

AUMENTANDO A EFICIÊNCIA DO MÉTODO DE ACESSO MÚLTIPLO EM
REDES DOMICILIARES

Miguel Elias Mitre Campista

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. Otto Carlos Muniz Bandeira Duarte, Dr. Ing.

Prof. Luís Henrique Maciel Kosmalski Costa, Dr.

Prof. João Crisóstomo Weyl Albuquerque Costa, D. Sc.

Prof. Marcelo Gonçalves Rubinstein, D. Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MAIO DE 2005

CAMPISTA, MIGUEL ELIAS MITRE

Aumentando a Eficiência do Método de Acesso Múltiplo em Redes Domiciliares [Rio de Janeiro] 2005

XVI, 97 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia Elétrica, 2005)

Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE

1. Redes Domiciliares
2. CSMA/CA
3. HomePlug
4. IEEE 802.11

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

*A meus pais, Francisco e Deise
e a minha irmã, Raquel.*

Agradecimentos

A Deus pelos dons recebidos.

À minha família, em especial meus pais e minha irmã, por todo o amor, sacrifício, educação e apoio ao longo da minha vida.

Aos meus orientadores Otto Carlos e Luís Henrique pela amizade, confiança, orientação e paciência durante o mestrado.

À equipe do GTA, particularmente aos amigos, Aurelio, Pedro, DOC, Rafael, Bicudo, Igor e Guilherme por toda amizade e cooperação durante toda a tese.

Aos professores Marcelo Rubinstein e João Crisóstomo pela presença na banca examinadora.

Aos funcionários do Programa de Engenharia Elétrica da COPPE/UFRJ, Solange, Roberto, Amanda e Rosa pela presteza no atendimento na secretaria do Programa.

Ao CNPq, pelo financiamento da pesquisa.

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

AUMENTANDO A EFICIÊNCIA DO MÉTODO DE ACESSO MÚLTIPLO EM
REDES DOMICILIARES

Miguel Elias Mitre Campista

Maio/2005

Orientadores: Otto Carlos Muniz Bandeira Duarte

Luís Henrique Maciel Kosmowski Costa

Programa: Engenharia Elétrica

Este trabalho analisa o desempenho da transmissão de dados à alta velocidade pela fiação elétrica residencial. A comunicação de dados através do canal elétrico tem as vantagens da ubiquidade e infra-estrutura pré-existente, porém enfrenta obstáculos importantes como a atenuação e o ruído. O principal padrão desse tipo de rede domiciliar é o HomePlug, que define um protocolo baseado no método de acesso múltiplo com prevenção de colisões (CSMA/CA). O HomePlug associa ao CSMA/CA uma técnica inovadora, chamada de contador de adiamentos (DC) que adapta a contenção dos nós no acesso ao meio de acordo com a carga da rede. O objetivo deste trabalho é a análise de desempenho do padrão HomePlug e, em particular, do mecanismo contador de adiamentos. Primeiramente, é derivada uma expressão matemática para a vazão máxima do HomePlug. Então, a eficácia do DC é avaliada através de simulações. Em seguida, a adaptação do contador de adiamentos ao padrão de redes sem fio IEEE 802.11 é proposta, motivada pelas semelhanças dos métodos de acesso desse padrão e do HomePlug. Observa-se a partir de diferentes abordagens que o mecanismo contador de adiamentos também melhora a vazão do IEEE 802.11. Finalmente, uma expressão para a probabilidade de colisões é derivada e um novo mecanismo baseado no contador de adiamentos é proposto para aumentar a vazão do HomePlug.

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

IMPROVING THE MULTIPLE ACCESS METHOD FOR HOME NETWORKS

Miguel Elias Mitre Campista

May/2005

Advisors: Otto Carlos Muniz Bandeira Duarte
Luís Henrique Maciel Kosmowski Costa

Department: Electrical Engineering

This work analyzes the performance of high speed data transmission over the home electrical wiring. The data communication over the electrical channel benefits from ubiquitous and pre-existent infra-structure, nevertheless it faces important obstacles such as attenuation and noise. The main standard of this type of home network is HomePlug, whose MAC protocol is based on carrier sense multiple access with collision avoidance (CSMA/CA). HomePlug introduces into CSMA/CA a novel technique, called the deferral counter (DC) which adapts the contention of the nodes for the medium according to the network load. This work aims to analyze the performance of the HomePlug standard and, specifically, of the deferral counter mechanism. First, a mathematical expression for maximum throughput of HomePlug is derived. Then, the DC efficiency is evaluated through simulations. Afterwards, the adaptation of the deferral counter to the wireless standard IEEE 802.11 is proposed, motivated by the similarities between the access methods of IEEE 802.11 and HomePlug. It is observed, through different approaches, that the deferral counter improves the throughput of IEEE 802.11 as well. Finally, an expression for the collision probability is derived and a novel mechanism based on the deferral counter is proposed to increase the Homeplug throughput.

Sumário

Resumo	v
Abstract	vi
Lista de figuras	x
Lista de tabelas	xiii
Lista de acrônimos	xiv
1 Introdução	1
1.1 Motivação	1
1.2 Trabalhos relacionados	3
1.2.1 Camada física	3
1.2.2 Camada de enlace	5
1.3 Objetivos	6
2 HomePlug 1.0	9
2.1 Comunicação através da fiação elétrica	9
2.2 Camada física	13

2.2.1	Sinalização e processamento de sinais	14
2.2.2	Quadro físico e endereçamento	18
2.3	Subcamada de controle de acesso ao meio	20
2.4	Segurança	30
2.5	Produtos	30
3	Análise do HomePlug 1.0	33
3.1	Análise da vazão máxima do HomePlug 1.0	33
3.2	Simulações	36
3.2.1	Modelo físico	37
3.2.2	Análise da vazão máxima teórica e simulada do HomePlug	40
3.2.3	Análise do contador de adiamentos com tráfego CBR	41
3.2.4	Análise do contador de adiamentos com tráfego misto	45
4	Aplicação do Contador de Adiamentos ao IEEE 802.11	48
4.1	As Redes IEEE 802.11	48
4.2	O Protocolo de controle de acesso ao meio	52
4.3	O emprego do contador de adiamentos pelo IEEE 802.11	57
4.4	Resultados	59
5	O Mecanismo Proposto	69
5.1	Proposta	69
5.2	Simulações	72
5.2.1	Resultados	72

<i>SUMÁRIO</i>	ix
6 Conclusão	88
Referências Bibliográficas	91

Lista de Figuras

2.1	Topologia da rede elétrica residencial.	10
2.2	Formato do quadro físico (PPDU).	16
2.3	Campo de controle de quadro.	19
2.4	Ponte entre uma rede Ethernet e HomePlug.	21
2.5	Lógica de transmissão do HomePlug.	23
2.6	Transmissão de um quadro de dados com sua respectiva resposta.	24
2.7	Exemplo de uma topologia.	26
2.8	O pseudo-código do algoritmo de transmissão.	27
2.9	Lógica de recepção do HomePlug.	29
2.10	Equipamentos HomePlug.	31
3.1	Tempos associados à transmissão de um quadro HomePlug.	34
3.2	Curva de resposta em frequência do canal.	39
3.3	Vazão máxima para uma rede HomePlug.	40
3.4	Vazão dos fluxos CBR variando o número de nós.	42
3.5	Vazão dos fluxos CBR variando a carga útil.	42
3.6	Porcentagem de colisões dos fluxos CBR com carga oferecida variável.	44

3.7	Porcentagem de colisões dos fluxos CBR com cargas úteis diferentes.	44
3.8	Vazão de tráfego CBR e voz.	46
3.9	Atraso do tráfego de voz.	46
4.1	Rede infra-estruturada.	49
4.2	Rede ad hoc.	50
4.3	A Rede ad hoc em múltiplos saltos.	51
4.4	Funcionamento básico do DCF.	52
4.5	Problema do terminal exposto.	56
4.6	Problema do terminal escondido.	57
4.7	Funcionamento do DCF com troca de RTS/CTS.	58
4.8	Lógica da transmissão do IEEE 802.11 com o contador de adiamentos (DC).	60
4.9	Vazão dos pacotes de 1500 octetos.	61
4.10	Vazão dos pacotes de 512 octetos.	62
4.11	Atraso dos pacotes de 1500 octetos.	63
4.12	Atraso dos pacotes de 512 octetos.	64
4.13	Porcentagem de colisão dos pacotes de 1500 octetos.	65
4.14	Porcentagem de colisão dos pacotes de 512 octetos.	66
4.15	Distribuição dos pacotes de 1500 octetos.	67
4.16	Distribuição dos pacotes de 512 octetos.	67
4.17	Vazão com $DC_{constante} = 0$ e $DC_{constante} = 3$ dos pacotes de 1500 octetos.	68
4.18	Vazão com $DC_{constante} = 0$ e $DC_{constante} = 3$ dos pacotes de 512 octetos.	68
5.1	Vazão da rede com pacotes de 1500 octetos a 14 Mbps.	73

5.2	Vazão da rede com pacotes de 512 octetos a 14 Mbps.	74
5.3	Vazão da rede com pacotes de 1500 octetos a 1 Mbps.	74
5.4	Vazão da rede com pacotes de 512 octetos a 1 Mbps.	75
5.5	Atraso dos pacotes de 1500 octetos a 14 Mbps.	76
5.6	Atraso dos pacotes de 512 octetos a 14 Mbps.	76
5.7	Atraso dos pacotes de 1500 octetos a 1 Mbps.	77
5.8	Atraso dos pacotes de 512 octetos a 1 Mbps.	78
5.9	Colisão dos pacotes de 1500 octetos a 14 Mbps.	78
5.10	Colisão dos pacotes de 512 octetos a 14 Mbps.	79
5.11	Colisão dos pacotes de 1500 octetos a 1 Mbps.	79
5.12	Colisão dos pacotes de 512 octetos a 1 Mbps.	80
5.13	Variação do atraso dos pacotes de 1500 octetos a 14 Mbps.	81
5.14	Variação do atraso dos pacotes de 512 octetos a 14 Mbps.	81
5.15	Variação do atraso dos pacotes de 1500 octetos a 1 Mbps.	82
5.16	Variação do atraso dos pacotes de 512 octetos a 1 Mbps.	83
5.17	Número médio de vezes consecutivas que um nó transmite pacotes de 1500 octetos a 14 Mbps.	84
5.18	Número médio de vezes consecutivas que um nó transmite pacotes de 512 octetos a 14 Mbps.	84
5.19	Número médio de vezes consecutivas que um nó transmite pacotes de 1500 octetos a 1 Mbps.	85
5.20	Número médio de vezes consecutivas que um nó transmite pacotes de 512 octetos a 1 Mbps.	86

Lista de Tabelas

2.1	Classes de prioridade e seus respectivos tipos de tráfego.	22
2.2	Valores definidos pelo padrão HomePlug para CW e DC.	25
2.3	Exemplo da evolução de CW e DC para o exemplo descrito.	26
2.4	Duração dos intervalos entre quadros.	30
3.1	Parâmetros da função de transferência.	38
3.2	Parâmetros utilizados.	38
4.1	Duração dos intervalos entre quadros.	53
4.2	Valores da janela de contenção (CW).	55
4.3	Evolução dos valores do DC e do CW correspondente.	59

Lista de Acrônimos

ACK :	<i>Acknowledgement;</i>
AGC :	<i>Automatic Gain Control;</i>
AODV :	<i>Ad Hoc On demand Distance Vector;</i>
AP :	<i>Access Point;</i>
ARQ :	<i>Automatic Repeat reQuest;</i>
BC :	<i>Backoff Counter;</i>
BT :	<i>Backoff Timer;</i>
BPSK :	<i>Binary Phase Shift Keying;</i>
BSS :	<i>Basic Service Set;</i>
CAP :	<i>Channel Access Priority;</i>
CIFS :	<i>Contention distributed InterFrame Space;</i>
CFB :	<i>Chamadas à Função de Backoff;</i>
CRC :	<i>Cyclic Redundancy Check;</i>
CSMA/CA :	<i>Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance;</i>
CTS :	<i>Clear-To-Send;</i>
CW :	<i>Contention Window;</i>
DBPSK :	<i>Diferencial Binary Phase Shift Keying;</i>
DC :	<i>Deferral Counter;</i>
DCF :	<i>Distributed Coordination Function;</i>
DIFS :	<i>DCF InterFrame Space;</i>
DSSS :	<i>Direct Sequency Spread Spectrum;</i>
DQPSK :	<i>Diferencial Quadrature Phase Shift Keying;</i>
DSR :	<i>Dynamic Source Routing;</i>
EFG :	<i>End-of-Frame Gap;</i>

EIFS :	<i>Extended InterFrame Space;</i>
FCS :	<i>Frame Check Sequence;</i>
FEC :	<i>Foward Error Correction;</i>
FHSS :	<i>Frequency Hopping Spread Spectrum;</i>
IBSS :	<i>Independent Basic Service Set;</i>
IEEE :	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers;</i>
IFFT :	<i>Inverse Fast Fourier Transform;</i>
ISO :	<i>International Organization for Standardization;</i>
MAC :	<i>Medium Access Control;</i>
MPDU :	<i>MAC Protocol Data Unit;</i>
NACK :	<i>Negative ACK;</i>
NAV :	<i>Network Allocation Vector;</i>
OFDM :	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplex;</i>
OSI :	<i>Open Systems Interconnection;</i>
PCF :	<i>Point Coordination Function;</i>
PCS :	<i>Physical Carrier Sense;</i>
PIFS :	<i>PCF InterFrame Space;</i>
PLC :	<i>PowerLine Comunnication;</i>
PPDU :	<i>Physical Protocol Data Unit;</i>
PR :	<i>Priority Resolution;</i>
PRS :	<i>Priority Resolution Signal;</i>
PSD :	<i>Power Spectral Density;</i>
PSK :	<i>Phase Shift Keying;</i>
QoS :	<i>Quality of Service;</i>
RIFS :	<i>Response InterFrame Space;</i>
RFCS :	<i>Received FCS;</i>
ROBO :	<i>Robust OFDM;</i>
RTS :	<i>Request-To-Send;</i>
SIFS :	<i>Short InterFrame Space;</i>
TCP :	<i>Transmission Control Protocol;</i>
TM :	<i>Tone Maps;</i>

TMI : *Tone Maps Index;*

UDP : *User Datagram Protocol;*

USB : *Universal Serial Bus;*

VCS : *Virtual Carrier Sense;*

Capítulo 1

Introdução

UMA demanda crescente por conectividade em ambientes domésticos vem surgindo devido à necessidade de compartilhar recursos e acesso à Internet em banda larga. Assim, o paradigma de redes domiciliares foi criado privilegiando características importantes como a onipresença de pontos de acesso à rede na residência. Uma rede domiciliar é um sistema de comunicação que visa interligar diversos dispositivos residenciais, distantes de até 300 metros, via uma infra-estrutura já disponível ou de baixo custo de instalação. As redes domiciliares interconectam diferentes equipamentos e disponibilizam acesso em rede com qualidade possibilitando o desenvolvimento de novas aplicações.

1.1 Motivação

O grande mercado para os próximos anos em redes domiciliares é a interconexão, em rede e com qualidade de serviço, de equipamentos de áudio e vídeo. O custo é um fator primordial em redes domiciliares e, conseqüentemente, a realização de obras civis para instalação de novos cabeamentos pode ser decisiva na escolha da tecnologia a ser adotada. Nessa direção, foram criados novos padrões de rede, classificados como “sem novos fios”, tais como o HomePlug [1] e o HomePNA [2, 3, 4], que se servem, respectivamente, da fiação elétrica e de telefone já existentes nas residências. Outra tecnologia concorrente, que também não requer gastos com cabeamento, é o padrão IEEE 802.11 [5] de redes sem

fio. De outro lado, a solução com fio convencional é baseada no padrão Ethernet. Porém, como a imensa maioria dos lares não possui a infra-estrutura de cabeamento necessária, o custo de instalação e os transtornos gerados inibem o seu emprego.

A tecnologia sem fio tem a mobilidade como característica singular, além de ser uma tecnologia de grande sucesso comercial. Por utilizar a rádio-frequência como meio de transmissão ela tem como desvantagem a grande atenuação por influência de obstáculos que limitam a cobertura. A tecnologia de rede através da fiação telefônica tem a grande vantagem de usar um meio dedicado entre a central telefônica e o assinante, o que permite a melhora da maioria das características acima citadas [6, 7, 8]. No entanto, o número de tomadas de telefone em uma residência normalmente não é grande. Nesse item relativo à ubiquidade a rede através da fiação elétrica é muito forte, pois é comum existirem tomadas de energia por toda a casa e também diversas por cômodo. Por outro lado, a fiação elétrica não foi projetada para a transmissão de dados a alta velocidade e pode ser considerada um meio físico hostil para este fim.

A comunicação de dados através da fiação elétrica (*PowerLine Communications - PLC*) a altas taxas surge como um grande desafio, pois deve contornar as restrições do meio. Taxas de transmissão que anteriormente eram da ordem dos kbps chegam agora aos Mbps. Para atingir tais taxas, o HomePlug emprega técnicas de modulação, de codificação e de processamento de sinais capazes de superar as adversidades do canal. Assim como no meio sem fio, na fiação elétrica há a incapacidade de garantir a detecção de colisão em função principalmente da atenuação e do ruído [1]. Por isso, tanto o padrão IEEE 802.11, das redes sem fio, quanto o padrão HomePlug, das redes através da fiação elétrica, controlam o acesso ao meio compartilhado utilizando o método de acesso múltiplo com escuta de portadora e prevenção contra colisão, denominado CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*). A prevenção de colisão se consegue através da tentativa de acesso não persistente para evitar que diferentes estações transmitam no mesmo instante de tempo.

Devido à alta atenuação não há como saber se o quadro transmitido colidiu no receptor e, portanto, se o quadro foi corretamente recebido pelo destinatário. Assim, no CSMA/CA, toda estação que recebe dados corretamente envia uma confirmação de re-

cebimento ao transmissor. As semelhanças entre o meio sem fio e o elétrico fazem com que os métodos de acesso ao meio definidos pelo HomePlug e pelo IEEE 802.11 possuam características em comum. Por conseguinte, um mecanismo que aumente a eficiência durante a comunicação, aplicado a um dos casos, poderia ser utilizado pelo outro.

Nativamente, tanto o HomePlug quanto o IEEE 802.11 fazem um tipo de acesso não-persistente para evitar que diferentes estações transmitam no mesmo instante de tempo. Assim, uma estação acessa o meio após um intervalo de tempo aleatório chamado de *backoff*. Além da transmissão não-persistente, o HomePlug introduz um outro mecanismo conhecido por contador de adiamentos (*Deferral Counter - DC*) a fim de reduzir ainda mais as colisões. Esse mecanismo complementa o *backoff* acelerando a resolução das colisões ao aumentar mais rapidamente o tempo médio de acesso de cada estação ao meio em períodos de alto tráfego. O emprego em conjunto de mecanismos que evitam colisões em redes cujo meio de transmissão oferece alta atenuação, como o elétrico e o sem fio, são importantes para a melhora do desempenho do acesso ao meio e conseqüentemente do protocolo MAC.

1.2 Trabalhos relacionados

1.2.1 Camada física

As limitações físicas do canal elétrico são o principal obstáculo a ser tratado pelo padrão HomePlug a fim de atingir taxas de transferência elevadas. Segundo Pavlidou *et al.* [9] o uso da fiação elétrica como meio de transmissão tende a ser pior que o uso do meio sem fio em termos de atenuação e ruído.

Propostas para contornar as adversidades do meio são tratadas em diferentes trabalhos através do aperfeiçoamento de técnicas de modulação, de codificação e de processamento de sinais. A aplicação dessas novas técnicas possibilita a obtenção de altas taxas de transferência. Pavlidou *et al.* [9] investigam as características do canal elétrico para a transmissão de dados, o ruído e as técnicas hoje empregadas na comunicação por fios de eletricidade. Abad *et al.* [10] revisam os problemas relacionados ao meio físico e discu-

tem requisitos necessários para as transmissões de dados em altas taxas com qualidade e segurança. Biglieri [11] analisa as dificuldades encontradas para a comunicação através da fiação elétrica, destaca a resposta do canal em frequência, os tipos de ruído e possíveis soluções para a modulação e o código de controle de erro empregados. Dai *et al.* [12] propõem a adoção de técnicas de processamento de sinais utilizadas em redes sem fio e as analisam perante as técnicas tradicionalmente utilizadas em PLC. Heo *et al.* [13] propõem uma nova arquitetura para o modem OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplex*) compatível com as especificações da camada física do padrão HomePlug e o analisam, porém não fazem comparações com outras propostas existentes. Lampe *et al.* [14] propõem um modelo estocástico para a resposta em frequência do canal elétrico e fazem a sua análise para transmissões utilizando diferentes tipos de modulação.

As características da fiação elétrica como canal foram modeladas em diferentes artigos. Langfeld [15] apresenta quatro possíveis modelos de canal e varia a topologia e o nível de ruído de cada um. Mostra seus respectivos parâmetros característicos e funções de transferência. Esse trabalho limita seu estudo a apenas os quatro tipos de canais, visto que os parâmetros característicos só são pertinentes aos casos analisados. Conseqüentemente, a obtenção das funções de transferência para outras topologias e níveis de ruído não é possível. Cañete *et al.* [16] descrevem o meio e propõem a adoção de um modelo que é função das características físicas da rede. O modelo é aplicável a qualquer cenário, desde que se conheçam o tamanho do ambiente, a quantidade de circuitos e o tipo de cabos. A partir do resultado obtido são extraídas as características finais do canal. Dostert [17] analisa o meio físico, propõe uma expressão que modela a resposta em frequência do canal elétrico baseado no modelo de ecos e verifica a capacidade do meio. Ao longo de uma transmissão, o sinal pode sofrer reflexões e ser transmitido por múltiplos caminhos. O modelo de ecos define a função de transferência do canal a partir do somatório de todos os sinais que atingem o receptor. Dostert compara os resultados medidos experimentalmente com os obtidos pela expressão derivada matematicamente atingindo boa aproximação. Dentre os trabalhos de camada física, verifica-se que o modelo de ecos se aplica bem às características do canal elétrico, além de ser de simples implementação.

1.2.2 Camada de enlace

Inicialmente, os trabalhos que abordavam propostas para a subcamada MAC propunham protocolos centralizados e com reservas de recursos [18, 19, 20]. Assim, seria garantida a eficiência na transmissão de dados através da fiação elétrica principalmente para fluxos com restrições de atraso. Protocolos com essas características foram propostos por Hrasnica *et al.* [18] pois assegurariam qualidade de serviço e baixa probabilidade de bloqueio dos fluxos de voz. Um transmissor teria que enviar uma requisição à estação base e aguardar o momento determinado para o envio dos dados. Segundo os autores, protocolos baseados em contenção não aumentariam a eficiência, pois estariam sempre sujeitos a colisões e, como consequência, desperdiçariam a banda passante disponível. Posteriormente, trabalhos mostraram que protocolos centralizados que reservam recursos possuem uma carga de controle alta [21, 22]. Sundaresan *et al.* [22] propuseram um protocolo distribuído sem reserva de recursos, onde uma estação que queira transmitir o faz caso o meio esteja ocioso. Sundaresan *et al.* mostraram analiticamente e por simulações que o atraso médio por pacote é menor no caso distribuído do que no centralizado. As vantagens do mecanismo distribuído justifica a *HomePlug PowerLine Alliance* [23] propor o padrão HomePlug baseado num protocolo distribuído para a subcamada MAC.

A maioria dos trabalhos que aborda o HomePlug limita-se a fazer testes superficiais de desempenho do protocolo. Dentre esses trabalhos, alguns fazem testes comparativos entre a subcamada de controle de acesso ao meio (MAC) do HomePlug e do padrão IEEE 802.11, por ser esse atualmente o seu principal concorrente comercial. Lin *et al.* [24] apresentam os padrões, dando ênfase ao HomePlug, e os comparam teoricamente em termos de vazão. Eles ainda analisam experimentalmente a conectividade da rede e a variação das taxas de transmissão. Lin *et al.* verificam que o HomePlug apresenta uma melhor vazão média, aumentando as distâncias dos enlaces, e menor variação da vazão, demonstrando maior estabilidade. Lee *et al.* [25] fazem uma análise experimental semelhante em outros cenários domésticos. Os resultados apresentados nesse trabalho mostram que o HomePlug possui melhor desempenho que o IEEE 802.11 ao apresentar maior conectividade e menor flutuação na vazão. Lee *et al.* mostram também que aumentando as distâncias entre os nós há queda de desempenho dos dois padrões. Num cenário

sem obstáculos, eles verificam que o IEEE 802.11 tem um bom desempenho. Porém, o posicionamento de uma parede entre os nós resulta em queda significativa da vazão. Adicionalmente, é mostrado que a vazão do HomePlug é assimétrica. Lee *et al.* [1] revisam em detalhes todo o padrão HomePlug incluindo as especificações de camada física e as características do protocolo de enlace. Também apresentam resultados obtidos a partir de simulações da vazão do HomePlug para tráfegos TCP e UDP utilizando diferentes números de nós.

Trabalhos com o intuito de melhorar o desempenho do padrão HomePlug diminuindo o número de colisões ainda não foram explorados. Por outro lado, esses tipos de abordagens já foram realizadas utilizando o padrão IEEE 802.11. Kuo *et al.* [26] propõem um simples esquema de *backoff* para redes sem fio não infra-estruturadas diferente do utilizado pelo IEEE 802.11 original e propõem um modelo analítico baseado em cadeias de Markov para a vazão e o atraso inserido pela proposta. A análise mostra que o algoritmo proposto melhora a vazão da rede e diminui o tempo de acesso ao meio. Kwon *et al.* [27] propõem um mecanismo que melhora a vazão e a justiça da rede. Para tal, eles aceleram a resolução de colisões e reduzem os períodos de ociosidade da rede. A resolução rápida de colisões ocorre aumentando o tempo de *backoff* das estações que estão em contenção pelo meio sempre que há a detecção de uma outra transmissão. Adicionalmente, eles aumentam o tempo máximo de *backoff* e diminuem o tempo mínimo comparado ao IEEE 802.11. Os períodos de ociosidade da rede são minimizados ao se reduzir exponencialmente o tempo de *backoff* quando um intervalo de tempo definido de ausência de transmissão é detectado. O bom desempenho de mecanismos que reduzem o número de colisões aplicados ao IEEE 802.11 sugere que mecanismos com o mesmo objetivo possam apresentar bons resultados também no HomePlug.

1.3 Objetivos

O objetivo deste trabalho é propor um novo mecanismo de controle de acesso ao meio capaz de aumentar a vazão agregada e melhorar o desempenho da rede para todos os tipos de tráfego incluindo os que possuam exigências quanto a banda e atraso. As

limitações físicas do canal elétrico tornam de suma importância os trabalhos que possuem a finalidade de aumentar a capacidade de transmissão no meio, em especial se considerada a necessidade por qualidade de serviço em aplicações futuras como voz e vídeo.

Nessa direção, este trabalho analisa o desempenho do HomePlug, e em especial, do contador de adiamentos (*Deferral Counter - DC*), que é o principal responsável pelos ganhos alcançados. Esse mecanismo foi introduzido pelo padrão e é capaz de reduzir colisões aumentando, conseqüentemente, a vazão agregada da rede. A análise da eficiência desse contador, e posteriormente, a proposta de uma nova alternativa que torne o acesso ao meio mais eficiente são consideradas.

Numa primeira etapa, as características do HomePlug são analisadas e uma expressão para a vazão máxima é derivada matematicamente. Adicionalmente, a influência do contador de adiamentos introduzido pelo padrão é verificada através de medidas de vazão e colisão na rede obtidas por simulação [28]. Tal análise complementa os trabalhos de Lin *et al.* [24] e Lee *et al.* [1, 25] que limitam-se a análises experimentais da vazão do HomePlug.

É proposto um novo mecanismo capaz de aumentar os ganhos alcançados pelo HomePlug. Este novo mecanismo é baseado no contador de adiamentos e possibilita, através da redução do número de colisões, melhorias em termos de vazão e atraso. As análises comparativas foram realizadas por simulação e uma análise matemática resultou numa expressão para a probabilidade de colisões que embasa os resultados obtidos [29]. Trabalhos que visam acelerar a resolução de colisões aplicados ao HomePlug ainda não existiam, porém trabalhos com esse mesmo intuito já foram feitos para redes IEEE 802.11 [26, 27, 30].

O HomePlug e o IEEE 802.11 possuem muitas características semelhantes e adotam o CSMA/CA como método de acesso. O HomePlug introduziu o mecanismo contador de adiamentos e obteve bons resultados de desempenho. Assim, este trabalho analisa o desempenho do padrão IEEE 802.11 com a inclusão do mecanismo contador de adiamentos. A análise resultante complementou o trabalho realizado por Kwon *et al.* [27] ao verificar esquemas diferentes para reduzir colisões. Neste trabalho o contador de adiamentos é aplicado ao IEEE 802.11 a partir de três diferentes abordagens: constante, linear e exponencial. O resultado mostrou que o emprego de mecanismos capazes de

acelerar a resolução de colisões é importante também em redes que utilizam o padrão IEEE 802.11 [31].

Este trabalho está organizado da seguinte forma. No Capítulo 2, são apresentadas as características das redes através da fiação elétrica, levando-se em consideração suas vantagens e desafios. Nesse mesmo capítulo, ainda é feita uma revisão do padrão HomePlug abordando suas definições para as camadas física e de enlace. No Capítulo 3, a operação do padrão HomePlug é analisada e uma expressão para a vazão máxima é derivada. Em seguida, o contador de adiamentos (DC) é apresentado e testado por simulação. No Capítulo 4, além de apresentar o padrão IEEE 802.11, o mecanismo contador de adiamentos é aplicado ao padrão sem fio através de três diferentes abordagens. Posteriormente, verifica-se sua eficiência. No Capítulo 5, um novo mecanismo baseado no DC é proposto e uma expressão para a probabilidade de colisões derivada. Ainda nesse capítulo, os ganhos do novo mecanismo são analisados e os resultados obtidos são confrontados com os previstos pela expressão. O Capítulo 6 conclui este trabalho e apresenta sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2

HomePlug 1.0

A FIAÇÃO elétrica era utilizada apenas para a transmissão de energia a 50 ou 60 Hz. Os primeiros esforços para aproveitá-la também em comunicações datam de 160 anos atrás onde protocolos de controle eram transmitidos para automação e segurança doméstica e controle de luz [32]. O uso das instalações elétricas para comunicações esbarra nas suas limitações físicas, pois a fiação elétrica não foi desenvolvida com este fim.

A alta atenuação e os ruídos são os principais obstáculos a serem contornados, especialmente em altas frequências. O principal desafio do padrão HomePlug é proporcionar altas taxas de transmissão, qualidade e confiabilidade durante a transmissão de dados superando as adversidades das características particulares apresentadas pelo meio físico.

2.1 Comunicação através da fiação elétrica

O cabeamento da rede elétrica residencial possui uma topologia que é uma combinação de barramento, estrela e árvore (Figura 2.1). Esse tipo de topologia favorece o problema das reflexões de sinais devido ao descasamento de impedâncias. Além disso, o uso de dois fios, uma fase e um neutro, compartilhados entre todos os dispositivos conectados à rede dificulta o emprego do modo *full-duplex*. Adicionalmente, a distribuição das fases dentro de uma residência deve ser considerada, pois não segue um padrão definido.

Em residências bifásicas, por exemplo, os cômodos podem estar conectados a diferentes fases dificultando a transmissão dos sinais. Essa dificuldade é devido à grande atenuação entre as fases do transformador de média para baixa tensão [33].

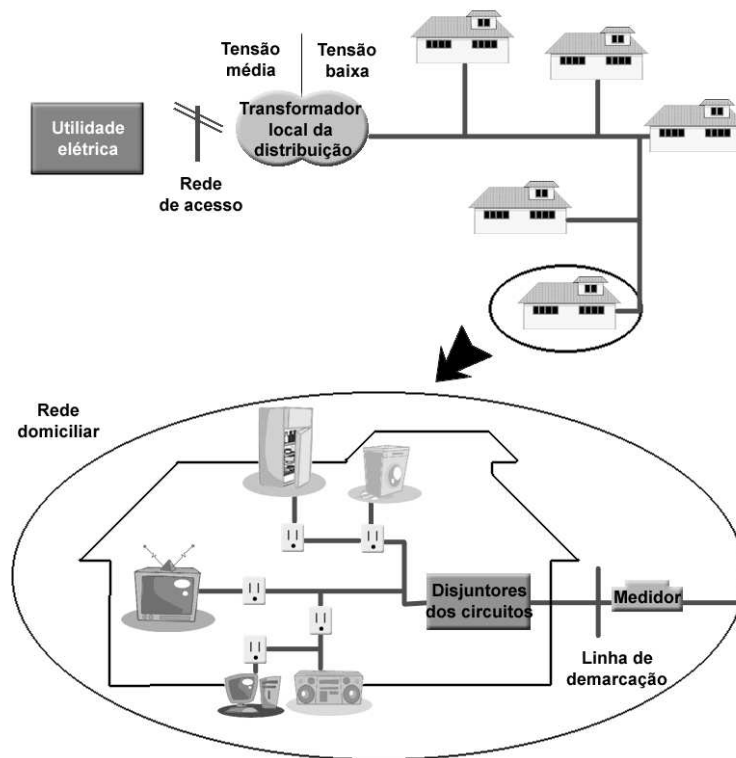


Figura 2.1: Topologia da rede elétrica residencial.

A atenuação é devida principalmente às reflexões por descasamento de impedâncias e irradiação. As reflexões ocorrem, pois diferentes tipos de condutores e tomadas são adicionados à rede causando descasamento de impedâncias. A variação no tempo da impedância da rede conforme equipamentos vão sendo ligados e desligados também é outro fator relevante. Já a irradiação ocorre porque os fios elétricos foram projetados para baixa frequência e não houve nenhuma preocupação com a irradiação, diferentemente da fiação telefônica onde os fios são trançados. Como consequência, os fios funcionam como antenas e a potência transmitida em alta frequência é irradiada. Para que não haja interferência em outros serviços, a potência usada para comunicação dos dispositivos é limitada, diminuindo o alcance dos enlaces de comunicação. Outro desafio relacionado com a fiação elétrica é a presença de ruídos. Ao contrário das redes sem fio, o ruído da rede elétrica não pode ser representado por um ruído branco gaussiano aditivo (*Additive White Gaussian*

Noise) [34], pois diversos equipamentos eletro-eletrônicos podem adicionar diferentes tipos de ruído impulsivo ao canal. Desta forma, o ruído impulsivo pode ser classificado em quatro categorias: síncrono, não síncrono ou tonal, de alta frequência e de apenas uma ocorrência (*single event impulse noise*) [33].

O impulso síncrono é provocado principalmente por *dimmers* [35]. Esse dispositivo gera ruído ao conectar a lâmpada à rede elétrica a cada ciclo AC. O ruído gerado é na forma de um impulso com o dobro da frequência da rede AC. O impulso não síncrono ou tonal é provocado por fontes de alimentação chaveadas (*switching power supplies*). Diversos equipamentos possuem esse tipo de fonte, tais como: computadores, escova de dentes elétrica, dentre outros. A frequência fundamental destes dispositivos está entre 10 kHz e 1 MHz. O ruído gerado é rico em harmônicos. O impulso de alta frequência é gerado por equipamentos que utilizam motor universal, tais como: o aspirador de pó, barbeador elétrico, entre outros. Esses motores geram impulsos em altas faixas de frequências, da ordem de dezenas de quilohertz [36]. A principal causa do impulso de apenas uma ocorrência é o ato de ligar e desligar aparelhos eletro-eletrônicos. Esses equipamentos possuem um capacitor para a correção do fator de potência, que é carregado e descarregado, conforme o equipamento é ligado e desligado. Esse efeito causa grandes voltagens transientes que são proporcionais ao tamanho do capacitor. Existem ainda ruídos causados por fontes externas de ondas de rádio, como por exemplo, intercomunicadores, babás eletrônicas e até mesmo rádios FM.

A atenuação é outro fator limitante para a transmissão em alta velocidade. O valor da atenuação de um sinal é uma função da frequência e da distância percorrida pelo sinal. Quanto maiores a frequência e a distância maior é a atenuação limitando consideravelmente o alcance das transmissões em altas frequências. Para o caso específico da rede elétrica, a carga da rede e os descasamentos de impedância também contribuem para a atenuação do sinal, e podem variar no tempo e com a localização. Os descasamentos de impedância são causados por emendas nos fios, interruptores e tomadas, provocando zeros na função de transferência do canal [33]. As tomadas causam problemas mesmo sem equipamentos conectados, pois, nesse caso, tornam-se pontos da rede sem terminação. Os equipamentos, se conectados às tomadas, também contribuem para a carga total da rede. A diferença de impedância entre os equipamentos e a rede elétrica, bem como as dife-

rentes impedâncias nas terminações e derivações, causam descasamento de impedância. Esses descasamentos provocam a reflexão do sinal transmitido. As reflexões resultam em uma maior atenuação do sinal, pois parte da potência do sinal é perdida. Essa atenuação é dependente da frequência, pois os aparelhos eletro-eletrônicos possuem filtros capacitivos que limitam consideravelmente sinais de baixa frequência. Assim, esse tipo de atenuação decai com o aumento da frequência. No caso específico de residências alimentadas por mais de uma fase, há, ainda, a atenuação entre fases intrínseca aos transformadores de média para baixa tensão que pode chegar a 40 dB.

Por último, a impedância da rede exerce uma grande influência na qualidade da transmissão de sinais. O transmissor de um modem deve inserir uma voltagem na rede elétrica que atinja o nível máximo de amplitude permitido pela norma. Portanto, a potência de transmissão é facilmente calculada quando a impedância da rede é conhecida. Quanto menor for a impedância maior terá que ser a potência de transmissão. Entretanto, a impedância da rede elétrica pode variar com o tempo, com a frequência e com a localização, assim, aumentando o custo do estágio de saída dos transmissores. A impedância da rede elétrica de uma casa resulta, basicamente de três fatores. O primeiro deles é a impedância do transformador de distribuição, que aumenta com a frequência. O segundo é a impedância característica do próprio cabo. Existe uma grande variedade de tipos de cabos, que podem ser modelados a partir de indutores e resistores em série. Por último, tem-se a impedância dos equipamentos que estão conectados à rede elétrica. Esse tipo de impedância pode variar entre 10 e 1000 ohms. O descasamento de impedância em uma linha de transmissão aumenta o índice de reflexão do sinal transmitido, acarretando uma diminuição da potência do sinal original e criando múltiplos caminhos. A topologia também exerce influência nos múltiplos caminhos, pois a junção de ramos de uma mesma rede também causa a reflexão do sinal devido aos descasamentos [33]. Todas as adversidades do canal elétrico, todavia, não impedem a sua aplicação para a transmissão de dados em altas taxas. O uso das instalações elétricas domiciliares para a transmissão de dados é motivada principalmente pelas grandes vantagens que oferece como infra-estrutura existente e ubiquidade.

Na última década, as comunicações através da fiação elétrica (*PowerLine Communications* - PLC) vêm recebendo atenção devido, principalmente, à sua ubiquidade. Dentre

todas as tecnologias de rede utilizadas num ambiente doméstico para prover conexão em altas taxas e acesso à Internet, a infra-estrutura elétrica é a única considerada onipresente por existirem tomadas em todos os cômodos da casa. Essa importante característica, aliada ao baixo custo de instalação, já que a infra-estrutura é pré-existente, tornam o HomePlug uma alternativa bastante atrativa. Para viabilizar transmissão de dados a alta taxa de transmissão [1] é preciso contornar as adversidades que a fiação elétrica provê. Para isso são usadas técnicas avançadas de processamento de sinais e comunicação tais como: códigos corretores de erro (*Forward Error Correction - FEC*), intercalamento (*interleaving*), protocolos de recuperação de erros por retransmissão (*Automatic Repeat Request - ARQ*), novos esquemas de modulação como o OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplex*) e protocolos tolerantes a falhas para a subcamada de controle de acesso ao meio (MAC). O HomePlug define o método de acesso ao meio e as especificações de camada física utilizando as técnicas acima citadas para garantir robustez na transmissão de dados. Atualmente, o padrão está em sua versão 1.0.

2.2 Camada física

O padrão HomePlug 1.0 viabiliza transmissões em altas taxas pela fiação elétrica domiciliar em parte devido às suas especificações de camada física. O emprego de novas técnicas como multiplexação usando OFDM com prefixo cíclico, códigos corretores de erro concatenados, três variantes do PSK (*Phase Shift Keying*) para modulação, preâmbulos de início e final de quadro e detecção física de portadora (*Physical Carrier Sense - PCS*) garantem a sua eficiência [1].

Além disso, o HomePlug viola a separação entre camadas ao utilizar os mesmos campos do cabeçalho para funções da camada física e da subcamada MAC. Essas características peculiares são analisadas nas subseções a seguir.

2.2.1 Sinalização e processamento de sinais

A técnica de multiplexação OFDM é utilizada por possuir uma alta eficiência espectral ao dividir a banda disponível em muitas sub-bandas estreitas, de menor taxa, mantendo as características de ortogonalidade e sobreposição. Cada sub-banda possui uma subportadora que pode ser modulada de diferentes formas e independentemente. As modulações empregadas são: BPSK (*Binary Phase Shift Keying*), DBPSK (*Differential Binary Phase Shift Keying*) e DQPSK (*Differential Quadrature Phase Shift Keying*). Essa flexibilidade é importante, pois possibilita que o HomePlug se adapte ao meio. Durante a transmissão de um fluxo, em virtude da imprevisibilidade das condições do canal, algumas subportadoras podem sofrer alta atenuação devido a ruídos ou sobreposição de sinais recebidos por diferentes percursos (atenuação por multi-percursos). A seleção das melhores subportadoras em conjunto com a modulação e a taxa do código corretor de erro apropriado torna-se importante para adaptação ao meio.

O padrão HomePlug 1.0 utiliza a faixa espectral de 4,49 a 20,7 MHz. O OFDM divide a banda de 0 a 25 MHz em 128 subportadoras igualmente espaçadas, das quais são utilizadas apenas 84. Outras 8 subportadoras podem ser desabilitadas para evitar interferência com as frequências de rádio-amadores, restando 76 subportadoras. A modulação OFDM é realizada a partir da transformada inversa rápida de Fourier (*Inverse Fast Fourier Transform - IFFT*) e cada símbolo OFDM é composto por 256 amostras do sinal. Para evitar interferências inter-simbólicas, as últimas 172 amostras das 256 obtidas durante o intervalo utilizado pela transformada inversa são usadas como prefixo cíclico. Essas 172 amostras são repetidas e anexadas ao final das 256 originais formando um símbolo OFDM de 428 amostras. Cada símbolo OFDM tem duração de $8,4 \mu s$, sendo $5,12 \mu s$ correspondentes ao símbolo OFDM propriamente dito e $3,28 \mu s$ ao prefixo cíclico [1].

Adicionalmente, para dar suporte à qualidade de serviço (*Quality of Service - QoS*), o padrão utiliza sinais de resolução de prioridade (*Priority Resolution Signal - PRS*) antes da transmissão dos quadros físicos. Os PRSs determinam que fluxos que terão prioridade de acesso ao meio. Para resolver a prioridade são transmitidos 2 sinais OFDM (PRS0 e PRS1). Cada sinal é composto por 6 símbolos OFDM especiais com $30,72 \mu s$ de duração mais um intervalo de processamento de $5,12 \mu s$ compondo um intervalo de $35,84 \mu s$.

Um quadro físico do HomePlug (*Physical Protocol Data Unit - PPDU*), Figura 2.2, é composto pelos dados recebidos da subcamada MAC (MPDU) cercados por delimitadores, um de início e outro de final de quadro. Os delimitadores são formados por um preâmbulo e um campo de controle de quadro. O preâmbulo é utilizado para controle automático de ganho (*Automatic Gain Control - AGC*), sincronização, referência de fase para a decodificação do campo de controle de quadro, detecção física de portadora (*Physical Carrier Sense - PCS*) e ajuda na determinação do tamanho do intervalo de tempo usado pela subcamada MAC. O preâmbulo é formado por 7,5 símbolos especiais OFDM sem prefixo cíclico [1]. Os dados do campo de controle de quadro além de serem codificados e intercalados de forma diferente do campo de dados do PPDU, são transmitidos em 4 símbolos OFDM modulados em BPSK. Já o campo de dados é formado por 20 a 160 símbolos OFDM e são modulados e codificados de acordo com as condições do meio. Preâmbulo e controle de quadro, que formam os delimitadores, têm duração de 72 μs . Tanto o preâmbulo quanto os sinais de resolução de prioridade são utilizados durante a fase de detecção física de portadora (PCS). A PCS é usada pelas estações para conhecimento de uma transmissão corrente.

Existem três tipos de delimitadores: os delimitadores de início de quadro, de final de quadro e de resposta. Em cada caso o campo de controle de quadro tem funções específicas. Esse campo possui informações referentes à camada física, à subcamada MAC e às duas simultaneamente. O HomePlug não define claramente as fronteiras entre as diferentes camadas do modelo OSI (*Open Systems Interconnection*) da ISO (*International Organization for Standardization*) a fim de tornar o protocolo mais eficiente. A camada física utiliza informações contidas no delimitador de início de quadro relativas à codificação e modulação do campo de dados. Entretanto, tanto a camada física quanto a subcamada MAC usam informações relativas ao comprimento do campo de dados para funcionalidades específicas. Essas informações estão contidas no campo de controle de quadro e ambas as camadas, física e enlace, podem acessá-las.

Os delimitadores e os sinais de resolução de prioridade (PRS) precisam ser decodificados e demodulados por todos os nós. Portanto, essas partes do quadro usam uma modulação e codificação fixa e conhecida de todas as estações, além de utilizar todas as subportadoras. Já o campo de dados do quadro físico do HomePlug está sujeito a diferen-

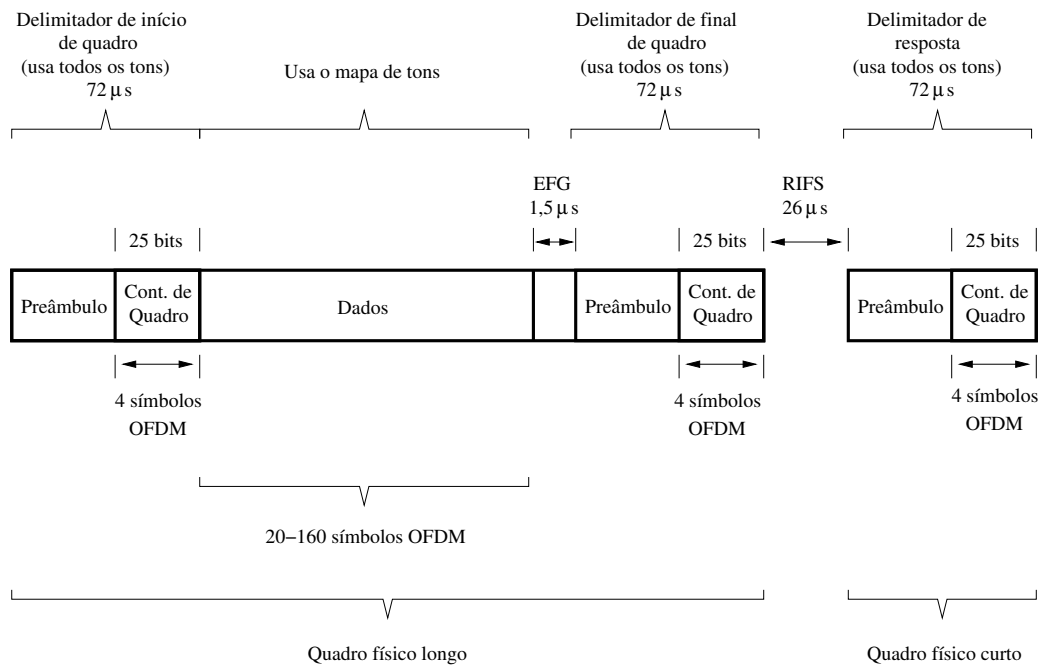


Figura 2.2: Formato do quadro físico (PPDU).

tes modulações, codificações e subportadoras de acordo com as condições do canal. Caso as condições do canal permitam, são usadas uma modulação com um maior número de bits por símbolo e uma codificação para correção de erros menos robusta e, dessa forma, uma maior taxa de transmissão é obtida. Caso haja ruído preponderante em algumas portadoras, elas podem ser eliminadas na comunicação entre dois nós. Assim, o HomePlug prevê a negociação entre os nós comunicantes antes ou durante as transmissões de um fluxo de dados para que eles se adaptem às condições do meio. A estimação do canal define quais as subportadoras são utilizadas, qual a modulação e qual a taxa do código corretor de erro são empregadas. Essas informações definem o mapa de tons (*Tone Maps* - TM) utilizado no campo de dados do quadro transmitido e são enviadas para o conhecimento das outras estações através do índice do mapa de tons (*Tone Maps Index* - TMI). Todos os nós devem ter conhecimento da situação do canal e dos TMIs referentes aos nós presentes na rede. O HomePlug 1.0 utiliza uma função de controle de estimação do canal para esse fim. Essa função é definida por um protocolo de gerenciamento definido pelo padrão. Em intervalos de 5 minutos em média, cada estação requisita informações a respeito da situação do canal. Após receber as requisições, todas as estações respondem

com o seu TMI. Por conseguinte, o nó requisitante conhece o TMI a ser utilizado para cada possível destino. Há a possibilidade das estações receberem informações a respeito de uma determinada estação sem tê-los requisitado. Durante a comunicação, o valor do TMI está contido no campo de controle de quadro apenas no seu delimitador de início. Os mapas de tons não são utilizados em delimitadores, preâmbulos ou símbolos de resolução de prioridade, pois esses utilizam um mapa conhecido *a priori* por todos os nós.

O comprimento do quadro transmitido é outra informação definida no delimitador de início de quadro no campo de controle. Essa informação é utilizada pela camada física para indicar por quanto tempo devem ser utilizadas a modulação e a codificação corrente antes de começar uma nova busca por outro preâmbulo.

Antes da transmissão de um quadro, quando nenhum mapa de tons foi definido para os dados, as transmissões são realizadas num modo especial usando modulação e codificação conhecidas *a priori* para que todas as estações compreendam os dados enviados. Esse modo é conhecido como modo ROBO (*Robust OFDM*) e é utilizado também para transmissões em *broadcast* e *multicast*. O modo ROBO foi desenvolvido para operar em condições de alto ruído utilizando sempre todas as subportadoras e um intercalador diferente dos outros modos. Em resumo, o modo ROBO é utilizado sempre que nenhum mapa de tons foi definido ou não pôde ser estabelecido.

A carga útil do quadro HomePlug consiste de um número de blocos de 20 ou 40 símbolos OFDM, codificados a partir de códigos de erro convolucionais e *Reed-Solomon* concatenados. A divisão em blocos desse tamanho é feita para combater o ruído impulsivo, que pode danificar uma seqüência de símbolos, principalmente quando se utiliza modulação diferencial, onde pelo menos dois símbolos são perdidos por vez [1]. No codificador convolucional, utiliza-se um comprimento 7 e taxas de código de $\frac{1}{2}$ ou $\frac{3}{4}$. Já o código *Reed-Solomon*, utiliza taxas de codificação que variam de $\frac{23}{39}$ a $\frac{238}{254}$. Considerando todos os possíveis parâmetros de transmissão, a camada física do HomePlug pode oferecer taxas de transmissão que variam de 1 a 14 Mbps. Quando o modo ROBO é utilizado, a taxa do código convolucional é de $\frac{1}{4}$, a taxa do código *Reed-Solomon* varia de $\frac{31}{39}$ a $\frac{43}{51}$ e os blocos utilizados são somente de 40 símbolos, o que reduz a taxa de transmissão máxima a 0,9 Mbps.

2.2.2 Quadro físico e endereçamento

Conforme mencionado anteriormente, o HomePlug 1.0 viola a independência entre camadas com o intuito de aumentar a eficiência. O campo de controle de quadro de todos os tipos de delimitadores possui informações utilizadas tanto pela camada física quanto pela subcamada MAC. O campo de comprimento do quadro, por exemplo, é utilizado por ambas as camadas.

Um quadro físico longo do HomePlug, como mostra a Figura 2.2, é formado por um delimitador de início de quadro, pelo campo de dados, por um intervalo de tempo (*End-of-Frame Gap* - EFG) e pelo delimitador de final de quadro. O EFG é um atraso de $1,5 \mu s$ para processamento do quadro recebido. Todo delimitador é formado por um preâmbulo e por um campo de controle de quadro.

As funções do preâmbulo foram descritas na Subseção 2.2.1. Todas as funções do preâmbulo são utilizadas exclusivamente pela camada física. Já o campo de controle de quadros além de possuir informações referentes à camada física, possui também informações usadas na subcamada MAC. Conforme a Figura 2.3, todos os delimitadores consistem de 1 bit para controle de contenção, seguido por 3 bits do tipo de delimitador, de 13 bits do campo variável e mais 8 bits para detecção de erros (*Frame Check Sequence* - FCS) do campo de controle. O campo de controle de contenção é utilizado durante períodos de rajadas quando uma determinada estação faz transmissões seguidas. Quando o controle de contenção é 1, a preempção só pode ser realizada por uma estação com prioridade superior. O tipo de delimitador define se o delimitador é de início, final ou resposta. Esse campo ainda define se uma resposta é esperada ou não pelo transmissor. O HomePlug permite que haja transmissões sem que haja a necessidade de reconhecimento. O campo variável possui informações específicas do tipo de delimitador e será descrito a seguir. O FCS do campo de controle é um CRC (*Cyclic Redundancy Check*) de 8 bits dos outros 17 bits do campo de controle de quadro.

No delimitador de início, os 13 bits do campo variável definem o comprimento da carga (8 bits) e o TMI (5 bits). O TMI, como já foi dito, define o mapa de tons utilizado para cada destino possível da rede. Esses 5 bits podem definir até 32 TMIs, porém metade

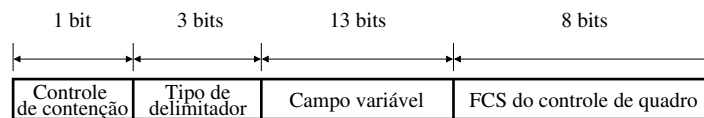


Figura 2.3: Campo de controle de quadro.

é reservado e um indica o modo ROBO. Logo, o número máximo de índice de mapas de tons diferentes é 15. Esse fato limita as redes que utilizam o HomePlug 1.0 a 16 nós. Desses 16 nós, um é o próprio nó e os outros são os 15 possíveis destinos. A limitação do número de nós é decorrência do HomePlug 1.0 definir que cada nó deve ter conhecimento *a priori* do índice de mapas de tons de todos os outros nós da rede. Para um número maior de nós, o modo utilizado é o ROBO. É importante observar que o número máximo de mapas de tons é maior que o número máximo de índice de mapas de tons. Apenas 15 dentre os mapas de tons possíveis podem ser utilizados num determinado momento devido à limitação dos índices. Não há a possibilidade de dois ou mais nós utilizarem o mesmo índice de mapas de tons, pois eles são usados para endereçamento.

No delimitador de final de quadro, o campo variável possui um campo de 2 bits para a prioridade de acesso ao meio (*Channel Access Priority* - CAP). O CAP é utilizado para um determinado nó verificar se pode ou não interromper uma rajada. O nó poderá fazê-lo se a prioridade da rajada for inferior à sua própria. Os outros 11 bits não têm função definida.

O HomePlug define 3 tipos de delimitadores de resposta: ACK, NACK e FAIL. O ACK (*Acknowledgement*) é enviado pelo destino para a origem quando o quadro foi corretamente recebido, o NACK (*Negative ACK*) e o FAIL caso contrário. Nos delimitadores de resposta, o campo variável também possui 2 bits de CAP que repetem a prioridade do quadro reconhecido. Além do CAP, o delimitador de reconhecimento positivo (ACK) possui 11 bits do campo de FCS recebido (*Received FCS* - RFCS). O destinatário repete no RFCS os 11 bits menos significativos do FCS do final do quadro de dados recebido, ou seja, repete o FCS do MPDU (*MAC Protocol Data Unit*). O transmissor do quadro de dados utiliza o RFCS para reconhecer a resposta. Nos delimitadores de reconhecimento

negativo, além dos 2 bits de CAP, há 1 bit que identifica o tipo de reconhecimento (NACK ou FAIL) e mais 10 bits de RFCS cuja formação é equivalente ao do ACK porém nem sempre possui a mesma função conforme será visto na Subseção 2.3.

Os quadros de resposta são formados apenas por um delimitador (preâmbulo, campo de controle quadro) e são chamados de quadro físico curto (Figura 2.2).

Após a negociação e a escolha do mapa de tons é atribuído um valor ao TMI. Esse valor define a modulação, codificação e subportadoras utilizadas no campo de dados de um quadro específico. A ineficiência de se modular e codificar um número muito grande de bits, que é o caso do tamanho de um endereço físico que possui 48 bits, faz com que o destino dos quadros seja identificado no nível físico a partir do TMI. Quando uma estação recebe um quadro e não identifica o índice correspondente como ela própria, o descarta. Sempre que uma estação identifica o TMI, ela pode confirmar a propriedade do quadro após demodular e decodificar o campo de dados recebidos e verificar que o endereço MAC do destino é o seu. Se por acaso uma estação receber um TMI conhecido que não seja o próprio, ela não conseguirá nem decodificar nem tão pouco demodular os dados do quadro recebido. Mesmo com a possibilidade do reconhecimento através do endereço MAC, uma rede HomePlug não pode ter mais de 16 nós sem estar em modo ROBO. Isso é devido ao dinamismo das condições da rede, onde os TMIs das estações são atualizados de acordo com as variações do canal. Caso existam 16 TMIs na rede e mais de 16 estações, num momento posterior pode ser necessário mais de 16 TMIs. Isso ocorreria dado que as condições da rede mudam e os TMIs também. A presença de mais de 16 TMIs não permite que cada estação conheça o TMI de todas as outras estações *a priori*.

2.3 Subcamada de controle de acesso ao meio

Da mesma forma que o padrão IEEE 802.11, o HomePlug 1.0 utiliza o método de acesso múltiplo CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*) devido à incapacidade de garantir a detecção de colisão na fiação elétrica, em função principalmente da atenuação e do ruído [1]. A atenuação e o ruído podem impedir que

o transmissor conheça uma possível colisão no receptor já que o sinal colidido pode não alcançá-lo. O sinal colidido ao não atingir o transmissor impede a detecção de colisão. O formato do quadro da camada MAC do HomePlug é idêntico ao Ethernet e, portanto, encapsula dados de 46 a 1500 octetos vindos da camada superior.

A interface entre redes HomePlug e Ethernet é realizada através de pontes conforme a Figura 2.4. A ponte é o equipamento HomePlug propriamente dito pois é a partir dela que o protocolo começa a ser utilizado.

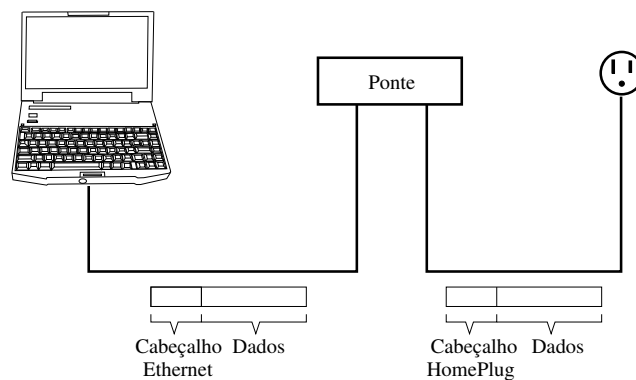


Figura 2.4: Ponte entre uma rede Ethernet e HomePlug.

Para dar suporte à qualidade de serviço, o padrão utiliza quatro níveis de prioridade no acesso ao meio, atribuídos em função do tipo de tráfego (Tabela 2.1), de acordo com a norma IEEE 802.1D [37]. As prioridades (*Channel Access Priorities - CAP*) estão associadas às classes CA0 a CA3, sendo a classe CA3 a de maior prioridade. A classe CA1 é a classe padrão.

A lógica de transmissão do HomePlug 1.0 encontra-se na Figura 2.5. Sempre que uma estação deseja transmitir um quadro de dados, ela deve inicialmente “escutar” o meio para evitar colisões. Com essa finalidade, o HomePlug define dois métodos para determinar se o meio está ocupado: a detecção física (PCS) e detecção virtual de portadora (*Virtual Carrier Sense - VCS*). A detecção física funciona através do reconhecimento de preâmbulos e transmissões de sinais de prioridade. A detecção virtual de portadora usa informações do quadro “escutado” para conhecer a duração da transmissão e assim estabelecer um vetor de alocação (*Network Allocation Vector - NAV*). Ao estabelecer um vetor de alocação,

Tabela 2.1: Classes de prioridade e seus respectivos tipos de tráfego.

CAP	Tipo de tráfego
CA3	Tráfego de voz e de controle da rede
CA2	Tráfego de vídeo e áudio e aplicações de negócios sujeitas a controle de admissão
CA1	Serviços de melhor esforço de alta qualidade (<i>"excellent effort"</i>)
CA0	Tráfego padrão de LAN (quando este é rotulado como tal) e tráfego de fundo

a estação só poderá fazer sua transmissão quando o vetor de alocação expirar, pois esse define um intervalo de tempo suficiente para o fim da transmissão corrente. Esse tempo compreende o intervalo desde o início da recepção do quadro de dados pelo destinatário, donde percebe-se a importância da MAC conhecer também o tamanho do quadro, até a recepção da resposta do quadro correspondente pelo transmissor. A detecção virtual é utilizada também, pois a detecção física sozinha não é suficiente devido às adversidades do meio. Num determinado momento, uma estação sob condições adversas de interferência pode não ser capaz de detectar corretamente os dados de um quadro modulado numa taxa alta ou não “escutar” um reconhecimento. A incapacidade de detectar e identificar portadora faz com a detecção física não seja eficaz em alguns momentos.

Caso o meio permaneça livre por um determinado intervalo de tempo, CIFS (*Contention Distributed InterFrame Space*), cujo valor é $35,84 \mu s$, a estação entra na fase de determinação de prioridade, Figura 2.5(a). São utilizados dois intervalos de tempo para determinação de prioridade (*Priority Resolution - PR*), a fim de permitir que apenas as estações com fluxos de maior prioridade disputem o meio no período de contenção (Figura 2.6). Cada um dos intervalos de tempo (PR0 e PR1) tem a mesma duração do intervalo CIFS, $35,84 \mu s$. Tanto o PR0 quanto o PR1 são formados por um sinal de resolução de prioridade (PRS) de $30,72 \mu s$, mais um intervalo para processamento do mesmo de $5,12 \mu s$.

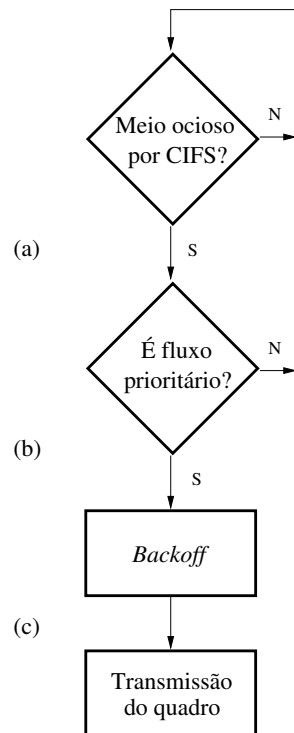


Figura 2.5: Lógica de transmissão do HomePlug.

A sinalização da classe de prioridade é feita quadro a quadro através de sinais chamados PRS (*Priority Resolution Signal*), enviados nos períodos PR0 e PR1. Os sinais de determinação de prioridade usam uma modulação *on-off*, na qual o número de cada classe representa o sinal a ser transmitido em binário [38]. Assim, ao escutar o bit 1 em PR0, todas as estações com quadros de classes inferiores a CA2 adiam suas transmissões, voltando a esperar o meio ficar livre por CIFS.

No período de disputa do meio físico, a estação escolhe um número aleatório uniformemente distribuído entre zero e o tamanho da janela de contenção (*Contention Window* - CW) e cria um contador de *backoff* (*Backoff Counter* - BC), onde $BC \in [0, CW]$ (Figura 2.5(b)). O valor de BC sorteado é multiplicado por um intervalo de tempo igual a $35,84 \mu s$ ($t_{intervalo}$) criando um temporizador chamado de *backoff timer* (BT), iniciado conforme a Equação 2.1. O valor de CW depende do número de chamadas à função de *backoff* (CFB) para o quadro a ser transmitido. Em resumo, nos períodos de contenção, uma estação que deseja transmitir deve aguardar o meio ficar ocioso por um intervalo de tempo CIFS. Após esse intervalo, transmitir seu sinal de prioridade nos intervalos de

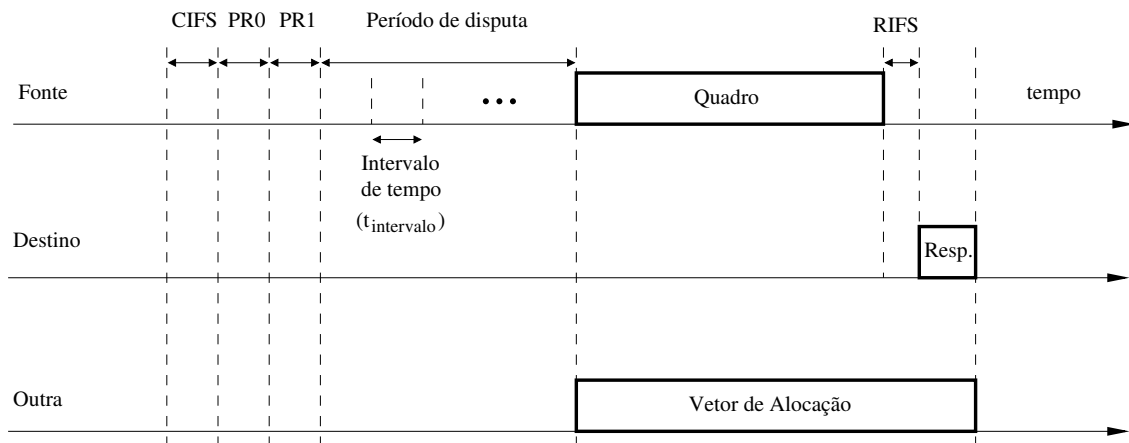


Figura 2.6: Transmissão de um quadro de dados com sua respectiva resposta.

resolução. Caso não haja nenhuma estação com prioridade superior ao seu tráfego, deve iniciar o seu BC e esperar sua expiração para fazer sua transmissão (Figura 2.5(c)). O BC é decrementado de uma unidade sempre que o meio permanecer ocioso por um intervalo de tempo igual a $35,84 \mu s$ ($t_{intervalo}$). Os valores da janela de contenção para as classes de maior prioridade (CA3 e CA2) e para as de menor prioridade (CA1 e CA0) se encontram na Tabela 2.2.

$$BT = random(0, CW) \times t_{intervalo} \mu s. \quad (2.1)$$

Contador de adiamentos

O contador de adiamentos (*Deferral Counter* - DC) é um mecanismo criado para evitar colisões através do aumento do número de vezes que a função de *backoff* é chamada para o quadro a ser transmitido. A função de *backoff* pode ser chamada mesmo que não haja uma colisão. Uma estação faz uma chamada à função de *backoff* (CFB) sempre que ocorre uma colisão ou quando a probabilidade de ocorrência da mesma é considerável, o que é indicado pelo DC. O mecanismo empregado indica alta probabilidade de colisão quando o contador de adiamentos atinge zero. Quando o DC é zero, a janela de contenção é incrementada ao perceber o meio sendo ocupado por uma outra estação, diminuindo a probabilidade de colisões. A janela de contenção é incrementada segundo a Equação 2.2, onde CW_{atual} é o tamanho atual da janela de contenção e o CW_{novo} é o próximo valor a ser utilizado. Quando CW e DC de uma estação atingem seus valores máximos, esses

permanecem com os seus valores máximos mesmo que haja novos incrementos. Os valores de DC e da janela de contenção (*Contention Window* - CW) definidos pelo padrão HomePlug são vistos na Tabela 2.2.

$$CW_{novo} = 2 \times CW_{atual} + 1. \quad (2.2)$$

Tabela 2.2: Valores definidos pelo padrão HomePlug para CW e DC.

CFB	CAP: CA3, CA2		CAP: CA1, CA0	
	CW	DC	CW	DC
0	7	0	7	0
1	15	1	15	1
2	15	3	31	3
≥ 2	31	15	63	15

A Tabela 2.3 exemplifica a evolução do valor da janela de contenção (CW) e do contador de adiamentos (DC). Um cenário possível é representado na Figura 2.7. No instante 0, o nó A faz sua primeira tentativa de acessar o meio e um outro nó, B, de mesma prioridade, captura o meio antes. Como o nó A não consegue transmitir, incrementa CW e DC para os valores seguintes, 15 e 1, respectivamente. No instante 2, o nó A consegue transmitir, porém colide com uma transmissão de mesma prioridade do nó B. O nó A, então, incrementa CW e DC para os valores seguintes. No instante 3, o nó A consegue acessar o meio e transmitir seu quadro, reiniciando os valores de CW e DC em seus valores mínimos. Do instante 4 em diante, o nó A não consegue transmitir pois o meio está sendo ocupado por outras transmissões. O valor do DC é sempre decrementado e sempre que atingir o valor zero e o meio for ocupado novamente, DC e CW são incrementados.

Durante a transmissão de um quadro, uma estação deve esperar um intervalo de tempo CIFS e após o período de resolução de prioridade, esperar mais um intervalo de tempo aleatório (*backoff*). Durante o período de disputa, uma estação transmissora deve escutar o meio, se o meio permanecer ocioso até o término do *backoff*, a estação transmite seu quadro. Se o meio for ocupado por uma outra transmissão, a estação verifica seu DC e o decrementa se esse não estiver nulo. Em seguida, pausa o seu *backoff* e o reinicia do ponto

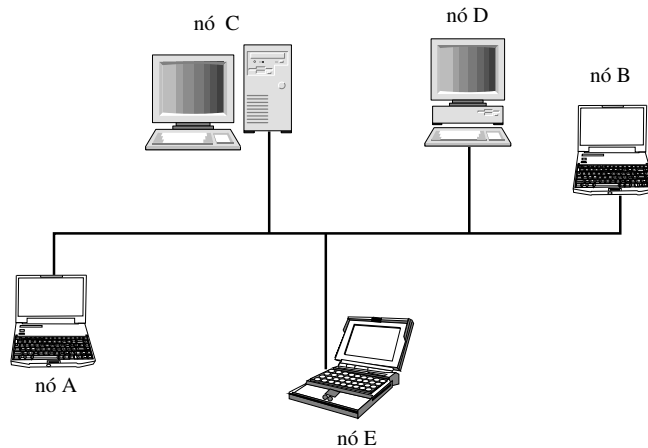


Figura 2.7: Exemplo de uma topologia.

Tabela 2.3: Exemplo da evolução de CW e DC para o exemplo descrito.

Instante	CW	DC
0	7	0
1	15	1
2	31	3
3	7	0
4	15	1
5	15	0
6	31	3
7	31	2
8	31	1

onde pausou quando houver uma nova oportunidade de transmissão, ou seja, quando o meio ficar livre por CIFS e a sua prioridade permitir a transmissão. Se o DC estava nulo, a estação faz uma nova chamada à função de *backoff* e aguarda o meio ficar ocioso novamente para iniciar um novo período de disputa. A Figura 2.8 mostra o pseudo-código do algoritmo de transmissão. Após transmitir um quadro de dados, a estação aguarda um quadro de resposta, se tiver indicado no delimitador de início de quadro o seu desejo. Se o quadro de resposta não for recebido a estação considera que uma colisão ocorreu, faz uma chamada a sua função de *backoff* e espera o meio ficar ocioso novamente para fazer uma retransmissão. Se o ACK for recebido, a estação reatribui os valores mínimos a DC

e CW.

```

1  transmissão ()
2  espera para transmitir um quadro;
3  se o meio está ocioso por CIFS então
4  se o backoff está pausado então
5  reinicia_backoff;
6  senão
7  inicia_backoff;
8  se o backoff terminou e o meio está ocioso então
9  transmite o quadro;
10 recepção(); // Espera por reconhecimento positivo
11 se a estação estiver em backoff e o meio for ocupado então
12 // Verifica DC;
13 se DC == 0 então
14 pára_backoff;
15 incrementa_DC;
16 incrementa_CW;
17 transmissão();
18 senão
19 decrementa_DC;
20 pausa_backoff;
21 transmissão();

1 recepção ()
2 se o reconhecimento positivo não chegar // Ocorreu colisão
3 incrementa_DC;
4 incrementa_CW;
5 transmissão(); // Retransmissão
6 senão
7 retorna;

```

Figura 2.8: O pseudo-código do algoritmo de transmissão.

O reconhecimento e o pedido de retransmissão seguem o protocolo convencional de solicitação de retransmissão (*Automatic Repeat reQuest* - ARQ) do tipo pára-e-espera. O protocolo ARQ somente não é utilizado nos casos em que o reconhecimento não é solicitado. Ao receber o quadro, o receptor verifica se o transmissor deseja receber resposta. O transmissor indica o seu desejo por resposta no campo de tipo de delimitador do controle de quadro. Essa informação está contida no delimitador de início e de final de quadro. Caso o transmissor deseje resposta, o receptor espera RIFS (*Response InterFrame Space*), que é um intervalo de tempo entre o final da recepção do quadro e a transmissão da resposta. O fato do RIFS ser o menor dos espaços entre quadros ($26,0 \mu\text{s}$) garante prioridade no envio das respostas em relação ao envio de dados. As respostas podem ser do tipo ACK (*Acknowledgement*), caso o quadro tenha sido recebido com sucesso; NACK (*Negative Acknowledgement*), caso um erro no quadro tenha sido detectado; ou FAIL, caso o receptor não possua espaço na fila de recepção para armazená-lo ou, caso seja um segmento, tenha chegado fora de ordem. Quando o transmissor recebe um NACK ele entra na

disputa pelo acesso ao meio assim que detectá-lo ocioso novamente. No caso do NACK, o RFCS (*Receive FCS*) não é utilizado porque não se sabe onde ocorreu o erro no quadro transmitindo. Logo, a identificação do quadro através do RFCS poderia estar comprometida. Uma estação que espera um ACK faz uma retransmissão caso receba um NACK ou não receba um ACK. Por outro lado, se um FAIL é recebido o transmissor aguarda 10 ms para que, caso a fila de recepção esteja cheia, haja tempo suficiente para esvaziá-la. No caso do FAIL, o RFCS é utilizado para identificação, pois não houve erros no quadro transmitido. Portanto, ao receber um FAIL, o transmissor verifica se aquele FAIL é referente a sua própria transmissão. Somente quadros de alta prioridade podem ser enviados pela estação transmissora à estação que respondeu com um quadro FAIL antes dos 10 ms. A Figura 2.9 ilustra a lógica de recepção do HomePlug. Após receber um quadro a estação verifica se há lugar para armazená-lo (Figura 2.9(a)) se não houver ela envia um FAIL. Caso haja em espaço na fila de recepção, a estação verifica se o quadro foi recebido corretamente. Se o quadro não estiver correto ela envia um NACK (Figura 2.9(b)), caso contrário envia um ACK (Figura 2.9(c)).

Quando uma estação recebe um quadro e não consegue identificar o seu comprimento ela espera por EIFS (*Extended InterFrame Space*) para tentar acessar o meio novamente. Isso pode ocorrer quando a relação sinal-ruído é baixa ou quando ocorre uma colisão. A não detecção do comprimento do quadro impede o estabelecimento do seu vetor de alocação e, portanto, a detecção virtual de portadora (VCS) não pode ser realizada. Como a detecção física (PCS) somente não é confiável, conforme dito anteriormente, a estação aguarda um intervalo suficiente para que a maior transmissão possível termine (Equação 2.3). O EIFS é um intervalo de tempo equivalente ao da transmissão dos três tipos de delimitadores ($t_{delimitadores}$), mais período de resolução de prioridade (t_{prio}), mais CIFS, RIFS, EFG e o tempo de transmissão do maior quadro de dados possível (t_{qmax}). Essa medida conservadora evita que haja colisões entre transmissões de dados e respostas. Os valores de todos os intervalos entre quadros utilizados pelo HomePlug 1.0 estão resumidos na Tabela 2.4.

$$EIFS = t_{delimitadores} + t_{prio} + CIFS + RIFS + EFG + t_{qmax} \mu s. \quad (2.3)$$

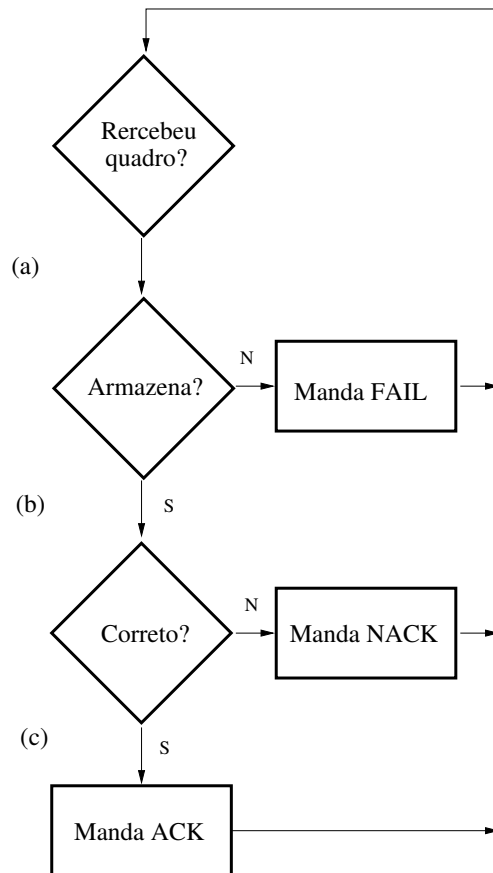


Figura 2.9: Lógica de recepção do HomePlug.

O HomePlug 1.0 prevê segmentação e remontagem dependendo do tamanho do quadro, que não pode passar de 160 símbolos OFDM de dados, e da taxa de transmissão. Segmentos recebidos em ordem correta geram um ACK. Se o segmento mais recente for recebido duplicado ele se sobreescreve em *buffer* e gera um ACK. Segmentos anteriores ou fora de ordem geram um FAIL. Quando uma transmissão é realizada em rajadas, ela ocorre logo após o período de resolução de prioridade, ou seja, não é usado o *backoff*. Os PRSs (*Priority Resolution Signals*) são utilizados apenas por estações com fluxos prioritários. A preempção pode ser realizada caso um fluxo de maior prioridade queira acessar o meio.

Tabela 2.4: Duração dos intervalos entre quadros.

Intervalo	Duração (μs)
CIFS	35,84
RIFS	26
EIFS	1695

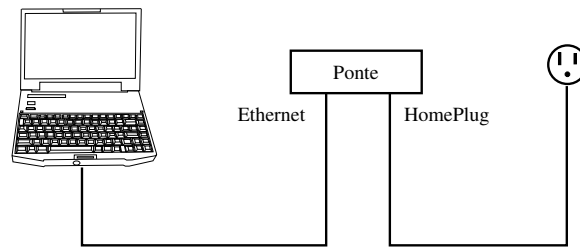
2.4 Segurança

Uma das características das redes através da fiação elétrica é o compartilhamento do meio entre todas as residências servidas pelo transformador. Isso torna possível escutar transmissões alheias. Além disso, a escuta poderia ser inclusive realizada através de irradiação. Ao invés de usar filtros passa-baixa que aumentam o custo, o HomePlug utiliza o padrão de criptografia DES (*Data Encryption Standard*), de 56 bits, para prover privacidade.

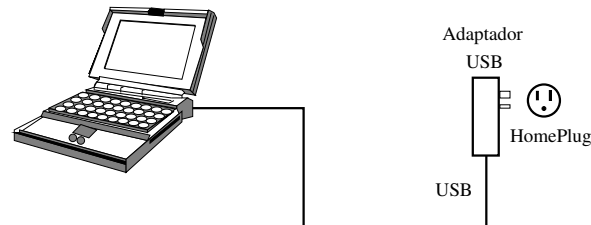
2.5 Produtos

Até o momento, há disponíveis no mercado diversos produtos que implementam a comunicação utilizando a fiação elétrica residencial. Equipamentos de redes que empregam o HomePlug são bastante difundidos. Os equipamentos comercializados mais comuns são pontes entre redes Ethernet e HomePlug. A interface que implementa o HomePlug 1.0 está na ponte, as estações possuem interfaces Ethernet para se comunicar com a ponte conforme visto na Figura 2.10(a). Adaptadores USB (*Universal Serial Bus*) também estão disponíveis e são ligados às estações através de uma porta USB. O adaptador USB é colocado diretamente na tomada elétrica conforme a Figura 2.10(b).

Dentre as empresas que oferecem produtos HomePlug, a Intellon [39] se destaca por ter sido a criadora do padrão HomePlug 1.0. Esse padrão foi escolhido pela *HomePlug Powerline Alliance* dentre as diversas propostas submetidas. A *HomePlug Powerline Alliance* é formada por um conjunto de empresas interessadas na padronização das comunicações através da fiação elétrica. A Linksys [40], empresa da Cisco [41], oferece



(a) Exemplo de uma ponte.



(b) Exemplo de um adaptador USB.

Figura 2.10: Equipamentos HomePlug.

pontes e equipamentos USB para redes HomePlug em sua versão 1.0. Outra empresa que oferece produtos é a GigaFast [42]. Essa empresa anuncia inclusive que as pontes HomePlug/Ethernet são os equipamentos mais vendidos atualmente. No mercado nacional, as empresas que se destacam são a Naxos [43], a Innovus [44] e a Kelow [45].

Recentemente, foi anunciada pela *HomePlug Powerline Alliance* uma nova versão conhecida como HomePlug AV [46] que está em fase final de especificações. Essa nova versão será capaz de alcançar taxas de transmissão mais elevadas que a versão 1.0 atingindo até 200 Mbps. O padrão escolhido para o HomePlug AV foi o desenvolvido pela *France Telecom*.

Neste capítulo, as características da transmissão pela fiação elétrica, dentro do ambiente domiciliar, foram analisadas e o padrão HomePlug em sua versão 1.0 apresentado.

O HomePlug define as especificações de camada física e o protocolo de subcamada de controle de acesso ao meio (MAC). Além disso, esse padrão utiliza o método de acesso múltiplo com prevenção de colisões (CSMA/CA). Foram mostrados os mecanismos utilizados pelo padrão para superar as adversidades do canal tanto ao nível de camada física quanto de camada de enlace. Em seguida, foram destacadas a importância de cada um dos mecanismos e quais as suas funções dentro do escopo de transmissão. Este capítulo mostrou ainda como o HomePlug 1.0 contorna as limitações do canal para atingir altas taxas de transmissão.

Capítulo 3

Análise do HomePlug 1.0

NESTE capítulo são estudadas as características particulares do padrão HomePlug 1.0. A vazão máxima é analisada através de uma expressão derivada matematicamente e avalia-se a influência da sobrecarga do cabeçalho e dos outros campos do protocolo na vazão efetiva alcançada. Assim, a eficiência do padrão é verificada comparando a vazão efetiva, obtida através de simulações, com a taxa máxima de transmissão de 14 Mbps definida no padrão. É também verificada a eficácia do contador de adiamentos (*Deferral Counter* - DC), que é o mecanismo introduzido pelo padrão para reduzir colisões, em termos de vazão, atraso e probabilidade de colisões.

3.1 Análise da vazão máxima do HomePlug 1.0

A taxa máxima de 14 Mbps definida no padrão HomePlug é obtida considerando-se o uso de parâmetros de códigos corretores de erro que oferecem a menor redundância e a transmissão através do maior número possível de subportadoras. Assim, a taxa de símbolos por segundo é igual a $\frac{1}{8,4\mu s}$ ou 10^7 símbolos/s, utilizando 84 subportadoras. Considerando 2 bits por símbolo na modulação DQPSK (*Differential Quadrature Phase Shift Keying*), chega-se a uma taxa máxima de 20 Mbps. No entanto, parte dessa taxa é consumida pelos códigos corretores de erro usados para oferecer maior robustez às comunicações. Assim, considerando a menor redundância prevista para os códigos corretores

de erro do padrão HomePlug que correspondem a $\frac{3}{4}$ do código convolucional e $\frac{238}{254}$ do código *Reed-Solomon*, a taxa máxima de transmissão de 20 Mbps cai para os 14 Mbps definidos no padrão. Esse valor não representa a taxa efetiva de transmissão de dados, pois devem ainda ser consideradas as sobrecargas de cabeçalhos, espaçamentos entre quadros e tempos de *backoff*, a transmissão do reconhecimento etc. A vazão máxima é obtida quando se considera a transmissão de um quadro logo em seguida de outro, assumindo que não ocorre colisão e que a transmissão é recebida sem erros. A Figura 3.1 mostra todos os tempos relacionados à transmissão de um quadro de acordo com o padrão HomePlug. Para tanto, deve-se considerar a seguinte expressão para a vazão máxima (T):

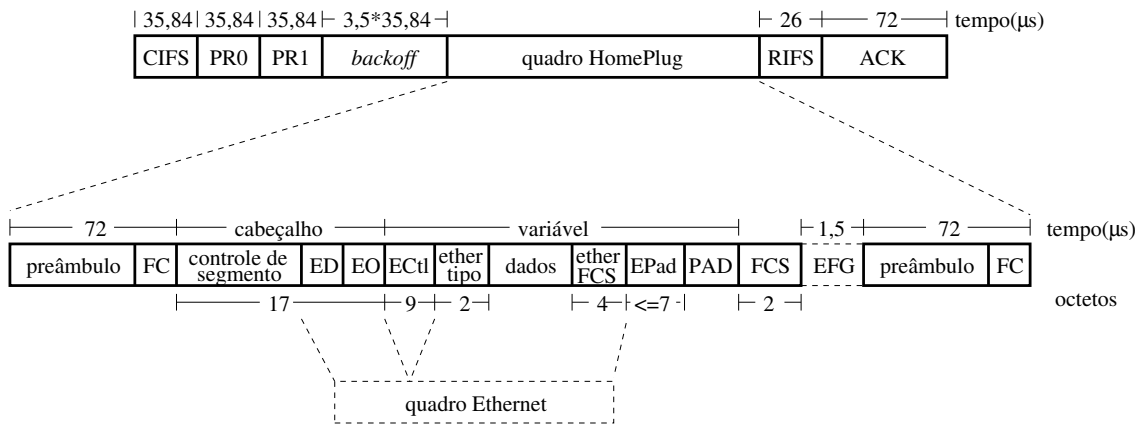


Figura 3.1: Tempos associados à transmissão de um quadro HomePlug.

$$T = \frac{d}{s_c + t_d} Mbps, \tag{3.1}$$

onde d é o tamanho da parte de dados em bits, s_c a sobrecarga em microssegundos e t_d o tempo de transmissão do quadro HomePlug em microssegundos. Um quadro HomePlug é formado pelo cabeçalho, pelo campo variável, pelo FCS, pelos delimitadores de início e final de quadro e mais o EFG conforme a Figura 3.1. A sobrecarga (s_c) de transmissão pode ser obtida baseada nos tempos relacionados à transmissão de um quadro de acordo com o padrão HomePlug. Esses tempos podem ser vistos na Figura 3.1.

$$s_c = 3 \times 35,84 + 3,5 \times 35,84 + 3 \times 72 + 26 + 1,5$$

$$s_c = 476,46 \mu s. \tag{3.2}$$

Os delimitadores e sinais de determinação de prioridade devem ser recebidos corretamente por todas as estações, por isso eles são enviados utilizando todas as subportadoras, com a mesma modulação e mesma codificação, independente de quem está enviando ou recebendo os dados. O segundo termo da Equação 3.2 representa o tempo médio de *backoff* considerando o tamanho de janela inicial. Dado que $t_{intervalo}$ é um intervalo de tempo durante um período de disputa e CW_{min} é o tamanho inicial da janela de contenção tem-se que,

$$\bar{t}_{backoff} = \frac{CW_{min}}{2} \times t_{intervalo} = \frac{7}{2} \times 35,84 \mu s. \quad (3.3)$$

O cabeçalho, o FCS (*Frame Check Sequence*) de dados, o campo de controle de encriptação (ECtl) e o enchimento de encriptação (Epad) são todos incluídos no cálculo do tempo de transmissão de dados, pois todos são enviados na mesma taxa dos dados. O cabeçalho HomePlug é composto por um controle de segmento mais os endereços Ethernet de destino e origem (ED e EO). O Epad é necessário porque o HomePlug aplica um algoritmo de criptografia que usa blocos de 8 octetos. Assim, além dos dados há ainda 34 octetos de sobrecarga mais o Epad que são adicionados aos dados no cálculo do número de símbolos (n_s) a serem transmitidos. O tempo de transmissão dos dados (t_d) está diretamente relacionado ao número de símbolos (n_s) (Equação 3.4).

$$t_d = n_s \times 8,4 \mu s. \quad (3.4)$$

O valor n_s depende do número de bits por símbolo (m) da modulação utilizada, do número de subportadoras (n_c), da taxa dos códigos corretores de erro (c) e do número de símbolos por bloco (n_b), como pode ser visto na Equação 3.5. Os dados são transmitidos em blocos de 20 ou 40 símbolos, dependendo da taxa de transmissão. Assim, o enchimento de bloco (PAD) preenche o bloco físico de transmissão com zeros somente no último segmento de um quadro caso o número de símbolos transmitidos não seja múltiplo do tamanho do bloco utilizado. Isso justifica a aproximação feita na Equação 3.5, pois o número de blocos deve ser arredondado para o inteiro seguinte superior.

$$n_s = \left\lceil \frac{1}{n_b} \times \frac{d + (34 + EPad) \times 8}{m \times n_c \times c} \right\rceil \times n_b \text{ símbolos.} \quad (3.5)$$

O EPad pode ser calculado conforme a Equação 3.6:

$$EPad = \left\lceil \frac{d}{8} \right\rceil \times 8 - d \text{ bits.} \quad (3.6)$$

Substituindo-se as Equações 3.2, 3.4 e 3.5, na Equação 3.1 pode-se obter a expressão geral para a vazão máxima em redes HomePlug 1.0 (Equação 3.7).

$$T = \frac{d}{s_c + \left\lceil \frac{1}{n_b} \times \frac{d + (34 + EPad) \times 8}{m \times n_c \times c} \right\rceil \times n_b \times 8,4} \text{ Mbps.} \quad (3.7)$$

Dessa forma, para a taxa máxima de transmissão, $m = 2$ bits/símbolo, $n_c = 84$ subportadoras, $c = \frac{3}{4} \times \frac{238}{254}$ e $n_b = 20$ símbolos por bloco [47]. Assim, a Equação 3.7 pode ser reescrita na seguinte forma:

$$T = \frac{d}{476,46 + \left\lceil \frac{1}{20} \times \frac{d + (34 + EPad) \times 8}{118,06} \right\rceil \times 20 \times 8,4} \text{ Mbps.} \quad (3.8)$$

A linha cheia na Figura 3.3 mostra a vazão máxima de uma rede HomePlug utilizando taxa de transmissão constante de 14 Mbps. A curva foi obtida através da variação do tamanho do quadro na Equação 3.8. Pode-se observar que a vazão máxima varia de 2 Mbps para pacotes de 160 octetos a 8 Mbps para pacotes de 1500 octetos. Estes valores correspondem a uma variação de 14,3% a 57,1% de eficiência com relação à taxa nominal de 14 Mbps.

3.2 Simulações

O simulador utilizado foi o ns-2 (*Network Simulator*) em sua versão 2.26 [48]. Os resultados de simulação foram obtidos utilizando módulos de simulação desenvolvidos por este trabalho para a camada de acesso ao meio (MAC) e para a camada física. Os módulos implementados foram desenvolvidos em C++ e em oTcl por serem as linguagens

do simulador de redes ns-2. O módulo MAC foi baseado no padrão HomePlug versão 1.0. Tanto o módulo HomePlug quanto o módulo físico foram incorporados à estrutura do ns que não os possuía.

3.2.1 Modelo físico

O módulo de camada física implementado utiliza o modelo de ecos descrito em [17] para o cálculo da atenuação, que em última caso define o alcance máximo das transmissões. O modelo de ecos consiste no somatório de todos os sinais que chegam ao receptor, defasados e com amplitudes diferentes. Devido à série de ramificações que a rede elétrica pode possuir e às reflexões ocasionadas por descasamentos de impedâncias, o sinal transmitido é recebido por múltiplos caminhos. Dependendo do caminho percorrido dentro da rede, das distâncias e do número de reflexões a que cada componente do sinal resultante está sujeito, a atenuação pode ser maior diminuindo a influência dessa componente no receptor.

A função de transferência obtida com o modelo de ecos (Equação 3.9) varia com a frequência e possui parâmetros que caracterizam os fios elétricos e a topologia da rede. Na Equação 3.9, a parcela $g_i \times e^{-\alpha(f)l_i}$ está relacionada com a atenuação e a parcela $e^{-j2\pi f\tau_i}$ com a defasagem. Essa expressão refere-se a frequências que variam entre 500 kHz e 20 MHz. A função de transferência também pode variar com o tempo, conforme equipamentos são ligados e desligados. É importante observar que o modelo de ecos implementado não modela ruídos. Nas simulações foi utilizado um canal constante no tempo e com poucas ramificações.

$$H(f) = \sum_{i=1}^N g_i \times e^{-\alpha(f)l_i} \times e^{-j2\pi f\tau_i}. \quad (3.9)$$

Na Equação 3.9, $\alpha(f) = (a_0 + a_1 \times f^k)$, onde a_0 e a_1 são parâmetros físicos relacionados com o tipo dos fios elétricos. O tempo que a componente leva para atingir o receptor é indicado por τ_i que é igual a $\frac{l_i}{v_p}$, onde l_i é a distância percorrida pelo sinal e v_p é a sua velocidade de fase do sinal que foi assumido para fins de simplificação como sendo aproximadamente igual a metade da velocidade da luz no vácuo. O número de sinais

que atinge o receptor é representado pela letra N . Os parâmetros da Tabela 3.1 devem ser obtidos após a verificação da resposta do canal a modelar.

Tabela 3.1: Parâmetros da função de transferência.

Parâmetro	Descrição
N	Número de sinais que atinge o receptor
i	Número de caminhos do sinal ($1 \leq i \leq N$)
a_0, a_1	Parâmetros relacionados com a atenuação
k	Expoente do fator de atenuação ($0,5 \leq k \leq 1$)
g_i	Peso do caminho i , está diretamente ligado aos coeficientes de transmissão e reflexão
l_i	Comprimento do caminho i
τ_i	Atraso do caminho i
$\alpha(f)$	Fator de atenuação

Nas simulações, são utilizados os parâmetros do trabalho de Langfeld [15] que são vistos na Tabela 3.2. Esses parâmetros aplicados à Equação 3.9 resultam na curva de função de transferência vista na Figura 3.2. Trata-se de uma topologia com 4 ramificações ou $N = 4$. É importante observar que mais ramificações são possíveis, porém os sinais que atingirão o receptor e que irão influenciar são provenientes das 4 ramificações mais próximas no caso analisado. As outras ramificações ou sinais provenientes dos outros caminhos já foram fortemente atenuados e não influenciarão no receptor.

Tabela 3.2: Parâmetros utilizados.

Parâmetros de atenuação		
$k = 1$	$a_0 = 0$	$a_1 = 7,8 \times 10^{-10} \text{ s/m}$
Parâmetros do caminho		
i	g_i	$l_i(m)$
1	0,64	200
2	0,38	222,4
3	-0,15	244,8
4	0,05	267,5

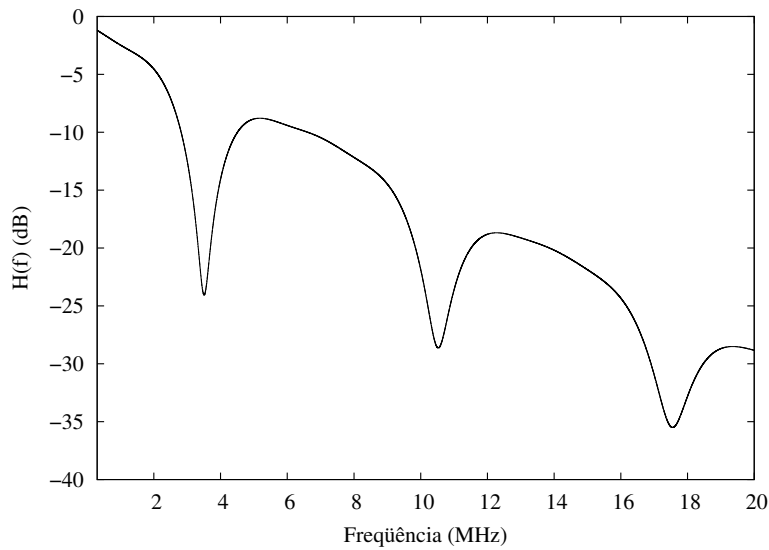


Figura 3.2: Curva de resposta em frequência do canal.

Para modelar o canal, é introduzida uma taxa de erro por bit. Assim, o receptor descarta o quadro e transmite um reconhecimento negativo (NACK) ao detectar o erro. O transmissor ao receber o NACK retransmite o quadro.

Nas simulações, são empregados os mesmos parâmetros utilizados no cálculo da expressão da vazão máxima: número de subportadoras (84), códigos corretores de erro ($\frac{234}{258}$ e $\frac{3}{4}$), número de símbolos por bloco (20) e modulação (DQPSK).

Na subcamada de acesso ao meio, uma característica original do HomePlug é destacada. O contador de adiamentos (*Deferral Counter* - DC) é um mecanismo de prevenção de colisões que foi introduzido pelo padrão HomePlug.

São realizados três conjuntos de simulações. O primeiro visa confirmar os resultados obtidos pelo módulo HomePlug baseado na expressão da vazão máxima obtida matematicamente (Seção 3.1). O segundo e o terceiro conjuntos avaliam a eficiência do contador de adiamentos. Em todas as simulações há no máximo 16 nós transmissores, pois para um número maior o modo a utilizar é o ROBO que possui vazão máxima de 0,9 Mbps.

3.2.2 Análise da vazão máxima teórica e simulada do HomePlug

No primeiro conjunto de simulações, o módulo é testado a partir da vazão máxima alcançada por uma transmissão ideal onde a probabilidade de erro no canal vale zero. O cenário é de um nó transmissor e um receptor a 5 metros de distância.

A transmissão é feita a 14 Mbps variando o tamanho da carga útil dos quadros de dados. A carga útil é variada de 160 até 2000 octetos e não há segmentação. A fonte transmite a uma taxa de dados constante (*Constant Bit Rate - CBR*). Transmitindo a 14 Mbps sempre há um quadro pronto para ser enviado. Na Figura 3.3, a curva cheia representa os valores teóricos e os pontos os valores obtidos pelo módulo de simulação. Verifica-se que os pontos coincidem com a curva teórica confirmando assim o módulo desenvolvido.

O gráfico da vazão máxima teórica possui um formato dente-de-serra devido aos enchimentos feitos para que o número de símbolos por bloco seja sempre um múltiplo de 20. As quedas periódicas que ocorrem na vazão acontecem quando é necessário mais um bloco de símbolos para a transmissão. Portanto, a vazão máxima diminui devido aos enchimentos.

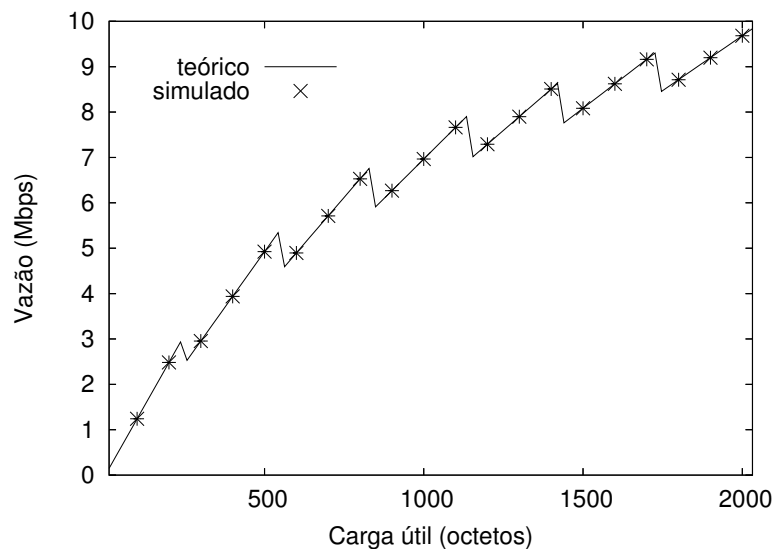


Figura 3.3: Vazão máxima para uma rede HomePlug.

3.2.3 Análise do contador de adiamentos com tráfego CBR

O segundo conjunto de simulações analisa a eficácia do contador de adiamentos utilizando tráfego CBR. É comparado o desempenho do HomePlug com e sem o uso do contador de adiamentos, ao se transmitir a diferentes taxas, com número de nós e tamanho de carga útil variáveis. A comunicação é feita de duas a duas, onde cada nó estava a 5 metros do outro numa linha reta. Todos os nós podem se comunicar diretamente e o atraso de propagação é desprezível. Os gráficos possuem barras de erro correspondentes a um intervalo de confiança de 95%.

A eficácia de um código corretor de erro é função da redundância inserida nos dados e da relação sinal-ruído do canal. O aumento da redundância implica numa maior robustez do código porém numa maior sobrecarga de protocolo. Neste trabalho foi assumida uma taxa de erro binária de 10^{-5} na saída dos decodificadores [50].

Na Figura 3.4, utilizou-se 1, 2 e 16 nós variando-se a carga oferecida a rede. A vazão obtida ao utilizar o contador de adiamentos (*Deferral Counter* - DC) é sempre maior, para o mesmo número de nós transmissores, se comparada ao caso sem DC. Portanto, verifica-se a efetividade do mecanismo contador de adiamentos para fluxos CBR. Ao diminuir o número de colisões, o mecanismo permite que, para o mesmo número de nós, a vazão agregada da rede seja mais alta quando o DC é usado. Essa vantagem ocorre quando a carga oferecida a rede atinge a saturação. O valor onde se atinge a saturação é menor para um maior número de nós dado que a disputa é maior.

Além disso, avalia-se a partir de que carga oferecida ocorre a saturação em cada caso. No caso de apenas um nó transmissor, os gráficos com e sem DC são coincidentes, pois não há disputa pelo meio e não há colisões. É importante notar que a utilização do DC faz diferença antes de ser atingida a saturação. Na Figura 3.4, no caso de 2 nós transmissores, entre 6 e 7 Mbps, a vazão com DC já é superior ao HomePlug sem DC. O mesmo acontece para 16 nós transmissores, entre 4 e 5 Mbps.

Na Figura 3.5, é verificada a influência do tamanho da carga útil sobre a vazão obtida para uma carga oferecida constante de 14 Mbps. Pode ser visto que para quadros menores a vazão é menor, devido à maior influência dos cabeçalhos, que representam um custo fixo

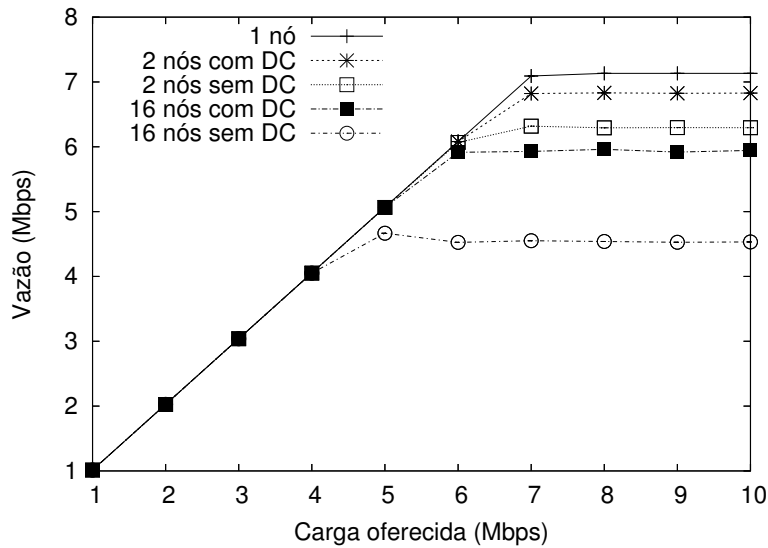


Figura 3.4: Vazão dos fluxos CBR variando o número de nós.

de transmissão e portanto diminuem a carga útil transmitida. Com o aumento do número de nós, aumenta o número de colisões e a vazão cai.

É constatado que a vazão é sempre maior quando se usa o DC, independente do tamanho dos quadros. Além disso, quanto maior o número de nós mais eficiente é o DC, porque maior é a probabilidade de haver colisões. Isso demonstra que o DC é mais eficiente quando a rede tende à saturação.

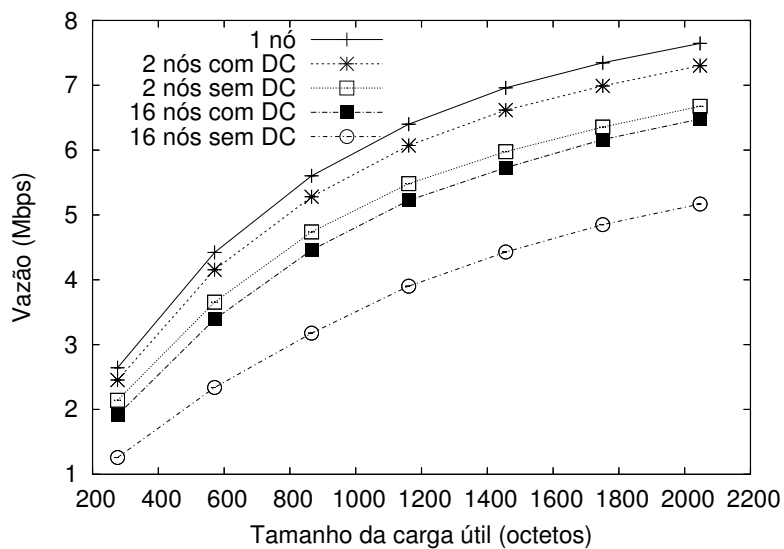


Figura 3.5: Vazão dos fluxos CBR variando a carga útil.

Em seguida, é analisada a quantidade de colisões na rede, para melhor caracterizar

o efeito do DC. Na Figura 3.6, o eixo X representa o número de nós transmissores e o eixo Y, a porcentagem de colisões ocorridas sobre o número de tentativas de transmissão, bem sucedidas ou não. É analisado o comportamento do DC com o aumento do número de nós a diferentes taxas com carga útil igual a 1500 octetos. Foram escolhidas três taxas de transmissão para variar a carga total oferecida: na carga baixa os nós transmitem a 1 Mbps, na carga média os nós transmitem a 6 Mbps e na carga alta os nós transmitem a 14 Mbps. É observado que o número de colisões aumenta com a carga da rede.

As curvas das cargas média e alta possuem um alto número de colisões. Para carga baixa, a porcentagem de colisões se mantém pequena e por isso o DC não é eficaz. Isso é observado na Figura 3.6, pois as curvas com DC e sem DC para 1 Mbps são coincidentes. Utilizando carga média (6 Mbps) mostra-se que antes da saturação o uso do DC é justificável, pois a porcentagem de colisões é mais alta quando não se usa o DC. Ainda nessa figura, na curva de 6 Mbps com DC, a partir de 12 nós a porcentagem de colisões aumenta bruscamente porque para esse número de nós uma carga oferecida de 6 Mbps está próxima da saturação. Para menos nós, apesar de haver colisões, a saturação ainda não foi alcançada e o aumento da porcentagem de colisões ainda não é tão acentuado. A porcentagem de colisões da curva de 6 Mbps com DC atinge a curva de 14 Mbps com DC quando há saturação. Para 16 nós transmissores, a saturação ocorre para uma carga oferecida um pouco menor que 6 Mbps, conforme visto na Figura 3.4.

A porcentagem de colisões tende a aumentar com o número de nós transmissores devido ao aumento da disputa pelo meio. A Figura 3.6 mostra que com apenas 2 nós transmissores o emprego do DC diminui as colisões em aproximadamente 4% ao se transmitir a 14 Mbps. Com 16 nós transmissores a diferença é ainda maior, de aproximadamente 11% transmitindo a 14 Mbps, justificando o emprego do DC também para cargas altas. A curva de 6 Mbps sem DC encontra a de 14 Mbps sem DC quando atinge a saturação.

Na Figura 3.7 são utilizados dois tamanhos de carga útil, de 250 octetos e 1500 octetos, e mantida a carga oferecida em 6 Mbps. Quando o DC é utilizado, verifica-se uma maior porcentagem de colisões para quadros menores. Isso acontece porque a vazão máxima é menor para quadros pequenos, portanto a saturação é atingida com cargas mais baixas (Figura 3.3). As curvas para quadros de 1500 e 250 octetos se encontram sempre quando

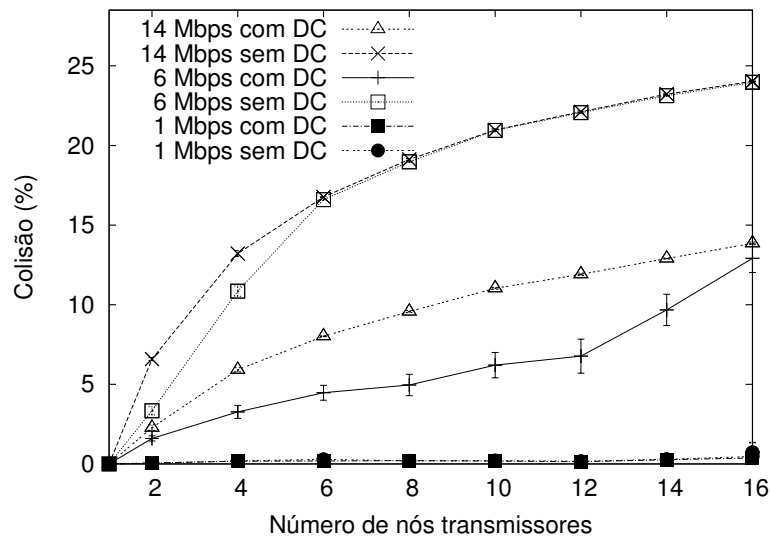


Figura 3.6: Porcentagem de colisões dos fluxos CBR com carga oferecida variável.

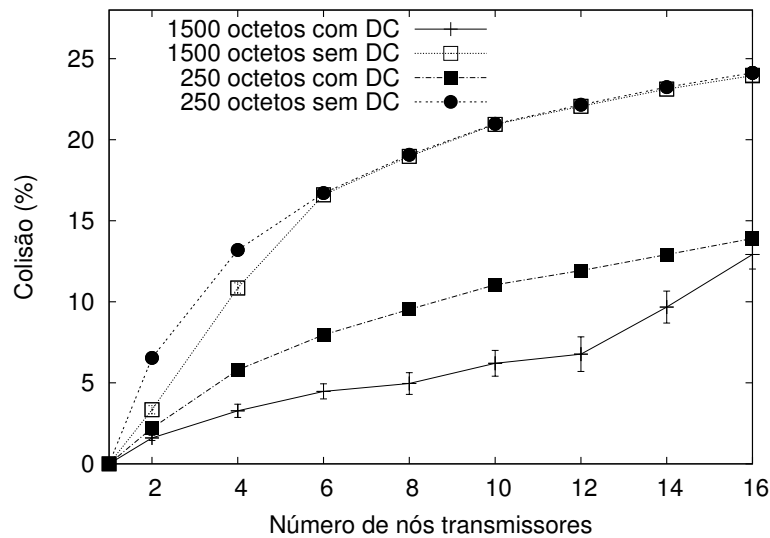


Figura 3.7: Porcentagem de colisões dos fluxos CBR com cargas úteis diferentes.

é atingida a saturação. Isso pode ser visto quando o DC é usado e quando não. Logo, na saturação, a porcentagem de colisões é a mesma independente do tamanho dos quadros. Observa-se que a saturação é atingida mais rapidamente para um número de nós menor quando o DC não é usado.

Para quadros pequenos, o número de colisões é maior pois há um maior número de acessos ao meio. Entretanto, na saturação, a probabilidade de colisões é constante pois a proporção entre o número de colisões e acessos ao meio é mantida, independente do

tamanho do quadro. Na saturação, a probabilidade de colisões está apenas relacionada com o número de nós transmissores e não com o tamanho do quadro. Aumentando-se o número de nós transmissores há um aumento da disputa pelo meio.

Comparando as Figuras 3.6 e 3.7, verifica-se novamente que o comportamento das curvas na saturação é idêntico. Isso pode ser visto nas curvas para 14 Mbps sem DC (Figura 3.6) que transmite quadros de 1500 octetos e na curva para 250 octetos sem DC (Figura 3.7) apesar de transmitir a 6 Mbps. O mesmo pode ser notado nas curvas de 14 Mbps com DC (Figura 3.6) e 250 octetos com DC (Figura 3.7). Mais uma vez percebe-se que, uma vez atingida a saturação, o tamanho dos quadros e a carga oferecida não influenciam na porcentagem de colisões.

3.2.4 Análise do contador de adiamentos com tráfego misto

O terceiro conjunto de simulações analisa o impacto do uso do DC sobre a transmissão de tráfego de voz do tipo PCM (*Pulse Code Modulation*) combinado com fontes de tráfego CBR. Para simular a voz são utilizadas fontes com fluxos do tipo *on-off*, com período ocioso de 1,8s e de atividade igual a 1,2s. São usados pacotes de 160 octetos, transmitidos a 64 kbps. Esses mesmos valores foram previamente empregados em [51] para a análise de transmissão de voz. O número de fontes de voz é variado ao longo da simulação. Junto com as fontes de voz, são utilizadas duas fontes CBR de 3 Mbps transmitindo quadros de 1500 octetos. Os fluxos CBR foram utilizados para forçar a saturação da rede. Todos os fluxos possuem a mesma prioridade. Nesse conjunto de simulações, a topologia utilizada e o intervalo de confiança são os mesmos da subseção anterior.

Neste conjunto de simulações a vazão tende a diminuir com a inclusão de novos nós. Diferentemente do tipo de simulação anterior com fluxos CBR, onde a carga se mantinha constante independente do número de nós, agora a carga oferecida aumenta com o número de nós que disputam o meio.

A Figura 3.8 mostra a vazão agregada da rede que é a soma da vazão de todos os nós comunicantes. O eixo X representa o número de fontes de voz e o eixo Y a vazão agregada. Pode-se verificar que o uso do DC é eficiente para um número grande de fluxos de

voz onde a probabilidade da ocorrência de colisões é maior. Já para um número pequeno de fluxos de voz o uso de DC, por ser um método que previne contra colisões, não é eficiente pois as colisões ainda não ocorrem com a frequência necessária para justificar o seu emprego.

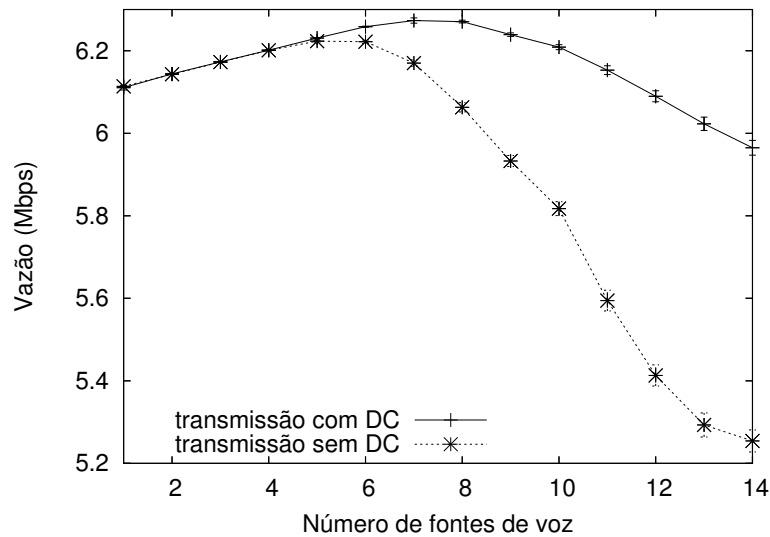


Figura 3.8: Vazão de tráfego CBR e voz.

Para o caso com DC, a vazão começa a diminuir com 8 fontes de voz e para o caso sem DC essa queda começa com 6 fontes. Para o caso sem DC a queda é mais acentuada devido ao maior número de colisões.

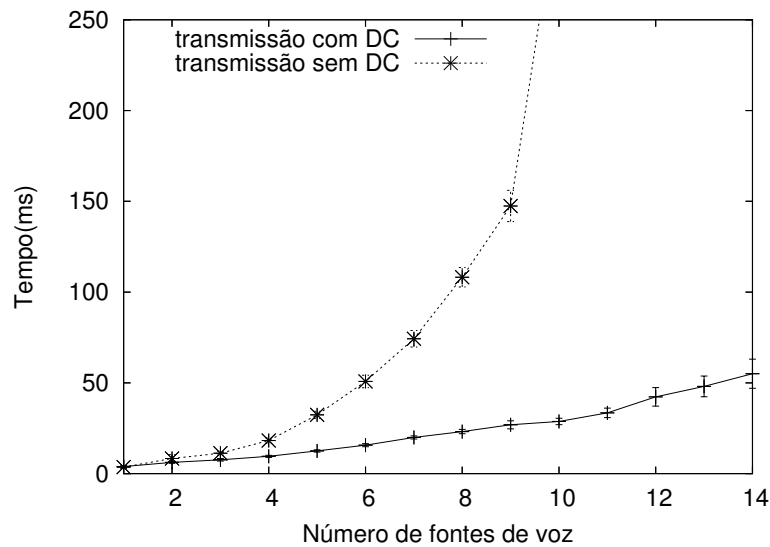


Figura 3.9: Atraso do tráfego de voz.

A Figura 3.9 representa o atraso médio sofrido pelos quadros de voz variando-se o número de nós. O atraso é maior sem o DC. O atraso foi calculado desde o recebimento do quadro pela subcamada de acesso ao meio do transmissor até a chegada ao receptor. Esse gráfico mostra que o atraso médio para acessar o meio com o uso do DC é menor que o atraso médio ocasionado pelas sucessivas retransmissões ocorridas ao não utilizá-lo, devido a colisões. Nesse gráfico pode-se concluir que, sem DC, a partir da nona fonte de voz o atraso médio supera o limite máximo tolerável de 250 ms [51], utilizado como parâmetro para a aplicação de voz se manter interativa.

Pode ainda ser observado na Figura 3.9 que, para 4 nós transmissores, a diferença de atraso médio já é significativa entre os casos com e sem DC, um pouco antes de atingir a saturação.

Neste capítulo, foi derivada a partir da análise das peculiaridades do HomePlug uma expressão para a sua vazão máxima. O DC, mecanismo introduzido pelo HomePlug 1.0, foi destacado devido à sua importância e sua eficiência comprovada através de simulações. O DC aprimora o método de acesso ao meio reduzindo as colisões. Foram analisados quais os efeitos da sobrecarga do protocolo e verificou-se que a vazão máxima varia de 2 Mbps para pacotes de 160 octetos a 8 Mbps para pacotes de 1500 octetos. Esses valores correspondem a uma variação de 14,3% a 57,1% de eficiência com relação à taxa nominal de 14 Mbps. Durante a análise do emprego do DC observou-se que esse não somente faz diferença para altas cargas quanto para médias. Essa conclusão foi alcançada através de simulações empregando cargas baixas, médias e altas relativas à capacidade nominal do padrão. Foram verificados ganhos em termos de vazão e atraso.

Os ganhos de vazão obtidos com o DC motivaram seu emprego nas redes IEEE 802.11, devido à semelhança entre os métodos de acesso ao meio (Capítulo 4) de ambos os padrões. Posteriormente, uma proposta para aprimorar o HomePlug 1.0 baseado no DC será vista no Capítulo 5.

Capítulo 4

Aplicação do Contador de Adiamentos ao IEEE 802.11

ATUALMENTE, o IEEE 802.11 [5] é o padrão mais difundido de redes locais sem fio. O IEEE 802.11 define as especificações da camada física e da subcamada de controle de acesso ao meio (MAC). Esse padrão também é conhecido como Wi-Fi (*Wireless-Fidelity*).

Em virtude da importância das redes sem fio em termos de sucesso comercial, fato devido principalmente às suas características de não requerer uma custosa infra-estrutura física e permitir mobilidade dos usuários, a proposta de novos mecanismos capazes de melhorar seu desempenho são fundamentais. Com esse intuito, este capítulo analisa o desempenho do padrão IEEE 802.11 com o mecanismo baseado no contador de adiamentos (*Deferral Counter - DC*) do HomePlug 1.0. Diferentes configurações do mecanismo foram analisadas.

4.1 As Redes IEEE 802.11

O padrão IEEE 802.11 prevê dois modos de operação: o infra-estruturado e o ad hoc. No modo infra-estruturado toda a comunicação é realizada através de um ponto centralizador chamado de ponto de acesso (*Access Point - AP*). Assim, mesmo que uma estação

receptora esteja no alcance de rádio da estação transmissora, a comunicação entre elas só é realizada passando pelo AP. Desta forma, a estação transmissora envia a mensagem para o ponto de acesso e o ponto de acesso transmite para a estação receptora. Cada AP possui um conjunto de estações associado a si formando um BSS (*Basic Service Set*). Um BSS é composto pelo ponto de acesso e pelos nós dentro do seu alcance de cobertura. A perda de eficiência do modo infra-estruturado, devido a todas as transmissões passarem pelo ponto de acesso, é compensada pela facilidade de gerenciamento. Nesse modo toda a complexidade da rede pode ser concentrada num só elemento. Caso haja a necessidade de aumentar a rede infra-estruturada além dos limites de alcance de um ponto de acesso, um outro ponto de acesso deve ser utilizado, criando um outro BSS. A comunicação entre nós de diferentes BSSs é realizada através de um sistema de distribuição que interconecta os pontos de acesso. O sistema de distribuição também fornece acesso à rede cabeada, e possivelmente à Internet, para as estações pertencentes aos BSSs interligados por ele (Figura 4.1).

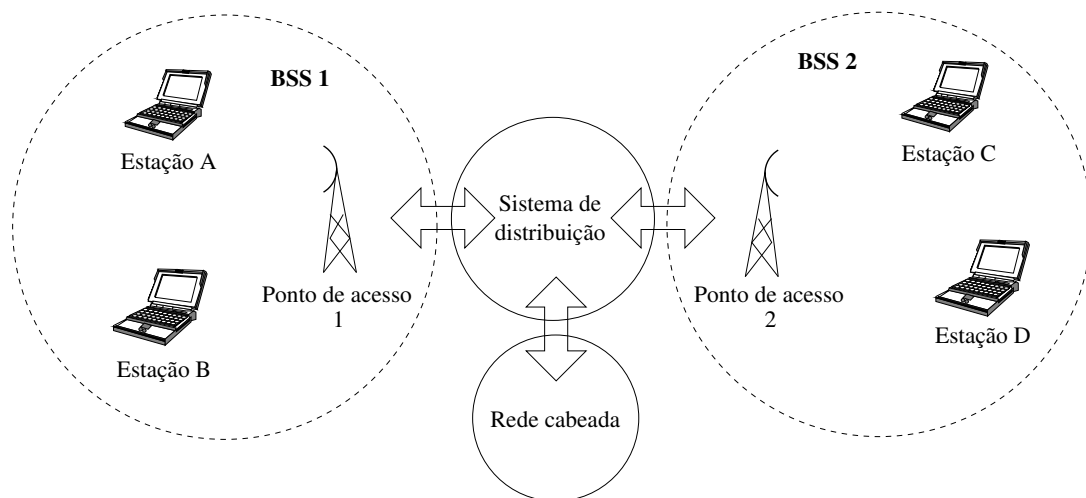


Figura 4.1: Rede infra-estruturada.

No modo ad hoc, todavia, não há pontos de acesso e todos os nós se comunicam diretamente. Caso as estações estejam dentro dos limites de alcance comuns, um IBSS (*Independent Basic Service Set*) é composto e, conseqüentemente, a comunicação é realizada sem intermediários (Figura 4.2). Se nem todas as estações estiverem dentro desse alcance comum, a comunicação é feita salto a salto através de outros nós da rede. No

último caso, cada estação funciona como um roteador em potencial e encaminha os quadros a uma estação que esteja dentro do seu alcance de cobertura na direção do destino (Figura 4.3) conforme definido por um protocolo de roteamento ad hoc, como *Dynamic Source Routing* (DSR) [52] ou o *Ad Hoc On demand Distance Vector* (AODV) [53]. A característica de operação distribuída das redes ad hoc aumenta a complexidade de operação de cada nó. Nas redes ad hoc, todos os nós terão funções como encaminhamento e roteamento de pacotes, autenticação, dentre outras que no modo infra-estruturado são desempenhadas pelo ponto de acesso.

O IEEE 802.11 define dois métodos de acesso ao meio: O PCF e o DCF. O modo PCF (*Point Coordination Function*) só é utilizado pelas redes infra-estruturadas e baseia o seu método de acesso na distribuição de fichas (*tokens*). Somente a estação que possuir a ficha pode acessar o meio. As fichas são distribuídas pelo ponto de acesso às estações requisitantes. Já o modo DCF (*Distributed Coordination Function*) é o método de acesso fundamental e pode ser empregado tanto pelas redes ad hoc quanto pelas infra-estruturadas. Neste trabalho foi utilizado o modo ad hoc, portanto somente o método DCF será detalhado na próxima seção (Seção 4.2).

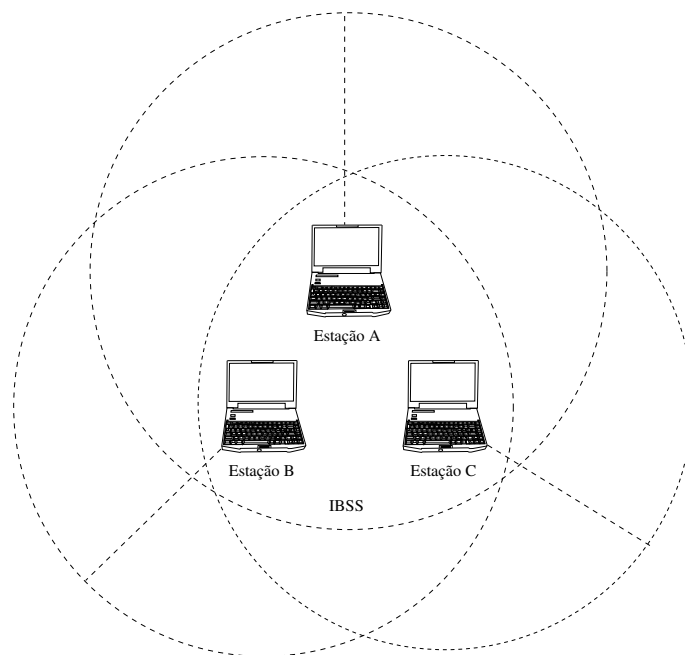


Figura 4.2: Rede ad hoc.

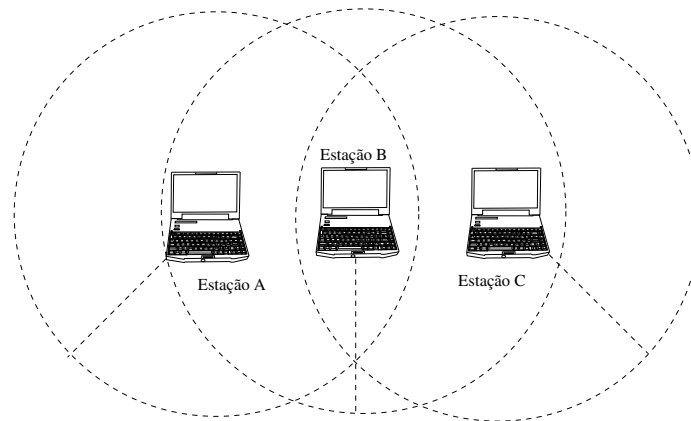


Figura 4.3: A Rede ad hoc em múltiplos saltos.

Conforme mencionado no Capítulo 1, devido às semelhanças entre as características do meio de transmissão elétrico e sem fio, os métodos de acesso empregados tanto pelo HomePlug quanto pelo IEEE 802.11 possuem muitas características em comum. Como consequência, algumas propostas para melhorar o desempenho de um dos padrões podem apresentar bons resultados serem adotadas por ambos.

Originalmente, o IEEE 802.11 operava a 1 ou 2 Mbps devido à limitação da modulação e da técnica de transmissão utilizada. As técnicas de transmissão utilizadas pelo padrão original são: o infravermelho, o espalhamento do espectro por salto de frequência (*Frequency Hopping Spread Spectrum* - FHSS) e o espalhamento de espectro por seqüência direta (*Direct Sequence Spread Spectrum* - DSSS). Visando aumentar a taxa de transmissão, o padrão IEEE 802.11 normalizou três extensões ao padrão inicial. Num primeiro momento, normalizaram-se as extensões IEEE 802.11a [54] e IEEE 802.11b [55], mais recentemente houve a normalização do IEEE 802.11g [56]. Os dois últimos operam na mesma frequência de 2,4 GHz, e conseqüentemente, possuem interoperabilidade. Já o IEEE 802.11a trabalha na frequência de 5 GHz e é incompatível com os outros padrões. As extensões adotaram novos tipos de modulação e extensões às técnicas de transmissão originais que possibilitaram alcançar taxas mais altas de transmissão. As extensões “a” e “g” possuem taxas máximas de 54 Mbps, já o “b” vai até no máximo 11 Mbps. A base instalada, atualmente, é na maior parte formada pelo IEEE 802.11b, porém nos últimos anos, o IEEE 802.11g vem alcançando a extensão “b” por serem compatíveis e por atingir

taxas mais elevadas. O interesse na extensão “a” vem diminuindo, pois além de não poder se comunicar com mais nenhuma outra extensão, não oferece vantagens significativas com relação ao “g”. Neste trabalho será considerado o IEEE 802.11b pois ainda é o mais encontrado em redes comerciais, porém o mecanismo poderia ser aplicado ao “g”.

4.2 O Protocolo de controle de acesso ao meio

No método de acesso conhecido por função de coordenação distribuída (*Distributed Coordination Function - DCF*), uma estação deve sempre aguardar o meio ficar ocioso por DIFS (*DCF InterFrame Space*), que é um intervalo de tempo de $50 \mu s$, para transmitir um quadro de dados. Depois de DIFS, a estação transmite o seu quadro de dados como ilustrado na Figura 4.4. Devido à atenuação do meio, que impede a detecção de colisão, o transmissor espera um reconhecimento positivo (*Acknowledgment - ACK*) do receptor. O receptor transmite um ACK somente se o quadro foi corretamente recebido. O ACK é transmitido após o término da recepção do quadro de dados mais um intervalo entre quadros chamado de SIFS (*Short InterFrame Space*), que dura $10 \mu s$. Como o SIFS é menor que o DIFS, a transmissão do ACK é garantida antes de qualquer outra transmissão de dados. O ACK é sempre transmitido na taxa básica (1 Mbps) para garantir que todas as estações tenham condições de escutá-lo. Para evitar colisões, após o quadro inicial de um fluxo de dados, todo o quadro de dados enviado espera DIFS ou EIFS (*Extended InterFrame Space*) mais um intervalo de tempo aleatório (*backoff*).

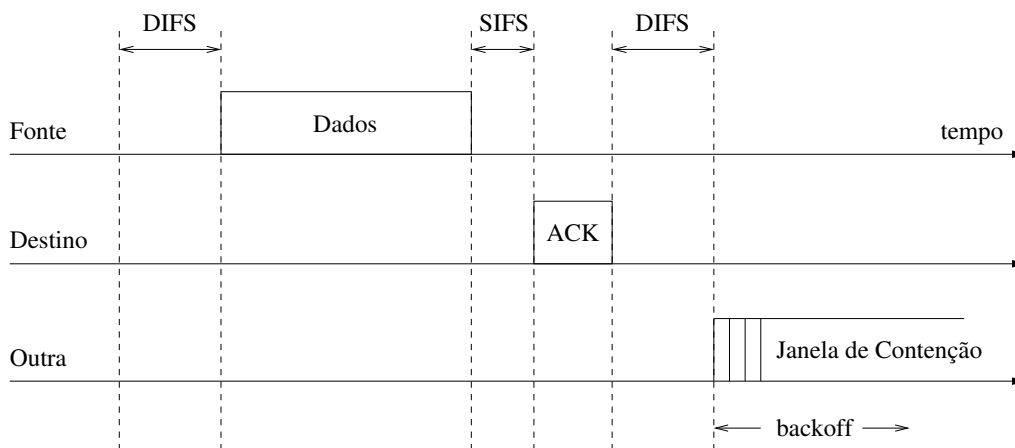


Figura 4.4: Funcionamento básico do DCF.

Um espaçamento entre quadros igual a DIFS é utilizado se a última transmissão foi recebida corretamente pelo destino, caso contrário um espaçamento entre quadros maior, igual a EIFS, é usado. As estações atrasam sua transmissão por EIFS, que é maior que DIFS, sempre que elas não podem determinar a situação da transmissão em progresso. A recepção de um quadro com erros compromete a identificação do tipo de quadro recebido, podendo ser um quadro de dados ou um ACK. Logo, as estações devem esperar um intervalo de tempo suficientemente grande para que uma eventual transmissão acabe. O intervalo EIFS começa a partir do término da recepção do quadro recebido com erro, supondo que esse fosse um quadro de dados. O EIFS evita colisões entre dados e quadros de ACK. Sua duração é igual a um intervalo SIFS, mais o tempo de transmissão de um ACK (t_{ACK}), mais um intervalo DIFS, de acordo com a Equação 4.1.

$$EIFS = SIFS + t_{ACK} + DIFS \mu s. \quad (4.1)$$

O EIFS do IEEE 802.11 é diferente do HomePlug, pois no HomePlug o EIFS inicia sua temporização a partir do início do quadro com erros. Isso causa uma menor eficiência do HomePlug, pois para garantir que não haja uma colisão, é necessário que o EIFS seja um intervalo igual à transmissão completa do maior quadro possível. Se o quadro não for tão grande haverá perda de tempo desnecessária. Um resumo de todos intervalos entre quadros utilizados pelo padrão IEEE 802.11 encontram-se na Tabela 4.1. O intervalo PIFS (*PCF InterFrame Space*) é utilizado no modo PCF (*Point Coordination Function*).

Tabela 4.1: Duração dos intervalos entre quadros.

Intervalo	Duração (μs)
SIFS	10
PIFS	30
DIFS	50
EIFS	364

O mecanismo de *backoff* inicia depois de expirar o intervalo de tempo relativo a DIFS ou EIFS. A função de *backoff* atribui um número aleatório uniformemente distribuído entre zero e o tamanho da janela de contenção $[0, CW]$. Esse número é usado como um

contador de *backoff* (*Backoff Counter* - BC) e o seu valor é multiplicado por um intervalo de tempo ($t_{intervalo}$) igual a $20\mu s$ para estabelecer um temporizador chamado de *backoff timer* (BT) visto na Equação 4.2. Um intervalo de $20\mu s$ garante a detecção do quadro por todas as estações da rede por ser um tempo suficiente para que o sinal atinja todas as estações dentro de um BSS. Seu valor está relacionado ao alcance da rede e ao tempo de propagação do sinal no ar.

$$BT = random(0, CW) \times t_{intervalo} \mu s. \quad (4.2)$$

As estações decrementam de uma unidade o seu contador de *backoff* (BC) se o meio permanecer ocioso por $t_{intervalo}(20 \mu s)$. Caso o meio permaneça ocioso, o contador de *backoff* (BC) continua sendo decrementado até que a temporização de *backoff* (BT) expire e neste momento a transmissão do quadro ocorre. Entretanto, se o meio for ocupado durante o *backoff* de uma estação, o contador de *backoff* (BC) dessa estação deve parar e aguardar o meio ficar novamente ocioso quando será realizada uma nova tentativa de transmissão e, desta forma, o contador de *backoff* (BC) reinicia de onde parou. A função de *backoff* é chamada se o transmissor não receber um reconhecimento positivo (ACK) do receptor.

A função de *backoff* é responsável pelo aumento do tamanho da janela de contenção (*Contention Window* - CW). Esse tamanho depende do número de vezes que a função de *backoff* é chamada durante a transmissão de um quadro de dados específico. Uma chamada à função de *backoff* (CFB) acontece toda vez que o ACK do quadro de dados correspondente não for recebido, e como consequência, uma colisão supostamente ocorreu. O aumento da janela de contenção (CW) evita colisões ao diminuir a probabilidade de mais de uma estação escolher o mesmo intervalo de tempo para a transmissão. Quanto maior o valor de CW, menores são as chances de duas ou mais estações escolherem o mesmo valor para o contador de *backoff* (BC). Na primeira tentativa de acessar o meio, as estações sorteiam um valor entre zero e o tamanho mínimo da janela de *backoff* $[0, CW_{min}]$, onde $CW_{min} = 31$. O valor da janela de contenção é dado por

$$CW_{novo} = 2 \times CW_{atual} + 1, \quad (4.3)$$

onde CW_{atual} é o valor atual da janela de contenção utilizada e CW_{novo} é o próximo valor. O valor da janela de contenção é limitado a um valor máximo, definido pelo padrão ($CW_{max} = 1023$). Se a função de *backoff* for chamada quando CW já for igual a CW_{max} , seu valor não é alterado. Quando uma transmissão bem sucedida ocorre, CW retorna ao valor inicial, CW_{min} . Os valores possíveis para a janela de contenção encontram-se na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Valores da janela de contenção (CW).

CFB	0	1	2	3	4	5
CW	31	63	127	255	511	1023

Assim como no HomePlug, o modo DCF do IEEE 802.11 implementa um vetor de alocação conhecido por NAV (*Network Allocation Vector*). Quando uma estação está escutando o meio, ela conhece a duração da transmissão corrente através de informações contidas no cabeçalho dos quadros escutados. Por conseguinte, uma estação sabe por quanto tempo o meio permanecerá ocupado e, conseqüentemente, por quanto tempo ela não poderá acessar o meio para transmissão. Desta forma, o emprego do NAV evita colisões.

Diferente do HomePlug 1.0, o IEEE 802.11 não prevê diferenciação de serviço nativamente e por isso não possui nem período de resolução de prioridade nem outro mecanismo semelhante. No entanto, o IEEE 802.11 possui uma extensão, chamada IEEE 802.11e [57], capaz de prover qualidade de serviço.

Um dos desafios das redes sem fio é contornar os problemas de terminal exposto e escondido. No problema do terminal exposto, uma estação transmissora pode influenciar na transmissão de uma terceira sem que essa participe da comunicação. Conforme a Figura 4.5, quando B transmite para a A, a estação C não pode transmitir para D. Isso ocorre mesmo que D esteja fora da área de cobertura de B pois C detectou o meio ocupado. A estação C poderia transmitir para D, pois a última seria capaz de receber o quadro sem prejuízos visto que a transmissão de B para A não influenciaria na transmissão de C para D. O problema do terminal exposto reduz a capacidade da rede.

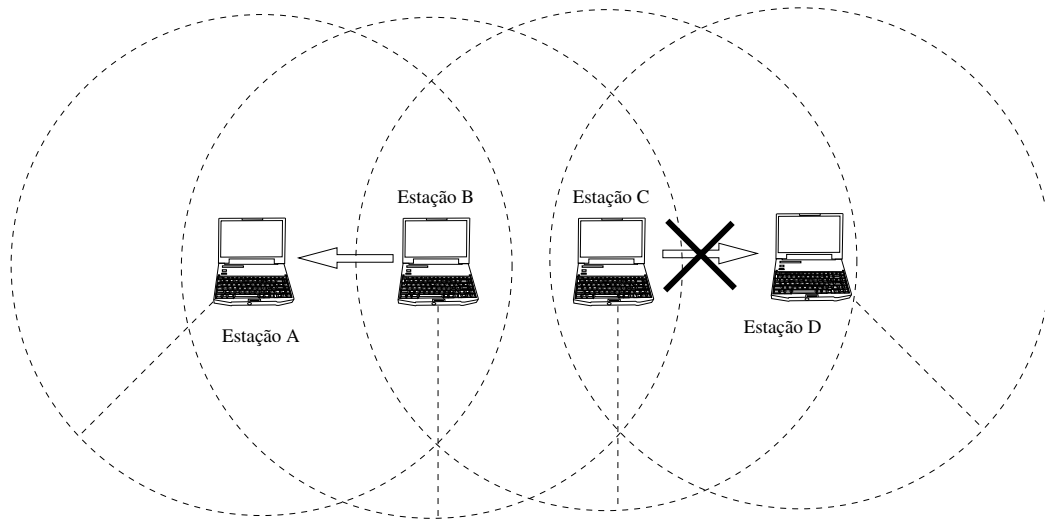


Figura 4.5: Problema do terminal exposto.

No problema do terminal escondido, a estação A não detecta uma transmissão e envia um quadro para B mesmo que esse já esteja fazendo uma recepção. Enquanto C transmite para B, a estação A, por não detectar o meio ocupado, começa a transmitir para B simultaneamente. Isso é possível porque A está fora do alcance de C (Figura 4.6). Como consequência, ocorre uma colisão em B. Esse problema também reduz a capacidade de transmissão da rede.

O mecanismo de RTS/CTS (*Request-To-Send/Clear-To-Send*) foi introduzido no padrão para evitar o problema de terminal escondido, além de transportar informações correspondentes ao tempo de transmissão. Os quadros de RTS/CTS são também usados para atualizar os vetores de alocação (NAV) das estações que estão esperando para transmitir. Assim, o meio fica reservado para a transmissão corrente pois todas as estações têm conhecimento da transmissão atual. Quando o mecanismo de RTS/CTS é empregado, o transmissor envia um quadro de RTS antes de DIFS. Após receber o RTS, o receptor espera SIFS e transmite um CTS. O processo de transmissão de RTS/CTS se completa quando o transmissor recebe o CTS. Depois de recebê-lo, o transmissor envia o quadro de dados após SIFS como mostrado na Figura 4.7. Seguindo o término do envio dos dados, o transmissor aguarda um ACK como no esquema básico. O problema do terminal escondido é solucionado, pois transmitindo um RTS e um CTS, todas as estações dentro da área de cobertura do transmissor e do receptor têm conhecimento da futura transmissão.

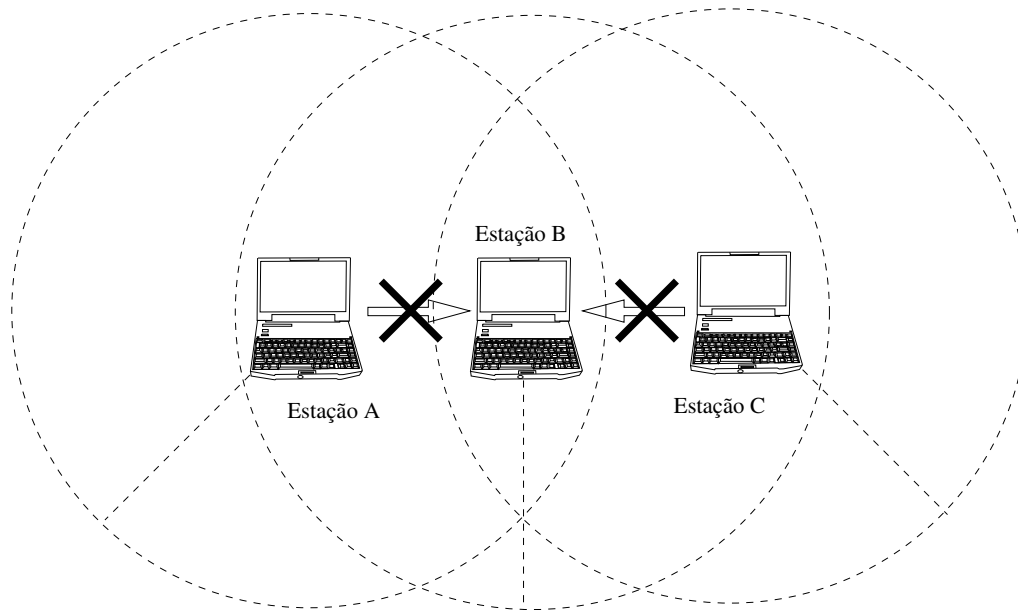


Figura 4.6: Problema do terminal escondido.

Na Figura 4.6, a estação A não transmitiria pois teria escutado um CTS da estação B. Toda estação dentro dos limites de cobertura do transmissor e do receptor devem escutar os quadros de RTS e/ou CTS. Portanto, os quadros de RTS/CTS devem ser enviados na taxa básica usualmente igual a 1 Mbps.

4.3 O emprego do contador de adiamentos pelo IEEE 802.11

O melhor desempenho do CSMA/CA é atingido quando um quadro é transmitido após o outro sem colisões ou intervalos de tempo ociosos. Em outras palavras, para aumentar o desempenho, as colisões devem ser evitadas e a duração do temporizador de *backoff* (BT) deve ser minimizada.

Conforme visto no Capítulo 2, o contador de adiamentos (*Deferral Counter* - DC) objetiva diminuir as colisões e, como consequência, aumentar a eficiência do protocolo da subcamada MAC. Devido às características semelhantes entre o IEEE 802.11 e o Home-

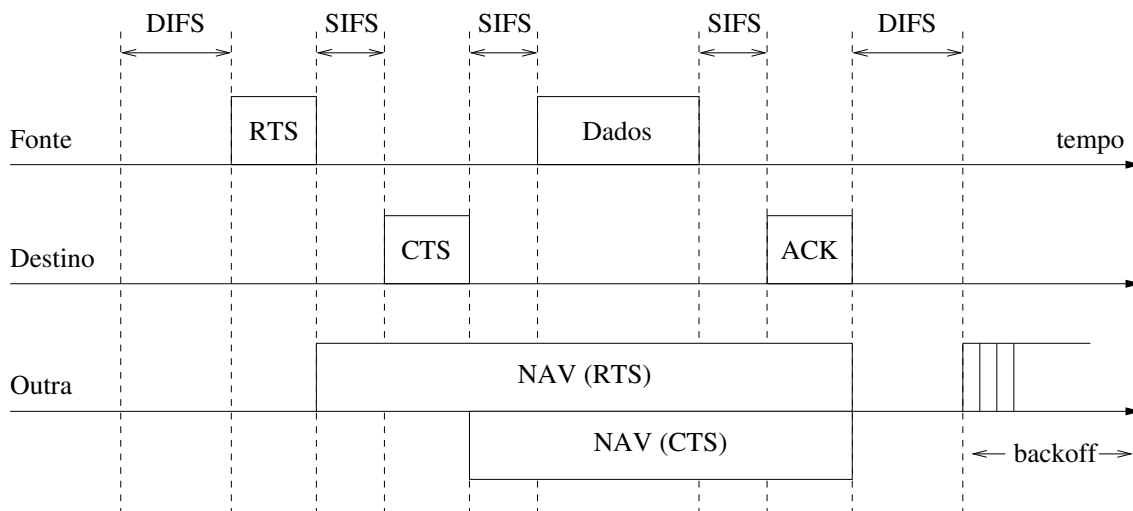


Figura 4.7: Funcionamento do DCF com troca de RTS/CTS.

Plug, espera-se que a utilização do mecanismo contador de adiamentos no padrão IEEE 802.11 deva produzir também um aumento da eficiência. Portanto, este capítulo analisa o desempenho do protocolo IEEE 802.11 com a utilização de um mecanismo contador de adiamentos. A análise efetuada compara os resultados de desempenho considerando três funções utilizadas para o contador de adiamento: a constante, a linear e a exponencial.

Conforme visto no Capítulo 2, no HomePlug 1.0 o contador de adiamentos (DC) é decrementado quando uma estação transmissora detecta o meio sendo ocupado. Quando o DC atinge zero, o tamanho da janela de contenção (CW) e do DC são incrementados. Os valores de DC e CW são vistos na Tabela 2.2.

No IEEE 802.11, a primeira proposta mantém o DC constante. A segunda proposta aumenta os valores do DC usando uma função linear da forma $4 \times n + 3$. A terceira proposta aumenta os valores do DC usando uma função exponencial da forma $2^{(n+2)} - 1$. O valor mínimo do contador de adiamentos foi definido como três, porque o IEEE 802.11 possui um valor de CW_{min} igual a 31 maior do que o do HomePlug 1.0 que igual a 7. Logo, a probabilidade de colisão é menor inicialmente e a adoção de um valor mínimo para o DC igual ao usado no HomePlug 1.0 não seria eficiente. Um DC mínimo igual a zero representaria uma sobrecarga alta especialmente quando a carga da rede fosse baixa. Para uma carga baixa na rede não há a necessidade de haver aumento de CW porque o IEEE 802.11 já possui um CW inicial (CW_{min}) suficientemente grande. Quando a janela

de contenção (CW) atinge o seu valor máximo (CW_{max}), o DC pára de aumentar. A Tabela 4.3 mostra a evolução dos valores de DC com o aumento de CW para as três funções propostas. Paralelamente, os valores de CW no HomePlug pode ser visto na Tabela tab:HP.

Tabela 4.3: Evolução dos valores do DC e do CW correspondente.

CW	Contador de adiamentos (DC)		
	Constante	Linear	Exponencial
31	3	3	3
63	3	7	7
127	3	11	15
255	3	15	31
511	3	19	63
1023	3	23	127

4.4 Resultados

A implementação do DC exigiu que o módulo do IEEE 802.11 disponível para simulador de redes ns-2 (*Network Simulator*) [48] fosse alterado. O mecanismo de *backoff* do IEEE 802.11 foi adaptado para ter o mesmo comportamento do *backoff* utilizado pelo HomePlug 1.0 conforme visto no Capítulo 2. Sempre que uma estação desejar transmitir ela deve esperar o meio ficar ocioso por DIFS e em seguida por um intervalo de *backoff*. Durante o intervalo de *backoff*, se a estação detectar o meio sendo ocupado por uma outra transmissão, ela deve verificar o seu DC. Se o DC era zero, a estação deve parar o seu *backoff*, incrementar o seu CW e o seu DC e esperar o meio ficar ocioso novamente por DIFS para fazer uma nova tentativa de transmissão. Caso o DC não seja zero, a estação deve decrementar o seu DC e proceder como no IEEE 802.11 original, ou seja, pausar o seu *backoff* e aguardar o meio ficar ocioso novamente por DIFS para reiniciá-lo. Uma transmissão ocorre sempre após a expiração do *backoff*. Seguindo a transmissão de um quadro de dados, a estação espera um ACK do receptor. Se o transmissor não receber um ACK, ele deve incrementar o seu DC e o seu CW porque a ocorrência de uma colisão é

considerada. A lógica da transmissão do IEEE 802.11 com o DC é vista na Figura 4.8.

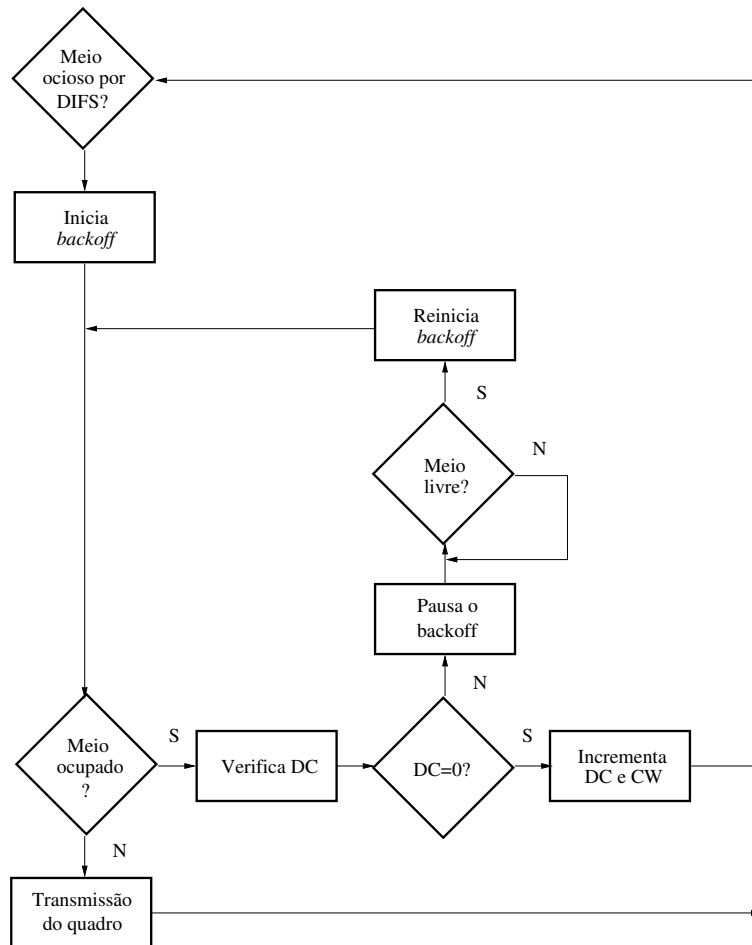


Figura 4.8: Lógica da transmissão do IEEE 802.11 com o contador de adiamentos (DC).

O cenário de simulação estudado consiste de uma rede onde todas as estações estão dentro dos limites de alcance comum. Portanto, todas as estações comunicam-se diretamente e o emprego do RTS/CTS não é justificável visto que o problema do terminal escondido não ocorre. Essa rede possui 32 nós aleatoriamente localizados numa área de 150 m x 150 m. Os transmissores são modelados por fontes CBR. Foi assumido que as estações transmitem a 6 Mbps, logo um pacote está sempre disponível para a transmissão. O objetivo principal é avaliar o comportamento da capacidade da rede, de acordo com as abordagens introduzidas para o DC, ao variar-se o número de nós transmissores. O número de nós transmissores utilizados variou entre 2, 4, 8, 16 e 32. Os resultados consideram intervalos de confiança de 95% representadas nas figuras por barras de erro verticais.

A Figura 4.9 mostra a vazão da rede para pacotes de 1500 octetos. É verificado que as três possibilidades de uso do DC têm um desempenho melhor que o IEEE 802.11 original, exceto para menos de 5 nós. Nesse caso, a vazão comporta-se de forma semelhante usando DC linear, exponencial e não usando DC (IEEE 802.11 original). O propósito do DC é aumentar a capacidade da rede reduzindo o número de colisões. Quando o número total de transmissores é menor do que cinco, há poucas colisões. Enquanto a probabilidade de colisões é baixa, a vazão da rede tende a manter-se constante ou até mesmo aumentar com o número de nós transmissores. Isso ocorre porque a quantidade de intervalos de tempo ociosos diminui devido à redução do tempo médio de *backoff*. A Figura 4.10 também mostra a vazão da rede só que para pacotes de 512 octetos. O comportamento apresentado na Figura 4.9 é acentuado na Figura 4.10. Nessa última, a curva relacionada ao IEEE 802.11 mostra uma pequena elevação, e somente depois de 4 nós começa a cair. Nesse caso particular, quando a probabilidade de colisões é pequena, o padrão IEEE 802.11 tem um desempenho superior às alternativas introduzidas porque não há ainda a necessidade de se evitar colisões. Aumentando o número de transmissores, a eficiência do IEEE 802.11 diminui rapidamente enquanto as alternativas que empregam o DC têm um desempenho muito melhor. Isso demonstra que, ao empregar o mecanismo proposto, as redes sem fio se tornam mais escaláveis.

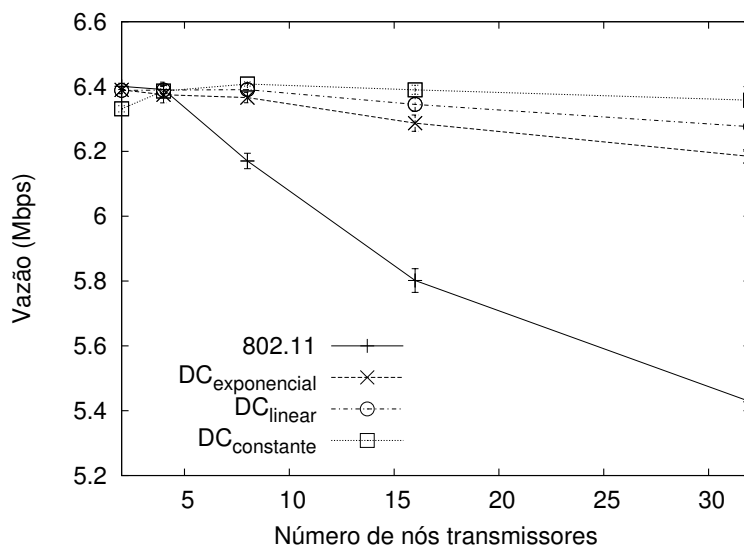


Figura 4.9: Vazão dos pacotes de 1500 octetos.

A Figura 4.10 mostra que as abordagens que usam DC linear e exponencial têm um

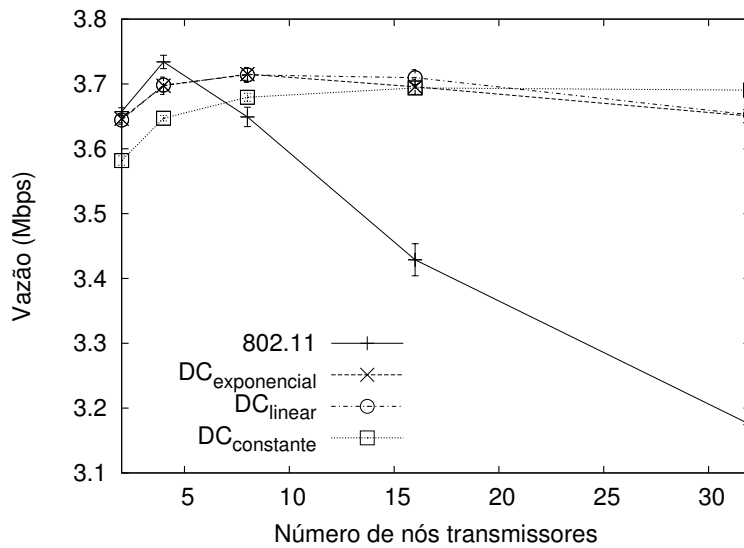


Figura 4.10: Vazão dos pacotes de 512 octetos.

desempenho superior ao que utiliza o DC constante até 16 transmissores. Isso significa que até 16 nós não há a necessidade de aumentar a janela de contenção tão rápido quanto a abordagem com DC constante faz. É importante mencionar que o efeito da redução do intervalo de *backoff* médio depende do tamanho dos pacotes. Quanto maior é o pacote, menor é o efeito da redução do intervalo de *backoff* médio. Esse é o motivo pelo qual na Figura 4.9 não há um aumento na capacidade de transmissão da rede quando há menos de 5 transmissores. Apesar do número de colisões ser pequeno, a redução do tempo de *backoff* médio não é suficiente para superar o custo das colisões. Para quadros de tamanhos menores essa redução faz com que a vazão aumente para um número até 5 transmissores, pois o número de colisões ainda é pequeno, conforme mostra a Figura 4.10.

As Figuras 4.11 e 4.12 apresentam o impacto do número de nós transmissores sobre o atraso do pacote. Em ambas figuras o mecanismo contador de adiamentos (DC) contribui para diminuir o atraso. Entretanto, os resultados mostrados nas curvas de atraso não refletem a mesma melhoria conseguida pelo mecanismo para vazão, como visto nas Figuras 4.9 e 4.10. O atraso é medido desde a recepção do quadro pela subcamada MAC do transmissor até chegar no destino. Isso inclui o tempo de *backoff*, espaçamento entre quadros e transmissão. Apesar do DC aumentar o tempo de *backoff* médio, a ocorrência mais freqüente de colisões faz com que o atraso medido para o padrão IEEE 802.11 original supere todas as abordagens com DC. O menor atraso médio para transmitir um quadro

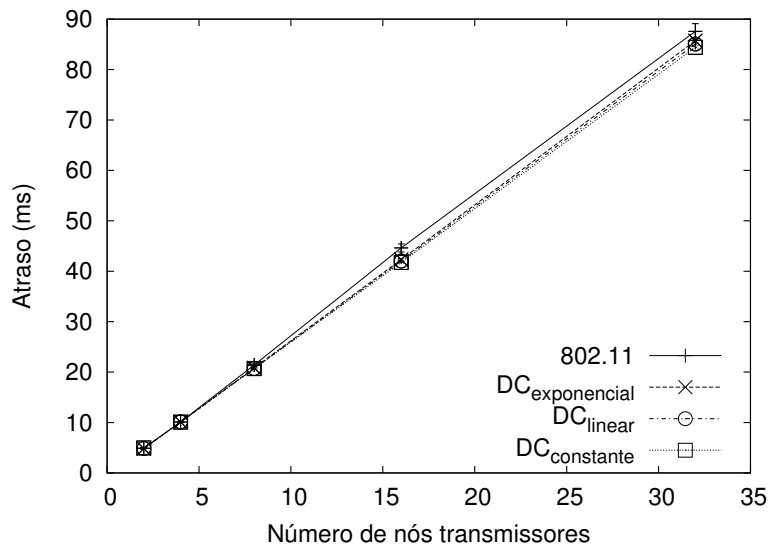


Figura 4.11: Atraso dos pacotes de 1500 octetos.

ocorre para qualquer tamanho dos quadros e seu efeito é mais sensível, principalmente, para um número grande de nós.

As Figuras 4.13 e 4.14 mostram a porcentagem de colisões ocorridas durante as transmissões. Essa porcentagem foi calculada a partir da razão entre o número de pacotes colididos e os recebidos corretamente. Uma colisão ocorre sempre que duas ou mais transmissões são realizadas simultaneamente. Observa-se que o tamanho dos pacotes não afeta a porcentagem de colisões ocorridas. A probabilidade de colisão é independente do tamanho do pacote, desde que todos os nós estejam dentro dos limites de alcance comum, como é o caso analisado. Se não estivessem dentro dos limites de alcance mútuo a probabilidade de colisões seria maior para pacotes maiores. Entretanto, o número de colisões é maior para quadros pequenos porque o número de acessos ao meio é maior. Já que a rede opera em saturação, a proporção entre a transmissão de quadros colididos e transmitidos com sucesso é que é independente do tamanho dos pacotes. A Figura 4.14 mostra que a porcentagem de colisões é maior para o IEEE 802.11 comparado às abordagens que usam o DC. Como pode ser visto, o formato das curvas está relacionado com a capacidade de aumentar a janela de contenção. Quanto mais rápido o CW aumenta, menor é a probabilidade de colisões. Logo, quanto maiores são os valores de DC mais demorado é o aumento de CW, provocando uma porcentagem maior de colisões. Isso pode ser visto nas Figuras 4.13 e 4.14 pois a porcentagem de colisões é maior para as abordagem que

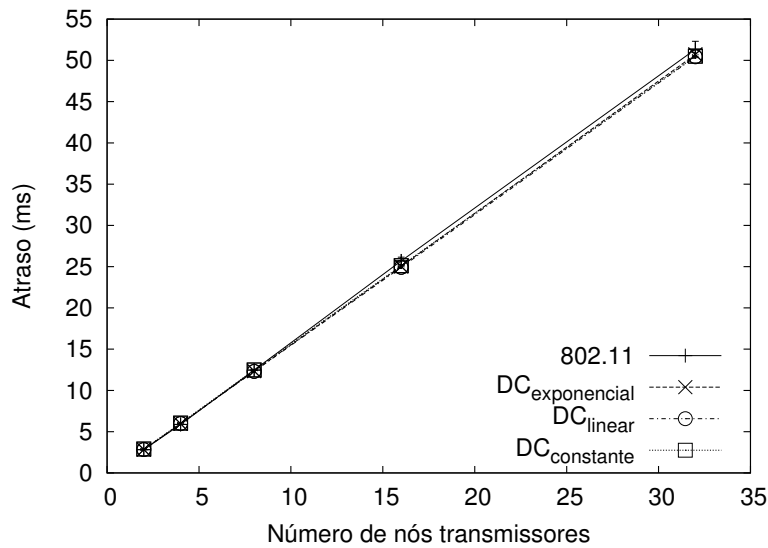


Figura 4.12: Atraso dos pacotes de 512 octetos.

usa $DC_{exponencial}$, seguido do DC_{linear} e por último o $DC_{constante}$. A observação interessante é que somente o aumento rápido de CW não é suficiente para encontrar a melhor opção dentre as analisadas para a transmissão. A Figura 4.10 mostra que para menos de 15 nós, a abordagem com o $DC_{constante}$ provê uma vazão pior do que as abordagens com DC_{linear} e $DC_{exponencial}$.

As Figuras 4.15 e 4.16 mostram porcentagens de colisões. Os resultados são referentes ao cenário com 32 nós transmissores e são limitados a transmissões simultâneas (colisões) ocorridas entre dois e três nós. De quatro nós em diante a porcentagem de colisões não é mostrada, pois os valores são muito baixos. Esses resultados enfatizam o fato da probabilidade de colisões não depender do tamanho do pacote, visto que as Figuras 4.15 e 4.16 são quase as mesmas. Essas figuras demonstram também que o DC diminui a probabilidade de colisões.

A redução da probabilidade de colisões é observada, pois quando o DC não é utilizado há uma porcentagem menor de colisões entre dois nós e maior para três nós comparando-se às abordagens que usam DC. Quando o DC não é empregado, a probabilidade de colisões é maior e eventos como, colisões envolvendo três ou mais nós, são mais frequentes. A colisão entre um número grande de estações não é desejável porque aumenta o número de retransmissões diminuindo a capacidade da rede.

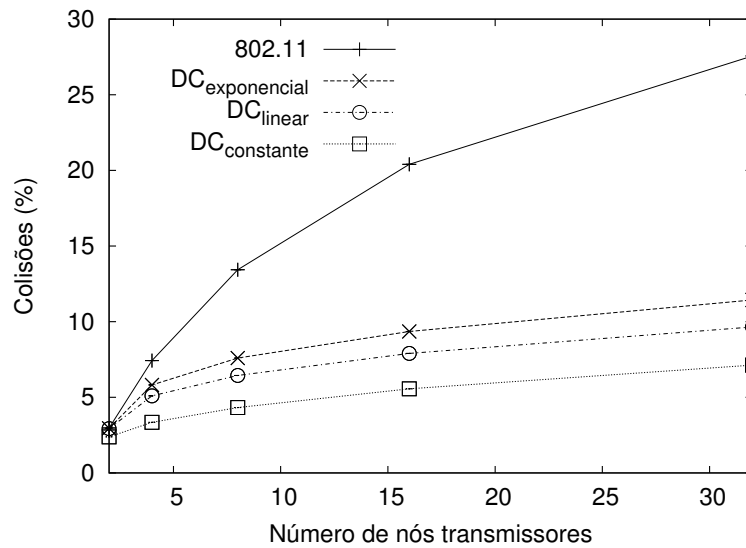


Figura 4.13: Porcentagem de colisão dos pacotes de 1500 octetos.

Adicionalmente, foi avaliado o desempenho do mecanismo contador de adiamentos (DC) numa abordagem capaz de aumentar mais rapidamente a janela de contenção. Essa abordagem emprega uma função constante onde DC é mantido sempre igual a zero. A Figura 4.17 mostra que, com o $DC_{constante=0}$ há um desempenho um pouco melhor apenas para a rede com mais de 16 nós transmissores usando pacotes de 1500 octetos. Além disso, para pacotes menores, o desempenho com $DC_{constante=0}$ é ainda pior, como mostrado na Figura 4.18. Esse resultado mostra que apenas o aumento rápido da janela de contenção não é suficiente para garantir uma eficiência maior do protocolo de subcamada MAC do IEEE 802.11. Um aumento rápido da janela de contenção implica num aumento de intervalos de tempo ociosos durante a *backoff*. O melhor resultado vai depender do tamanho dos pacotes, do número de nós transmissores e principalmente do tráfego gerado.

Neste capítulo o DC foi implementado no padrão IEEE 802.11 devido às semelhanças entre o canal elétrico e o sem fio. Essas semelhanças sugeriram que os benefícios encontrados no HomePlug devido ao DC também seriam vistos no IEEE 802.11. O estudo foi realizado a partir de três abordagens para os valores de DC: uma constante, uma linear e outra exponencial. As três abordagens investigadas demonstraram um desempenho superior ao IEEE 802.11 especialmente em termos de escalabilidade. Dentre as três a que apresentou os melhores resultados foi a constante. Com a inclusão do mecanismo de contador de adiamentos, o protocolo de subcamada de controle de acesso ao meio do

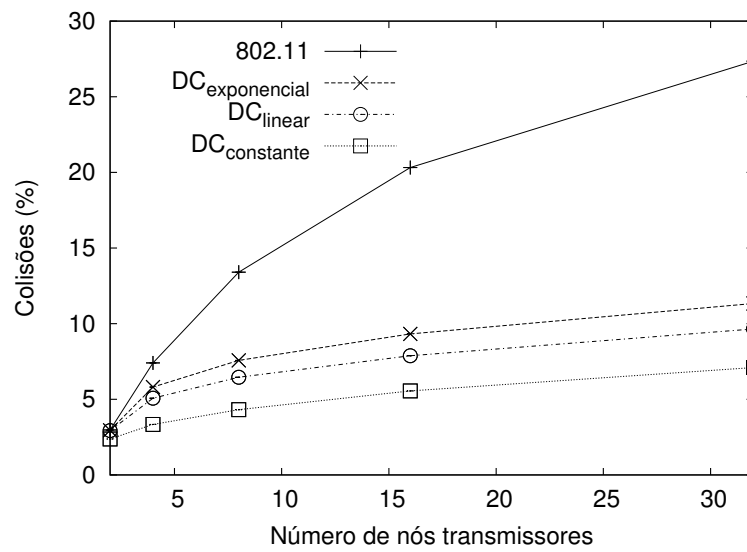


Figura 4.14: Porcentagem de colisão dos pacotes de 512 octetos.

IEEE 802.11 manteve sua taxa de transmissão elevada mesmo para um alto número de fontes. A vazão máxima alcançada para 32 nós foi cerca de 9% e 5% mais alta que a do padrão original para pacotes de 1500 e 512 octetos, respectivamente.

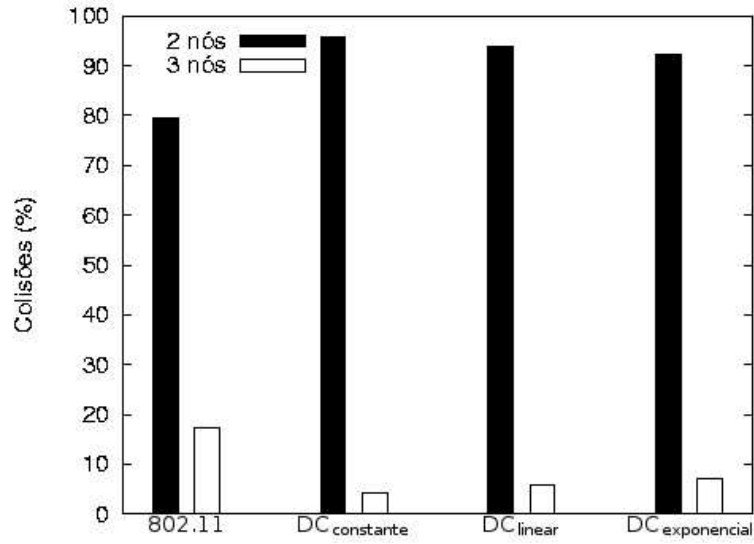


Figura 4.15: Distribuição dos pacotes de 1500 octetos.

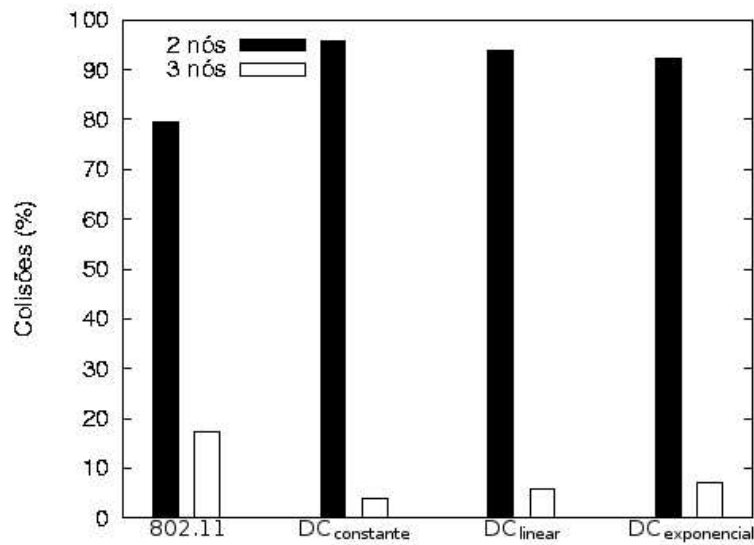


Figura 4.16: Distribuição dos pacotes de 512 octetos.

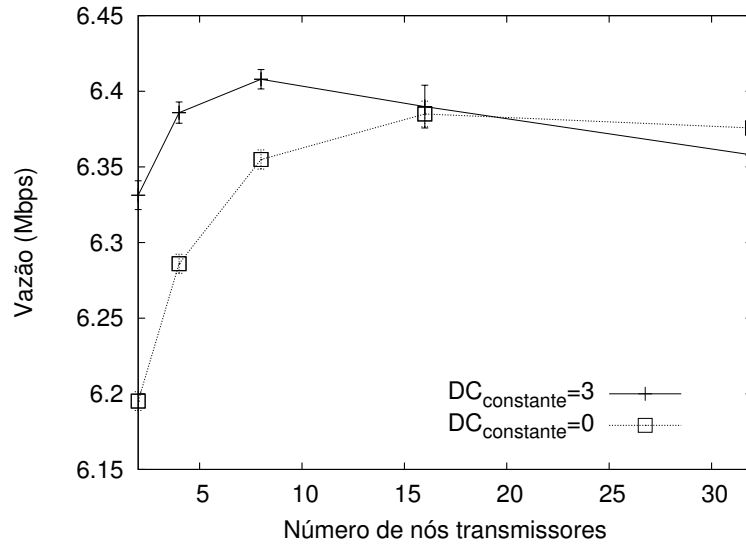


Figura 4.17: Vazão com $DC_{constante} = 0$ e $DC_{constante} = 3$ dos pacotes de 1500 octetos.

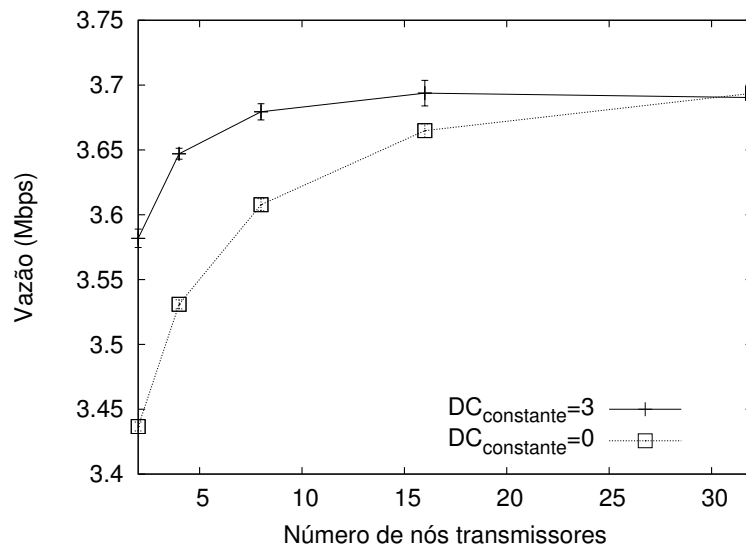


Figura 4.18: Vazão com $DC_{constante} = 0$ e $DC_{constante} = 3$ dos pacotes de 512 octetos.

Capítulo 5

O Mecanismo Proposto

No Capítulo 4 mostrou-se que o mecanismo contador de adiamentos (*Deferral Counter* - DC), proposto inicialmente para o padrão HomePlug, é também vantajoso quando aplicado ao IEEE 802.11. Neste capítulo, o HomePlug volta a ser abordado e um mecanismo baseado no DC é proposto. Esse novo mecanismo evita colisões de uma forma mais eficiente do que o empregado pelo padrão HomePlug 1.0. Para alcançar os resultados o mecanismo é implementado e avaliado em comparação ao padrão HomePlug 1.0 original.

5.1 Proposta

Conforme visto no Capítulo 2, o contador de *backoff* (*Backoff Counter* - BC) é iniciado com um valor aleatório sorteado no intervalo $[0, CW]$. Portanto, como o valor do contador de *backoff* (*Backoff Counter* - BC) é escolhido aleatoriamente, quanto maior o valor da janela de contenção (CW) menor é a probabilidade de duas ou mais estações quaisquer escolherem o mesmo intervalo de tempo para fazer a sua transmissão e, conseqüentemente, seus quadros colidirem. Logo, aumentar a janela de contenção implica diminuir a probabilidade de colisões e, como conseqüência, aumentar a vazão agregada. Desta forma, neste capítulo é proposto um novo mecanismo de acesso ao meio que objetiva o aumento da vazão agregada da rede através do rápido incremento da janela de

contenção para diminuir a probabilidade de colisão. No mecanismo proposto, toda estação sempre incrementa sua janela de contenção (CW) ao verificar o meio sendo ocupado por uma outra transmissão, sendo essa uma transmissão bem sucedida ou não. Equivalente ao contador de adiamentos constante, explicado no capítulo anterior, com o valor constante igual a zero. O aumento da janela de contenção diminui a probabilidade de colisão, mas aumenta o tempo médio de acesso do quadro. Portanto, há um compromisso entre a diminuição das colisões e o atraso. Assim, neste capítulo é feita uma análise de desempenho do mecanismo proposto e obtém-se resultados de vazão, atraso e variação do atraso.

Considerando um cenário da rede saturada onde todas as estações possuem quadros prontos para serem transmitidos a qualquer instante, isso significa que todas as estações sempre disputam o acesso ao meio. Uma transmissão é bem sucedida se uma estação conseguir acessar o meio antes de todas as outras estações da rede. Para isso, é necessário que a estação escolha um contador de *backoff* (*backoff counter* - BC) menor que o de todas as outras estações. Dado que cada estação escolhe o seu BC independentemente, a probabilidade de sucesso numa transmissão é produto da probabilidade de uma estação escolher um BC qualquer e todas as outras estações escolherem um BC maior.

A Equação 5.1 demonstra, para o mecanismo proposto, a probabilidade de uma determinada estação fazer uma transmissão bem sucedida num intervalo de tempo qualquer dentro de um período de disputa. Seja N o conjunto de n estações transmissoras e i e j índices correspondentes a estações transmissoras. Seja s o intervalo de tempo escolhido para a transmissão, W_i e W_j o número atual de possíveis valores para o BC (*Backoff Counter*) durante a transmissão de i e j , respectivamente. A probabilidade de uma estação i transmitir num intervalo de tempo s (P_t) é igual a probabilidade da estação i escolher um intervalo de tempo s e todas as outras estações j escolherem um intervalo de tempo maior do que s . O valor de W_i é igual a $CW_i + 1$ da estação i no período de disputa corrente. Por exemplo, se $CW_i = 7$, $W_i = 8$ e $BC_i \in [0, 7]$.

$$P_t = \frac{1}{W_i} \times \prod_{j=1, j \neq i}^n \frac{W_j - s}{W_j}, \text{ onde } i \text{ e } j \in N \mid N = [1, \dots, n]. \quad (5.1)$$

Baseando-se em testes de sanidade, observa-se que com o aumento de W_j das estações j , a probabilidade de uma determinada transmissão ser realizada num intervalo específico s tende a $\frac{1}{W_i}$ com $W_j \rightarrow \infty$. Esse resultado é equivalente à probabilidade do meio estar sendo ocupado por uma única estação e essa escolher um determinado intervalo de tempo para a sua transmissão dentre as W_i possibilidades. Quando W_j tende ao infinito, isso significa que as chances das estações j escolherem um intervalo de tempo menor ou igual a s para sua transmissão tendem a zero. Se $W_j \rightarrow s \Rightarrow P_t \rightarrow 0$ pois todas as estações colidem. O aumento do número de estações também influencia a probabilidade de transmissão com sucesso de uma estação i , pois para todos os n nós competirem pelo meio, W_j deverá ser da ordem de grandeza de W_i e portanto o aumento de j ao infinito implica $P_t \rightarrow 0$. Se j tender ao infinito, o produtório $\prod_{j=1, j \neq i}^n \frac{W_j - s}{W_j} \rightarrow 0$ pois $\frac{W_j - s}{W_j} < 1$.

Generalizando a Equação 5.1, a probabilidade de haver transmissão num determinado período de disputa por uma estação dentre as n transmissoras é igual a

$$P_t = \sum_{i=1}^n \frac{1}{W_i} \times \prod_{j=1, j \neq i}^n \frac{W_j - s}{W_j}. \quad (5.2)$$

Como a transmissão pode ocorrer num intervalo s qualquer, desde que

$$s \in [0, W_{min}] \mid W_{min} = \min\{W_0, \dots, W_n\},$$

para garantir que não haja nenhum fator negativo no produtório $\prod_{j=1, j \neq i}^n \frac{W_j - s}{W_j}$, tem-se a Equação 5.3. Se houver pelo ou menos um fator negativo significa que $P_t = 0$, pois existe uma estação j com um $W_j < s$, o que torna impossível a transmissão do nó i .

$$P_t = \sum_{s=0}^{W_{min}} \sum_{i=1}^n \frac{1}{W_i} \times \prod_{j=1, j \neq i}^n \frac{W_j - s}{W_j}, \text{ onde } W_{min} = \min\{W_0, \dots, W_n\}. \quad (5.3)$$

Na Equação 5.3, se $W_j \rightarrow \infty$, o somatório $\sum_{i=1}^n \frac{1}{W_i} \times \prod_{j=1, j \neq i}^n \frac{W_j - s}{W_j}$ tende à transmissão de um único nó. Nesse caso, todas as componentes do somatório tendem a zero com exceção da parcela referente à probabilidade de transmissão da estação i que tende a $\frac{1}{W_i}$. Logo, $P_t = 1$ pois a transmissão desse único nó ocorrerá num intervalos de tempo s .

A probabilidade de colisão (P_c) é então verificada na Equação 5.4. Pode ser observado que aumentando W_j ao infinito $P_t \rightarrow 1$ e $P_c \rightarrow 0$. Em contrapartida, se os valores de $W_j \rightarrow s$ ou se o aumento do número das n estações tender ao infinito então $P_t \rightarrow 0$. O mecanismo proposto, ao aumentar mais rapidamente os valores de W_j das estações, diminui a probabilidade de colisões tornando o método de acesso empregado (CSMA/CA) mais eficiente. Na Equação 5.4, observa-se também que a probabilidade de haver uma colisão é independente do tamanho dos pacotes supondo que todos os nós estão dentro de uma área de transmissão comum e escutam o início da transmissão dos outros.

$$P_c = 1 - \sum_{s=0}^{W_{min}} \sum_{i=1}^n \frac{1}{W_i} \times \prod_{j=1, j \neq i}^n \frac{W_j - s}{W_j}. \quad (5.4)$$

O padrão HomePlug, ao aplicar um mecanismo de reação mais lento a possíveis colisões, tende a apresentar tamanhos para janelas de contenção menores ao longo de suas transmissões. Esse fato aumenta a probabilidade de colisões justificando o emprego do mecanismo proposto. Em contrapartida, CW não pode crescer indefinidamente, pois implicaria num acréscimo da variação do atraso conforme será visto nas simulações.

5.2 Simulações

Para simular o mecanismo proposto, o padrão HomePlug versão 1.0 foi implementado para a subcamada MAC e o modelo de ecos [17] para simular a camada física. Esses módulos foram desenvolvidos em C++ e em oTcl por serem as linguagens do simulador de redes ns-2 (*Network Simulator*) em sua versão 2.26 [48]. O modelo de ecos segue os mesmos parâmetros utilizados na Seção 3.2.

5.2.1 Resultados

Nas simulações é utilizada uma topologia onde as estações estão em linha e se comunicam duas a duas. Todas as estações utilizam fluxos UDP de taxa constante (*Constant Bit Rate* - CBR) e estão dentro do alcance de transmissão de todas as outras, calculado

a partir do modelo de ecos. Os tamanhos de pacote são de 1500 octetos e 512 octetos e o número de estações é variado de 1 até 16 nós transmissores enviando dados a taxas de 1 Mbps e 14 Mbps. As variações nas taxas, tamanhos de pacotes e número de estações são empregadas para avaliar a proposta em diferentes situações de carga. Os efeitos do mecanismo proposto ao se variar o tamanho da janela de contenção máxima ($CW_{máx}$) também são avaliados. Para tal, $CW_{máx}$ varia de 63, que é o tamanho máximo do padrão HomePlug, até 511, conforme a Equação 2.2. Os gráficos possuem barras de erro correspondentes a um intervalo de confiança de 95%.

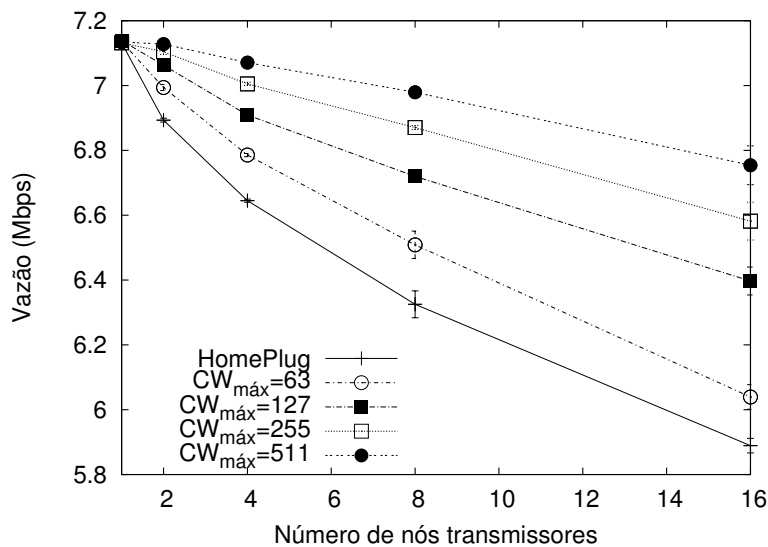


Figura 5.1: Vazão da rede com pacotes de 1500 octetos a 14 Mbps.

Nas Figuras 5.1 e 5.2 são mostradas as vazões agregadas da rede quando a taxa de transmissão de todos os nós é de 14 Mbps para pacotes de 1500 e 512 octetos. Os resultados mostram as vantagens do mecanismo proposto em termos de vazão quando a rede encontra-se na saturação. A maior vazão é atingida quando se transmite quadros de maior tamanho e quando os nós transmitem a 14 Mbps, pois resulta num alto tráfego. Verifica-se também que a taxa de transmissão agregada na rede diminui ao aumentar o número de nós transmissores, pois aumenta o número de colisões (Equação 5.4). A eficiência do mecanismo proposto pode ser observada pelos maiores valores de vazão obtidos e pela diminuição mais suave do desempenho com o aumento das estações transmissoras. Observa-se também que os resultados de vazão são melhores para maiores valores da janela de contenção ($CW_{máx}$), refletindo a diminuição do número de colisões. Esse

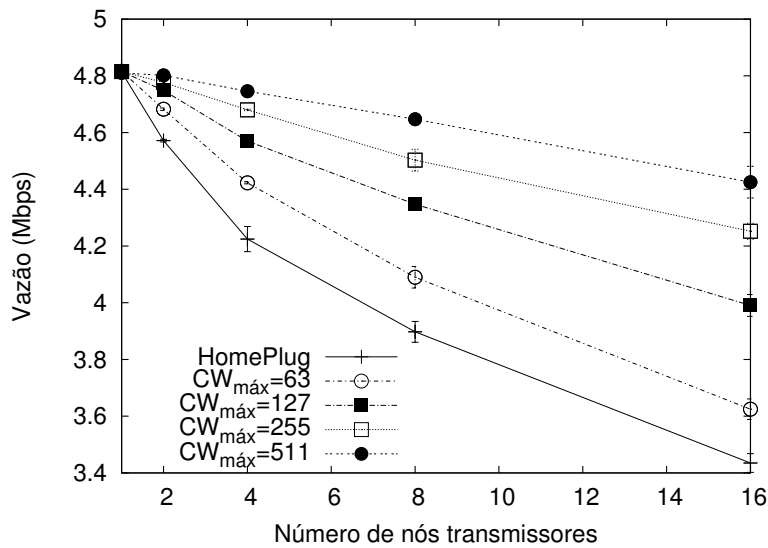


Figura 5.2: Vazão da rede com pacotes de 512 octetos a 14 Mbps.

resultado confirma a Equação 5.3, pois ao aumentar o tamanho de CW a vazão agregada aumenta tendendo a de um único nó transmissor. A diferença de ganho de vazão entre as diferentes curvas de $CW_{máx}$ diminui para os valores mais altos de $CW_{máx}$ porque a quantidade de colisões já está baixa e um aumento no tamanho de CW não traz ganhos significativos. Esse comportamento é independente do tamanho do pacote utilizado. Porém, quanto maior o pacote, maior é a vazão agregada atingida porque proporcionalmente a sobrecarga do protocolo é menor.

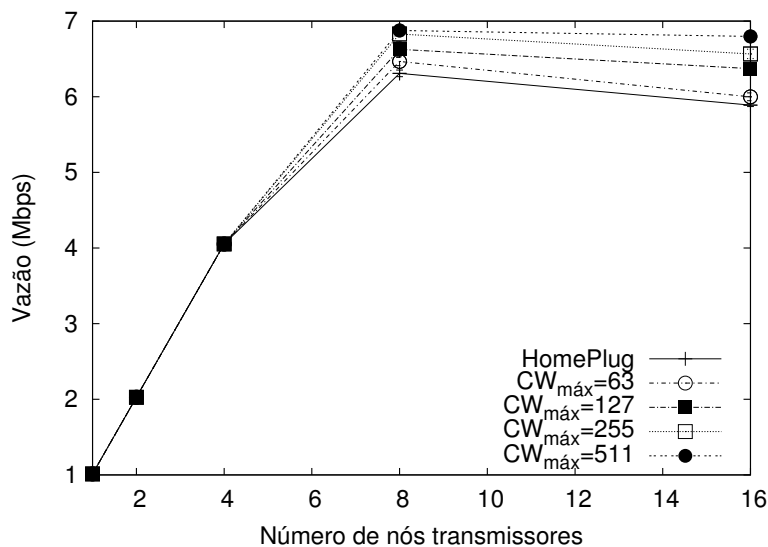


Figura 5.3: Vazão da rede com pacotes de 1500 octetos a 1 Mbps.

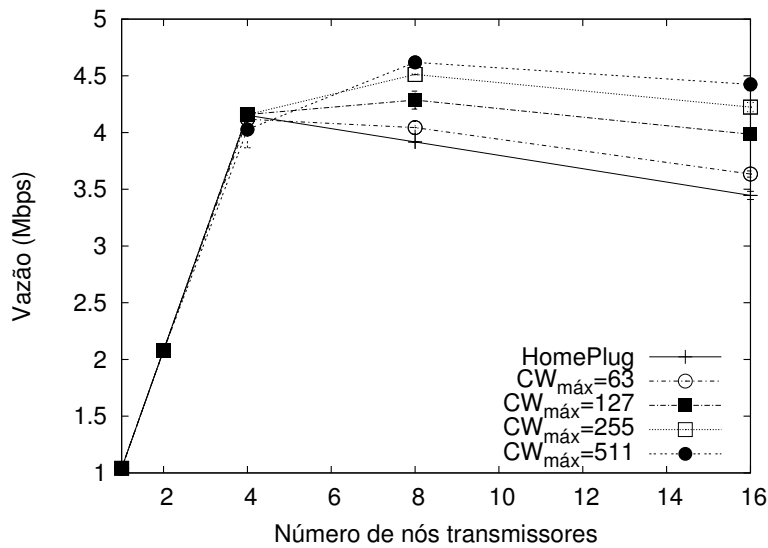


Figura 5.4: Vazão da rede com pacotes de 512 octetos a 1 Mbps.

A vazão agregada obtida ao variar o número de nós transmissores com carga oferecida de 1 Mbps por nó é vista nas Figuras 5.3 e 5.4, para pacotes de 1500 e 512 octetos, respectivamente. Nos gráficos, o número de nós varia de 1 até 16 nós. Como as estações transmitem a 1 Mbps, para poucos nós a carga da rede está baixa e a saturação ainda não foi atingida. Com o aumento do número de nós, e como consequência, com o aumento da carga da rede, a vazão agregada aumenta até que seja alcançada a saturação. Tanto para 1500 quanto para 512 octetos, nota-se que o mecanismo proposto é vantajoso a partir de 4 nós. Como cada nó oferece carga de 1 Mbps, somente a partir de 4 nós a carga da rede está alta e a saturação é atingida. Conseqüentemente, as colisões começam a ocorrer e o mecanismo torna-se mais eficiente. O comportamento do mecanismo proposto e do padrão HomePlug é o mesmo até 4 nós, pois não há muitas colisões. Em consequência, não há retransmissões nem aumento de CW. Isso mostra que antes da saturação o HomePlug com o mecanismo proposto apresenta um desempenho equivalente ao do HomePlug original quando submetidos a baixas cargas. Analogamente ao ocorrido para a taxa de 14 Mbps, a vazão obtida é maior e as diferenças de ganho de vazão diminuem entre as curvas conforme $CW_{máx}$ cresce.

As medidas a seguir se referem ao atraso de transmissão dos pacotes. O valor medido é definido como o atraso médio de todos os nós transmissores desde o instante em que o quadro é recebido pela subcamada MAC até o momento em que é recebido com sucesso

pelo nó de destino. Havendo colisões ou erro de transmissão no quadro o atraso para um determinado pacote continuará sendo considerado até que sua transmissão seja bem sucedida. O atraso de propagação é negligenciável.

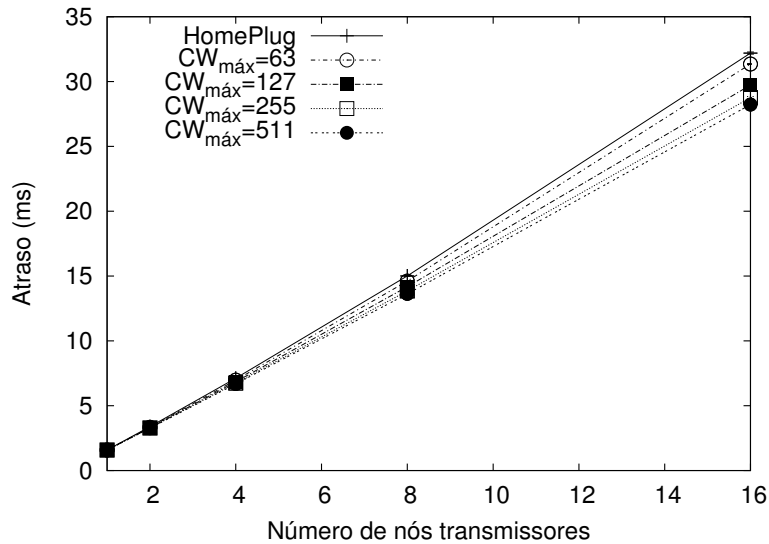


Figura 5.5: Atraso dos pacotes de 1500 octetos a 14 Mbps.

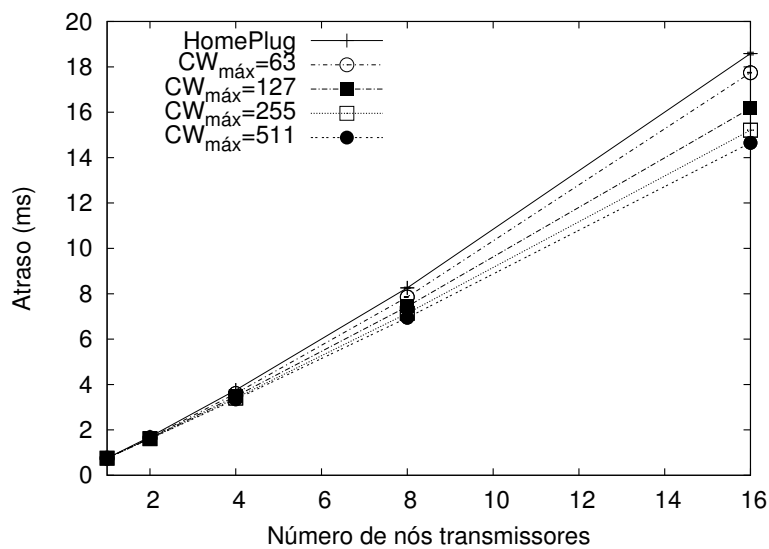


Figura 5.6: Atraso dos pacotes de 512 octetos a 14 Mbps.

Nas Figuras 5.5 e 5.6 o atraso médio é verificado para transmissões de 14 Mbps. Observa-se que tanto para pacotes de 1500 quanto para 512 octetos, o atraso médio é menor quando o mecanismo proposto é empregado. Aumentando CW mais rapidamente, há diminuição do número de colisões. Apesar do tempo médio de acesso ao meio ser maior,

o atraso médio de transmissão diminui com o aumento do número de nós comparado ao HomePlug. Por conseguinte, ao fazer mais retransmissões, uma estação espera mais tempo na média para enviar um quadro com sucesso do que esperaria se CW fosse maior. Nota-se que aumentando $CW_{máx}$, o atraso médio diminui porque os nós que não conseguem transmitir têm as suas chances de acessar o meio reduzidas. Como consequência, o número de estações que competem pelo meio fica temporariamente menor pois será composto apenas pelas estações com CW menor. Isso resulta num aumento da variação do atraso conforme será visto mais adiante. Aumentando o valor de $CW_{máx}$, o atraso médio tende ao atraso de uma única estação transmissora. Esses resultados condizem com as Equações 5.3 e 5.4. Nota-se também que a diferença de atraso médio entre as diferentes curvas de $CW_{máx}$ diminui conforme $CW_{máx}$ aumenta.

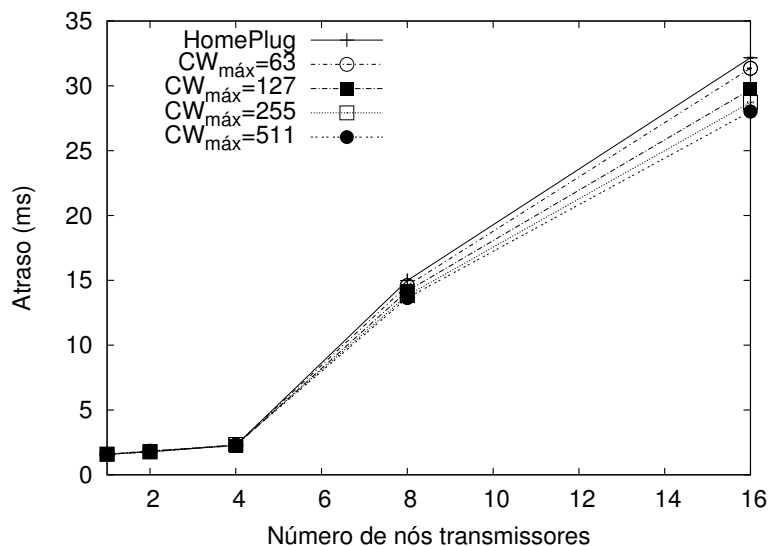


Figura 5.7: Atraso dos pacotes de 1500 octetos a 1 Mbps.

O atraso médio para transmissões de 1 Mbps é visto nas Figuras 5.7 e 5.8. Observa-se que o atraso médio começa a aumentar a partir de 4 nós para pacotes de 1500 octetos e a partir de 2 nós para pacotes de 512 pois é quando a rede atinge a saturação. Conseqüentemente, o número de colisões aumenta. Em ambos os casos, o mecanismo proposto introduz um atraso médio menor com o aumento da carga da rede. Para pacotes de 512 octetos, a diferença no atraso inicia para um número menor de nós porque a saturação é atingida mais rapidamente. Visto que a sobrecarga de protocolo é proporcionalmente maior em relação às transmissões de pacotes de 1500 octetos tornando a taxa de saturação mais

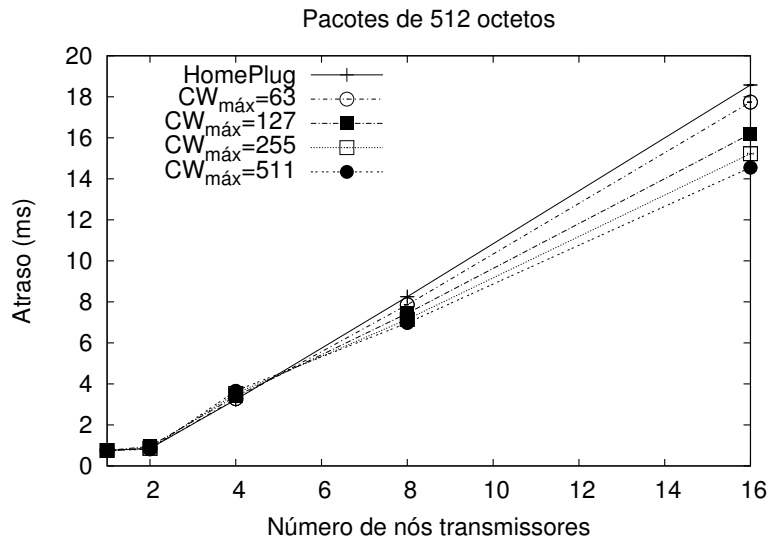


Figura 5.8: Atraso dos pacotes de 512 octetos a 1 Mbps.

baixa para pacotes menores. Esse fato pode ser visto na Figura 3.3. Pode-se observar que a ordem de grandeza do atraso é a mesma para 14 e 1 Mbps.

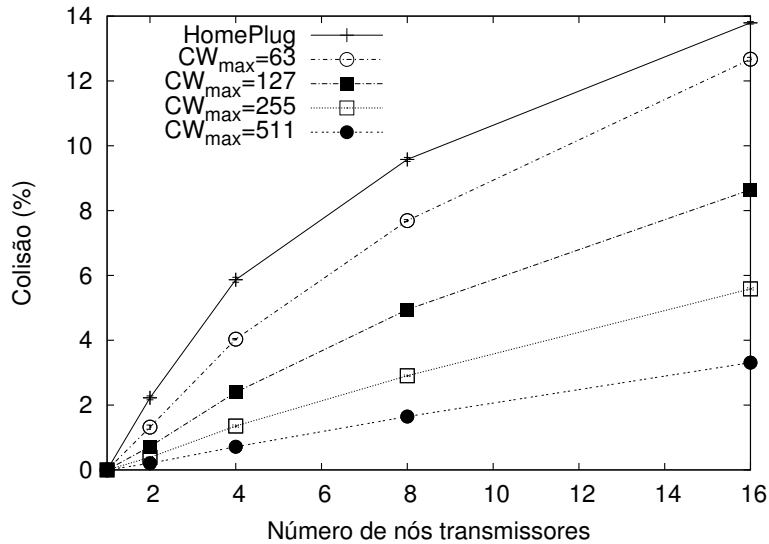


Figura 5.9: Colisão dos pacotes de 1500 octetos a 14 Mbps.

Para condições de baixa carga, o atraso médio do HomePlug e do mecanismo proposto é equivalente, pois tanto as colisões quanto o conseqüente aumento da janela de contenção são eventos que não ocorrem com frequência. A estação que tentar acessar o meio terá uma alta probabilidade de fazê-lo com sucesso na primeira tentativa. Observa-se que o atraso médio dos quadros aumenta com a carga na rede que é quando quando

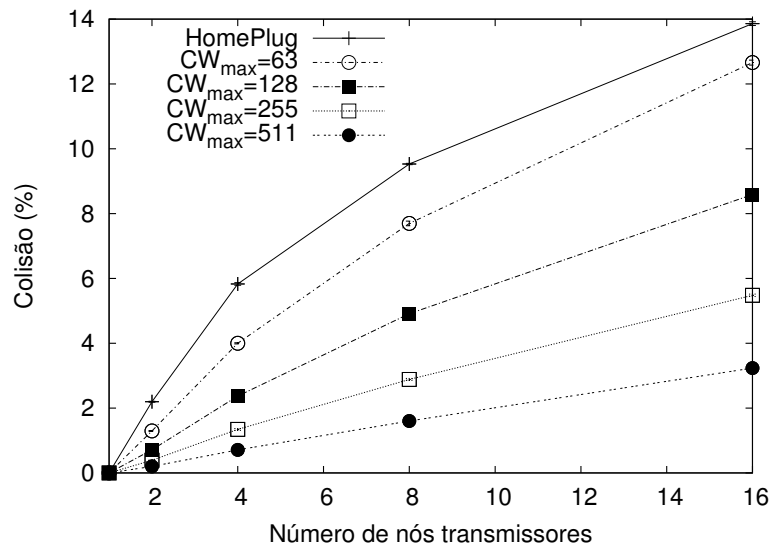


Figura 5.10: Colisão dos pacotes de 512 octetos a 14 Mbps.

as colisões começam a ocorrer. Em contrapartida, esse aumento é menor e as diferenças entre as curvas diminuem conforme $CW_{máx}$ aumenta. Esse comportamento é semelhante ao ocorrido para transmissões a 14 Mbps.

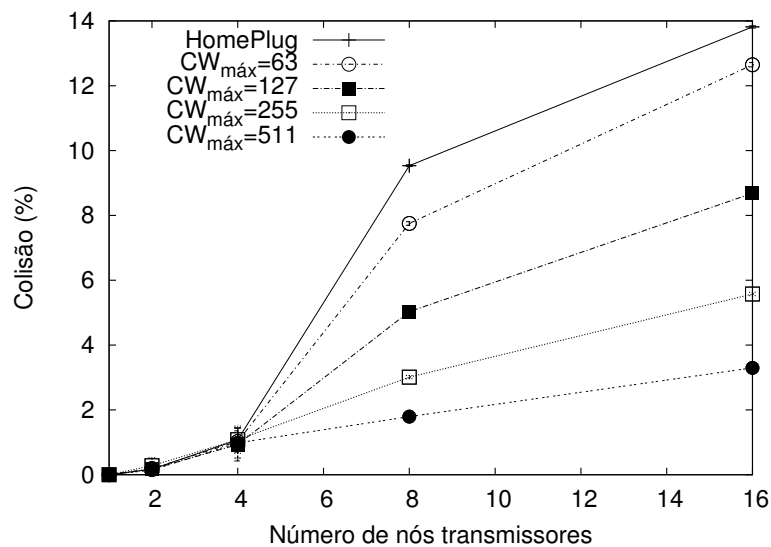


Figura 5.11: Colisão dos pacotes de 1500 octetos a 1 Mbps.

Uma colisão ocorre sempre que uma transmissão é realizada por mais de uma estação no mesmo intervalo de tempo. A porcentagem de colisões foi medida através da razão entre o número de colisões e o total de transmissões realizadas, sendo estas bem sucedidas ou não. Nas Figuras 5.9 e 5.10 percebe-se que para nós transmitindo a 14 Mbps,

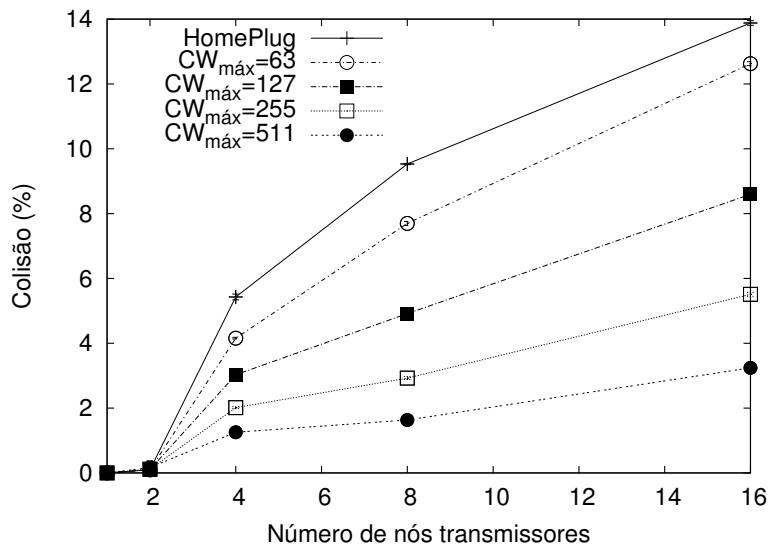


Figura 5.12: Colisão dos pacotes de 512 octetos a 1 Mbps.

independente do tamanho dos pacotes, a porcentagem de colisões é a mesma. Apesar do número de colisões ser maior para pacotes menores, pois o número de acessos ao meio é maior, o número de transmissões também é mais alto. Logo, a porcentagem de colisões é equivalente ao caso com pacotes maiores. Aumentando CW, a probabilidade de colisões diminui, pois a probabilidade de pelo menos dois nós escolherem o mesmo intervalo de tempo para transmissão é reduzida. Para valores muito grandes de CW a probabilidade de colisão tende a zero. Esse resultado pode ser observado nas curvas de $CW_{máx}$, onde a probabilidade de colisão diminui de acordo com o seu aumento. Observa-se também que a diferença entre as curvas de $CW_{máx}$ diminui conforme o valor de $CW_{máx}$ aumenta. Isso ocorre porque com um $CW_{máx}$ já grande, o número de colisões não é mais tão acentuado.

Nas Figuras 5.11 e 5.12, como os nós estão transmitindo à taxas mais baixas (1 Mbps), o número de colisões passa a ocorrer após um certo número de nós transmissores. Esse número depende do momento em que a carga no meio passa a ser alta e, portanto, as colisões aumentam. Para pacotes de 1500 octetos as colisões são relevantes a partir de 4 nós transmissores e para 512 octetos, a partir de 2 nós. As curvas para $CW_{máx}$ possuem o mesmo comportamento da curva do HomePlug aumentando a partir de um determinado número de nós. Porém, o aumento é menor quanto maior for $CW_{máx}$.

A variação do atraso (*jitter*) consiste no desvio padrão do atraso medido a partir dos

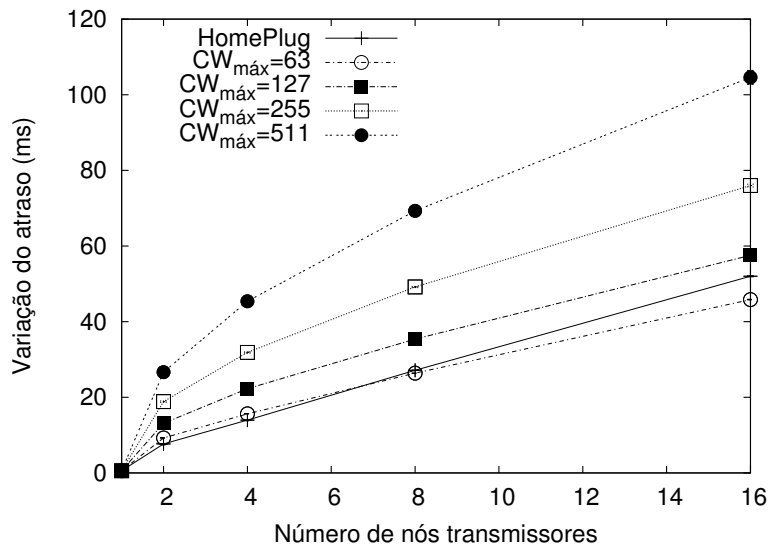


Figura 5.13: Variação do atraso dos pacotes de 1500 octetos a 14 Mbps.

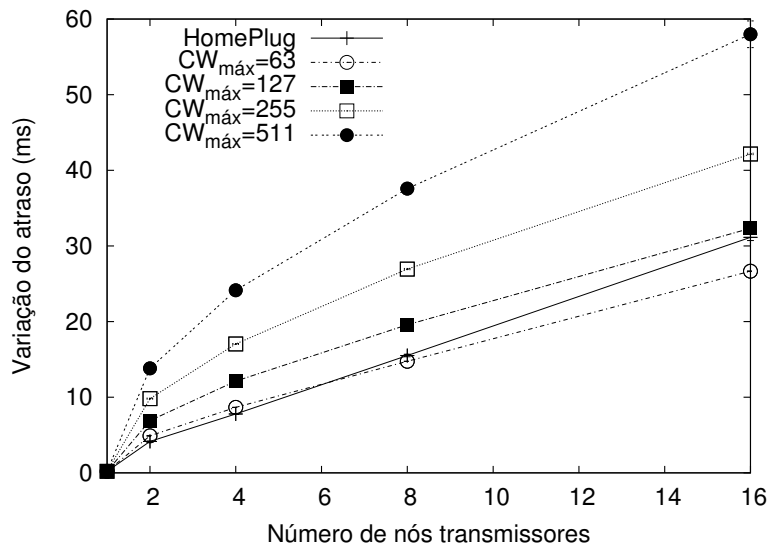


Figura 5.14: Variação do atraso dos pacotes de 512 octetos a 14 Mbps.

pacotes recebidos pelos destinatários. Os efeitos do aumento de CW e o número de retransmissões são analisados. Uma retransmissão contribui com o aumento da variação do atraso, pois introduz um atraso extra além do necessário numa transmissão bem sucedida. Em contrapartida, aumentando mais rápido CW, a probabilidade de uma estação escolher um valor pequeno para o BC (*Backoff Counter*) e acessar o meio diminui, aumentando o atraso. Se uma transmissão é realizada com sucesso, o atraso é pequeno, pois a probabilidade do mesmo nó acessar o meio novamente são maiores com CW no valor mínimo que

é igual a 7. Logo, o mecanismo proposto também influi na variação do atraso. Nas Figuras 5.13 e 5.14, é medida a variação do atraso para transmissões a 14 Mbps. Em ambos os gráficos da figura percebe-se que utilizando o mecanismo proposto para $CW_{máx} = 63$ a variação do atraso é menor do que a do HomePlug independente do tamanho do pacote. Conclui-se que, ao fazer mais retransmissões, o HomePlug possui uma variação do atraso maior do que a proporcionada pelo aumento rápido de CW. Logo, o efeito de aumentar a janela de transmissão rapidamente do mecanismo proposto não supera o efeito das retransmissões. Observa-se, no entanto, que para $CW_{máx} > 63$ a variação do atraso aumenta. Nesses casos, o efeito do aumento mais rápido de CW supera o introduzido pelas retransmissões. Há claramente um compromisso entre a variação do atraso e a probabilidade de colisões, e conseqüentemente entre a variação do atraso e a vazão agregada da rede.

A variação do atraso para a taxa de transmissão de 1 Mbps possui o mesmo comportamento analisado para 14 Mbps quando o número de colisões aumenta, conforme visto nas Figuras 5.15 e 5.16. Para pacotes de 1500 octetos isso ocorre a partir de 4 nós transmissores e para pacotes de 512 octetos, a partir de 2 nós.

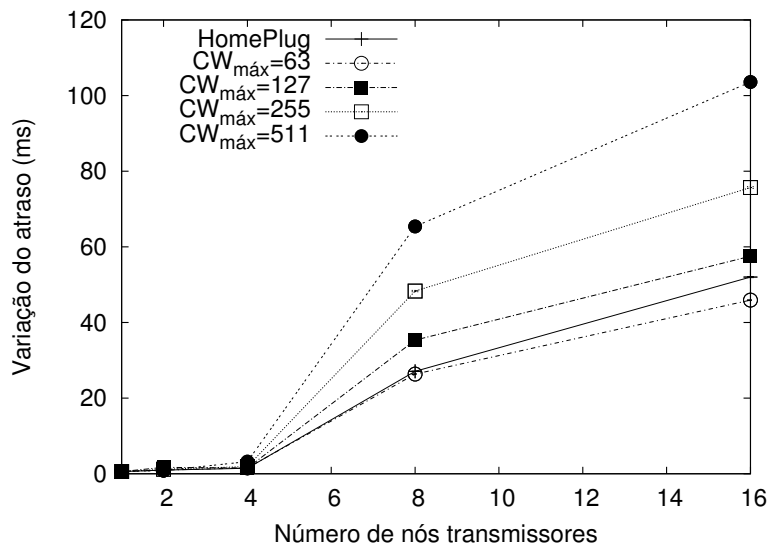


Figura 5.15: Variação do atraso dos pacotes de 1500 octetos a 1 Mbps.

Verifica-se em todas as figuras de variação do atraso (Figuras 5.13 a 5.16) que a curva do HomePlug é a que possui um crescimento mais acentuado com o aumento da carga. No HomePlug, o aumento da carga implica num aumento mais rápido de colisões do

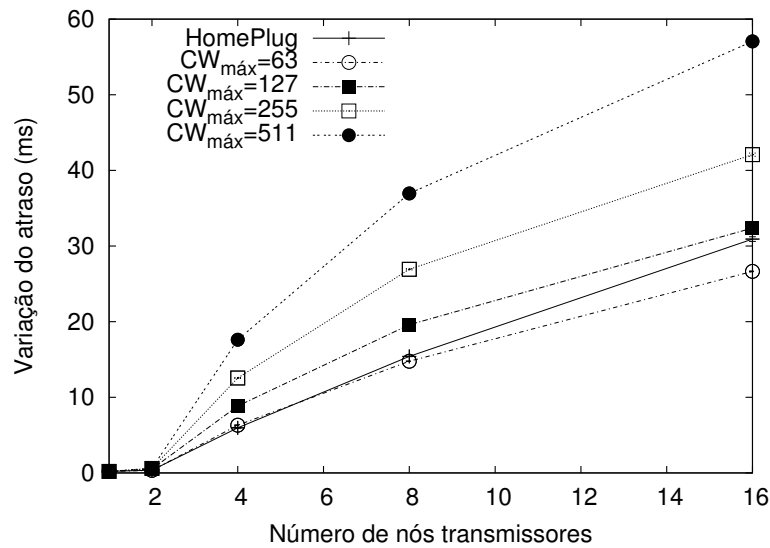


Figura 5.16: Variação do atraso dos pacotes de 512 octetos a 1 Mbps.

que o mecanismo proposto. O mecanismo proposto não só possui janelas de contenção maiores como também aumenta mais rapidamente os seus valores. Portanto uma mesma probabilidade de colisão só é atingida para uma maior carga na rede. Logo, dependendo da carga na rede é vantajoso aplicar $CW_{máx} > 63$. Nos gráficos das Figuras 5.14 e 5.16, por exemplo, com uma carga correspondente a 16 nós transmissores a variação do atraso entre o HomePlug e o mecanismo proposto para $CW_{máx} = 127$ são equivalentes. A partir das figuras de variação do atraso, pode ser observado que o aumento das colisões é mais prejudicial ao desempenho do que o aumento mais rápido de CW.

O desempenho da rede pode melhorar se o tamanho de $CW_{máx}$ for estabelecido de acordo com as características do tráfego da rede. O valor de $CW_{máx}$ pode ser escolhido ou de uma forma fixa configurando o *driver* da placa ou adaptativamente. A forma fixa exige o conhecimento prévio do número de nós e da vazão agregada da rede, a forma adaptativa exige que o *hardware* ou o *driver* seja capaz de conhecê-los dinamicamente. A complexidade na escolha de um valor para $CW_{máx}$ está relacionada com a obtenção dos parâmetros necessários.

Nas Figuras 5.17 e 5.18 são analisadas quantas transmissões consecutivas em média uma mesma estação realiza. Assim, pode-se avaliar a relação entre a variação do atraso e transmissões consecutivas. Não será mostrado o resultado para 1 nó transmissor porque

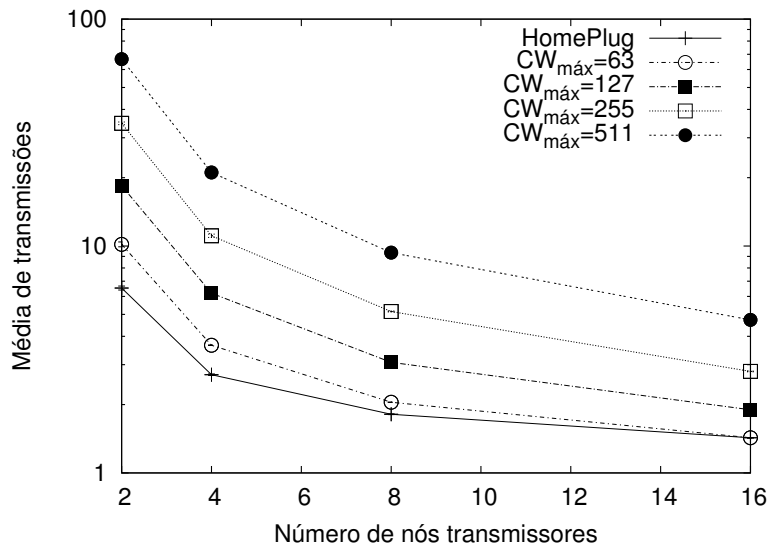


Figura 5.17: Número médio de vezes consecutivas que um nó transmite pacotes de 1500 octetos a 14 Mbps.

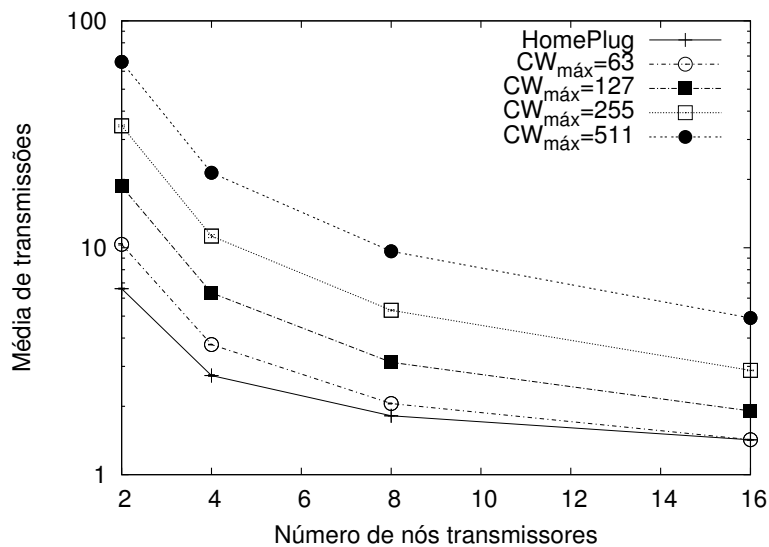


Figura 5.18: Número médio de vezes consecutivas que um nó transmite pacotes de 512 octetos a 14 Mbps.

esse é o único a transmitir.

Uma mesma estação conseguindo acessar o meio consecutivamente resultará num aumento da variação do atraso. As estações que não estão transmitindo terão que esperar mais tempo para conseguir enviar seus pacotes, introduzindo um atraso alto. Ao acessar o meio, a probabilidade de permanecer transmitindo são maiores introduzindo um

atraso baixo. Nas Figuras 5.17 e 5.18 nota-se que para transmissões a 14 Mbps o número de transmissões consecutivas vai diminuindo com o aumento do número de nós porque quanto maior o número de nós transmissores menor é a probabilidade de o mesmo nó ganhar o meio. Pode ser visto nessas figuras que independentemente do tamanho dos pacotes, quanto maior a janela, mais vezes um mesmo nó ganha o meio. Isso é previsível a partir da Equação 5.3 que mostre que com o aumento de CW a transmissão tende a ser realizada por um único nó.

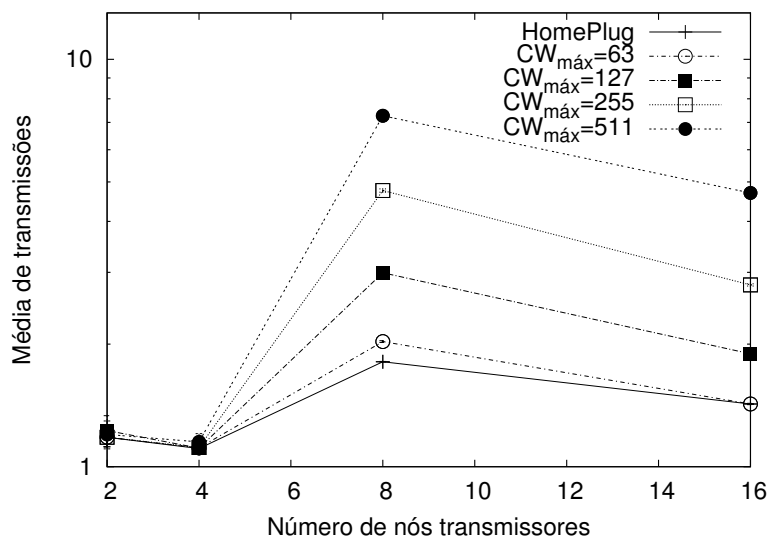


Figura 5.19: Número médio de vezes consecutivas que um nó transmite pacotes de 1500 octetos a 1 Mbps.

Nas Figuras 5.19 e 5.20 ao transmitir a 1 Mbps o número de vezes que uma mesma estação transmite na média é baixo porque a carga oferecida é baixa. Tráfego baixo implica em altas chances de sucesso numa transmissão visto que a disputa ainda não é relevante. Aumentando o número de nós transmissores, há um aumento do tráfego e um mesmo nó passa a acessar o meio repetidas vezes. O incremento de CW das outras estações aumenta a probabilidade de um nó que acabou de transmitir fazê-lo novamente. Ao continuar aumentando o número de nós transmissores, a saturação é atingida e as chances da ocorrência de transmissões seguidas diminuem conforme o caso estudado para taxas de 14 Mbps. As curvas relativas ao HomePlug diminuem mais lentamente do que as outras pelos mesmos motivos que levam a sua variação do atraso a aumentar mais rapidamente. Assim, como nas Figuras 5.13 a 5.16, as curvas do HomePlug para consecutivas trans-

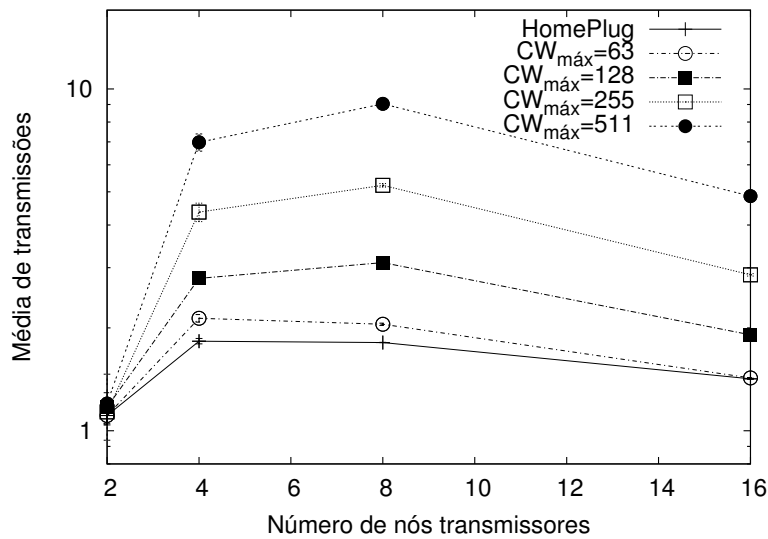


Figura 5.20: Número médio de vezes consecutivas que um nó transmite pacotes de 512 octetos a 1 Mbps.

missões são próximos da curva de $CW_{máx} = 63$.

Tendo em vista que utilizando $CW_{máx} = 63$ o desempenho foi melhor na maioria dos casos sob todos os aspectos analisados e além disso é o que introduz menor dificuldade de implementação, a escolha de $CW_{máx} = 63$ é sugerida.

Neste capítulo foi derivada uma expressão para a probabilidade de colisão e baseando-se nela observou-se que o aumento rápido do *backoff* implica num aumento da vazão agregada da rede. Essa conclusão motivou a substituição do DC por mecanismo mais eficiente baseado no DC original. Esse mecanismo deveria ser capaz de aumentar mais rapidamente a janela de contenção conforme o tráfego da rede aumentasse. Assim, na proposta, a janela de contenção é incrementada toda vez que um nó verifica a rede sendo ocupada por uma outra transmissão. Foram ainda testados valores maiores que o definido pelo HomePlug para a janela de contenção máxima ($CW_{máx}$) resultando num aumento de vazão porém num aumento conjunto da variação do atraso. Verificou-se que para $CW_{máx} = 63$ o mecanismo proposto atinge melhores resultados independentemente do tamanho dos pacotes, do número de nós e do tráfego da rede. Ainda foi mostrado que dependendo das condições da rede mesmo um $CW_{máx}$ maior que o original pode ser aplicado comprovando a eficiência da proposta e apontando a possibilidade de implemen-

tações adaptativas futuras.

Capítulo 6

Conclusão

A COMUNICAÇÃO através da fiação elétrica possui grandes vantagens, tais como, ubiquidade e pré-existência de infra-estrutura, porém, possui também grandes desafios. O maior obstáculo da transmissão de dados pelo meio elétrico é proporcionar qualidade e banda larga, essencial para aplicações futuras, adaptando-se as adversidades do canal. Uma solução proposta pelo padrão HomePlug é o aprimoramento dos mecanismos de acesso ao meio para reduzir as colisões, visto que esse tipo de rede, não garante detecção em virtude da alta atenuação e ruídos.

O padrão HomePlug em sua versão 1.0 define as especificações da camada física e o protocolo de subcamada de controle de acesso ao meio (*Medium Access Control - MAC*) que se serve do método de acesso múltiplo com prevenção de colisões (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance - CSMA/CA*). A partir da análise das suas peculiaridades uma expressão para a vazão máxima foi derivada. O mecanismo contador de adiamentos (*Deferral Counter - DC*) foi introduzido pelo HomePlug 1.0 para aprimorar o método de acesso ao meio reduzindo as colisões. Foram analisados quais os efeitos da sobrecarga do protocolo e verificou-se que a vazão máxima varia de 2 Mbps para pacotes de 160 octetos a 8 Mbps para pacotes de 1500 octetos. Esses valores correspondem a uma variação de 14,3% a 57,1% de eficiência com relação à taxa nominal de 14 Mbps. Durante a análise do emprego do DC observou-se que esse somente não faz diferença para altas cargas quanto para médias. Essa conclusão foi alcançada através de simulações empregando cargas baixas, médias e altas relativas à capacidade nominal do padrão. Foram

verificados ganhos em termos de vazão e atraso.

O ar e o meio elétrico possuem algumas características semelhantes no que se refere a alta atenuação e reflexão de sinais. Por não ser possível a detecção de colisão, tanto o padrão sem fio, o IEEE 802.11, quanto no padrão HomePlug se servem do método de acesso CSMA-CA. Assim, este trabalho analisou o desempenho do padrão IEEE 802.11 com o mecanismo de DC que existe no HomePlug. A análise considerou três abordagens para os valores de DC: uma constante, uma linear e outra exponencial. As três abordagens sugeridas demonstraram que a introdução do mecanismo DC provê um desempenho superior ao IEEE 802.11, especialmente em termos de escalabilidade. Dentre as três abordagens, a que apresentou os melhores resultados foi a constante. O protocolo de subcamada de controle de acesso ao meio do IEEE 802.11 com a inclusão do mecanismo DC manteve sua taxa de transmissão elevada mesmo para um grande número de fontes. A vazão máxima alcançada para 32 nós foi cerca de 9% e 5% mais alta que a do padrão original para pacotes de 1500 e 512 octetos, respectivamente.

Para evitar colisões, toda estação HomePlug transmite após um intervalo de tempo aleatório (*backoff*) que aumenta quando ocorrem colisões ou quando a probabilidade de ocorrência de colisões é considerada alta. Assim, uma expressão para a probabilidade de colisões foi derivada e, baseado nessa expressão, observou-se que o aumento rápido do *backoff* acarreta num aumento da vazão devido à redução da probabilidade de colisões. Essa conclusão foi alcançada através de testes de sanidade onde se verificou que, mesmo para muitos nós fontes, se um *backoff* infinito for utilizado, a vazão tende à de um único nó. Em vista disso, um mecanismo baseado no DC foi proposto e suas vantagens verificadas. Esse mecanismo procura evitar colisões ao aumentar mais rapidamente o *backoff* se comparado ao padrão HomePlug original. Foram analisados diferentes valores máximos para o tamanho da janela de contenção máxima (CW_{max}) e observou-se que quanto maior o tamanho da janela, maiores são os ganhos de vazão pois maior poderá ser o intervalo de *backoff*. O compromisso é o aumento da variação do atraso com o CW_{max} , pois quanto maior o CW_{max} maior é o número de vezes que uma mesma estação transmite consecutivamente. Contudo, mantendo-se o CW_{max} igual ao máximo original foi visto que esse mecanismo é vantajoso independentemente do tamanho dos pacotes, do número de nós e do tráfego da rede. Em seguida, ainda foi mostrado que dependendo das condições da

rede, pode ser aplicado um CW_{max} maior que o utilizado originalmente pelo HomePlug.

Como trabalhos futuros, a investigação de um DC dinâmico baseado no tráfego da rede é promissora. Idealmente, o tamanho do *backoff* máximo seria adaptativo em função das condições da rede. Essa idéia é factível, pois o padrão HomePlug 1.0 já utiliza mecanismos que verificam o estado da comunicação e configura determinados parâmetros de acordo com o nível de atenuação e ruídos do canal elétrico. Outra possibilidade seria a análise da atenuação em diferentes tipos de instalações elétricas e o estudo da influência do mesmo sobre a capacidade de transmissão. A utilização de modelos de ruído aliado ao modelo de ecos poderia representar uma abordagem mais realista do canal elétrico. Medidas de alcance poderiam ser realizadas e a verificação da conectividade da rede em função da topologia encontrada. A comunicação entre dois nós efetuada “em saltos” é uma alternativa a ser estudada para vencer adversidades do meio físico e aumentar o alcance.

Referências Bibliográficas

- [1] LEE, M. K., NEWMAN, R. E., LATCHMAN, H. A., KATAR, S. E YONGE, L. Homeplug 1.0 Powerline Communications LANs - Protocol Description and Performance Results. *International Journal of Communication Systems* 16, 5 (junho de 2003), 447–473.
- [2] ITU-T. G.989.1: Phoneline networking transceivers - Foundation. Recomendação, fevereiro de 2001.
- [3] ITU-T. G.989.2: Phoneline networking transceivers - Payload format and link layer requirements. Recomendação, novembro de 2001.
- [4] ITU-T. G.989.3: Phoneline networking transceivers - Isolation function. Recomendação, março de 2003.
- [5] IEEE. IEEE standard 802.11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. Padrão, 1999.
- [6] AMODEI JR., A., CUNHA, D. O., COSTA, L. H. M. K., RUBINSTEIN, M. G. E DUARTE, O. C. M. B. Uma Análise de Desempenho do Padrão HomePNA. Em *XXI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações (SBT'2004)* (Belém, Brasil, setembro de 2004).
- [7] AMODEI JR., A., COSTA, L. H. M. K. E DUARTE, O. C. M. B. Increasing the Throughput of the HomePNA MAC Protocol. Em *29th IEEE Conference on Local Computer Networks - LCN'2004* (Tampa, USA, novembro de 2004), pp. 294–301.

- [8] AMODEI JR., A. Um Novo Mecanismo de Acesso ao Meio para as Redes Domílicares através da Fiação Telefônica. Tese de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, março de 2005.
- [9] PAVLIDOU, N., VINCK, A. J. H., YAZDANI, J. E HONARY, B. Power Line Communications: State of the Art and Future Trends. *IEEE Communications Magazine* 41, 4 (abril de 2003), 34–40.
- [10] ABAD, J., BADENES, A., BLASCO, J., CARRERAS, J., DOMINGUEZ, V., GÓMEZ, C., IRANZO, S., RIVEIRO, J. C., RUIZ, D., TORRES, L. M. E COMABELLA, J. Extending the Power Line LAN Up to the Neighborhood Transformer. *IEEE Communications Magazine* 41, 4 (abril de 2003), 64–70.
- [11] BIGLIERI, E. Coding and Modulation for a Horrible Channel. *IEEE Communications Magazine* 41, 5 (maio de 2003), 92–98.
- [12] DAI, H. E POOR, H. V. Advanced Signal Processing for Power Line Communications. *IEEE Communications Magazine* 41, 5 (maio de 2003), 100–107.
- [13] HEO, K. L., CHO, S. M., LEE, J. W., SUNWOO, M. H. E OH, S. K. Design of a High Speed OFDM Modem System for Powerline Communications. Em *IEEE Workshop on Signal Processing Systems - SIPS'02* (outubro de 2002), pp. 264–269.
- [14] LAMPE, L. H.-J. E HUBER, J. B. Bandwidth Efficient Power Line Communications Based on OFDM. *International Journal of Electronics and Communications* 54, 1 (janeiro de 2000), 2–12.
- [15] LANGFELD, P. The Capacity of Typical Powerline Reference Channels and Strategies for System Design. Em *International Symposium on Power-Line Communications and its Applications (ISPLC)* (Malmö, Suécia, abril de 2001), pp. 271–278.
- [16] CAÑETE, F. J., CORTÉS, J. A., DIEZ, L. E ENTRAMBASAGUAS, J. T. Modeling and Evaluation of the Indoor Power Line Transmission Medium. *IEEE Communications Magazine* 41, 4 (abril de 2003), 41–47.
- [17] DOSTERT, K. M. Power Lines as High Speed Data Transmission Channels - Modelling the Physical Limits. Em *Proc. of the 5th IEEE International Symposium on*

Spread Spectrum Techniques and Applications (ISSSTA'98) (Sun City , África do Sul, setembro de 1998), vol. 2, pp. 585–589. ISBN 0-7803-4281-X.

- [18] HRASNICA, H., HAIDINE, A. E LEHNERT, R. Reservation MAC Protocols for Powerline Communications. Em *5th International Symposium on Power-Line Communications and its Applications (ISPLC'01)* (Malmö, Suécia, abril de 2001).
- [19] HRASNICA, H. E LEHNERT, R. Performance Analysis of Error Handling Methods Applied to a Broadband PLC Access Network. Em *Proc. SPIE, Internet Performance and Control of Network Systems III* (Califórnia, EUA, julho de 2002), vol. 4865, pp. 166–177.
- [20] HRASNICA, H. E LEHNERT, R. Performance Analysis of Polling Based Reservation MAC Protocols for Broadband PLC Access Networks. Em *XIVth International Symposium on Services and Local access (ISSLS'02)* (Seul, Coréia, abril de 2002), pp. 14–18.
- [21] HRASNICA, H. E LEHNERT, R. Extended ALOHA and Hybrid-Polling Reservation MAC Protocols for Broadband Powerline Communications Access Networks. Em *XVIII World Telecommunications Congress 2002 (WTC'02)* (Paris, França, setembro de 2002), pp. 22–27.
- [22] SUNDARESAN, S., ANAND, S., SRIKANTH, S. E C.N.KRISHNAN. Performance of a distributed MAC for OFDM based power line communication networks. Em *Proc. of 8th National Conference on Communications* (Bombaim, Índia, janeiro de 2002), pp. 238–243.
- [23] Homeplug Powerline Alliance. Acessada em <http://www.homeplug.org>, 2005.
- [24] LIN, Y.-J., LATCHMAN, H. A. E NEWMAN, R. E. A Comparative Performance Study of Wireless and Power Line Networks. *IEEE Communications Magazine* 41, 4 (abril de 2003), 54–63.
- [25] LEE, M. K., LATCHMAN, H. A., NEWMAN, R. E., KATAR, S. E YONGE, L. Field Performance Comparison of IEEE 802.11b and Homeplug 1.0. Em *IEEE*

- Conference on Local Computer Networks (LCN'02)* (novembro de 2002), pp. 598–599.
- [26] KUO, W.-K. E KUO, C.-C. Enhanced Backoff Scheme in CSMA/CA for IEEE 802.11. Em *In Proc. IEEE VTC-Fall* (Orlando, FL, outubro de 2003), pp. 2809–2813.
- [27] KWON, Y., FANG, Y. E LATCHMAN, H. A novel MAC Protocol with Fast Collision Resolution for Wireless LANs. Em *In Proc. IEEE Infocom 2003* (2003).
- [28] CAMPISTA, M. E. M., VELLOSO, P. B., COSTA, L. H. M. K. E DUARTE, O. C. M. B. Uma Análise da Capacidade de Transmissão na Rede de Energia Elétrica Domiciliar. Em *XXI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações - SBT'04* (Belém, Brasil, setembro de 2004).
- [29] CAMPISTA, M. E. M., COSTA, L. H. M. K. E DUARTE, O. C. M. B. Um Mecanismo Eficiente de Redução de Colisões para a Transmissão de Dados Através da Fiação Elétrica Domiciliar. Em *A ser publicado no XXIII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores (SBRC'05)* (maio de 2005).
- [30] L.BONONI, M.CONTI E L.DONATIELLO. Design and Performance Evaluation of a Distributed Contention Control (DCC) Mechanism for IEEE 802. 11 Wireless Local Area Networks. Em *Proc. of The First ACM International Workshop on Wireless Mobile Multimedia (WoWMoM'98)* (Dallas, Texas, outubro de 1998), pp. 59–67.
- [31] VELLOSO, P. B., CAMPISTA, M. E. M., CUNHA, D. O., COSTA, L. H. M. K. E DUARTE, O. C. M. B. Analysing the Performance of Wireless Local Area Networks with an Improved Collision Avoidance Mechanism. *Aceito para a publicação na Revista da Sociedade Brasileira de Telecomunicações* (janeiro de 2005).
- [32] BROWN, P. A. Power line communications - past, present, and future. Em *Proc. of International Symposium on Power-line Communications and its Applications (ISPLC'99)* (Lancaster, Reino Unido, setembro de 1999), pp. 1–8.
- [33] VELLOSO, P. B., CUNHA, D. O., AMODEI JR., A., RUBINSTEIN, M. G. E DUARTE, O. C. M. B. Redes Domiciliares: Desafios das Tecnologias sem Novos fios.

Em *Minicursos do XXII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores (SBRC'04)* (Gramado, Brasil, maio de 2004), pp. 221–269.

- [34] ZIMMERMANN, M. E DOSTERT, K. An Analysis of the Broadband Noise Scenario in Powerline Networks. Em *International Symposium on Power-Line Communications and its Applications (ISPLC'00)* (Limerick, Irlanda, abril de 2000), pp. 131–138.
- [35] ZUBERI, K. H. Powerline Carrier (PLC) Communications Systems. Tese de Mestrado, IT-Universitetet, Suécia, setembro de 2003.
- [36] SUTTERLIN, P. E DOWNEY, W. A power line communication tutorial - challenges and technologies. Relatório técnico, Echelon Corporation, 1999.
- [37] IEEE. IEEE Standard 802.1d: Media access control (MAC) bridges. Suplemento, 1998.
- [38] GARDNER, S., MARKWALTER, B. E YONGE, L. Homeplug Standard Brings Networking to the Home. Relatório Técnico 12, CommsDesign.com, dezembro de 2000. Acessada em <http://www.commsdesign.com/main/2000/12/0012feat5.htm>.
- [39] Intellon. Acessada em <http://www.intellon.com>, 2005.
- [40] Linksys. Acessada em <http://www.linksys.com>, 2005.
- [41] Cisco. Acessada em <http://www.cisco.com>, 2004.
- [42] Gigafast. Acessada em <http://www.gigafast.com>, 2004.
- [43] Naxos. Acessada em <http://www.naxos.com.br>, 2004.
- [44] Innovus. Acessada em <http://www.innovus.com.br>, 2005.
- [45] Kelow. Acessada em <http://www.kelow.com.br>, 2004.
- [46] CHANG, R. Gadgets Home Electronic Network May Be as Close as the Nearest Power Outlet. Relatório técnico, wsj.com, julho de 2004. Acessada em http://www.intellon.com/press/media/wsj_lr_072804.pdf.
- [47] DOSTERT, K. *Powerline Communications*, 1^a ed. Prentice-Hall, 2001. ISBN 0130293423.

- [48] FALL, K. E VARADHAN, K. *The ns Manual*. UC Berkeley, LBL, USC/ISI, and Xerox PARC, abril de 2002. Acessada em <http://www.isi.edu/nsnam/ns/ns-documentation.html>.
- [49] EBERT, J. E WILLIG, A. A Gilbert-Elliot Bit Error Model and the Efficient Use in Packet Level Simulation. TKN Technical Reports Series of Technical University Berlin., mar 1999. Disponível em citeseer.ist.psu.edu/ebert99gilbertelliott.html.
- [50] FOERSTER, J. E LIEBETREU, J. FEC Performance of Concatenated Reed-Solomon and Convolutional Coding with Interleaving. Relatório técnico, IEEE, junho de 2000. Acessada em http://iee802.org/16/phy/contrib/802161pc-00_33.pdf.
- [51] VELLOSO, P. B., RUBINSTEIN, M. G. E DUARTE, O. C. M. B. Uma Análise da Capacidade de Transmissão de Voz em Redes ad hoc. Em *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores* (Natal, Brasil, maio de 2003), pp. 775–786.
- [52] JOHNSON, D. B. E MALTZ, D. A. Dynamic source routing in ad hoc wireless networks. Em *Mobile Computing*, T. Imielinski e H. Korth, Eds. Kluwer Academic Publishers, 1996, ch. 5, pp. 153–181.
- [53] PERKINS, C. E ROYER, E. Ad-hoc on-demand distance vector routing. Em *2nd IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications* (New Orleans, USA, fevereiro de 1999), pp. 90–100.
- [54] IEEE. IEEE Standard 802.11a: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications - High-speed Physical Layer in the 5 GHz Band. Suplemento, 1999.
- [55] IEEE. IEEE Standard 802.11b: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications - High-speed Physical Layer in the 2.4 GHz Band. Suplemento, 1999.
- [56] IEEE. IEEE Standard 802.11g: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications - High-speed Physical Layer in the 2.4 GHz Band. Suplemento, 2003.

- [57] IEEE. 802.11e draft 3.1: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications - Medium Access Control (MAC) Enhancements for Quality of Service (QoS). Draft, 2002.