos de energia e de controle de potência não são abordados. Alguns trabalhos foram realizados para investigar o consumo de energia com o uso de antenas direcionais de forma a minimizar o consumo de energia da rede [27] e para estudar a diminuição da interferência global de uma rede através da variação do alcance com o uso de antenas direcionais [28].

2.3.2 Problemas do Uso de Antenas Direcionais

Retomando o cenário da figura 2.6, pode-se ilustrar claramente uma situação de custo-benefício com o uso de antenas direcionais. Suponha que A esteja se comunicando com B, e que A se encontra em estado de recepção. Como todos os quadros RTS, CTS, dados

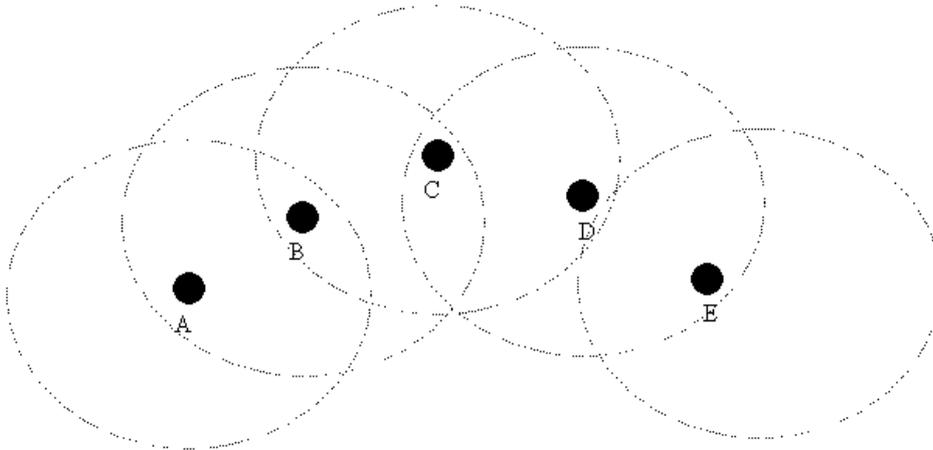


Figura 2.7: Comunicação omidirecional com múltiplos saltos.

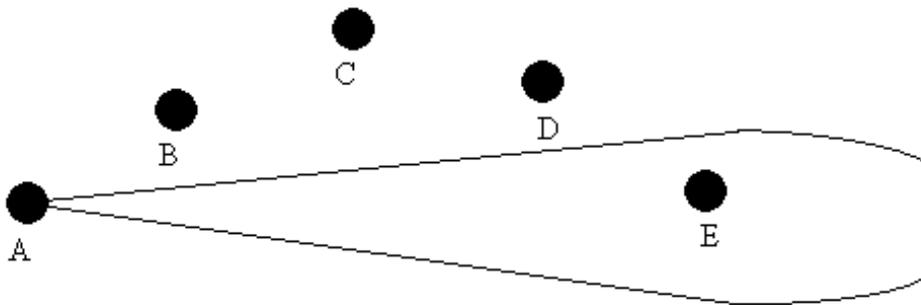


Figura 2.8: Comunicação direcional direta entre fonte e destino.

e ACK foram transmitidos direcionalmente, C não sabe da comunicação em andamento. Logo, C poderá transmitir para A em qualquer momento interferindo e interrompendo a comunicação em andamento entre A e B. Logo, os problemas de terminal escondido são agravados com o uso de antenas direcionais.

Por outro lado, ainda supondo uma comunicação entre A e B, caso o nó A esteja utilizando um feixe específico, transmitindo ou recebendo, e neste momento C transmita para A, o nó A não conseguirá receber o quadro de C por estar direcionado na direção do nó B. A este comportamento se batizou de surdez, sendo discutido nos artigos [7] e [29] e abordado com maiores detalhes no capítulo 3. Este comportamento afeta fortemente a desempenho da rede e seus efeitos são acentuados com o uso de antenas direcionais. O

nó C poderá tentar consecutivas vezes a comunicação com o nó A, e como o processo de *backoff* possui tempos aleatórios exponencialmente maiores, o nó C experimentará grandes períodos de espera até obter um *timeout*.

O maior alcance obtido através da utilização de antenas direcionais também possui um aspecto negativo. Supondo o cenário da figura 2.9, o benefício de ser possível uma rota com menor número de saltos utilizando o maior alcance obtido com antenas direcionais continua verdadeiro. Contudo, os nós B, C e D serão silenciados com a transmissão de A para E. Desta forma, os cenários com muitos nós em linha são prejudicados pelas transmissões direcionais com aumento de alcance. Supondo que A deseje falar com B, e D com E, com as transmissões direcionais e alcance omnidirecional, isto é possível. Contudo, utilizando antenas direcionais e aumento de alcance, ambas as comunicações não são possíveis simultaneamente. Quando A transmitir para B, mesmo que D esteja direcionado transmitindo para E, o nó E receberá a transmissão de A causando uma colisão.

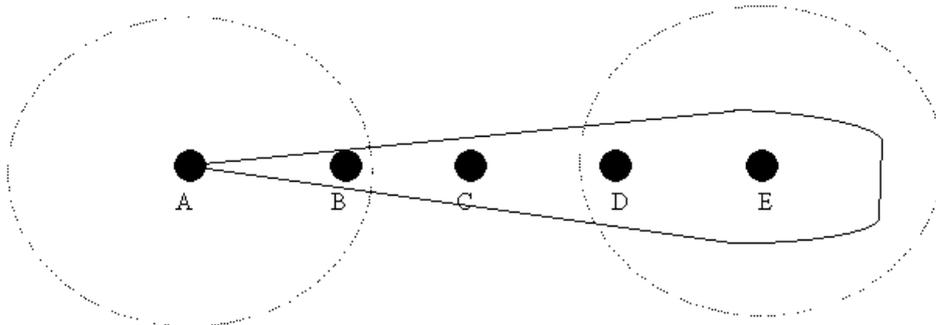


Figura 2.9: Comunicação direcional em topologia de linha.

Capítulo 3

Protocolo AHDMAC

ESTE capítulo examina o fenômeno da surdez observado nas redes sem fio *ad hoc* para em seguida apresentar um caso específico identificado neste trabalho, a surdez intrínseca. Uma métrica é apresentada para mensurar os efeitos da surdez, inclusive da surdez intrínseca. Os efeitos da surdez são quantificados em simulações para as redes omnidirecionais e direcionais. O protocolo AHDMAC é apresentado para contornar os efeitos da surdez intrínseca e o seu efeito sobre o indicador proposto de surdez é mostrado para averiguar sua eficácia. Os parâmetros de ajuste do protocolo AHDMAC são examinados e ajustados para valores que serão utilizados como padrão nas simulações do capítulo 4. Por fim, este capítulo termina analisando o comportamento das diferentes versões do AHDMAC em um cenário simples de comunicação com três nós. Uma versão do AHDMAC será selecionada para ser examinada em cenários complexos de simulação no capítulo 4.

3.1 Ambiente de Simulação

As simulações foram realizadas utilizando o *software* NS-2 [25], 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 rodadas suficientes de forma a se obter um intervalo de confiança de 95% para a faixa de erro mostrada nos gráficos. Alguns dos

resultados apresentados neste trabalho já foram publicadas pelos autores em [30].

O NS-2 original na versão 2.26 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 pelos colegas Glauco Fiorott Amorim, Luiz Antonio Silva, Myrna C. M. dos Santos Amorim e Nilton C. N. da C. Braga. Este módulo foi estendido no presente trabalho de forma a incorporar o aumento de alcance resultante da utilização de antenas direcionais. Neste módulo, foi acrescentada a proposta do AHDMAC com suas variações para antenas direcionais apresentada neste trabalho.

Nas simulações foram usados os parâmetros básicos de simulação contidos na tabela 3.1, estes são incorporados em um script para *shell tcsh* que foi usado nas simulações. Sempre que não houver referência aos valores usados na simulação, supõe-se a utilização dos valores aqui relacionados. Muitas destas variáveis possuem significados auto-explicativos, outros estão com sua interpretação descrita na tabela 3.1. Os parâmetros *Ndnaw*, *Nslots* e *Nqueue* que dizem respeito à proposta deste trabalho, o AHDMAC, são explorados no seção 3.4 e serão parâmetros fixos nas simulações deste capítulo.

De uma forma resumida, as simulações são feitas para os modos direcionais com todos os quadros transmitidos direcionalmente, inclusive os quadros de controle, conforme detalhado no capítulo 2. Para tanto, supõe-se a utilização de um mecanismo de localização fornecido por uma camada superior que fornece as informações necessárias para o correto envio de quadros. As simulações são analisadas com os modos DMAC e AHDMAC podendo possuir ou não o aumento de alcance sendo então denominados DMAC-G e AHDMAC-G. Os valores para o alcance são resumidos na tabela 2.3 para quando for considerada a situação de aumento de alcance. Conforme detalhado no capítulo 3, o protocolo AHDMAC pressupõe a contagem de um tempo de espera no feixe onde ocorreu a transmissão de um quadro após o correto recebimento de seu quadro de reconhecimento *ACK*. A contagem do tempo de espera é suficiente para que o quadro seja re-transmitido sem que ocorra disputa pelo meio, desta forma o problema da surdez intrínseca não irá ocorrer. Nas simulações deste capítulo será utilizada a versão AHDMAC-4, escolhida conforme análise feita no capítulo 3, para todas as simulações.

Para diminuir os tempos de simulação, os *logs* não foram armazenados para evitar a escrita em mídia magnética. Os cálculos são feitos em tempo de simulação e apenas os resultados desejados são gravados. Apesar de esta prática diminuir muito o tempo de simulação, a análise dos resultados é dificultada pela ausência de registros detalhados. Cabe notar que para as simulações em grade foram executadas 500 rodadas de simulação. O servidor utilizado possui duas CPUs Intel Xeon de 2,8 GHz e 1 GB de memória RAM. Utilizando este *hardware*, foi necessário uma média de 30 dias para executar 500 rodadas de simulações dos cenários em grade.

Tabela 3.1: Parâmetros de Simulação.

Parâmetro	Valor	Função
ic	95%	Intervalo de confiança
debug	10	Nível baixo de interesse
nrofruns	15	Quantidade de rodadas
fila	100	Tamanho da fila em quadros
tempoTotal	100	Tempo de uma rodada de simulação
fila	100	Tamanho da fila em quadros
rts_tresh	0	Limite de pacote para uso de RTS/CTS
RXT	3.65262e-10	RXThresh para 250m
CST	2.28289e-11	CSThresh para 500m
deslocamento	200	Distância entre os nós (Metros)
beams	8	Quantidade de feixes
coluna	3	Quantidade de colunas em grade
linha	1	Quantidade de linhas em grade
psize	1500	Pacote padrão de rede Ethernet
rate	2500000	Taxa de emissão (Mbps)
dir1	results	Nome do diretório para dados
qtfontes	1	Quantidade de de fluxos
randomFluxos	0	Modo de formação dos fluxos
Ndnav	1	Parâmetro do AHDMAC
Nqueue	1	Parâmetro do AHDMAC
Nslots	32	Parâmetro do AHDMAC
eixoXnome	Ndnav	Parâmetro a ser variado
eixoXvalor	(0 1 2 3 4)	Valores para o parâmetro

3.2 Surdez

As primeiras referências ao efeito de surdez foram feitas por Choudhury e Vaidya em [7]. O assunto foi tema de um relatório técnico [29] com uma proposta de contorno pelos mesmos autores que em seguida estenderam a proposta em [31]. Contudo, o mecanismo proposto em [7] pressupõe o uso de um sinal, ou tom, fora da banda de transmissão, o que torna necessário o uso de outro transmissor de rádio. Independentemente da forma como o tom proposto for implementado, este tipo de proposta necessita de mecanismos que causam incompatibilidades com o padrão IEEE 802.11 [1]. A proposta deste trabalho pretende ser compatível com o padrão IEEE 802.11 [1], porém, aliviando os problemas de surdez. Para tanto, não necessita de *hardware* adicional e não altera ou introduz mensagens, mas propõe um comportamento diferenciado para cada nó introduzindo um tempo de espera. Desta forma, cada nó altera o seu tratamento com relação aos quadros recebidos, sem contudo, alterar a troca de mensagens características do protocolo, ou seja, os quadros não são alterados nem tão pouco sua ordem e significado.

Conforme apresentado no capítulo 2, no modelo utilizado de antenas direcionais, um nó equipado com antena direcional consegue transmitir em diferentes direções a cada momento. Contudo, o nó apenas possui um transmissor, isto implica que um mesmo nó somente pode realizar uma transmissão, ou uma recepção, de cada vez. Como o uso de antenas direcionais uma transmissão (ou recepção) corresponde a um setor circular, o mesmo pode estar engajado em uma comunicação em determinada direção e ter quadros enviados para si vindos de outra direção.

Vistos estes conceitos gerais, o problema da surdez pode ser agora melhor entendido tomando-se como exemplo a figura 2.6. O nó A está se comunicando com o nó B, onde o nó A utiliza seu feixe 0 para se comunicar com o nó B, que por sua vez utiliza seu feixe 2. Desta forma, ambos os nós encontram-se direcionados, portanto, surdos nos outros feixes, ou nas outras direções. Em um certo momento, o nó C tenta iniciar uma comunicação com o nó A enviando um RTS através de sua antena 1 para ser recebido pela antena 3 do nó A. O nó A está direcionado com a antena 0 e portanto surdo para a antena 3. Desta forma, o nó A não responderá ao nó C. Uma vez que o nó C tente o envio de um quadro RTS sem sucesso, o mesmo irá iniciar um mecanismo de *backoff* com tempos exponencialmente

maiores. A vazão agregada da rede será fortemente prejudicada por este comportamento, uma vez que o mesmo incorrerá em grandes tempos de *backoff* e conseqüentemente em desperdício do meio de transmissão e queda da vazão agregada da rede.

Este trabalho propõe uma forma de mensurar a surdez através da relação de quadros transmitidos e recebidos. Desta maneira, um dado quantitativo pode ser utilizado para identificar e mensurar o efeito da surdez. A relação entre os quadros RTS enviados e ACK recebidos indica uma razão da surdez percebida pelo nó em questão. Uma razão igual a 1, indica que os pedidos de envio de quadros de dados estão sempre obtendo sucesso e sendo confirmados com seus respectivos ACKs. Contudo, valores maiores que 1 indicam que pedidos consecutivos de envio de quadros de dados feitos com um quadro RTS foram feitos para apenas um recebimento bem sucedido de um quadro de dados expresso pelo recebimento de um quadro ACK.

3.2.1 Surdez Intrínseca

Na definição de surdez encontrada em [7], [9], [29] e [31], a surdez está relacionada a uma comunicação em andamento entre um par de nós e a interferência causada por um terceiro nó que inicia uma segunda comunicação. Nesta definição, supõe uma comunicação de um nó A com um nó B, onde um terceiro nó C, em diferente eixo, tenta uma comunicação com A ou B. Devido ao fato de A estar surdo para C, direcionado para B, o nó C sofrerá os efeitos negativos da surdez. As comunicações fim-a-fim acontecem entre aplicações e são mapeadas por uma relação fonte e destino estática ao longo da sua duração. Nasipuri [5] considerou nas simulações que a fonte e o destino de cada quadro transmitido seriam sorteados independentemente. No entanto, não é possível imaginar que, cada quadro a ser transmitido não possui um relacionamento com os outros anteriormente transmitidos. Em outras palavras, os quadros pertencem a comunicações em andamento, não são gerados de forma aleatória ou espontânea. Desta forma, é pertinente e importante o estudo dos efeitos da comunicação *ad hoc* direcional em fluxos, ou seja, em comunicações com fonte e destino determinados. Para considerar este tipo de situação, foi considerado um par fonte-destino estático nas simulações deste trabalho.

Contudo, o problema da surdez também acontece dentro de uma mesma comunicação fim-a-fim, caracterizando uma situação de surdez intrínseca. Tome-se como exemplo uma comunicação de A com C tendo B como um salto intermediário conforme mostrado na figura 3.1. Quando houver uma taxa de transferência grande o suficiente para que o *buffer* de transmissão esteja sempre cheio, ocorrerá a seguinte sistemática. O nó A transmitirá um pacote para o nó B, que por sua vez tentará transmiti-lo para o nó C, contudo, a fila de A está cheia e o mesmo tentará imediatamente após a recepção do quadro ACK uma nova transmissão para B independentemente da tentativa de B transmitir para C causando uma situação de disputa entre A e B. Lembrando que os quadros de controle também são transmitidos direcionalmente, caso B tente transmitir primeiro, ele direcionará sua antena para C e enviará um quadro RTS. Em seguida A também tentará transmitir para o nó B, contudo, o mesmo está direcionado na direção de C, conseqüentemente surdo para A. O nó A poderá tentar inúmeras vezes a transmissão de um quadro sem obter sucesso. Conforme a norma IEEE 802.11 [1], a cada falha de transmissão, a janela de contenção

é aumentada de forma exponencial, causando um desperdício do meio de transmissão e uma conseqüente queda na taxa de transferência do nó A. Caso A consiga transmitir antes de B, o problema citado não irá ocorrer.

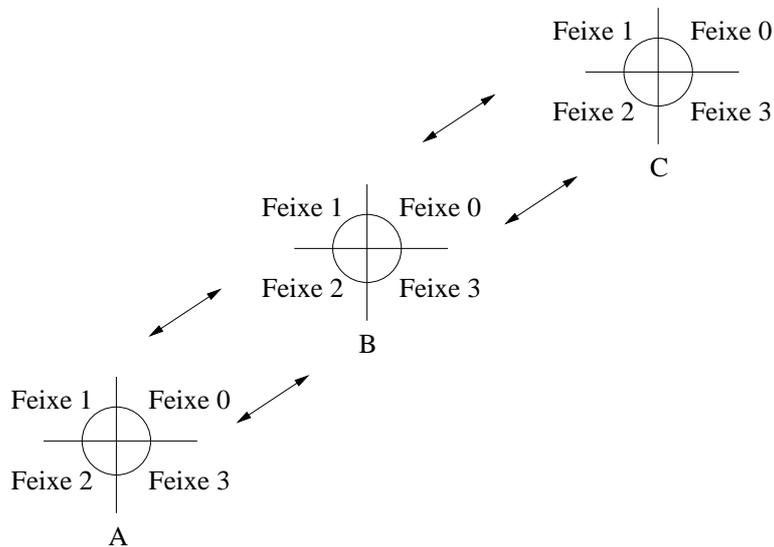


Figura 3.1: Cenário de comunicação com três nós em linha.

Este comportamento problemático não ocorre nas redes omnidirecionais. Quando B estiver transmitindo o quadro recebido de A para C, o seu quadro RTS também será recebido por A. Desta forma, quando um nó envia um quadro, todos os nós em sua zona de recepção o recebem. Como estes são os nós que podem interferir na comunicação, o correto recebimento do quadro evita que estes nós iniciem uma transmissão que iria causar uma situação de possível surdez. Portanto, nas redes omnidirecionais, existe a disputa pelo meio, entretanto, todos os nós que podem interferir na transmissão serão avisados da mesma por um quadro RTS ou CTS, ou ainda receber a transmissão do quadro de dados ou ACK. Por outro lado, nas redes puramente direcionais, nós em zona de alcance do par fonte/destino da comunicação podem não ser avisados de que a mesma está em andamento devido à direcionalidade dos quadros. Em outras palavras, nós que estejam na zona de alcance de um transmissor, não irão notar uma comunicação em andamento caso estejam fora do eixo direcional da comunicação.

Portanto, o problema da surdez intrínseca é o baixo desempenho das transmissões puramente direcionais como mostrado na figura 3.2 devido ao aumento da janela de con-

tenção por causa de quadros RTS enviados e não respondidos por respectivos CTSs. A figura mostra as curvas de desempenho de vazão para uma comunicação com três nós para o cenário mostrado na figura 3.1 onde o nó A transmite para o nó C. Os nós estão posicionados a uma distância de 200 metros um do outro. A curva de vazão obtida pela transmissão omnidirecional (doravante abreviada por OMNI) mostra que existe uma condição de saturação e que a vazão máxima obtida é pouco menor que 2,5 Mbps. Para taxas de emissão de 2 Mbps o modo direcional (doravante abreviado por DMAC) atinge um alto grau de surdez intrínseca, o que faz com o seu desempenho tenha uma queda brusca. Para a faixa de saturação, taxas de emissão maiores que 2 Mbps, a vazão atingida é menor que a obtida com a taxa de emissão de 2 Mbps porque ainda não existe o efeito da surdez intrínseca.

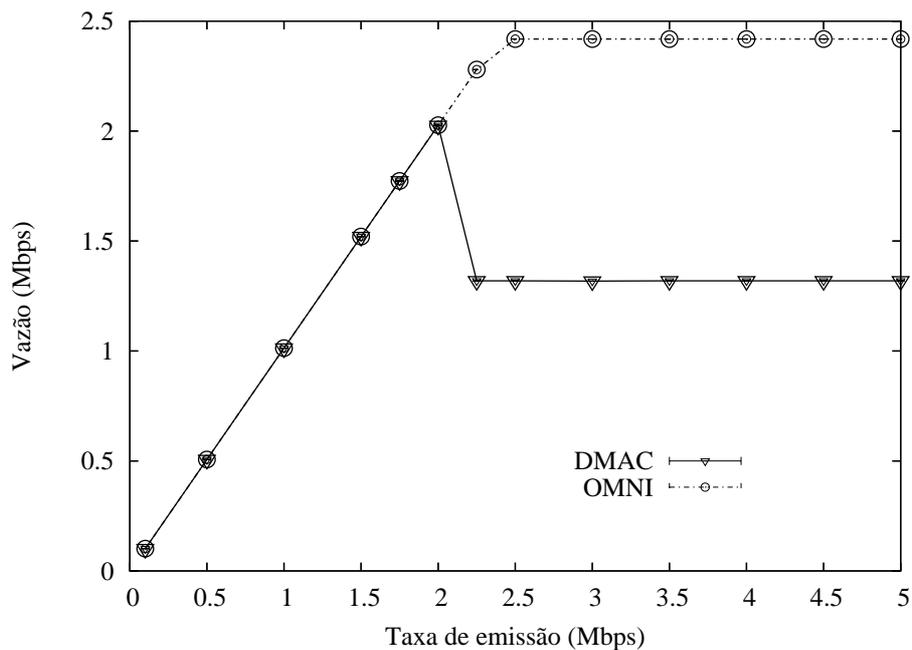


Figura 3.2: Vazão na comunicação com três nós em linha.

3.2.2 Quantificando a Surdez: Índice de Surdez

Retomando a proposta de um índice de medida de surdez, neste caso também de surdez intrínseca, a figura 3.3 ilustra a razão RTS/ACK para o nó A na comunicação do cenário mostrado na figura 3.1 para pacotes de 1500 bytes e distância de 200 metros entre os nós. Esta razão será utilizada como uma medida de surdez e será denominada de índice de surdez. Cabe lembrar que nas simulações deste trabalho em todo envio de quadro de dados são utilizados os quadros RTS e CTS. O nó emissor envia uma série de quadros RTS para os quais não obtêm resposta, aumentando sua janela de contenção e com conseqüente queda em sua vazão. No mínimo, é necessário um quadro RTS para o envio de um quadro de dados. Desta forma, uma razão maior que 1 indica que, em média, foram enviados mais do que 1 quadro RTS para cada quadro de dados. Para taxas de emissão de até cerca de 2 Mbps observa-se que os modos omnidirecional (OMNI) e direcional (DMAC) possuem uma relação RTS/ACK muito próxima de 1, contudo, para taxas maiores, o modo DMAC apresenta uma razão de quase 3,5.

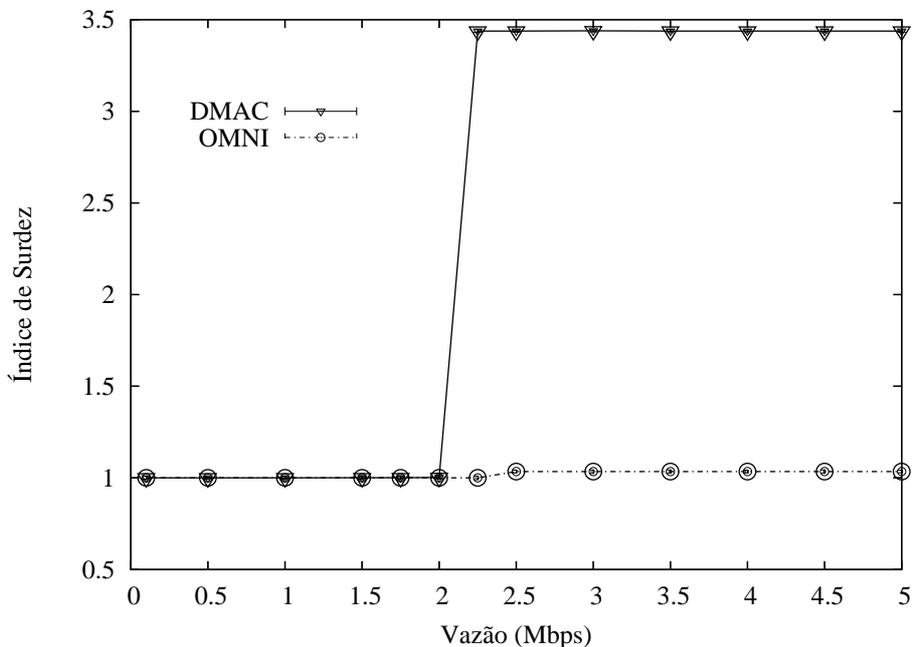


Figura 3.3: Índice de surdez RTS/ACK do Nó A na comunicação com três nós em linha.

Uma comparação possível pode ser feita analisando as diferenças entre os comportamentos dos nós da cadeia de transmissão conforme a figura 3.4. Espera-se que os nós

A (emissor) e B (intermediário) apresentem comportamentos similares. Já o nó C (sorvedouro) deverá ter uma razão sempre unitária, já que este nó não transmite os quadros de dados, o único quadro transmitido é a resposta à formação de rota AODV (*Ad Hoc On Demand Distance Vector*) [26] para que se inicie a transmissão dos dados. Cabe notar que no NS-2 é mandatório o uso de um protocolo de roteamento, o estudo da influência dos mesmos em redes diecionais não é objeto desta dissertação. Nos gráfico de vazão deste trabalho o período de tempo antes da formação das rotas não é considerado. Como esperado, para o modo OMNI, esta razão é muito próxima de 1 para todos os nós, enquanto que com o uso do DMAC esta razão foi em torno de 3,4 para o nó A e 2,5 para o nó B.

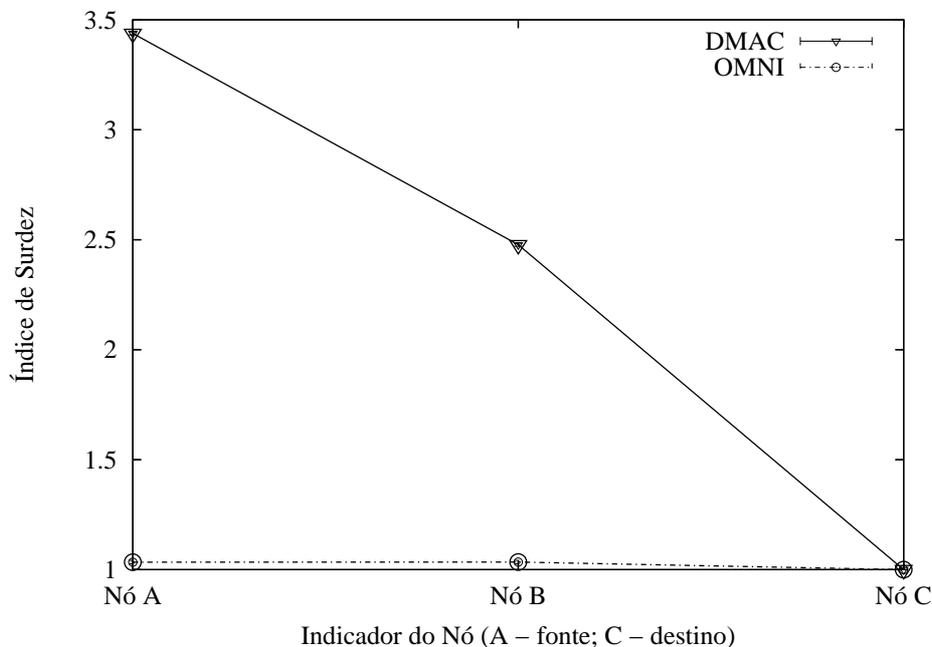


Figura 3.4: Índice de surdez na comunicação com três nós em linha.

3.3 O Protocolo AHDMAC

A proposta deste trabalho é baseada em uma solução simples, eficiente e que não provoca divergências com as normas IEEE 802.11 [1]. Como mostrado na seção anterior, a surdez intrínseca possui grande influência no desempenho das redes *ad hoc* utilizando antenas direcionais. Desta forma, foi feita uma extensão à proposta básica de um protocolo direcional, o DMAC [7] e [8], e desenvolvido um novo protocolo de acesso ao meio,

chamado AHDMAC (*Ad Hoc Directional MAC*). 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 com o intuito de evitar uma situação de surdez intrínseca. O exemplo da figura 3.1 ilustra o mecanismo proposto. A comunicação irá iniciar com o nó A enviando um RTS, recebendo um quadro CTS do nó B e então enviando seu quadro de dados. Após a recepção do quadro ACK, propõe-se que o nó A inicie uma contagem de DNAV no feixe 0, onde ocorreu a transmissão do quadro de dados, permitindo que o nó B envie totalmente o mesmo quadro de dados para o nó C. O tempo de contagem para o DNAV deve ser então:

$$Ndn_{nav}(Nslots.slot + DIFS + t_{RTS} + SIFS + t_{CTS} + SIFS + t_{data} + SIFS + t_{ACK}) \quad (3.1)$$

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, portanto que o próximo nó na cadeia de comunicação levará para enviá-lo. O fator $Nslots.slot$ corresponde ao tempo máximo de *backoff*, 31 *slots* de tempo, acrescido de um *slot*. O parâmetro $Nslots$ possui o valor 32, o termo $Nslots.slot$ representa 32 *slots* de tempo. Um *slot* de tempo é uma unidade básica de tempo definida pelo norma IEEE 802.1 e corresponde soma dos seguintes tempos: tempo de detecção de portadora para verificar se o meio está livre, tempo de mudança de estado de recepção para transmissão, tempo de propagação no ar e tempo de processamento de um quadro e preparação de uma resposta. Este é utilizado para evitar uma possível disputa pelo meio, uma vez que o tempo máximo de *backoff* possível antes de uma transmissão é de 31 *slots* de tempo. Se fosse utilizado um fator com 31 *slots* de tempo haveria a possibilidade de um outro nó sortear 31 *slots* para sua *backoff* e disputar o meio com nó emissor (nó A no exemplo).

Na tentativa de otimizar esta modificação, outras variações do AHDMAC básico foram propostas e testadas em simulação. Uma 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. A primeira variação, AHDMAC-2, o nó não inicia um DNAV se é o último salto antes do destino e inicia a contagem de um DNAV em todos os outros casos. O mecanismo do AHDMAC-2 pode ser entendido como uma forma de otimizar os tempos de espera do AHDMAC para que não exista *backoff* desnecessária. O AHDMAC-3, funciona de forma muito semelhante ao AHDMAC. Nesta variação, o DNAV somente tem sua contagem iniciada se a fila de quadros a transmitir do emissor contiver um ou mais quadros para envio. A motivação para o AHDMAC-3 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. A última versão, AHDMAC-4 combina as duas possibilidades de otimização. Nesta versão, primeiro verifica-se se existem quadros na fila de transmissão, e caso existam, um DNAV é iniciado conforme regra do AHDMAC-2 verificando o número de saltos que faltam para o destino. A versão original, o AHDMAC, também pode ser chamado de AHDMAC-1.

O AHDMAC possui alguns parâmetros de ajuste que estão resumidos na tabela 3.2, que serão explorados na seção 3.4. O primeiro destes diz respeito ao tempo de total de espera a ser realizado no feixe onde ocorreu a transmissão, o chamado $Ndnav$. Este parâmetro é um multiplicador do tempo total de transmissão expresso na equação 3.1. Intuitivamente, considera-se que o tempo $Ndnav$ de espera ideal é o unitário, pois é o tempo mínimo de transmissão necessário. Com valores maiores que um, é esperado que aconteça uma espera desnecessária e, conseqüentemente, uma queda de vazão.

Outro ajuste possível é alterar o valor expresso pelo fator $Nslots.slot$ na equação 3.1, que foi batizado de $Nslots$. Este fator corresponde ao tempo de *backoff* descrito pela norma IEEE 802.11 [1]. Lembrando que antes de transmitir um quadro o nó sorteia um valor entre 0 e 31 para ter acesso ao meio físico de transmissão.

Por fim, existe a possibilidade de verificar a quantidade de quadros na fila para definir o DNAV de *backoff*. Este parâmetro, $Nqueue$, somente tem aplicabilidade nas variações do AHDMAC que forem realizar a checagem de fila, a saber, AHDMAC-3 e AHDMAC-4.

Tabela 3.2: Parâmetros do AHDMAC.

Parâmetro	Função	Versões
Ndnav	Multiplicador total	Todas
Nqueue	Qtde de quadros na fila	AHDMAC-3 e AHDMAC-4
Nslots	Multiplicador de slots	Todas

3.4 Simulações para Ajuste de Parâmetros Básicos

Nesta seção são explorados os parâmetros de ajuste do AHDMAC conforme expresso na tabela 3.2. O primeiro parâmetro a ser abordado é o $Ndnav$, que como exposto anteriormente, é um multiplicador do tempo total de transmissão do quadro anteriormente transmitido. Nas simulações seguintes, pode-se notar que este parâmetro afeta fortemente o resultado do AHDMAC. Na condição desta simulação, o modo OMNI apresenta um melhor resultado para todos os valores simulados. Todas as versões do AHDMAC apresentam um resultado muito semelhante, com exceção do AHDMAC-1 que possui um desempenho ligeiramente inferior, notadamente para $Ndnav > 1$. Simulando uma comunicação com três nós em linha e taxa de transmissão de 2,5 Mbps, é obtido o resultado expresso na figura 3.5. Deve ser notado que o valor de $Ndnav$ não afeta os modos OMNI e DMAC, portanto, os valores simulados para ambos serão constantes. Para um $Ndnav = 0$ tem-se o mesmo resultado de DMAC, o que era esperado, visto que nesta condição o comportamento do AHDMAC é exatamente igual ao do DMAC. Com $Ndnav = 0$ o AHDMAC não realiza *backoff*, portanto apresenta exatamente o comportamento do DMAC. O melhor resultado possível é obtido com $Ndnav = 1$, comprovando o esperado e exposto neste capítulo. Nas outras situações, o *backoff* é maior do que o necessário levando a um desperdício do meio com períodos grandes de *backoff* desnecessários incorrendo em baixo desempenho. Contudo, o benefício de *backoff* do AHDMAC é grande, e mesmo com um maior *backoff* para $Ndnav = 2$, o resultado da desempenho do AHDMAC ainda é melhor do que o resultado do DMAC. Com $Ndnav$ maior que 2 o *backoff* é grande o suficiente para fazer com que o resultado do AHDMAC seja inferior ao do DMAC.

Repetindo a simulação para uma comunicação com cinco nós em linha é obtido o

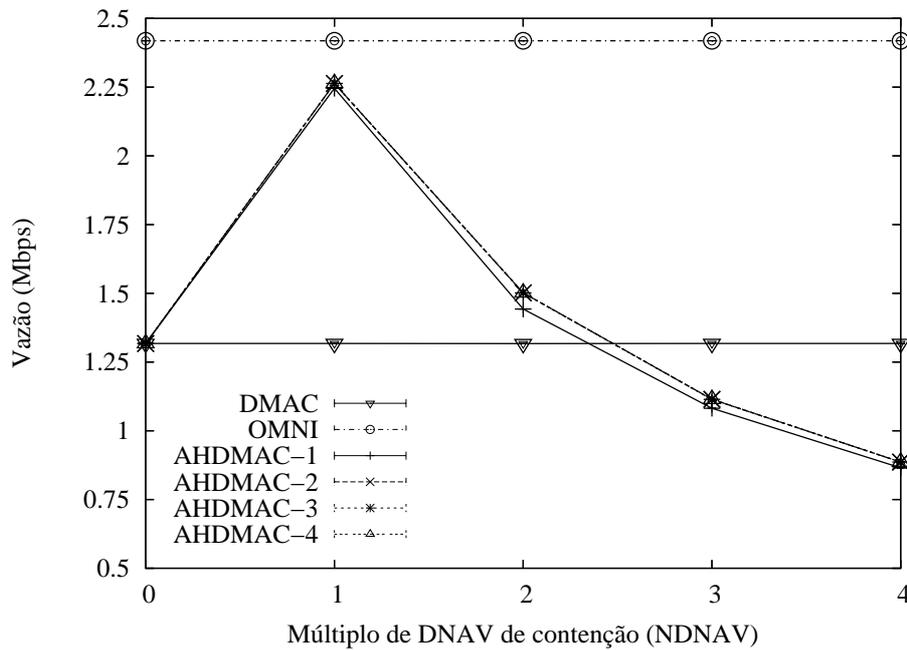


Figura 3.5: Influência do $Ndnav$ na comunicação com três nós em linha.

resultado expresso na figura 3.6. Diferentemente da simulação anterior, neste cenário existe a reutilização do espaço, pois é possível mais de uma comunicação ao mesmo tempo. Devido ao ganho proporcionado pelo AHDMAC com a reutilização do espaço, este supera tanto o modo DMAC quanto o modo OMNI para $Ndnav = 1$ e também para $Ndnav = 2$. Novamente, o desempenho máxima é obtida com $Ndnav=1$ e para valores maiores de $Ndnav$ observa-se queda de desempenho. Portanto, $Ndnav$ deve ser usado com valor unitário para se obter o valor máximo de vazão. Em todas as simulações seguintes será utilizado um valor unitário para o parâmetro $Ndnav$. Os modos AHDMAC-3 e AHDMAC-4 apresentam um desempenho ligeiramente superior para $Ndnav > 1$. Todas as variações do AHDMAC se comportam de forma muito similar com relação a variação de $Ndnav$.

Conforme a seção 3.3, uma proposta intuitiva para o melhoramento do funcionamento do AHDMAC é testar a fila de transmissão antes de setar um $DNAV$ no feixe que está sendo utilizado. Pode-se testar a existência de uma quantidade de N quadros na fila de transmissão, e somente iniciar a contagem do $DNAV$ se esta condição for satisfeita. As versões do AHDMAC que fazem a checagem de fila são o AHDMAC-3 e o AHDMAC-

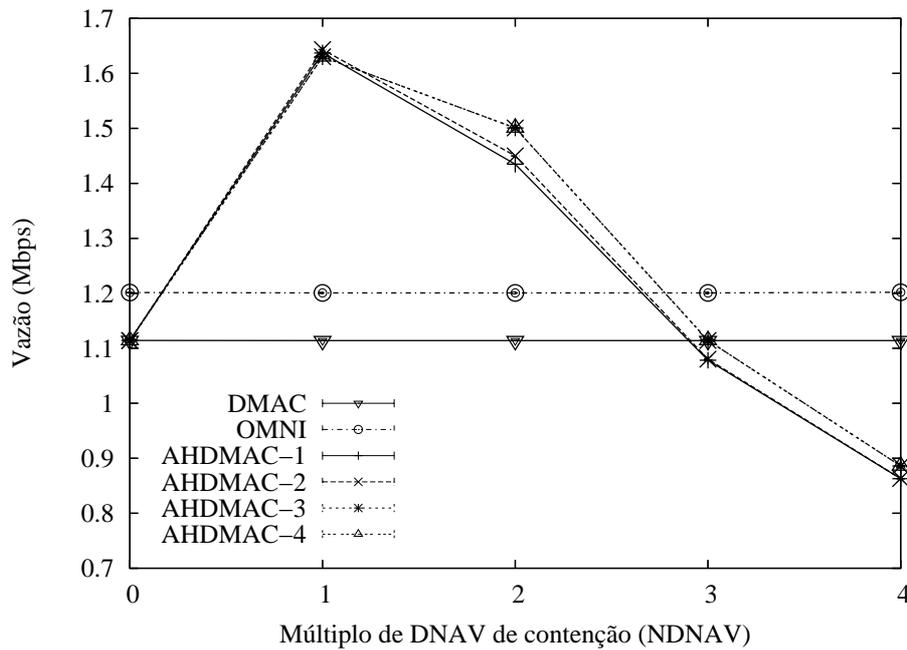


Figura 3.6: Influência do $Ndnav$ na comunicação com cinco nós em linha.

4. A figura 3.7 apresenta o resultado da simulação do cenário com três nós em linha. Como esperado, as versões AHDMAC-1 e AHDMAC-2 apresentam resultado constante, sendo que o desempenho do AHDMAC-2 é superior ao AHDMAC-1 em cerca de 0,8%. As versões AHDMAC-3 e AHDMAC-4 apresentam praticamente o mesmo resultado, em ambos os casos a vazão é decrescente com o valor de $Nqueue$ e o máximo é obtido com $Nqueue = 1$. O valor máximo obtido nestas versões é igual ao obtido com o AHDMAC-2.

Na simulação de um cenário com cinco nós em linha com variação do fator N da verificação de quadros em fila mostrada na figura 3.6, observa-se que o desempenho do AHDMAC-2 é superior ao das outras versões, cerca de 0,8% com relação ao melhor resultado do AHDMAC-3 e AHDMAC-4 e cerca de 0,4% com relação ao AHDMAC-1. Pode-se entender que este resultado é obtido devido ao aumento da complexidade do cenário, a maior complexidade implica em maior aleatoriedade, o que faz com que o uso permanente do *backoff* do AHDMAC seja um benefício constante. Com o AHDMAC-3 e AHDMAC-4, existe uma condição para o DNAV ser iniciado, esta condição pode não ser satisfeita no seu momento decisório e num momento seguinte o *backoff* do DNAV

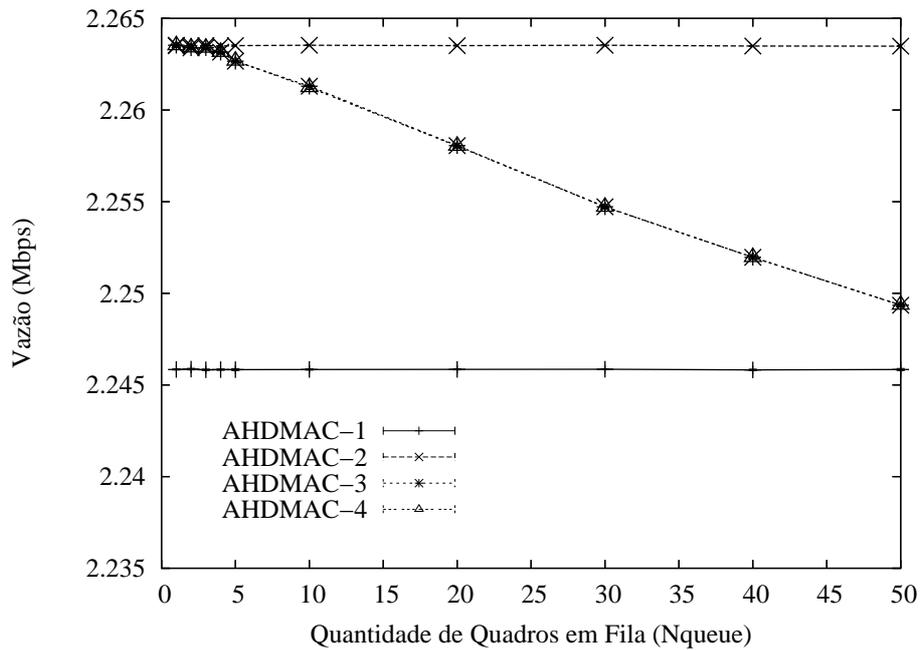


Figura 3.7: Influência do $Nqueue$ na comunicação com três nós em linha.

poderia acarretar em benefício. Contudo, as diferenças encontradas entre os modos com relação ao parâmetro $Nqueue$ são muito pequenas, desta forma não se tornando este um fator decisivo para o desempenho total do AHDMAC.

Resta agora a análise do efeito da variação da quantidade de $slots$ de tempo a ser acrescentada no $backoff$. Na simulação com três nós em linha, figura 3.9, pode ser observado que este fator possui uma grande influência nos resultados. Na simulação, o máximo ocorreu entre $Nslots = 16$ e $Nslots = 18$, estando os valores obtidos dentro da faixa de erro. Para valores muito grandes de $Nslots$, o decaimento na vazão pode ser muito significativo. Por exemplo, para o AHDMAC-1, o máximo é obtido para a faixa referida com a vazão de 2,3 Mbps, e para $Nslots = 60$ a vazão cai cerca de 12% para 2,0 Mbps. Todas as variações do AHDMAC apresentaram um desempenho semelhante, contudo, o AHDMAC-1 apresentou o pior resultado para a faixa de valores simulados.

Para o cenário com os cinco nós em linha, observa-se uma mudança conforme observado na figura 3.10. Além de ser notado um comportamento oscilatório não apresentado anteriormente, nota-se que o $backoff$ em termos do fator $slots$ de tempo obteve o máximo de vazão para um valor maior quando comparado com o cenário de 3 nós. Nesta simula-

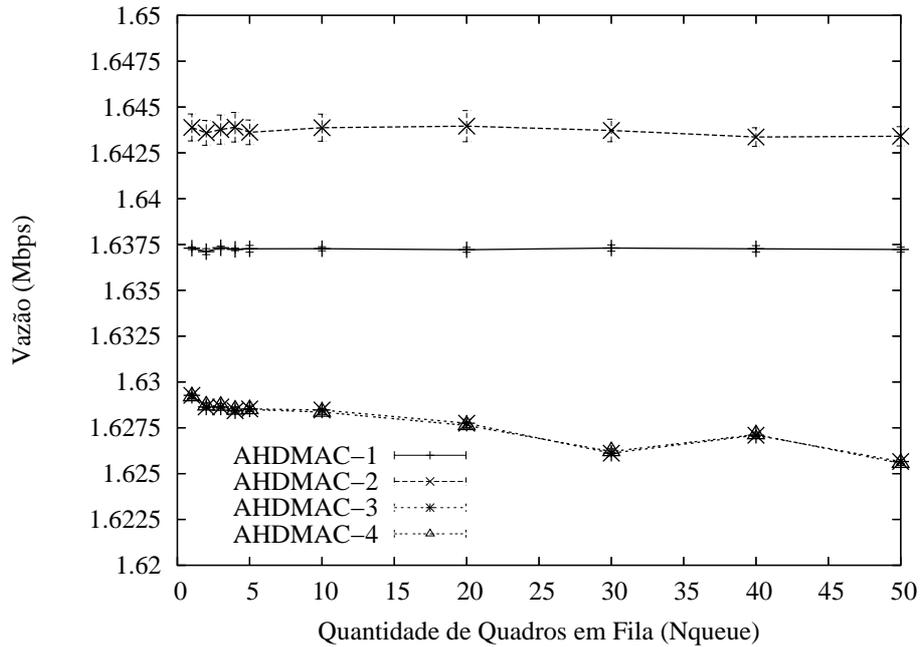


Figura 3.8: Influência do $Nqueue$ na comunicação com cinco nós em linha.

ção, o máximo foi obtido em 54 unidades de tempo, enquanto que o valor anterior havia sido entre 16 e 18 unidades. Este fato sugere que este fator pode influenciar a vazão de forma variável com relação ao tamanho da rota para o destino. A diferença entre o maior e o menor valor obtido na simulação chegou a quase 22%, entretanto, a diferença percentual entre o valor obtido com o valor referência ($Nslot = 32$) e o valor máximo ($Nslot = 54$) foi de pouco mais de 5%. Neste cenário também se pode observar um diferencial positivo para a checagem de fila feita nos modos AHDMAC-3 e AHDMAC-4. Para valores grandes de $Nslots$, estes modos apresentaram um desempenho superior aos demais, sendo que o modo AHDMAC-1 apresentou o pior resultado para os maiores valores de $Nslots$.

Com estes resultados com relação aos parâmetros de ajuste, podem ser determinados os valores a serem escolhidos para as simulações mais complexas. O parâmetro $Ndnav$ deve possuir o valor 1. Isto pode ser concluído visto que o comportamento para este parâmetro se portou da forma esperada e que os resultados das simulações indicam que a vazão máxima é alcançada com $Ndnav = 1$. Para $Nqueue$, o máximo para este parâmetro nas simulações com 3 e 5 nós também foi alcançado para $Nqueue = 1$ tanto para AHDMAC-3 quanto para AHDMAC-4 (os modos que fazem verificação de fila). O fato

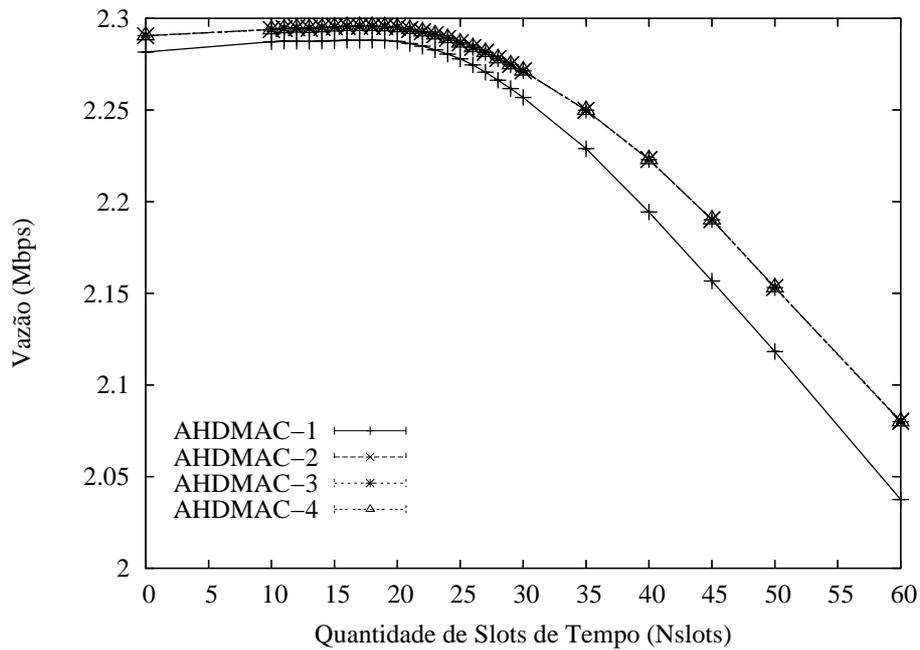


Figura 3.9: Influência do $Nslots$ na comunicação com três nós em linha.

inesperado desta análise de parâmetros foi $Nslots$, que apresentou um máximo variável com a quantidade de nós participantes da comunicação. Soma-se a isto o comportamento inesperado de oscilação apresentado no cenário de 5 nós em fila. Entretanto, optou-se neste trabalho em fixar o valor em $Nslots = 32$, que era o valor previsto para uso antes destas simulações e que apresenta um valor médio satisfatório para os cenários simulados. Em todas as demais simulações deste trabalho os parâmetros são fixados com os seguintes valores: $Ndnav = 1$, $Nqueue = 1$ e $Nslots = 32$.

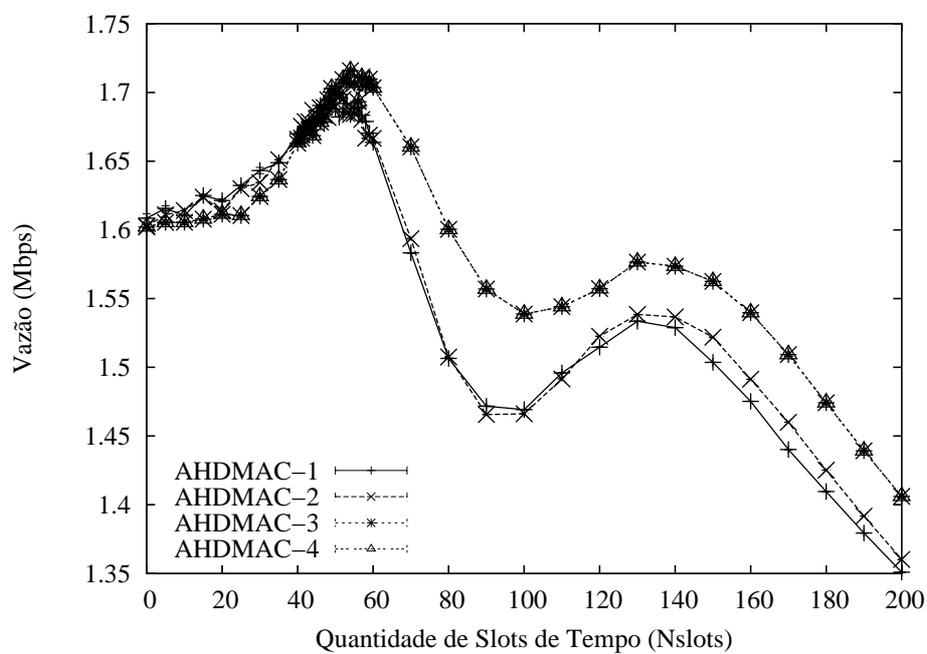


Figura 3.10: Influência do $Nslots$ na comunicação com cinco nós em linha.

3.5 Efeitos do AHDMAC

Posto a proposta do AHDMAC e o problema que este se propõe a resolver, nesta etapa é possível verificar o efeito do mesmo no cenário com três nós mostrado na figura 3.1 deste capítulo. Simulações detalhadas deste protocolo serão mostradas no capítulo 4. O resultado do AHDMAC-1 (2,2 Mbps) da vazão obtida ainda é ligeiramente inferior quando comparado com o modo OMNI (2,4 Mbps) conforme ilustrado na figura 3.11. As demais versões do AHDMAC tiveram resultado de 2,3 Mbps de vazão. Contudo, o resultado é superior ao obtido pelo modo DMAC, que teve um máximo de 2,0 Mbps para taxas de emissão de 2 Mbps e com queda para 1,3 Mbps para taxas de emissão maiores. Todas as variações do AHDMAC apresentam resultados muito semelhantes para este cenário.

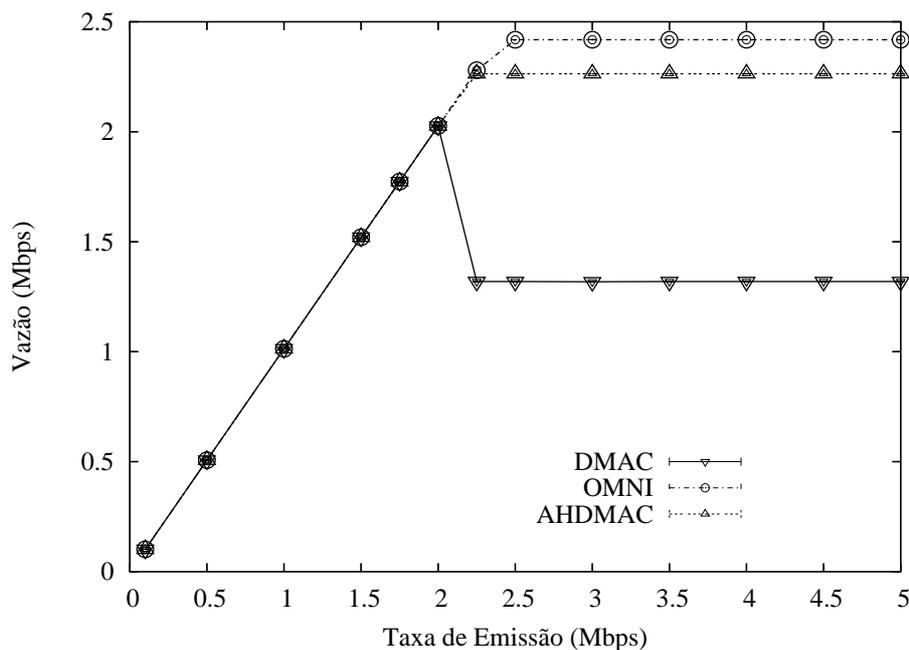


Figura 3.11: Vazão na comunicação com três nós em linha.

Na figura 3.12 fica evidenciado que o AHDMAC-1 diminui o índice de surdez sempre que houver condição suficiente para a surdez intrínseca existir. A condição para tal é a saturação que acontece para taxas de emissão superiores a 2 Mbps, pode se observar que para taxas maiores que 2 Mbps inicia-se o efeito de surdez manifestado através do aumento do índice de surdez. Para o modo DMAC a razão para o nó A passa de unitária

para cerca de 3,5 para taxas de emissão maiores que 2 Mbps. O modo OMNI obtém valores de razão muito próximos de 1, sendo que o modo AHDMAC teve resultado ainda mais próximo da unidade. Desta forma, o AHDMAC está servindo ao seu propósito de contornar os efeitos da surdez, e em particular da surdez intrínseca.

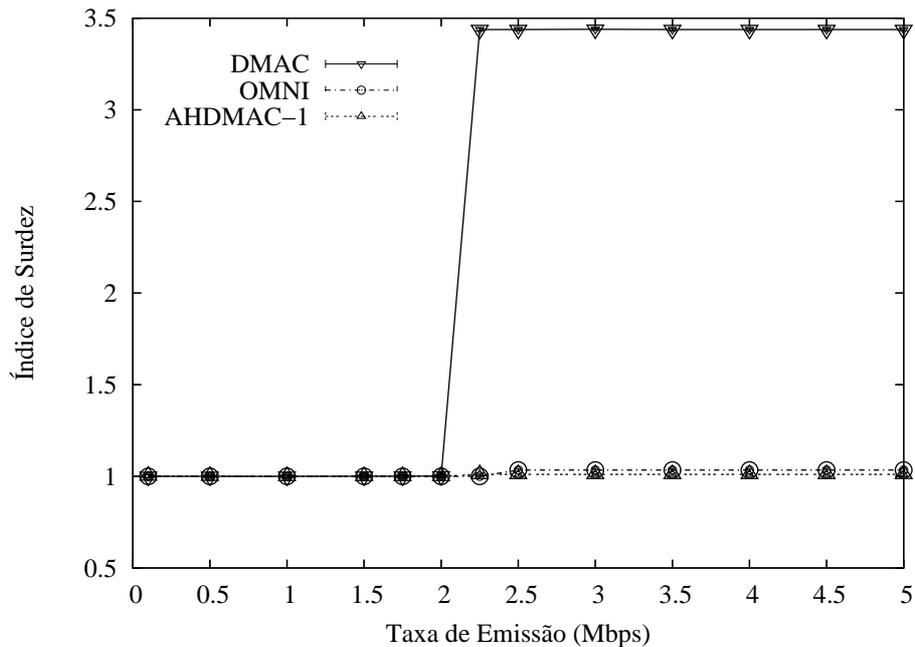


Figura 3.12: Índice de surdez do Nó A na comunicação com três nós em linha.

A figura 3.13 mostra que qualquer um dos modos do AHDMAC resulta uma razão entre os quadros RTS enviados e ACK recebidos mais próxima de um do que o modo OMNI para a condição de saturação, ou seja, o protocolo AHDMAC em qualquer uma de suas versões resulta em um índice de surdez menor do que o modo OMNI na simulação deste cenário.

Como resultado da simulação do AHDMAC-1, tanto para o nó A quanto para o nó B, a razão RTS/ACK fica ligeiramente mais próxima de 1 do que no caso omnidirecional conforme mostrado na figura 3.14. Contudo, a formação da rota AODV não aconteceu na primeira tentativa. Como houve dois pedidos para a formação da rota, a razão foi 2 para o nó C. Isto foi um efeito adverso do AHDMAC, visto que a resposta RREPLY do AODV deve ser transmitida pelo mesmo feixe onde foi recebido o RREQ do AODV. Como havia sido iniciado um DNAV neste feixe, o *backoff* ocasionou em uma nova tentativa de trans-

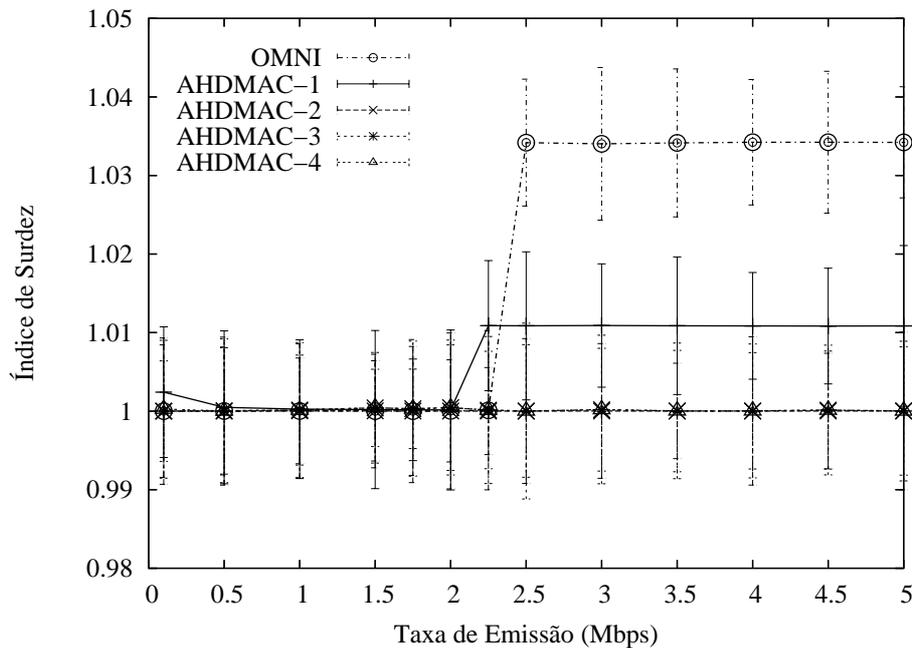


Figura 3.13: Índice de surdez do Nó A na comunicação com três nós em linha.

missão. Cabe notar que qualquer variação do AHDMAC que não seja a AHDMAC-1, não sofre deste efeito na formação da rota. O efeito observado na formação da rota AODV somente ocorre com a versão AHDMAC-1 como mostrado na figura 3.15. Desta forma o uso de qualquer uma das versões do AHDMAC diferente do AHDMAC-1 resulta na solução deste efeito adverso.

Para finalizar a análise deste cenário com três nós, a figura 3.16 mostra o efeito do aumento de alcance para as diferentes versões do AHDMAC e para o modo DMAC. Na simulação foi utilizado o cenário com transmissão em oito feixes, o que acarreta em um alcance de 420 metros conforme tabela 2.3. Como a distância utilizada entre os nós é de 200 metros, com o aumento de alcance a comunicação passa a acontecer diretamente entre os nós A e C. Para todos os modos, com exceção de AHDMAC-1 e AHDMAC-3, a vazão obtida é praticamente a mesma da taxa de emissão. Desta forma, os modos AHDMAC-1 e AHDMAC-3, por não verificarem a quantidade de saltos para o destino, realizam um *backoff* desnecessária que resulta em queda de desempenho como mostrado na figura 3.16.

Foram observadas poucas diferenças entre as diferentes versões do AHDMAC, con-

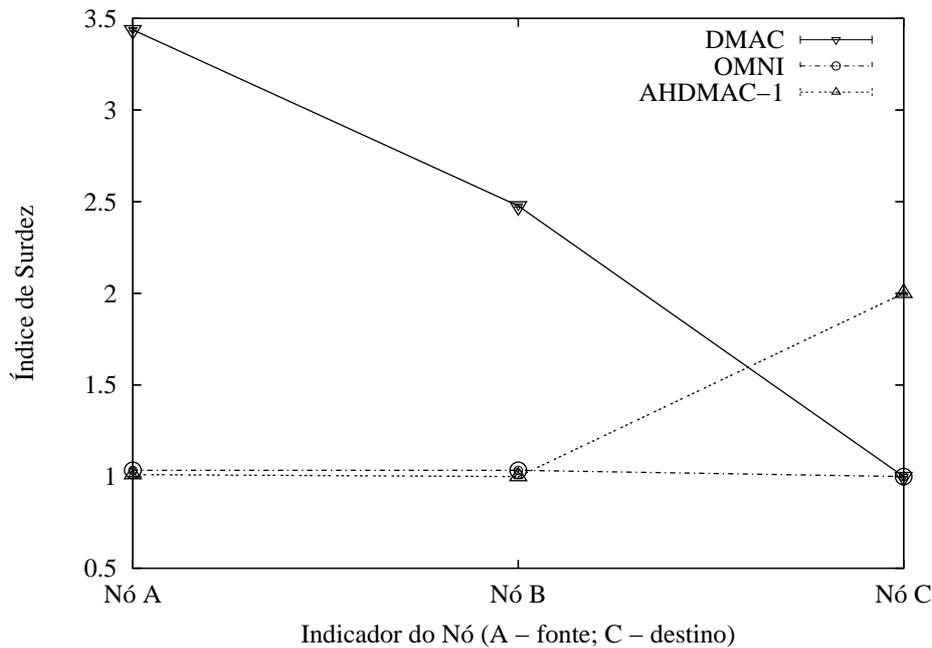


Figura 3.14: Índice de surdez na comunicação com três nós em linha.

tudo, existem motivos suficientes, como a comunicação direta entre fonte e destino, para que os modos AHDMAC-1 e AHDMAC-3 sejam preteridos. As variações AHDMAC-2 e AHDMAC-4 não apresentaram diferenças significativas nas simulações analisadas. Contudo, o AHDMAC-2 não possui a verificação de fila feita pelo AHDMAC-4, que potencialmente pode representar um benefício em cenários não simulados. Nas simulações de maior complexidade que serão detalhadas no capítulo 4 será utilizada sempre a versão AHDMAC-4. Esta versão possui ambas as possibilidades de melhoria propostas e não apresenta nenhum dos dois efeitos adversos observados nas simulações. O AHDMAC-4 não apresenta o efeito adverso na formação da rota AODV e também não apresenta a ineficiência na comunicação com apenas dois nós que também tem seu efeito sentido em comunicações com mais de dois nós.

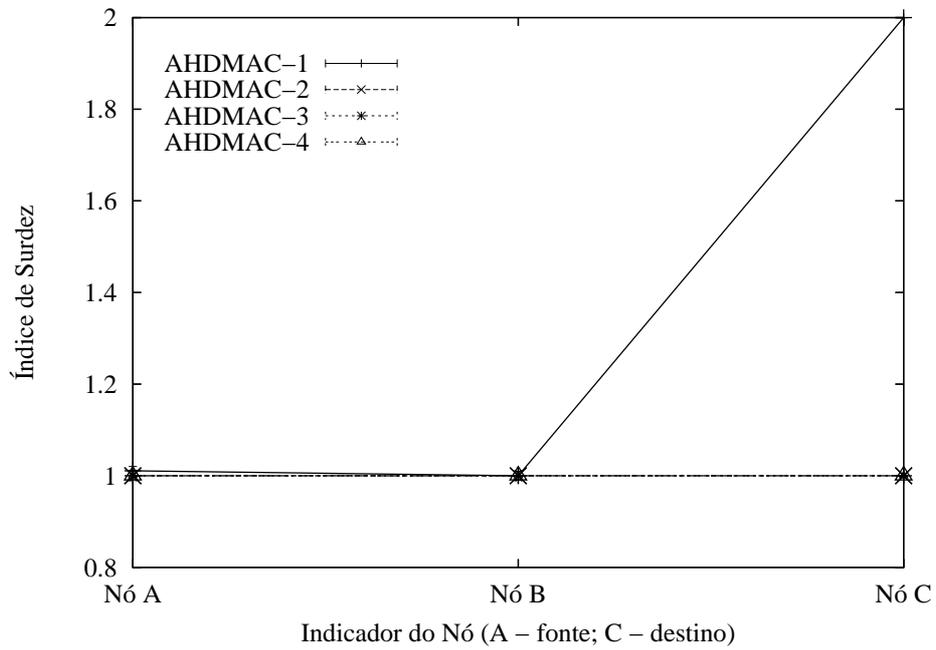


Figura 3.15: Índice de surdez na comunicação com três nós em linha.

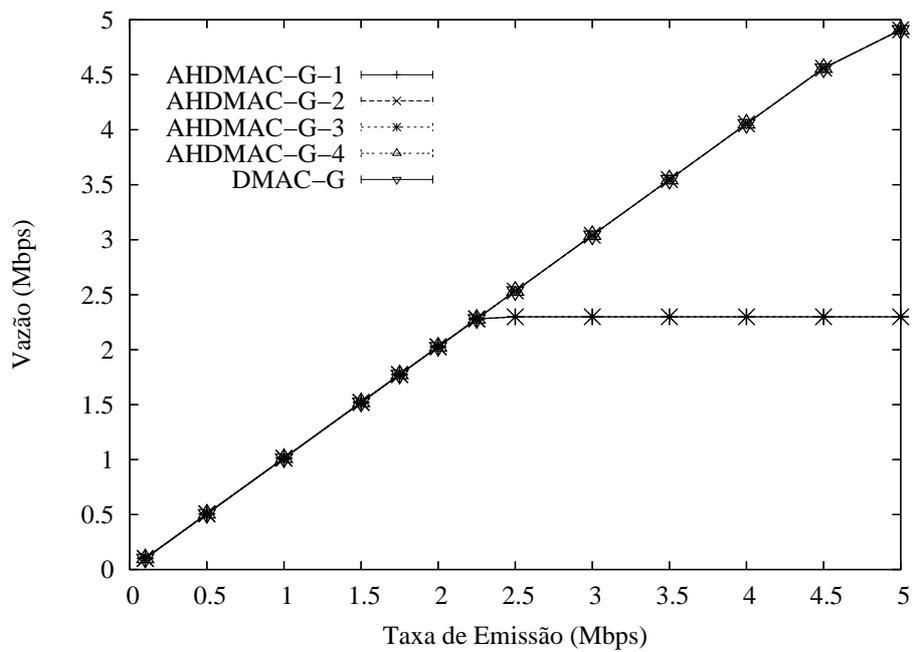


Figura 3.16: Vazão na comunicação com três nós em linha e aumento de alcance.

Capítulo 4

Simulação do Protocolo AHDMAC

NESTE capítulo são discutidas diversas simulações do protocolo AHDMAC. Inicialmente são apresentados testes de sanidade realizados com o intuito de certificar o correto funcionamento das simulações. Cenários de comunicação em linha são analisados para uma avaliação inicial dos efeitos obtidos com o uso do AHDMAC. Em seguida é apresentada uma série de simulações com variação de distância entre os nós em linha para análise dos efeitos do aumento de alcance em cenários de comunicação em linha. Cenários de topologia em grade são explorados em diversas variações em escala de níveis crescentes de aleatoriedade. Para uma avaliação do AHDMAC no uso geral, são realizadas diversas simulações em cenários completamente aleatórios.

4.1 Teste de Sanidade

Para verificação da correção obtida no aumento do alcance com o uso das antenas direcionais, foi feita uma simulação para comparação com os resultados teóricos calculados na seção 2.2.1. As simulações foram feitas com apenas dois nós, um transmitindo para o outro onde a distância entre os dois foi variada. A figura 4.1 mostra que o alcance de 250 metros é atingido sem o benefício do aumento da concentração de potência, ou seja, para os modos OMNI, DMAC e AHDMAC.

Por outro lado, com o aumento de alcance, é atingida a distância de 420 metros com

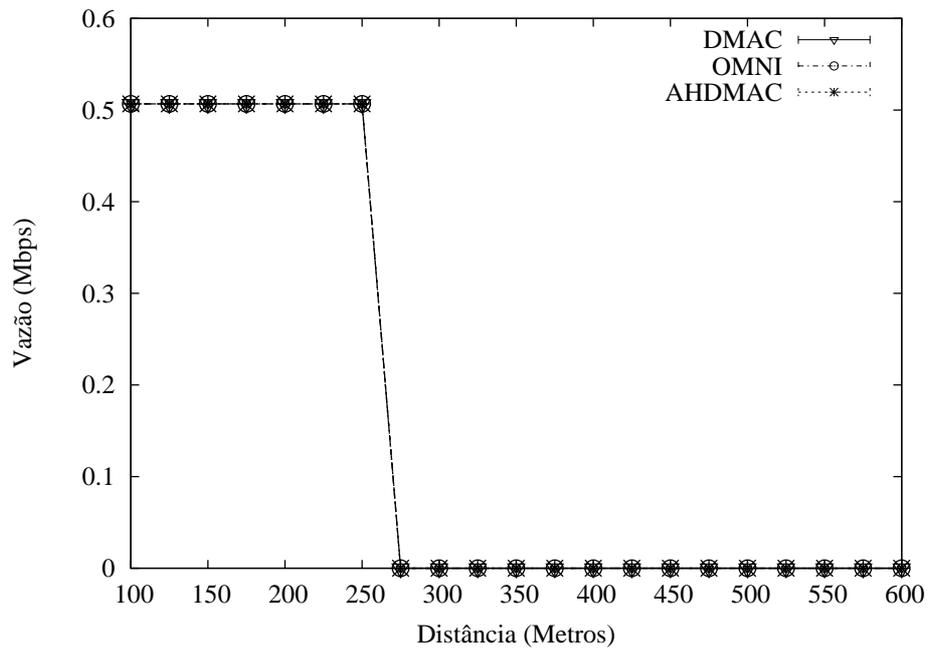


Figura 4.1: Alcance obtido sem aumento de alcance.

a utilização de 8 feixes conforme a figura 4.2. Cabe lembrar que apenas os modos com aumento de ganho DMAC-G e AHDMAC-G podem se beneficiar do aumento de alcance. A correção observada entre o modelo matemático e as simulações é confirmada na figura 4.3 que mostra que o ganho obtido com 4 feixes é de 353 metros conforme previsto nos cálculos.

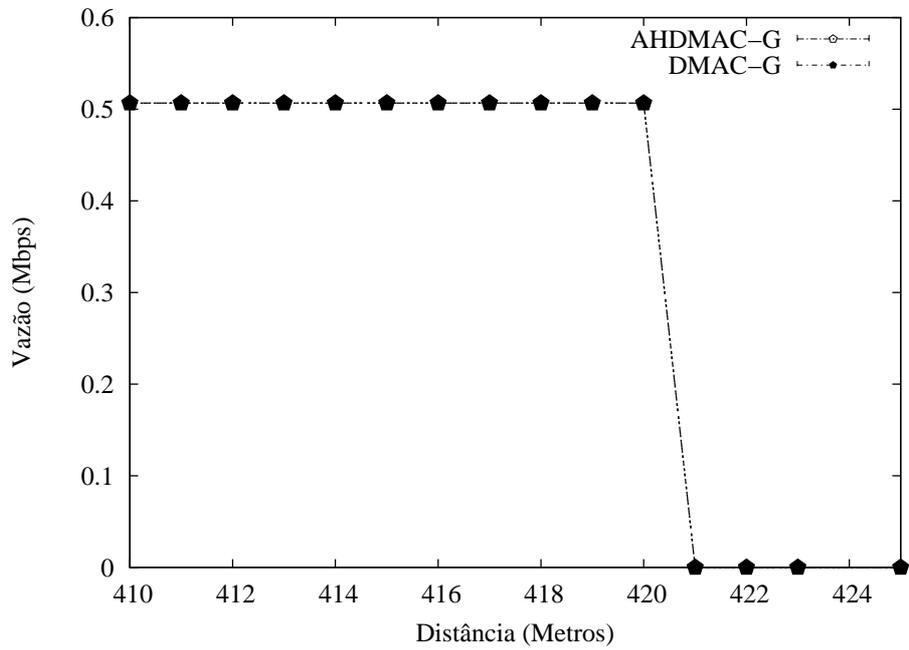


Figura 4.2: Aumento de alcance com oito feixes.

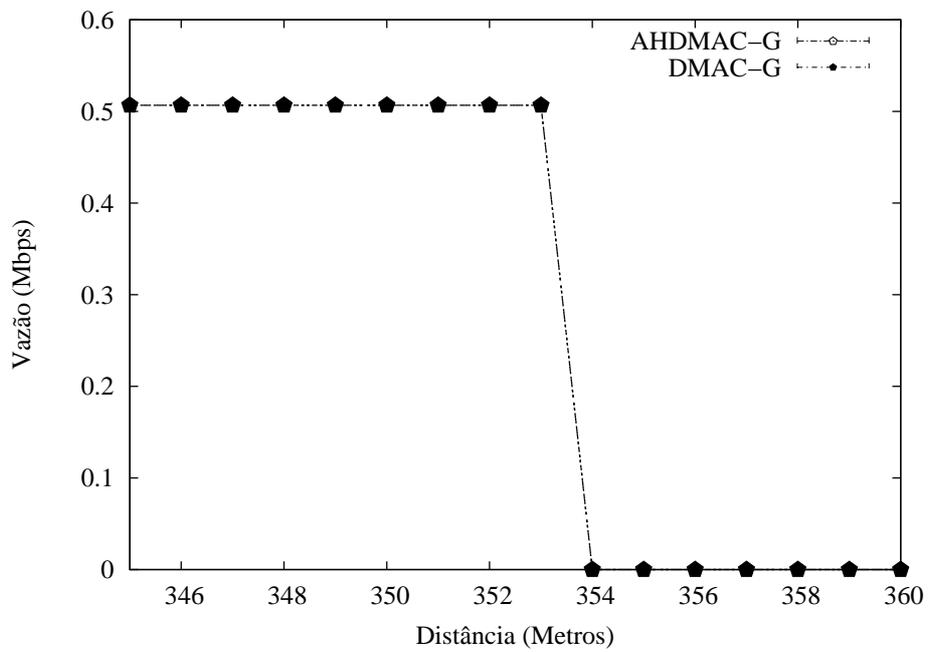


Figura 4.3: Aumento de alcance com quatro feixes.

4.2 Simulação do Protocolo AHDMAC

4.2.1 Cenários de Linha

No capítulo 3 foi detalhado o cenário de simulação com três nós em linha exemplificado na figura 3.1. Este cenário se caracteriza por uma linha com três nós onde o nó localizado mais à esquerda transmite para o nó localizado mais à direita. O resultado da simulação encontra-se na figura 3.11, onde se pode notar que embora o aumento na vazão com relação ao modo DMAC tradicional seja grande, o AHDMAC ainda perde com relação ao modo OMNI. Isto é devido ao fato de que não existe a possibilidade de reutilização do espaço, o que não possibilita os ganhos esperados com o uso de antenas direcionais. Contudo, os novos problemas impostos pela transmissão direcional, principalmente a surdez, já estão presentes, acarretando em problemas de transmissão e queda de desempenho. Desta forma, com a resultante dos efeitos não é possível para o AHDMAC obter um resultado melhor que o do modo OMNI.

Por outro lado, a modificação do cenário anterior para uma comunicação contendo cinco nós em uma mesma linha, conforme ilustrado na figura 4.4, já possibilita que o AHDMAC tenha um desempenho superior ao modo OMNI devido à reutilização do espaço conforme pode ser verificado na figura 4.5. Cabe notar que até cerca de 1,5 Mbps de taxa de emissão o AHDMAC e o DMAC apresentam os mesmos resultados. O modo AHDMAC apresenta um desempenho superior para todas as taxas examinadas, por outro lado, o modo DMAC apresenta uma grande queda na vazão para taxas maiores que 2 Mbps obtendo um desempenho inferior inclusive ao modo OMNI. Na condição de saturação, o AHDMAC consegue um resultado quase 50% maior que o DMAC e cerca de 35% maior que o modo OMNI. Por outro lado, nesta condição o OMNI é quase 10% superior ao DMAC.



Figura 4.4: Ilustração da comunicação com cinco nós.

A figura 4.6 mostra que o aumento na cadeia de nós acarretou em um aumento do

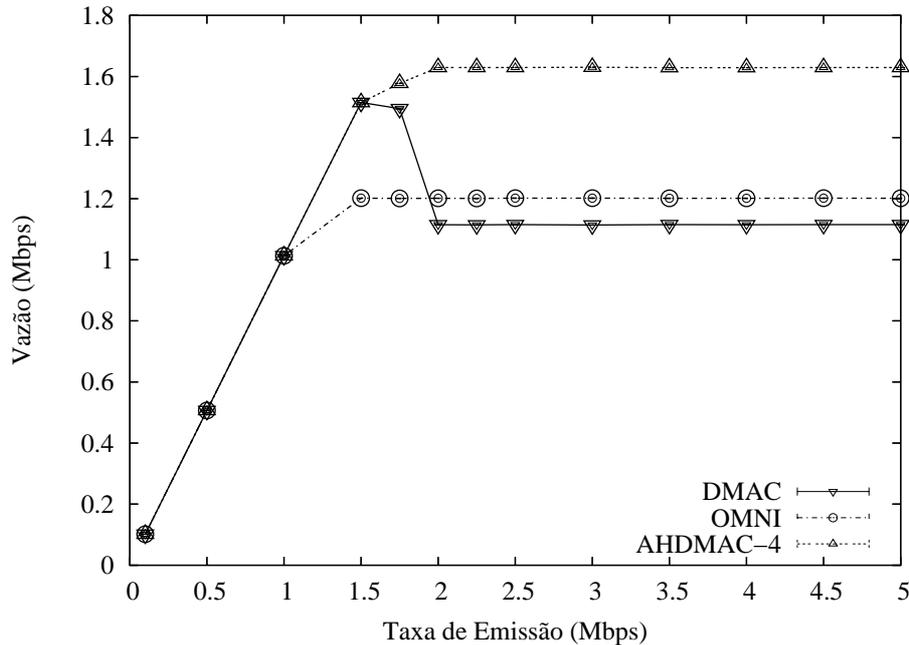


Figura 4.5: Vazão na comunicação com cinco nós em linha.

índice de surdez observado no nó A para todos os modos. O modo DMAC alcançou uma razão muito próxima de 4, o que foi o menor aumento proporcionalmente, enquanto que o modo OMNI aumentou sua razão para pouco mais que 2,5, o modo AHDMAC manteve-se com a menor média, ficando pouco abaixo de 2. O modo AHDMAC teve a menor razão para todas as taxas verificadas em simulação. Outro fato a ser notado é que estes efeitos negativos são sentidos em taxas menores neste cenário de 5 nós. A partir de taxas de 1 Mbps para o modo OMNI inicia-se a degradação que somente inicia com taxas de 1,5 Mbps para os modos DMAC e AHDMAC.

A análise do comportamento dos diferentes nós da cadeia mostrou um fato surpreendente como pode ser observado na figura 4.7. Para todos os casos, os nós C, D e E apresentaram uma razão unitária. Para o modo OMNI, apenas o nó A apresentou uma razão de valor praticamente 2,5. O modo AHDMAC apresenta um comportamento parecido com o DMAC, contudo, as razões observadas giram em torno da metade do observado para o DMAC. Em ambos os casos, a razão inicia em valores grandes no nó A (quase 4 para DMAC e quase 2 para AHDMAC) e decai no nó B (quase 2,5 para DMAC e quase 1,5 para AHDMAC) alcançando a unidade no nó C e permanecendo neste valor para os

outros nós.

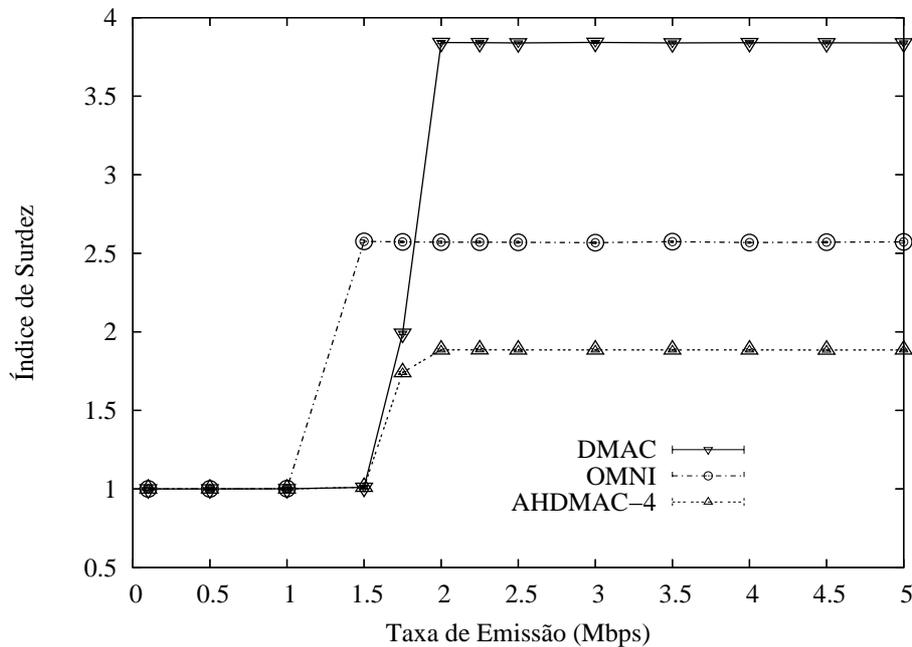


Figura 4.6: Índice de surdez na comunicação com cinco nós em linha.

O gráfico da figura 4.8 mostra o efeito do aumento de alcance na vazão para o cenário de comunicação com cinco nós ilustrado na figura 4.4. O aumento de alcance proporcionou um aumento de quase 40% de vazão para o AHDMAC. Por outro lado, o aumento de alcance teve o efeito de um aumento de desempenho de pouco mais de 17% para o DMAC, o que foi suficiente para o mesmo apresentar um desempenho melhor que OMNI. Comparando o AHDMAC-G com o modo OMNI, o aumento de desempenho é de mais de 88%. Comparando apenas o efeito da proposta deste trabalho, ou seja, comparando o AHDMAC-G com o DMAC-G, o resultado foi quase 74% superior. Este resultado é proporcionado apenas pela distribuição espacial de uma única comunicação. Para que se possa entender o resultado obtido, deve-se atentar que se soma ao efeito da reutilização do espaço, o efeito do aumento de alcance, ambos proporcionados pela direcionalidade das transmissões. Com o aumento do alcance é possível que o destino seja alcançado com um menor número de saltos, enquanto que os modos normais (OMNI, DMAC e AHDMAC) necessitam de 4 saltos para o alcançar o destino, os modos com aumento de alcance (DMAC-G e AHDMAC-G) necessitam de apenas dois saltos.

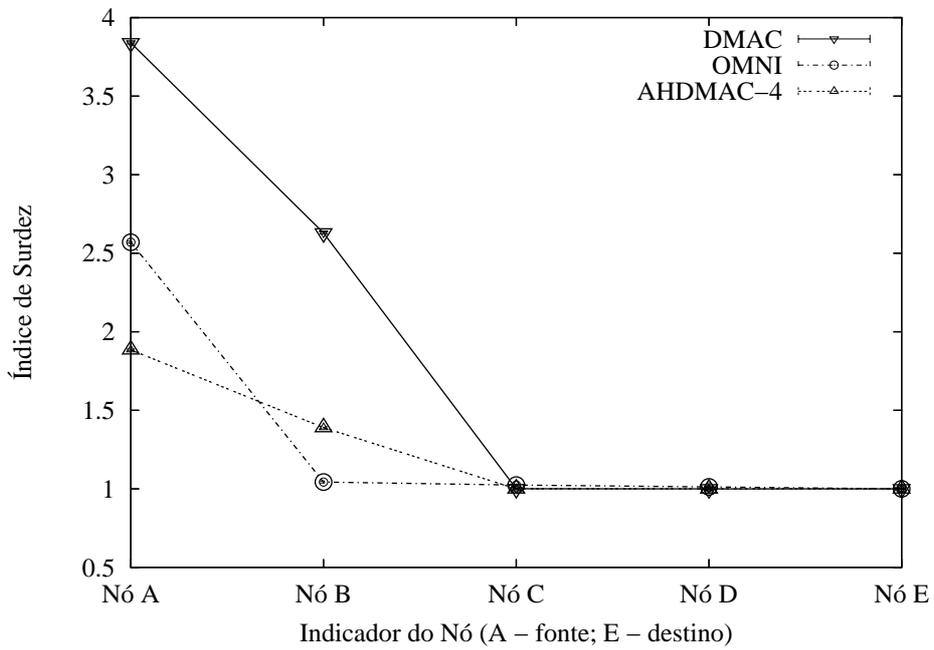


Figura 4.7: Índice de surdez na comunicação com cinco nós em linha.

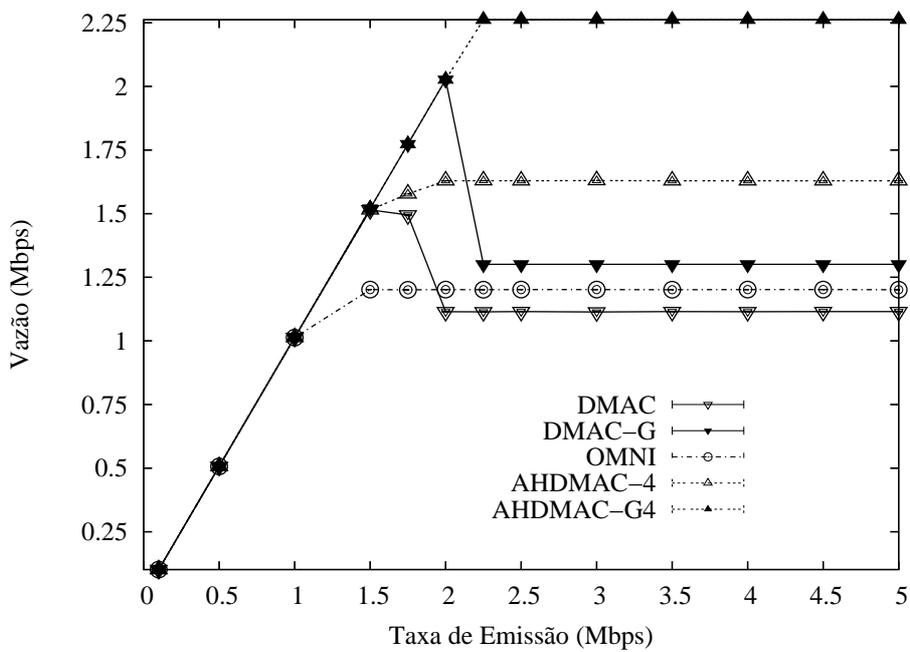


Figura 4.8: Vazão na comunicação com cinco nós em linha.

4.2.2 Análise de Aumento de Alcance

Conforme explicações anteriores feitas na seção 2.2.1, a utilização de antenas direcionais possibilita o aumento do alcance através do aumento do ganho de transmissão conforme detalhado nas equações 2.3 e 2.4. Nesta seção, os resultados de simulação obtidos para os diferentes modos são expostos e os respectivos ganhos de desempenho comparados para diferentes distâncias entre os nós nos cenários em linha. Para que os efeitos de aumento de alcance possam ser isoladamente analisados, são utilizados os cenários de 3 e 5 nós em linha com antenas direcionais com 8 feixes e taxa de 2,5 Mbps.

Primeiramente, será analisado o cenário com três nós em linha para os modos com alcance fixo: OMNI, DMAC e AHDMAC. Na figura 4.9 é mostrada a vazão obtida com a variação da distância entre os nós. A quantidade de saltos, ou tamanho da rota AODV, para a origem alcançar o destino é mostrada na figura 4.10. Para valores de deslocamento de até 125 metros, a comunicação acontece diretamente entre os nós como mostrado na figura 4.10, porque o nó C está dentro do alcance do nó A. Para distâncias entre 125 e 250 metros a comunicação precisa dos dois saltos, e para distâncias maiores que 250 metros não há comunicação porque a distância entre os nós é maior que o alcance. Para as distâncias entre 150 e 225 metros, existe um vale de desempenho para os modos direcionais.

Note que para distâncias de *deslocamento* de até a metade da distância RXT, a comunicação se dá com apenas um passo. Em outras palavras o nó intermediário não participa da comunicação, e a mesma acontece nas mesmas taxas como se fosse em uma comunicação com apenas dois nós. Neste caso a distância RXT é de 250 m, portanto, para deslocamentos maiores que 125 m a comunicação terá dois saltos.

O modo DMAC se comporta de forma muito semelhante ao AHDMAC, mas apresentando maiores variações negativas. Nas distâncias intermediárias sua vazão cai para 1,32 Mbps, ou seja, quase metade do desempenho do AHDMAC. Contudo, para 250 m, seu desempenho aumenta consideravelmente para 2,25 Mbps. Cabe aqui ressaltar que esta grande diferença obtida entre a faixa intermediária e 250 m (ou menor que 150 m) é explicada pela grande influência da surdez intrínseca inerente ao DMAC. Nesta faixa intermediária, o nó B irá transmitir um pacote recebido por A para B, contudo, além do

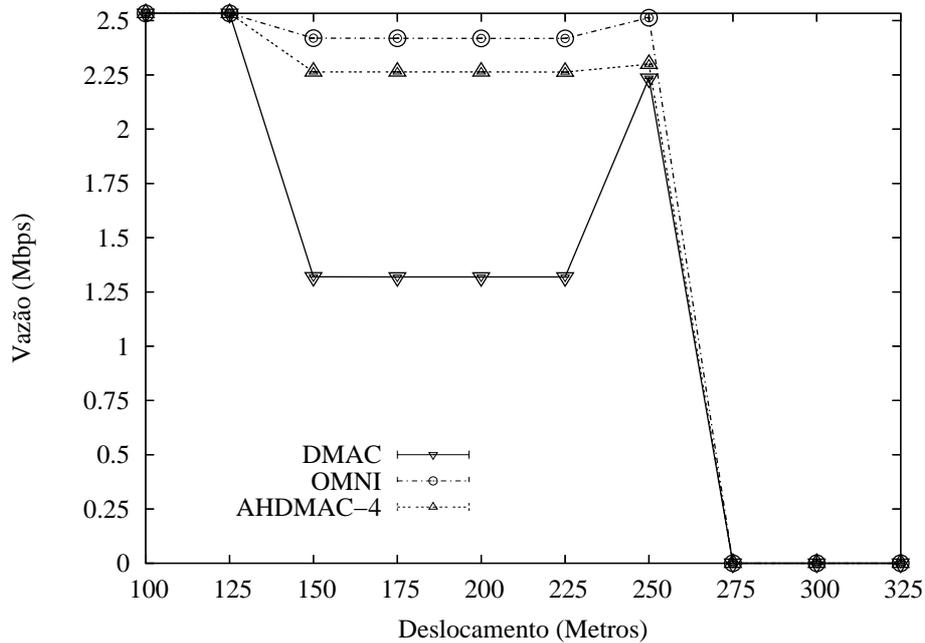


Figura 4.9: Vazão na comunicação com três nós em linha.

problema da surdez intrínseca já detalhado neste trabalho, outro fator negativo irá somar para a queda do desempenho. Quando o nó A transmitir para o nó B, o nó C irá receber a interferência de A e setar um DNAV de EIFS, conforme norma IEEE 802.11 [1], a recepção de um quadro corretamente irá retornar o nó a condição normal. Portanto, nesta situação, quando B tentar transmitir um pacote para C, este mesmo nó C estará em processo de *backoff* causado pelo recebimento de um quadro EIFS devido a estar em zona CST para uma transmissão anterior de A. Após o correto recebimento do RTS pelo nó C enviado pelo nó B, aquele irá retornar ao estado normal, sem contudo responder para a estação B. Neste trabalho, este efeito será chamado de “efeito EIFS”. A junção de ambos efeitos negativos, a surdez intrínseca que provoca grandes tempos de *backoff* no nó A e a repetição da transmissão feita pelo nó B, devido a contagem de EIFS em C, provoca uma resultante com efeitos somados muito mais fortes que ambas sozinhas. Cabe ressaltar que o efeito negativo da contagem de EIFS também ocorre com o modo OMNI, mas seus efeitos não são tão fortes.

Cabe ressaltar que um fenômeno similar foi relatado em [32] por Choudhury e Vaidya, que foi batizado de “captura”. Neste artigo diz-se que um nó foi capturado quando este

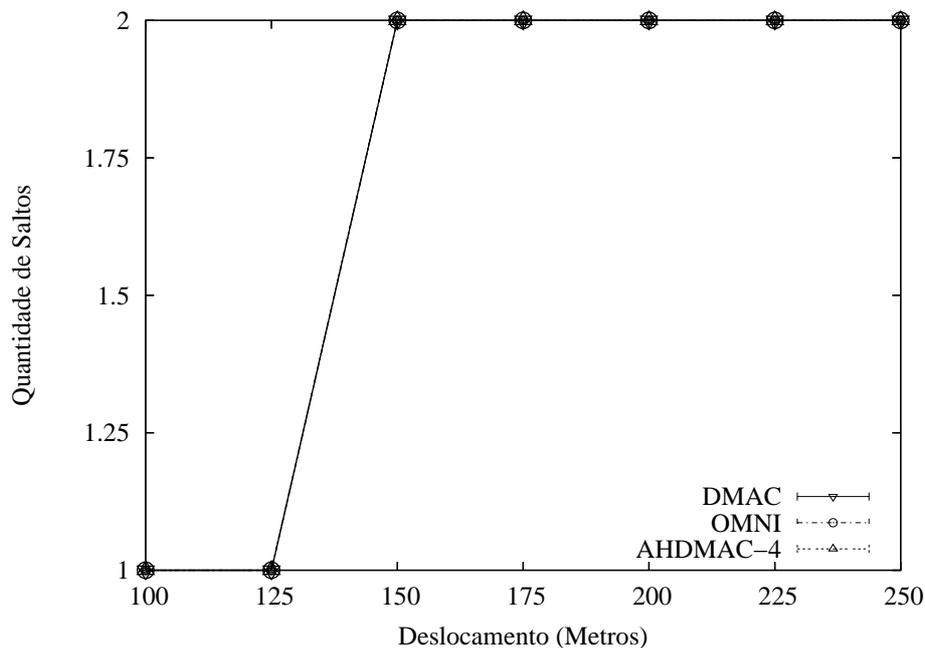


Figura 4.10: Quantidade de saltos na comunicação com três nós em linha.

está engajado em uma recepção de um quadro destinado para outro nó. Desta forma, existe uma queda de desempenho global porque os nós recebem completamente quadros que não são destinados para si. Na situação de captura, o nó prejudicado se encontra na zona de recepção RXT do emissor, diferentemente do efeito EIFS, onde o nó receptor se encontra na zona de interferência CST do emissor. Além disto, ao término da captura o nó pode iniciar o procedimento de acesso ao meio, enquanto que no efeito EIFS, ao término da transmissão ocasionadora da interferência, o nó deve realizar uma contenção por um período EIFS.

Contudo, diferentemente do modo DMAC, o AHDMAC apresenta uma maior resistência aos problemas apresentados. A vazão para o AHDMAC no vale entre 150 e 225 metros permanece praticamente constante em 2,26 Mbps. Como o AHDMAC trata inteiramente o problema da surdez neste caso, a queda apresentada no vale para o AHDMAC é devido ao problema da contagem de EIFS. Desta forma, a comunicação acontece em cadência sem desperdício de repetição de quadros de controle desnecessários ou mesmo de inúmeras tentativas de transmissão frustradas que acarretam em demasiada contenção e estouro dos contadores de re-transmissão.

Com a distância de 250 metros tem-se um cenário interessante. Neste caso, RXT (250 metros) é a metade de CST (500 metros), portanto, o nó A consegue se comunicar com o nó B sem interferir no nó C. Em outras palavras, cada nó se comunica com o outro sem que sua interferência seja notada pelos outros. Isto pode ser percebido pelo aumento de vazão nesta situação.

A figura 4.11 mostra a vazão obtida com os modos DDMAC-G e AHDMAC-G. Um ponto interessante é a ausência do pico na vazão provocado pelo efeito EIFS, sendo a vazão nivelada pelo valor mais baixo. Isto ocorre porque RXT (420 metros) é ligeiramente inferior à metade de CST (841 metros), portanto, para 8 feixes, sempre haverá a influência deste efeito negativo. Neste caso, ao se afastar o nó C para o fim da zona de interferência, não existe hipótese de afastar B da mesma distância sem que este saia da zona de recepção de A.

Com o benefício do aumento de alcance para os modos DDMAC-G e AHDMAC-G, até 200 metros a comunicação é de apenas um salto, e até 400 metros ela permanece com dois saltos e para distâncias maiores o alcance não é suficiente para que um nó consiga alcançar o outro. A figura 4.12 mostra o benefício que o aumento de alcance proporciona aumentando a faixa de distância onde a comunicação pode ocorrer com apenas um salto. Cabe ressaltar que o aumento de alcance não acarreta em aumento de vazão neste cenário, mas aumenta a distância máxima onde a comunicação acontece com apenas um salto e também a distância máxima que permite comunicação.

De forma a isolar o fator negativo do efeito EIFS, foi realizada uma simulação similar à anterior, porém com a zona de interferência igual a zona de recepção. Desta forma, o único efeito negativo que será apresentado nos resultados da simulação será o efeito da surdez intrínseca. A figura 4.13 mostra o resultado da simulação para o mesmo cenário, onde $CST = RXT$.

Os resultados obtidos pelos modos AHDMAC e DDMAC foram muito parecidos, enquanto que o modo OMNI obteve um resultado praticamente constante e igual à taxa de emissão. Isto demonstra que a parcela do efeito EIFS responde por grande parte da queda na vazão do cenário em questão. Por outro lado, o mecanismo proposto resolve o problema encontrado tanto para a surdez intrínseca quanto para o efeito EIFS. Uma

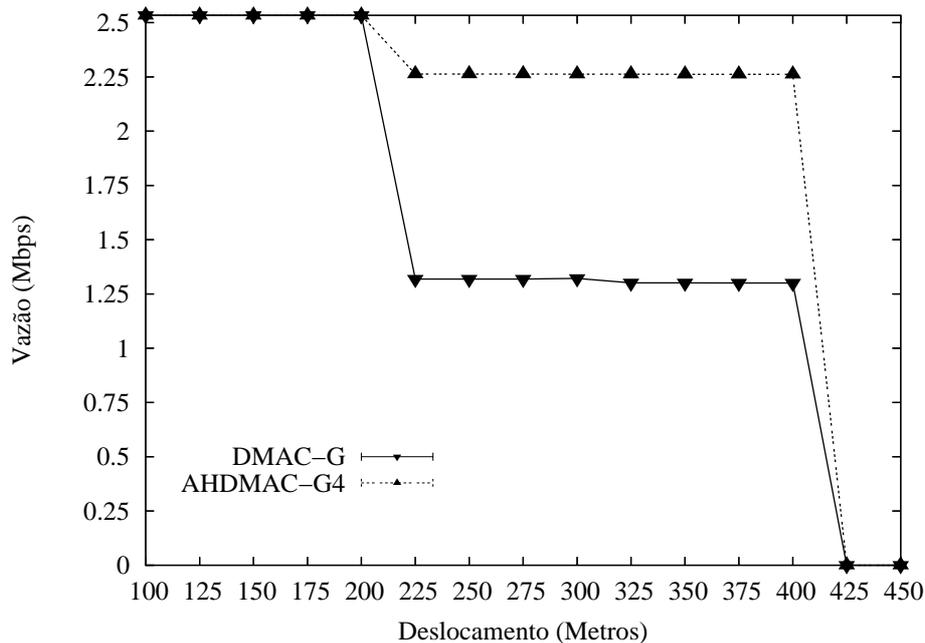


Figura 4.11: Vazão na comunicação com três nós em linha.

outra forma de colocar esta questão é imaginar que o mecanismo do AHDMAC fornece uma maior resistência ao efeito EIFS. A quantidade de saltos necessários para que o nó A alcance o destino, o nó C, apresenta o mesmo comportamento mostrado na figura 4.10. De forma semelhante, o aumento de alcance neste cenário apresenta resultados muito semelhantes para o DMAC-G e AHDMAC-G conforme mostrado na figura 4.14. Como esperado, o efeito do aumento do alcance faz com que os mesmos resultados de vazão sejam alcançados para distâncias maiores.

Para finalizar a questão da análise básica do aumento de ganho, agora será exposto o cenário de cinco nós em comunicação em linha. A figura 4.15 mostra a vazão obtida para este cenário. Para todos os modos um padrão oscilatório com seqüências de máximos e mínimos é apresentado como consequência da combinação de entrada e saída de regiões de RXT e CST combinado com a variação da quantidade de saltos para o destino.

Analisando a figura 4.16, nota-se que a quantidade de saltos para os modos sem aumento de alcance é de 2 saltos para distâncias de até 125 metros e de 4 para até 250 metros quando existe quebra de alcançabilidade e a comunicação não é possível. A figura 4.15 mostra um vale na vazão encontrado entre as distâncias de 175 e 225 metros que é devido

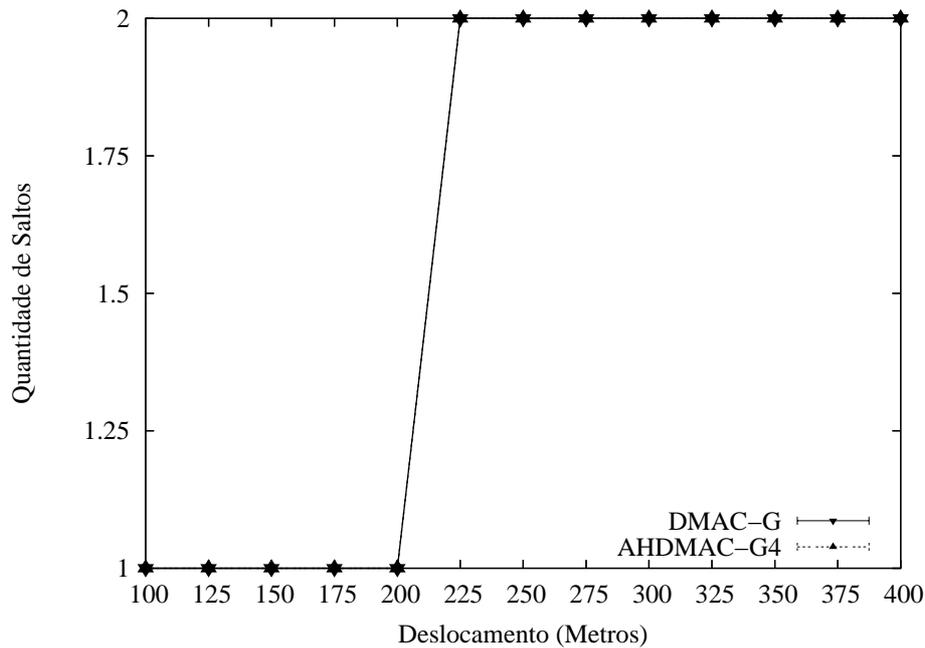


Figura 4.12: Número de saltos na comunicação com três nós em linha.

ao mesmo problema encontrado no cenário de 3 nós, a existência dos problemas de surdez intrínseca e do efeito EIFS. Da mesma forma, o pico encontrado em 250 metros é devido à eliminação destes problemas. O fato novo é o pico negativo encontrado em 150 metros. Este pode ser explicado porque nesta distância, já ocorreu o aumento da quantidade de saltos e 150 metros é menor que um terço da distância CST. Isto quer dizer que quando o nó A faz uma transmissão, o efeito EIFS é sentido no nó B (250 metros) e no nó C (450 metros), visto que ambos estão dentro da zona de interferência de A (500 metros). O mesmo ocorre com os nós B e C, pois ambos possuem dois nós à sua frente na comunicação. Nesta condição adversa, deslocamento de 15 metros, os modos AHDMAC e DMAC apresentam praticamente o mesmo desempenho.

Para os modos com aumento de ganho, o resultado da simulação é mostrado na figura 4.17. Apesar de o modo AHDMAC-G ser mais resistente às variações de deslocamento com relação à vazão, no pior caso, apresentou resultado semelhante ao DMAC-G. O modo AHDMAC-G apresentou três degraus na curva de vazão, o modo DMAC apresentou uma curva com formato similar, porém com valores inferiores. Na distância de 125 metros o DMAC apresentou um pico negativo não apresentado no AHDMAC-G.

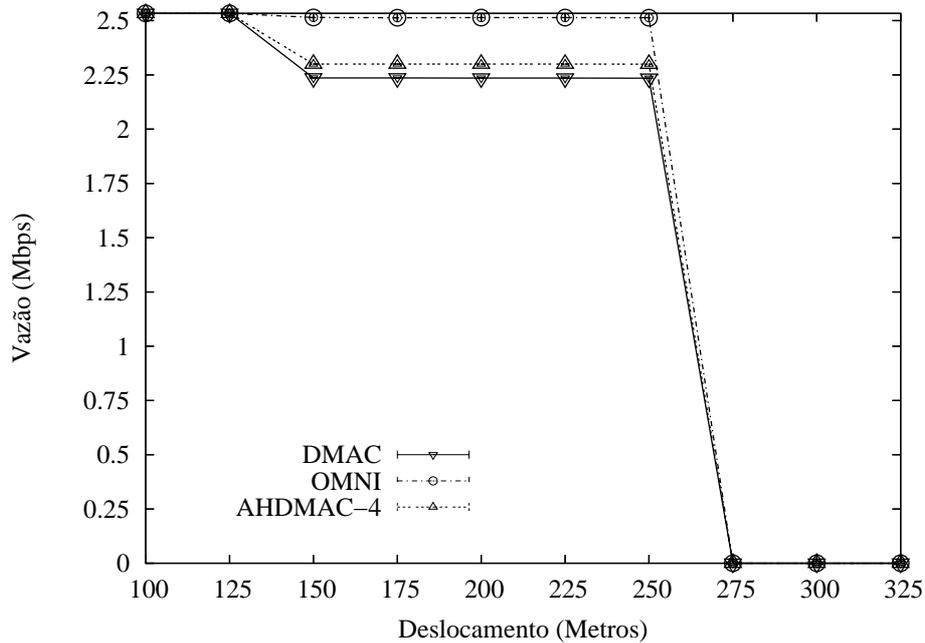


Figura 4.13: Vazão na comunicação com três nós em linha.

O tamanho da rota da transmissão do nó A é mostrada na figura 4.18. Neste cenário de 5 nós e com o aumento de alcance, é necessário apenas um salto quando o deslocamento é de 100 metros, são necessários dois saltos de 125 até 200 metros, são necessários 4 saltos de 225 a 400 metros, para mais de 400 metros não é possível comunicação. No pior caso (entre 225 e 275 metros), além de se ter a maior quantidade de saltos, 4, também se têm uma condição ruim com relação ao problema do EIFS, pois quando A transmite para B, os nós C e D estão em zona CST. O modo DMAC possui um pico negativo em 125 metros que não pode ser facilmente explicado. Não existe uma condição, número de saltos ou quantidade de nós afetados pelo efeito CST que possa explicar este pico negativo. De alguma forma, existe um sincronismo de tempo entre o efeito CST e a surdez intrínseca que provoca uma grande queda na vazão do modo DMAC. Cabe notar que o AHDMAC não sofre desta brusca queda para a distância de 125 metros. Uma forma de comprovar que este pico negativo está relacionado com o efeito EIFS é o resultado da simulação seguinte onde $RXT = CST$.

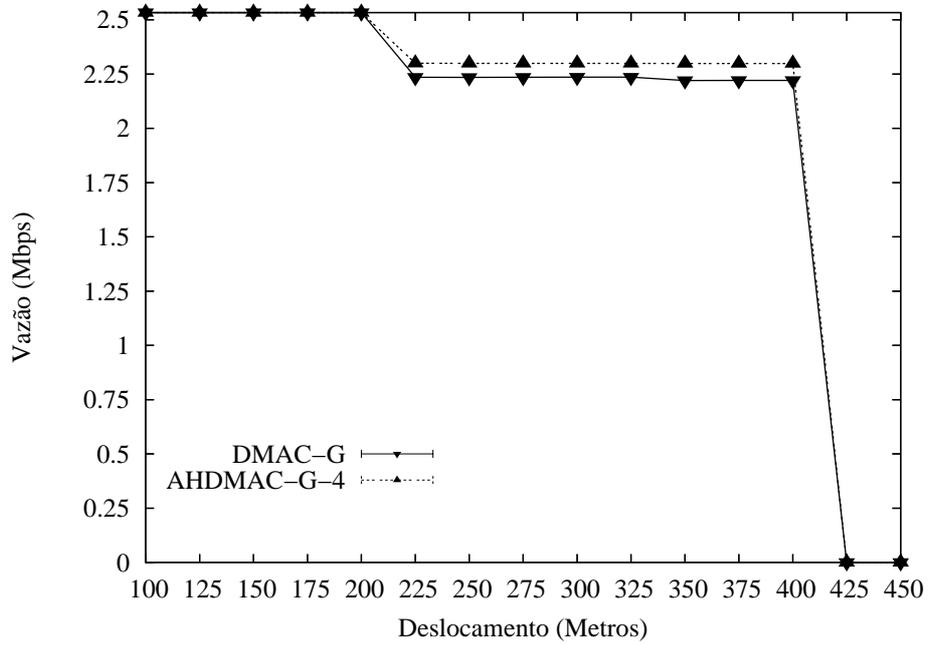


Figura 4.14: Vazão na comunicação com três nós em linha.

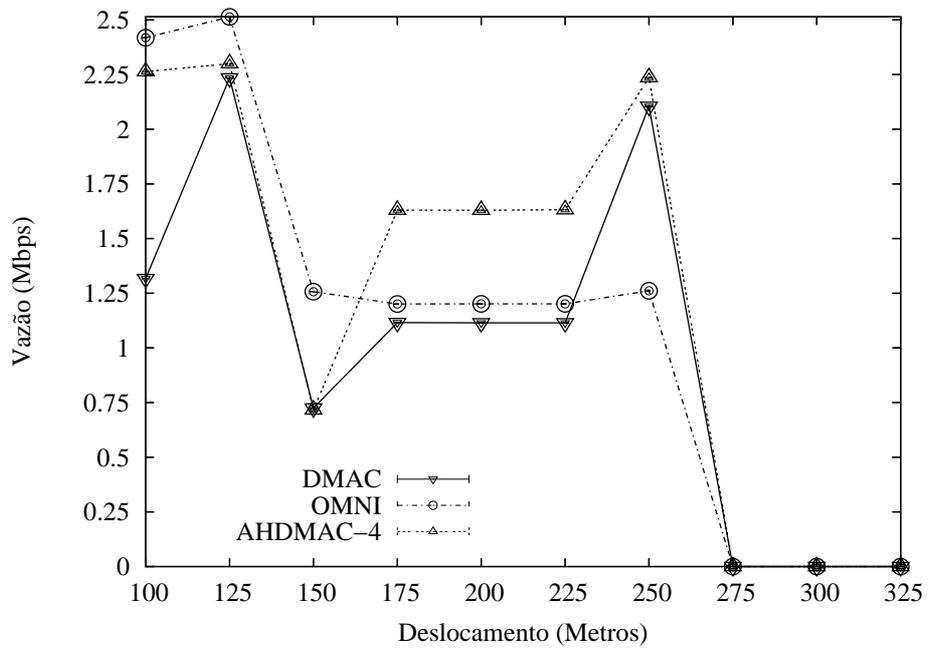


Figura 4.15: Vazão na comunicação com cinco nós em linha.

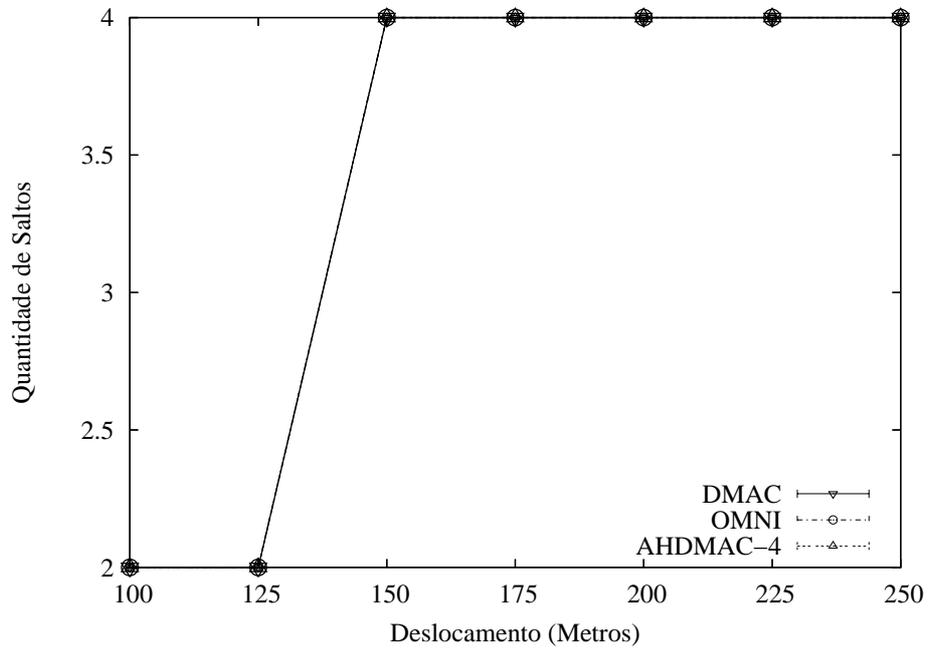


Figura 4.16: Número de saltos na comunicação com cinco nós em linha.

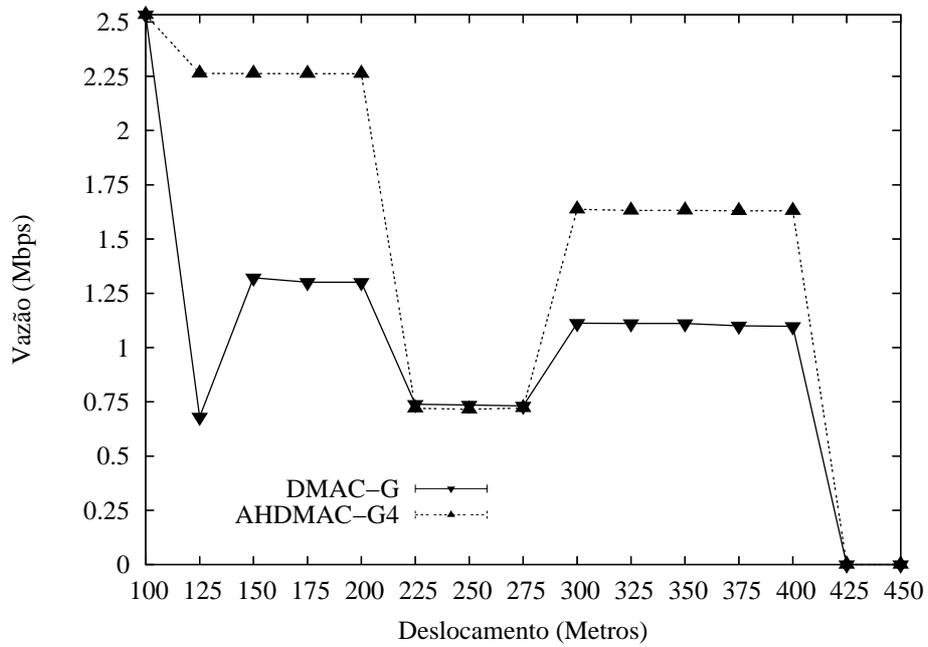


Figura 4.17: Vazão na comunicação com aumento de alcance e cinco nós em linha.

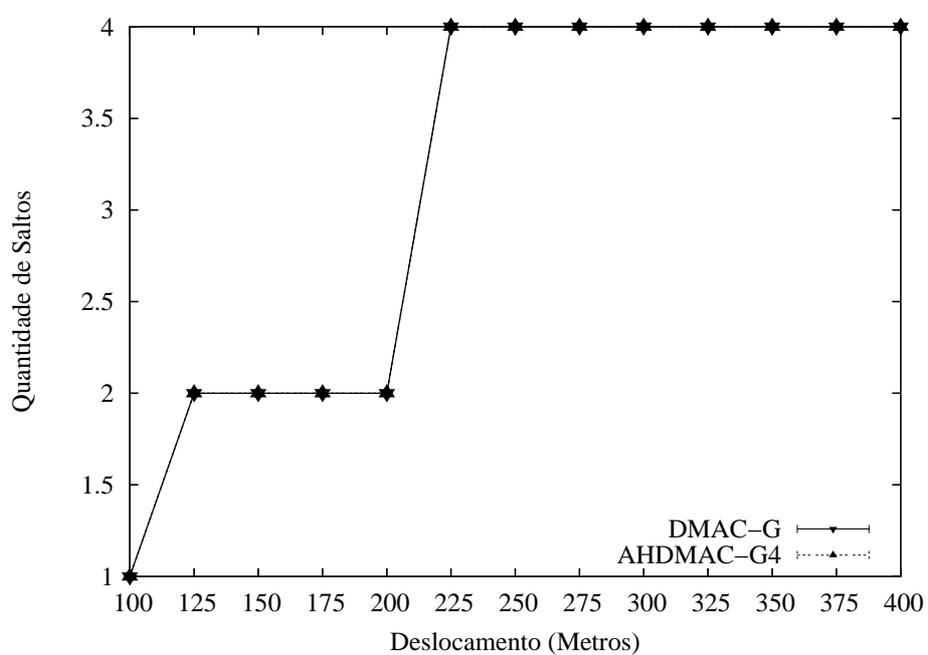


Figura 4.18: Saltos na comunicação com aumento de alcance e cinco nós em linha.

A figura 4.19 mostra o resultado da vazão na simulação do cenário com 5 nós em linha onde a zona de interferência é igual à zona de recepção ($CST = RXT$). Nesta simulação os modos AHDMAC e DDMAC apresentam praticamente um valor constante onde o AHDMAC é superior ao DDMAC. Já o modo OMNI apresenta apenas dois degraus de desempenho, contudo, o desempenho do OMNI é quase a metade dos outros modos para distâncias maiores que 150 metros.

A quantidade de saltos obtida na simulação do cenário com 5 nós em linha onde a zona de interferência é igual à zona de recepção ($CST = RXT$) é a mesma da simulação anterior e seu comportamento se encontra na figura 4.16. Para esta situação, $CST = RXT$, todos os degraus na curva de vazão podem ser explicados pela quantidade de saltos para todos os modos. Para 100 e 125 metros, são necessários dois saltos, devido a isto é a faixa de melhor desempenho. Entre 150 e 250 metros, são necessários quatro saltos, portanto nesta faixa existe uma queda de desempenho. Esta queda de desempenho é mais acentuada para o modo OMNI, que nesta faixa apresenta resultado inferior aos modos direcionais. Este resultado pode ser analisado de outra forma, o modo OMNI apresenta um resultado $CST = RXT$ muito semelhante quando ao obtido anteriormente. Desta forma, o modo OMNI não obteve um melhor desempenho com a eliminação da zona de interferência. Por outro lado, na condição onde $CST = RXT$ os modos direcionais obtiveram uma melhora significativa de desempenho. Como com a utilização dos controles direcionais não existe os tempos de espera desnecessários, como no modo OMNI, a eliminação da zona de interferência anula o efeito EIFS. Consequentemente, a reutilização espacial e aumentada proporcionando um aumento na vazão.

O resultado da simulação dos modos AHDMAC e DDMAC, com aumento de alcance, é mostrado na figura 4.20 para a condição onde a zona de interferência é igual à zona de recepção ($CST = RXT$). Como esperado, o efeito do aumento de alcance é postergar as quedas de desempenho para distâncias maiores quando comparadas as figuras 4.19 e 4.20.

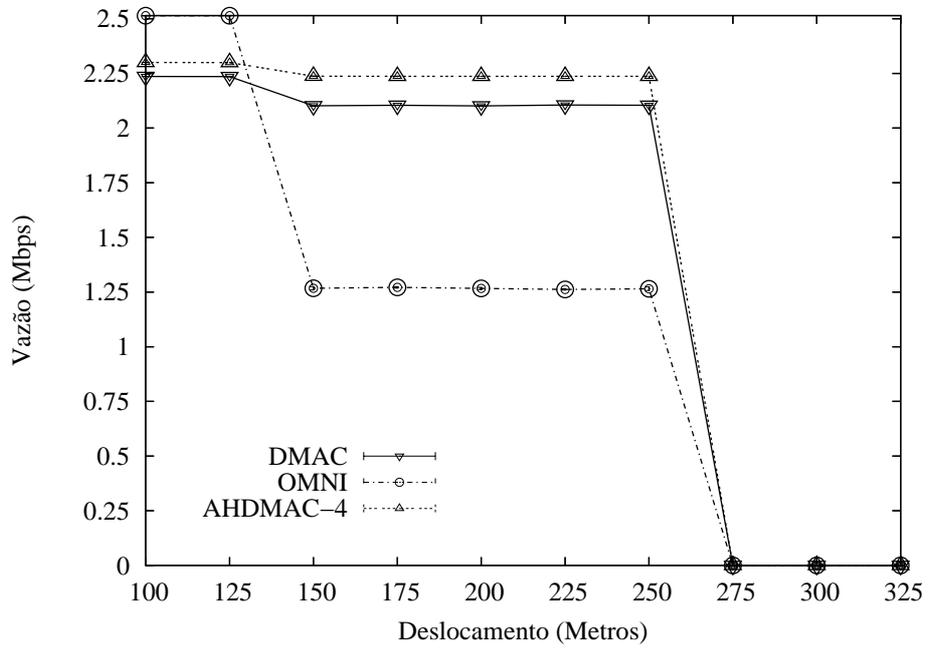


Figura 4.19: Vazão na comunicação com aumento de alcance e cinco nós em linha.

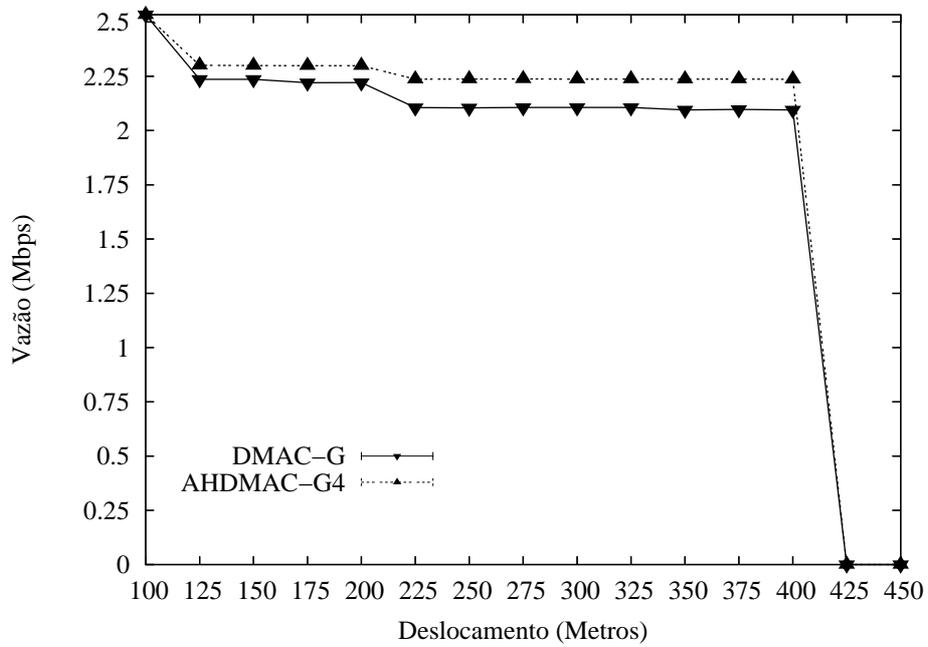


Figura 4.20: Vazão na comunicação com aumento de alcance e cinco nós em linha.

4.2.3 Cenário em Linha Crescente

Os cenários em linha expostos nas seções anteriores exploram uma linha com 3 e com 5 nós. Nesta seção, é detalhada uma simulação onde a quantidade de nós em linha é aumentada de forma a possibilitar uma análise do resultado do AHDMAC em rotas de tamanhos diversos. A comunicação acontece sempre de forma a utilizar todos os nós da linha, sempre o nó mais à esquerda transmite para o nó mais à direita. Nesta simulação foram utilizados oito feixes e um espaçamento entre os nós de 200 metros.

O resultado da simulação é mostrado na figura 4.21 para os modos OMNI, AHDMAC e DMAC. Com apenas dois nós, todos os modos conseguem transmitir na taxa máxima, acrescentando um salto intermediário, o modo OMNI é o que obtém melhor desempenho. Para quatro ou mais nós, o AHDMAC consegue um desempenho superior a ambos os outros modos. Com 6 ou mais nós, o modo DMAC consegue superar o modo OMNI.

A figura 4.22 mostra o resultado da simulação acrescentando os modos com aumento de alcance, AHDMAC-G e DMAC-G. Novamente, com apenas dois nós, todos os modos empatam alcançando o máximo de desempenho. O AHDMAC-G é superior ao OMNI, DMAC e AHDMAC em todos os outros casos, e apenas empata com o DMAC-G para 3 nós em linha. O AHDMAC-G também apresenta degraus de desempenho que serão esclarecidos com a análise da quantidade de saltos. Novamente, o DMAC-G não consegue se beneficiar com o aumento de alcance, e para uma comunicação de seis ou mais nós realiza um desempenho muito parecido com o DMAC, a menos do vale do DMAC. Um pico negativo de desempenho é apresentado para 4 nós. Com quatro nós e aumento de alcance, o primeiro nó consegue transmitir para o terceiro nó, que então re-transmite os quadros para o quarto nó. Quando o primeiro nó transmite para o terceiro, o quarto sofrerá o efeito EIFS. Contudo, a quantidade de saltos para uma fila de três nós é a mesma, e o resultado não é tão negativo. No caso de uma comunicação com a quantidade de quatro nós, ocorre um sincronismo de tempo tal que o efeito EIFS alcança seu efeito máximo.

A quantidade de saltos, como esperado, para os modos sem aumento de alcance, é de uma unidade a menos que o tamanho total da fileira de nós conforme mostrado na figura 4.23. Os modos com aumento de alcance conseguem manter a mesma quantidade

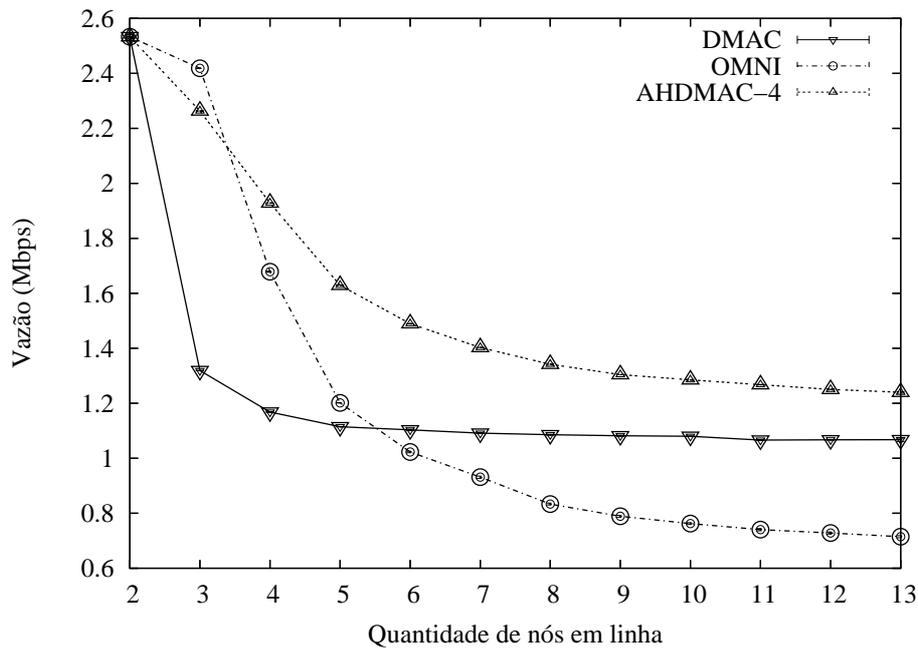


Figura 4.21: Vazão na comunicação em linha de tamanho crescente.

de saltos em dois passos da simulação como mostra a figura 4.23. Como exemplo, os modos com aumento de alcance precisam de 2 saltos para uma quantidade de 4 ou 5 nós pertencentes a comunicação, por outro lado, os modos sem aumento de alcance precisam de 3 saltos para uma quantidade de 4 nós pertencentes a comunicação e de 4 saltos para uma comunicação com 5 nós. O alcance dos modos AHDMAC-G e DMAC-G é de 420 metros, portanto, suficientemente grande para que um nó transmita para um nó localizado a uma distância de 400 metros, sem a necessidade da transmissão intermediária para o nó a uma distância de 200 metros. Tanto o AHDMAC-G quanto o DMAC-G alcançam a mesma quantidade de saltos, porém, o DMAC-G não consegue tirar o mesmo proveito disto e apresenta um desempenho inferior ao AHDMAC-G e similar ao DMAC de uma forma geral.

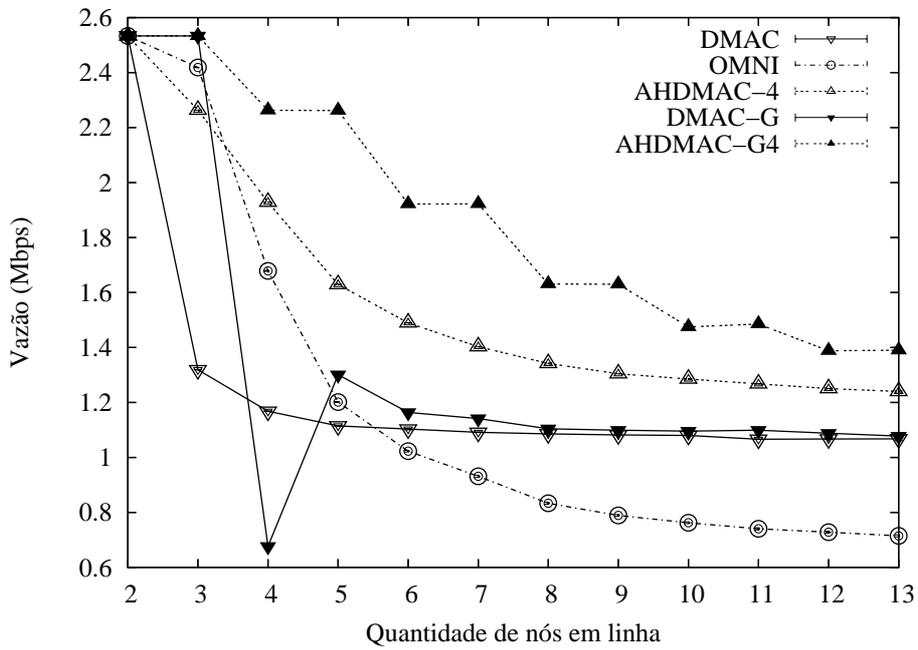


Figura 4.22: Vazão na comunicação em linha de tamanho crescente.

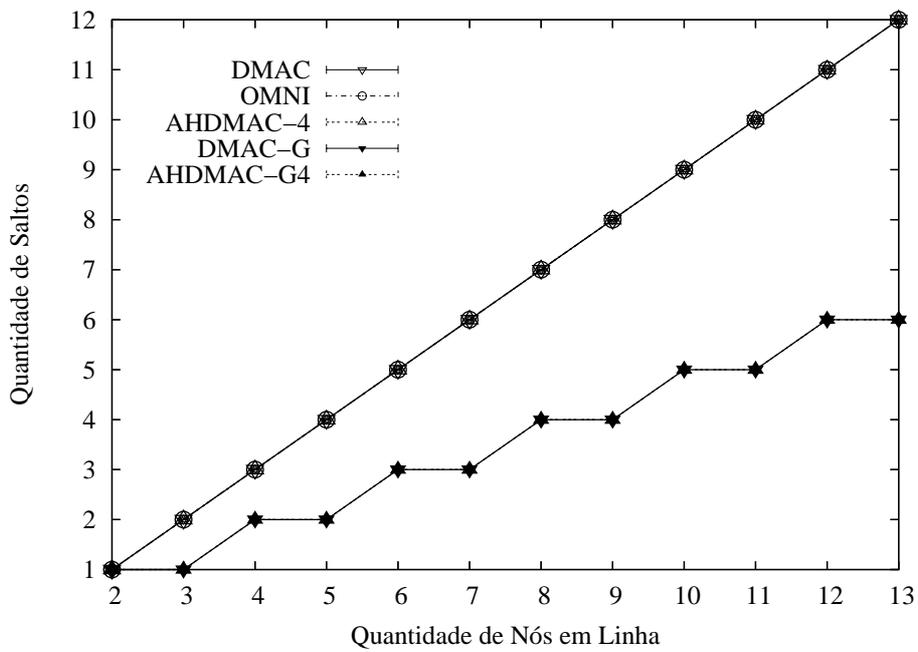


Figura 4.23: Quantidade de saltos na comunicação em linha de tamanho crescente.

4.2.4 Cenários em Grade: Modo Linhas

Conforme ilustrado na figura 4.24, o cenário de simulação aqui chamado de modo linhas consiste de uma grade de 25 elementos dispostos em cinco linhas e cinco colunas com espaço de 200 metros entre uma linha ou uma coluna. Para cada linha, o nó mais à esquerda transmite para o nó mais à direita da mesma linha. Desta forma, a comunicação nesta grade acontece como cinco vezes o cenário mostrado na figura 4.4, onde cada linha da grade se porta como o cenário de 5 nós em linha.

A figura 4.25 mostra a vazão agregada (soma das vazões de cada sorvedouro) da rede para o cenário em questão com a variação da taxa de emissão de cada uma das fontes pela mesma taxa. O modo DMAC obteve uma vazão 48% maior que o modo OMNI para a taxa de 5 Mbps, por outro lado, o modo AHDMAC teve um desempenho 33% maior que o DMAC. Neste cenário o AHDMAC consegue somar os benefícios obtidos em uma comunicação em linha e proporcionar um ganho significativo.

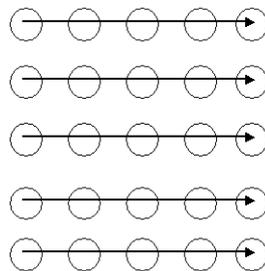


Figura 4.24: Ilustração do cenário grade modo linhas.

Com o efeito do aumento de alcance sendo levado em consideração, percebe-se que o DMAC não é capaz de usufruir dos seus possíveis benefícios. Para taxas maiores que 0,5 Mbps, o modo DMAC-G possui desempenho inferior ao DMAC. Por outro lado, o AHDMAC-G pode não se beneficiar por completo do benefício do aumento de ganho, contudo, consegue na quase totalidade da faixa de taxas simulada, ao menos empatar em desempenho com o AHDMAC. Como relatado na literatura ([7], [9]), os modos direcionais possuem o desempenho prejudicado pelos cenários de comunicação em topologia em linha. A explicação para este fato está relacionada com o aumento da zona de interferência. Como foi utilizado um sistema com 8 feixes, a distância CST é de 841 metros, o

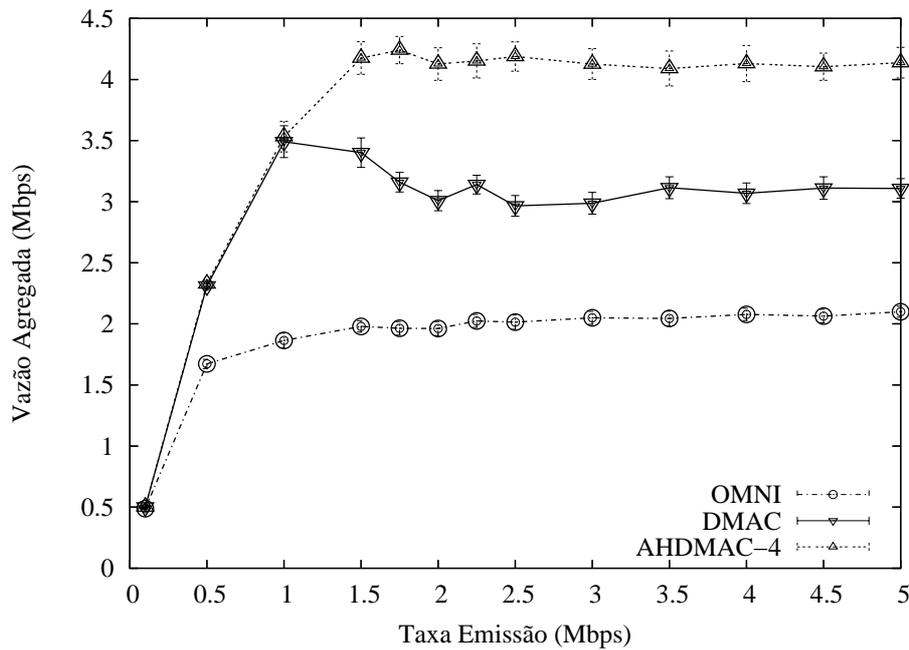


Figura 4.25: Vazão na comunicação do cenário grade modo linhas.

que possibilita que o efeito EIFS prejudique dois nós.

Uma variação deste cenário com resultados interessantes é obtida fixando a vazão de um fluxo em 2,5 Mbps e variar a quantidade de feixes. O resultado desta simulação é mostrado no figura 4.27. A simulação comprova um resultado esperado, que é a proporcionalidade da vazão com relação à quantidade de feixes utilizada. Quanto maior a quantidade de feixes, menor a interferência que uma transmissão realiza sobre as outras, pois o feixe é mais estreito. Para apenas dois feixes, o AHDMAC alcança um desempenho de 2,0 Mbps, com a utilização de 36 feixes a mesma experimenta um aumento de 365% para 7,3 Mbps. O modo DMAC consegue um aumento de 288% na vazão, passando de 1,7 Mbps com 2 feixes, para 4,9 Mbps com 36 feixes. O resultado dos modos direcionais é significativamente maior quando comparado com o modo OMNI que têm um resultado médio de 2 Mbps. O modo AHDMAC-G é 48% superior ao DMAC-G e 365% superior ao modo OMNI.

Ao se adicionar o aumento de alcance aos modos DMAC e AHDMAC, tem-se o resultado mostrado na figura 4.28. Desta, pode-se retirar uma conclusão importante, a utilização de feixes com maior direcionalidade pode melhorar o desempenho dos modos

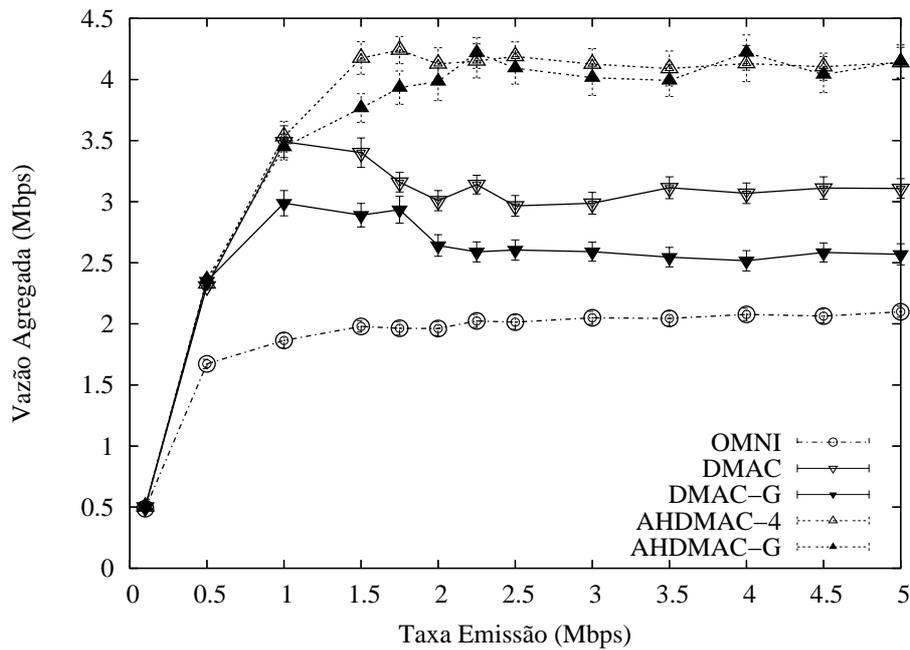


Figura 4.26: Vazão na comunicação do cenário em grade no modo linhas.

direcionais e os modos com aumento de alcance são mais influenciados pela questão da quantidade de feixes. Para o cenário em questão, o AHDMAC-G empata com o AHDMAC para 8 feixes e para maiores quantidades de feixes possui desempenho superior. Já o DMAC-G, somente empata com o DMAC para a condição de 12 feixes, e também repete o desempenho superior para uma maior quantidade de feixes. Para menos de oito feixes, ambos os modos com aumento de alcance possuem desempenho inferior aos seus respectivos modos sem aumento de alcance. Para estas quantidades de feixes, não é possível diminuir a quantidade de saltos. O AHDMAC-G alcança a taxa de 8,9 Mbps com 36 feixes, um aumento de 445% quando comparado com os 2,0 Mbps alcançados com apenas dois feixes. O modo DMAC-G consegue uma taxa de 6,8 Mbps com 36 feixes, 453% maior que 1,5 Mbps alcançado com 2 feixes. O modo AHDMAC-G é 30% superior ao DMAC-G e 445% superior ao modo OMNI.

Como dito, um dos benefícios do aumento de alcance é a diminuição do tamanho das rotas necessárias para o destino. A figura 4.29 mostra que os modos com aumento de ganho possibilitam uma queda na quantidade de saltos necessários. Tanto o DMAC-G, quanto o AHDMAC-G possuem um desempenho muito semelhante. Enquanto o modo

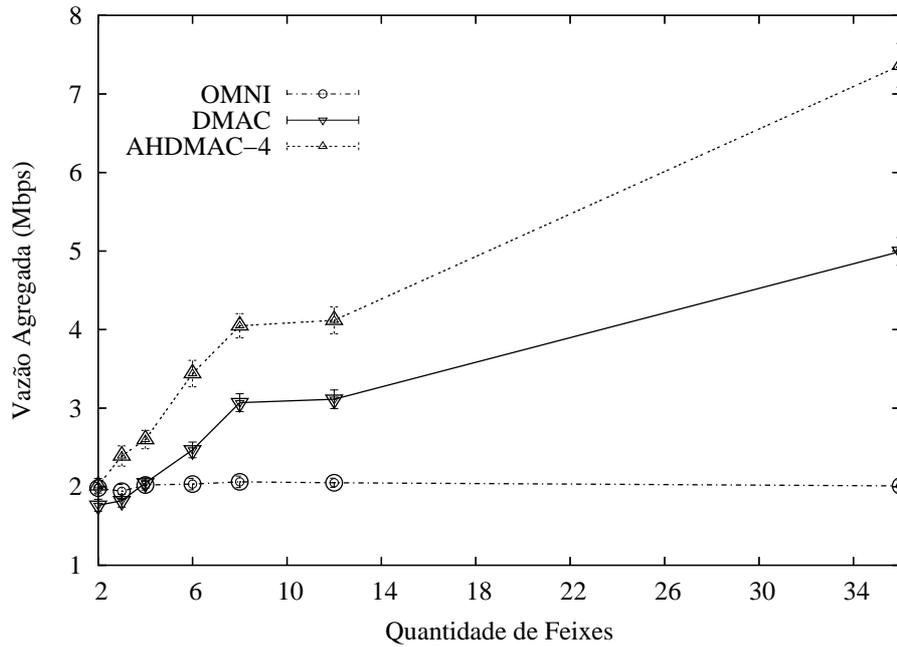


Figura 4.27: Vazão na comunicação do cenário grade modo linhas.

OMNI possui uma rota de tamanho médio de 5 saltos, os modos DMAC-G e AHDMAC-G possuem uma rota de média quase 4 saltos para poucos feixes podendo chegar a quase 2 saltos para uma grande quantidade de feixes. Foi a verificado que os modos direcionais DMAC e AHDMAC, mesmo sem o aumento de ganho possibilitam uma diminuição no tamanho da rota quando comparados com OMNI. Contudo, a rota mínima sem aumento de alcance é de 4 saltos, e foi observado uma rota de 5 saltos para o modo OMNI. Desta forma, a baixa reutilização espacial do OMNI faz com que este forme rotas maiores do que o mínimo necessário. Não são os modos direcionais que diminuem as rotas formadas, mas o OMNI que tem dificuldade em cenário densos.

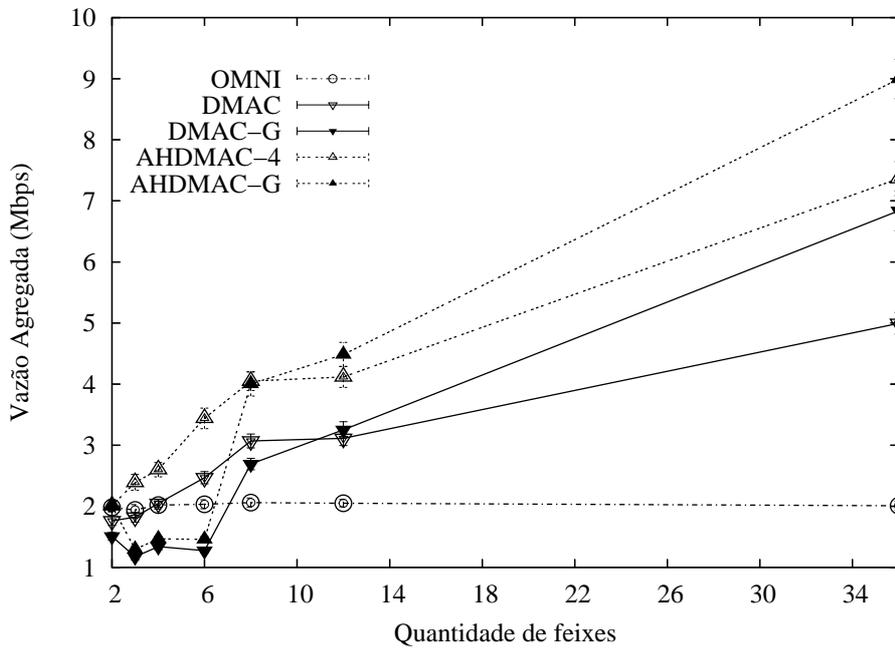


Figura 4.28: Vazão na comunicação do cenário grade modo linhas.

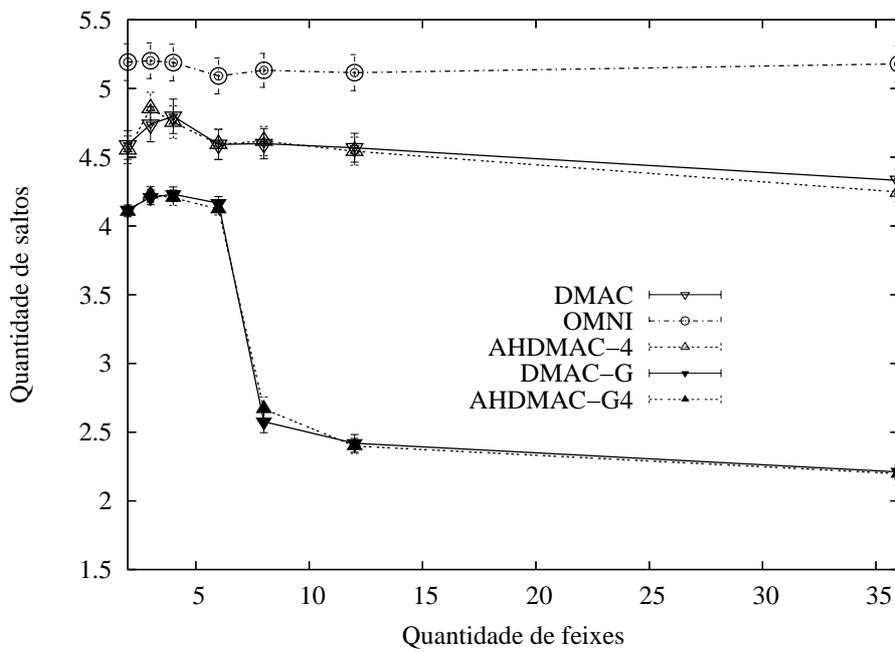


Figura 4.29: Vazão na comunicação do cenário grade modo linhas.

4.2.5 Cenários em Grade: Modo Colunas

O modo colunas também consiste de uma grade de 25 elementos simétricos com espaço de 200 metros entre uma linha ou uma coluna. Conforme ilustrado na figura 4.30, as comunicações deste cenário são realizadas de uma forma aleatória, porém bem definida. A fonte para cada um dos cinco fluxos é sorteada de forma independente dentro da coluna mais à esquerda da grade, os destinos são sorteados tendo a coluna mais à direita como o universo do sorteio. Neste cenário o grau de aleatoriedade é maior que no anterior, permitindo uma análise dos efeitos do AHDMAC de forma mais independente da topologia das comunicações.

O resultado da simulação deste modo é mostrado na figura 4.31. Neste modo, os desempenhos são inferiores aos obtidos no modo linhas, contudo, o modo AHDMAC consegue um desempenho bem superior ao DMAC. Para taxas de emissão de 5 Mbps o DMAC consegue um resultado 46% superior ao OMNI, já o AHDMAC consegue um resultado 17% superior ao DMAC para a mesma taxa de emissão.

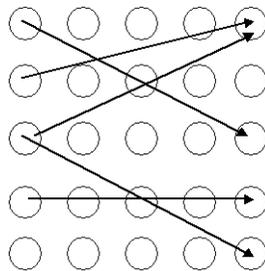


Figura 4.30: Ilustração do modo grade em coluna.

Considerando-se o aumento de alcance, obtém-se o resultado mostrado na figura 4.32. Como no cenário anterior, o DMAC-G não consegue se beneficiar do aumento de alcance e obtém um desempenho inferior ao DMAC. O AHDMAC-G, tem um resultado muito parecido com o AHDMAC, porém levemente inferior. As comunicações neste cenário ainda possuem um alto grau de lineariedade, e portanto são prejudicadas.

Para explorar os efeitos da densidade de comunicações, uma variação deste cenário foi realizada. Nesta, as comunicações obedecem a forma de criação do modo coluna, mas a quantidade de fluxos é variada para uma taxa constante de 2,5 Mbps. Como resultado,

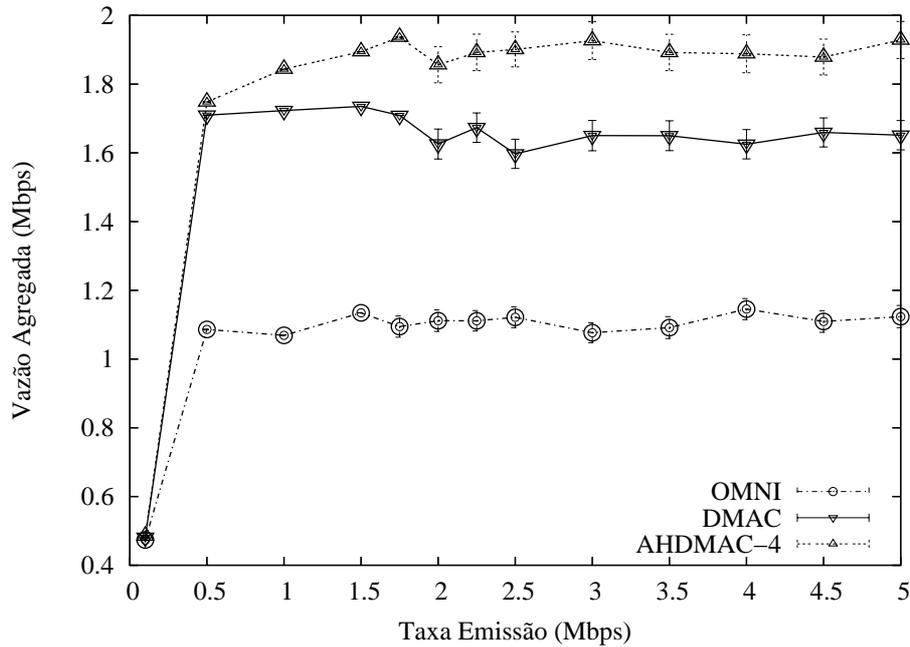


Figura 4.31: Vazão na comunicação do cenário grade modo coluna.

observa-se na figura 4.33 que o desempenho do AHDMAC é superior ao do DMAC em todas as condições. Enquanto que o modo OMNI tem uma vazão agregada praticamente constante para um ou muitos fluxos, os modos DMAC e AHDMAC possuem uma vazão agregada crescente com a quantidade de fluxos.

Como obtido no cenário anterior, a figura 4.34 mostra que os modos com aumento de alcance não apresentam um ganho com relação aos modos com alcance normal. Cabe aqui lembrar que neste cenário as comunicações possuem uma topologia ainda bastante linear, o que não favorece as transmissões direcionais.

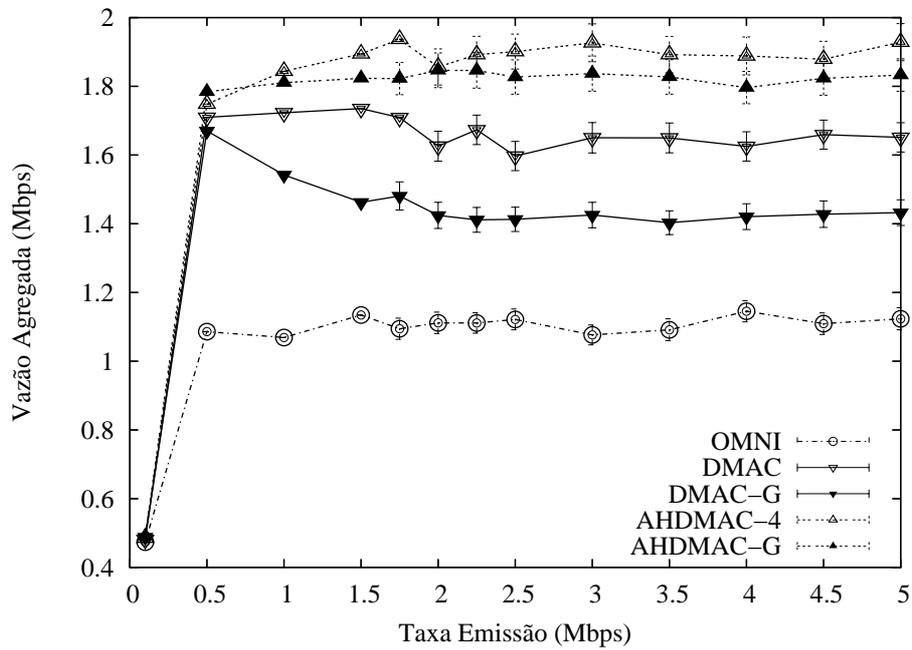


Figura 4.32: Vazão na comunicação do cenário grade modo coluna.

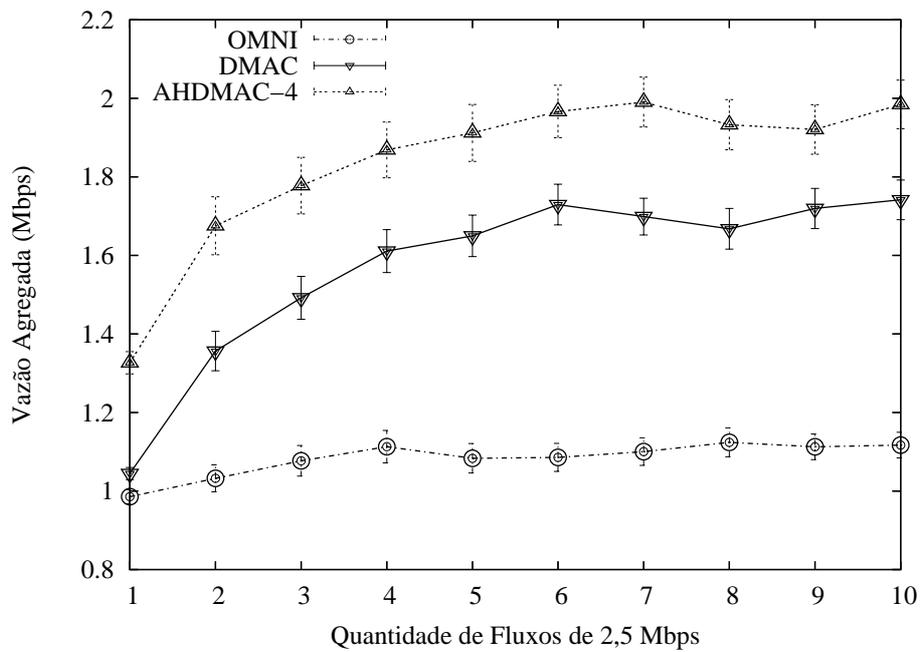


Figura 4.33: Vazão na comunicação do cenário grade modo coluna.

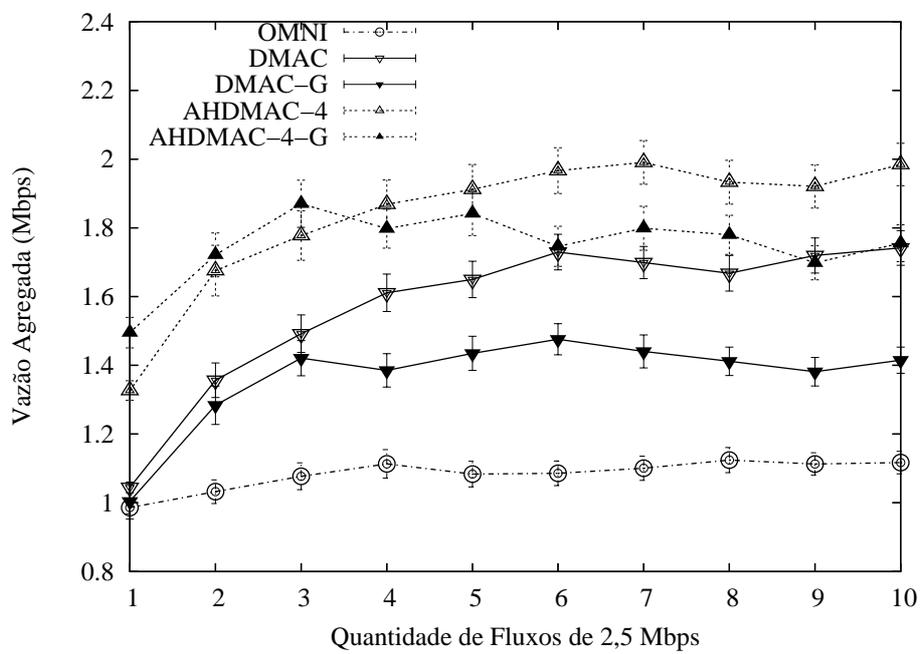


Figura 4.34: Vazão na comunicação do cenário grade modo coluna.

Repetindo a análise feita no cenário anterior, a figura 4.35 mostra o efeito da variação da quantidade de feixes para um fluxo de taxa de emissão de 2,5 Mbps. O modo AHDMAC é superior, ou equivalente para 2 e 3 feixes, ao OMNI para qualquer quantidade de feixes. Já o DMAC é inferior ao OMNI para 2 e 3 feixes, e inferior ao AHDMAC para qualquer situação. O modo AHDMAC passa de 1 Mbps com 2 feixes para 1,6 Mbps com 36 feixes, um aumento de 60%. Já o modo DMAC consegue um aumento de desempenho de 76%, passando de 0,77 Mbps com dois feixes para 1,36 Mbps com 36 feixes. O modo AHDMAC é 23% superior ao DMAC e 63% superior ao modo OMNI (vazão em torno de 0,9 Mbps).

Considerando-se o aumento de alcance (figura 4.36), o DMAC-G é superior ao DMAC para 12 ou mais feixes, para quantidades menores os modos se alternam com relação ao desempenho. Tanto o DMAC, quanto o DMAC-G não são superiores ao OMNI para toda a faixa de valores simulados. O modo DMAC consegue um aumento de 73%, passando de 1,19 Mbps com 2 feixes, para 2,07 Mbps com 36 feixes.

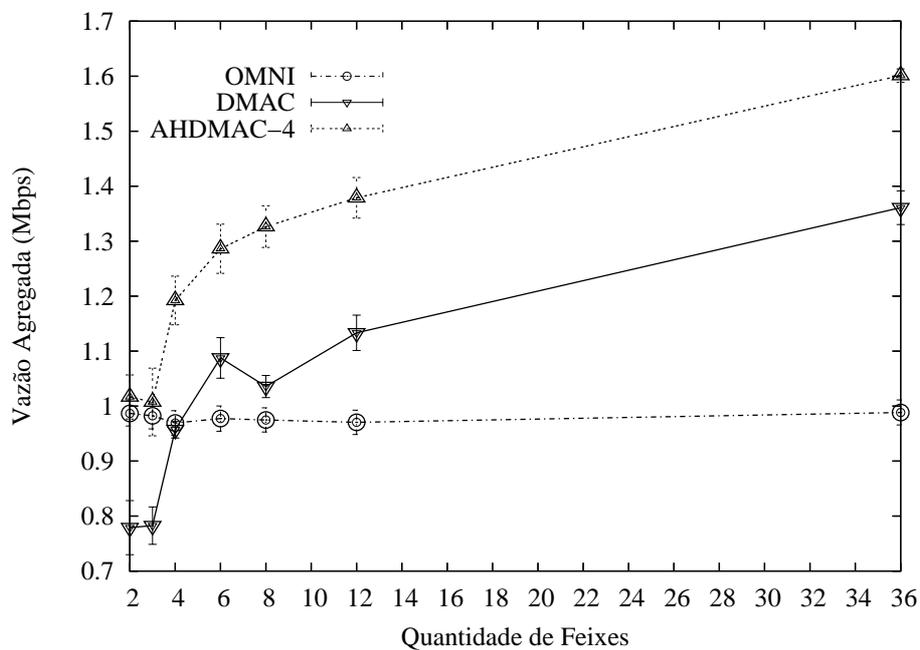


Figura 4.35: Vazão na comunicação do cenário grade modo coluna.

O AHDMAC-G é superior ao AHDMAC para uma quantidade de feixes maior ou igual a 8, para quantidades menores os modos se alternam para o melhor desempenho.

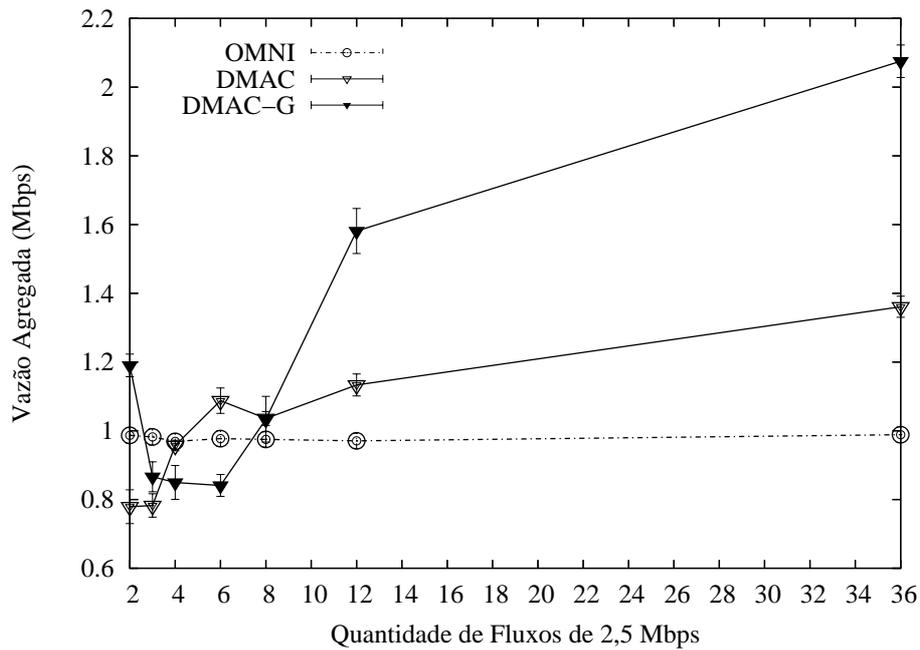


Figura 4.36: Vazão na comunicação do cenário grade modo coluna.

Ambos os modos são superiores, ou ao menos empatam, ao OMNI em qualquer caso simulado. O AHDMAC-G tem uma vazão de 1,33 Mbps para dois feixes, aumentando a quantidade de feixes para 36 a vazão aumenta para 2,27 Mbps, um aumento de 70%. O modo AHDMAC-G é 9% superior ao DMAC-G e 231% superior ao modo OMNI.

Enquanto os modos normais, OMNI, DMAC e AHDMAC, mantêm uma média de mais de cinco saltos para o destino, como mostrado na figura 4.38, os modos com aumento de alcance, DMAC-G e AHDMAC-G, conseguem formar rotas em torno de 4 saltos utilizando uma pequena quantidade de feixes e passam a formar rotas em torno de apenas 2 saltos para uma grande quantidade de saltos. Esta grande diminuição na quantidade de saltos explica o grande aumento de desempenho observado nestas simulações.

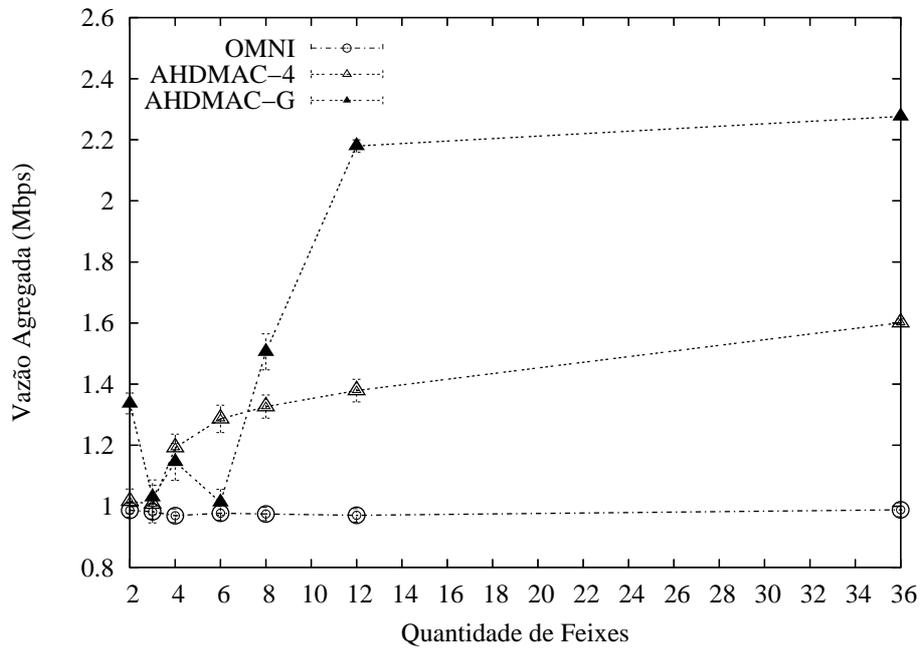


Figura 4.37: Vazão na comunicação do cenário grade modo coluna.

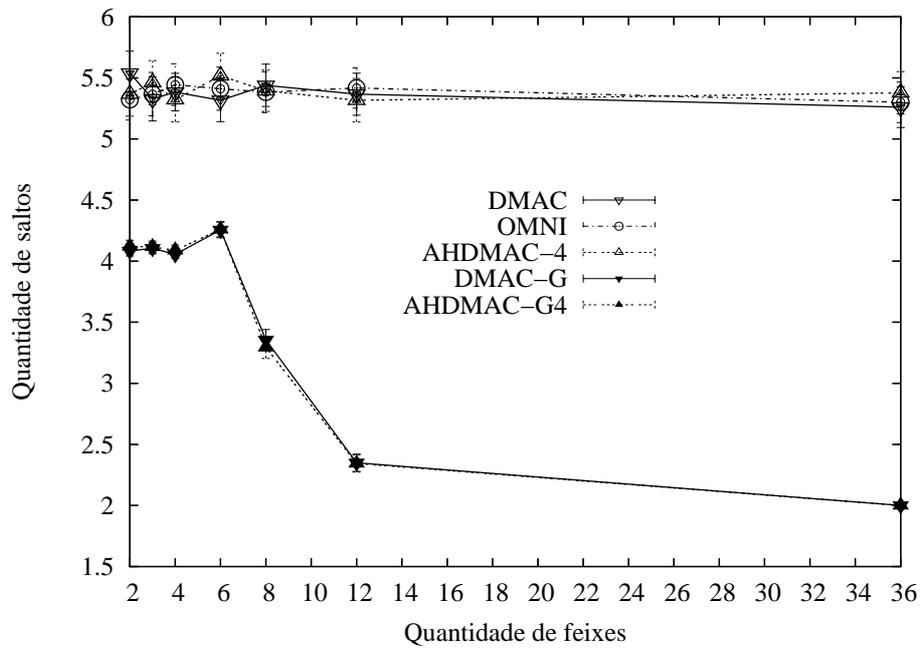


Figura 4.38: Vazão na comunicação do cenário grade modo coluna.

4.2.6 Cenários em Grade: Modo Aleatório

Neste último cenário de simulação em grade simétrica com 25 elementos com espaçamento de 200 metros, cada fluxo possui sua origem e sorvedouro sorteado independentemente. Esta simulação foi chamada de modo aleatório e a figura 4.39 ilustra a formação das comunicações. Neste cenário o grau de aleatoriedade é ainda maior que no modo colunas, permitindo uma análise dos efeitos do AHDMAC de forma ainda mais independente da topologia das comunicações.

A figura 4.40 mostra o resultado da simulação para o cenário referido. Como dito anteriormente, as simulações em grade com taxas da ordem de Mbps são extremamente intensivas em termos de uso de recursos computacionais. Quanto maior o grau de aleatoriedade das simulações, maior a quantidade de simulações para que os resultados convirjam para margens de erro percentualmente pequenas. No caso desta simulação, os resultados apresentados para o AHDMAC e o DMAC são muito similares, e em muitos os casos o resultado apresenta sobreposição de resultados. Apesar de os modos apresentarem sobreposição de resultados, existe a tendência exposta na figura 4.40 de que o AHDMAC tenha resultados superiores ao DMAC como é visto para as taxas de 1,5; 1,75; 2,25; 2,5; 3 e 4,5 Mbps onde as barras de erro não estão apresentando sobreposição.

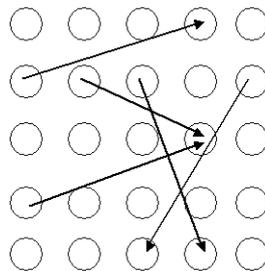


Figura 4.39: Ilustração do modo grade aleatório.

A sobreposição dos resultados da simulação do DMAC-G e do AHDMAC-G também são encontradas na figura 4.41 que mostra esta situação. Contudo, para as taxas de 1,0 e 1,5 Mbps não existe sobreposição dos resultados e o AHDMAC-G é superior ao DMAC-G. Ainda que o quadro de sobreposição dos modos AHDMAC-G e DMAC-G permaneça, esta figura mostra um resultado esperado, mas que ainda não havia sido apresentado. Este

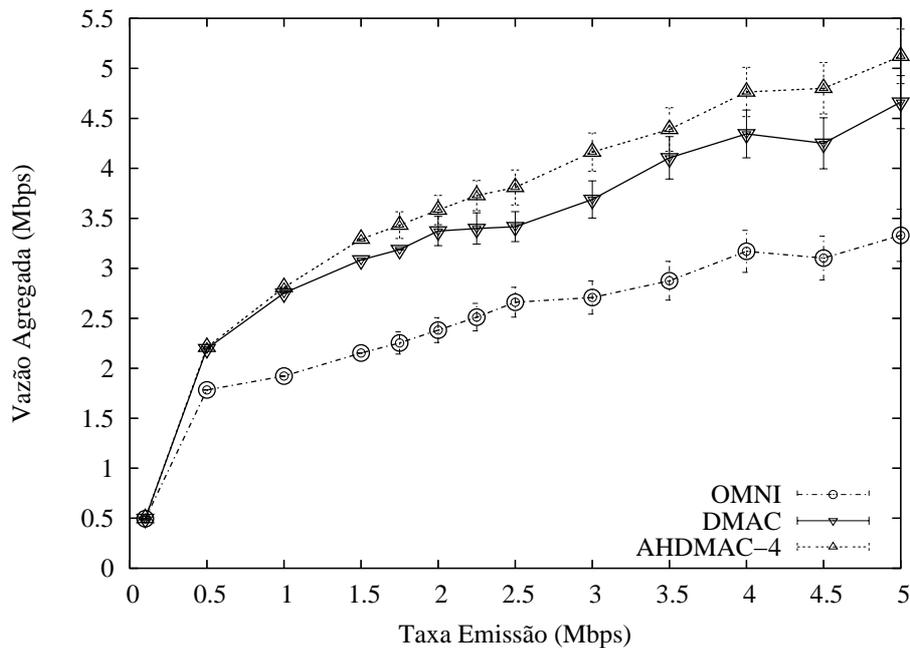


Figura 4.40: Vazão na comunicação do cenário grade modo aleatório.

cenário é o primeiro onde os modos com aumento de alcance conseguem superar os seus respectivos modos sem aumento de alcance para todos os valores simulados maiores que 1 Mbps.

Na simulação de uma variação deste cenário, a taxa de emissão é fixada em 2,5 Mbps, e a quantidade de fluxos é variada de 1 até 10. A figura 4.42 mostra o resultado obtido com esta simulação. Da mesma forma que na primeira simulação deste modo, é apresentada uma grande quantidade de sobreposição de resultados. Contudo, para uma quantidade de fluxos até 3, o AHDMAC apresenta um resultado superior ao DMAC em todos casos. Para quantidades maiores de fluxos, os resultados apresentam uma quantidade de sobreposição ainda muito grande.

O efeito do aumento de ganho na simulação é mostrado na figura 4.43. O modo AHDMAC-G é superior ao DMAC-G para 1, 2 e 4 fluxos, nas demais quantidades de fluxos, a sobreposição do resultado ainda é muito grande. Novamente, os modos com aumento de ganho apresentam um resultado superior quando comparados com seus similares sem o benefício do aumento de alcance.

A figura 4.44 mostra o resultado da simulação do cenário em grade no modo aleatório

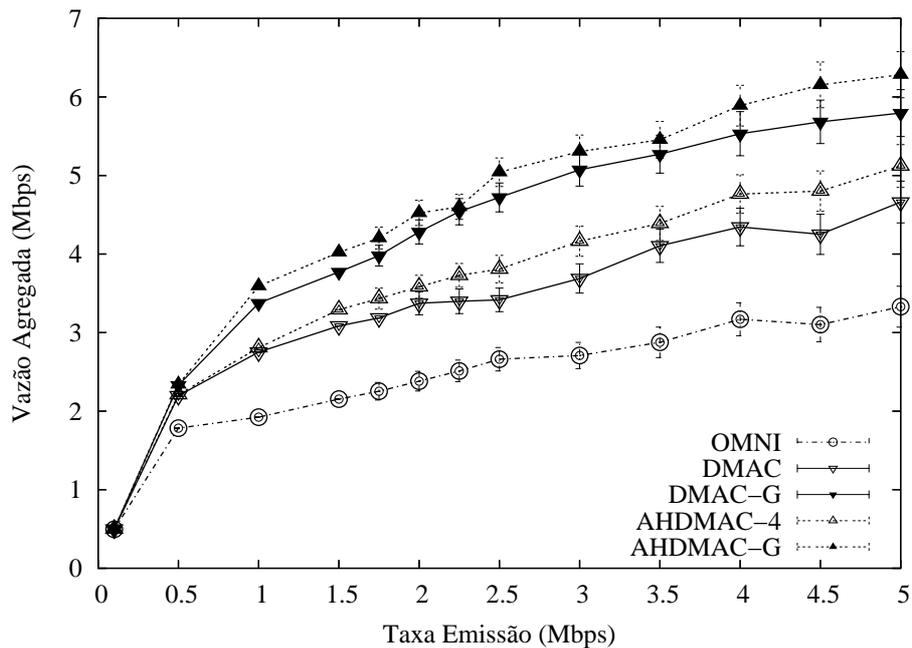


Figura 4.41: Vazão na comunicação do cenário grade modo aleatório.

quando é feita a variação da quantidade de feixes para um fluxo de 2,5 Mbps escolhido aleatoriamente. Para 8 ou mais feixes, o AHDMAC é superior ao DMAC e ao OMNI. Neste mesmo intervalo, o DMAC é inferior ao OMNI em desempenho. O modo AHDMAC aumenta o seu desempenho em 33%, obtendo 1,5 Mbps com 2 feixes e 2,0 Mbps com 36 feixes. O mesmo é cerca de 17% superior ao OMNI no melhor caso e 13% inferior no pior. O modo OMNI é 30% superior ao DMAC (1,3 Mbps) quando o mesmo utiliza dois feixes, por outro lado, quando o DMAC utiliza 36 feixes, ambos possuem desempenho equivalente.

Considerando aumento de alcance, o resultado desta simulação se altera significativamente como mostrado na figura 4.45. O modo AHDMAC-G é superior ao AHDMAC em todos os casos simulados, por outro lado, o DMAC-G apresenta uma sobreposição de valores com o DMAC para 3 e 4 feixes, nos outros casos, o DMAC-G é superior ao DMAC. O aumento de ganho permite ao DMAC-G uma melhora muito significativa sobre o DMAC, de forma que com 36 feixes o DMAC-G apresenta desempenho semelhante ao AHDMAC-G.

A resposta para o baixo desempenho do DMAC no cenário em grade no modo aleató-

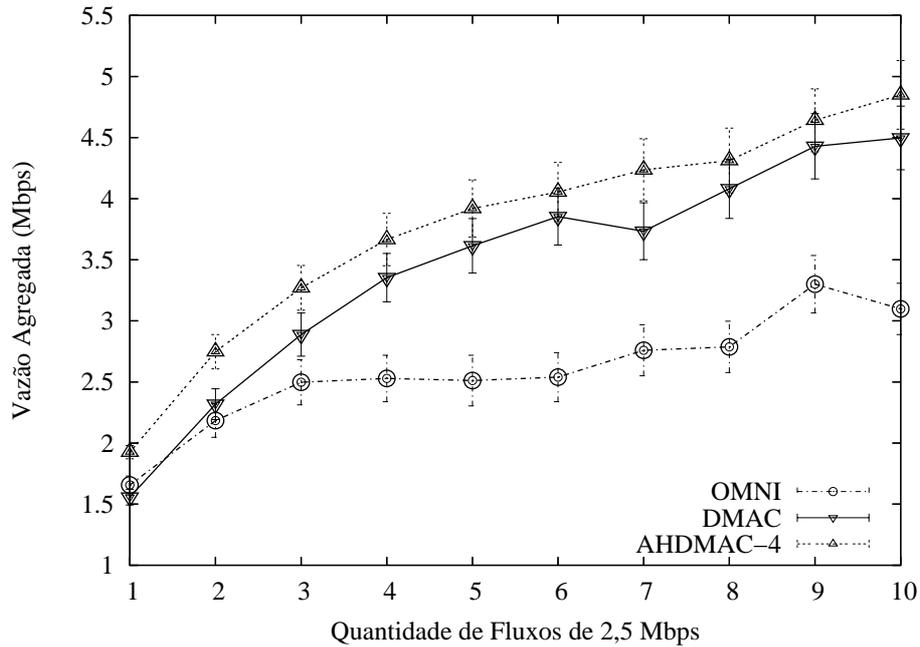


Figura 4.42: Vazão na comunicação do cenário grade modo aleatório.

rio é encontrada na análise da quantidade de saltos da simulação mostrada na figura 4.46. A quantidade de saltos média para os três modos sem aumento de alcance é de pouco mais de 3 saltos. Recordando do resultado da simulação com três nós mostrado na figura 3.11, nota-se o baixo desempenho do DMAC em um cenário com três nós e taxa de 2,5 Mbps.

Por outro lado, a figura 4.46 mostra o motivo dos modos com aumento de alcance, DMAC-G e AHDMAC-G obterem um desempenho melhor. Com o uso de dois feixes, estes modos apresentam uma média de 2,5 saltos, que cai para 1,5 saltos com 36 feixes. Desta forma, o aumento de alcance possibilita a formação de rotas com menores quantidades de saltos e conseqüentemente uma maior vazão.

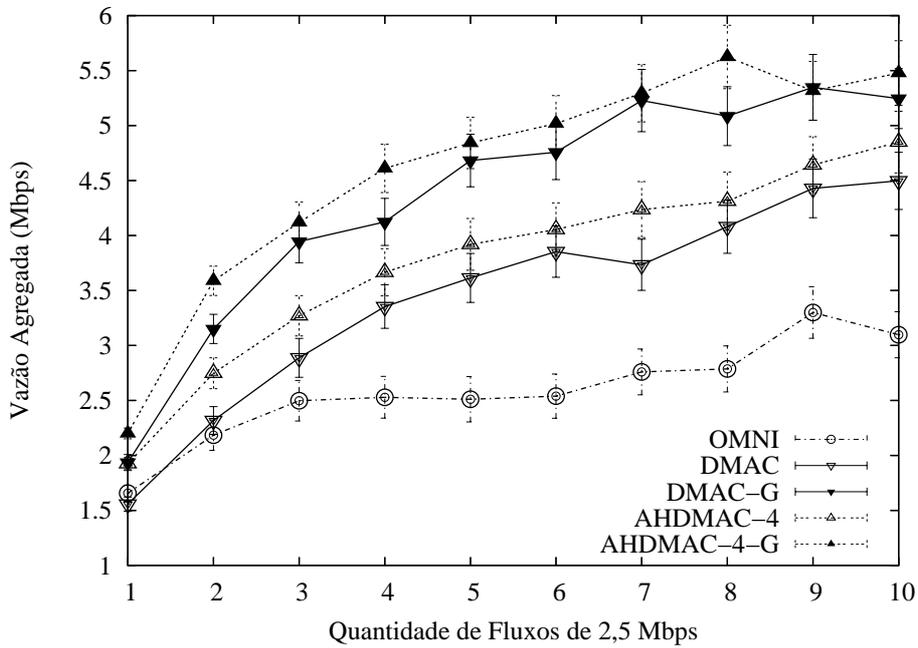


Figura 4.43: Vazão na comunicação do cenário grade modo aleatório.

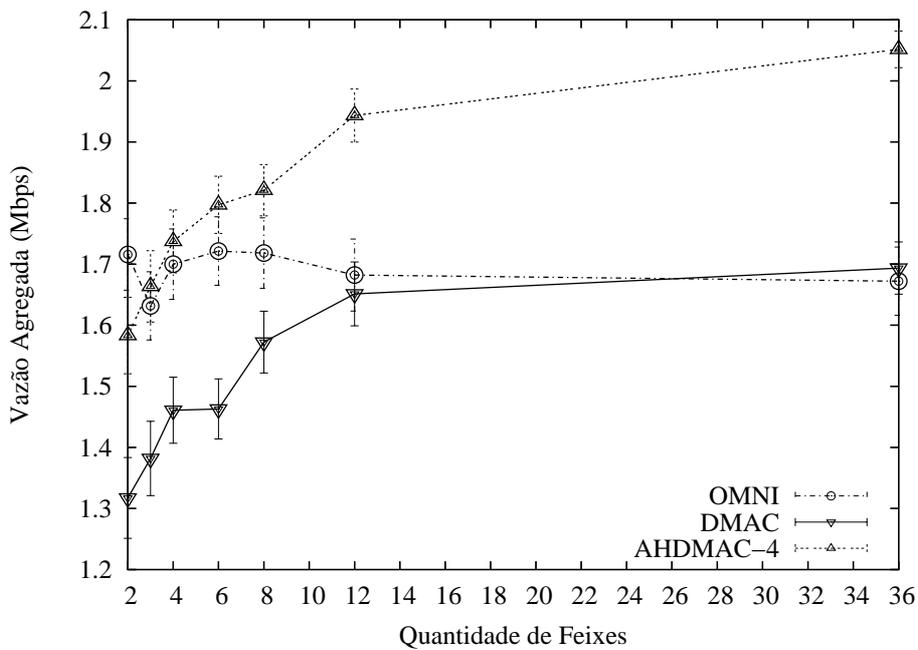


Figura 4.44: Vazão na comunicação do cenário grade modo aleatório.

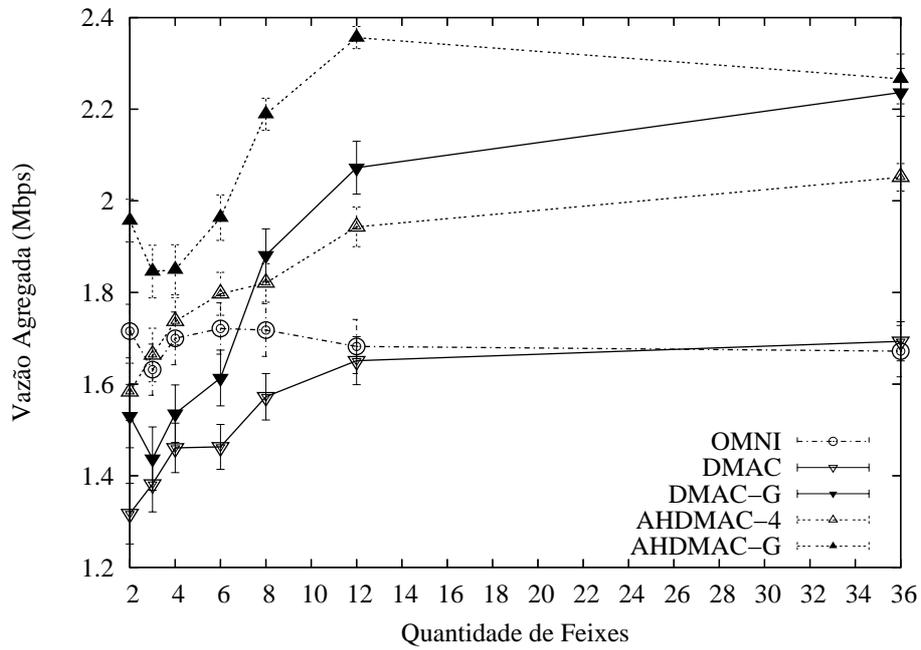


Figura 4.45: Vazão na comunicação do cenário grade modo aleatório.

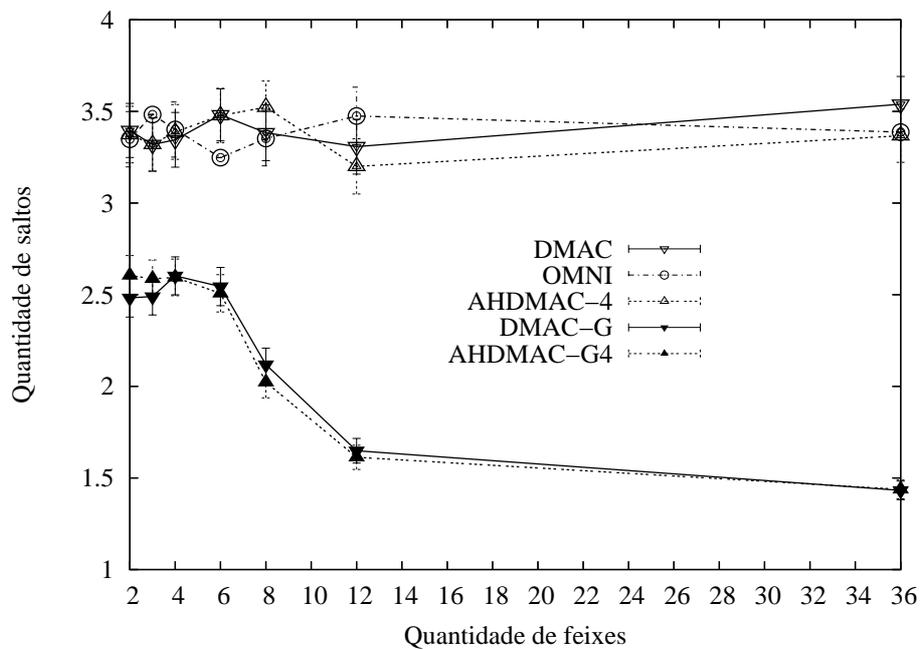


Figura 4.46: Quantidade de saltos na comunicação do cenário grade modo aleatório.

4.2.7 Cenários Aleatórios

Os cenários aleatórios consistem em um espaço plano quadrado de 750 por 750 metros onde 19 nós são dispostos aleatoriamente. Cada fluxo possui a sua origem e o seu destino sorteados de forma independente. Conforme já exposto, este tipo de simulação requer muitos recursos computacionais para que as margens de erro dos resultados sejam pequenas o suficiente para permitir uma boa análise dos resultados.

A primeira simulação de um cenário completamente aleatório, foi feita com a variação da taxa de emissão de três fluxos aleatórios. A figura 4.47 mostra o resultado da simulação. Embora o gráfico mostre uma sobreposição muito grande dos resultados, algumas conclusões podem ser retiradas. O aumento de alcance em um cenário completamente aleatório permite um aumento de vazão para o AHDMAC-G quando comparado com o AHDMAC e também permite um aumento de vazão para o DMAC-G quando comparado com o DMAC. Os modos AHDMAC-G e DMAC-G possuem um melhor desempenho do que os outros modos para taxas maiores ou igual a 1 Mbps.

A quantidade de saltos nos cenários aleatórios é mostrada na figura 4.48. Os modos com aumento de alcance conseguiram uma diminuição de praticamente um salto, tendo uma média em torno de 1,5 saltos contra 2,5 dos modos sem aumento de alcance.

Uma situação muito parecida é encontrada na figura 4.49 que mostra a simulação deste mesmo cenário onde a taxa de emissão é fixada em 2,5 Mbps para uma quantidade variável de fluxos. Embora os resultados do AHDMAC e do DMAC possuam uma grande sobreposição, ambos superam o modo OMNI para 4 ou mais fluxos. Os modos com aumento de alcance superam os modos com alcance normal para toda a faixa da simulação. Para a condição de 5 fluxos, o modo AHDMAC-G obteve desempenho cerca de 35% superior ao modo AHDMAC, e 77% superior ao modo OMNI.

De uma forma similar à simulação anterior, a figura 4.50 mostra a quantidade de saltos necessária para a fonte alcançar o destino. Os modos com aumento de alcance conseguem uma rota com em torno de um salto a menos que os modos com alcance normal.

Por fim, foi realizada uma simulação com 3 fluxos de 2,5 Mbps onde foi variada a quantidade de feixes em cada nó. A figura 4.51 mostra o resultado da simulação para a

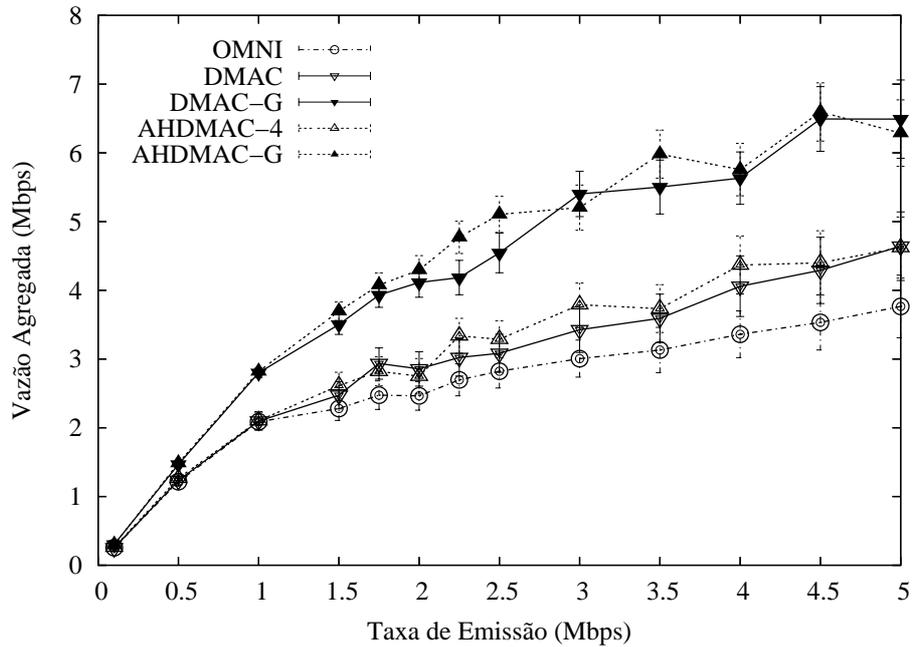


Figura 4.47: Vazão na comunicação do cenário aleatório.

quantidade de saltos das rotas formadas. Para quatro ou menos feixes, o tamanho da rota para os modos com aumento de alcance foi de 2 saltos, contra uma média de 2,6 saltos para os modos com alcance normal. Para mais de quatro feixes os modos com aumento de alcance formam rotas com menos de dois saltos e a queda na quantidade de saltos aumenta com a quantidade de feixes, alcançando uma média de 1,2 saltos para 36 feixes.

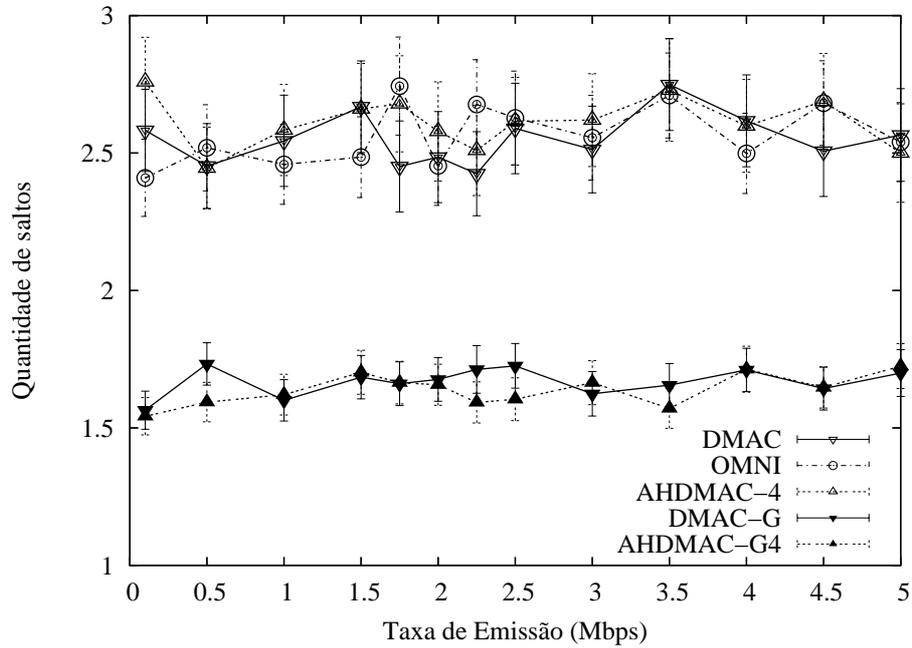


Figura 4.48: Quantidade de saltos na comunicação do cenário aleatório.

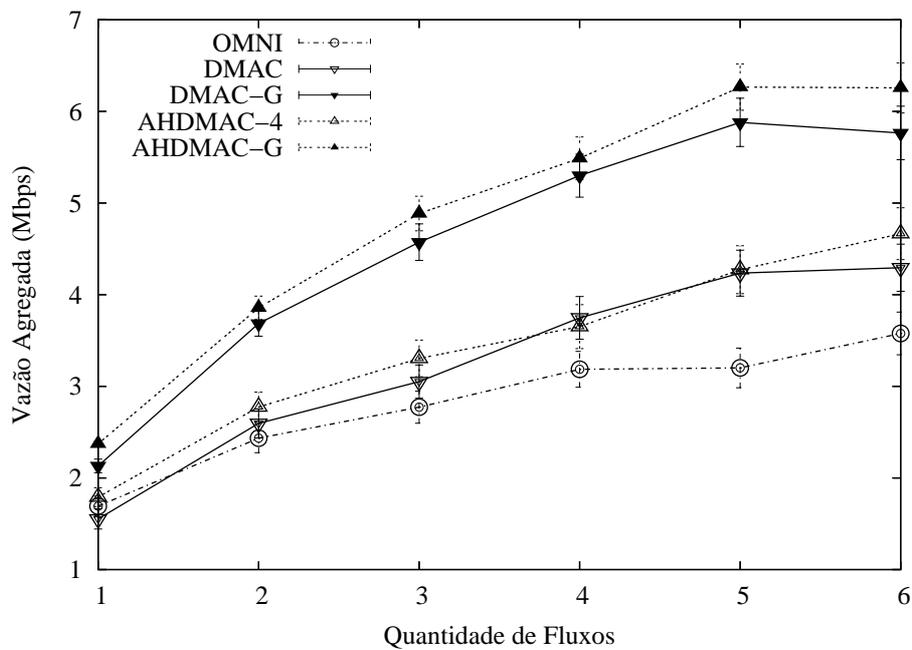


Figura 4.49: Vazão na comunicação do cenário aleatório.

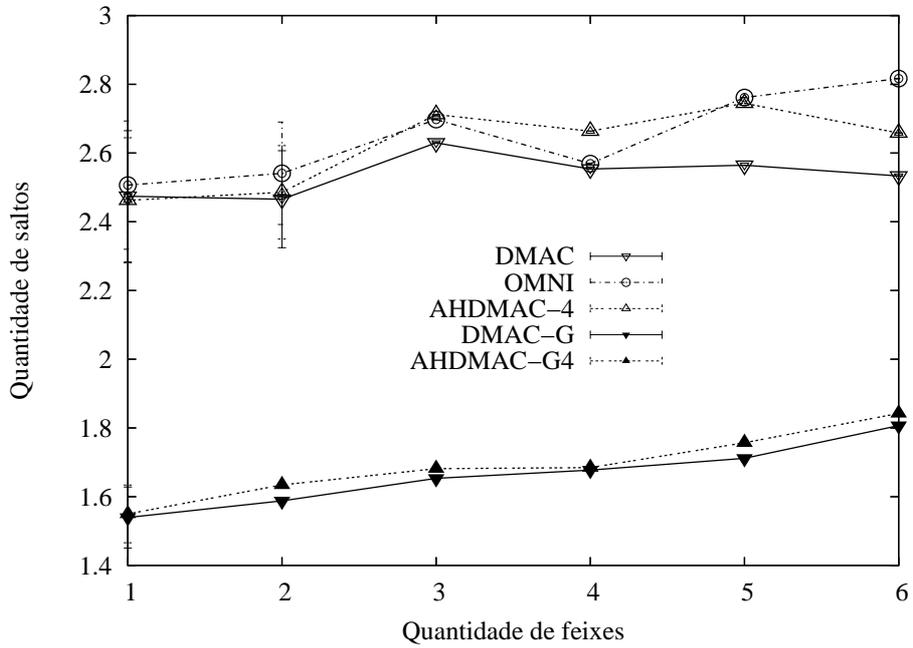


Figura 4.50: Quantidade de saltos na comunicação do cenário aleatório.

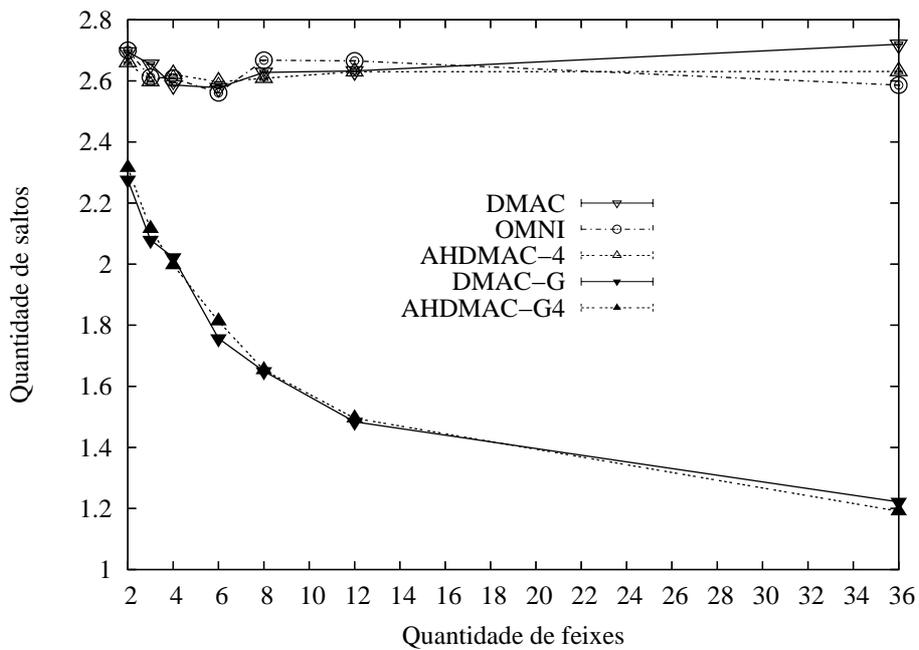


Figura 4.51: Quantidade de saltos na comunicação do cenário aleatório.

Capítulo 5

Conclusão

ESTE trabalho abordou o problema da surdez nas redes IEEE 802.11 no modo *ad hoc* de múltiplos saltos utilizando antenas direcionais. Uma métrica para mensurar os efeitos da surdez, o índice de surdez, foi aqui proposta. 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. Através de simulações constatou-se a eficiência do AHDMAC em reduzir o índice de surdez encontrado em uma rede direcional utilizando o protocolo DMAC. Na maior parte dos casos, o AHDMAC consegue obter um índice de surdez menor que o modo OMNI.

A proposta básica do AHDMAC consiste na introdução de um tempo de espera no feixe utilizado permitindo a re-transmissão do quadro sem disputa pelo meio, de forma a eliminar a surdez intrínseca. Foram propostas quatro versões diferentes do AHDMAC que compartilham os parâmetros multiplicadores de tempo de espera N_{slots} e N_{nav} . A versão AHDMAC-2 contém uma verificação de rota eliminando o tempo de espera desnecessário na transmissão feita para o destino. A verificação de uma quantidade de quadro em *buffer* de transmissão N_{queue} é feita pelo AHDMAC-3 antes do início da contagem do tempo de espera. Por fim, a versão AHDMAC-4 realiza ambos os mecanismos de verificação de *buffer* e rota.

Na simulação do protocolo AHDMAC identificou-se a existência de um efeito negativo na vazão das comunicações de múltiplos saltos inerente ao padrão IEEE 802.11 ao

qual chamou-se de efeito EIFS. A solução proposta, o AHDMAC, possui uma menor influência destes efeitos negativos em comparação com o DMAC. A combinação do efeito EIFS com a surdez intrínseca resulta em uma forte diminuição da vazão para os modos puramente direcionais, com efeitos mais fortes no modo DMAC. O efeito EIFS é percebido por um nó em uma zona de interferência, com a eliminação da zona de interferência os modos direcionais obtêm um melhor desempenho quando feita a comparação com os seus desempenhos em um cenário com a existência de uma zona de interferência. Por outro lado, a inexistência da zona de interferência não melhora o desempenho do modo OMNI.

Na simulação de uma comunicação com 5 saltos e taxa de emissão de 2,5 Mbps realizada neste trabalho, o AHDMAC é quase 50% superior ao DMAC e cerca de 35% superior ao OMNI. Com a adição do aumento de alcance aos modos direcionais, verifica-se que o AHDMAC-G é 88% superior ao OMNI e 74% superior ao DMAC-G.

Em um cenário com variação da quantidade de nós em uma comunicação de múltiplos saltos em topologia linear, verificou-se que o modo OMNI apresenta um maior decaimento de vazão quando comparado com os modos direcionais. Nas simulações realizadas, constatou-se que o AHDMAC supera o modo OMNI e também o DMAC para taxas de emissão de 2,5 Mbps para 4 ou mais nós. Nas comunicações com 6 ou mais saltos, o modo DMAC é superior ao OMNI. Desta forma, verificou-se que em rotas com grandes quantidades de saltos o DMAC pode superar o OMNI. Por outro lado, o aumento de alcance faz com que o AHDMAC-G tenha o melhor resultado para qualquer tamanho de rota, apenas empatando com o DMAC-G para uma comunicação de 3 nós. Desta forma, a proposta deste trabalho permite aos modos direcionais se beneficiarem do aumento de alcance e também diminui o efeito negativo das topologias lineares.

Na simulação do cenário de grade 5x5 no modo linhas, o AHDMAC obteve um resultado 33% maior que o modo DMAC e 48% melhor que o modo OMNI para uma taxa de emissão de 5 Mbps. Para a grade 5x5 com comunicações aleatórias, o AHDMAC-G foi 90% superior ao OMNI para taxas de emissão de 5 Mbps, enquanto que o AHDMAC foi 53% superior. Em todos os cenários de simulação em topologia de grade, o AHDMAC obteve resultado superior ao DMAC para taxas de emissão acima da taxa de saturação.

Desta forma, para os cenários em grade, o AHDMAC consegue um resultado melhor que o DMAC em todos os casos independentemente da forma de estabelecimento das comunicações. Por outro lado, os modos com aumento de alcance não são beneficiados nos casos com comunicação em topologias lineares, e em muitos casos possuem desempenho inferior aos respectivos modos sem aumento de alcance. Contudo, o AHDMAC-G consegue obter maior benefício do aumento de alcance do que o DMAC-G. Nos cenários em grade com comunicações aleatórias, os modos com aumento de alcance conseguem uma melhora de desempenho significativa com relação aos modos sem aumento de alcance.

Nos cenários completamente aleatórios, não foi possível diferenciar os modos AHDMAC e DMAC, no entanto, é possível identificar a tendência de que o AHDMAC tenha um desempenho superior ao DMAC. Contudo, nestes cenários, os modos com aumento de alcance conseguem os melhores resultados quando comparados com os modos sem aumento de alcance. Os modos AHDMAC e DMAC, nestes cenários, ficam com resultados próximos ao modo OMNI, enquanto que os modos AHDMAC-G e DMAC-G conseguem resultados muito superiores. No cenário completamente aleatório simulado com 5 fluxos de 2,5 Mbps, o modo AHDMAC-G obteve desempenho cerca de 35% superior ao modo AHDMAC, e 77% superior ao modo OMNI. Conforme esperado, em cenários de topologia aleatória, o aumento de alcance proporciona uma melhora de desempenho mais significativa do que a obtida em cenários com algum grau de linearidade.

As simulações realizadas mostram que o maior alcance de um nó com antena direcional possibilita a formação de rotas com menores quantidades de saltos e com conseqüente maior vazão agregada. Contudo, neste trabalho verificou-se uma condição ótima com relação à quantidade de feixes a ser utilizada para os cenários simulados. De uma forma geral, pode-se recomendar a utilização de sistemas com 8 ou mais feixes, pois em alguns cenários simulados, sistemas direcionais com menos de 8 feixes obtiveram desempenho inferior ao modo OMNI. Por outro lado, em todos os cenários simulados, foi encontrado um formato de degrau para a curva da quantidade de saltos com relação a diretividade do sistema. Cabe notar que quanto maior a quantidade de feixes, maior o alcance da transmissão, o que possibilita a formação de uma rota com menor quantidade de saltos. De uma forma geral, com a utilização de até 8 ou 12 feixes, a curva do tamanho da rota permaneceu em seu degrau de maior valor, para valores maiores de quantidade de feixes,

o degrau da rota possui um valor significativamente menor.

Desta forma, neste trabalho foi proposto um mecanismo que possibilita que prevaleçam os benefícios do uso de antenas direcionais, tais como a reutilização do espaço e formação de rotas com menores quantidades de saltos, frente aos problemas que surgem com o seu uso, tais como a surdez e o efeito EIFS aqui identificado. Resumidamente, a proposta deste trabalho, o protocolo AHDMAC, permite que uma rede IEEE 802.11 *ad hoc* de múltiplos saltos aumente sua performance com relação à vazão e que a dependência da topologia das redes direcionais seja diminuída.

5.1 Trabalhos Futuros

Como continuação deste trabalho, uma série de linhas de pesquisa podem ser indicadas. Primeiramente, um estudo pode ser feito para estender o nível de otimização *cross-layer* alcançado. Neste trabalho eliminou-se o efeito negativo da contenção desnecessária quando a comunicação é direta entre fonte e destino através da verificação do tamanho da rota para o destino. Conforme aqui verificado, existe uma forte indicação de que o parâmetro N_{slots} do protocolo AHDMAC possa ser utilizado de forma variável com o tamanho da rota para otimizar o resultado alcançado com o AHDMAC. Desta forma, esta otimização pode ser estudada com o intuito de melhorar ainda mais o desempenho obtido.

Um detalhamento temporal das comunicações pode ser realizado de forma a explicar alguns comportamentos de difícil entendimento. Desta forma, esta frente de trabalho se resume em se traçar linhas de tempo das transmissões de cada nó envolvido em uma comunicação de forma proporcional ao tempo efetivamente gasto. Esta linha de trabalho pode ser realizada através da geração de *logs* detalhados das simulações, que não foram produzidos neste trabalho, para posterior análise. Assim, espera-se que alguns comportamentos inexplicados possam ser entendidos de uma forma sistemática e direta.

Por outro lado, vislumbra-se que a utilização de antenas direcionais com suas adaptações necessárias para redes *ad hoc* em conjunto com as técnicas de controle de potência possa acarretar em um alto nível de re-utilização espacial. Adicionalmente, com a otimi-

zação da energia gasta e com conseqüente diminuição do nível de interferência da rede. Caso seja atingido o objetivo de acumular os benefícios atingidos por estas técnicas de forma isolada, o ganho acumulado esperado será significativo.

Nesta dissertação verificou-se que os sistemas com antenas direcionais são fortemente influenciados pela relação entre as zonas de recepção e interferência. Os resultados para os modos direcionais onde a zona de interferência é nula, são superiores aos resultados obtidos onde a zona de interferência é existente. Uma investigação detalhada destes efeitos pode revelar que os valores adotados para estas regiões podem não ser adequados para uso em redes direcionais.

Por fim, outros aspectos podem ser estudados com relação ao uso de antenas direcionais. Com o aumento de alcance e conseqüente formação de rotas menores, espera-se uma diminuição nos tempo de latência. Este aspecto é de grande importância para aplicações em tempo real ou interativas, onde a latência e o *jitter* são aspectos determinantes.

Referências Bibliográficas

- [1] IEEE. *IEEE Standard 802.11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications*, 1999.
- [2] IEEE. *IEEE Standard 802.3: Carrier Sense Multiple Access With Collision Detection (CSMA/CD) Access Method and Physical Layer Specifications*, março de 2002.
- [3] LIBERTI, J. C., E RAPPAPORT, T. S. *Smart Antennas for Wireless Communications: IS-95 and Third Generation CDMA Applications*. Prentice Hall, abril de 1995.
- [4] RAPPAPORT, T. S. *Smart Antennas: Adaptive Arrays, Algorithms and Wireless Position Location*. IEEE Press, setembro de 1998.
- [5] NASIPURI, A., YOU, S. Y. J., E HIROMOTO, R. E. A MAC Protocol for Mobile Ad Hoc Networks using Directional Antennas. In *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)* (2000).
- [6] NASIPURI, A., MANDAVA, J., MANCHALA, H., E HIROMOTO, R. E. On-Demand Routing Using Directional Antennas in Mobile Ad Hoc Networks. In *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)* (2000).
- [7] CHOUDHURY, R. R., YANG, X., RAMANATHAN, R., E VAIDYA, N. H. Using Directional Antennas For Medium Access Control in Ad Hoc Networks. In *ACM Mobicom* (setembro de 2002).
- [8] CHOUDHURY, R. R., E VAIDYA, N. H. On Designing MAC Protocols for Wireless Networks using Directional Antennas. *IEEE Transactions of Mobile Computing (TMC)* (2005).

- [9] CHOUDHURY, R. R., E VAIDYA, N. H. Impact of Directional Antennas on Ad Hoc Networks Routing. In *Personal and Wireless Communication (PWC)* (2003).
- [10] CHOUDHURY, R. R., E VAIDYA, N. H. Performance of Ad Hoc Routing Using Directional Antennas. *Journal of Ad Hoc Networks - Elsevier Publishers* (novembro de 2004).
- [11] JOHNSON, D. B., MALTZ, D. A., E BROCH, J. Dynamic Source Routing in Ad Hoc Wireless Networks. In *Mobile Ad Hoc Network (MANET) Working Group, IETF* (março de 1998).
- [12] KORAKIS, T., JAKLLARI, G., E TASSIULAS, L. A MAC Protocol for Full Exploitation of Directional Antennas in Ad-hoc Wireless Networks. In *ACM MobiHoc* (2003).
- [13] WANG, Y., E GARCIA-LUNA-ACEVES, J. Spatial Reuse and Collision Avoidance in Ad Hoc Networks with Directional Antennas. In *IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM)* (2002).
- [14] ZENG, X., BAGRODIA, R., E GERLA, M. GloMoSim: a Library for Parallel Simulation of Large-scale Wireless Networks. In *12th Workshop on Parallel and Distributed Simulations* (maio de 1998).
- [15] RAMANATHAN, R. On the Performance of Ad Hoc Networks with Beamforming Antennas. In *ACM MobiHoc* (2001).
- [16] *OPNET*. <http://www.opnet.com>, acesso em 12 de março de 2006.
- [17] TAKAI, M., MARTIN, J., REN, A., E BAGRODIA, R. Directional Virtual Carrier Sensing for Directional Antennas in Mobile Ad Hoc Networks. In *ACM MOBIHOC* (junho de 2002).
- [18] *MATLAB User's Guide*. <http://www.mathworks.com>, acesso em 12 de março de 2006.
- [19] *QualNet User's Manual*. <http://www.qualnet.com>, acesso em 12 de março de 2006.

- [20] IEEE. *IEEE Standard 802.11a: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications - High-speed Physical Layer in the 5 GHz Band*, 1999.
- [21] IEEE. *IEEE Standard 802.11b: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications - High-speed Physical Layer in the 2,4 GHz Band*, 1999.
- [22] IEEE. *IEEE Standard 802.11g: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications - High-speed Physical Layer in the 2,4 GHz Band*, 2003.
- [23] CHOUDHURY, R. R., UEDA, T., E BORDIM, J. BeamNet: Ad Hoc Networking Testbed Using Beamforming Antennas. In *IEEE Vehicular Technology Conference (VTC) (2005)*.
- [24] RAMANATHAN, R., REDDI, J., SANTIVANEZ, C., WIGGINS, D., E POLIT, S. Ad Hoc Networking with Directional Antennas: A Complete System Solution. *Journal of Selected Areas in Communications* (janeiro de 2005).
- [25] FALL, K., E VARADHAN, K. *The ns Manual*. UC Berkeley, LBL, USC/ISI, and Xerox PARC, abril de 2002. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/ns-documentation.html>, acesso em 12 de março de 2006.
- [26] PERKINS, C., E ROYER, E. Ad-hoc On-demand Distance Vector Routing. In *IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications* (fevereiro de 1999).
- [27] NASIPURI, A., LI, K., E SAPPIDI, U. R. Power Consumption and Throughput in Mobile Ad Hoc Networks using Directional Antennas. In *IEEE International Conference on Computer Communication and Networks (ICCCN) (2002)*.
- [28] TAKAI, M., ZHOU, J., E BAGRODIA, R. Adaptive Range Control Using Directional Antennas in Mobile Ad Hoc Networks. In *MSWiM (ACM International Workshop on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems)* (2003).

- [29] CHOUDHURY, R. R., E VAIDYA, N. H. Deafness: A Problem in Ad Hoc Networks when using Directional Antennas. In *University of Illinois at Urbana-Champaign Technical Report* (2003).
- [30] ROCHA, R. R., COSTA, L. H. M. K., E REZENDE, J. F. Uma Análise de Desempenho de Redes Ad Hoc de Múltiplos Saltos Utilizando Antenas Direcionais. In *XXI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações - SBT'2004* (setembro de 2004).
- [31] CHOUDHURY, R. R., E VAIDYA, N. H. Deafness: A MAC Problem in Ad Hoc Networks when Using Directional Antennas. In *IEEE International Conference on Network Protocols (ICNP)* (2004).
- [32] CHOUDHURY, R. R., E VAIDYA, N. H. Capture-Aware Protocols for Wireless Multihop Networks Using Multi-Beam Antennas. Relatório técnico, University of Illinois at Urbana-Champaign.