

CONTROLE DE POTÊNCIA EM REDES AD HOC 802.11

Alexandre Andrade Pires

TESE 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. Celso Carneiro Ribeiro, Dr.

Prof. Edmundo Albuquerque de Souza e Silva, Ph. D.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

JULHO DE 2005

PIRES, ALEXANDRE ANDRADE

Controle de Potência em Redes *Ad Hoc*
802.11 [Rio de Janeiro] 2005

XIII, 90 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ,
M.Sc., Engenharia Elétrica, 2005)

Tese (Mestrado) - Universidade Federal do
Rio de Janeiro, COPPE

1. Redes *Ad Hoc*
2. Conservação de Energia
3. Controle de Potência
4. Redes IEEE 802.11

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

Ao meu pai, Mario, e minha mãe, Regina, meus exemplos de vida e conduta.

Agradecimentos

A Deus, por fazer-me capaz de perseguir meus objetivos.

À minha namorada, Juliana, por ser minha parceira e cúmplice, não somente nesta, mas também em muitas outras jornadas.

Ao professor José Ferreira de Rezende, não só pela orientação, mas pela compreensão, rigor e amizade, sempre nos momentos exatos.

A todos os companheiros da Divisão de Tecnologia da Informação do CTEEx, por compartilharem comigo o dia-a-dia desta conquista.

Ao Centro Tecnológico do Exército Brasileiro, pelo tempo disponibilizado para o desenvolvimento deste trabalho e estímulo ao aperfeiçoamento de seu corpo técnico.

Aos companheiros e professores do Grupo de Teleinformática e Automação (GTA) /COPPE da Universidade Federal do Rio de Janeiro, pelo apoio e amizade.

À CAPES, CNPq, FAPERJ, FINEP, FUNTEL e RNP pelos recursos utilizados para essa pesquisa.

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

CONTROLE DE POTÊNCIA EM REDES *AD HOC* 802.11

Alexandre Andrade Pires

Julho/2005

Orientador: José Ferreira Rezende

Programa: Engenharia Elétrica

A utilização racional dos recursos de energia é de suma importância em uma rede sem fio. Especialmente quando terminais são agrupados formando uma rede ad hoc, já que a participação de todas as estações no roteamento representa um consumo de energia ainda maior. O controle da potência de transmissão dos terminais constitui uma importante área de pesquisa neste contexto. O presente trabalho, além de apresentar e discutir os mecanismos de controle de potência já existentes, propõe novos métodos capazes de possibilitar não só a economia de energia, como também uma maior eficiência no uso do canal. Além disso, os mecanismos propostos foram projetados para oferecer uma maior proteção às transmissões em potência reduzida, evitando que os benefícios obtidos com o controle de potência sejam reduzidos por causa de um aumento de colisões, efeito observado em alguns dos esquemas anteriores. Por fim, os resultados de simulação comprovam um melhor desempenho, ao comparar as propostas com os principais mecanismos da literatura.

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

POWER CONTROL ON 802.11 *AD HOC* NETWORKS

Alexandre Andrade Pires

July/2005

Advisor: José Ferreira Rezende

Department: Electrical Engineering

Efficient management of energy resources represents a serious requirement in wireless networks. When wireless devices are grouped to create an *ad hoc* network, energy conservation becomes an even more important issue, as nodes are required to participate in the routing task. Transmission power control constitutes an important research area in this scenario. This work, besides presenting power control mechanisms suggested by other authors, proposes new methods that are able to save energy and at the same time to provide a higher efficiency on channel utilization. Moreover, proposed mechanisms are designed to offer a higher protection to reduced power transmissions. This extra protection guarantees that power control advantages will not be reduced by the effect of increased collisions, a phenomenon observed in some previous schemes. Simulation results show a significant improve in performance, when comparing the proposed schemes to other methods from literature.

Lista de Acrônimos

ACK:	<i>Acknowledge;</i>
ALCA:	<i>Asymmetric Links Collision Avoidance;</i>
BER:	<i>Bit Error Rate;</i>
CA:	<i>Collision Avoidance;</i>
CBR:	<i>Constant Bit Rate;</i>
COMPOW:	<i>Common Power Protocol;</i>
CSMA:	<i>Carrier-Sense Multiple Access;</i>
CSThresh:	<i>Carrier-Sensing Threshold;</i>
CTS:	<i>Clear to Send frame;</i>
DATA:	<i>Data frame;</i>
DBTMA:	<i>Dual Busy Tone Multiple Access;</i>
DCF:	<i>Distributed Coordination Function;</i>
DIFS:	<i>Distributed Inter-Frame Space;</i>
DP:	<i>Duração de Portadora;</i>
DSR:	<i>Dynamic Source Routing;</i>
EB:	<i>Esquema Básico;</i>
EBM:	<i>Esquema Básico com Memória;</i>
EIFS:	<i>Extended Inter-Frame Space;</i>
FN:	<i>Farthest Neighbor;</i>
GPC:	<i>Generalized Power Control</i>
HRP:	<i>Hello-Reply frame;</i>

HRQ:	<i>Hello-Request frame;</i>
IDTC:	Informação de Duração da Transmissão Corrente;
IEEE:	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers;</i>
MAC:	<i>Medium Access Control;</i>
MACA:	<i>Medium Access - Collision Avoidance;</i>
MCP:	Módulo de Controle de Potência;
MSINR:	Módulo de SINR;
MV:	Módulo de Vizinhança;
NAV:	<i>Network Allocation Vector;</i>
PARO:	<i>Power-Aware Routing Optimization;</i>
NS:	<i>Network Simulator;</i>
PCF:	<i>Point Coordination Function;</i>
PCM:	<i>Power Control MAC;</i>
PCMA:	<i>Power Controlled Multiple Access;</i>
PCMAC:	<i>Power Controlled MAC;</i>
RTS:	<i>Request to Send frame;</i>
RXThresh:	<i>Receiving Threshold;</i>
SIFS:	<i>Short Inter-Frame Space;</i>
SINR:	<i>Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio;</i>
TCP:	<i>Transmission Control Protocol;</i>
ZDP:	Zona de Detecção de Portadora;
ZR:	Zona de Recepção;

Sumário

Resumo	v
Abstract	vi
Lista de Acrônimos	vii
Lista de Figuras	xii
1 Introdução	1
1.1 Motivação	1
1.2 Objetivos	5
1.3 Organização da Dissertação	6
2 Controle de Potência em Redes 802.11	8
2.1 Resumo do Protocolo MAC 802.11	9
2.2 Esquemas de Controle de Potência em Redes Ad Hoc	13
2.2.1 Controle de Potência em conjunto com Roteamento e Escalo- namento	15
2.2.2 Controle de Potência utilizando Canais Adicionais	17
2.2.3 Controle de Potência utilizando os Quadros de Controle 802.11	19

<i>SUMÁRIO</i>	x
Esquema Básico	21
O Problema dos Enlaces Assimétricos	24
PCM: <i>Power Control MAC</i>	25
2.3 Considerações sobre Controle de Potência em Redes 802.11	27
3 Propostas	29
3.1 EBM: Esquema Básico com Memória	31
3.2 ALCA: Asymmetric Links Collision Avoidance	33
3.3 FN-ALCA: Reservando o canal de forma seletiva	36
3.3.1 FN: Farthest Neighbor	38
3.3.2 Protocolo Completo: FN-ALCA	39
3.4 Considerações sobre as Propostas	40
4 Modificações no Simulador	42
4.1 Módulo de Controle de Potência	44
4.1.1 EB, EBM e PCM	45
4.1.2 ALCA e FN-ALCA	48
4.2 Módulo de SINR	50
4.3 Módulo de Vizinhança	53
4.4 Considerações sobre as Modificações Realizadas	54
5 Resultados de Simulação	56
5.1 Modelo de Simulação	56
5.2 Esquema Básico com Memória	58

<i>SUMÁRIO</i>	xi
5.2.1 Topologia	58
5.2.2 Resultados	59
5.3 Esquema Básico com ALCA	63
5.3.1 Topologia	63
5.3.2 Resultados	65
Cenário 1	65
Cenário 2 - Variando a área	67
Cenário 2 - Variando a taxa CBR	69
5.4 FN-ALCA	69
5.4.1 Topologia	71
5.4.2 Resultados	71
5.5 Considerações sobre os Resultados Obtidos	74
6 Conclusões e Trabalhos Futuros	79
6.1 Conclusões	80
6.2 Trabalhos Futuros	83
Referências Bibliográficas	85

Lista de Figuras

2.1	Utilização do contador NAV.	10
2.2	Zonas definidas ao redor de um transmissor.	11
2.3	Comportamento dos terminais na ZR e na ZDP.	12
2.4	Esquema Básico	22
2.5	Redução da ZDP.	25
2.6	Problema dos Enlaces Assimétricos.	26
2.7	<i>Power Control MAC</i>	27
3.1	Requisitos e respectivas linhas de ação adotadas.	30
3.2	Redução da área reservada para a transmissão.	32
3.3	Estratégia utilizada.	34
3.4	Topologia prejudicial ao EBM.	37
4.1	Modificações no simulador.	44
4.2	Implementação do Esquema Básico.	46
4.3	Escolha da Duração de Portadora.	49
4.4	Escolha do EIFS utilizado.	51
4.5	Troca de pacotes HRQ-HRP.	54

5.1	Topologia para avaliação do EBM.	59
5.2	EBM - vazão e energia consumida (1024 B).	60
5.3	EBM - vazão e energia consumida (128 B).	62
5.4	Avaliação do ALCA - Cenário 1.	64
5.5	ALCA - Cenário 1.	66
5.6	ALCA - Cenário 2: Variando a área.	68
5.7	ALCA - Cenário 2: Variando a taxa CBR.	70
5.8	Comparação do ALCA com os demais esquemas.	72
5.9	FN-ALCA - Área: 1 km²	74
5.10	FN-ALCA - Área: 2,25 km²	75
5.11	FN-ALCA - Área: 4 km²	76

Capítulo 1

Introdução

1.1 Motivação

Nos últimos anos, tem se tornado comum o estabelecimento de redes de comunicação sem fio. Antes restrita a grupos de radio-amadorismo e sistemas de telefonia celular, esta tecnologia vem ganhando espaço em empresas e residências. A demanda é explicada pela facilidade da implantação, que não exige a passagem de cabos, bem como pelos benefícios trazidos pela mobilidade. Com o avanço das tecnologias capazes de suportar este tipo de serviço, particularmente o padrão IEEE 802.11 [1, 2, 3], o custo dos equipamentos vem caindo bastante ao longo do tempo, o que torna a comunicação sem fio ainda mais atrativa.

As redes sem fio podem ser classificadas em dois tipos principais. O mais comumente utilizado nos dias atuais é o tipo infra-estruturado, no qual cada terminal sem fio comunica-se com um único equipamento, responsável por intermediar as comunicações. Este é o caso, por exemplo, de redes de telefonia celular. Um outro tipo de rede, denominado *ad hoc*, dispensa a existência de qualquer infra-estrutura física. Neste tipo de rede, o encaminhamento dos pacotes é realizado pelos próprios terminais que compõem a rede. Redes *ad hoc* podem ser empregadas em situações onde existe a necessidade de comunicação cooperativa e temporária entre um certo grupo de usuários, tais como operações de emergência em casos de desastres natu-

rais e reuniões que exigem comunicação de dados entre os participantes. Mais ainda, tendo em vista sua inerente flexibilidade, redes *ad hoc* têm sido utilizadas em aplicações militares, especialmente naquelas desenvolvidas em regiões onde é inviável a implantação prévia de uma infra-estrutura destinada às comunicações.

Terminais de computação móveis são, geralmente, empregados quando se exige mobilidade e portabilidade, o que os torna objeto de sérias restrições de peso e dimensão. Devido a tais restrições, a utilização de baterias de grande capacidade torna-se inviável. Assim, estes equipamentos são em sua maioria alimentados por baterias leves e compactas, o que em geral representa uma redução significativa em sua autonomia de operação.

A interface de comunicação sem fio é responsável por mais de 50% da energia total gasta por um terminal móvel, mesmo tratando-se de um equipamento de razoável capacidade de computação [4, 5]. Quando terminais desse tipo são agrupados formando uma rede *ad hoc*, o problema é ainda mais acentuado, já que o roteamento, ou seja, o encaminhamento de pacotes, deve ser realizado pelos próprios terminais que compõem a rede, exigindo deles um maior consumo de energia. Além disso, a energia dos terminais passa a ser um recurso global da rede e não restrito às próprias estações. Desta forma, o gerenciamento das reservas de energia de cada terminal ganha substancial importância, uma vez que ele efetivamente determina o tempo de vida da rede.

Vários trabalhos recentes [6, 7, 8, 9, 10, 11, 12] têm proposto métodos para atingir um menor consumo de energia. A grande maioria focada no padrão IEEE 802.11 [1, 3]. Entre as áreas mais pesquisadas pode-se destacar a que visa elaborar novas técnicas de roteamento que levem em conta o estado atual de energia dos terminais, tentando escolher rotas que maximizem o tempo de vida da rede [7, 8, 9, 10]. Estas técnicas baseiam-se na premissa de que o consumo total de energia é menor quando são utilizados vários saltos (*hops*) curtos, em baixa potência, do que um único salto longo, em alta potência [13].

Uma outra área de grande importância nesse contexto tem por objetivo minimizar o consumo da rede com técnicas de controle da potência de transmissão. A

idéia principal consiste em utilizar numa transmissão o nível mínimo de potência necessário para a manutenção da comunicação, evitando desperdício de energia.

Além de um melhor aproveitamento da energia dos terminais, o controle de potência pode oferecer ainda um maior reuso espacial do canal, resultando em uma menor contenção no meio e aumentando a vazão agregada da rede. Este efeito é decorrente da diminuição da potência média das transmissões, o que representa a possibilidade de um maior número de transmissões simultâneas na rede. Adicionalmente, ao reduzir a potência das transmissões, o controle de potência reduz a interferência no interior do canal, resultando em uma menor probabilidade de erros de transmissão.

As técnicas de controle de potência são implementadas através do uso de uma malha fechada, na qual informações de potência são realimentadas do receptor para o transmissor. Assim, de posse destas informações, o transmissor em questão pode ajustar o nível de sua potência de transmissão ao valor considerado adequado [11, 14, 12].

Três abordagens diferentes têm sido utilizadas para realizar a implementação da realimentação de informações do receptor para o transmissor. A primeira delas utiliza a criação de um novo canal separado de controle, no qual seriam enviados os dados referentes ao controle de potência. Este tipo de abordagem é utilizado atualmente em redes de telefonia celular, no qual as estações rádio-base (ERBs) trocam dados com os terminais móveis para o controle de potência de transmissão por meio de um canal de dados dedicado, separado do canal para transmissão de voz. A segunda abordagem, semelhante à primeira, seria a implementação de um novo canal para a transmissão de tons de ocupado (*busy tones*). A diferença desta abordagem para a primeira reside no fato de que, com o uso de *busy tones*, as informações de potência são transmitidas exclusivamente através da potência dos tons de ocupado, não sendo transmitida qualquer informação através de quadros de dados. Isto representa uma menor necessidade de largura de banda, além da possibilidade de transmitir as informações de potência não só ao transmissor em questão, mas também a todos os demais terminais que estejam ao alcance do tom. A terceira abordagem consiste na

inclusão de campos adicionais nos quadros do protocolo IEEE 802.11 (*RTS - CTS - DATA - ACK*), a fim de abrigar as informações de controle de potência. Os quadros citados são padronizados pelo padrão IEEE 802.11. Quando um terminal *A* deseja transmitir para um terminal *B*, ele inicialmente envia um quadro *RTS*, que deve ser respondido por *B* com um quadro *CTS*. Só então o terminal *A* enviará os dados, através do quadro *DATA*. Após isso, o terminal *B* indicará o sucesso da transmissão com um quadro *ACK*. Como estes quadros já são originalmente trocados entre transmissor e receptor ao longo da transmissão de uma certa quantidade de dados, a malha de realimentação já estaria estabelecida.

As duas primeiras abordagens geralmente representam bons resultados, tendo em vista que as informações de potência podem ser trocadas em tempo real, ao longo da transmissão dos dados, pelo canal separado. Entretanto, estes esquemas exigem a disponibilidade de dois transeptores em cada terminal, o que as torna soluções caras e complicadas.

Desta forma, as propostas que sugerem a inclusão de campos de informação adicionais nos quadros de dados e de controle do padrão 802.11, representam uma solução simples, exigindo apenas mudanças no *firmware* dos equipamentos 802.11, e têm recebido especial atenção por parte dos pesquisadores. No entanto, o principal ponto fraco nesta abordagem consiste na criação de enlaces assimétricos entre terminais que disputam o meio. Isto ocorre quando as potências de transmissão dos terminais são diferentes, devido ao controle de potência estabelecido. Os enlaces assimétricos aumentam substancialmente a probabilidade de colisão, colocando em risco os ganhos obtidos com o controle de potência. Por outro lado, soluções distribuídas que visam a escolha de uma potência comum de transmissão entre todos os terminais que compõem a rede são complexas, além de exigirem uma grande troca de informações.

Atualmente, tendo em vista as grandes perspectivas de aplicações envolvendo redes *ad hoc*, é crescente a demanda por soluções que propiciem um melhor aproveitamento da energia disponível nos terminais. Desta forma, a motivação para o estudo de técnicas controle de potência é consequência direta desta tendência. Mais

ainda, existe a necessidade da proposta de novos esquemas, capazes de serem a um só tempo, simples o suficiente para não produzirem grandes mudanças no *hardware* existente, e eficientes o bastante para lidar com dificuldades intrínsecas, como o problema dos enlaces assimétricos.

1.2 Objetivos

Esta dissertação concentra-se no estudo de técnicas de controle de potência para redes IEEE 802.11, baseadas na implementação de uma malha de realimentação estabelecida na troca dos quadros *RTS* - *CTS* - *DATA* - *ACK*.

Um mecanismo simples para a implementação desta malha, denominado Esquema Básico - EB [7, 11], constitui o ponto de partida para muitos outros esquemas propostos. Em poucas palavras, esta técnica se baseia na idéia de transmitir os quadros *RTS* e *CTS* em potência máxima, conseguindo com isso a reserva do canal para o restante da transmissão. A troca *RTS* - *CTS* é, assim, utilizada para determinar o nível mínimo de potência necessário para a comunicação, possibilitando a transmissão do *DATA* e do *ACK* em potência reduzida.

Os problemas inerentes ao Esquema Básico são herdados pela maioria dos trabalhos que baseiam-se nele. Pode-se identificar claramente, por exemplo, que o mecanismo não possibilita qualquer reuso espacial, já que a reserva do meio é sempre realizada em potência máxima. Desta forma, uma das principais promessas do controle de potência, que consiste no aumento da vazão agregada em função de um maior número de transmissões simultâneas, deixa de ser cumprida. Além disso, com a criação de enlaces assimétricos, consequência direta da redução de potência do quadro *DATA*, o número de colisões aumenta bastante, o que também representa aumento no número de retransmissões. Com isso, a economia de energia obtida com a redução de potência dos quadros *DATA* e *ACK* pode ser anulada em função do gasto adicional com retransmissões [6].

Desta forma, o objetivo principal deste trabalho, além do estudo de técnicas existentes, é a elaboração de um novo esquema de controle de potência capaz de

permitir um real acréscimo de vazão agregada na rede, ao mesmo tempo em que reduz o consumo das estações. Mais ainda, a nova técnica é capaz de solucionar o problema dos enlaces assimétricos, garantindo que a energia economizada com o controle de potência não seja desperdiçada com retransmissões. Além disso, sua implementação é simples a tal ponto de exigir apenas uma atualização de *firmware* para ser implementada em equipamentos 802.11 atuais.

Assim, a principal contribuição deste trabalho reside no conjunto de mecanismos que compõem a principal proposta, intitulada FN-ALCA (*Farthest Neighbor - Asymmetric Links Collision Avoidance*), bem como na avaliação de desempenho realizada por simulações, que demonstram a efetividade do novo esquema, quando comparado a outros esquemas. Além disso, pode-se ainda apontar as modificações realizadas no simulador utilizado, tanto no sentido de implementar as propostas a serem avaliadas, quanto no aspecto relativo a aperfeiçoamentos capazes de fazer com que as avaliações sejam as mais próximas possíveis das condições encontradas em redes reais.

1.3 Organização da Dissertação

Este trabalho encontra-se dividido em seis capítulos. Os dois primeiros fazem a apresentação do tema de pesquisa e fornecem o embasamento teórico para a compreensão das técnicas de controle de potência consideradas, bem como das particularidades do protocolo MAC 802.11 que possuem influência sobre alguns aspectos destas técnicas. Os demais capítulos abordam a apresentação das propostas que compõem o novo esquema de controle de potência, bem como sua avaliação por simulações. A organização detalhada é descrita a seguir:

- Capítulo 1 - Faz a introdução da dissertação, apresentando o tema de pesquisa;
- Capítulo 2 - Aborda os conceitos básicos relacionados ao protocolo MAC do padrão IEEE 802.11, bem como os principais trabalhos na área;
- Capítulo 3 - Apresenta os mecanismos que compõem a proposta FN-ALCA;

- Capítulo 4 - Apresenta as modificações realizadas no simulador utilizado, enfatizando sua importância para uma avaliação de resultados o mais realista possível;
- Capítulo 5 - Apresenta o ambiente de simulação, os cenários escolhidos para avaliar e os principais resultados obtidos; e
- Capítulo 6 - Traz as conclusões da dissertação e sugestões de continuação do trabalho.

Capítulo 2

Controle de Potência em Redes

802.11

Este capítulo aborda conceitos básicos sobre as principais técnicas de controle de potência já propostas anteriormente, fornecendo subsídios para o entendimento dos problemas e questões inerentes ao estudo contido nesta dissertação. O foco principal é mantido sobre os esquemas que implementam a malha fechada para troca de informações de controle de potência através da inclusão de campos adicionais nos quadros *RTS*, *CTS*, *DATA* e *ACK* do padrão, já que representam a solução mais simples e promissora para a realimentação destas informações.

Inicialmente, entretanto, é apresentado um resumo do protocolo MAC do padrão IEEE 802.11, com ênfase nos aspectos que possuem relação com as técnicas apresentadas.

Desta forma, a seção 2.1 apresenta o referido resumo, discutindo aspectos do protocolo MAC 802.11 importantes para o controle de potência. Em seguida, a seção 2.2 apresenta sucintamente os mecanismos de controle de potência anteriormente propostos. Além disso, é explicado em detalhes o mecanismo conhecido como Esquema Básico - EB, que constitui a base para várias outras propostas, e demonstrada sua principal deficiência, conhecida como problema dos enlaces assimétricos. Por fim, a seção 2.3 conclui o capítulo.

2.1 Resumo do Protocolo MAC 802.11

O padrão IEEE 802.11 define dois tipos de protocolo de acesso ao meio, sendo eles o PCF (*Point Coordination Function*) e o DCF (*Distributed Coordination Function*). O PCF é um esquema centralizado e o DCF é um esquema totalmente distribuído. Neste trabalho, consideraremos apenas o esquema DCF, que se aplica a redes *ad hoc*.

O DCF é baseado em CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*). Neste esquema, é utilizada a detecção física de portadora aliada à detecção virtual de portadora para diminuir a probabilidade de colisões entre os pacotes transmitidos entre as diversas estações que compartilham o meio.

A detecção física de portadora consiste na mera monitoração do canal compartilhado, visando determinar a presença de uma portadora de dados nesse canal. Existindo a portadora em questão, o meio é considerado ocupado. Já a detecção virtual de portadora vale-se de pacotes de controle, trocados antes de cada transmissão, para informar às demais estações da duração total da transmissão corrente, protegendo-a contra eventuais tentativas de acesso ao meio, que resultariam em colisão. Os pacotes trocados antes de cada transmissão real de dados são o *RTS* (*Request To Send*), enviado pela estação que deseja transmitir um pacote de dados, e o *CTS* (*Clear To Send*), enviado pela estação receptora, em resposta ao *RTS*.

Este mecanismo foi concebido com o intuito de lidar com um conhecido problema de redes sem fio, denominado terminal escondido. Este problema ocorre quando um receptor está ao alcance da transmissão de dois transmissores diferentes, que, por sua vez, encontram-se fora do alcance um do outro. Assim, se um dos transmissores estiver transmitindo dados para o receptor, o outro transmissor será incapaz de perceber a transmissão em curso. Por isso, é fácil perceber que, neste caso, a detecção física de portadora de nada valerá. Se este último transmissor desejar, poderá iniciar uma transmissão, sobrepondo-se à transmissão ora em curso. Como o receptor será incapaz de receber os dois pacotes de dados ao mesmo tempo, haverá uma colisão, e ambos os pacotes serão descartados. A proposta da troca de pacotes *RTS-CTS*

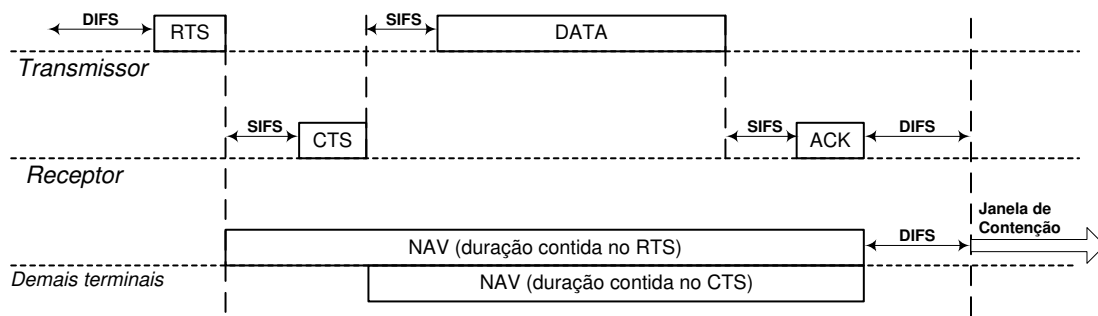


Figura 2.1: Utilização do contador NAV.

baseia-se na seguinte dinâmica: ao desejar transmitir, o primeiro transmissor enviará um *RTS* (*Request To Send*). Ao ouvir o *RTS*, o receptor responderá com um *CTS* (*Clear To Send*). Como o segundo transmissor está ao alcance do receptor, ele será capaz de ouvir a transmissão do *CTS*, percebendo que o meio estará ocupado por certo tempo, especificado no próprio pacote *CTS*.

Para realizar a detecção virtual de portadora, cada estação possui um contador denominado NAV (*Network Allocation Vector*), que indica o tempo restante de transmissões correntes. Recebendo um *RTS* ou um *CTS*, a estação será capaz de extrair a informação de duração da transmissão e colocá-la no contador NAV, o que a impedirá de tentar acessar o meio até que este tempo seja decorrido. Assim, é realizada a chamada detecção virtual de portadora, já que o meio é considerado ocupado até que o contador NAV seja zerado. A utilização do contador NAV é esquematizada na figura 2.1. Na figura, *DIFS* e *SIFS* são intervalos de tempo padronizados entre pacotes do protocolo 802.11.

Quando um pacote de dados é transmitido em uma rede sem fio, podem ser definidas duas diferentes zonas ao redor do transmissor. A primeira delas é denominada Zona de Recepção (ZR). Os receptores que se situam no interior da ZR recebem potência suficiente para que ocorra a correta recepção do pacote e decodificação dos dados.

A segunda área é conhecida como Zona de Detecção de Portadora (ZDP). Os receptores contidos na ZDP recebem potência suficiente para detectar a presença do sinal da transmissão no canal, podendo inclusive identificar os instantes de início e

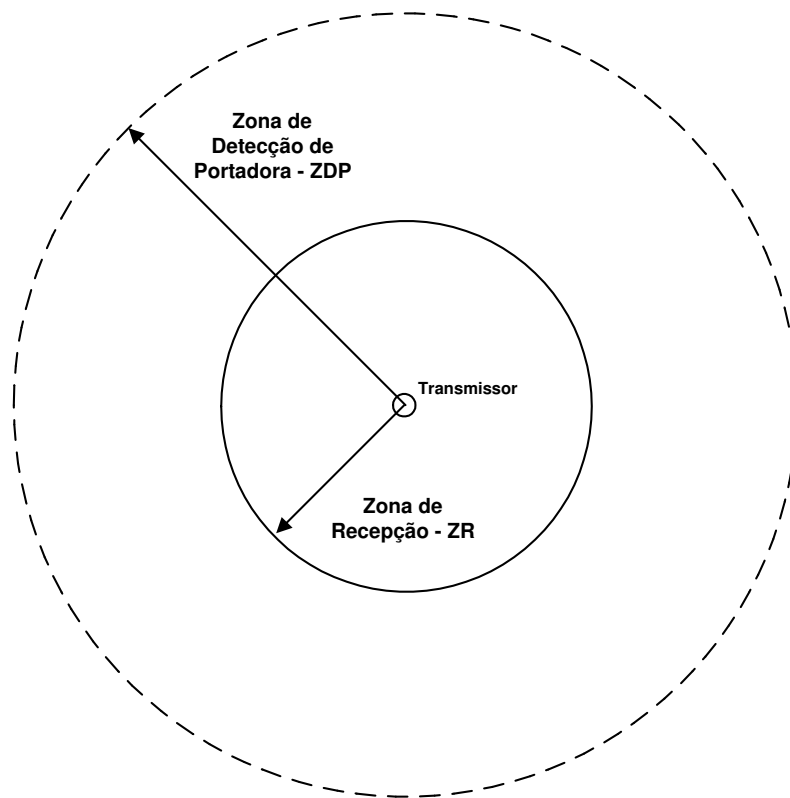


Figura 2.2: Zonas definidas ao redor de um transmissor.

término da transmissão. Entretanto, a potência recebida por esses terminais é insuficiente para que seja possível acessar os dados contidos no pacote. Nesta situação, o pacote será inevitavelmente descartado.

Por fim, os terminais que se situam fora das duas zonas anteriores recebem uma potência tão baixa durante a transmissão, que são incapazes de sequer detectar a presença de qualquer sinal no canal. A definição dessas zonas ao redor de um transmissor situado em um terreno plano e sem obstáculos é ilustrada na figura 2.2.

Considerando o esquema de acesso ao meio descrito, pode-se perceber que apenas os terminais que se encontram na Zona de Recepção podem extrair corretamente a informação de duração da transmissão do pacote de controle (*RTS* ou *CTS*). Já os terminais que estão na Zona de Detecção de Portadora apenas podem perceber a existência da portadora no meio, não possuindo, portanto, a informação de duração. Cabe ressaltar que, já que estes terminais estão na ZDP do transmissor em questão, considerando as transmissões simétricas, este também estará na ZDP destes termi-

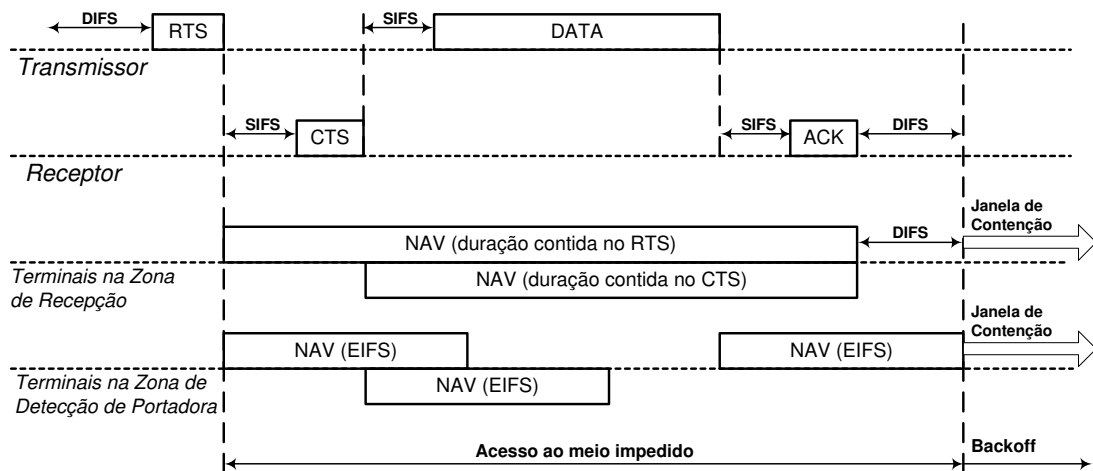


Figura 2.3: Comportamento dos terminais na ZR e na ZDP.

nais. Assim, se um deles decidir iniciar uma transmissão simultânea à preexistente, existirá significativa probabilidade de colisão. Assim, para suavizar essa probabilidade, o padrão estabelece que, no caso de um terminal apenas perceber a existência de portadora, sem recepção correta do pacote, ele deverá gravar em seu NAV um valor fixo, chamado EIFS (*Extended Inter Frame Space*), a partir do término do pacote em questão.

A figura 2.3 ilustra o comportamento dos demais terminais da rede, quando dois nós realizam uma comunicação. Os terminais na Zona de Recepção de um dos dois nós comunicantes são capazes de extrair a duração da transmissão dos pacotes *RTS* e *CTS*. Já os terminais na Zona de Detecção de Portadora, gravam o valor EIFS em seus contadores NAV, não acessando o meio até que ele se esgote.

Para uma transmissão de dados, composta pelos quadros *RTS-CTS-DATA-ACK*, a possibilidade de colisão por transmissão simultânea de um nó na área de detecção de portadora se dará quando o meio não está ocupado, ou seja, nos intervalos de tempo entre os pacotes *RTS-CTS*, *CTS-DATA* e *DATA-ACK*. Desta forma, o valor de EIFS deve ser grande o suficiente para, após terminado um pacote, o terminal não tente disputar o meio antes que o outro pacote daquela transmissão comece. Dado que o pacote seguinte já tenha começado, após a contagem de EIFS, o terminal testará o meio e perceberá que ele se encontra, novamente, ocupado, gravando

novamente em seu NAV o valor EIFS, conforme indica a figura 2.3. Desta forma, a transmissão corrente poderá terminar com segurança antes que um daqueles terminais na Zona de Detecção de Portadora tente realizar uma transmissão.

Por fim, é conveniente lembrar que o método de acesso ao meio descrito não elimina completamente a probabilidade de colisões ocorrerem [15]. O esquema apenas tenta reduzi-la ao máximo, protegendo tanto quanto o possível, a transmissão do pacote *DATA*, já que a probabilidade de colisão dele é bem mais alta do que a dos demais pacotes, por conta de sua maior duração.

2.2 Esquemas de Controle de Potência em Redes Ad Hoc

Vários tipos de mecanismos vêm sendo propostos, por diferentes autores, para implementar funcionalidades relativas ao controle de potência em redes *ad hoc* baseadas no padrão IEEE 802.11.

As promissoras vantagens do controle de potência já foram demonstradas em trabalhos como [16], onde os autores demonstram o potencial de economia de energia e de aumento de capacidade de um esquema denominado GPC, quando comparado ao padrão 802.11 puro. O GPC (*Generalized Power Control*) é um protocolo teórico ideal, que conta com o conhecimento global da rede, e segundo o qual, um terminal só pode iniciar uma transmissão se existir ao menos um nível de potência que satisfaça as duas restrições abaixo:

- Atingir o receptor pretendido em um nível de potência suficiente para garantir a correta recepção;
- Não causar a perda de uma comunicação já iniciada por extrapolar a margem de tolerância a interferência no receptor em questão.

A primeira condição implica em garantir a recepção do quadro em um nível de potência que sensibilize o receptor e, ao mesmo tempo, seja suficientemente maior

do que a interferência e o ruído para assegurar uma recepção sem erros. A segunda restrição implica em não penalizar comunicações correntes, o que deve ser sempre uma preocupação dos esquemas de controle de potência.

Os resultados desse trabalho demonstram de forma enfática que o uso de controle de potência, desde que realizado através de um mecanismo cuidadoso, sempre trará benefícios, tanto em economia de energia quanto na capacidade de redes *ad hoc*.

No trabalho [17], a proposta consiste em utilizar medições relativas às condições do canal de comunicação para adaptar parâmetros de transmissão de terminais 802.11. Os autores optaram por variar três parâmetros, sendo eles: o limiar de fragmentação, o limite de tentativas de transmissão e o nível de potência de transmissão. Mesmo utilizando um mecanismo simples, aumentando ou reduzindo o nível de potência de transmissão de acordo com o valor da taxa de erro de bit (*BER*) do canal, os resultados do trabalho comprovam a eficácia do ajuste da potência de transmissão na melhora de parâmetros de desempenho. A mesma abordagem de relacionar o controle de potência com a *BER* numa comunicação é também utilizada em [14], com os mesmos bons resultados.

Resultados como este vêm incentivando os pesquisadores da área a desenvolverem as mais variadas propostas de mecanismos capazes de atingir os ganhos previstos.

As seções seguintes apresentam uma classificação das abordagens mais comumente utilizadas, separando as propostas que abordam o controle de potência em conjunto com outras funcionalidades, tais como roteamento e escalonamento, as que abordam o problema através do uso de canais adicionais, e aquelas que o fazem através da inclusão de campos adicionais nos quadros do protocolo IEEE 802.11.

Como algumas propostas podem ser classificadas em mais de uma classe, optou-se por levar em conta a principal característica da proposta, classificando-a como tal, embora deixando explícita a condição de duplo enquadramento.

2.2.1 Controle de Potência em conjunto com Roteamento e Escalonamento

Alguns trabalhos propõem a implementação do controle de potência em conjunto com o mecanismo de roteamento, fazendo com que as rotas escolhidas pela rede sejam adequadas à transmissões com menor potência. Além disso, alguns deles se utilizam do controle de potência para controlar a própria topologia da rede, tentando obter configurações mais proveitosas do ponto de vista da energia.

Essa abordagem constitui um caso de otimização entre camadas (*cross-layer optimization*). Mesmo quando o roteamento não é alterado pelo algoritmo de controle de potência, o conceito de *cross-layer* tem norteado alguns trabalhos na área [18, 19], por exemplo, aqueles que nos quais são mantidas informações sobre a vizinhança dos terminais [20].

Como uma forma de conseguir um aumento na capacidade da rede, outros esquemas utilizam o controle de potência em conjunto com técnicas de escalonamento de pacotes, determinando o momento e a ordem na qual as comunicações deverão ser realizadas. Nesta subseção serão expostos algumas dessas propostas.

Em [7] é exposto o PARO (*Power-Aware Routing Optimization*), agregando as questões de controle de potência de transmissão e de roteamento. Segundo essa proposta, a escolha de rotas é definida com base no menor gasto de energia, ao invés da tradicional busca pelo menor número de saltos. A rota escolhida é aquela na qual os nós intermediários utilizam, em conjunto, a menor potência possível em suas transmissões, necessariamente resultando em uma rota sub-ótima sob a ótica do número de saltos. Dessa forma, o *loop* de controle de potência é estabelecido através de mensagens de roteamento, dentro das quais é sempre informada a potência de transmissão utilizada. De posse dessa informação, aliada a outras, tais como a potência recebida, a sensibilidade do receptor e um adequado modelo de propagação, o receptor pode calcular a mínima potência necessária à transmissão, e informá-la ao transmissor. Assim, nas transmissões seguintes, o nó já possui a informação sobre a potência necessária para atingir aquele vizinho.

Seguindo a mesma tendência de utilização de controle de potência nos mecanismos de roteamento, COMPOW [8] defende a utilização de um único nível de potência em toda a rede (nível de potência comum). Este nível de potência seria escolhido dentre um conjunto discreto de níveis. A escolha se daria mediante a execução de todo o mecanismo de roteamento várias vezes, uma para cada nível, de tal forma que o nível escolhido seria o mínimo nível que oferecesse a mesma conectividade que o maior dos níveis.

Em [20], os autores demonstram que, sob certas topologias, por exemplo em redes onde os terminais não são homogeneamente distribuídos, formando agrupamentos (*clusters*), o uso de um nível comum de potência não é adequado, levando a injustiça, alto consumo e queda de desempenho. No mesmo trabalho, é proposto o protocolo CLUSTERPOW, específico para estas topologias. O protocolo permite que seja adotado um nível comum de potência dentro de cada agrupamento, e níveis variados entre agrupamentos.

Dentre os trabalhos que realizam o controle de potência em conjunto com um controle de topologia, podemos citar [21]. Os autores argumentam que, para rádios de curto alcance, os gastos de energia de um terminal em repouso, apenas aguardando uma comunicação, são comparáveis aos gastos com a transmissão de dados. Desta forma, é proposto um mecanismo que altera a topologia da rede, desligando os terminais que são considerados redundantes, do ponto de vista do roteamento. Em [13], uma abordagem semelhante é adotada, fazendo a seleção dos terminais a serem desligados através dos resultados de uma inundação periódica de pacotes de controle. No trabalho [22], é mais uma vez adotada a estratégia de ativação seletiva de rádio-transmissores, porém visando um ambiente de rede infra-estruturado. Mais iniciativas na linha de desligar terminais ociosos são encontradas em [23], onde os terminais são ligados apenas quando ocorrem eventos de comunicação, e em [24], onde é definido um *sleep mode* e três protocolos são propostos para definir quando um terminal deve ser colocado neste modo e quando ele deve ser ativado. As propostas nesta linha são muito adequadas quando o objetivo é a economia de energia em uma rede de sensores, tipo de rede *ad hoc* específica para monitoração de áreas e que vem ganhando especial atenção dos pesquisadores [25, 26].

Ainda seguindo a linha de englobar roteamento e controle de potência, em [27] é exposto um mecanismo que, além de visar as duas funções citadas, ainda provê o escalonamento de pacotes para redes *ad hoc* de múltiplos saltos.

Uma outra iniciativa no sentido de explorar o benefício do escalonamento de pacotes em conjunto com técnicas de controle de potência é descrita em [28], trabalho no qual os autores propõem um esquema que engloba ambas as funcionalidades.

Em [29], é apresentado um esquema semelhante, controlando o escalonamento de pacotes, porém visando redes sem fio de acesso infra-estruturadas.

Os trabalhos que fazem a união entre controle de potência e roteamento, ou controle de topologia, possuem sempre como base a escolha de rotas sub-ótimas, com mais saltos, a fim de poupar energia, seja da rede como um todo, ou de alguns terminais que estejam com menores reservas no momento. Por isso, em sua maioria, representam soluções que levam a rede a um desempenho inferior, do ponto de vista da vazão agregada. Além disso, são, muitas vezes, algoritmos de convergência lenta e pouca escalabilidade, como consequência do imperativo de manter sempre a conectividade da rede.

Já os mecanismos que propõem o uso de escalonamento, como uma forma de compensar o efeito de diminuição da vazão, enfrentam a dificuldade de que a obtenção do escalonamento ótimo geralmente constitui um problema combinatório complexo, geralmente solucionado em parte através de heurísticas sub-ótimas.

2.2.2 Controle de Potência utilizando Canais Adicionais

Alguns trabalhos encaram o problema da realimentação de informações necessária ao controle de potência através da inclusão de canais de controle adicionais aos equipamentos IEEE 802.11. Com canais adicionais, sejam eles canais de dados, ou apenas para o transporte de tons de ocupado (*busy tones*), a realimentação é realizada de forma imediata, ao longo da comunicação propriamente dita, o que geralmente resulta em bons resultados. São apresentados em seguida alguns destes trabalhos.

O protocolo PCMA (*Power Controlled Multiple Access*), proposto em [12], permite que cada terminal utilize um nível diferente de potência, utilizando uma seleção de nível pacote a pacote. O esquema utiliza dois canais diferentes, sendo um deles utilizado exclusivamente para a emissão de tons de ocupado (*busy tones*), se valendo destes sinais para lidar com o problema do terminal escondido, ao invés da metodologia *RTS-CTS*. Quando um nó encontra-se recebendo um pacote de dados, envia periodicamente o tom de ocupado em um determinado nível de potência, que é função do máximo ruído adicional que o terminal pode suportar sem que haja uma colisão com o pacote sendo recebido naquele instante. Quando um outro terminal deseja transmitir, ele escuta o canal de controle e, ao ouvir o tom de ocupado, utiliza a potência recebida para calcular o nível máximo de potência que pode ser empregado sem que sua transmissão atrapalhe a comunicação já estabelecida.

Em [30] é proposto o DBTMA (*Dual Busy Tone Multiple Access*), abordagem semelhante, porém utilizando dois tons de ocupado diferentes para sinalizar a tolerância a ruído do receptor e do transmissor. No trabalho [31], um canal de controle separado é utilizado para trafegar dados relativos à potência utilizada e à tolerância a ruído adicional de cada terminal. Neste trabalho, o problema dos enlaces assimétricos é resolvido através do uso deste canal adicional. Os autores demonstram ainda que o protocolo garante a justiça entre os terminais no acesso ao meio. A solução propõe a eliminação do quadro *ACK* como uma forma de evitar as colisões no transmissor. A tarefa de controle da entrega dos pacotes ficaria a cargo de tabelas de quadros transmitidos armazenadas no transmissor e no receptor, ou seria confiada aos protocolos de camadas superiores, como o TCP (*Transmission Control Protocol*). A proposta é aprimorada em [32].

Já no trabalho [33] o controle de potência é abordado em um ambiente de uma rede *ad hoc* na qual são disponíveis vários canais de comunicação de dados, atribuídos sob demanda (*on-demand*). Neste esquema, é reservado um canal de controle para a troca de informações de potência. Desta forma, o controle de potência é utilizado para possibilitar o reuso de frequências (ou de canais), ao reduzir o nível médio das potências de transmissão.

A proposta abordada em [34] baseia-se no Esquema Básico para determinar a potência de transmissão dos quadros *DATA* e *ACK*, transmitindo-os na mínima potência necessária. Entretanto, os autores optam por enviar os pacotes de controle, *RTS* e *CTS*, por um canal adicional separado, sempre em potência máxima. Além disso, este esquema poderia ser enquadrado na seção 2.2.1, já que realiza uma operação conjunta entre a camada MAC e a camada de rede. A topologia e as rotas da rede são controladas na medida em que a camada MAC controla a potência de pacotes do protocolo de roteamento. O controle se presta a escolher rotas mais eficientes, do ponto de vista da economia de energia.

Os trabalhos que abordam o problema de controle de potência através da inclusão de canais adicionais geralmente obtêm bons resultados devido à rápida realimentação das condições de recepção. São soluções mais robustas, capazes de lidar com ambientes de grande mobilidade e em situações onde as condições de propagação mudam rapidamente, como por exemplo, na presença de multi-percurso (*fading*). Entretanto, são propostas que exigem uma radical mudança nos equipamentos IEEE 802.11 atuais, o que as torna dispendiosas e, talvez, inviáveis.

A falta de compatibilidade com o padrão 802.11 é complementada com o fato de a criação de um ou mais canais adicionais obrigatoriamente representarem uma redução na capacidade do canal original, presumindo-se a manutenção da faixa do espectro destinada ao equipamento [35]. Além disso, deve ser ainda levado em conta o gasto de energia adicional necessário para a transmissão simultânea no canal adicional.

2.2.3 Controle de Potência utilizando os Quadros de Controle 802.11

A mais promissora área de pesquisa em controle de potência para redes *ad hoc* 802.11, sob o ponto de vista da facilidade de implementação prática, é a que aborda o problema da realimentação através da inclusão de campos adicionais nos quadros de controle nativos do protocolo 802.11. A inclusão de campos pode ser feita através

de mera atualização do *firmware* dos equipamentos atuais.

Em [36], na descrição do protocolo MACA, desenvolvido para uso de transmissão de dados por rádio-amadores, já era proposto o controle de potência de transmissão. Sua idéia básica era resolver o problema do terminal escondido através de detecção virtual de portadora, com a utilização da troca *RTS-CTS*, eliminando a necessidade de detecção real de portadora. Desta forma, o autor aproveita a troca destes pacotes de controle para propor o estabelecimento de um *loop* de controle de potência, fazendo com que o transmissor seja alimentado com informações relativas à recepção, ajustando sua potência.

No trabalho [37], é proposta uma solução para determinar a menor potência necessária para garantir comunicação em um certo modo de transmissão. Os modos de transmissão considerados consistem em diferentes modulações, que resultam em diferentes taxas de transmissão, utilizadas nos padrões 802.11 a/h/e. Entretanto, segundo o trabalho [38], o controle de potência tem sua eficiência reduzida quando o número de taxas de transmissão possíveis aumenta.

O protocolo *SmartNode* é apresentado em [35]. Este esquema utiliza o mecanismo do Esquema Básico para determinar o nível de potência de transmissão a ser empregado nos quadros *DATA* e *ACK*, escolhendo os níveis para a transmissão do *RTS* e *CTS* com base em um algoritmo que tenta balancear a reserva do meio para a transmissão e a necessidade de realizar reuso espacial. O esquema leva em conta um parâmetro de justiça no acesso ao meio. Uma de suas maiores vantagens é ser compatível com equipamentos existentes, baseados no padrão 802.11. Entretanto, tal qual a maioria dos esquemas baseados no Esquema Básico, ele não oferece uma solução para o Problema dos Enlaces Assimétricos.

O protocolo apresentado em [39] é baseado no Esquema Básico, porém opera também em conjunto com a camada de rede, determinando rotas mais eficientes. O protocolo não provê reuso espacial, sem obter ganhos na capacidade da rede. Os resultados demonstram que o esquema atinge um ganho da ordem de 5% na economia de energia quando comparado a esquemas similares, com o mesmo desempenho em capacidade. Se for tolerado uma pequena diminuição na capacidade, podem ser

atingidos ganhos da ordem de 80% na economia de energia.

Em [40], os autores propõem o protocolo SRM (*Spatial Reuse MAC*) cujo objetivo é permitir o reuso espacial do canal através do emprego do controle de potência, mas sem a necessidade do uso de um canal de controle em separado. O desempenho do protocolo é comparado aos esquemas Básico [11] e aquele proposto em [6].

Os mecanismos que utilizam a realimentação de informações através da inclusão de campos nos quadros 802.11 são baseados, em sua maioria, no mecanismo Esquema Básico - EB [7, 11], já citado na seção 1.2. Em seguida, o Esquema Básico é explicado em detalhes.

Esquema Básico

A idéia do estabelecimento de uma malha fechada para controle de potência a partir da troca de pacotes *RTS-CTS-DATA-ACK* vem sendo utilizada, por diversos trabalhos, como um esquema básico, a partir do qual podem se propor melhorias. Em resumo, esta técnica se baseia em utilizar os pacotes de reserva do meio de transmissão, *RTS* e *CTS*, em potência máxima, numa tentativa de minimizar os riscos de colisão. Ao mesmo tempo, utiliza-se esta troca de pacotes para estabelecer o nível mínimo de potência necessário para a comunicação entre os dois terminais, transmitindo os pacotes *DATA* e *ACK* neste nível de potência. Cabe ressaltar que esta técnica não aproveita o potencial de reuso espacial do canal, já que a reserva do meio é feita em potência máxima. Seu apelo baseia-se puramente na economia de energia, já que os pacotes *DATA* e *ACK* valem-se da malha de controle e são transmitidos em potência mais baixa. Observa-se ainda que a economia de energia pode ser bastante significativa, já que o pacote *DATA* tem duração várias vezes superior à dos demais.

O esquema básico pode assim ser definido de acordo com a seguinte seqüência de ações, imaginando a situação da transmissão de um pacote de um terminal 1 para um terminal 2: Inicialmente, o terminal 1 envia um pacote *RTS*, utilizando sua máxima potência de transmissão; ao receber o *RTS*, o terminal 2 compara a

potência recebida com a sua sensibilidade; o terminal 2 envia, então, um pacote *CTS*, utilizando potência máxima, com a informação da potência de transmissão necessária para a transmissão do *DATA*; recebendo o *CTS*, o terminal 1 compara a potência recebida (do *CTS*) com a sua sensibilidade; em seguida, o terminal 1 ajusta a potência de transmissão para o valor especificado no *CTS* e envia o *DATA*, nesta potência, com a informação da potência de transmissão necessária para a transmissão do *ACK*; por fim, o terminal 2 recebe o *DATA*, ajusta a potência de transmissão para o valor especificado e envia o *ACK* nesta potência.

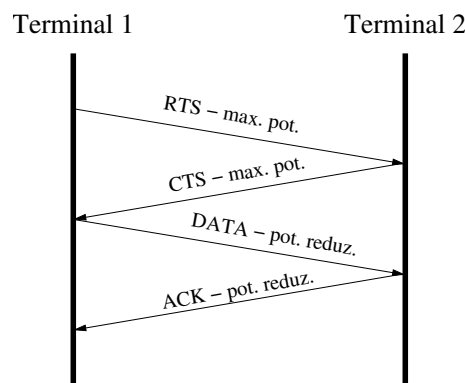


Figura 2.4: Esquema Básico

O método para determinar a potência de transmissão necessária para recepção de um pacote é relativamente simples. Tomando novamente o exemplo da transmissão de um pacote *RTS* do terminal 1 para o 2, com uma potência P_{MAX} , temos que, após atenuação no canal, este pacote atinge o receptor 2 com uma potência P_R . Desta forma temos a relação exibida em 2.1, onde G_{12} é a atenuação sofrida no canal.

$$P_R = G_{12}P_{MAX} \quad (2.1)$$

Seja $RXThresh_2$ o limiar de sensibilidade do receptor 2, ou seja, a mínima potência necessária para a correta recepção de um quadro sem erros. A potência que 1 deveria empregar para atingir o receptor 2 com a potência $RXThresh_2$, é dada pela equação 2.2, supondo a atenuação do canal como um valor constante, numa conclusão análoga a 2.1.

$$P_{NEC} = \frac{RXThresh_2}{G_{12}} \quad (2.2)$$

Isolando G_{12} em 2.1, e substituindo em 2.2, temos que a potência a ser empregada pelo transmissor 1 é dada por 2.3.

$$P_{NEC} = \frac{RXThresh_2}{P_R} P_{MAX} \quad (2.3)$$

É fácil perceber que todos os fatores que compõem 2.3 são de conhecimento do receptor do quadro *RTS*, o terminal 2. Assim, 2 pode calcular a potência necessária para que o terminal 1 consiga atingi-lo com um quadro no seu limiar mínimo de sensibilidade $RXThresh_2$. Mais ainda, de posse deste valor, o terminal 2 pode realimentar esta informação, para que 1 empregue apenas o nível de potência P_{NEC} .

Pode-se perceber, ainda, que, em 2.3, o fator P_{MAX} já é de conhecimento do terminal 1, supondo que todos os terminais da rede tenham um mesmo valor de potência máxima de transmissão. Assim, basta que o terminal 2 realimente a fração F de P_{MAX} a ser usada, dada pela equação 2.4.

$$F = \frac{RXThresh_2}{P_R} \quad (2.4)$$

Desta forma, 2 inclui num campo do quadro *CTS* que responde ao *RTS* enviado pelo terminal 1 a fração F . Quando 1 recebe o *CTS*, basta extrair F e multiplicar por P_{MAX} para determinar o valor da potência a ser transmitida no quadro *DATA*. Um procedimento análogo ocorre para que 2 determine a potência de transmissão a ser empregada no quadro *ACK*.

O Esquema Básico pressupõe que as condições de propagação mantenham-se constantes, ao menos, durante uma completa troca *RTS-CTS-DATA-ACK*. Efeitos de desvanecimento (*fading*) rápido, como os decorrentes de multi-percurso, podem ser suprimidos através de uma margem de segurança, fazendo com que os terminais empreguem uma potência ligeiramente superior à mínima exigida.

Pode-se, ainda, observar que o Esquema Básico não leva em consideração fatores

como ruído, ou interferência co-canal, que podem influenciar na correta recepção do pacote. Apenas o limiar de sensibilidade do terminal é levado em conta.

O Problema dos Enlaces Assimétricos

Nesta seção será apresentada a principal deficiência do Esquema Básico, bem como de outros esquemas de controle de potência propostos. A questão é denominada de Problema da Zona de Detecção de Portadora, ou Problema dos Enlaces Assimétricos, e vem sendo alvo de alguns trabalhos [6, 41].

Como descrito na seção 2.1 é incluído nos pacotes *RTS*, *CTS* e *DATA* um campo que indica o tempo restante para o término da transmissão do pacote. Esta informação é utilizada por terminais que estão ao alcance da transmissão em questão para realizar uma detecção virtual de portadora. Ou seja, um terminal que percebe a transmissão em questão (dado que este terminal esteja na Zona de Recepção do transmissor), colocará o valor relativo ao tempo restante de transmissão em seu NAV, deixando de acessar o meio até que este tempo termine.

Entretanto, ao utilizar o esquema básico, uma falha pode acontecer com nós que se situam na Zona de Detecção de Portadora do transmissor. Após a transmissão de um *RTS* ou *CTS*, um terminal na zona de detecção de portadora atribuirá o valor EIFS ao seu NAV. Com o controle de potência, a transmissão do *DATA* ocorrerá em potência reduzida. Reduzindo-se a potência de transmissão ocorrerá uma conseqüente redução da zona de detecção de portadora, conforme a figura 2.5.

Assim, pode ser que o terminal em questão, após decorrido o tempo EIFS, teste o meio e não perceba a transmissão do *DATA*, por não mais estar na zona de detecção de portadora daquele transmissor. Assim, este terminal irá considerar o meio livre e, após um tempo de *backoff*, iniciará uma transmissão que poderá colidir com a corrente, conforme a figura 2.6.

O problema citado não se resume em absoluto a um falha restrita ao Esquema Básico. A grande maioria dos trabalhos citados na seção 2.2 se utiliza de uma abordagem semelhante: pacotes de controle em uma potência mais elevada e, em

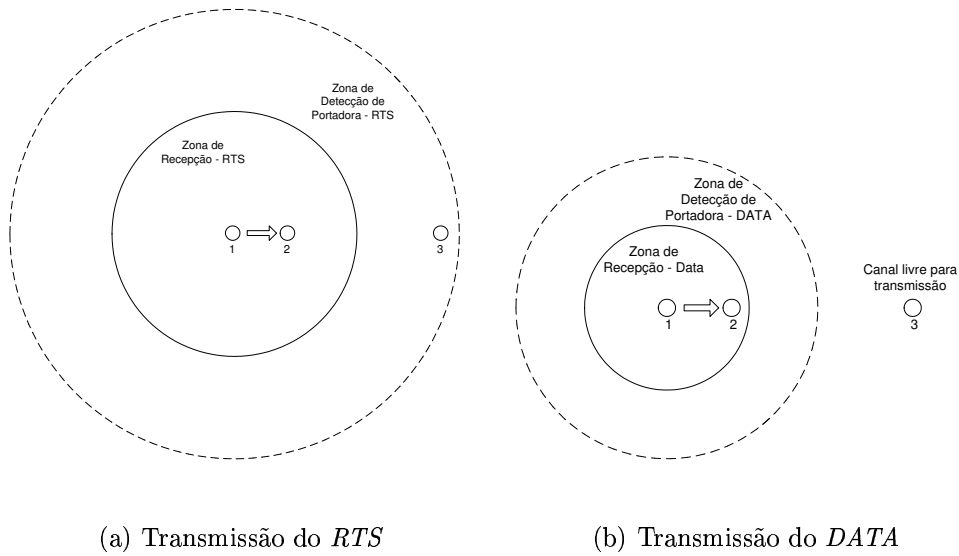


Figura 2.5: Redução da ZDP.

seguida, um pacote de dados (*DATA*) numa potência mais baixa. A filosofia por trás desta dinâmica é baseada no fato de que os pacotes de controle servem para reservar o meio para uma transmissão de maior duração (o *DATA*). Desta forma eles devem ter maior potência para poder oferecer uma maior proteção a essa transmissão que virá em seguida. Por outro lado, é fundamental, para que seja alcançado o objetivo de economia de energia, que o *DATA*, justamente por ser um pacote maior e responsável pelo maior gasto de potência nos transmissores, seja transmitido apenas na mínima potência necessária para atingir o receptor em questão. Podemos assim concluir que o problema descrito é inerente aos esquemas que se valem desta abordagem.

PCM: *Power Control MAC*

Uma solução para o Problema dos Enlaces Assimétricos é apresentada em [6]. O trabalho demonstra através de simulações o referido problema, advertindo que esta falha pode levar a um aumento considerável do número de colisões, e, conseqüentemente, de retransmissões. Desta forma, ao invés do desejado efeito de economia de energia, haveria um aumento efetivo do consumo na rede. A idéia básica da solução proposta pelos autores é que, ao transmitir um *DATA* em potência reduzida, o transmissor deve, periodicamente, elevar a potência do pacote até a máxima, por um

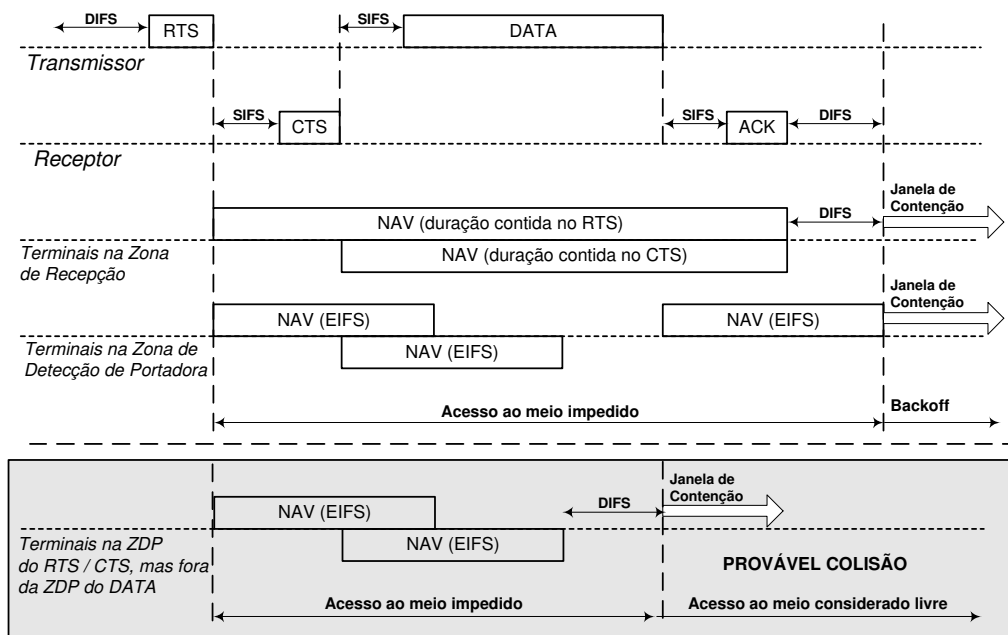
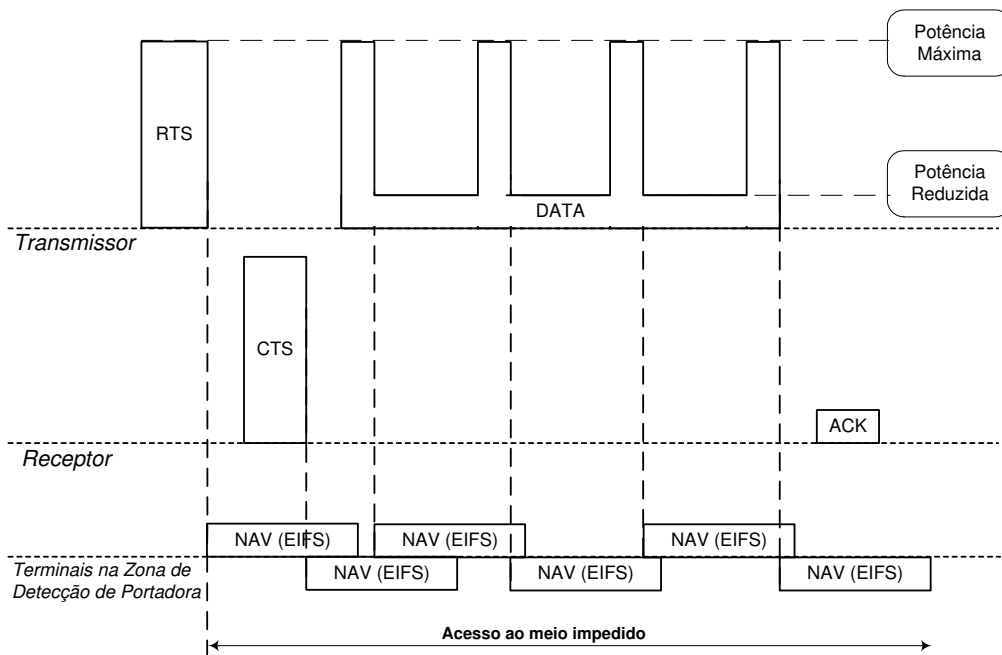


Figura 2.6: Problema dos Enlaces Assimétricos.

tempo suficiente para que a transmissão seja percebida pelos terminais na zona de detecção de portadora. Assim, durante a transmissão do *DATA*, o nível de potência é elevado até o máximo, disparando a contagem de EIFS nos terminais em questão. Após isso, o nível retorna ao mínimo necessário para a comunicação, voltando a subir até o máximo após certo intervalo de tempo, suficientemente pequeno para garantir que um novo EIFS seja disparado antes que um dos terminais tente acessar o canal. A figura 2.7 ilustra o mecanismo.

A abordagem descrita resulta em um desempenho melhor, já que minimiza as probabilidades de colisão e garante que o ganho no consumo de energia obtido com o controle de potência não será anulado por sucessivas retransmissões de pacotes. No entanto, a viabilidade da solução esbarra na dificuldade de implementar transmissores capazes de variar a potência de transmissão com a rapidez e a precisão necessárias. Além disso, a economia de energia é prejudicada pelas sucessivas elevações de potência exigidas na transmissão de um *DATA*.

Figura 2.7: *Power Control MAC*.

2.3 Considerações sobre Controle de Potência em Redes 802.11

Ao estudar as principais propostas de esquemas de controle de potência, podemos observar os desafios que a implantação desta funcionalidade em redes *ad hoc* 802.11 representam. Estas dificuldades são compensadas pelos benefícios que o controle de potência poderá trazer a sistemas que operam em uma organização tão peculiar.

Fazer com que os terminais transmitam na mínima potência necessária, evitando o desperdício de energia, parece ser uma tarefa relativamente fácil, conseguida pela maioria dos mecanismos da literatura. Entretanto, também é fácil perceber a necessidade de realizar esta tarefa ao mesmo tempo que são garantidas outras restrições.

Uma das restrições que devem ser atendidas pelos protocolos de controle de potência é a resolução do Problema dos Enlaces Assimétricos. Uma proposta para a resolução do problema é encontrada nos trabalhos [32] e [41], através do protocolo PCMAC. No entanto, a abordagem utilizada é de difícil implementação, já que necessita do uso de um canal de controle adicional.

Dentre as técnicas que não utilizam canal adicional, baseando a realimentação de informações de potência nos quadros do protocolo 802.11, apenas o PCM [6] propõe-se a resolver o problema. Entretanto, pelas razões expostas na seção anterior, ela também é uma técnica de difícil implementação prática.

Capítulo 3

Propostas

Dentre as propostas estudadas para controle de potência em redes *ad hoc* 802.11, pode-se destacar a simplicidade dos mecanismos baseados no Esquema Básico. Neste esquema, o envio das informações relativas ao controle de potência utilizando os próprios quadros de controle do protocolo IEEE 802.11 torna desnecessária a inclusão de novos canais de controle ou de *busy tones*. Desta forma, a real implementação de dispositivos que utilizem controle de potência é facilitada, já que as mudanças a serem realizadas nos atuais equipamentos podem, muitas vezes, ser reduzidas a meras atualizações de *firmware*.

Além disso, propostas baseadas no Esquema Básico podem, em sua maioria, permitir com facilidade a operação em rede de equipamentos novos, que utilizam o controle de potência, e de equipamentos legados, funcionando de acordo com o padrão 802.11 puro.

Entretanto, apesar de conseguirem prover boa economia de energia, tais propostas impossibilitam reais ganhos de vazão agregada na rede. A explicação para isto reside no fato da reserva do canal para a transmissão ser sempre realizada na máxima potência de transmissão. Esta reserva, realizada pelos quadros *RTS* e *CTS*, impede que outros terminais tentem acessar o meio compartilhado antes que a transmissão corrente termine. Os esquemas em questão a realizam em potência máxima a fim de garantir que mesmo os terminais mais distantes receberão o aviso e abdicarão do

Requisito identificado	Linha de ação adotada
Simplicidade e compatibilidade	Realimentação nos quadros nativos 802.11
Evitar o aumento de colisões e retransmissões	Resolução do Problema dos Enlaces Assimétricos
Ganho de vazão agregada	RTS e CTS já em potência reduzida

Figura 3.1: Requisitos e respectivas linhas de ação adotadas.

acesso ao meio até que o canal esteja novamente disponível para a transmissão.

Porém, é fácil perceber que, em determinadas situações, este mecanismo impede que transmissões que poderiam ser efetuadas de forma simultânea ocorram, impedindo o reuso espacial do canal. Por outro lado, abrir mão da reserva prévia do meio de transmissão poderia representar um significativo acréscimo do número de colisões na rede. Tal situação resultaria em um maior número de retransmissões, fazendo com que os terminais da rede, além de gastarem mais energia, aumentem a contenção no canal, o que reduziria a vazão agregada. Esses prejuízos de eficiência no consumo de energia e de vazão agregada poderiam anular os ganhos inerentes ao controle de potência, já citados anteriormente.

Desta forma, as propostas contidas neste trabalho situam-se nesta linha de ação: encontrar uma maneira de realizar a reserva do meio em potências mais baixas, a fim de poupar energia e, principalmente, permitir o reuso espacial do canal, sem, com isso, provocar um drástico aumento do número de colisões na rede, capaz de anular os ganhos potenciais.

Assim, os principais requisitos identificados, relacionados às respectivas linhas de ação, são exibidas na figura 3.1. .

A seguir, os mecanismos básicos são apresentadas de forma lógica, convergindo para um modelo único, que resulta do aprimoramento e uso conjunto das demais.

3.1 EBM: Esquema Básico com Memória

No esquema básico convencional, ou sem memória, os pacotes *RTS* e *CTS* são sempre enviados utilizando a potência de transmissão máxima. Apenas os pacotes *DATA* e *ACK* são beneficiados pela malha estabelecida para o controle de potência. A proposta de um esquema básico com memória é utilizar em cada terminal uma tabela, na qual seriam armazenados os níveis de potência anteriormente utilizados para a comunicação com cada um de seus vizinhos. Para cada endereço MAC pertencente a um terminal próximo, haverá na tabela a exata potência necessária para a comunicação, potência esta determinada a partir da última troca *RTS-CTS-DATA-ACK*.

Inicialmente, todas as tabelas encontram-se vazias. Na primeira troca *RTS-CTS-DATA-ACK* que um terminal executa com um terminal vizinho, será incorporada à tabela uma entrada, que associa àquele terminal vizinho o nível de potência necessário para atingi-lo. Mais especificamente, no momento em que o transmissor recebe o *CTS*, ele extrai do campo adequado a informação de potência excedente que foi utilizada no *RTS* (informação essa gravada pelo receptor). Nesse instante, ele atualiza a tabela, associando ao receptor em questão essa potência excedente, que servirá como subsídio para que o próximo *RTS* seja transmitido apenas com a mínima potência necessária. Da mesma forma, ao receber o *DATA*, o receptor retirará do campo adequado a informação a ser gravada em sua tabela, sendo utilizada nas próximas comunicações com aquele terminal. Cabe ressaltar que não é necessária qualquer modificação à estrutura dos quadros, além da já realizada para permitir o funcionamento do esquema básico. Ao receber um pacote a ser transmitido para um vizinho, a camada MAC realizará uma busca na tabela e empregará, na transmissão do *RTS*, aquela potência determinada anteriormente. Não obtendo resposta, o terminal transmissor entenderá que aquele vizinho pode ter se afastado dele, retransmitindo o *RTS* na potência máxima. Em busca de uma maior eficiência, pode-se empregar o uso de uma temporização na tabela, fazendo com que entradas que não sejam utilizadas por determinado tempo expirem.

Dentre as vantagens obtidas nesse esquema, podemos citar a maior economia de

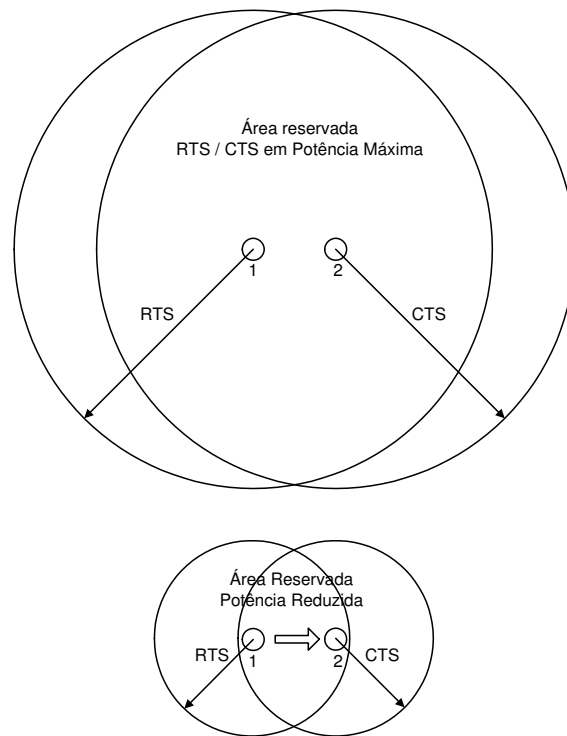


Figura 3.2: Redução da área reservada para a transmissão.

energia e o aumento da vazão agregada devido ao reuso espacial do canal, já que, para cada transmissão, a área reservada corresponde à união da zona de detecção de portadora do pacote *RTS* e da zona de detecção de portadora do *CTS*. Se esses pacotes serão transmitidos com menos potência, tais zonas serão menores, possibilitando a existência de transmissões simultâneas entre terminais próximos. A redução da área reservada para transmissão é ilustrada na figura 3.2.

Como desvantagem, pode-se argumentar que esse tipo de mecanismo poderia trazer grandes penalidades ao desempenho em aplicações que têm como característica a alta mobilidade dos terminais, bem como em cenários que apresentem condições de propagação adversas, como o desvanecimento rápido. Contudo, deve-se ainda salientar que este tipo de mecanismo apresentará melhor desempenho em situações de baixa mobilidade dos terminais da rede, característica de significativa parcela das aplicações de redes *ad hoc*. Além disso, para minimizar as perdas decorrentes dos fatores citados, é introduzida uma margem de segurança, enviando os pacotes com uma potência ligeiramente maior do que a calculada. Essa margem pode ser da ordem de 5% da potência necessária.

Uma outra desvantagem é que a redução da área reservada para a transmissão representa uma menor proteção às transmissões, já que alguns terminais dentro do alcance dos nós envolvidos numa comunicação não serão avisados. Isto poderia levar a um aumento do número de colisões, e consequentes retransmissões de quadros. Entretanto, resultados de simulação demonstraram que este efeito não chega a anular os ganhos decorrentes da reutilização espacial.

A mecanismo do Esquema Básico com Memória foi proposto e avaliado em [42].

3.2 ALCA: *Asymmetric Links Collision Avoidance*

Como foi exposto em 2.2.3, a solução para o problema da Zona de Detecção de Portadora não só é necessária, como deverá fazer parte de qualquer esquema de controle de potência a ser desenvolvido com base na estratégia do uso pacotes de controle em potências superiores a do pacote de dados. Esta estratégia apóia-se na idéia do envio de pacotes de controle em alta potência, para a proteção apropriada da transmissão dos dados, enviados em potência reduzida para a economia de energia, conforme a figura 3.3. O pioneiro representante de seu uso é o Esquema Básico, conforme a seção 2.2.3.

A solução proposta em [43], o mecanismo ALCA (*Asymmetric Links Collision Avoidance*), baseia-se na possibilidade de fazer com que a informação de duração da transmissão chegue até os terminais que estão na Zona de Detecção de Portadora do transmissor em questão. Como foi visto em 2.1, os terminais na ZDP não são capazes de decodificar corretamente o pacote recebido, e com isso não têm acesso à informação de duração da transmissão, embutida nos pacotes *RTS* e *CTS*.

No entanto estes terminais são capazes de perceber a existência de uma portadora no meio, e, mais importante, são capazes de distinguir com alguma exatidão os instantes de início e término deste sinal. O esquema proposto consiste em utilizar um método que inclua a Informação de Duração da Transmissão Corrente (IDTC) na duração física das portadoras que carregam os pacotes de *RTS* e *CTS*. Assim, os terminais na ZDP também poderão ter acesso à IDTC, evitando que tentem o

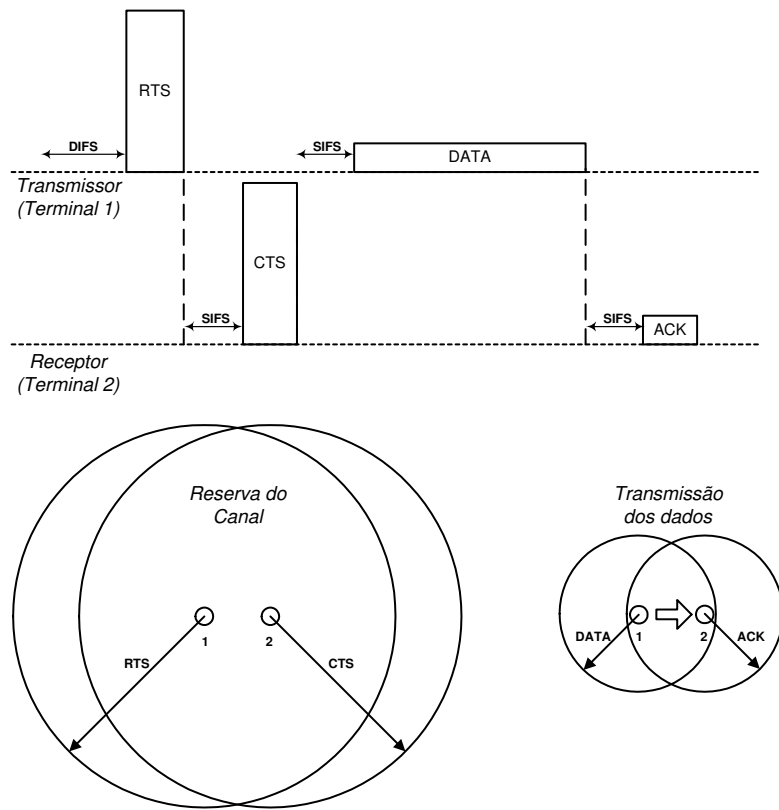


Figura 3.3: Estratégia utilizada.

acesso ao meio até que esta transmissão corrente termine. Uma proposta semelhante é realizada num recente trabalho [44], no qual os autores sugerem utilizar a duração física da portadora de um pacote para ajustar o NAV, promovendo maior justiça na rede e obtendo ainda maior vazão agregada. Entretanto, a proposta não emprega qualquer tipo de controle de potência, e tampouco é apresentada como uma maneira de evitar o Problema dos Enlaces Assimétricos.

É possível aumentar a duração física das portadoras do *RTS* e do *CTS* através da adição de poucos bits a esses pacotes. É importante perceber que esses bits adicionais não carregam em si qualquer informação, servindo apenas para aumentar a duração do sinal no meio.

Desta forma, o protocolo ALCA possui N Durações de Portadora (DP) distintas para *RTS* e *CTS*. Para os terminais que estão na Zona de Recepção, a informação contida na DP é ignorada, já que esses nós têm acesso à IDTC gravada nos pacotes. Para os terminais na ZDP, a informação da DP será utilizada para extrair a IDTC.

A dinâmica do protocolo é baseada em duas etapas. Na primeira etapa, o nó que vai iniciar uma transmissão, calcula a Informação de Duração da Transmissão Corrente (IDTC) e a grava no pacote *RTS* a ser transmitido. De posse da IDTC ele decide qual Duração de Portadora (DP) ele deve usar para que essa informação seja recuperada pelos terminais na ZDP. Para a realização desta escolha, o IDTC deverá ser comparado a limiares previamente escolhidos, resultando na escolha de uma duração de portadora DP_i , dentre as N possíveis. Os limiares e as N Durações de Portadora discretas deverão ser de conhecimento de todos os terminais da rede.

Assim, o nó inclui ao final do *RTS* a seqüência de bits necessária para que o *RTS* tenha no meio a DP escolhida. Os nós que estão na ZR irão ignorar a presença destes bits, bem como a DP, extraindo a IDTC diretamente do cabeçalho do pacote.

Numa segunda etapa, um nó na Zona de Detecção de Portadora (ZDP) do primeiro percebe a existência de uma portadora de duração DP_i . Ao perceber que ele não será capaz de decodificar corretamente o pacote, ao invés de simplesmente gravar o valor EIFS padrão em seu NAV, ele irá, de posse da duração de portadora DP_i , determinar um novo valor para EIFS, a ser gravado no NAV. Este valor deverá ser maior que a Informação de Duração da Transmissão Corrente (IDTC), para que o nó evite o acesso ao meio até que a transmissão corrente termine.

Ao transmitir um *CTS* em resposta a um *RTS*, os terminais devem agir de forma análoga, modificando a duração física da portadora do *CTS* de acordo com a IDTC.

É importante perceber que o protocolo ALCA poderá funcionar em conjunto com qualquer esquema de controle de potência que utilize pacotes de controle em potência máxima, seguidos por um *DATA* em potência reduzida, sem a necessidade de um canal de controle adicional. Neste trabalho, o ALCA funciona em conjunto com o Esquema Básico, e seu trabalho é apenas resolver o Problema dos Enlaces Assimétricos, explicado no capítulo 2.

O mecanismo ALCA foi proposto e avaliado por simulações nos trabalhos [43] e [45].

3.3 FN-ALCA: Reservando o canal de forma seletiva

A proposta descrita nesta seção, o FN-ALCA (*Farthest Neighbor - Asymmetric Links Collision Avoidance*), engloba as principais idéias implementadas e testadas durante o desenvolvimento deste trabalho.

Uma delas se refere à necessidade de reduzir a potência de transmissão dos pacotes de controle *RTS* e *CTS*. Essa idéia foi desenvolvida durante a implementação do esquema EBM. A redução de potência destes pacotes permite que a área reservada para a transmissão seja também reduzida, o que passa a permitir que o canal seja reutilizado por estações mais distantes. Além disso, a economia de energia ao transmitir tais pacotes em potência reduzida pode ser, também, considerável.

Entretanto, esta redução de área reservada para a transmissão representa também uma menor proteção da comunicação. O emprego da exata potência necessária para atingir o terminal de destino na transmissão de *RTS* e *CTS*, adotada pelo EBM, pode, em muitas topologias, representar uma proteção muito pequena para as transmissões. Um terminal, por exemplo, que possui muitos vizinhos distantes, e se comunica com um terminal bem próximo, pode ter suas transmissões repetidamente interrompidas por transmissões daqueles vizinhos desavisados. Um exemplo desta topologia é ilustrado na figura 3.4.

Desta forma, na construção da proposta FN-ALCA, a idéia de redução da potência do EBM é aproveitada, sem contudo utilizar sua opção de reduzi-la ao ponto de chegar até o nível mínimo para atingir o terminal destino. Para lidar com tais topologias desfavoráveis, é necessário que os pacotes de reserva de meio tenham sua potência ajustada para um valor que possa assegurar um maior grau de proteção.

Por outro lado, ao fazer a opção de transmitir quadros de controle em potência superior e quadros *DATA* e *ACK* apenas na potência necessária, depara-se com o Problema dos Enlaces Assimétricos, descrito no capítulo 2. Para evitar o problema e o conseqüente acréscimo do número de colisões, utiliza-se o protocolo ALCA,

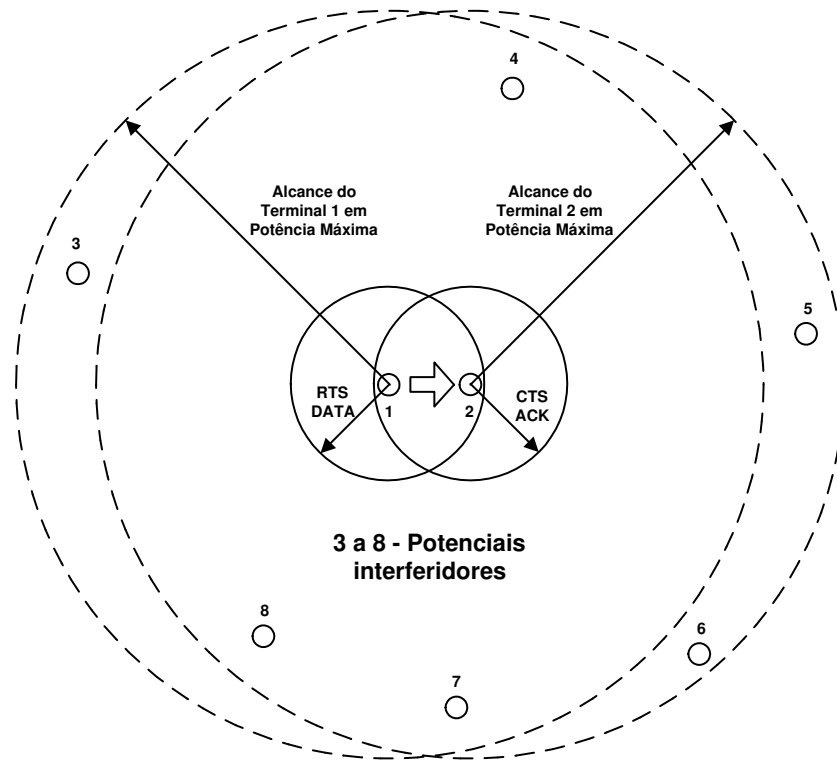


Figura 3.4: Topologia prejudicial ao EBM.

descrito anteriormente.

Assim, pode-se dizer que os principais pilares deste mecanismo são os seguintes:

- EBM - Com a idéia de diminuir a potência de transmissão de quadros *RTS* e *CTS*, para possibilitar reuso do canal;
- ALCA - Com a idéia de usar a duração de portadora destes pacotes, para lidar com o Problema dos Enlaces Assimétricos.

Desta forma, resta apenas definir o nível de potência citado, inferior à potência máxima, mas que permite uma maior proteção às comunicações do que o nível adotado pelo EBM. Mais uma idéia foi desenvolvida para definir tal nível e, somando-se às duas citadas, compor o protocolo completo de controle de potência proposto neste trabalho.

3.3.1 FN: Farthest Neighbor

A idéia principal por trás da troca *RTS-CTS* que precede uma transmissão é efetuar a reserva do meio, para que a transmissão possa ocorrer com os demais terminais da rede em silêncio, evitando colisões. Entretanto, é importante salientar que nem todos os terminais ao redor do par de nós comunicantes necessitam ser silenciados. A reserva do meio deve ser feita de forma que sejam silenciados apenas os nós que representam real perigo de interferência, tanto no receptor, durante a recepção do *DATA*, quanto no transmissor, durante a recepção do *ACK*. No protocolo MAC 802.11, a reserva de meio é realizada em potência máxima. Essa abordagem também é adotada pelo Esquema Básico, pelo PCM, e por vários outros esquemas de controle de potência. No entanto, é fácil perceber que a transmissão de *RTS-CTS* em potência máxima é por demais conservadora. Na verdade, para conseguir silenciar todos os potenciais interferidores à sua volta, um nó cercado por N terminais vizinhos deveria transmitir um *RTS* na potência exata para atingir o seu vizinho mais distante (*Farthest Neighbor - FN*).

Usando esta abordagem, pode-se conseguir uma melhor eficiência no uso da energia disponível, contando ainda com a vantagem adicional de poder obter uma melhor utilização do canal. Isto se deve a uma diminuição da potência média de transmissão das estações, levando a uma reutilização espacial do meio.

A proposta então, é fazer com que cada terminal mantenha uma tabela atualizada com a potência necessária para atingir cada um de seus vizinhos. Ressalta-se que uma idéia semelhante é adotada pelo EBM, porém com a diferença de que, naquele caso, apenas os terminais com os quais a estação realizou comunicações são mantidos em sua tabela. A idéia agora é que a estação, mesmo sem realizar comunicações com certo terminal ao seu alcance, deva aprender a potência necessária para atingi-la. Com isso, é possível, a qualquer instante, conhecer o vizinho mais distante, utilizando, na transmissão de *RTS* e *CTS* a potência necessária para atingi-lo.

3.3.2 Protocolo Completo: FN-ALCA

Como descrito anteriormente, qualquer solução de controle de potência que deseje empregar quadros de controle em níveis de potência mais altos que os quadros de dados incorrerá no Problema dos Enlaces Assimétricos. Desta forma, é natural que o esquema ALCA seja empregado para evitar que este problema eleve de forma significativa as colisões na rede.

Além disso, ao utilizar o esquema FN em conjunto com o ALCA, pode-se optar por atingir o último vizinho apenas no seu limiar de detecção de portadora. Ou seja, não é necessário nem mesmo que o vizinho mais distante decodifique o pacote de controle. Basta que ele tenha acesso à duração de portadora, pois o ALCA se encarregará de configurar corretamente o NAV, possibilitando a proteção da transmissão em andamento.

Desta forma, o FN-ALCA escolherá a potência de transmissão de forma a realizar duas tarefas. A primeira delas, já descrita, é a de fazer com que o pacote transmitido chegue ao vizinho mais distante com o nível mínimo de potência para disparar neste nó a detecção de portadora. Se P_{FN} é a potência necessária para enviar um pacote ao vizinho mais distante de um terminal, $RXThresh$ é a potência mínima que deve atingir um receptor para a correta recepção de um pacote e $CSThresh$ a potência mínima para disparar uma detecção de portadora, a potência a ser empregada para realizar esta tarefa pode ser determinada a partir da equação 3.1.

$$P_1 = \frac{CSThresh}{RXThresh} P_{FN} \quad (3.1)$$

A segunda tarefa é a de chegar ao terminal ao qual se destina o pacote com o nível mínimo para a correta recepção do mesmo. Assim, se denominarmos de P_2 a potência para realizar esta segunda tarefa, a potência escolhida para a transmissão é dada pela equação 3.2.

$$P_{RTS/CTS} = \max(P_1, P_2) \quad (3.2)$$

Desta forma, o esquema FN-ALCA, sob certas condições, pode operar de forma igual ao esquema EBM. No caso, por exemplo, de dois terminais que se comunicam sem a presença de qualquer outro terminal vizinho, onde a proteção do canal para a transmissão é irrelevante.

No esquema EBM, um terminal manterá em sua tabela de vizinhança informações de potência referentes apenas aos terminais com os quais foram realizadas comunicações recentes. Assim, as entradas da tabela são criadas e atualizadas durante as trocas *RTS - CTS - DATA - ACK*, com o mecanismo do Esquema Básico. No FN-ALCA, cada terminal deve ter informações sobre toda a sua vizinhança, e não apenas sobre aqueles terminais com os quais mantém comunicações. Isto é necessário para que possa ser determinado o vizinho mais distante. Desta forma, deve ser implementado um sistema no qual cada terminal envia periodicamente um pacote a ser respondido por todos os seus vizinhos, possibilitando a criação e atualização de entradas na tabela de vizinhança. Este sistema é descrito em detalhes na seção 4.3 do capítulo 4.

O mecanismo FN-ALCA é proposto e avaliado em [46].

3.4 Considerações sobre as Propostas

O protocolo descrito, FN-ALCA, reúne soluções desenvolvidas ao longo desta pesquisa de forma a compor um esquema completo de controle de potência para redes *ad hoc* 802.11.

Uma dessas soluções é a necessidade de transmitir os pacotes de controle *RTS* e *CTS* em potências mais baixas, para possibilitar o reuso espacial da rede. Outra, consiste no uso do esquema ALCA, capaz de evitar que o Problema dos Enlaces Assimétricos aumente o número de colisões e retransmissões, anulando os ganhos obtidos. A última solução consiste na determinação do vizinho mais distante (FN), que possibilita a determinação do nível de potência adequado para assegurar, a uma só vez, reuso espacial e proteção adequada às comunicações.

O esquema proposto é avaliado neste trabalho por simulações e os resultados demonstram ganhos significativos de vazão agregada e de eficiência no consumo de energia.

Capítulo 4

Modificações no Simulador

A fim de propiciar um ambiente capaz de dar suporte à experimentação dos modelos propostos, uma série de modificações foram introduzidas no código original do simulador utilizado. O simulador em questão é o *Network Simulator versão 2.26* [47, 48], e já disponibiliza em sua forma original um ambiente para a simulação de uma rede *ad hoc*, segundo o padrão IEEE 802.11.

Para a realização da avaliação de desempenho, foram implementadas as propostas deste trabalho, ou seja, o Esquema Básico com Memória, o mecanismo ALCA e o esquema completo, FN-ALCA, descritos no capítulo 3.

Além disso, a fim de possibilitar a comparação dos esquemas propostos com trabalhos existentes, foram implementados o Esquema Básico e o protocolo PCM, descritos no capítulo 2. Estes esquemas foram escolhidos como parâmetros de avaliação por constituírem, dentre os esquemas que utilizam a troca de informações de controle de potência nos próprios quadros do padrão 802.11 (descritos na subseção 2.2.3 do capítulo 2), as opções de melhor desempenho atualmente.

Estas modificações foram todas agrupadas em um Módulo de Controle de Potência (MCP), responsável por, a partir de um argumento, passado ao simulador via linha de comando, implementar um dentre os vários possíveis métodos de controle de potência descritos, ou o padrão 802.11 puro. Com isso, o MCP é capaz de escolher, a cada quadro, a exata potência de transmissão a ser empregada.

Além disso, para que a avaliação de desempenho se aproximasse de uma situação real, foi incluído um Módulo de SINR (MSINR). O parâmetro SINR (*Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio*) é definido quando levamos em conta que cada terminal da rede encontra-se exposto ao ruído térmico e também a um certo nível de interferência co-canal. Dado que um receptor em questão encontra-se recebendo um quadro, definimos o SINR ao dividir a potência do sinal referente ao quadro em recepção pela soma do ruído com a potência total de interferência neste receptor. O simulador original apresenta um modelo idealizado de transmissão, no qual tais parâmetros não são levados em conta. A implementação do MSINR consegue, desta forma, respaldar os resultados obtidos nas simulações ao torná-los, em princípio, mais próximos aos que seriam obtidos com uma implementação real.

Por fim, para que os modos EBM e FN-ALCA dispusessem das informações de vizinhança das quais necessitam, foi implementado um Módulo de Vizinhança (MV) que, rodando na camada de rede do terminal, é capaz de determinar quais são os vizinhos desta estação, bem como a potência necessária para atingir cada um deles. Este módulo funciona através da transmissão de pacotes de *Hello*, transmitidos periodicamente. Através deles, os terminais aprendem o suficiente sobre sua vizinhança para que possam escolher adequadamente a potência de transmissão utilizada em cada pacote, conforme descrito na seção 3.3 do capítulo 3. Antes de transmitir um pacote, a camada MAC acessa a tabela de vizinhança, construída pela camada de rede, a fim de determinar o vizinho mais distante, dentro do conceito de *cross-layer optimization*. Quando o terminal encontra-se em comunicação direta com outro, a camada MAC realiza as atualizações pertinentes na tabela de vizinhança, corrigindo a potência de transmissão necessária para atingir aquele determinado terminal de acordo com as variações de SINR do mesmo, realimentadas pelo módulo de controle de potência. A figura 4.1 esquematiza a implementação em questão, marcando em cinza os módulos adicionados.

Além dos módulos citados, algumas modificações foram introduzidas nas camadas física, MAC e de rede, para que o sistema interagisse adequadamente com os módulos. As seções subsequentes apresentam alguns detalhes das implementações realizadas no simulador original.

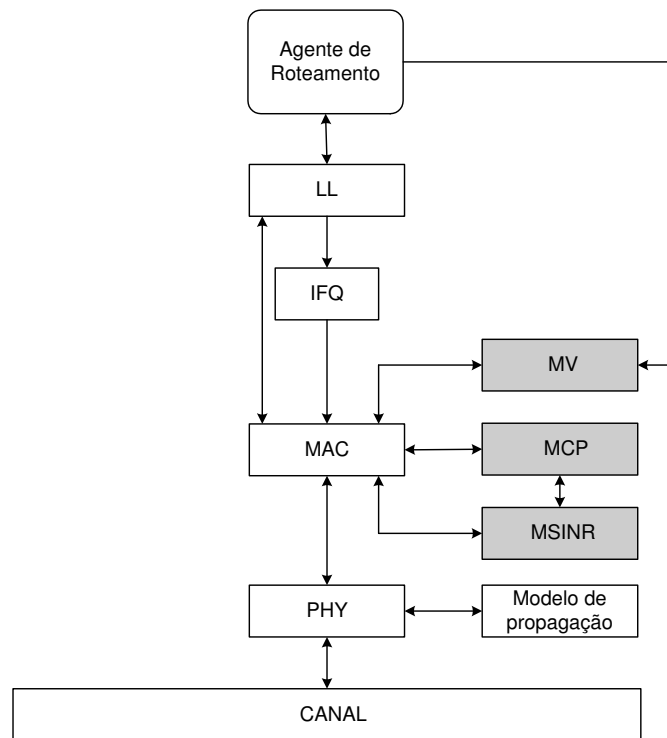


Figura 4.1: Modificações no simulador.

4.1 Módulo de Controle de Potência

Com o objetivo de implementar os esquemas de controle de potência mencionados, foi introduzido o Módulo de Controle de Potência no simulador original. Operando na camada MAC, o MCP é o responsável por definir a potência de transmissão a ser utilizada em cada quadro transmitido, de acordo com o esquema a ser implementado. Pequenas modificações foram introduzidas também na camada física dos terminais, a fim de permitir que a potência de transmissão seja passada pela camada MAC, no momento da transmissão do quadro.

Além disso, quando um quadro qualquer é recebido pela camada física e repassado à camada MAC, as informações referentes a este quadro, tais como a potência na qual foi recebido, tipo de quadro e duração física do sinal recebido são, também, repassados ao MCP, de forma que ele possa contar com essas informações para os algoritmos de controle de potência implementados.

A implementação do MCP pode ser subdividida em duas etapas. Na primeira

delas, foram implementados o Esquema Básico, o Esquema Básico com Memória e o PCM. Estas implementações representam mudanças mais superficiais na estrutura do simulador original. Basicamente resumem-se à inclusão de campos e consultas, no caso do EBM, ao Módulo de Vizinhança. Na segunda etapa, foram implementados o ALCA e o esquema FN-ALCA, que representam mudanças mais substanciais. As subseções seguintes referem-se a tais etapas.

4.1.1 EB, EBM e PCM

A primeira implementação realizada foi a inclusão do Esquema Básico. A figura 4.2 ajuda a compreender a sequência de ações realizadas pelos terminais transmissor e receptor em uma comunicação neste esquema, da forma como foi implementada no MCP. Na figura, o transmissor corresponde ao terminal 1 e o receptor ao terminal 2. Desta forma, $P_{NEC_{12}}$ corresponde à mínima potência necessária para que o terminal 1 atinja o terminal 2. As potências $P_{NEC_{12}}$ e $P_{NEC_{21}}$ são calculadas de acordo com as equações introduzidas no capítulo 2.

Vale ressaltar que, para todas as potências calculadas pelo MCP, é acrescentada uma margem de segurança de 5%, utilizada para lidar com problemas tais como flutuações na atenuação do canal, por exemplo.

A implementação consistiu na inclusão de campos adicionais nos quadros *CTS* e *DATA*, de forma a possibilitar o transporte das informações de controle de potência. Além disso, modificações na camada física e na camada MAC permitiram que informações, como a potência na recepção de um quadro, fossem repassadas à MAC e que a camada MAC pudesse configurar o nível de potência de transmissão de um quadro (nível esse definido pelo MCP).

O Esquema Básico com Memória foi implementado de forma semelhante, reaproveitando estruturas utilizadas no EB, tais como os campos introduzidos nos quadros para transportar as informações de potência (utilizados também por todos os demais esquemas).

A principal diferença introduzida se refere à troca *RTS-CTS*, feita antes de uma

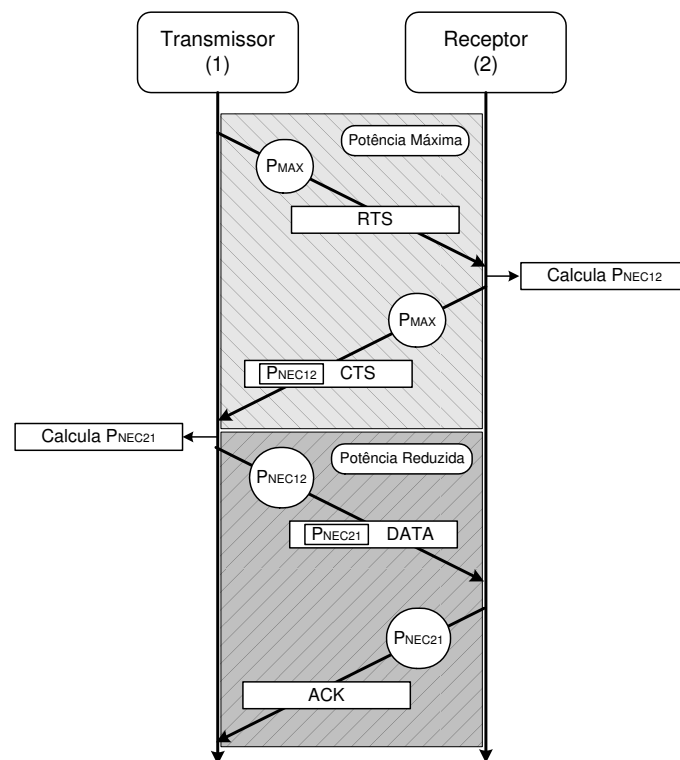


Figura 4.2: Implementação do Esquema Básico.

transmissão de dados. Para a transmissão desses quadros, que no EBM deve ser realizada já em potência reduzida, o MCP necessita realizar uma consulta ao Módulo de Vizinhança, verificando se o terminal ao qual a comunicação é destinada já possui uma entrada na tabela. Se já houve uma comunicação anteriormente realizada com esse terminal, a entrada na tabela é utilizada para determinar a potência dos quadros *RTS*, do lado do transmissor, e *CTS*, do lado do receptor.

Por outro lado, se aquele terminal não consta na tabela do MV, a troca *RTS-CTS* deverá ser realizada em potência máxima e o mecanismo termina por ser igual ao do Esquema Básico. Além disso, deve ser considerada a possibilidade de as condições de propagação haverem mudado, ou mesmo a possibilidade de mobilidade dos terminais. Com isso, é possível que, ao enviar um *RTS* na potência lida na tabela, o transmissor não mais consiga atingir o terminal receptor. Assim, para que o transmissor não insista em usar um valor de potência que já pode estar desatualizado, foi definido que, no caso de um terminal enviar um *RTS* e não receber um *CTS* em resposta, ele apaga a entrada da tabela referente àquele terminal e retransmite novamente o

RTS, desta vez em potência máxima. Se a comunicação tiver sucesso desta vez, um novo valor de potência será aferido, sendo gerada novamente a entrada na tabela do MV.

Do lado do receptor, existe a mesma possibilidade, referente ao quadro *CTS*. Se o *CTS* for transmitido em potência insuficiente, o transmissor que enviou o *RTS* julgará que houve uma mudança de condições e, como descrito acima, elevará a potência do *RTS* ao máximo numa segunda tentativa. Do outro lado, porém, o *CTS* continuaria a ser transmitido em potência reduzida. Para resolver esta questão, foi implementada uma temporização no *CTS*, semelhante à que já existe no *RTS*. Se, após o envio de um *CTS*, o *DATA* não for recebido, o receptor apagará a entrada do terminal transmissor de sua tabela, a exemplo do que ocorre no transmissor. Desta forma, numa segunda transmissão de *CTS*, ele também será enviado em potência máxima.

Conforme o capítulo 2, o protocolo PCM (*Power Control MAC*) consiste em elevar periodicamente a potência do pacote de dados (*DATA*), de forma a manter os terminais na Zona de Detecção de Portadora do transmissor avisados de que a transmissão ainda está em curso. Esse processo dispara repetidamente a contagem de EIFS nestes terminais, permitindo que a transmissão termine antes que qualquer um deles tente realizar um acesso ao meio, resolvendo assim o Problema dos Enlaces Assimétricos. A implementação realizada no simulador, a fim de avaliar os resultados do protocolo PCM, foi simplesmente utilizar a implementação do Esquema Básico. A única diferença se refere ao cálculo da energia gasta nas transmissões dos pacotes *DATA*. No protocolo PCM, ao invés da energia ser calculada, como no EB, multiplicando a potência necessária pelo tempo de transmissão, deve ser levado em conta que haverá uma elevação periódica da potência do *DATA* ao nível máximo. A equação 4.1 se refere ao cálculo da energia gasta em uma transmissão no Esquema Básico, ao passo que a equação 4.2 ilustra o mesmo cálculo, para o PCM.

$$E = P_{NEC}t_{TOTAL} \quad (4.1)$$

onde,

- P_{NEC} = Potência necessária - utilizada na transmissão do *DATA*;
- t_{TOTAL} = Tempo total para a transmissão *DATA*.

$$E = P_{NEC}t_1 + P_{MAX}t_2 \quad (4.2)$$

onde,

- P_{NEC} = Potência necessária - utilizada na transmissão do *DATA*;
- P_{MAX} = Potência máxima;
- t_1 = Tempo total de transmissão em potência reduzida;
- t_2 = Tempo total de transmissão em potência máxima.

4.1.2 ALCA e FN-ALCA

A implementação do mecanismo ALCA representa maiores mudanças no simulador que as descritas anteriormente. Isto ocorre porque a duração da portadora recebida na camada física deverá agora ser utilizada para suporte das decisões do Módulo de Controle de Potência. Conforme descrito no capítulo 3 diferentes valores de Duração de Portadora (DP) serão utilizados para sinalizar aos terminais na Zona de Detecção de Portadora (ZDP) do transmissor em questão sobre a duração da transmissão corrente.

É importante que os valores de DP sejam discretos e suficientemente espaçados para que o nó na ZDP não possa confundir uma DP com outra, gravando um valor errado em seu NAV. Os valores utilizados nas simulações realizadas neste trabalho são espaçados de $20\mu s$. Dado que o SIFS (*Short Inter-Frame Space*), um tempo padrão entre pacotes que consta da especificação do IEEE 802.11b, é de $10\mu s$, pode-se assegurar que os nós consigam diferenciar durações espaçadas de $20\mu s$.

Vale lembrar que o esquema ALCA pode ser implementado de diferentes maneiras. Temporizações e limiares podem ser ajustados de forma a serem adequados a

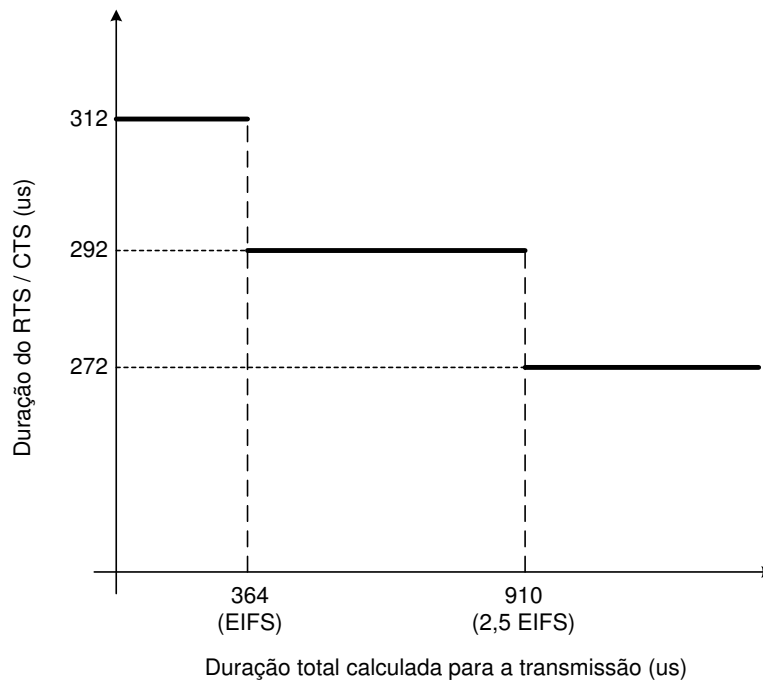


Figura 4.3: Escolha da Duração de Portadora.

outros padrões, que não o 802.11b. Desta forma, os valores utilizados neste trabalho constituem apenas um exemplo de implementação, adequado ao 802.11b.

A duração física da portadora de um pacote *RTS*, na taxa básica de 2 Mbps, é de aproximadamente $272\mu\text{s}$. Dessa forma foram utilizados três valores de DP espaçados por $20\mu\text{s}$: $272\mu\text{s}$, $292\mu\text{s}$ e $312\mu\text{s}$. O EIFS padrão, a essa taxa, é de aproximadamente $364\mu\text{s}$. Assim, os limiares escolhidos para a quantização da Informação de Duração da Transmissão Corrente (IDTC) foram $364\mu\text{s}$ e $910\mu\text{s}$. Na figura 4.3, pode-se visualizar a escolha de portadora. Foi utilizado o menor valor de DP ($272\mu\text{s}$) para indicar uma duração de transmissão corrente superior a $910\mu\text{s}$. Um DP de $292\mu\text{s}$ indica uma duração entre $364\mu\text{s}$ e $910\mu\text{s}$, enquanto que um DP de $312\mu\text{s}$ indica durações inferiores a $364\mu\text{s}$.

Do lado da recepção do pacote por um terminal na ZDP, a duração do pacote é determinada e comparada aos três valores discretos ($272\mu\text{s}$, $292\mu\text{s}$ e $312\mu\text{s}$). Como, após passar pelo canal, a duração do pacote pode apresentar variações, são definidos os limiares: $262\mu\text{s}$, $282\mu\text{s}$ e $302\mu\text{s}$. Se o pacote recebido tiver duração inferior ao primeiro limiar, entende-se que o pacote recebido não é um *RTS* ou *CTS* (pode ser

um *ACK*, por exemplo). Assim, grava-se o valor EIFS padrão no NAV, o contador regressivo que indica quanto tempo resta para que o meio seja considerado livre após uma transmissão.

Se o pacote recebido tiver duração física de portadora superior a $262\mu\text{s}$ e inferior a $282\mu\text{s}$, conclui-se que foi transmitido um *RTS* ou *CTS* com duração de $272\mu\text{s}$, gravando-se no NAV um valor de EIFS modificado (foi utilizado o valor de 1638, que corresponde a $4,5 \cdot \text{EIFS}$). Este valor corresponde ao tempo máximo que um terminal poderá esperar, realizando detecção virtual de portadora. Analogamente, se a duração da portadora for entre $282\mu\text{s}$ e $302\mu\text{s}$, grava-se $910\mu\text{s}$ no NAV.

Por fim, se o pacote recebido tiver duração de portadora superior a $302\mu\text{s}$, conclui-se que existem duas hipóteses. Na primeira delas, o pacote transmitido foi um *RTS* ou *CTS* com $312\mu\text{s}$, o que corresponde a uma duração total da transmissão corrente (IDTC) inferior ao valor do EIFS padrão ($364\mu\text{s}$). Neste caso, gravar no NAV o valor de EIFS é suficiente. Numa segunda hipótese, o pacote transmitido é um pacote Broadcast ou um pacote de dados (*DATA*). Neste caso, também, a utilização do EIFS padrão é suficiente para garantir que não haverá colisão com o *ACK*. Assim, grava-se o valor EIFS padrão no NAV. A escolha do valor apropriado de EIFS é mostrada na figura 4.4.

4.2 Módulo de SINR

Em uma comunicação RF, além de ruído, cada receptor encontra-se exposto a um certo nível de interferência co-canal. Assim, podemos definir um parâmetro de qualidade de recepção de um sinal chamado SINR (*Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio*). Em cada instante, o SINR em certo receptor pode ser calculado ao dividir a potência do quadro em recepção pela soma da potência total de interferência com a potência do patamar de ruído. O patamar de ruído pode ser definido como a potência em um dado receptor quando todos os transmissores da rede estão em silêncio. A fim de investigar os efeitos do SINR sobre os métodos de controle de potência considerados, as influências do ruído e da interferência co-canal foram também adi-

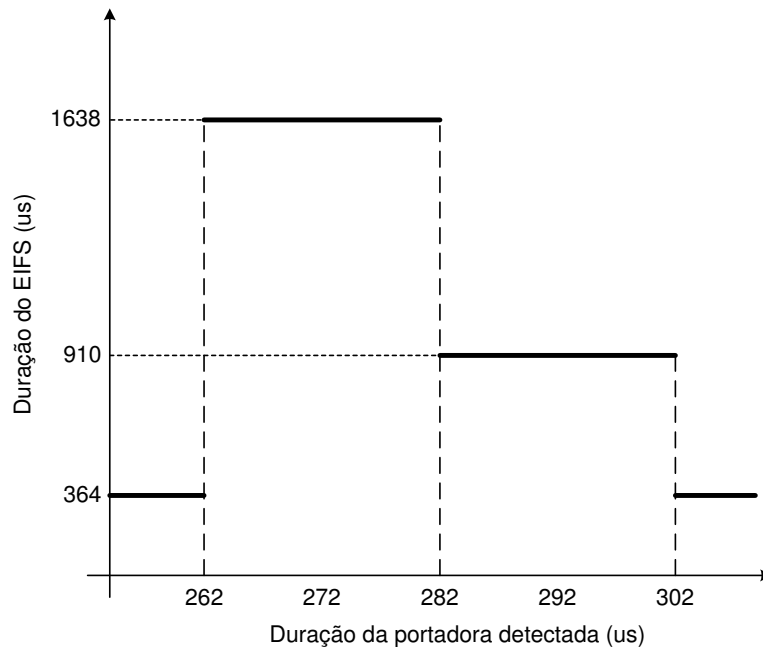


Figura 4.4: Escolha do EIFS utilizado.

cionadas ao simulador em questão, sob a forma de um módulo de controle de SINR. A equação 4.3 fornece o nível de SINR em um dado receptor, quando este receptor encontra-se recebendo um pacote de potência P_R . Na fórmula, N representa a potência de ruído no receptor, e I_j representa a potência do sinal j dentre os n sinais interferentes.

$$SINR_{RX} = \frac{P_R}{N + \sum_{j=1}^n I_j} \quad (4.3)$$

Assim, pacotes abaixo do limiar $CSThresh$, que seriam prontamente descartados na implementação original, devem ter sua duração e nível de potência repassados à camada MAC, para que o módulo de controle de SINR possa ser devidamente atualizado. O nível de SINR é incrementado ou decrementado, de acordo com o início, término e nível de potência de todos os pacotes que atingem um terminal.

Desta forma, a potência transmitida por um dado transmissor deve satisfazer a dois quesitos. Em primeiro lugar, após a atenuação sofrida no canal, ele deve ser recebido acima do limiar $RXThresh$, que representa a mínima potência para a correta recepção de um pacote. A fim de possibilitar isso, a potência de transmissão

deve ser superior à obtida pela equação 4.4 [7], onde $P_{TX_{RXThresh}}[i]$ representa a potência de transmissão empregada para que o sinal atinja o receptor com potência igual a $RXThresh$. $P_R[i-1]$ é a potência que atingiu o receptor após a transmissão de um frame anterior, enviado com potência $P_{TX}[i-1]$.

$$P_{TX_{RXThresh}}[i] = \frac{RXThresh}{P_R[i-1]} P_{TX}[i-1] \quad (4.4)$$

Além disso, o transmissor deve ainda empregar um nível de potência que resulte em um determinado nível de SINR no receptor, $SINRThresh$. Este nível de potência deve ser superior ao que resulta da equação 4.5 (análoga à equação 4.4). Onde $SINR_{RX}[i-1]$ representa o SINR medido no receptor durante o último pacote corretamente recebido.

$$P_{TX_{SINRThresh}}[i] = \frac{SINRThresh}{SINR_{RX}[i-1]} P_{TX}[i-1] \quad (4.5)$$

Assim, para satisfazer aos dois quesitos, basta que o transmissor empregue a potência que satisfaça ao pior caso dentre os dois, que é dada pela equação 4.6. Na implementação do módulo de controle de potência desenvolvido, este nível de potência é calculado no receptor e enviado ao transmissor nos quadros *CTS* e *DATA* (ressalta-se que, neste contexto, o termo "receptor" se refere ao receptor de um certo quadro *DATA*).

$$P_{TX}[i] = \max(P_{TX_{RXThresh}}[i], P_{TX_{SINRThresh}}[i]) \quad (4.6)$$

É importante ressaltar a inclusão do Módulo de SINR, já que uma das principais vantagens do controle de potência é justamente a redução da interferência co-canal. Com a inclusão deste módulo, foi possível constatar um efeito benéfico das técnicas de controle de potência, que não ficava evidente com o uso do simulador original.

4.3 Módulo de Vizinhança

Dentre os mecanismos propostos neste trabalho, o Esquema Básico com Memória (EBM) e o *Farthest Neighbor (FN)* destacam-se dos demais pela necessidade de conhecimento acerca dos terminais vizinhos, ou vizinhança. Nestes esquemas, cada terminal deve conhecer quem são os seus vizinhos e qual o nível de potência mínimo necessário para atingi-los. A fim de proporcionar este conhecimento, foi implementado no simulador em questão um Módulo de Vizinhança (MV), responsável por armazenar e gerenciar a tabela de vizinhança de cada terminal. Este módulo trabalha em cooperação com o MCP, possibilitando a implementação dos esquemas citados acima.

Uma diferença marcante entre os dois refere-se ao fato de que, no EBM, cada terminal construirá sua tabela de vizinhança levando em conta apenas seus interlocutores, ou seja, apenas aqueles terminais vizinhos com os quais já estabeleceu alguma comunicação. Isto facilita bastante o processo de aprendizado, ou seja, a construção da tabela, na medida em que, ao estabelecer uma comunicação, a troca de quadros *RTS-CTS* já possibilita o conhecimento sobre a potência necessária para atingir o vizinho. Isto é feito segundo o mecanismo do Esquema Básico. Desta forma, basta que o MV seja alimentado, ao final desta troca, com as informações necessárias.

No caso do FN, porém, é essencial que cada terminal tenha o conhecimento sobre todos os terminais vizinhos, e não apenas aqueles com os quais estabelece comunicações. Para que o esquema de aviso ao terminal mais distante funcione, este conhecimento é essencial. Assim, já que não é mais possível valer-se apenas da troca *RTS-CTS* para obter as informações necessárias, é implementado pelo MV um esquema de troca periódica de pacotes para este fim. Estes pacotes, denominados *Hello-Request (HRQ)* e *Hello-Reply (HRP)* são equivalentes à troca *RTS-CTS*, fazendo com que os terminais aprendam a potência mínima necessária para atingir uns aos outros. A diferença é que eles são disparados periodicamente e não envolvem apenas duas estações, mas todos os ouvintes. O terminal que envia o *Hello-Request (HRQ)* o faz em *broadcast*, fazendo a requisição a todos os vizinhos ao mesmo tempo.

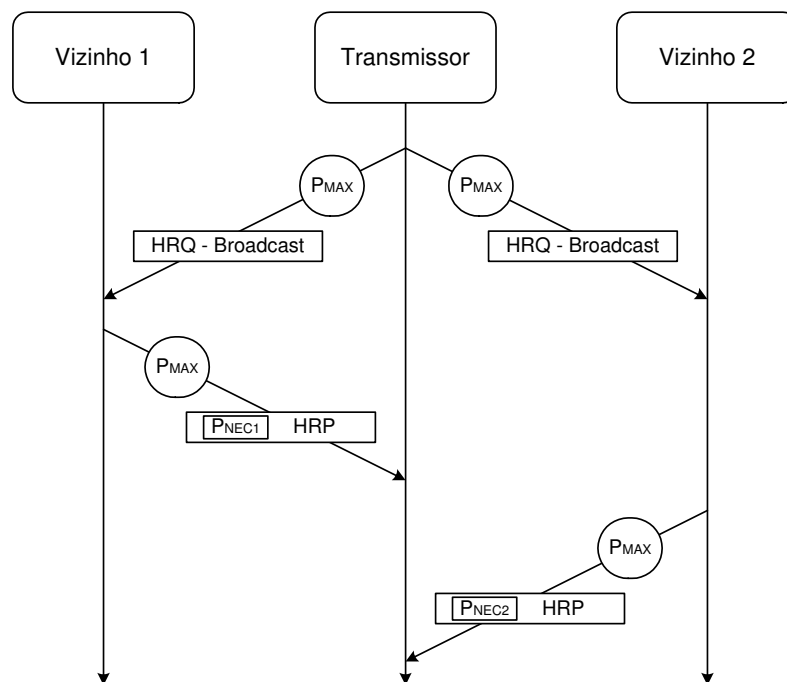


Figura 4.5: Troca de pacotes HRQ-HRP.

Já o pacote de resposta *Hello-Reply* (*HRP*), é enviado por cada um dos vizinhos em *unicast*, destinado ao terminal que realizou a requisição. Desta forma, a tabela de vizinhança é atualizada e o mecanismo FN pode utilizá-la. A troca de pacotes foi implementada no protocolo de roteamento DSR (*Dynamic Source Routing*), acrescentando os pacotes *Hello-Reply* e *Hello-Request* ao protocolo, que já existe no simulador *NS* original. A figura 4.5 esquematiza a troca destes pacotes.

4.4 Considerações sobre as Modificações Realizadas

Neste capítulo foram expostas as principais modificações realizadas no simulador *NS v. 2.26* [47, 48], a fim de possibilitar a implementação e avaliação dos esquemas propostos neste trabalho, bem como de outros esquemas de controle de potência já existentes, para efeito de comparação. As principais modificações podem ser agrupadas em três grandes grupos, que constituem três módulos adicionados ao simulador, a saber:

- Módulo de Controle de Potência - MCP;

- Módulo de SINR - MSINR;
- Módulo de Vizinhança - MV.

O MCP é responsável por escolher, a cada quadro, e de acordo com o esquema de controle de potência utilizado, a potência a ser empregada pelo transmissor. Além disso, é de sua responsabilidade o tráfego e o processamento de todas as informações referentes ao controle de potência. O MSINR é responsável por implementar um aspecto ausente no simulador original, mas de suma importância para uma avaliação mais realista: a influência do ruído e da interferência co-canal na recepção dos quadros e nos mecanismos de controle de potência. E, por fim, o MV é o responsável por manter e atualizar as tabelas de vizinhança, que armazenam informações utilizadas pelo controle de potência acerca dos terminais vizinhos a uma estação.

Todas estas implementações, além de necessárias para a pesquisa em questão, constituem um aprimoramento do simulador *NS*, podendo ser utilizadas por novos trabalhos.

Capítulo 5

Resultados de Simulação

Neste capítulo serão apresentados os resultados de simulação obtidos na avaliação dos esquemas desenvolvidos neste trabalho. A avaliação do Esquema Básico com Memória e a do Esquema Básico com ALCA são inicialmente apresentadas em separado, tendo como parâmetros de comparação o padrão IEEE 802.11 puro (sem controle de potência) e o Esquema Básico. Isto ajuda a demonstrar o quanto cada um desses esquemas contribui para melhorar o desempenho do Esquema Básico.

Por fim, é apresentada uma seção que exhibe os resultados obtidos na avaliação do esquema combinado FN-ALCA.

Uma seção inicial descreve os aspectos comuns referentes ao modelo de simulação utilizado. A menos quando explicitamente citados, os valores utilizados nos parâmetros de simulação poderão sempre ser encontrados nesta seção. Cada um dos esquemas foi avaliado com diferentes topologias de rede, de acordo com os objetivos específicos da avaliação. Desta forma, no início de cada seção de resultados, a topologia é apresentada, bem como justificada sua escolha.

5.1 Modelo de Simulação

Para a realização das simulações foi utilizado o simulador *NS 2.26* [47] e implementadas modificações de acordo com o capítulo 4. A taxa de transmissão de dados

utilizada no canal de rádio foi de 11 Mbps e a taxa básica de 2 Mbps. Atualmente, esta é a taxa máxima utilizada em equipamentos 802.11b [3] reais. O tamanho do pacote foi fixado em 1024 bytes, a não ser nas simulações onde este tamanho é variado (nestas simulações a alteração do tamanho do pacote fica explícita). Cada terminal transmissor gera um tráfego do tipo CBR (*Constant Bit Rate*), ou seja, a camada de aplicação permanece, durante todo o tempo de simulação, enviando dados a determinada taxa constante. A taxa das fontes CBR são diferentes para cada tipo específico de avaliação.

Foi considerada uma Zona de Detecção de Portadora (ZDP) aproximadamente duas vezes maior do que a Zona de Recepção (ZR). No maior nível de potência utilizado, que corresponde a 281 mW, e ainda considerando um terreno plano e sem obstáculos, a ZDP corresponde a um círculo de raio 500 m, e a ZR a um círculo de raio 250 m. O modelo de propagação utilizado é denominado *Two-Ray Ground*. Este modelo encontra-se disponível no simulador e utiliza dois modelos distintos para o cálculo da atenuação da potência do sinal em relação à distância do transmissor. É utilizado um limiar, descrito pela equação 5.1, onde h_t e h_r são as alturas das antenas, e λ é o comprimento de onda do sinal, para decidir qual modelo será utilizado. Se a distância d entre transmissor e receptor for inferior a este limiar, o modelo utilizado é o de propagação em espaço livre, no qual a potência do sinal recebido é uma função de $\frac{1}{d^2}$. Se a distância for superior ao limiar, é utilizado um modelo que considera dois caminhos distintos de propagação: uma onda direta e uma onda refletida no solo. Neste modelo, a potência do sinal recebido sofre uma atenuação mais severa, sendo calculada como uma função de $\frac{1}{d^4}$. Para as simulações realizadas, o valor do limiar corresponde a aproximadamente 100m.

$$d_c = \frac{4\pi h_t h_r}{\lambda} \quad (5.1)$$

Cada simulação corresponde a um tempo de 30 s, a não ser quando explicitamente citado. Este tempo foi escolhido por ser um intervalo grande o suficiente para uma amostragem adequada. Na taxa de 11 Mbps, neste tempo pode-se transmitir mais de 30.000 quadros de dados. Não foi considerada mobilidade dos terminais

nas simulações, com o objetivo de avaliar somente o desempenho dos esquemas, sem a influência de outros fatores. A mobilidade traz consequências nocivas ao desempenho da rede, tais como a perda e redescoberta de rotas, cujos efeitos poderiam mascarar os resultados obtidos pelos mecanismos de controle de potência. Em todas as simulações são avaliados o padrão IEEE 802.11 puro e o Esquema Básico, servindo de parâmetros de comparação para os esquemas propostos. Em algumas simulações o esquema PCM - *Power Control MAC* também é avaliado para comparação de desempenho.

5.2 Esquema Básico com Memória

5.2.1 Topologia

Para avaliação do EBM, foi implementada a topologia indicada na figura 5.1, na qual são estabelecidas comunicações paralelas entre terminais que se situam em duas colunas. Gerou-se, para cada conjunto, um tráfego do tipo CBR (*Constant Bit Rate*) de taxa 5Mbps originado nos terminais da coluna da esquerda, ou seja, referenciados por números pares, tendo como destino o terminal correspondente na coluna da direita. Assim, toda a comunicação é realizada entre cada terminal par N e seu vizinho $N + 1$.

O objetivo deste cenário é analisar a influência da Zona de Detecção de Portadora no desempenho do mecanismo de controle de potência. Ao variar a distância entre os conjuntos, pode-se estudar com exatidão as situações relativas possíveis entre duas transmissões concorrentes, no que diz respeito às Zonas de Recepção e de Detecção de Portadora. Parte-se inicialmente de distâncias pequenas, ou seja, fazendo com que as comunicações estejam dentro da ZR uma da outra, aumentando-se gradativamente, fazendo com que uma comunicação encontre-se na ZDP da outra, até que, por fim, estejam completamente dissociadas.

Utilizou-se uma distância de 150m entre as colunas, ou seja, distância entre transmissores e receptores. Os pacotes gerados pelo transmissor têm um tamanho

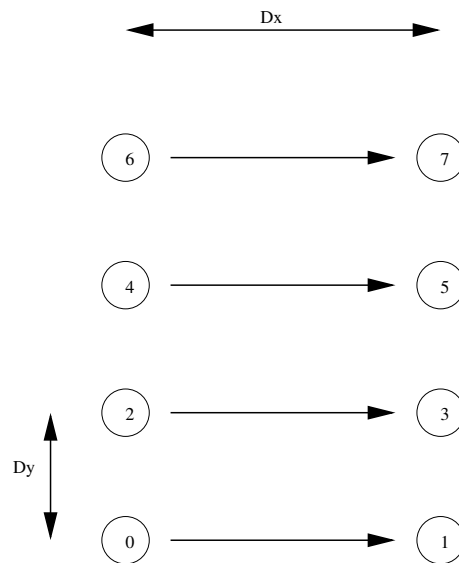


Figura 5.1: Topologia para avaliação do EBM.

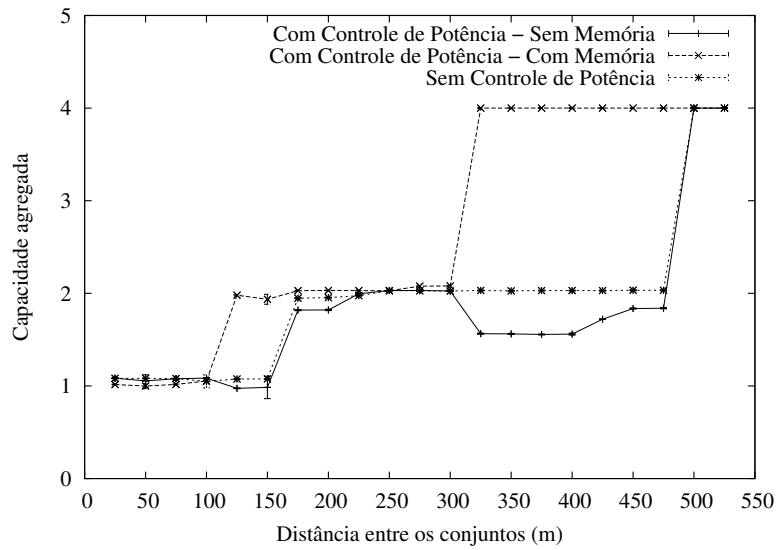
de 1024 bytes. A distância entre as linhas, ou entre os conjuntos, foi variada de 25m a 525m a passos de 25m. Na simulação em questão, foram utilizados quatro conjuntos.

5.2.2 Resultados

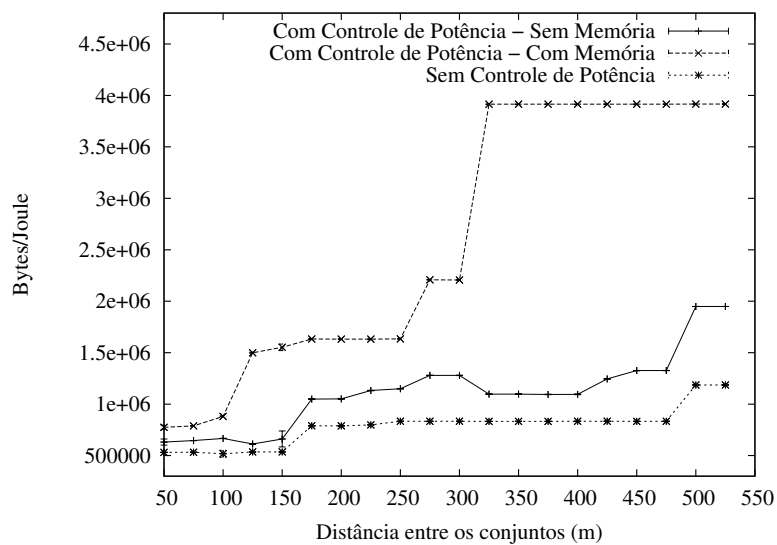
Nas figuras 5.2(a) e 5.2(b) são apresentadas as curvas resultantes para a vazão agregada e número de bytes entregues por unidade de energia consumida, relativos à distância entre os conjuntos. Os intervalos de confiança utilizados são de 95%.

O gráfico exibido na figura 5.2(a) mostra a vazão agregada dos quatro conjuntos, utilizando o tamanho do pacote igual a 1024 bytes, normalizada em relação à vazão obtida com apenas um dos conjuntos. A normalização ajuda a percepção do desempenho por fazer referência a uma transmissão isolada, na qual inexistente disputa pelo meio. Pode-se facilmente concluir ainda que a vazão máxima obtida no cenário em questão será igual a quatro, ou seja, quatro transmissões simultâneas isoladas.

Como as Zonas de Recepção e de Detecção de Portadora foram iguais a 250m e 500m, para potência de transmissão máxima, pode-se perceber nitidamente a queda de desempenho do esquema básico sem memória na região que vai de 275m a 475m,



(a) Vazão agregada.



(b) Energia.

Figura 5.2: EBM - vazão e energia consumida (1024 B).

ocasionada pelo problema exposto em [6]. Nesta região, o controle de potência é prejudicado pelo fato do transmissor vizinho a um conjunto situar-se na ZDP dele, eventualmente ocasionando colisões. Como consequência, seu desempenho é consideravelmente degradado, em relação ao 802.11 puro.

Quando a distância entre os conjuntos atinge os 500m, as comunicações encontram-

se completamente fora da ZDP uma das outras, resultando em comunicações independentes. Assim, como não há mais disputa pelo meio, os desempenhos dos esquemas com e sem controle de potência igualam-se ao máximo possível.

Para o esquema com memória, todas as comunicações são executadas em potência reduzida, exceto pelos pacotes iniciais para a determinação do nível necessário. Neste caso, pode-se concluir que a ZR é reduzida ao mínimo necessário para atingir o receptor, no caso, 150m. Da mesma forma, a zona de detecção de portadora sofre uma redução proporcional, passando a situar-se entre 150m e 300m. Com isso, pode-se observar que, já a partir dos 300m, o esquema com memória passa a realizar o reuso espacial do canal, atingindo o desempenho máximo.

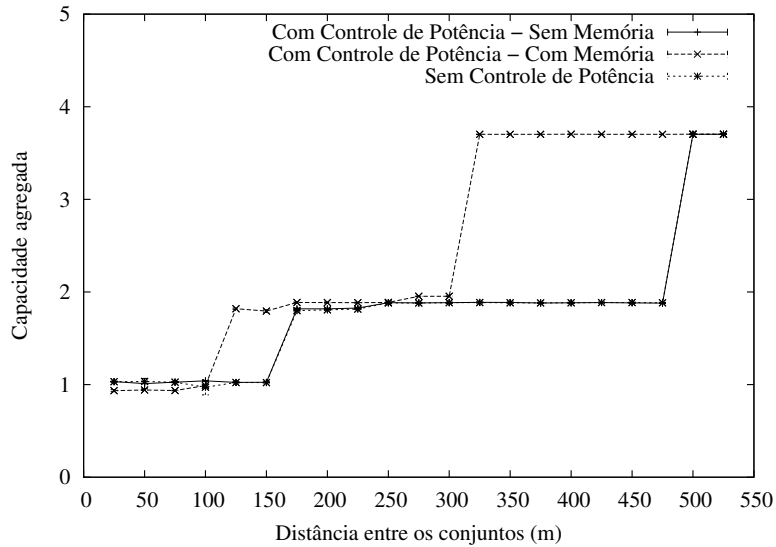
Mais ainda, pode-se perceber que este esquema não apresenta, mesmo quando a distância entre os conjuntos é tal que se situe dentro da ZDP (150m - 300m), uma queda de desempenho análoga à do esquema sem memória na região entre 250m e 500m.

Esta melhoria deve-se ao fato de que os pacotes *RTS* e *CTS* são também enviados em potência baixa, evitando as possíveis colisões entre *RTS* e *CTS* em máxima potência e *DATA* e *ACK* em potência reduzida. A falha do esquema básico é decorrente da redução da ZDP ao longo da troca *RTS-CTS-DATA-ACK*, o que faz com que terminais que detectaram os pacotes *RTS* e *CTS* não detectem a transmissão dos pacotes *DATA* e *ACK*. Ao utilizar a mesma potência para todos os pacotes de controle e o pacote de dados, o modelo com memória possui a Zona de Detecção de Portadora reduzida durante toda a troca, evitando seu aumento desnecessário no início da transmissão, atenuando o problema.

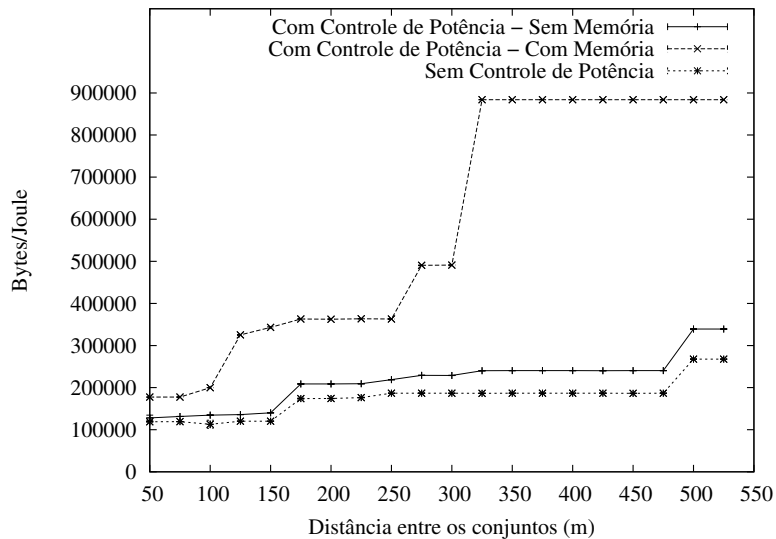
No gráfico exibido na figura 5.2(b) pode-se atestar a maior eficiência no consumo de energia obtida pelos dois métodos de controle de potência quando comparados com o padrão puro. Mais uma vez, o esquema com memória, valendo-se da economia na transmissão de *RTS* e *CTS*, termina por apresentar um melhor comportamento.

Reduzindo o tamanho do pacote de 1024 bytes para 128 bytes, foram obtidos os gráficos exibidos nas figuras 5.3(a) e 5.3(b). Na figura 5.3(a), pode-se perceber que

o efeito do aumento das colisões e conseqüente queda de desempenho apresentado pelo esquema básico sem memória entre 250 e 500m praticamente desaparece. Isto ocorre devido a diminuição da probabilidade de colisões e a redução do tamanho dos pacotes de dados, fazendo com que seu desempenho seja praticamente idêntico ao do padrão puro.



(a) Vazão agregada.



(b) Energia.

Figura 5.3: EBM - vazão e energia consumida (128 B).

Na figura 5.3(b), percebe-se, numa comparação com a figura 5.2(a), que, para pacotes de 128 bytes, a eficiência no consumo é bastante reduzida. Este efeito é decorrente do aumento do número de pacotes de controle *RTS* e *CTS* quando pacotes de dados de tamanho menor são utilizados.

O Esquema Básico com Memória consiste em uma primeira aproximação do que seria um mecanismo que reduzisse a proteção das transmissões, em troca dos ganhos do controle de potência. Entretanto, a redução de proteção do EBM é bastante radical, reduzindo a potência de transmissão de *RTS* e *CTS* ao mínimo necessário. Naturalmente, em um cenário real, onde a mobilidade e as condições adversas do canal afetam sobremaneira a potência necessária para atingir um receptor, o EBM seria obrigado a retransmitir estes pacotes várias vezes em potência máxima, o que o faria perder desempenho tanto em vazão quanto em energia. Com isso, o EBM é considerado neste trabalho apenas um passo inicial em direção ao FN-ALCA, que seria um protocolo mais completo. Assim, nas demais simulações, o EBM não tem seu desempenho avaliado.

5.3 Esquema Básico com ALCA

5.3.1 Topologia

Para a avaliação do ALCA em conjunto com o Esquema Básico, foram utilizados dois tipos de cenários de simulação. O primeiro deles, denominado Cenário 1, foi criado com o propósito de observar de forma explícita como os esquemas considerados são afetados pelo Problema dos Enlaces Assimétricos, exposto na subseção 2.2.3. A topologia ideal para esse propósito é a indicada na figura 5.4, na qual são estabelecidas comunicações paralelas entre terminais que se situam em duas colunas. Gerou-se, para cada fluxo, um tráfego do tipo CBR (*Constant Bit Rate*), de taxa 5 Mbps com diferentes tamanhos de pacote, que se origina nos terminais da coluna da esquerda, ou seja, nos nós 0 e 2, destinando-se ao terminal correspondente na coluna da direita (nós 1 e 3).

Utilizando um cenário como esse, pode-se estudar com exatidão as situações relativas possíveis entre duas transmissões concorrentes, no que diz respeito às Zonas de Recepção (ZR) e Detecção de Portadora (ZDP). Parte-se inicialmente de distâncias pequenas, ou seja, fazendo com que as comunicações estejam dentro da ZR uma da outra, aumentando-se gradativamente, fazendo com que uma comunicação encontre-se na ZDP da outra, até que, por fim, estejam completamente dissociadas.

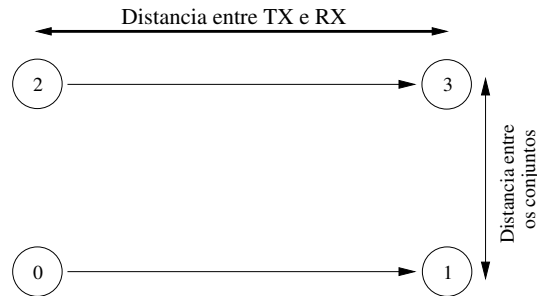


Figura 5.4: Avaliação do ALCA - Cenário 1.

Utilizou-se uma distância de 150m entre transmissores e receptores. Os pacotes gerados pelos transmissores têm um tamanho de 1024 bytes. A distância entre os conjuntos foi variada de 25m a 525m a passos de 25m.

O segundo tipo de cenário, denominado genericamente de Cenário 2, corresponde a um conjunto de cenários aleatórios, gerados através do posicionamento arbitrário de 40 terminais em uma certa área física. 20 terminais são transmissores e 20 são receptores. É exigido que todas as transmissões sejam de um único salto, fazendo com que os terminais da rede não executem roteamento. No entanto, um nó não é obrigado a comunicar-se somente com o nó mais próximo a ele, podendo escolher qualquer um dentre os que se situam dentro de sua ZR. Foram realizadas simulações variando a dimensão da área ocupada pela rede e a carga da rede (taxa de geração dos tráfegos CBR). Para cada simulação, são gerados 50 cenários aleatórios.

5.3.2 Resultados

Cenário 1

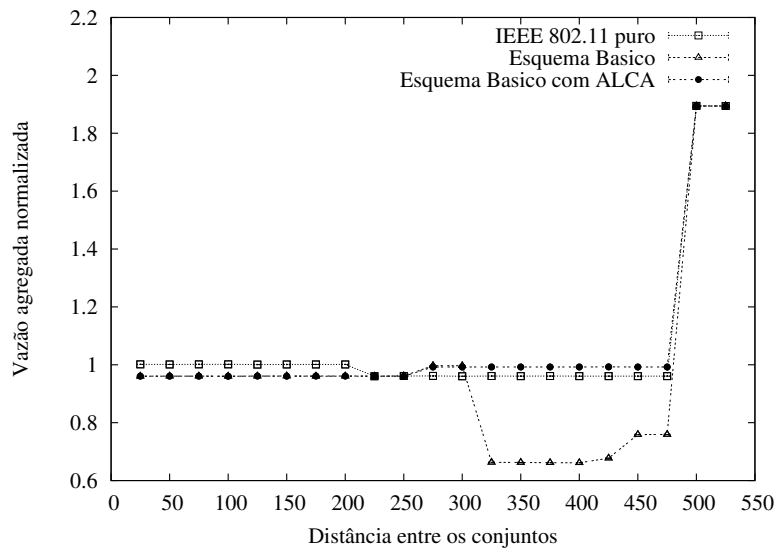
O gráfico exibido na figura 5.5(a) mostra a vazão agregada dos dois conjuntos, utilizando o tamanho do pacote igual a 1024 bytes, normalizada em relação à vazão obtida com apenas um dos conjuntos. A normalização ajuda a percepção do desempenho por fazer referência a uma transmissão isolada, na qual inexistente disputa pelo meio. Pode-se facilmente concluir ainda que a vazão máxima obtida no cenário em questão será igual a dois, ou seja, duas transmissões simultâneas isoladas.

Como as zonas de Recepção e de detecção de portadora foram iguais a 250m e 500m, para potência de transmissão máxima, pode-se perceber nitidamente a queda de desempenho do Esquema Básico na região que vai de 275m a 475m, ocasionada pelo Problema dos Enlaces Assimétricos, conforme citado em [6]. Nesta região, o controle de potência é prejudicado pelo fato do transmissor vizinho a um conjunto situar-se na ZDP dele, eventualmente ocasionando colisões. Como consequência, seu desempenho é consideravelmente degradado, em relação ao 802.11 puro.

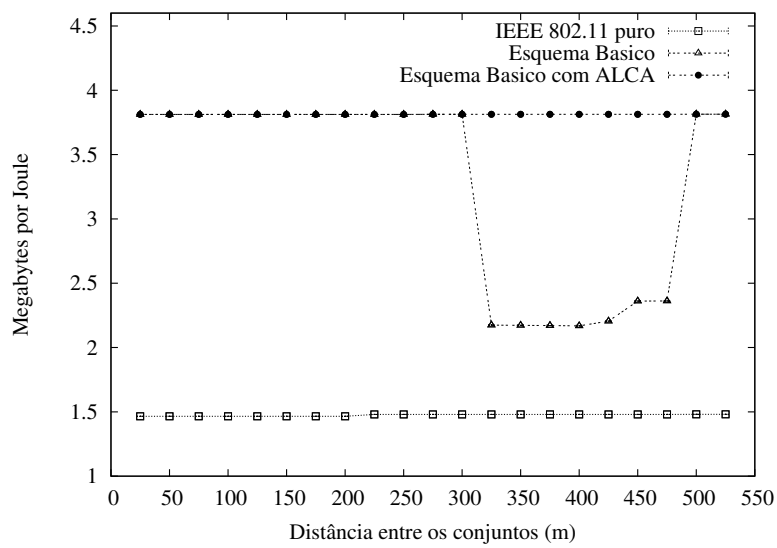
Quando a distância entre os conjuntos atinge os 500m, as comunicações encontram-se completamente fora da ZDP uma da outra, resultando em comunicações independentes. Assim, como não há mais disputa pelo meio, os desempenhos dos esquemas com e sem controle de potência igualam-se ao máximo possível.

Pode-se perceber que o protocolo ALCA corrige o Problema dos Enlaces Assimétricos, não tendo seu desempenho prejudicado como o do Esquema Básico. Seu desempenho diferenciado ocorre em função da sinalização acerca da duração da transmissão para os terminais que estão na ZDP, através do sistema explicado na seção 3.2.

Na figura 5.5(b) é possível observar que a economia de energia proporcionada pelo ALCA é bem maior que a do Esquema Básico puro, já que são necessárias menos retransmissões, como resultado direto de uma melhor proteção das transmissões. Os resultados apresentados são a média de 20 simulações. Os intervalos de confiança



(a) Vazão Agregada.



(b) Energia.

Figura 5.5: ALCA - Cenário 1.

são de 95%.

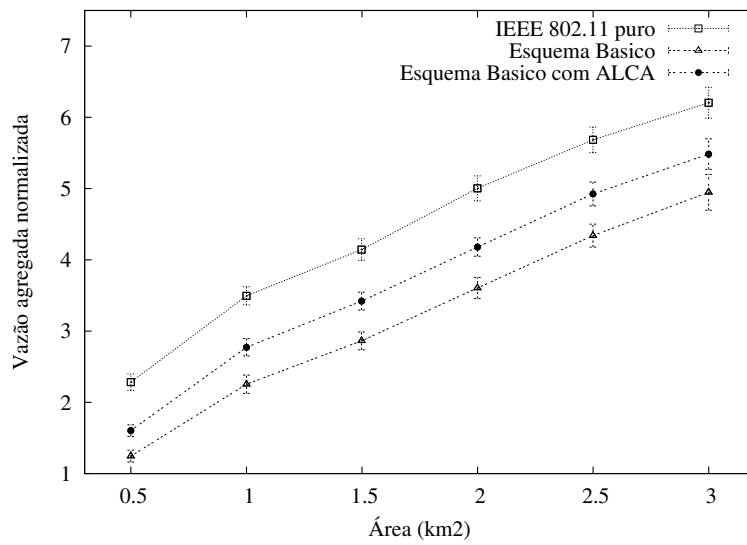
Cenário 2 - Variando a área

Nesta avaliação, são dispostos 40 nós de forma aleatória em uma dada área física. Os valores considerados para a área são: 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5; e 3 km². Existem ao todo 20 fluxos (20 transmissores e 20 receptores). Foram simulados 50 cenários para cada dimensão de área, considerando o intervalo de confiança de 95%. As comunicações são todas de um único salto, fazendo com que os terminais da rede não executem roteamento. Isto foi feito para impedir que efeitos decorrentes da descoberta de rotas pudessem mascarar os resultados da avaliação. No entanto, um nó não é obrigado a comunicar-se somente com o nó mais próximo a ele, podendo escolher qualquer um dentre os que se situam dentro de sua Zona de Recepção (ZR). O objetivo do cenário apresentado é avaliar o desempenho dos esquemas para redes de diferentes densidades.

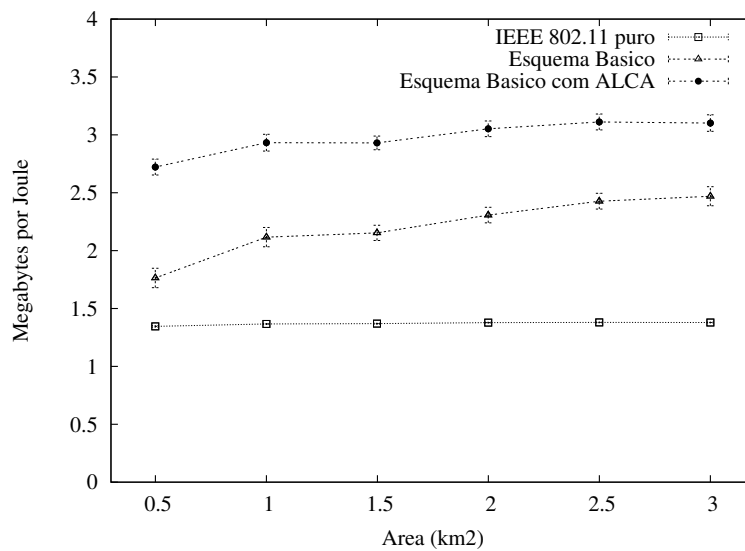
Na figura 5.6 são exibidos os resultados para vazão e economia de energia. A exemplo do Cenário 1, a vazão agregada normalizada é obtida pela divisão da vazão agregada da rede pela vazão obtida com apenas um fluxo, utilizando o mesmo tamanho de pacote. O tamanho de pacote utilizado foi de 1024 bytes. Cada fluxo possui uma taxa CBR de 5 Mbps, o que é mais do que suficiente para que cada nó tenha sempre pacotes na fila a serem transmitidos. É importante perceber que trata-se de uma situação limite na rede, na qual ela opera em sua capacidade máxima de carga.

Examinando 5.6(a), é possível notar que o padrão IEEE 802.11 puro tem maior desempenho. Em seguida temos o Esquema Básico com o protocolo ALCA e, por último, o Esquema Básico puro. Numa situação extrema de tráfego como a simulada, é natural que o padrão 802.11 apresente um desempenho melhor, já que o ALCA oferece uma maior proteção contra colisões de uma forma conservadora. O Esquema Básico puro tem o pior desempenho devido ao Problema dos Enlaces Assimétricos. O ALCA melhora sua vazão, ao solucionar o problema.

Já na figura 5.6(b), é evidente o ganho do protocolo ALCA. O Esquema Básico proporciona grande economia com relação ao IEEE 802.11 puro, porém este acréscimo poderia ser ainda maior, se não houvesse o Problema dos Enlaces Assimétricos.



(a) Vazão Agregada.



(b) Energia.

Figura 5.6: ALCA - Cenário 2: Variando a área.

Ao utilizar o ALCA, elimina-se o problema, e o ganho de economia de energia faz-se pleno.

Cenário 2 - Variando a taxa CBR

Mais uma vez, a simulação é realizada com 20 nós transmissores e 20 nós receptores dispostos aleatoriamente em uma área de 2000m x 2000m. As taxas CBR por fluxo simuladas foram: 50, 100, 200, 300, 400, 500 e 600 kbps. Somando as taxas dos 20 fluxos, obtemos o tráfego total oferecido à rede: 1, 2, 4, 6, 8, 10 e 12 Mbps. Como nas demais simulações foram utilizadas taxas altas, de forma a testar o comportamento dos esquemas em uma situação limite de tráfego, nesta simulação procurou-se utilizar taxas mais próximas das necessárias para aplicações reais.

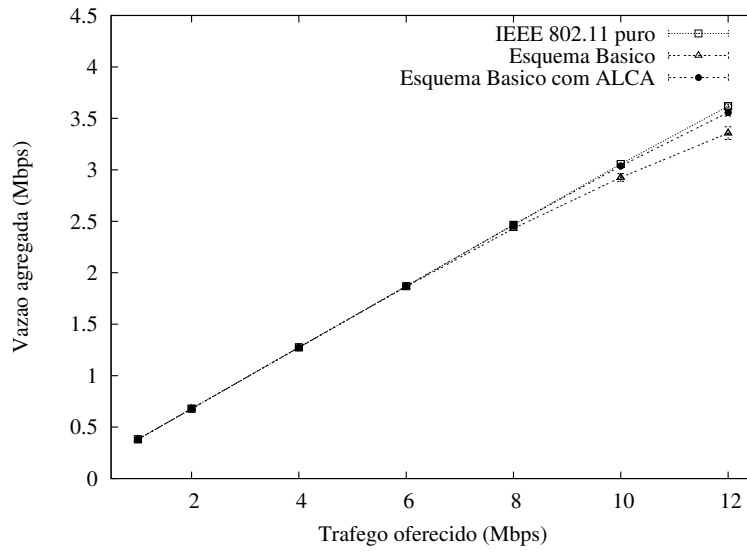
Os resultados são demonstrados na figura 5.7. O tamanho do pacote utilizado foi de 1024 bytes. Os intervalos de confiança são de 95%.

É possível observar que, para valores mais realistas de tráfego, o comportamento dos protocolos quanto a vazão é bem parecido. As curvas se sobrepõem na maior parte dos valores, com uma ligeira queda de desempenho do Esquema Básico quando as taxas tendem a aumentar.

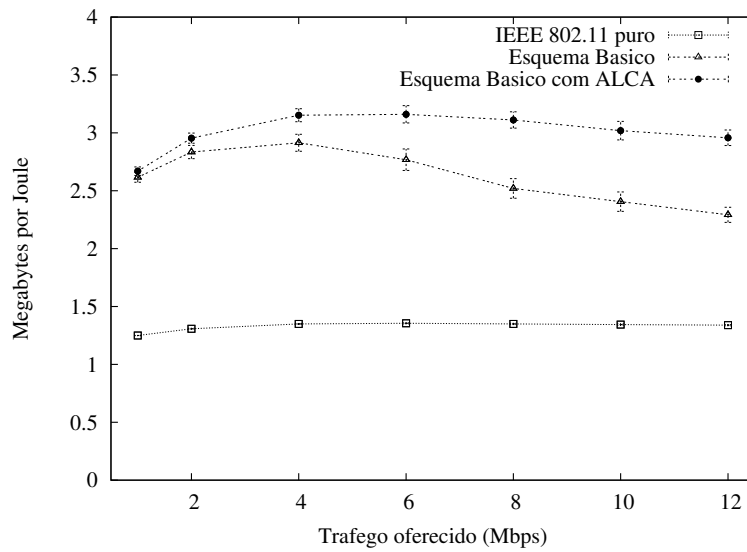
No entanto, no gráfico que ilustra a medida de megabytes por Joule, pode-se observar a disparidade entre os mecanismos. O padrão IEEE 802.11 puro tem desempenho bem inferior, sendo superado quase que em 100% pelo Esquema Básico. Quando o tráfego aumenta e as colisões começam a acontecer, o Problema dos Enlaces Assimétricos se faz presente, fazendo com que o Esquema Básico com o protocolo ALCA apresente uma economia de energia de 30 a 40% maior que a provida pelo Esquema Básico puro. A explicação para o melhor desempenho, está em uma maior proteção às transmissões, economizando a energia gasta em retransmissões.

5.4 FN-ALCA

Nesta seção são avaliados o padrão IEEE 802.11 puro, o Esquema Básico, o Esquema Básico em conjunto com o ALCA e o PCM, além do esquema FN-ALCA. O EBM não é simulado pelas razões indicadas na seção 5.2. São apresentadas inicialmente duas curvas nas quais são avaliados todos os esquemas citados, exceto



(a) Vazão Agregada.



(b) Energia.

Figura 5.7: ALCA - Cenário 2: Variando a taxa CBR.

o FN-ALCA. O objetivo é ilustrar o desempenho do ALCA em comparação aos demais, nos mesmos moldes de simulação utilizados na avaliação do FN-ALCA. Isto é necessário pois posteriormente, com a inclusão do FN-ALCA, que possui um desempenho bastante superior, fica difícil comparar o ALCA com os demais.

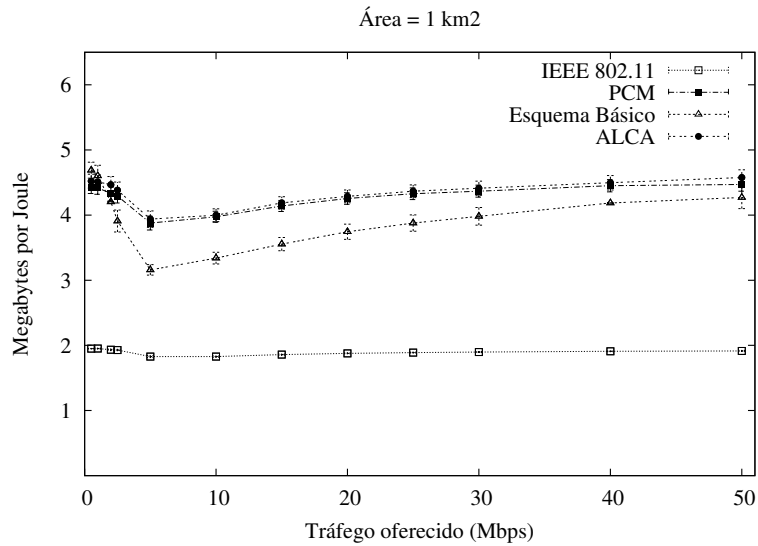
5.4.1 Topologia

Mais uma vez, o cenário de simulação corresponde a um conjunto de cenários aleatórios, gerados através do posicionamento arbitrário de 40 terminais em uma certa área física. Destes, 20 terminais são transmissores e 20 são receptores. Foram realizadas simulações variando a dimensão da área ocupada pela rede e a carga da rede (taxa de geração dos tráfegos CBR). A área na qual os terminais foram distribuídos foi variada, assumindo os valores de $1km^2$, $2,25km^2$ e $4km^2$. Mais uma vez, o objetivo é analisar o comportamento dos esquemas em redes de diferentes densidades. Para cada área, foram analisados dois parâmetros, sendo eles a vazão agregada da rede, ou capacidade, e a quantidade de dados transmitidos por unidade de energia. Para cada simulação, são gerados 50 cenários aleatórios. Desta forma, são exibidos os valores médios e barras de erro que correspondem a intervalos de confiança de 99%, diferentemente das avaliações preliminares de EBM e ALCA, que foram realizadas com intervalo de confiança de 95%. As simulações são sempre realizadas com um patamar de potência de ruído de -100dBm.

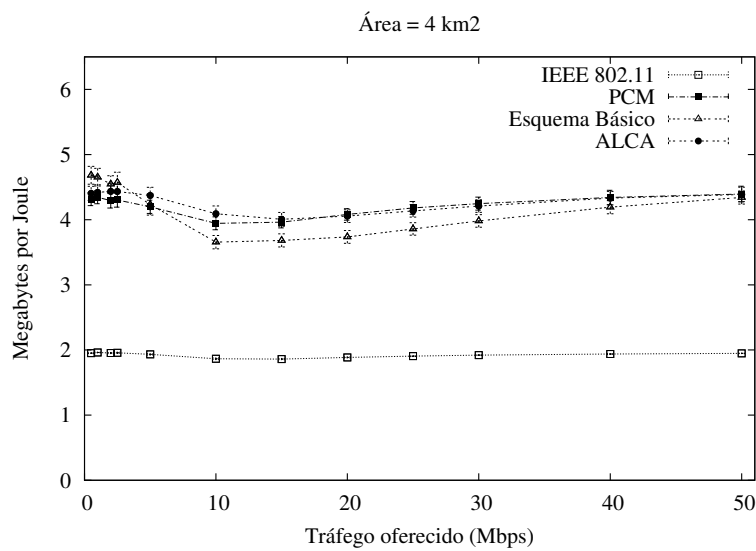
5.4.2 Resultados

Inicialmente, as figuras 5.8(a) e 5.8(b) apresentam os resultados obtidos, em termos de energia, para os seguintes modos: padrão 802.11 puro, PCM, Esquema Básico e Esquema Básico com ALCA. Este último, por simplicidade, será referenciado nos gráficos simplesmente por ALCA. Nessas curvas, assim como nas demais, os parâmetros de desempenho são plotados em função do tráfego total oferecido à rede. Este valor corresponde ao somatório das taxas de transmissão de todos os fluxos CBR gerados pelos transmissores. Como todos os fluxos, em cada simulação, têm taxas iguais, podemos obter a taxa de transmissão de um único fluxo fazendo a divisão do valor do tráfego oferecido pelo número de transmissores, isto é, 20. Podemos perceber que, em todos os gráficos, o Esquema Básico, por si só, já apresenta grande vantagem em relação ao padrão 802.11. Adicionalmente, pode-se ver que o desempenho do esquema ALCA é comparável ao do PCM. Não é apresentada

uma comparação de vazão agregada entre estes esquemas pois nenhum deles utiliza considerável reuso espacial do canal, sendo seus resultados de vazão sempre bem próximos.



(a) Energia - Área: 1 km².



(b) Energia - Área: 4 km².

Figura 5.8: Comparação do ALCA com os demais esquemas.

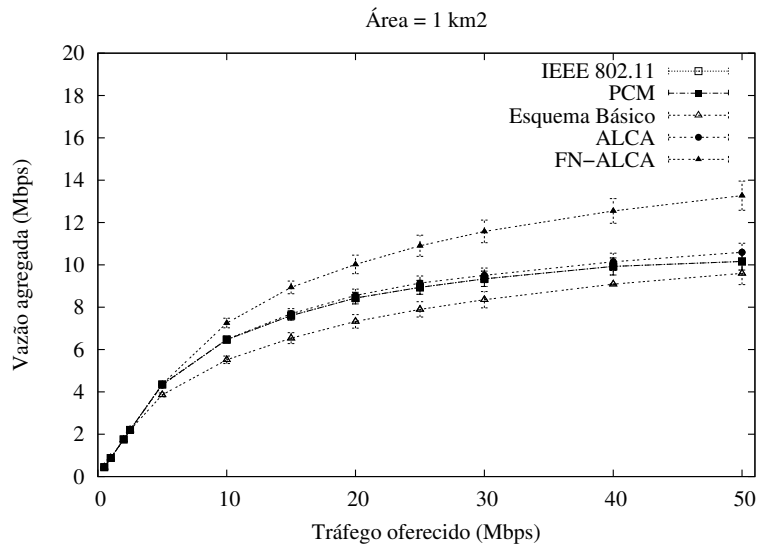
As figuras 5.9(a) e 5.9(b) exibem os resultados obtidos nos 50 cenários aleatórios, numa área de 1 km². Desta vez, além dos esquemas avaliados anteriormente, é

avaliado o desempenho do esquema FN-ALCA. Analisando o gráfico 5.9(b), pode-se verificar a grande economia de energia proporcionada pelo esquema FN-ALCA. A quantidade de dados transmitidos por unidade de energia gasta é mais do que duas vezes maior do que o obtido por outros métodos de controle de potência, tais como Esquema Básico, com e sem ALCA, e PCM. Tomando com referência o padrão 802.11 puro, o aumento de eficiência chega a ser de 400 a 500%.

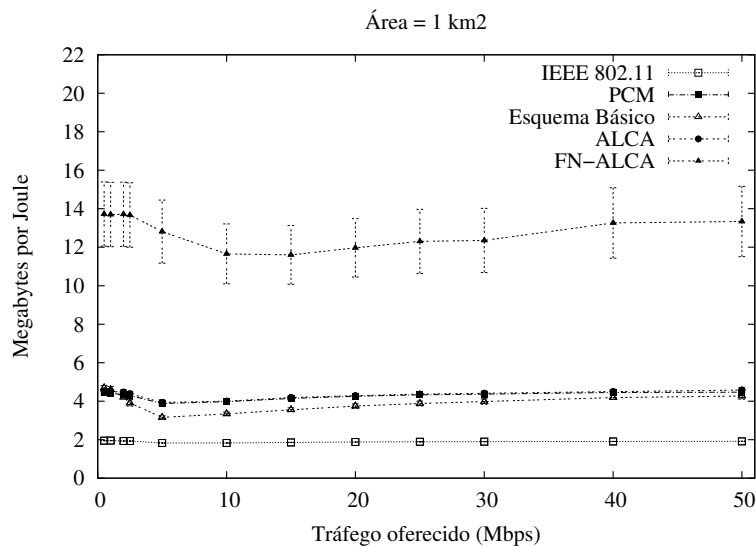
No gráfico 5.9(a), pode-se ver que o método FN-ALCA, com o aumento do tráfego oferecido, passa a ter um desempenho da ordem de 30% maior do que os demais esquemas. Isto pode ser creditado ao fato do FN-ALCA utilizar um significativo reuso espacial do canal de rádio, já que a reserva do meio é feita apenas na potência necessária para atingir o terminal vizinho mais distante, como descrito na subseção 3.3. Com isso, a potência média das transmissões é reduzida, o que resulta em um menor nível de interferência nos receptores, possibilitando maior vazão. Nas figuras 5.10(a) e 5.10(b) podemos ver os resultados obtidos em uma área de 2,25 km^2 , e nas figuras 5.11(a) e 5.11(b), os resultados em uma área de 4 km^2 .

Ao analisar os gráficos de energia pode-se perceber que o aumento da área praticamente não provoca mudanças na eficiência, não havendo alterações perceptíveis nas curvas. No entanto, nos gráficos de vazão agregada, percebe-se o aumento gradativo da vazão, acompanhando o aumento da área. Isto ocorre pois, em redes menos densas, a reutilização espacial do canal tende a ser maior.

Em todos os cenários avaliados, os benefícios trazidos pelo esquema proposto, o FN-ALCA, mantiveram-se inalterados. Pode-se perceber ainda que o FN-ALCA apresenta uma maior dependência do cenário aleatório gerado do que os demais esquemas, o que se reflete nos maiores intervalos de confiança. Este é um efeito normal, já que, com o mecanismo de transmissão de *RTS-CTS* na mínima potência necessária para atingir os vizinhos mais distantes, pode-se prever a existência de cenários mais ou menos favoráveis à economia. Entretanto, mesmo com grande variação nos resultados, as curvas demonstram um desempenho bastante superior aos demais.



(a) Vazão Agregada.

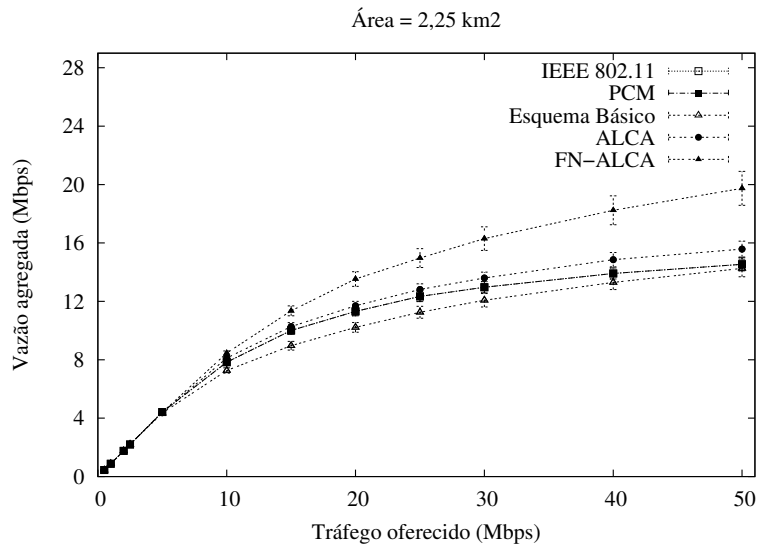


(b) Energia.

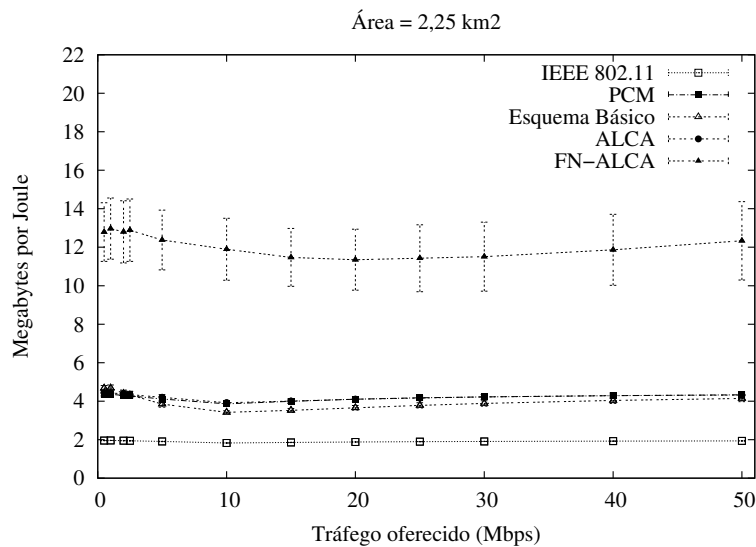
Figura 5.9: FN-ALCA - Área: 1 km².

5.5 Considerações sobre os Resultados Obtidos

Neste capítulo foram expostos os resultados de simulação obtidos na avaliação dos esquemas propostos neste trabalho. Os resultados demonstram que o esquema FN-ALCA apresenta um desempenho bastante superior aos demais, tanto em economia



(a) Vazão Agregada.

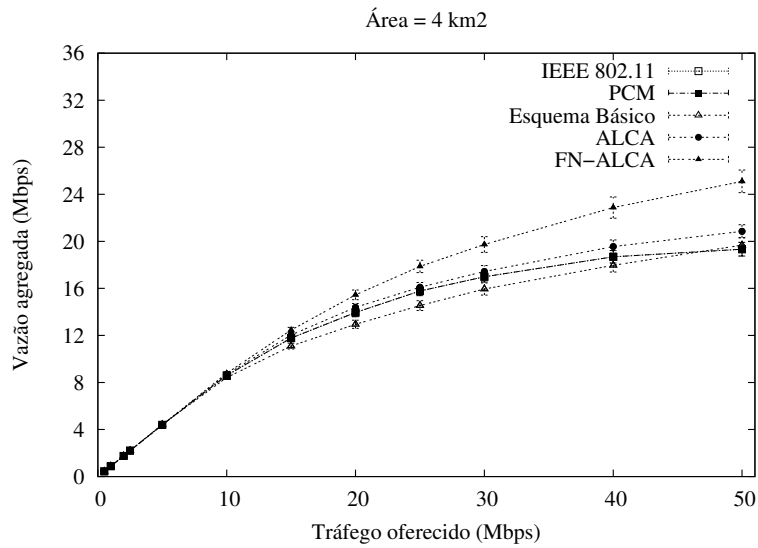


(b) Energia.

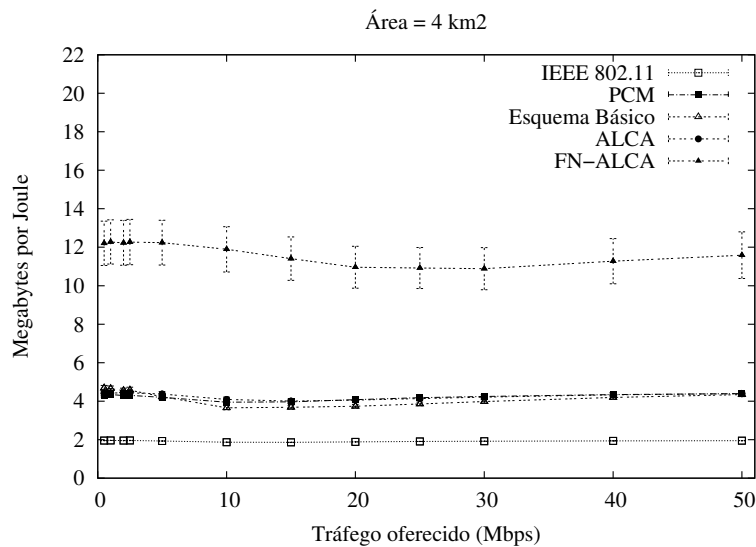
Figura 5.10: FN-ALCA - Área: 2,25 km².

de energia, quanto em vazão agregada. Isto é uma consequência direta de duas características suas, a saber:

- Troca de quadros *RTS/CTS* na mínima potência suficiente para atingir o vizinho mais distante;



(a) Vazão Agregada.



(b) Energia.

Figura 5.11: FN-ALCA - Área: 4 km².

- Proteção adequada das transmissões através do esquema ALCA.

As simulações em questão levam em conta o efeito do ruído e da interferência co-canal, condições que fazem parte de uma rede *ad hoc* real. Além disso, conforme explicitado no capítulo 4, para todas as potências de transmissão empregadas pelos

terminais, é acrescentada uma margem de 5% para lidar com efeitos como mudanças súbitas nas condições de propagação. Esses fatores contribuem para tornar os resultados mais próximos de condições reais.

Simulações realizadas em cenários com posicionamento arbitrário de terminais demonstraram que o esquema proposto FN-ALCA oferece um ganho mínimo de 100% em eficiência de energia com relação aos demais esquemas considerados, o que se traduz em um ganho mínimo de 400% em relação ao padrão 802.11 sem controle de potência. Adicionalmente, como resultado de um melhor aproveitamento do canal rádio, FN-ALCA mostrou-se por volta de 30% mais eficiente no que diz respeito à vazão agregada da rede.

A questão da mobilidade não é tratada neste trabalho, por representar um conjunto de condições muito mais severas para as condições de propagação e de conectividade da rede. O processo de perda e descoberta de rotas, por exemplo, constitui um problema capaz de ser tão prejudicial ao desempenho da rede, que poderia comprometer os resultados de forma a mascarar as avaliações realizadas. Entretanto, pode-se acreditar que os esquemas utilizados são capazes de permitir que terminais em movimento relativo atualizem suas tabelas de potência ao longo do movimento, bastando para isso adequar a periodicidade da atualização das tabelas à velocidade relativa entre as estações. Podem ser necessários ajustes e aprimoramentos capazes de melhorar a eficiência dos esquemas numa rede móvel, porém os conceitos que norteiam os esquemas continuam válidos.

Comunicações de múltiplos saltos também não são utilizadas nas simulações, tendo em vista que a simples inclusão do roteamento, e do consequente processo de descoberta de rotas, também poderia mascarar os resultados referentes aos esquemas. Todavia, já que qualquer comunicação de múltiplos saltos pode ser encarada como uma série de comunicações de salto único, ao menos do ponto de vista das camadas física e de enlace, onde se situam os esquemas avaliados, pode-se esperar o comportamento dos esquemas não seja prejudicado por comunicações daquele tipo.

Desta forma, os resultados obtidos expressam a economia de energia, bem como o ganho de vazão, que pode ser obtido em uma rede *ad hoc* 802.11 com o uso das

técnicas propostas neste trabalho. Por todos os fatores citados, pode-se concluir que eles possuem, mesmo sendo baseados em simulações, considerável proximidade com os resultados que seriam obtidos em um teste real.

Capítulo 6

Conclusões e Trabalhos Futuros

O objetivo deste trabalho de dissertação foi analisar os principais mecanismos de controle de potência em redes *ad hoc* 802.11 existentes na literatura e desenvolver novas propostas, capazes de proporcionar um melhor desempenho.

As principais contribuições deste trabalho foram as seguintes:

- a proposta de um novo mecanismo de controle de potência, capaz de oferecer não só economia de energia, mas também aumento na vazão agregada da rede;
- uma solução para o problema dos enlaces assimétricos, que se equipara em desempenho à solução proposta em [6], porém com uma menor complexidade de implementação, e;
- a utilização do conhecimento de toda a vizinhança de um terminal na determinação da potência de transmissão, visando otimizar a economia de energia ao mesmo tempo que se oferece adequada proteção às transmissões.

A próxima seção apresenta as conclusões do trabalho e a seção 6.2 traz sugestões para trabalhos futuros motivados a partir da pesquisa desenvolvida neste trabalho.

6.1 Conclusões

O foco deste trabalho consiste no estudo e desenvolvimento de métodos de controle de potência de transmissão em redes *ad hoc* IEEE 802.11. Em uma rede sem fio, na qual os terminais são geralmente alimentados por baterias de reduzida capacidade, o aproveitamento eficiente da energia disponível é fundamental. Mais ainda, em se tratando de redes *ad hoc*, que se caracterizam pela necessidade de que cada terminal atue como roteador de pacotes, os recursos de energia não são apenas uma preocupação daquela estação que os possui. Eles constituem recursos dos quais a própria rede como um todo necessita para manter sua conectividade. Neste contexto, o controle de potência se apresenta como um relevante campo de pesquisa, cuja importância vem aumentando à medida que o uso de redes 802.11 se populariza e as primeiras aplicações *ad hoc* começam a ser viabilizadas.

Dentre os mecanismos de controle de potência propostos na literatura, apresentados no capítulo 2, destacam-se aqueles que implementam a realimentação de informações necessárias ao controle de potência através dos próprios quadros nativos do protocolo IEEE 802.11 - *RTS/CTS/DATA/ACK*. O ponto forte dessas propostas reside em sua indiscutível simplicidade, capaz de fazer com que alguns equipamentos 802.11 atuais sejam transformados em equipamentos com controle de potência muitas vezes por meio de uma simples atualização de *firmware*. A maioria desses mecanismos tem como ponto de partida o Esquema Básico [7, 11], que tem como primordial característica o emprego de pacotes de controle, ou seja *RTS* e *CTS* em potência máxima, para a reserva do meio e proteção da transmissão, e quadros *DATA* e *ACK* em potência reduzida.

Desta forma, todos estes esquemas apresentam duas deficiências, a saber:

- Necessitam da transmissão de *RTS* e *CTS* em potência máxima, o que muitas vezes constitui num desperdício de energia, e;
- Ficam expostos ao Problema dos Enlaces Assimétricos.

Desta forma, este trabalho apresenta propostas no sentido de solucionar as duas

deficiências citadas. As propostas em questão foram detalhadas no capítulo 3, e representam as principais contribuições do trabalho.

O Esquema Básico com Memória (EBM) [42] consiste na primeira tentativa no sentido de resolver o desperdício de energia que muitas vezes ocorre ao transmitir *RTS* e *CTS* em potência máxima. No entanto, ele representa uma considerável diminuição na proteção das transmissões.

O Problema dos Enlaces Assimétricos, também exposto no capítulo 2, é uma consequência da existência da Zona de Detecção de Portadora, na qual os terminais não conseguem extrair a informação de duração da transmissão corrente. Este problema pode, como demonstrado em [6], causar um grande aumento do número de colisões e retransmissões na rede, comprometendo seriamente os ganhos obtidos com o controle de potência.

O esquema ALCA (*Asymmetric Links Collision Avoidance*) destina-se a solucionar o referido problema, fazendo com que a informação de duração da transmissão corrente chegue aos terminais da Zona de Detecção de Portadora através de uma duração diferenciada da portadora dos quadros *RTS* e *CTS*.

Por fim, o mecanismo FN-ALCA (*Farthest Neighbor - ALCA*) junta os dois conceitos em um só esquema, empregando no *RTS* e *CTS* apenas a potência necessária para atingir o vizinho mais distante do transmissor. Com isso, além de economizar energia, pode-se obter um reuso espacial do canal, possibilitando um ganho de vazão agregada na rede. Para avaliar os esquemas e compará-los a propostas preexistentes, como o próprio Esquema Básico e o PCM [6], foi necessário implementar uma série de modificações no simulador escolhido para a avaliação, o *Network Simulator versão 2.26* [47, 48]. Estas modificações, delineadas no capítulo 4, resultaram em módulos que realizam tarefas específicas, que foram incorporados ao simulador e podem ser futuramente utilizados em outras pesquisas.

Um desses módulos, o Módulo de SINR, destina-se a levar em conta a influência do ruído e da interferência co-canal nas comunicações da rede e nos mecanismos de controle de potência. Trata-se de um componente crítico, inexistente no simulador

original, que faz com que os resultados de simulação aproximem-se dos que seriam obtidos na prática. É um exemplo de estrutura que pode ser de grande valia para outros trabalhos que utilizem o mesmo simulador.

As propostas foram avaliadas em diversas topologias de rede, sendo os resultados apresentados no capítulo 5. Foi dada preferência às avaliações em cenários aleatórios, por constituírem um caso mais geral. Topologias específicas foram utilizadas para avaliar a dependência do desempenho com determinado parâmetro, quando necessário.

O aspecto da mobilidade, conforme explicado no capítulo 5, não foi abordado nas simulações devido às consequências deste fator. A perda e redescoberta de rotas pode comprometer o desempenho da rede de forma a prejudicar a avaliação do impacto de cada mecanismo de controle de potência no referido desempenho. Entretanto, como a potência de transmissão de cada terminal é acrescida de uma margem de 5%, pode-se esperar que dois terminais em movimento relativo possam ajustar suas potências de transmissão adequadamente enquanto se comunicam. Da mesma forma, comunicações de múltiplos saltos também não foram objeto de avaliação para evitar que a descoberta de rotas mascarasse a contribuição do controle de potência no desempenho. Considerando que, do ponto de vista das camadas física e de enlace, não há diferença entre uma comunicação de múltiplos saltos e várias comunicações de salto único, pode-se antever que os esquemas não apresentarão mudanças de desempenho significativas quando empregados em comunicações daquele tipo.

As avaliações realizadas e seus resultados demonstram que as metas da pesquisa foram alcançadas com o esquema FN-ALCA, que foi capaz de proporcionar, a um só tempo, grande economia de energia e aumento da vazão agregada da rede. Mais ainda, foram vários os esforços realizados para que os resultados fossem o mais próximo possível dos decorrentes de uma aplicação real, o que reforça a sua relevância.

Assim, os pontos fortes da proposta apresentada são, além do aumento da vazão agregada e da grande economia de energia, a solução confiável para o Problema dos Enlaces Assimétricos e a sua indiscutível simplicidade, já que não são necessários canais adicionais e outras modificações no *hardware* dos dispositivos 802.11 atuais.

Desta forma, FN-ALCA torna-se uma opção atrativa para o estabelecimento de controle de potência em redes *ad hoc* 802.11.

6.2 Trabalhos Futuros

Para trabalhos futuros, pode-se sugerir avaliações dos esquemas propostos em situações de mobilidade. No entanto, são necessárias soluções para garantir que as condições adversas decorrentes da mobilidade não interfiram de forma a impedir a comparação entre os esquemas. Da mesma forma, comunicações de múltiplos saltos podem também ser objeto de avaliações futuras, tomando-se as medidas necessárias para uma avaliação justa.

Nas avaliações por simulação foram consideradas apenas duas métricas de desempenho, sendo elas a vazão agregada da rede e a quantidade de dados entregue por unidade de energia. Entretanto, outros aspectos podem ser analisados no que diz respeito aos esquemas avaliados, como por exemplo o nível de justiça resultante. Outras métricas que podem ser avaliadas são o retardo médio e a variação do retardo dos pacotes.

Os esquemas podem ainda ser avaliados em um número maior de cenários, contemplando por exemplo, aplicações de elevado nível de ruído, canal com desvanecimento rápido e redes com agregação de terminais, formando *clusters*. A maioria destas avaliações pressupõe algumas mudanças no simulador, mas podem fornecer uma idéia sobre qual mecanismo é mais adequado a qual tipo de aplicação. Mais ainda, pode-se chegar a um esquema adaptativo, que identifique automaticamente as condições e passe a implementar o mecanismo mais vantajoso.

Novos trabalhos, não necessariamente relativos a controle de potência, podem ser desenvolvidos com o auxílio do Módulo de SINR. Este adendo ao simulador pode ser de grande valia na avaliação de protocolos de acesso ao meio e métodos de controle de admissão, por exemplo.

Por fim, com a atual disponibilidade de equipamentos 802.11 com possibilidades

de atualização de *firmware*, pode-se sugerir a implementação real de redes de terminais que operem de acordo com os esquemas propostos, possibilitando testes de campo e avaliações mais detalhadas.

Referências Bibliográficas

- [1] Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. IEEE Standard 802.11, 1999.
- [2] Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: High-speed Physical Layer in the 5 GHz Band. IEEE Standard 802.11a, 1999.
- [3] Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: High-Speed Physical Layer Extension in the 2.4 GHz Band. IEEE Standard 802.11b, 1999.
- [4] ANASTASI, G., CONTI, M., GREGORI, E., AND PASSARELA, A. A Performance Study of Power-Saving Policies for Wi-fi Hotspots. *Computer Networks '04* 45, 3 (junho de 2004), 295–318.
- [5] KRAVETS, R., AND KRISHNAN, P. Power Management Techniques for Mobile Communications. In *MOBICOM'98* (outubro de 1998), pp. 157–168.
- [6] JUNG, E., AND VAIDYA, N. H. A Power Control MAC Protocol for Ad Hoc Networks. In *ACM MOBICOM'02* (setembro de 2002), pp. 134–140.
- [7] GOMEZ, J., CAMPBELL, A. T., NAGHSHINEH, M., AND BISDIKIAN, C. Conserving Transmission Power in Wireless Ad Hoc Networks. In *ICNP'01* (novembro de 2001), pp. 24–34.
- [8] NARAYANASWAMY, S., KAWADIA, V., SREENIVAS, R. S., AND KUMAR, P. R. Power Control in Ad-hoc Networks: Theory, Architecture, Algorithm and Im-

- plementation of the COMPOW Protocol. In *European Wireless 2002* (fevereiro de 2002), pp. 156–162.
- [9] SINGH, S., WOO, M., AND RAGHAVENDRA, C. S. Power-aware Routing in Mobile Ad Hoc Networks. In *ACM MOBICOM'98* (outubro de 1998), pp. 181–190.
- [10] TOH, C.-K. Maximum Battery Life Routing to Support Ubiquitous Mobile Computing in Wireless Ad Hoc Networks. *IEEE Communications Magazine* 39, 6 (junho de 2001), 138–147.
- [11] AGARWAL, S., KRISHNAMURTHY, S., KATZ, R. H., AND DAO, S. K. Distributed Power Control in Ad-hoc Wireless Networks. *IEEE PIMRC'01 2* (outubro de 2001), 59–66.
- [12] MONKS, J. P., BHARGHAVAN, V., AND MEI W. HWU, W. A Power Controlled Multiple Access Protocol for Wireless Packet Networks. In *IEEE INFOCOM'01* (abril de 2001), pp. 219–228.
- [13] AWERBUCH, B., HOLMER, D., AND RUBENS, H. The Pulse Protocol: Energy Efficient Infrastructure Access. In *INFOCOM'04* (março de 2004).
- [14] EBERT, J.-P., STREMMEL, B., WIEDERHOLT, E., AND WOLISZ, A. An Energy-efficient Power Control Approach for WLANs. In *Journal of Communications and Networks (JCN)* (maio de 2000), pp. 197–206.
- [15] XU, K., GERLA, M., AND BAE, S. How Effective is the IEEE 802.11 RTS/CTS Handshake in Ad Hoc Networks? In *GLOBECOM'02* (maio de 2002), pp. 72–76.
- [16] MONKS, J., EBERT, J.-P., MAI HWU, W., AND WOLISZ, A. Energy Saving and Capacity Improvement Potential of Power Control in Multi-hop Wireless Networks. *Computer Networks* 3, 41 (fevereiro de 2003), 313–330.
- [17] RAMOS, N., PANIGRAHI, D., AND DEY, S. Energy-efficient Link Adaptations IEEE 802.11b Wireless LAN. In *IASTED International Conference on Wireless and Optical Communications* (julho de 2003), pp. 578–583.

- [18] LU, X., CHEN, Y., AND WANG, Y. Joint PHY and MAC Layer Power Optimization for Video Transmission over Wireless LAN. In *SPIE'04* (janeiro de 2004), pp. 110–118.
- [19] LIU, X., AND GOLDSMITH, A. Cross-Layer Design of Wireless Networks for Distributed Control. In *IEEE Conference on Decision and Control* (junho de 2004).
- [20] KAWADIA, V., AND KUMAR, P. R. Power Control and Clustering in Ad Hoc Networks. In *INFOCOM'03* (abril de 2003).
- [21] XU, Y., BIEN, S., MORI, Y., HEIDEMANN, J., AND ESTRIN, D. Topology control protocols to conserve energy in wireless ad hoc networks. Relatório Técnico 6, University of California, Los Angeles, Center for Embedded Networked Computing, January 2003.
- [22] SHETH, A., AND HAN, R. Adaptive Power Control and Selective Radio Activation for Low-power Infrastructure-mode 802.11 LANs. In *IEEE Workshop on Mobile and Wireless Networks* (maio de 2003), pp. 812–818.
- [23] ZHENG, R., AND KRAVETS, R. On-demand Power Management for Ad Hoc Networks. In *INFOCOM'03* (abril de 2003).
- [24] TSENG, Y.-C., HSU, C.-S., AND HSIEH, T.-Y. Power-saving Protocols for IEEE 802.11-based Multi-hop Ad Hoc Networks. In *INFOCOM'02* (junho de 2002), pp. 200–209.
- [25] POTTIE, G. J., AND KAISER, W. J. Wireless integrated network sensors (WINS). *Communications of the ACM* 43, 5 (maio de 2000), 51–58.
- [26] RAGHUNATHAN, V., SCHURGERS, C., PARK, S., AND SRIVASTAVA, M. Energy aware wireless microsensor networks. *IEEE Signal Processing Magazine* 19, 2 (março de 2002), 40–50.
- [27] CRUZ, R. L., AND SANTHANAM, A. V. Optimal Routing, Link Scheduling and Power Control in Multi-Hop Wireless Networks. In *INFOCOM'03* (abril de 2003), pp. 702–711.

- [28] ELBATT, T., AND EPHREMIDES, A. Joint Scheduling and Power Control for Wireless Ad Hoc Networks. In *IEEE Transactions on Wireless Communications* (junho de 2004), pp. 23–27.
- [29] BEHZAD, A., AND RUBIN, I. Power Controlled Multiple Access Control for Wireless Access Nets. In *Vehicular Technology Conference* (abril de 2003).
- [30] WU, S. L., TSENG, Y. C., AND SHEU, J. P. Intelligent Medium Access for Mobile Ad Hoc Networks with Busy Tones and Power Control. In *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* (setembro de 2000), pp. 1647–1657.
- [31] LIN, X.-H., KWOK, Y.-K., AND LAU, V. K. N. A New Power Control Approach for IEEE 802.11 Ad Hoc Networks. *IEEE PIMRC'03 2* (setembro de 2003), 1761–1765.
- [32] LIN, X.-H., KWOK, Y.-K., AND LAU, V. K. N. On Power Managed Multiple Access Control in an IEEE 802.11 Based Ad Hoc Wireless Network. *Journal of Information Society and Engineering 20* (junho de 2004), 491–515.
- [33] WU, S.-L., TSENG, Y.-C., LIN, C.-Y., AND SHEU, J.-P. A Multi-channel MAC Protocol with Power Control for Multi-hop Mobile Ad Hoc Networks. *The Computer Journal SCI 45*, 1 (janeiro de 2002), 101–110.
- [34] MUQATTASH, A., AND KRUNZ, M. Power Controlled Dual Channel (PCDC) Medium Access Protocol for Wireless Ad Hoc Networks. In *INFOCOM'03* (abril de 2003), pp. 470–480.
- [35] POON, E., AND LI, B. Achieving 802.11 MAC Interoperability in Power-efficient Ad Hoc Networks with Dynamic Range Adjustment. In *Distributed Computing Systems* (maio de 2003), pp. 650–657.
- [36] KARN, P. MACA - A New Channel Access Method for Packet Radio. In *ARRL Computer Networking Conference* (julho de 1990), pp. 134–140.
- [37] GRILO, A., AND NUNES, M. Link Adaptation and Transmit Power Control for Unicast and Multicast in IEEE 802.11 a/h/e WLANs. In *LNC'03* (outubro de 2003), pp. 334–345.

- [38] TOUMPIS, S., AND GOLDSMITH, A. Capacity Regions for Wireless Ad Hoc Networks. *IEEE Transactions on Wireless Communication* 2, 4 (julho de 2003), 736–748.
- [39] BERGAMO, P., MANIEZZO, D., GIOVANARDI, A., MAZZINI, G., AND ZORZI, M. Distributed Power Control for Power-aware Energy-efficient Routing in Ad Hoc Networks. *Wireless Networks* 10 (maio de 2004), 29–42.
- [40] CORDEIRO, C., GOSSAIN, H., AND AGRAWAL, D. A Spatial Reuse Enabling Power Control MAC Protocol for Wireless Ad Hoc Networks. Relatório técnico, University of Cincinnati, janeiro de 2003.
- [41] LIN, X.-H., KWOK, Y.-K., AND LAU, V. K. N. Power Control for IEEE 802.11 Ad-hoc Wireless Networks: Issues and a New Algorithm. In *ICPP '03* (outubro de 2003), pp. 249–256.
- [42] PIRES, A. A., FONTES, M. F., AND DE REZENDE, J. F. Proposta e Avaliação de um Esquema de Controle de Potência com Memória em Redes Ad Hoc 802.11. In *SBRC 2004* (maio de 2004).
- [43] PIRES, A. A., AND DE REZENDE, J. F. Controle de Potência em Redes Ad Hoc: Evitando Colisões em Enlaces Assimétricos. In *WCSF 2004* (novembro de 2004).
- [44] LI, Z., NANDI, S., AND GUPTA, A. K. Improving MAC performance in Wireless Ad Hoc Networks Using Enhanced Carrier Sensing. In *IFIP-TC6 Networking 2004* (maio de 2004).
- [45] PIRES, A. A., DE REZENDE, J. F., AND CORDEIRO, C. ALCA: A New Scheme for Power Control on 802.11 Ad Hoc Networks. In *IEEE International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks* (junho de 2005).
- [46] PIRES, A. A., DE REZENDE, J. F., AND CORDEIRO, C. FN-ALCA: Esquema de Controle de Potência para Economia de Energia e Aumento de Capacidade de Redes Ad Hoc 802.11. In *SBRC 2005* (maio de 2005).

- [47] FALL, K., AND VARADHAN, K. The NS Manual.
- [48] The Network Simulator ns-2. Página da World Wide Web. url:
<http://www.isi.edu/nsnam/ns/>, acessada em 15 de março 2005.