UM NOVO MECANISMO DE ACESSO AO MEIO PARA REDES DOMICILIARES ATRAVÉS DA FIAÇÃO TELEFÔNICA

Aurelio Amodei Junior

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.

____

Artur Ziviani, Dr.

____

Prof. Helio Waldman, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MARÇO DE 2005

AMODEI JUNIOR, AURELIO

Um novo mecanismo de acesso ao meio para redes domiciliares através da fiação telefônica [Rio de Janeiro] 2005

XIII, 70 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia Elétrica, 2005)

Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE

1. Redes domiciliares
2. Controle de acesso ao meio
3. HomePNA

I. COPPE/UFRJ II. Titulo (série)

A meus pais, Aurelio e Angela, a minha irmã Juliana,
e a minha querida Monique.

Agradecimentos

Primeiramente a Deus, por me permitir ter chegado até aqui.

À minha família, principalmente meus pais e minha irmã, por todo o amor, carinho e orientação durante a minha vida.

À minha querida Monique e sua família, por todo o amor, companheirismo e suporte em todos os momentos.

Aos meus orientadores Otto Carlos e Luís Henrique por toda a amizade, confiança e orientação, além de estarem sempre presentes para dar conselhos e ajudar a superar todos os obstáculos.

A toda a equipe do GTA, em particular aos amigos Miguel, Doc, Pedro, Bicudo, Igor, Rafael, Guilherme, Rubi e Rezende, pela amizade e pela ajuda com o desenvolvimento da tese.

Ao professor Helio Waldman e ao pesquisador Artur Ziviani meus agradecimentos por terem aceitado participar da banca examinadora.

A todos os funcionários do Programa de Engenharia Elétrica da COPPE/UFRJ, 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.)

UM NOVO MECANISMO DE ACESSO AO MEIO PARA REDES DOMICILIARES ATRAVÉS DA FIAÇÃO TELEFÔNICA

Aurelio Amodei Junior

Março/2005

Orientadores: Otto Carlos Muniz Bandeira Duarte
Luís Henrique Maciel Kosmalski Costa
Programa: Engenharia Elétrica

Este trabalho propõe um novo mecanismo de acesso ao meio para a subcamada de controle de acesso ao meio (MAC) dos padrões de redes domiciliares através da fiação telefônica HomePNAv2 e HomePNAv3. O mecanismo se baseia numa técnica de agregação de alguns dos *slots* de prioridade disponíveis, visando diminuir o número de colisões na rede e, conseqüentemente, aumentar a vazão agregada. Além disso, o mecanismo não requer a alteração dos padrões, podendo ser implementado acima da subcamada MAC dos padrões atuais. Os resultados mostram que o mecanismo proposto é capaz de aumentar a vazão agregada da rede, obtendo ganhos de até 44% e 36% para os padrões HomePNAv2 e HomePNAv3, respectivamente. Analisa-se também a influência do uso do mecanismo proposto sobre o atraso da rede. É mostrado que o atraso médio não é alterado, sendo ligeiramente menor que o atraso médio original. Mostra-se ainda que o uso do mecanismo aumenta a variação de atraso da rede já que para aumentar a vazão agregada o mecanismo introduz um adiamento maior para alguns quadros. Dos resultados obtidos pode-se constatar que o mecanismo proposto diminui o número de colisões e aumenta a vazão sem alteração significativa no atraso médio.

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

A NEW MEDIUM ACCESS CONTROL MECHANISM FOR HOME PHONELINE NETWORKS

Aurelio Amodei Junior

March/2005

Advisors:	Otto Carlos Muniz Bandeira Duarte
	Luís Henrique Maciel Kosmalski Costa
Department:	Electrical Engineering

This work proposes a new medium access control mechanism for the Medium Access Control (MAC) sublayer of the home phoneline network standards HomePNAv2 and HomePNAv3. The mechanism is based on a priority slots aggregation technique, that aims to reduce the number of collisions in the network and, as a consequence, increasing the total aggregated throughput. Furthermore, this mechanism does not require modifying the standards, since it can be implemented over the current MAC sublayer. Results show that the proposed mechanism increases the aggregated throughput, achieving gains of up to 44% and 36% for HomePNAv2 and HomePNAv3, respectively. We also analyze how the mechanism influences the network delay. The average delay is not affected, as the use of the proposed mechanism results in a slightly lower average delay than the original one. Moreover, we show that the jitter increases because of the deferral of random frames in order to avoid collisions. The results show that the proposed mechanism avoids collisions, increases the throughput and does not significantly affect the delay.

Sumário

Lista de Figuras

Lista de Tabelas

Lista de Acrônimos

ADSL :	*Asynchronous Digital Subscriber Line*;
AMAC :	*Asynchronous Medium Access Control*;
AQAM :	*Adaptive Quadrature Amplitude Modulation*;
AS :	*Aggregated Slots*;
BL :	*Backoff Level*;
CRC :	*Cyclic Redundancy Check*;
CSMA/CA :	*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*;
CSMA/CD :	*Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection*;
DFPQ :	*Distributed Fair Priority Queuing*;
DSL :	*Digital Subscriber Line*;
EOF :	*End Of Frame*;
FC :	*Frame Control*;
FCC :	*Federal Communications Commission*;
FCS :	*Frame Check Sequence*;
FDQAM :	*Frequency Diverse Quadrature Amplitude Modulation*;
HCS :	*Header Check Sequence*;
HomePNA :	*Home Phoneline Networking Alliance*;
IEEE :	*Institute of Electrical and Electronics Engineers*;
IFG :	*Inter-Frame Gap*;
IPv4 :	*Internet Protocol version 4*;
ITU-T :	*International Telecommunication Union - Telecommunication Standardization Sector*;

MAC : *Medium Access Control*;

MBL : *Maximum Backoff Level*;

ns : *network simulator*;

PE : *Payload Encoding*;

PRI : *Priority*;

PSD : *Power Spectral Density*;

QAM : *Quadrature Amplitude Modulation*;

QoS : *Quality of Service*;

RF : Rádio Frequência;

RSVD : *Reserved*;

SI : *Scramble Initialization*;

SMAC : *Synchronous Medium Access Control*;

VDSL : *Very-High-Data-Rate Digital Subscriber Line*;

Capítulo 1

Introdução

ASSISTE-SE hoje a uma grande oferta de produtos de diferentes tecnologias para redes locais que podem ser utilizados para interconectar computadores dentro de nossas casas. Esse tipo de rede, denominado rede domiciliar, tem como objetivo fazer a interconexão dos computadores e dispositivos de rede dentro de nossos lares, fornecendo, entre outros serviços, o compartilhamento de acesso à Internet e de recursos como impressoras e *scanners* [1].

Entre as principais tecnologias encontram-se as redes cabeadas, que requerem a instalação de uma infra-estrutura de cabeamento, e as redes sem fio que vêm tendo um enorme sucesso comercial. Além destas soluções já tradicionais, encontra-se também como solução as chamadas redes sem novos fios, que são o alvo deste trabalho. Estas redes, apesar de recentes, utilizam o conceito antigo de usar para a transmissão de dados os fios de uma infra-estrutura já existente como os fios das instalações de televisão a cabo, telefônicas ou elétricas.

1.1 Motivação

As tecnologias de redes domiciliares podem ser classificadas em com fio, sem fio e sem novos fios. Na tecnologia com fio, a rede Ethernet (IEEE 802.3) [2] é a solução convencional, mas a imensa maioria dos lares não possui a infra-estrutura de cabeamento necessária e o custo de instalação do cabeamento é alto. A solução sem fio, representada principalmente pelo padrão IEEE 802.11 [3, 4], vem tendo um grande sucesso comercial nos últimos anos e possui uma grande diversidade de fabricantes e produtos. Apesar dessa tecnologia ser imbatível para aplicações que se servem de dispositivos móveis, alguns problemas relacionados a desempenho, cobertura e garantia de qualidade de serviço (QoS - *Quality of Service*) vêm sendo constatados, além do clássico problema de segurança. Nos últimos anos, a solução sem novos fios recebeu uma atenção especial. Essa tecnologia utiliza uma infra-estrutura de cabeamento já existente na casa, como os fios das instalações de televisão a cabo, telefônicas ou elétricas. Vários fabricantes e organismos de normalização procuram padronizar essas redes que foram denominadas redes domiciliares através da fiação de televisão a cabo (*Home Cable Networks*), redes domiciliares através da fiação telefônica (*Home Phoneline Networks*) e redes domiciliares através da fiação elétrica (*Home Powerline Networks*).

Uma vantagem da rede domiciliar que se serve da fiação elétrica é sua ubiqüidade, pois há muito mais tomadas de energia elétrica que de telefone, facilitando a interconexão de dispositivos [5, 6, 7, 8]. No entanto, a fiação telefônica possui como vantagem a privacidade, já que o par telefônico é individual por assinante, constituindo um meio seguro [9]. O mesmo não ocorre nas redes de fiação elétrica e sem fio que estão sujeitas a ação de bisbilhoteiros oportunistas. Apesar da fiação telefônica utilizar um cabeamento com par trançado similar ao utilizado pelo Ethernet, há uma grande diferença entre ambos, pois o Ethernet possui um cabeamento dedicado ponto a ponto. Na fiação telefônica há apenas um par trançado compartilhado por toda a casa, que pode ter terminações em aberto, ou não casadas na freqüência de interesse, gerando reflexões. No entanto, o par trançado usado na fiação telefônica apresenta uma menor atenuação e maior banda passante em relação à fiação elétrica, o que o torna um meio menos hostil para a transmissão de dados. Isso torna interessante a opção de utilizar a fiação telefônica, já que ela possui um meio de transmissão mais seguro e menos hostil que as redes sem fio e através da fiação elétrica, e não necessitam da instalação de infra-estrutura de cabeamento, como no Ethernet.

O único padrão comercializado hoje em dia para redes domiciliares através da fiação telefônica é o HomePNA (*Home Phoneline Networking Alliance*), criado por uma aliança de empresas, de mesmo nome. Atualmente, os produtos comercializados são da segunda versão deste padrão (HomePNAv2), e já há a terceira versão que foi lançada em 2003. Desta forma, o trabalho realizado nesta tese aborda estas duas versões do padrão, HomePNAv2 e HomePNAv3.

1.2 Trabalhos Relacionados

Atualmente a área de pesquisa em redes domiciliares vem apresentando um grande crescimento. Com o grande leque de possibilidades, cresce também a oportunidade de pesquisa nessa área. Dutta-Roy [10] apresenta algumas das soluções disponíveis para redes domiciliares, descrevendo brevemente as suas funcionalidades, e fazendo uma comparação entre algumas das tecnologias sem fio existentes. Ele também apresenta uma solução de integração da rede domiciliar e o acesso à Internet para o caso da utilização da fiação elétrica. Neste caso a fiação elétrica pode também ser utilizada para se prover o acesso à Internet, fornecendo uma solução completa de conexão à Internet para toda a casa. Waring *et al.* [11] também apresentam algumas das tecnologias disponíveis, e, da mesma forma que Dutta-Roy, analisam os modos de se interconectar as redes domiciliares com redes de acesso externas.

A pesquisa na área de redes domiciliares através da fiação telefônica e do padrão HomePNA abrange duas áreas principais, a camada física e a subcamada de controle de acesso ao meio (MAC - *Medium Access Control*). A seguir são apresentados alguns trabalhos relacionados à camada física. Bisaglia *et al.* [12] apresentam uma modelagem do meio físico para o HomePNA, em função da sua topologia. Eles comparam os resultados obtidos no modelo com os resultados medidos em topologias similares, mostrando a validade do modelo utilizado. Eles propõem também a utilização de algumas técnicas de equalização para contornar o problema das reflexões na rede, mostrando o desempenho obtido para as duas taxas de símbolo do HomePNAv2. Bisaglia e Castle [13, 14] também analisam arquiteturas de um receptor HomePNA, e comparam técnicas de equalização para o HomePNAv2. Eles mostram que algumas técnicas podem apresentar melhor desempenho para certas modulações e taxas de símbolo. Lao [15] propõe uma modelagem do par trançado utilizado na fiação telefônica através de um modelo de linhas de transmissão. Ele compara os resultados do modelo com os resultados obtidos por medição, mostrando que esse modelo é válido desde que se conheçam os parâmetros de resistência, indutância, capacitância e condutância do cabo utilizado.

Em relação à subcamada MAC que é o foco principal deste trabalho, Chung *et al.* [16] apresentam uma análise matemática da vazão de saturação do HomePNAv2. Esse trabalho faz uma análise do número médio de colisões em função do número de nós na rede. A vazão de saturação é definida como a vazão agregada da rede para um dado número de nós quando todos os nós transmitem quadros um após o outro, ininterruptamente. Esta é a mesma abordagem utilizada nesta tese. Kim *et al.* [17] fazem uma análise similar para o modo assíncrono do HomePNAv3, apresentando o mecanismo de gerenciamento de colisões utilizado por este padrão. Essa análise mostra que este mecanismo de gerenciamento de colisões diminui o número de colisões do HomePNAv3, tornando-o, sob esse aspecto, mais eficiente que o HomePNAv2. No entanto, o HomePNAv3 possui uma limitação de apenas 27 nós na rede, que não existe no HomePNAv2. Loh e Ozturk [18] fazem uma análise matemática e uma validação por simulação do HomePNAv2. Para isso, eles fazem uma análise matemática do número médio de colisões por quadro transmitido, idêntica à análise feita por Chung *et al.* [16]. Eles também desenvolvem um simulador da subcamada MAC do HomePNAv2, e comparam os resultados matemáticos com os resultados obtidos através de simulação. Também é apresentado o esquema de prioridades do HomePNAv2, analisando como parâmetro de QoS a variação do atraso (*jitter*) da rede. Kangude *et al.* [19] também apresentam uma análise do protocolo MAC do HomePNAv2 e do seu mecanismo de resolução de colisão. Neste trabalho, eles mostram que o uso de 3 *slots* para a resolução de colisão, como definido pelo padrão, não é ótimo em alguns casos. Eles sugerem então que o número de *slots* para a resolução de colisão varie de acordo com a carga da rede para melhorar a eficiência da rede, apontando para a possibilidade da criação de um mecanismo adaptativo, que varie esse parâmetro dinamicamente. Sterenson [20] analisa os parâmetros de QoS providos pelos modos síncronos e assíncronos do HomePNAv3. São feitas análises amostrais do atraso e da variação do atraso da rede, mostrando que o modo síncrono é capaz de oferecer parâmetros de QoS melhores que o modo assíncrono. Além disso, ele também faz uma análise da influência do meio físico sobre a vazão obtida na rede, e da técnica de agregação de pacotes utilizada pelo HomePNAv3. Sub e Greaves [21] apresentam uma análise por simulação do desempenho de uma rede HomePNAv2. Nesta simulação são utilizados modelos específicos do meio físico e de tráfego para o caso escolhido, para efeito de comparação com os resultados obtidos por medição. Eles mostram também a degradação da rede quando se utiliza um meio físico com muito ruído.

1.3 Objetivos

Entre os trabalhos relacionados apresentados, a maior parte se detém em análises do desempenho do HomePNA, e comparações dos resultados apresentados com resultados reais ou de simulação. Apenas Kangude *et al.* [19] apresentou uma proposta para melhorar o desempenho da rede.

O principal objetivo deste trabalho é a proposta de um novo mecanismo de acesso ao meio para a subcamada MAC dos padrões HomePNAv2 e HomePNAv3 [1, 9]. Este mecanismo faz a agregação de alguns *slots* de prioridades mais altas, fazendo com que os quadros de maior prioridade escolham um desses *slots* aleatoriamente. Com isso, consegue-se diminuir o número de colisões na prioridade mais alta e, conseqüentemente, aumentar a vazão agregada da rede. Além disso, este mecanismo não requer a alteração dos padrões HomePNAv2 e HomePNAv3 já existentes, podendo ser implementado como uma nova subcamada acima da subcamada MAC dos padrões atuais. O uso dos padrões HomePNAv2 e HomePNAv3 com o mecanismo proposto neste trabalho serão doravante denominados HomePNAv2+ e HomePNAv3+, respectivamente.

Primeiramente, o presente trabalho apresenta uma análise de desempenho dos padrões existentes HomePNAv2 e HomePNAv3 [22]. Essas análises foram feitas através de simulações, para as quais foram criados módulos de simulação HomePNAv2 e HomePNAv3. Para estas simulações foi utilizada uma condição de máxima ocupação da rede, onde todos os nós transmitem quadros ininterruptamente. Essa vazão também é conhecida como vazão de saturação [16, 17]. Então é feita também uma análise de desempenho do mecanismo proposto que mostra o comportamento e o ganho obtido nos novos padrões

HomePNAv2+ e HomePNAv3+ [23]. Para isso, o mecanismo foi também implementado no simulador, e é feita uma primeira etapa de determinação de parâmetros, onde é encontrado o melhor valor para o número de *slots* agregados no mecanismo para os dois padrões, HomePNAv2+ e HomePNAv3+. Com esses parâmetros, determina-se então a vazão obtida para os dois padrões, e os seus ganhos em relação aos padrões originais. É apresentada também uma análise do atraso médio e da variação do atraso para mostrar o efeito do mecanismo proposto sobre o atraso da rede.

Este trabalho está organizado da seguinte forma. O Capítulo 2 descreve as principais características das redes domiciliares através da fiação telefônica, e descreve o funcionamento do padrão HomePNA. No Capítulo 3 são apresentadas as análises de desempenho dos padrões HomePNAv2 e HomePNAv3. O novo mecanismo de acesso ao meio proposto para o HomePNA e os resultados obtidos são apresentados no Capítulo 4. Por fim, no Capítulo 5 são apresentadas as conclusões deste trabalho e os possíveis trabalhos futuros.

Capítulo 2

As Redes Domiciliares Através da Fiação Telefônica

AS redes domiciliares através da fiação telefônica buscam utilizar o cabeamento telefônico de pares metálicos trançados já existente nas casas para permitir a construção de sistemas de comunicação de dados a alta velocidade. Desta forma, a rede domiciliar utiliza a mesma fiação responsável pela interconexão do assinante com a central telefônica. A primeira vista, pode parecer trivial fazer um sistema de comunicação com pares metálicos trançados, pois a rede Ethernet se serve deste mesmo tipo de meio físico e consegue taxas de transmissões de 10 Mbps (10Base-T), 100 Mbps (100Base-T) e até 1 Gbps (1000Base-T). No entanto, existem diferenças fundamentais na topologia, na qualidade do meio físico e na quantidade de pares trançados a serem usados.

Na rede Ethernet com par trançado a topologia é estrela com um elemento centralizador (*hub* ou comutador) e as estações nas pontas da estrela. Assim, as comunicações entre cada estação e o elemento centralizador são dedicadas e do tipo ponto a ponto, ou seja, um cabo Ethernet de pares trançados por dispositivo a ser conectado. A fiação telefônica, por outro lado, não apresenta uma topologia bem definida, podendo possuir um número variável de tomadas telefônicas, conforme ilustra a Figura 2.1. Nesta figura, os pontos de acesso (PA) são as tomadas telefônicas, onde podem estar ligados um ou mais dispositivos, entre aparelhos telefônicos, fac-símiles ou dispositivos HomePNA. Desta forma, ao invés de uma topologia estrela com comunicações ponto a ponto dedicadas, o HomePNA

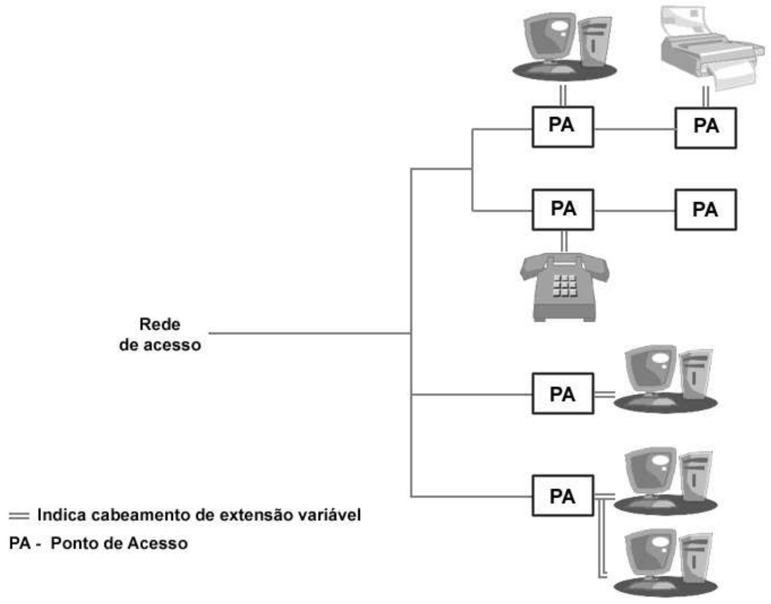


Figura 2.1: Topologia da rede domiciliar através da fiação telefônica.

na fiação telefônica possui uma topologia híbrida em árvore e multiponto que torna o problema de reflexões de sinal, devido a descasamento de impedância, muito mais grave que na rede Ethernet de par trançado.

Além disso, na rede Ethernet o cabo de par trançado possui quatro pares onde todos os pares são conectados de um lado na estação e do outro no elemento central (*hub* ou comutador) através de um conector tipo RJ45. A rede Ethernet pode se servir, simultaneamente, de mais de um par para aumentar o desempenho utilizando, por exemplo, um par para a transmissão, um para a recepção e outros para transmissão ou recepção. No Gigabit Ethernet, usa-se os quatro pares metálicos simultaneamente para se atingir a taxa de transmissão de 1 Gbps, transmitindo-se efetivamente 250 Mbps em cada par. No sistema telefônico cada linha corresponde a um par metálico e, portanto, a rede domiciliar se baseia em um único par que é compartilhado para interconexão de todos os dispositivos. Esta particularidade da fiação telefônica elimina a possibilidade de se transmitir e receber sinais simultaneamente (modo *full-duplex*).

A qualidade dos cabos utilizados nas redes Ethernet é muito superior à dos cabos normalmente empregados para o serviço de telefonia em uma residência. O cabo usado para

100 Mbps é geralmente de categoria 5 e o usado em residências é de categoria 3 ou pior, implicando transmissões de baixa qualidade. Existem ainda cabeamentos residenciais que se servem de cabos planos. Cabos planos possuem dois fios em paralelo que formam uma antena simples. Quando os fios são trançados, as ondas de diferentes partes dos fios se cancelam, resultando em menor interferência cruzada (*crosstalk*) e interferência externa. Portanto, os cabos planos são ainda piores para altas taxas de transmissão. Assim, tanto a topologia como a baixa qualidade do cabo tornam a fiação telefônica um ambiente hostil para se atingir altas velocidades e requerem o uso de técnicas avançadas de processamento de sinais como, por exemplo, técnicas de equalização para lidar com as reflexões do sinal.

A importância da equalização nas redes domiciliares através da fiação telefônica pode ser observada na Figura 2.1 onde as terminações da rede são arbitrárias, ou seja, diferentes equipamentos, ou mesmo nenhum equipamento, podem estar conectados a um determinado ponto de acesso (tomada do telefone). Assim, a terminação pode estar casada (em torno de 100 Ω na freqüência de interesse), pode ser capacitiva (em torno de 300 pF para um telefone fora do gancho), ou estar em aberto [12]. Segmentos com impedância casada podem representar estações ou uma possível ligação à central telefônica. Terminações capacitivas representam telefones fora do gancho, secretárias eletrônicas etc., enquanto que terminações abertas representam pontos de acesso não utilizados nos quais não foram feitas tentativas de casamento de impedância. Os circuitos em aberto e terminações não casadas são os principais responsáveis pela reflexão dos sinais nas redes através da fiação telefônica. Os descasamentos de impedância causam padrões complexos de reflexão no domínio do tempo pela rede, e isso implica em faixas estreitas de alta atenuação no domínio da freqüência, que são chamadas de *notches*. Além disso, pequenas mudanças nos parâmetros da rede podem prejudicar seriamente a comunicação, por exemplo, mudando um *notch* de uma freqüência relativamente inofensiva para uma freqüência de grande importância para o funcionamento da rede. Um outro problema que surge com a utilização da fiação telefônica como meio de comunicação é o ruído. O ruído na fiação telefônica pode ser oriundo da captação de Rádio-Freqüência (RF), da diafonia, de equipamentos conectados à rede telefônica ou do acoplamento com a rede elétrica que gera um ruído do tipo impulsivo. A rede deve ser capaz de operar, por exemplo, quando o sinal de toque é enviado da central para o assinante, ou durante a transmissão de um fax.

2.1 O Padrão HomePNA

A idéia de realizar uma rede domiciliar em linha telefônica foi inicialmente proposta pela empresa Tut System que desenvolveu uma tecnologia que permitia uma taxa de transmissão de 1 Mbps. Em junho de 1998, as companhias 3Com, Agere Systems, AMD, AT&T Wireless Services, Broadcom, Compaq, Conexant, Hewlett-Packard, Intel, Motorola e 2Wire fundaram a *Home Phoneline Networking Alliance*, conhecida como HomePNA [26]. Hoje este consórcio conta com mais de 150 empresas. Esta aliança é uma associação sem fins lucrativos que reúne indústrias ligadas às áreas de redes, telecomunicações, hardware, software e eletrodomésticos objetivando garantir a adoção de uma única especificação de modo a promover o rápido desenvolvimento de produtos e sua interoperabilidade.

A primeira especificação, a HomePNAv1 [27], foi publicada em junho de 1999 e se baseia na proposta tecnológica da empresa Tut System de 1 Mbps. Uma segunda geração desta tecnologia foi proposta pela empresa Broadcom empregando equalização adaptativa e modulação de amplitude em quadratura (QAM - *Quadrature Amplitude Modulation*) para aumentar a taxa de transmissão. Em março de 2000, foi publicada a especificação HomePNAv2 [27, 28, 29] que possui taxas de transmissão de até 32 Mbps. A aliança também vem procurando tornar suas especificações padrões internacionais. Nesse sentido, a ITU-T, baseando-se na especificação HomePNAv2, estabeleceu as recomendações G.989.1 [30], G.989.2 [31] e G.989.3 [32]. As recomendações G.989.1 e G.989.2 apresentam a especificação do HomePNAv2, definindo a camada física e a subcamada MAC. Já a recomendação G.989.3 especifica as características de um filtro para fazer o isolamento espectral entre a fiação domiciliar e a rede de acesso externa na faixa de freqüências utilizada pelo HomePNAv2, de forma a se minimizar o efeito da interferência externa. Baseado na segunda versão, foi criado em 2003 o HomePNAv3 [33]. O novo padrão possui 2 modos na subcamada MAC, o modo síncrono (SMAC - *Synchronous* MAC) e o assíncrono (AMAC - *Asynchronous* MAC) [20] [34]. O HomePNAv3 alcança taxas de transmissão de até 128 Mbps, com extensão opcional para até 240 Mbps [33]. O mecanismo proposto neste trabalho foi originalmente criado para o HomePNAv2. No entanto, este mecanismo também se aplica ao modo AMAC do HomePNAv3, por ser compatível com o HomePNAv2. Assim, neste trabalho serão abordados o HomePNAv2 e o HomePNAv3 no modo AMAC.

2.2 HomePNAv2

A faixa de freqüências usada pelo padrão HomePNAv2 é de 4 a 10 MHz. A freqüência inferior foi definida de forma a não interferir nos serviços já oferecidos como a telefonia e outros serviços de acesso, como o DSL (*Digital Subscriber Line*). Como ilustrado na Figura 2.2, o serviço telefônico convencional ocupa, tipicamente, a faixa até 4 kHz, e os sistemas DSL mais utilizados como forma de acesso residencial ocupam a faixa até 2 MHz. Análises sobre a resposta do canal mostraram que a banda acima de 10 MHz é mais sensível aos efeitos das reflexões [29] e à diafonia. Para sistemas cuja banda se sobrepõe à especificada para o padrão HomePNAv2, como o VDSL (*Very-High-Data-Rate Digital Subscriber Line*), é necessária a inclusão de uma função de isolamento para eliminar a interferência.

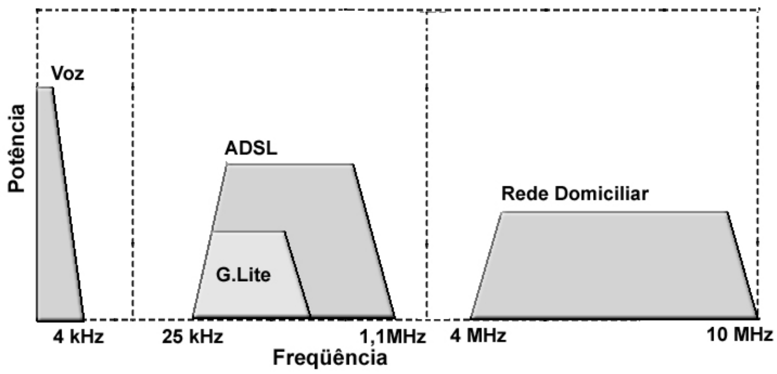


Figura 2.2: Multiplexação dos sistemas de voz, ADSL e HomePNAv2 em freqüência.

Além da compatibilidade com outros serviços já existentes, o uso da fiação telefônica torna necessário que os dispositivos de rede domiciliar sigam algumas regulamentações específicas. Existem regulamentações para dispositivos ou terminais ligados à linha telefônica que tratam de questões como o nível máximo de sinal a ser transmitido. Outras questões indiretamente ligadas ao cabeamento telefônico também devem ser consideradas, como a irradiação de sinais de RF. A Figura 2.3 mostra a máscara de densidade espectral de potência (PSD - *Power Spectral Density*) definida para os transmissores HomePNAv2 [30]. De acordo com a potência máxima de transmissão, a norma especifica que um alcance de até 300 metros pode ser atingido, podendo variar de acordo com a instalação telefônica da casa. Esse alcance já seria suficiente para cobrir a grande maioria dos domicílios.

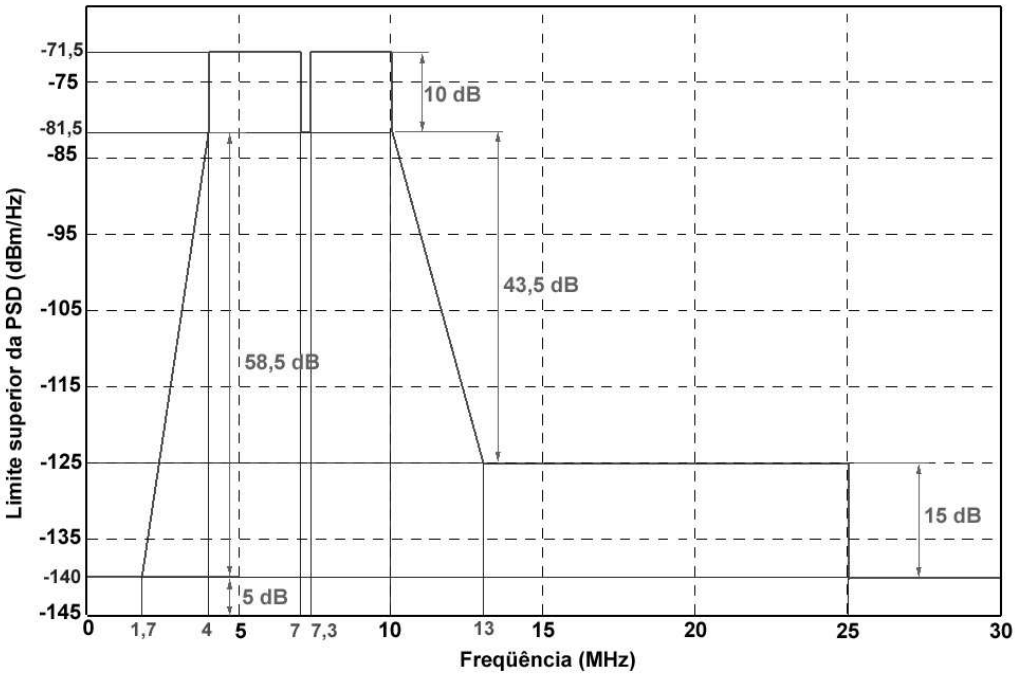


Figura 2.3: Máscara de densidade espectral de potência do HomePNAv2.

A portadora utilizada é de 7 MHz. A escolha da banda entre 4 e 10 MHz se sobrepõe a apenas uma banda de rádio-amador, simplificando a filtragem para eliminação dos problemas de emissão e interferência de sinais de RF. Além dos limites em 4 e 10 MHz, há um *notch* reduzindo a densidade espectral de potência máxima entre 7 e 7,3 MHz para -81,5 dBm/Hz, como pode ser visto na Figura 2.3. Este *notch* serve para reduzir a interferência nessa banda de rádio-amador. O limite de -140 dBm/Hz para a banda abaixo de 2 MHz garante a compatibilidade tanto com os sistemas de acesso ADSL e G.Lite quanto com a rede tradicional de telefonia. Desta forma, a rede de telefonia, as redes de acesso e a rede domiciliar podem coexistir multiplexadas em freqüência como mostra a Figura 2.2.

Ao adotar a máscara de densidade espectral de potência mostrada na Figura 2.3, os transmissores podem atender às exigências da FCC (*Federal Communications Commis-*

sion) Parte 68, que é um instrumento regulador dos Estados Unidos para a conexão de equipamentos terminais à rede telefônica. É comum que os produtos apresentem também compatibilidade com a FCC Parte 15, que regulamenta dispositivos de RF.

2.2.1 A Subcamada de Controle de Acesso ao Meio

O HomePNAv2 utiliza o protocolo CSMA/CD (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection*) para o compartilhamento do meio entre as estações, como em uma rede Ethernet. O quadro MAC utiliza exatamente o mesmo quadro da rede Ethernet com os campos de endereço de destino, endereço de origem, tipo, dados e seqüência de verificação de quadro (FCS - *Frame Check Sequence*).

O CSMA/CD é uma técnica de acesso múltiplo com detecção de portadora e com detecção de colisões. Quando uma estação tem dados a transmitir, ela primeiro escuta o meio para saber se alguma outra estação está transmitindo no momento. Se o meio estiver ocupado, a estação espera até que ele fique ocioso. Caso não seja detectada nenhuma portadora, a estação transmite o seu quadro. No entanto, pode acontecer que duas ou mais estações queiram transmitir e detectem que o meio está ocupado. Então, assim que o meio ficar livre, as estações tentarão transmitir simultaneamente causando uma colisão. Também pode ocorrer que imediatamente após uma estação começar a transmitir, outras estações fiquem prontas para transmitir e escutem o meio. Se o sinal da primeira estação ainda não tiver atingido as outras estações devido ao retardo de propagação, estas detectarão o meio desocupado e também começarão a transmitir, resultando em uma colisão. Sempre que é detectada uma colisão, as estações envolvidas iniciam um processo de resolução de colisão. No HomePNAv2 este processo é diferente do utilizado no Ethernet e será explicado adiante.

Ao protocolo de controle de acesso ao meio do HomePNAv2 foi acrescentado um mecanismo de prioridade para dar suporte à QoS. Este mecanismo prevê oito níveis de prioridade de acesso ao meio. Assim, diferentes tipos de tráfego podem receber diferentes prioridades que variam de 0 a 7, sendo 7 a maior prioridade. Com base na prioridade de cada quadro, sua transmissão é feita no intervalo de tempo (*slot*) correspondente após o espaçamento obrigatório (IFG - *Inter-Frame Gap*) ao final de cada quadro, que deve ser no mínimo de 29 μs. Como mostra a Figura 2.4, os intervalos de tempo são dispostos em ordem decrescente de prioridade. Desta forma, estações com fluxos de maior prioridade começam a transmitir mais cedo, sem competir com o tráfego de menor prioridade.

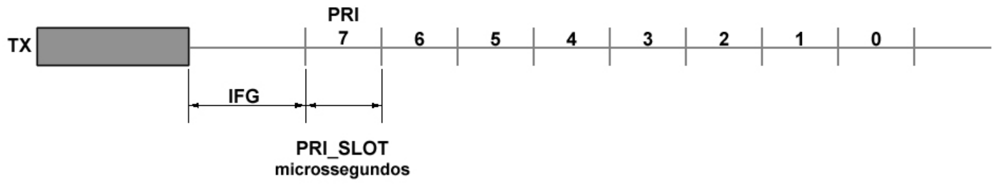


Figura 2.4: *Slots* de prioridade no HomePNAv2.

A utilização de prioridade busca reduzir a variação do atraso de mídias contínuas alocando uma maior prioridade para estas mídias em relação ao tráfego de dados, evitando assim que rajadas de dados possam ocupar o meio e atrapalhar a cadência das mídias contínuas. A duração de cada intervalo de tempo de prioridade, denotada por PRI_SLOT, é de 21 μs. Estações que tenham quadros para transmitir devem monitorar a detecção de portadora e adiar o uso do canal caso seja detectada a portadora antes do início do intervalo de tempo relativo à prioridade da estação. Caso outra estação controle o meio antes do início da transmissão, a contagem dos intervalos de tempo deve ser reiniciada. A Figura 2.5 mostra duas estações, uma com prioridade 7 e outra com prioridade 1, aguardando o final da transmissão de uma terceira estação para transmitirem.

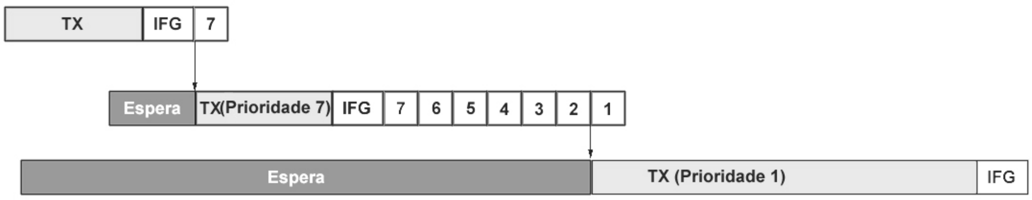


Figura 2.5: Acesso com prioridade no HomePNAv2.

Como pode ser visto na Figura 2.5, embora a estação com prioridade 1 tenha iniciado a escuta do meio antes, a estação com prioridade 7 transmite primeiro, e a estação com prioridade 1 tem que reiniciar seu contador de intervalos de tempo para competir pelo meio novamente.

Todas as estações monitoram o meio para detectar colisões entre transmissões de outras estações. Essas colisões podem ser detectadas pela duração da transmissão, visto que a duração mínima de um quadro válido é de 92,5 μs. Uma estação que detecte a colisão da sua transmissão deve parar a transmissão em até 70 μs [29], para que as outras estações possam também detectá-la. Caso haja uma colisão, as estações esperam um tempo de 92 μs e então começam a contar novamente o IFG. A duração de um quadro também não pode ultrapassar o tempo máximo de quadro de 3122 μs. Transmissões muito curtas, ou muito longas, são consideradas como colisão por estações monitorando a rede. O procedimento para a transmissão de um quadro pode ser visto na Figura 2.6.

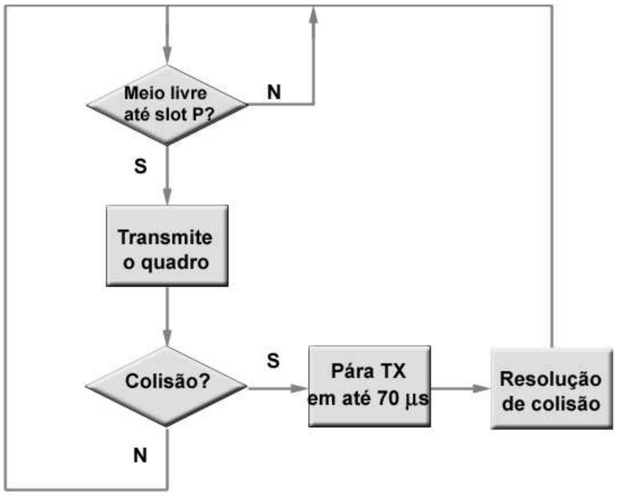


Figura 2.6: Lógica de acesso ao meio no HomePNAv2.

Se o meio estiver livre até o *slot* de prioridade correspondente à do quadro, a estação transmite o quadro. Após iniciar a transmissão, a estação monitora o meio para detectar se houve uma colisão. Caso não haja colisão, ela termina de transmitir o quadro, e volta ao estado inicial, podendo transmitir um novo quadro. Caso haja colisão, a estação deve parar a transmissão em até 70 μs para o início da resolução de colisão. Neste caso, as estações iniciam um procedimento distribuído de resolução de colisão chamado *Distributed Fair Priority Queuing* (DFPQ) [29], que é diferente do tratamento de colisões feito pelo Ethernet. Após a execução do algoritmo, as estações envolvidas na colisão são organizadas em níveis de *backoff*, que indicam a ordem em que as estações vão transmitir. A saída esperada é que apenas uma estação esteja no nível 0, podendo transmitir o seu quadro. Após a transmissão, todas as outras estações decrementam seu nível de *backoff* para que uma nova estação no nível 0 de *backoff* assuma o controle do meio. Todas as estações, mesmo as que não estão esperando para transmitir, devem monitorar o meio para ter conhecimento do nível de *backoff* máximo. Desta forma, estações que não estavam envolvidas na colisão original podem saber quando todas as estações envolvidas na colisão transmitiram seus quadros. Estações que não estavam envolvidas na colisão só podem transmitir após todas as estações envolvidas em colisões terem transmitido. Para cada nível de prioridade (de 0 a 7), todas as estações mantêm contadores de nível de *backoff*, BL (*Backoff Level*), e contadores de nível de *backoff* máximo, MBL (*Maximum Backoff Level*). Estes contadores são iniciados em 0 e saturam em 15. O nível da colisão pode ser determinado pelo *slot* de prioridade no qual ocorreu a colisão.

Como a Figura 2.7 mostra, após uma colisão são utilizados três *slots* especiais de sinalização (S0, S1 e S2) antes dos intervalos de tempo de prioridade. Esses *slots* utilizam uma sinalização do tipo *on-off*, ou seja, simplesmente detecta-se a presença ou não de portadora. Assim, duas ou mais estações podem sinalizar no mesmo *slot*, detectando-se apenas se o *slot* foi sinalizado ou não. Os contadores de BL e MBL são determinados através destes *slots* de sinalização. Os *slots* de sinalização têm a duração de 32 μs e só são usados após uma colisão, nunca após uma transmissão bem sucedida.

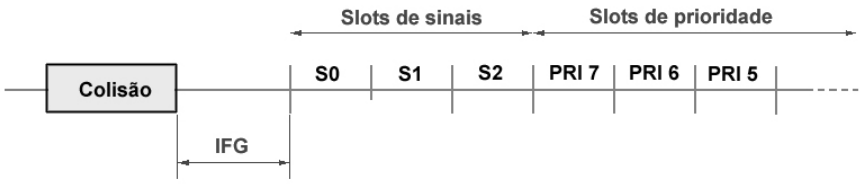


Figura 2.7: Esquema de sinalização no HomePNAv2.

Cada estação participando da resolução de colisão escolhe aleatoriamente um dos três *slots* de sinalização para transmitir o sinal de *backoff* que determinará os níveis de *backoff*. Estações participando da resolução de colisão incrementam seu BL para cada sinal de *backoff* recebido em um *slot* anterior ao escolhido pela estação, e decrementam o BL para cada quadro transmitido com sucesso. As estações no nível de *backoff* 0 iniciam suas transmissões no intervalo de tempo correspondente à sua prioridade após os intervalos de tempo de sinalização. Estações de prioridade mais alta podem se adiantar ao fim da resolução de colisão ao transmitirem num intervalo de tempo de prioridade anterior ao nível de prioridade no qual ocorreu a colisão. O contador MBL é incrementado a cada sinal de *backoff* recebido e decrementado a cada transmissão bem sucedida [30]. Desta forma, enquanto a resolução de colisão estiver ocorrendo, o MBL será diferente de zero. Nas colisões subseqüentes à colisão inicial, ou seja, durante o período de resolução de colisão enquanto o MBL é diferente de zero, os contadores são incrementados de maneira diferenciada. Para as estações que não estão envolvidas nas colisões subseqüentes o BL é incrementado para cada sinal de *backoff* recebido em um *slot* anterior ao escolhido pela estação menos um, e o MBL de todas as estações é incrementado do número total de sinais de *backoff* recebido menos um. Para as estações envolvidas nas colisões subseqüentes, o BL é incrementado como na colisão inicial.

A Figura 2.8 apresenta um exemplo do processo de resolução de colisão entre 3 estações transmitindo no mesmo nível de prioridade. No instante 1 as três estações tentam transmitir simultaneamente e colidem. No instante 2 acontece a resolução da colisão, onde as estações 1 e 2 escolhem o *slot* S0, e a estação 3 escolhe o *slot* S2. Assim, as estações 1 e 2 não incrementam o BL, e a estação 3 incrementa o seu BL para 1, já que houve apenas um sinal de *backoff* antes do seu *slot*, no *slot* S0. Mesmo que duas estações tenham sinalizado no mesmo *slot*, a estação 3 só pode determinar se houve ou não a sinalização. Todas as estações incrementam o seu MBL para 2, pois dois *slots* foram sinalizados. No instante 3 as estações 1 e 2, que estavam com o BL em 0, tentam transmitir e colidem novamente. No instante 4 acontece uma nova resolução de colisão onde a estação 1 escolhe o *slot* S1 e a estação 2 escolhe o *slot* S2. A estação 1 mantém então o seu BL, e a estação 2 incrementa o seu BL para 1. Como a estação 3 não está envolvida nessa segunda colisão, ela incrementa o seu BL em apenas 1, que é o número de *slots* sinalizados, 2, menos 1. Todas as estações incrementam o seu MBL em 1, que é igualmente o número de *slots* sinalizados menos 1. No instante 5, a estação 2 que é a única com BL igual a 0, transmite o seu quadro com sucesso, e assim as outras duas estações decrementam os seus contadores de BL. O MBL de todas as estações também é decrementado. No instante 6, a estação 2 transmite o seu quadro, decrementando igualmente os contadores. Finalmente,

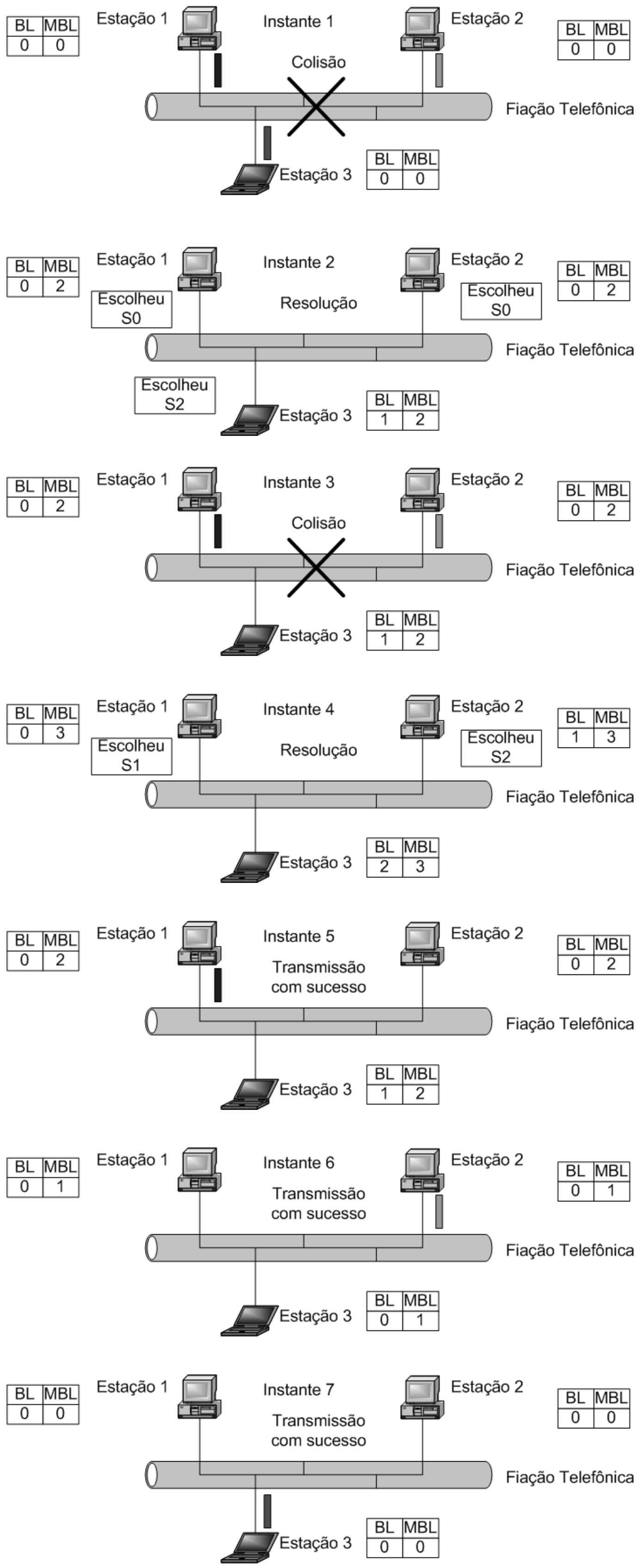


Figura 2.8: Exemplo do processo de resolução de colisão do HomePNAv2.

no instante 7 a estação 3 transmite o seu quadro, e então o MBL de todas as estações volta a 0, indicando o fim do processo de resolução de colisão.

2.2.2 A Camada Física

A rede Ethernet usa codificação em banda básica transmitindo diretamente o sinal digital no meio. A sincronização de um quadro é realizada a partir dos oito bytes de preâmbulo do quadro Ethernet que geram uma onda quadrada que permite a sintonia do relógio de recepção. É utilizada a codificação Manchester de forma a obrigar transições freqüentes (0 para 1 e 1 para 0) do sinal digital, facilitando assim a sincronização do quadro. A delimitação de fim de quadro é a própria ausência de sinal obrigatória por um intervalo de tempo mínimo, denominada espaçamento entre quadros, após cada quadro.

Na rede HomePNA a codificação em banda básica não é possível, pois interferiria com os serviços já existentes que ocupam esta banda. Portanto, o sinal deve ser modulado. Assim, o padrão HomePNAv2 mantém todos os campos do quadro Ethernet, à exceção do preâmbulo, e adiciona um envelope específico. Para se obter uma alta taxa de transmissão com robustez, foi escolhida a modulação adaptativa de amplitude em quadratura (AQAM - *Adaptive Quadrature Amplitude Modulation*) [14]. Essa modulação possibilita ao sistema operar a 2 ou 4 Mbaud com diferentes taxas de modulação, ou seja, ao invés de utilizar uma taxa fixa de bits por símbolo, o padrão possibilita variar a codificação de 2 a 8 bits por símbolo para cada quadro [29].

Para canais com boa resposta em freqüência pode ser utilizada a taxa de 4 Mbaud, que possibilita transmissões a até 32 Mbps, se utilizada com a taxa de 8 bits por símbolo. A taxa básica de símbolos, no entanto, é de 2 Mbaud, e permite a transmissão de dados a taxas entre 4 e 16 Mbps. Quando o sistema opera a 2 Mbaud, o espectro do sinal discreto no tempo possui largura $F = \frac{1}{T} = 2$ MHz. No entanto, a banda do sistema é de 6 MHz (entre 4 e 10 MHz). O sinal transmitido pode, então, ser considerado como composto por três cópias do sinal de 2 MHz, centradas em 5, 7 e 9 MHz [14]. Por este motivo, no contexto do HomePNAv2, o sinal QAM no modo 2 Mbaud é chamado de *Frequency Diverse QAM* (FDQAM). Em canais com uma baixa relação sinal-ruído, onde grande parte do espectro é atenuada, o FDQAM funciona de forma robusta em muitas situações em que o QAM tradicional não funcionaria. Além disso, o FDQAM não necessita que o transmissor possua conhecimento das características do canal, o que simplifica o funcionamento do protocolo em canais variáveis no tempo [29].

O quadro padronizado para a rede domiciliar em linha telefônica é representado na Figura 2.9 [29]. Este consiste de um preâmbulo de 16 bytes, um campo de controle de quadro (*Frame Control* - FC) de 4 bytes, um campo correspondente ao quadro Ethernet, o campo de CRC (*Cyclic Redundancy Check*) de 2 bytes, o campo de enchimento (PAD) de tamanho variável e o campo EOF de um byte.

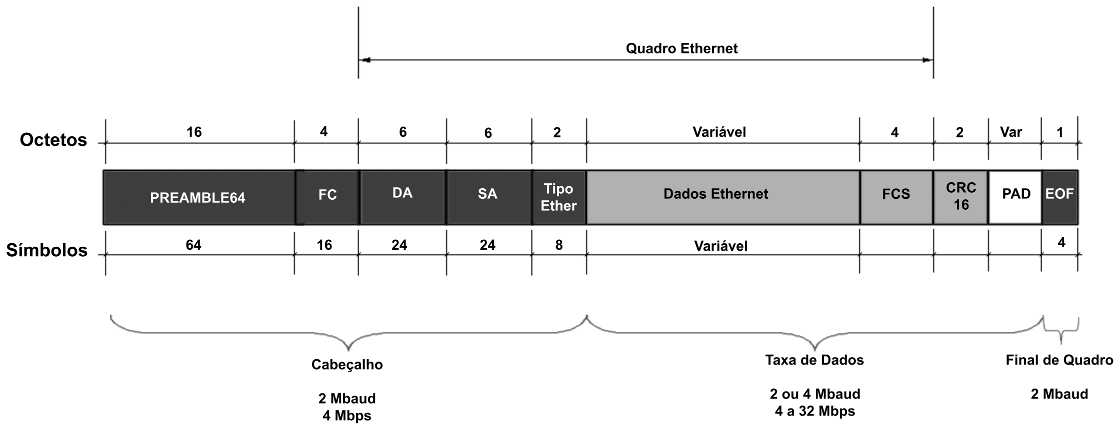


Figura 2.9: Quadro do HomePNAv2.

O preâmbulo é uma seqüência conhecida de símbolos adaptada à modulação, transmitida a 2 Mbaud que serve para sincronizar a recepção do quadro. O preâmbulo consiste de 64 símbolos (16 bytes) definido pela seqüência hexadecimal 0xFC483084 repetida quatro vezes.

O campo controle de quadro possui 4 bytes e é subdividido em 6 campos: tipo de quadro, com 1 byte, RSVD (*Reserved*), com 1 bit, PRI (*Priority*), com 3 bits, SI (*Scrambler Initialization*), com 4 bits, PE (*Payload Encoding*), com 1 byte e HCS (*Header Check Sequence*), com 1 byte.

O campo tipo de quadro é destinado a prover flexibilidade para compatibilizar definições futuras de novos formatos e moduladores. Para o HomePNAv2 este campo é preenchido com algum valor conhecido pelo transmissor e o quadro deve ser desconsiderado se seu valor for desconhecido. O campo RSVD (1 bit) é reservado. Ele deve ser mantido em zero pelo transmissor e desconsiderado pelo receptor. O campo PRI de 3 bits serve para definir a prioridade absoluta que um quadro específico irá receber para acessar o meio. Oito níveis de prioridades são especificados sendo a prioridade 7 preferencial à prioridade 0. Parte do quadro deve ser embaralhada para transmissão. O objetivo do uso de um embaralhador de estado inicial pseudo-aleatório é tornar a densidade espectral de potência (PSD) mais uniforme entre os quadros. Assim, elimina-se um problema de geração de freqüências específicas em pacotes sucessivos altamente correlacionados. O embaralhamento começa no primeiro bit do campo PE e termina no último bit do campo CRC, ou PAD (Figura 2.9), caso este exista. O campo SI deve conter o valor utilizado na inicialização do embaralhador. Como a Figura 2.9 mostra, parte do quadro é enviada obrigatoriamente a 2 Mbaud, de modo que qualquer estação possa decodificar esta parte do quadro. O campo PE define a constelação de codificação da parte do quadro que possui taxa de transmissão variável. A Tabela 2.1 mostra a codificação do campo PE.

O campo HCS (verificação do cabeçalho) consiste de oito bits de verificação de redundância cíclica (CRC) obtidos pela codificação da seqüência dos 128 bits (não embaralhados), na ordem de transmissão, começando no campo controle de quadro e terminando no campo de endereço de origem do Ethernet. O campo HCS, que ainda não foi calculado, é substituído por zeros. Para a codificação utiliza-se o polinômio gerador

$$G(x) = x^8 + x^7 + x^6 + x^4 + x^2 + 1 \ . \tag{2.1}$$

Primeiro complementa-se os 8 primeiros bits da seqüência e então utiliza-se esses 128 bits como os coeficientes de um polinômio $M(x)$, de grau 127 (o primeiro bit corresponde ao termo x^{127} e o último corresponde ao termo x^0). Multiplica-se então este polinômio $M(x)$ por x^8, e divide-se pelo polinômio gerador $G(x)$. O resto dessa divisão, $R(x)$, é então multiplicado por um novo polinômio $H(x)$ resultando em $N(x)$. $H(x)$ é definido por

$$H(x) = x^7 + x^6 + x^5 + x^4 + x^2 + x + 1 \ . \tag{2.2}$$

$N(x)$ é novamente dividido por $G(x)$, resultando em um novo resto $C(x)$, de grau menor ou igual a 7. Os coeficientes de $C(x)$ formam então uma seqüência de 8 bits,

Tabela 2.1: Codificação do campo PE.

Valor	Taxa de Tx	Interpretação
0	Não disponível	Modo não padronizado
1	4 Mbps	2 Mbaud, 2 bits por símbolo
2	6 Mbps	2 Mbaud, 3 bits por símbolo
3	8 Mbps	2 Mbaud, 4 bits por símbolo
4	10 Mbps	2 Mbaud, 5 bits por símbolo
5	12 Mbps	2 Mbaud, 6 bits por símbolo
6	14 Mbps	2 Mbaud, 7 bits por símbolo
7	16 Mbps	2 Mbaud, 8 bits por símbolo
8	Não disponível	Reservado, descartar quadro ao receber
9	8 Mbps	4 Mbaud, 2 bits por símbolo
10	12 Mbps	4 Mbaud, 3 bits por símbolo
11	16 Mbps	4 Mbaud, 4 bits por símbolo
12	20 Mbps	4 Mbaud, 5 bits por símbolo
13	24 Mbps	4 Mbaud, 6 bits por símbolo
14	28 Mbps	4 Mbaud, 7 bits por símbolo
15	32 Mbps	4 Mbaud, 8 bits por símbolo
16-255	Não disponível	Reservado, descartar quadro ao receber

que é complementada, chegando-se aos bits que irão formar o HCS. Como o campo HCS é transmitido na taxa básica, ele é útil para verificar se o cabeçalho de um quadro está correto, mesmo quando parte da sua carga útil foi transmitida com erro. Essa informação pode ser útil para camadas superiores, como por exemplo, para a otimização de um algoritmo de negociação de taxa.

Os campos seguintes são endereço de destino, endereço de origem, tipo, dados e seqüência de verificação de quadro (*Frame Check Sequence* - FCS), todos obtidos do quadro Ethernet. Os campos de endereço de destino e origem contêm os endereços MAC das estações de destino e origem, com 6 bytes cada. O campo tipo informa ao receptor qual protocolo da camada de rede está sendo utilizado, por exemplo, o IPv4 (*Internet Protocol version 4*). O campo dados corresponde à carga útil de dados e pode ter até 1500 bytes. O campo FCS consiste de um código de 32 bits de verificação de redundância cíclica de todos os campos do quadro Ethernet, exceto ele próprio, para detectar possíveis erros de transmissão.

O campo CRC-16 consiste de 16 bits de verificação de redundância cíclica. O CRC-16 é função do conteúdo de todo o quadro Ethernet, começando no primeiro bit do endereço de destino e acabando no último bit do campo FCS. Para o cálculo do CRC-16 é usado o polinômio gerador

$$G(x) = x^{16} + x^{12} + x^{5} + 1 \ . \tag{2.3}$$

O cálculo é feito de forma similar ao cálculo do campo HCS. Primeiro complementam-se os 16 primeiros bits da seqüência de n bits, e esses bits formam os coeficientes de um polinômio $M(x)$, de grau $n-1$. $M(x)$ é multiplicado por x^{16} e dividido por $G(x)$, gerando um polinômio de resto $R(x)$ de grau menor ou igual a 15. Os coeficientes de $R(x)$ formam então uma seqüência de 16 bits, que é complementada, e o resultado é colocado no campo CRC-16. Esse campo é utilizado em conjunto com o campo FCS do Ethernet, para diminuir a probabilidade de erros não detectados. É importante observar que o cabeamento telefônico convencional se serve de um par trançado de qualidade inferior aos cabos recomendados para a rede Ethernet. Além disso, a comunicação na rede Ethernet é ponto a ponto enquanto na rede domiciliar através da fiação telefônica têm-se apenas um par de fios sendo compartilhado por todas as estações com terminações em aberto e descasadas. Portanto, na rede domiciliar em linha telefônica existem muitas reflexões do sinal. Como conseqüência destas características, a taxa de quadros errados na rede domiciliar em linha telefônica é uma ordem de grandeza maior que a encontrada na rede Ethernet e por isso são necessárias as proteções do cabeçalho (HCS), do quadro Ethernet (FCS) e do quadro HomePNA (CRC-16).

O campo PAD, ou enchimento, é utilizado apenas quando parte do pacote é transmitido a 4 Mbaud. No último byte do campo PAD é colocado um valor, PAD_LENGTH, igual ao número de bytes no campo PAD, menos um. Todos os outros bytes são mantidos em zero. O tamanho do campo PAD deve ser suficiente para que o tempo de transmissão do quadro completo seja pelo menos 92,5 μs. Este tempo de transmissão garante que um fragmento de colisão seja distinguido de um quadro válido pelo tempo de transmissão obtido pela detecção de portadora.

O delimitador de fim de quadro (EOF) é uma seqüência conhecida de quatro símbolos (um byte) transmitida a 2 Mbaud cujo valor hexadecimal é 0xFC. Além disso, um intervalo mínimo de silêncio, chamado de *Inter-Frame Gap* (IFG), deve seguir cada quadro.

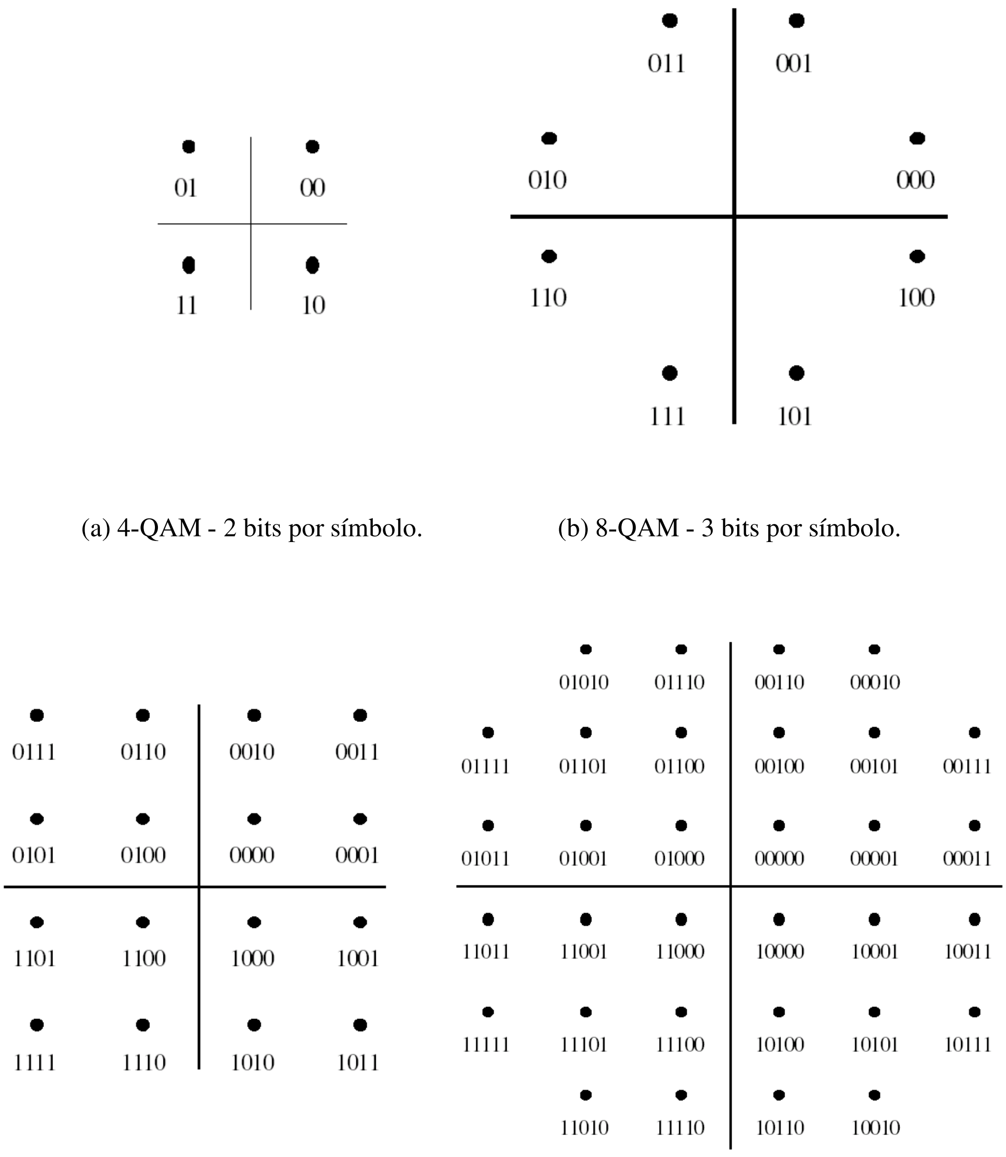
Depois de formado, o quadro deverá passar por um embaralhador. O embaralhador é inicializado por uma seqüência pseudo-aleatória de 4 bits, que é enviada no campo SI do controle de quadro, e é definido pelo polinômio gerador

$$G(x) = x^{23} + x^{18} + 1 \ . \tag{2.4}$$

O embaralhamento é utilizado somente a partir do décimo sétimo bit do campo controle de quadro, até o último bit do campo CRC-16 (ou PAD, se presente).

A modulação AQAM permite que se varie a taxa utilizada na rede de acordo com as condições de canal e ruído. O padrão prevê o uso de constelações de 4 a 256 símbolos, que correspondem de 2 a 8 bits por símbolo, respectivamente. As constelações de 2 a 5 bits por símbolo são apresentadas nas Figuras 2.10(a) a 2.10(d). As constelações de 6, 7 e 8 bits por símbolo não são apresentadas por serem muito grandes, mas seguem a mesma lógica de formação das constelações menores.

A escala relativa dessas constelações é apresentada na Tabela 2.2, onde o valor apresentado é relativo à amplitude máxima das portadoras nos eixos ortogonais. A unidade imaginária i representa uma unidade no eixo vertical. Pode-se perceber que com o aumento do número de bits por símbolo, a diferença de amplitude entre os símbolos diminui. Como a potência é proporcional ao quadrado da amplitude, nota-se porque as maiores taxas de transmissão requerem uma maior relação sinal-ruído no receptor para a correta demodulação do símbolo. No caso de meios mais hostis, com menor relação sinal-ruído, pode-se utilizar taxas de transmissão menores, que são mais imunes a ruídos.



(a) 4-QAM - 2 bits por símbolo.

(b) 8-QAM - 3 bits por símbolo.

(c) 16-QAM - 4 bits por símbolo.

(d) 32-QAM - 5 bits por símbolo.

Figura 2.10: Constelações QAM do HomePNAv2.

Tabela 2.2: Escala relativa das constelações QAM do HomePNAv2.

Bits por símbolo	Ponto de referência	Valor
2	00	$(1+i)$
3	000 e 001	$(12+5i)/9$ e $(5+12i)/9$
4	0000	$(1+i)/3$
5	00000	$(1+i)/4$

2.3 HomePNAv3

O padrão HomePNAv3 possui dois modos de operação diferentes na camada MAC, o síncrono (SMAC) e o assíncrono (AMAC). Enquanto a versão 2 tem como taxa de transmissão máxima 32 Mbps, o HomePNAv3 é capaz de atingir taxas de transmissão de até 128 Mbps, com uma extensão opcional para 240 Mbps [33]. Além disso, o HomePNAv3 também utiliza uma técnica de agregação de pacotes, que permite aumentar a eficiência do protocolo de acesso ao meio [20] [34]. Esta técnica consiste em agregar o campo de dados de vários quadros Ethernet em um único quadro HomePNA. Com isso, o campo de dados do HomePNA pode chegar a até 64.000 bytes, aumentando a eficiência do protocolo. Deve ser observado que para cada quadro a ser enviado é necessário incluir o cabeçalho e fim de quadro. A transmissão dos campos de cabeçalho e fim de quadro dura 70 μs, enquanto, para uma taxa de transmissão de 128 Mbps, a transmissão de um campo de dados de 1500 bytes dura apenas 94 μs. A perda de desempenho devido ao cabeçalho e fim de quadro é muito grande. Já com a técnica de agregação de pacotes, a transmissão de um campo de dados de 64.000 bytes dura 4 ms, diminuindo assim o custo fixo por quadro relativo aos campos de cabeçalho e fim de quadro.

O modo síncrono foi criado para oferecer qualidade de serviço determinística, que não é garantida pelo HomePNAv2. Para isso, o modo SMAC utiliza o método de acesso ao meio síncrono em um modo mestre-escravo, e técnicas de controle de admissão e reserva de recursos, que permitem que a rede ofereça qualidade de serviço. Neste modo, uma estação da rede é escolhida como estação mestre através de um protocolo específico. Assim, todas as estações devem transmitir de acordo com as instruções da estação mestre.

De uma forma centralizada, a estação mestre aloca intervalos de tempo específicos para as outras estações, sem disputa pelo meio, para atender aos requisitos de QoS da rede. Além disso, ela também aloca intervalos onde as estações podem disputar pelo meio, como no HomePNAv2 e no modo AMAC.

O modo assíncrono mantém compatibilidade com o HomePNAv2. Esse modo utiliza a mesma subcamada MAC utilizada pelo padrão anterior. A única diferença é a introdução de um novo esquema de gerenciamento de colisões utilizado para diminuir o número de colisões na rede. Nesse esquema, cada nó da rede possui um conjunto ordenado de 3 *slots* de resolução de colisão (A, B e C) pré-definidos, e nenhum desses conjuntos pode ser igual para dois nós. Para isso, o HomePNAv3 possui um protocolo de gerenciamento de colisão que garante que dois nós na rede não utilizem o mesmo conjunto. Portanto, o número de estações na rede é limitado a 27. Cada um dos *slots* A, B, e C pode ser definido como um dos 3 *slots* de resolução de colisão existentes, S0, S1, ou S2. Quando houver uma colisão, o nó irá utilizar o primeiro *slot* do seu conjunto, o *slot* A, para a resolução de colisão. Em caso de uma nova colisão para este mesmo quadro, ele irá utilizar então o segundo *slot* do conjunto, o *slot* B, e no caso de mais uma, o terceiro *slot*, C. Como não há um conjunto de *slots* repetido, isso garante que cada quadro irá colidir no máximo três vezes, e que após a terceira colisão, todo quadro obterá sucesso em acessar o meio. Essa técnica diminui o número de colisões e aumenta a eficiência da rede, mas, em contrapartida, limita o número de nós na rede a 27, que é o número de conjuntos diferentes possíveis.

A Figura 2.11 apresenta um processo de resolução do pior caso que é a colisão entre os 27 nós. Os nós foram numerados de H0 a H26 e C1 a C13 representam as colisões, na ordem em que elas ocorrem. Nota-se que a resolução de colisão no HomePNAv3 ocorre em no máximo 3 níveis, o que garante que nenhum quadro irá colidir mais de 3 vezes.

Para saber o conjunto de *slots* de resolução de colisão de cada nó, basta seguir a seqüência na figura, e verificar quais foram os *slots* escolhidos. A Tabela 2.3 apresenta os conjuntos de todos os nós da Figura 2.11.

Para casos de colisões com um menor número de nós, a resolução dependerá do conjunto de *slots* de resolução de cada nó. Por exemplo, é apresentando um caso em que

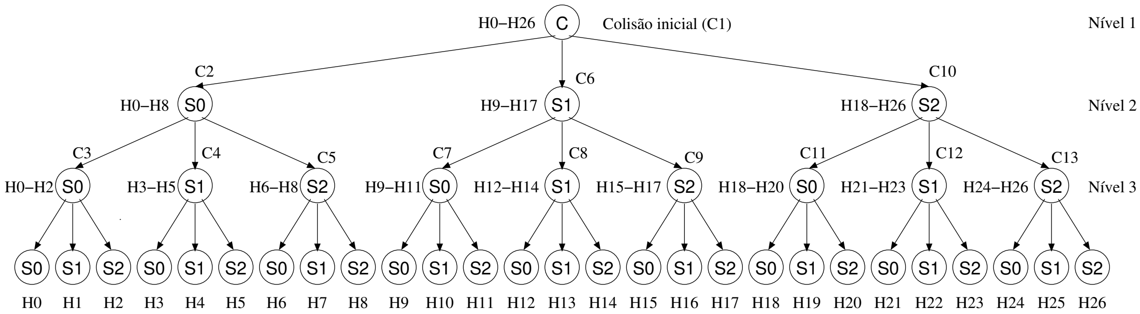


Figura 2.11: Resolução de colisão entre 27 nós no HomePNAv3.

Tabela 2.3: Conjuntos de *slots* de resolução de colisão do HomePNAv3.

Nó	**Conjunto de *slots***	**Nó**	**Conjunto de *slots***	**Nó**	**Conjunto de *slots***
H0	(S0, S0, S0)	H9	(S1, S0, S0)	H18	(S2, S0, S0)
H1	(S0, S0, S1)	H10	(S1, S0, S1)	H19	(S2, S0, S1)
H2	(S0, S0, S2)	H11	(S1, S0, S2)	H20	(S2, S0, S2)
H3	(S0, S1, S0)	H12	(S1, S1, S0)	H21	(S2, S1, S0)
H4	(S0, S1, S1)	H13	(S1, S1, S1)	H22	(S2, S1, S1)
H5	(S0, S1, S2)	H14	(S1, S1, S2)	H23	(S2, S1, S2)
H6	(S0, S2, S0)	H15	(S1, S2, S0)	H24	(S2, S2, S0)
H7	(S0, S2, S1)	H16	(S1, S2, S1)	H25	(S2, S2, S1)
H8	(S0, S2, S2)	H17	(S1, S2, S2)	H26	(S2, S2, S2)

os quadros de 6 nós colidem, sendo estes os nós H0, H5, H12, H19, H20 e H23. Como mostra e Figura 2.12, somente ocorrerão as colisões C1, C2, C10 e C11.

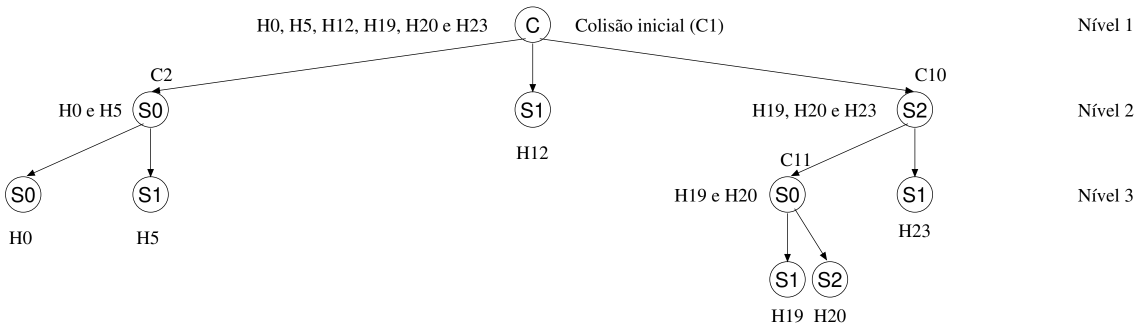


Figura 2.12: Exemplo de resolução de colisão entre 6 nós no HomePNAv3.

Para alcançar taxas de até 128 Mbps, o HomePNAv3 utiliza uma banda passante maior. Enquanto o HomePNAv2 utiliza uma banda de apenas 6 MHz, o HomePNAv3 utiliza uma banda passante de 17 MHz, na faixa de 4 a 21 MHz, como mostra a máscara de densidade espectral de potência na Figura 2.13.

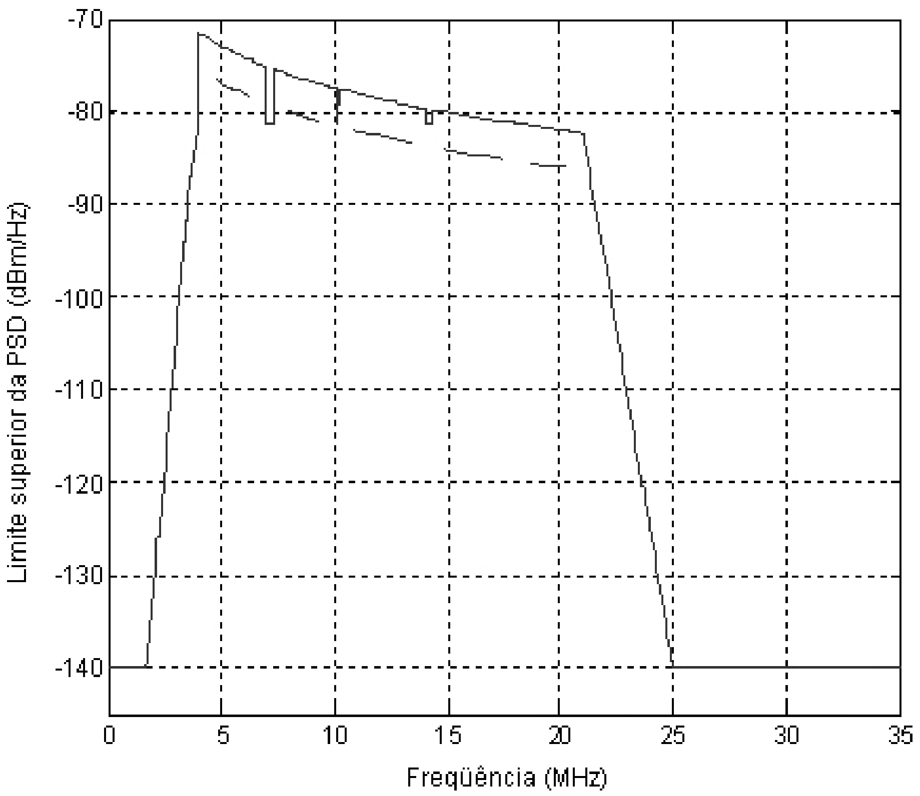


Figura 2.13: Máscara de densidade espectral de potência do HomePNAv3.

Com essa banda passante, é possível chegar a uma taxa de símbolos de até 16 Mbaud. Utilizando então 8 bits por símbolo, obtém-se uma taxa de

$$T = (16 * 10^6) * 8 = 128Mbps \quad . \tag{2.5}$$

Para a extensão opcional de 240 Mbps utiliza-se uma banda passante ainda maior, que chega a 24 MHz, de 4 a 28 MHz, alcançando uma taxa de símbolos de 24 Mbaud. A nova máscara é mostrada na Figura 2.14. Além disso, também foram definidas duas novas constelações QAM, para 9 e 10 bits por símbolo. Utilizando a constelação de 10 bits por símbolos com a taxa de símbolos de 24 Mbaud chega-se à taxa de 240 Mbps.

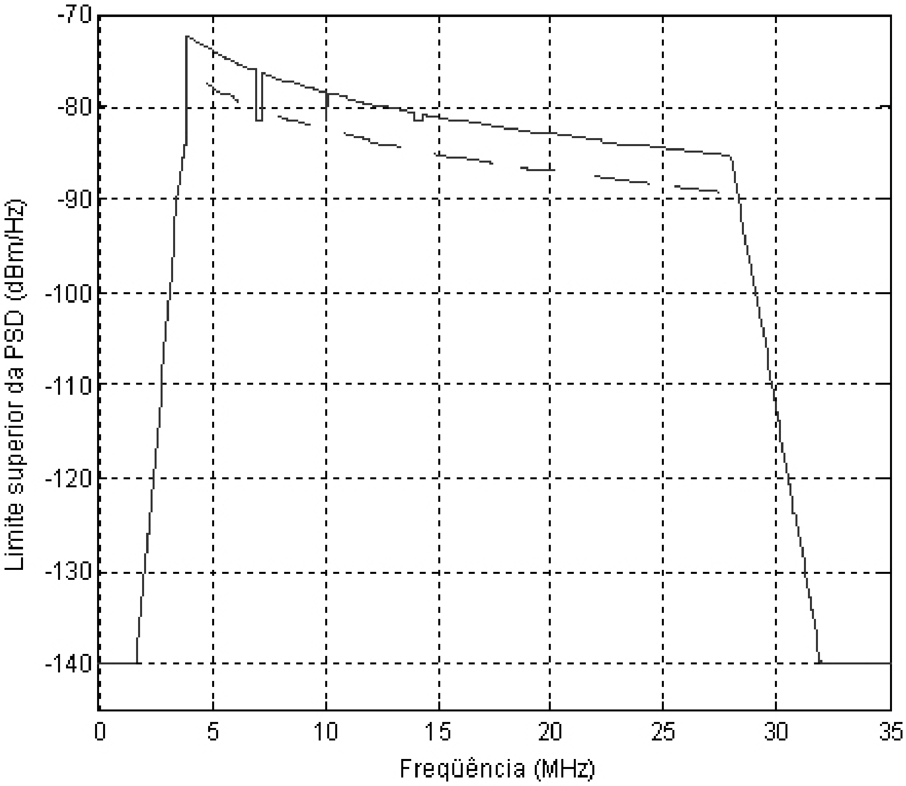


Figura 2.14: Máscara de densidade espectral de potência do HomePNAv3 para a extensão de 240 Mbps.

No entanto, o HomePNAv3 mantém a taxa básica de transmissão de 4 Mbps para os campos de cabeçalho e fim de quadro, o que diminui a eficiência da rede. A taxa básica faz com que a eficiência da rede diminua para taxas de transmissão maiores, devido ao tempo fixo de transmissão do cabeçalho.

2.4 Produtos

Atualmente no mercado há diversas empresas que fabricam produtos baseados no padrão HomePNA como soluções para redes domiciliares. Esses produtos podem ser de 4 tipos diferentes: placa PCI, placa PCMCIA, adaptador USB ou ponte Ethernet. A placa PCI é para uso interno em computadores de mesa, enquanto a placa PCMCIA é utilizada em computadores portáteis. O adaptador USB é de mais fácil instalação e é portátil,

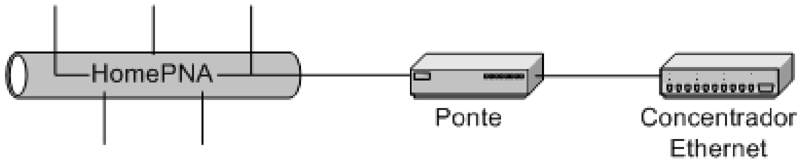


Figura 2.15: Exemplo de ponte entre uma rede HomePNA e um concentrador Ethernet.

podendo ser facilmente transferido de um computador para outro. A ponte Ethernet requer que o computador já tenha uma placa de rede Ethernet, mas apresenta algumas vantagens. A primeira é que ela é transparente para o usuário, e não requer nenhuma instalação de *drivers*, bastando que o computador tenha uma saída Ethernet disponível. Além disso, ela pode funcionar como uma ponte entre duas redes, interconectando uma rede Ethernet e uma rede HomePNA, ao invés de simplesmente conectar um computador. Um exemplo desse modo de funcionamento é apresentado na Figura 2.15.

Tabela 2.4: Produtos HomePNA.

Empresa	Modelo	Versão HomePNA	Tipo de conexão
2Wire	PC Port Phoneline Adapter	v2	USB
D-Link	DHN-1000	v2	Ethernet
	DHN-520	v2	PCI
	DHN-120	v2	USB
Linksys	HPB200	v2	Ethernet
	HPN200	v2	PCI
	USB200HA	v2	USB
	PCM200HA	v2	PCMCIA
Asotel	Dynamix HP-20C	v2	Ethernet
	Dynamix HP-30C	v3	Ethernet
	Dynamix HP-30U	v3	USB
	Dynamix DH-314	v3	Comutador 14 portas
Corinex	CXH-AV-ETH	v3	Ethernet
	CXH-AV-USB	v3	USB
	CXH-AV-SWT	v3	Comutador 14 portas

A Tabela 2.4 apresenta alguns dos produtos disponíveis atualmente. Entre as empresas fabricantes desses produtos temos a 2Wire [35], a D-Link [36] e a Linksys [37], que fabricam produtos baseados no padrão HomePNAv2. Os produtos baseados no padrão HomePNAv3 começaram a chegar ao mercado no final do ano de 2004, e são apresentadas duas empresas que já possuem esses produtos, a Asotel [38] e a Corinex [39]. Além dos adaptadores que já existiam para o HomePNAv2, essas empresas apresentam uma nova categoria de produto, o comutador HomePNAv3. A princípio pode não fazer sentido um comutador HomePNA, já que o meio é compartilhado e, em geral, cobre toda a casa. O objetivo do comutador HomePNA é funcionar como um PABX, onde seria possível interligar várias linhas telefônicas, fazendo uma única rede. Essa opção pode ser útil para empresas que ocupam vários andares de um prédio, interligando todos em uma única rede. A Figura 2.16 apresenta, como exemplo, o comutador HomePNAv3 da Corinex.

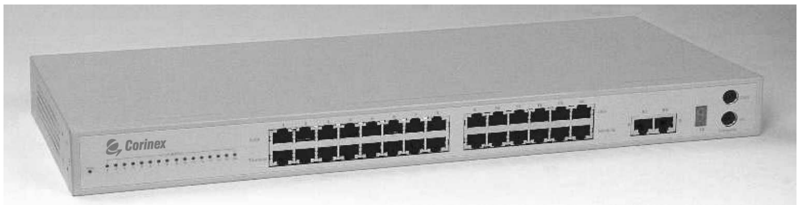


Figura 2.16: Comutador HomePNAv3 Corinex CXH-AV-SWT.

Capítulo 3

Análise de Desempenho do Padrão HomePNA

Neste capítulo, são apresentadas análises de desempenho dos padrões HomePNAv2 e HomePNAv3 AMAC. Estes resultados, além de apresentar a eficiência dessas redes, servirão como base para a análise do ganho do mecanismo proposto na Seção 4.1.

Em todas as análises tem-se apenas um nó receptor, e varia-se o número de nós transmissores para analisar o comportamento da rede. O número de nós receptores não influencia os resultados obtidos, já que essa rede utiliza um meio compartilhado, e na verdade todos os nós estão recebendo todos os quadros enviados na rede.

3.1 Análise do HomePNAv2

3.1.1 Análise Matemática

Em comparação com a subcamada MAC do padrão IEEE 802.3 (Ethernet), o MAC HomePNAv2 possui um mecanismo inovador de resolução de colisões. Desta forma, é interessante a análise da vazão que pode ser obtida por este método de acesso ao meio. Nesta seção é realizada uma análise para 1, 2, 3 e 4 nós transmitindo.

A vazão é calculada supondo-se que cada nó sempre possui um quadro a transmitir quando o meio fica livre. Assim, as estações tentam transmitir um quadro após o outro, ininterruptamente, causando a ocupação máxima da rede sem períodos de ociosidade. Para mais de 1 nó transmitindo, isso acarreta colisões entre todos os nós transmissores, já que todos tentarão transmitir quando o meio estiver livre. Nesses casos, a vazão obtida considera o pior caso de ocupação máxima da rede. Essa vazão também é chamada de vazão de saturação [16][17]. O cálculo da vazão é feito em função do tempo necessário para a transmissão de quadros de um determinado tamanho, s, que nessa análise será sempre menor ou igual ao tamanho máximo permitido pela norma, 1500 bytes, de modo a evitar fragmentação. Além disso, é necessário o uso de enchimento quando o tempo de transmissão do quadro é menor do que 92,5μs. O número de bytes de enchimento, e, é o menor número inteiro que garanta que o tempo de transmissão seja no mínimo 92,5μs. A taxa de transmissão de dados é dada por t. Supõe-se ainda que a prioridade dos quadros é p.

Para o caso de somente um nó transmitindo não há colisões. Portanto, a vazão máxima da rede é alcançada. De acordo com a Figura 2.9, o cabeçalho e o final do quadro são enviados à taxa básica de 4 Mbps. O cabeçalho contém 34 bytes e o final de quadro 1 byte, totalizando 35 bytes. Esses 35 bytes correspondem a 280 bits, cuja transmissão a 4 Mbps leva 70 μs. O restante do quadro contém os campos dados, FCS e CRC, que são enviados à taxa t, especificada no cabeçalho do quadro. Os campos FCS e CRC possuem 6 bytes. Portanto, o tempo de transmissão do restante do quadro, em segundos, é dado por

$$\frac{(s + e + 6) * 8}{t}. \tag{3.1}$$

Além disso, após a transmissão de um quadro deve haver um período de silêncio (IFG) de 29 μs. O quadro de prioridade p é transmitido após $(7 - p) * 21$ μs. Com isso, o tempo total de transmissão de um quadro é dado por:

$$T = 70 + 29 + (7 - p) * 21 + \frac{(s + e + 6) * 8}{t}\ \mu s, \tag{3.2}$$

onde t é dado em Mbps e s e e são dados em bytes. Logo, a vazão máxima para um nó transmissor é dada por:

$$V_1 = \frac{s * 8}{99 + (7 - p) * 21 + \frac{(s+e+6)*8}{t}} Mbps. \qquad (3.3)$$

A Tabela 3.1 apresenta a vazão do protocolo de acesso ao meio do HomePNAv2 para quadros de 1500 bytes e taxas de transmissão de dados de 10 e de 32 Mbps.

Tabela 3.1: Vazão máxima do protocolo MAC HomePNAv2.

Taxa de	Vazão (Mbps) em função da prioridade							
Dados (Mbps)	7	6	5	4	3	2	1	0
10	9,20	9,06	8,92	8,78	8,65	8,52	8,39	8,27
32	25,24	24,17	23,19	22,28	21,45	20,67	19,95	19,28

Pode-se observar na Tabela 3.1 que a vazão máxima é alcançada quando a prioridade 7 é utilizada. Além disso, a queda percentual de vazão entre as prioridades é mais acentuada na taxa de 32 Mbps. Isto ocorre porque o tempo de transmissão dos dados é menor, fazendo com que a duração dos *slots* de prioridade represente uma fração maior do tempo total de transmissão do quadro. Assim, a vazão depende da prioridade uma vez que uma tentativa de acesso deve esperar um determinado tempo correspondente ao seu *slot* de prioridade. Quanto maior a prioridade menos tempo se espera e maior a vazão. A análise realizada neste capítulo considera a utilização da prioridade 7 em todos os casos.

À medida que o número de nós transmitindo aumenta, haverá colisões e o algoritmo de resolução de colisões entrará em ação.

Em seguida, uma análise para os casos de dois, três ou quatro nós transmitindo quadros ininterruptamente é apresentada. Nesses casos, a cada colisão ocorrida deve-se contar o tempo limite de detecção de colisão, 92 μs, o IFG e o tempo dos 3 *slots* de sinalização (S0 a S2). Após esse período considera-se o tempo de transmissão do número de quadros, n, que inicialmente haviam colidido. Como a resolução de colisões é probabilística, podem ocorrer várias colisões até que todos os quadros colididos possam ser transmitidos. Obtendo-se o valor do número médio de colisões, C_n, para um dado número n de nós transmitindo, pode-se obter a vazão para mais de um nó transmitindo, conforme a Equação 3.4.

$$V_n = \frac{n * (s * 8)}{C_n * (92 + 29 + 3 * 32) + n * (99 + \frac{(s+e+6)*8}{t})} Mbps. \tag{3.4}$$

Para o caso de 2 nós transmitindo, tem-se duas possibilidades: os nós conseguem resolver a colisão (sucesso) ou não conseguem resolvê-la e colidem novamente (insucesso), reiniciando o processo. Sendo P_s a probabilidade de sucesso e P_i a probabilidade de insucesso, o número médio de colisões, C, é obtido ponderando o número de colisões necessárias para uma dada configuração de insucessos e sucesso com base na probabilidade de que esta configuração ocorra. Tem-se:

$$C_2 = 1 * P_s + 2 * P_i * P_s + 3 * P_i^2 * P_s + ... \tag{3.5}$$

Deve-se destacar que a série mostrada na Equação 3.5 possui infinitos termos, pois existe a possibilidade de que os dois quadros venham a colidir indefinidamente. Cada um dos termos do somatório desta série representa uma determinada configuração de insucessos na tentativa de acesso (colisões) e o sucesso. Esta série pode ser representada pelo somatório

$$C_2 = \sum_{j=1}^{\infty} j * P_i^{j-1} * P_s. \tag{3.6}$$

A probabilidade de insucesso, P_i, é a probabilidade de que ambos os nós escolham o mesmo *slot* de sinalização, ficando desta forma com o mesmo nível de *backoff* e causando uma nova colisão. Como existem três *slots* de resolução de prioridade, dado que um nó escolheu um *slot* de sinalização S_x, a chance de que o segundo nó escolha o mesmo *slot* é igual a $\frac{1}{3}$. Logo, $P_i = \frac{1}{3}$ e $P_s = \frac{2}{3}$. Para estes valores de P_i e P_s, o somatório da Eq. 3.6 converge para $1,5$.

Para o caso de 2 nós, com $C = 1,5$, tem-se:

$$V_2 = \frac{2 * (s * 8)}{1,5 * (217) + 2 * (99 + \frac{(s+e+6)*8}{t})} Mbps. \tag{3.7}$$

Para o caso de 3 nós, tem-se 3 possibilidades: resolução com sucesso na primeira tentativa, P_s, quando cada nó escolhe um *slot* diferente; um insucesso P_i, quando os 3 nós escolhem um mesmo *slot*, reiniciando o processo; e um sucesso parcial, P_{sp}, quando 2 nós escolhem um mesmo *slot* e o outro escolhe um *slot* diferente. No caso de um sucesso parcial, recai-se no caso anterior de 2 nós, que já é conhecido e a partir deste ponto o número médio de colisões é $1,5$. Desta forma, para o número médio de colisões com 3 nós, tem-se:

$$\begin{aligned} C_3 &= 1 * P_s + (1 + 1,5) * P_{sp} + 2 * P_i * P_s + \\ & \quad (2 + 1,5) * P_i * P_{sp} + 3 * P_i^2 * P_s + ... \end{aligned} \tag{3.8}$$

Esta série pode ser representada pelo somatório:

$$C_3 = \sum_{j=1}^{\infty} [j * P_i^{j-1} * P_s + (j + 1,5) * P_i^{j-1} * P_{sp}]. \tag{3.9}$$

Observando todas as combinações possíveis de escolha dos 3 *slots* pelos 3 nós, chega-se a um total de 27 possibilidades, onde 6 combinações resultam em um sucesso, 18 resultam em um sucesso parcial e 3 resultam em um insucesso. Chega-se aos valores de probabilidades $P_s = \frac{2}{9}$, $P_{sp} = \frac{2}{3}$ e $P_i = \frac{1}{9}$. Com estes valores, o somatório da Eq. 3.9 converge para $2,25$.

Analogamente, chega-se também ao valor da vazão para o caso de 3 nós, aplicando estes valores na Eq. 3.4:

$$V_3 = \frac{3 * (s * 8)}{2,25 * (217) + 3 * (99 + \frac{(s+e+6)*8}{t})} Mbps. \tag{3.10}$$

Observando as Eqs. 3.7 e 3.10, nota-se que elas são iguais, pois os valores de C_n, $1,5$ e $2,25$, se divididos pelos valores de n, resultam no mesmo valor, $0,75$. Ou seja, a vazão para 2 e 3 nós é idêntica, pois a relação C_n/n é igual. Dividindo também por n a Eq. 3.4 pode-se chegar à Eq. 3.11, que depende somente do parâmetro C_n/n, número médio de colisões por quadro transmitido.

$$V_3 = \frac{(s * 8)}{\frac{C_n}{n} * (217) + 99 + \frac{(s+e+6)*8}{t}} Mbps. \tag{3.11}$$

Com 4 nós, é impossível a resolução da colisão em apenas uma colisão, e a resolução é feita em dois passos. Após a primeira colisão, pode-se ter 4 configurações: os 4 nós escolheram o mesmo *slot*, 3 nós escolheram um mesmo *slot* e 1 nó escolheu um *slot* diferente, 2 nós escolheram um mesmo *slot* e os outros 2 nós também escolheram um outro *slot*, e 2 nós escolheram um mesmo *slot* e os outros 2 nós escolheram *slots* diferentes. Analisando as combinações possíveis, observa-se que os valores das probabilidades para estes 4 casos são, respectivamente, $\frac{1}{27}$, $\frac{8}{27}$, $\frac{6}{27}$ e $\frac{12}{27}$. Obtém-se assim o número médio de colisões para 4 nós:

$$C_4 = \tfrac{12}{27} * (1 + 1,5) + \tfrac{6}{27} * (1 + 1,5 + 1,5) + \tfrac{8}{27} * (1 + 2,25) + \\ + \tfrac{1}{27} * \{\tfrac{12}{27} * (1 + 1,5) + \tfrac{6}{27} * (1 + 1,5 + 1,5) + \tfrac{8}{27} * (1 + 2,25) + \\ + \tfrac{1}{27} * [\tfrac{12}{27} * (1 + 1,5) + \tfrac{6}{27} * (1 + 1,5 + 1,5) + ...]\} \tag{3.12}$$

Esta série pode ser representada pelo somatório:

$$C_4 = [\frac{12}{27} * (2,5) + \frac{6}{27} * (4) + \frac{8}{27} * (3,25)] * \sum_{j=0}^{\infty} 27^{-j}. \tag{3.13}$$

Resolvendo essa série, chega-se a um valor médio de $3,1155$ colisões. Tem-se então a vazão para 4 nós:

$$V_4 = \frac{(s * 8)}{\frac{3,1155}{4} * (217) + 99 + \frac{(s+e+6)*8}{t}} Mbps. \tag{3.14}$$

Para mais nós, a análise matemática torna-se complexa. Isso levou à criação do módulo de simulação, para que os casos com maior número de nós fossem analisados.

3.1.2 Módulo de Simulação

Com o objetivo de melhor analisar o desempenho do protocolo de acesso ao meio do HomePNAv2, foi desenvolvido um módulo para o simulador de redes *ns*-2 (*Network Simulator 2*) [40]. O módulo HomePNAv2 é baseado no módulo Ethernet disponível no *ns*-2. Além das diferenças básicas entre os métodos de acesso do HomePNA e do Ethernet, foram implementadas as funcionalidades de prioridade e de resolução de colisão que são específicas do HomePNAv2. Foi implementado um modelo físico simplificado que transmite os quadros com um atraso de propagação fixo para todas as estações. A especificação [28] define o tempo máximo de ida e volta na rede (RTT - *Round Trip Time*) como sendo 3 μs. Logo, utilizou-se um atraso de propagação de 1,5 μs que é a metade do RTT, considerando somente o tempo de ida.

De modo a verificar o funcionamento do módulo, foram realizadas simulações com situações de carga alta e constante para até 4 nós transmissores, onde cada nó sempre possuía um quadro para transmitir. Foram utilizados tamanho de quadro de 1500 bytes e prioridade 7. Com isso, pôde-se comparar os resultados das simulações usando o módulo HomePNAv2 com os resultados teóricos obtidos na Seção 3.1.1. Estas comparações foram utilizadas como testes de sanidade, para verificar o funcionamento correto do módulo. Os resultados possuem intervalos de confiança de 95%.

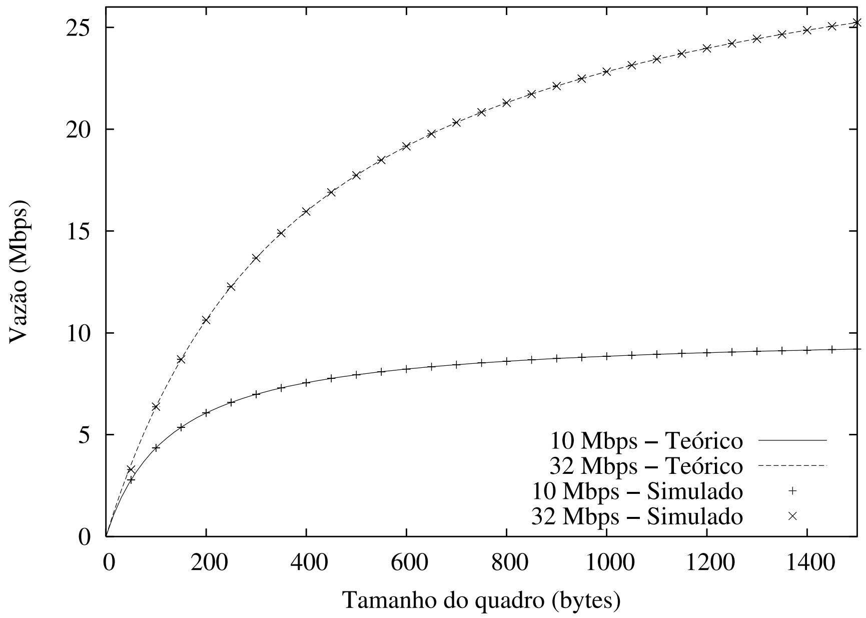


Figura 3.1: Vazão do HomePNAv2 para 1 nó transmissor.

Nas Figuras 3.1, 3.2, 3.3 e 3.4 são apresentados os resultados para 1, 2, 3 e 4 nós transmitindo, respectivamente. O resultado teórico é apresentado através de linhas contínuas enquanto os resultados obtidos por simulação são representados por pontos. Pode-se observar que o modelo de simulação reproduz o modelo teórico, havendo pequenas diferenças quando há mais de um nó transmitindo, principalmente à taxa de dados de 32 Mbps. Isso é devido à influência do tempo de propagação utilizado na simulação, que não foi levado em conta na análise matemática, para simplificação, por ser um tempo muito pequeno. Nota-se assim que esse tempo não invalida o resultado obtido, mantendo válidos o modelo matemático e a simplificação utilizados. Para apenas 1 nó transmissor, esse tempo não influi, pois assim que o nó acaba de transmitir um quadro, ele está pronto para transmitir o próximo. Mas no caso de haver mais de um nó transmissor, ao término

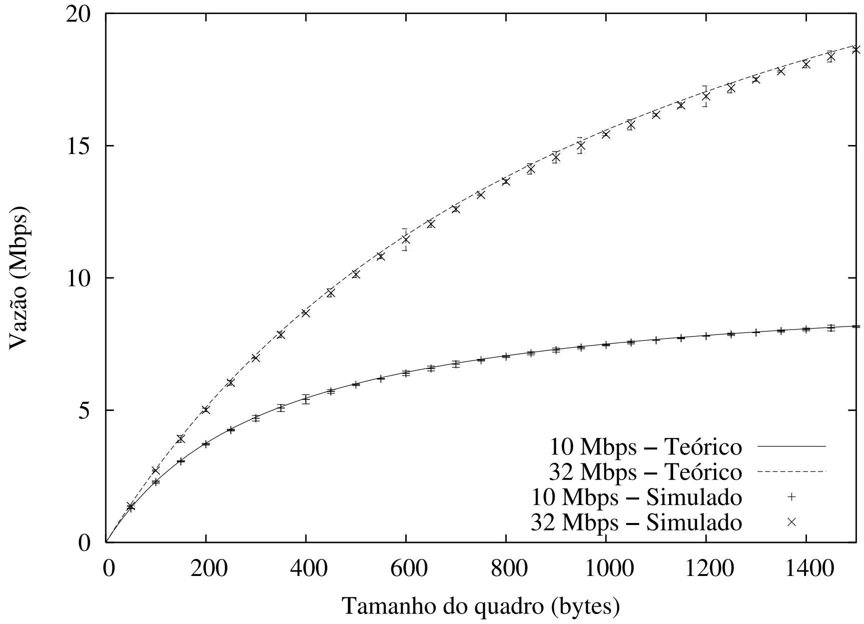


Figura 3.2: Vazão do HomePNAv2 para 2 nós transmissores.

da transmissão de um quadro os nós só percebem que o meio está livre após o tempo de propagação, quando o quadro chega efetivamente aos outros nós da rede. Isso causa uma ligeira diminuição da vazão total da rede, mais perceptível à taxa de 32 Mbps pois o tempo de transmissão de um quadro é menor e o tempo de propagação representa uma fração maior do tempo total de transmissão.

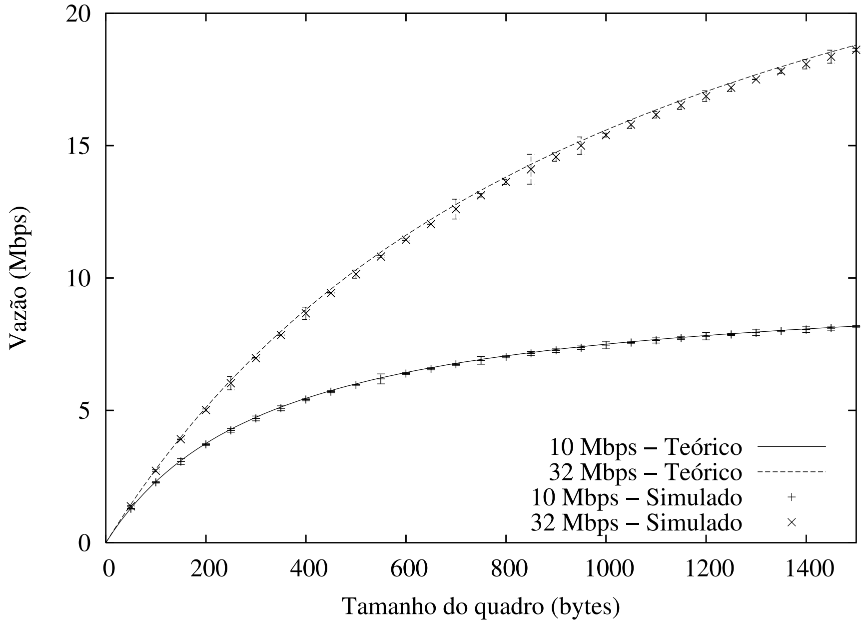


Figura 3.3: Vazão do HomePNAv2 para 3 nós transmissores.

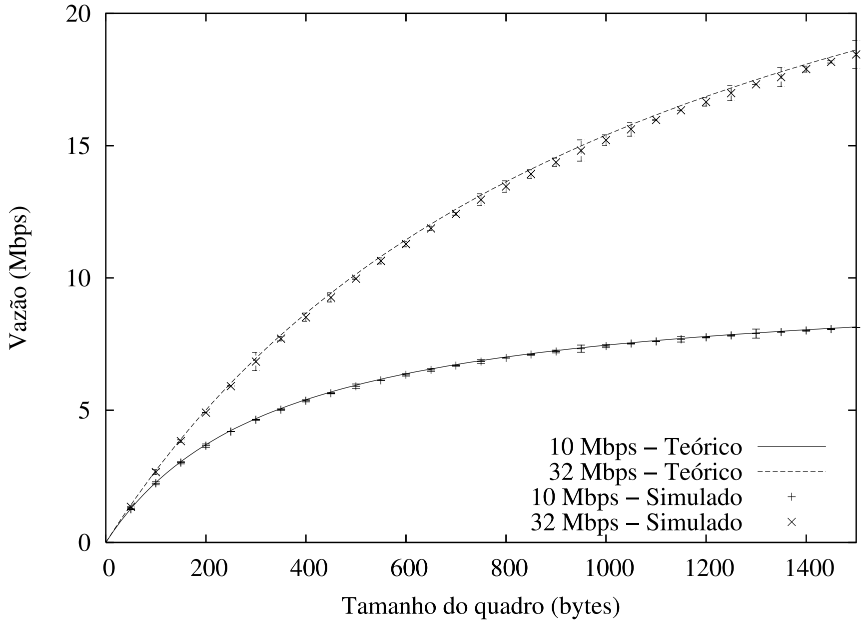


Figura 3.4: Vazão do HomePNAv2 para 4 nós transmissores.

3.1.3 Análise por Simulação

Nesta parte das simulações, o objetivo foi avaliar a eficiência do protocolo de acesso ao meio, analisando a vazão obtida quando se varia o número de nós transmissores na rede. Na Seção 3.1.1 essa análise foi feita matematicamente para até 4 nós. No entanto, como o aumento do número de nós torna a análise complexa, utilizou-se a simulação para avaliar a vazão obtida nestes casos.

O cenário de simulação é constituído de um nó receptor para todos os transmissores, e o número de nós transmissores na rede varia de 1 a 50. Nestas simulações foram utilizadas taxas de transmissão na camada física de 10 e 32 Mbps. Cada simulação dura 100 segundos. Para todas as medidas, foram calculados intervalos de confiança de 95% relativos à média das amostras. Utilizou-se 4 tamanhos de quadros diferentes, desde quadros pequenos de 160 bytes, típicos de um tráfego de voz [41], até quadros grandes de 1500 bytes, para a obtenção da vazão máxima. Para a ocupação máxima da rede, todos os nós transmitem quadros ininterruptamente, o que garante que sempre que o meio estiver livre, todos os nós irão tentar transmitir causando uma colisão entre eles, iniciando o processo de resolução de colisão.

A Figura 3.5 mostra a variação da vazão da rede na taxa de 10 Mbps variando-se agora o número de nós para os 4 tamanhos de quadro. É importante notar que a vazão tende a se manter constante para um número elevado de nós, se estabilizando em um valor que independe do número de nós. Logo, observa-se que o algoritmo de resolução de colisão utilizado mantém o número médio de colisões por quadro transmitido, C/n, constante para um número elevado de nós.

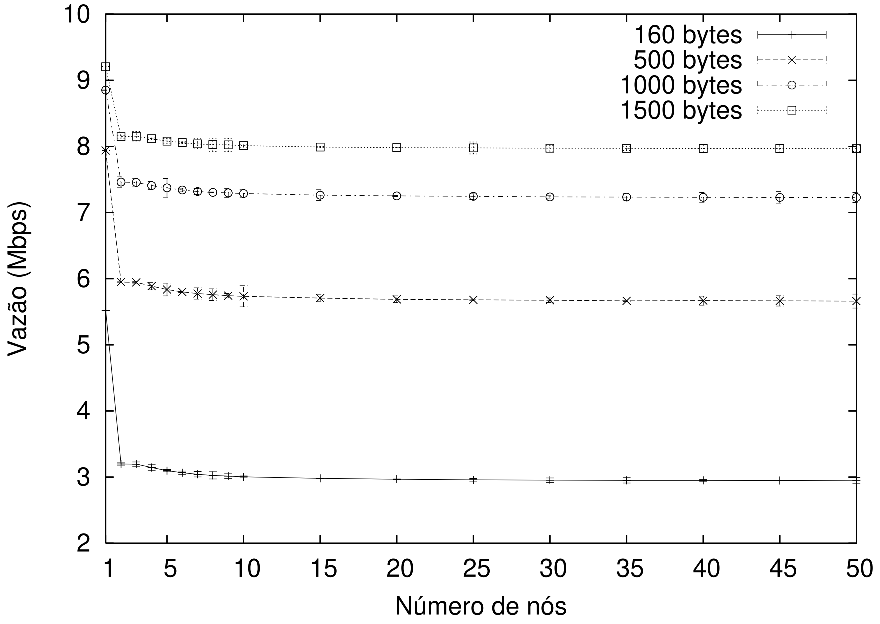


Figura 3.5: Vazão com taxa de transmissão de 10 Mbps.

Para quadros de 1500 bytes, por exemplo, observa-se que a vazão se estabiliza em aproximadamente 7,97 Mbps, ou seja, 79,7% de eficiência. Aplicando estes valores na Eq. 3.11, para valores de n de 40 e 50 nós, por exemplo, obtém-se o mesmo valor para C/n, de aproximadamente $0,93$ [22]. Esse valor independe do tamanho do quadro, e poderia ser obtido também a partir das outras curvas. Nota-se que a variação do número de nós influi pouco na vazão obtida, já que a variação da vazão a partir de 2 nós é pequena até se chegar a um valor praticamente constante. Isso também é observado a partir da análise matemática, já que para 2 nós transmitindo, obteve-se um valor de C/n de $0,75$, e a 10 Mbps obtém-se uma vazão de 8,18 Mbps, próxima dos 7,97 Mbps obtidos para um número elevado de nós. Assim, utilizando este valor de $C/n = 0,93$ na Eq. 3.11, chega-se a uma equação que pode ser considerada como a vazão mínima obtida na rede, independente do número de nós.

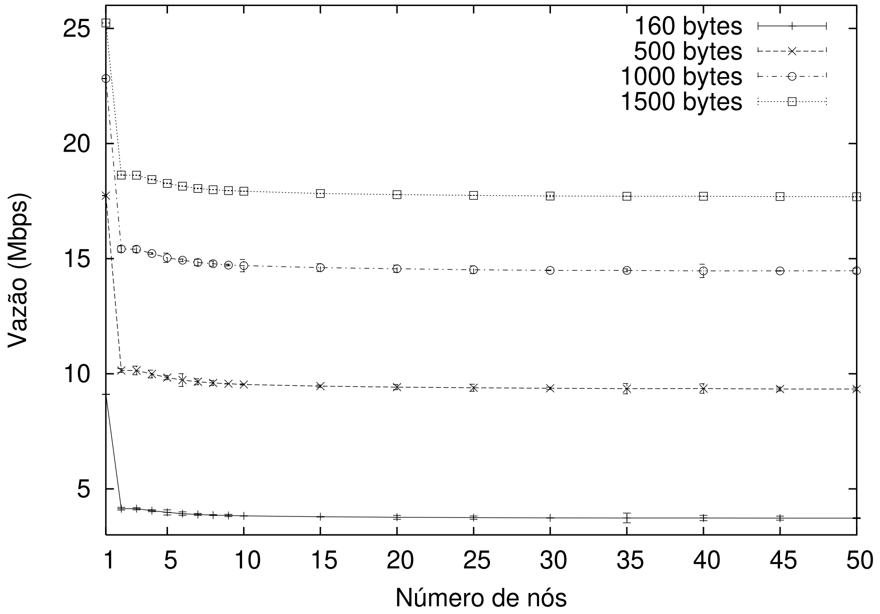


Figura 3.6: Vazão com taxa de transmissão de 32 Mbps.

A Figura 3.6 apresenta os valores de vazão para a taxa de 32 Mbps. O comportamento é análogo ao da figura anterior, e pode-se igualmente chegar ao valor de C/n anterior, válido para qualquer taxa de transmissão. Nota-se também que para uma taxa de transmissão maior há uma maior diminuição da vazão devido às colisões, já que o tempo de transmissão dos dados é menor, e o tempo de resolução de colisão representa uma fração maior do tempo de transmissão total. Para a taxa de 32 Mbps e quadros de 1500 bytes, com um número elevado de nós transmissores tem-se uma vazão de 17,7 Mbps e eficiência de 55,3%, contra 79,7% de eficiência para a taxa de 10 Mbps.

3.2 Análise do HomePNAv3

Nesta seção são apresentados os resultados de desempenho no modo AMAC do HomePNAv3. Para se chegar a esses resultados, o modo AMAC do HomePNAv3 foi também implementado no simulador de redes *ns-2* [40]. Esse módulo se baseou no módulo do HomePNAv2, onde foi implementado o novo protocolo de gerenciamento de colisões. Ficou também limitado o número máximo de nós na rede a 27, de acordo com o padrão HomePNAv3.

O cenário de simulação para a análise do HomePNAv3 é constituído de um nó receptor para todos os transmissores. O número de nós transmissores na rede varia de 1 a 27. Os conjuntos de *slots* de resolução de colisão são escolhidos aleatoriamente em cada rodada de simulação, de modo a se obter um resultado que é a média de todos os casos. No entanto, uma técnica de escolha destes conjuntos poderia ser utilizada para minimizar o número de colisões e aumentar a eficiência. Por exemplo, para até 3 nós poderiam ser escolhidos 3 conjuntos com o primeiro *slot* diferente, o que faria com que a resolução se desse logo após a primeira colisão. Em todas as simulações é utilizada a taxa de transmissão de 128 Mbps, por ser a taxa máxima de transmissão definida como obrigatória pelo padrão [34]. Como para as outras medidas, cada simulação dura 100 segundos e os intervalos de confiança são de 95%. Em todas as simulações todos os nós possuem prioridade 7, pois para esta prioridade obtém-se a maior vazão [22]. Para a ocupação máxima da rede, novamente utiliza-se a vazão de saturação, onde todos os nós transmitem quadros ininterruptamente.

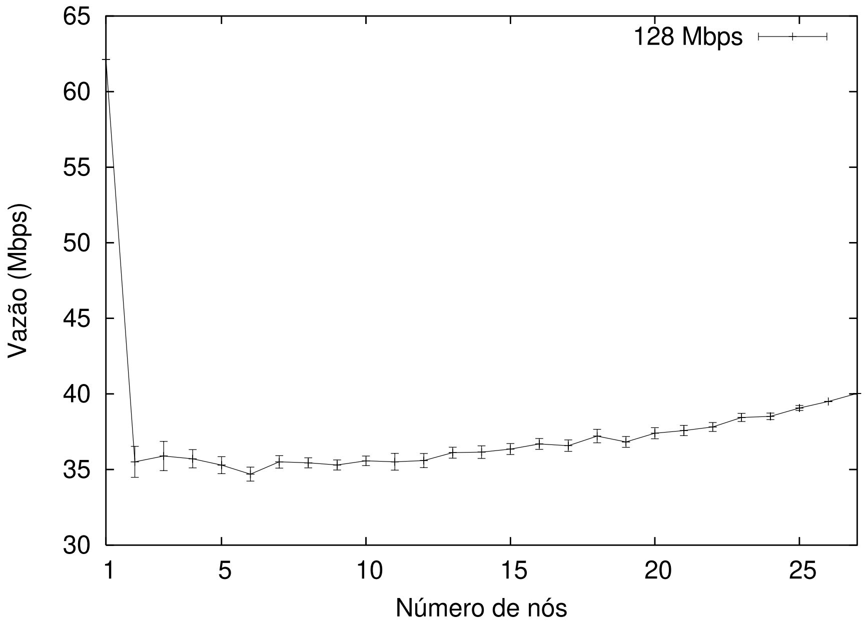


Figura 3.7: Análise de vazão do HomePNAv3.

A Figura 3.7 mostra a vazão da rede na taxa de transmissão nominal de 128 Mbps, variando-se o número de nós, utilizando quadros de 1500 bytes. É importante notar que, enquanto no HomePNAv2 a vazão tendia a se estabilizar para um grande número de nós, agora a vazão cresce com o aumento do número de nós. Isso acontece devido à técnica de gerenciamento de colisões utilizada pelo HomePNAv3, que é capaz de diminuir o número de colisões e, conseqüentemente, aumentar a vazão da rede. Para se avaliar essa melhora, pode-se utilizar o parâmetro C/n. Quanto menor esse valor, maior a eficiência da rede. Na Seção 3.1.3 mostrou-se que para o HomePNAv2 esse parâmetro se estabiliza em $0,93$ para mais de 15 nós. No HomePNAv3, para o caso de 27 nós, observa-se pela Figura 2.11 que na primeira colisão entre os 27 nós, eles são divididos em 3 grupos de 9 nós, que geram mais 3 colisões, se dividindo novamente em 9 grupos de 3 nós, que geram mais 9 colisões para a transmissão de todos os quadros. Assim, tem-se um total de $C = 1 + 3 + 9 = 13$ colisões, para a transmissão de $n = 27$ quadros. Logo, no caso do HomePNAv3 com 27 nós, tem-se:

$$\frac{C}{n} = \frac{1+3+9}{27} = 0,48, \tag{3.15}$$

donde pode-se notar a maior eficiência do novo padrão, que gera menos colisões por quadro transmitido, limitando porém o número máximo de estações na rede.

Na Figura 3.7 é interessante notar também a grande diferença entre a taxa de transmissão nominal da rede e a máxima vazão obtida. Para a taxa de 128 Mbps, com apenas 1 nó

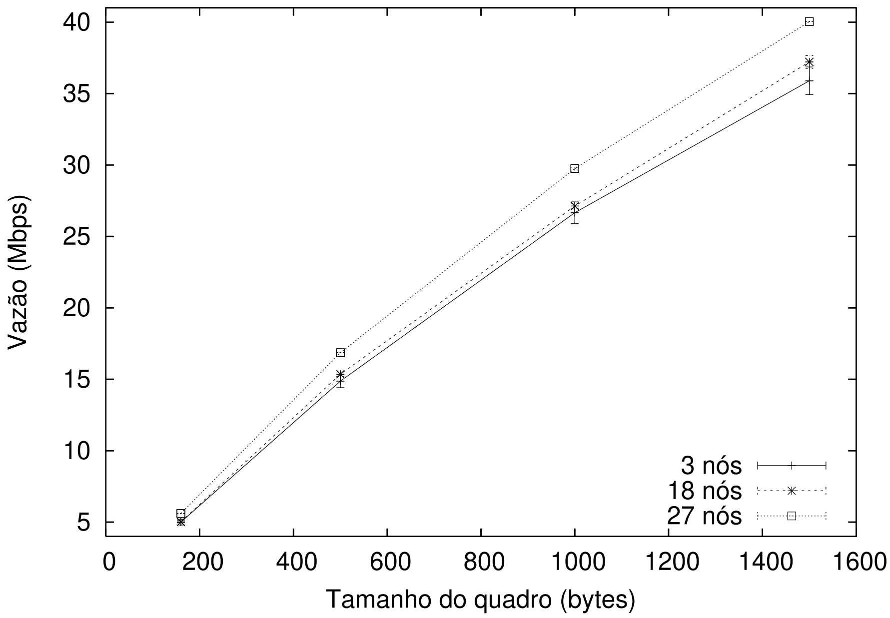


Figura 3.8: Análise da influência do tamanho do quadro no HomePNAv3.

transmissor tem-se uma vazão máxima de 62,1 Mbps, ou seja, eficiência de 48,5%. Para mais de um nó, essa taxa caiu para quase a metade, chegando a 34,7 Mbps. Essa diferença deve-se à diminuição do tempo de transmissão total do quadro para taxas de transmissão mais altas enquanto foram mantidos todos os outros tempos de cabeçalho, fim de quadro, *slots* de prioridade e espaçamento entre quadros. Assim, o tempo gasto com uma colisão é da ordem do tempo de transmissão de um quadro, podendo ser inclusive maior. Para altas taxas, como 128 Mbps, o tempo de transmissão de um quadro fica próximo do tempo mínimo de quadro, de 92,5 μs, enquanto a colisão, além de gastar 92 μs, também acarreta os 3 *slots* de resolução de colisão subseqüentes, cada um com a duração de 32 μs. Com isso as colisões, mesmo que em menor número, causam uma maior degradação da vazão agregada.

Todo quadro requer um cabeçalho e um fim de quadro e, por compatibilidade e para que todas estações possam monitorar a rede, eles são transmitidos na taxa básica. Assim, há um "custo fixo´´ por quadro. Portanto, para quadros menores, o desempenho da rede é pior, chegando a uma vazão de apenas 5 Mbps para quadros de 160 bytes. A Figura 3.8 apresenta a vazão obtida com a variação do tamanho do quadro. Nota-se também, pelas Figuras 3.7 e 3.8, que o comportamento da rede depende somente do número de colisões, que é função do número de nós. Assim, em um mesmo cenário, alterando-se a taxa de transmissão ou o tamanho do quadro, muda-se os valores da vazão, mas o número médio de colisões por quadro, C/n, se mantém, mantendo assim o mesmo comportamento no processo de resolução de colisões. Por este motivo, a partir deste ponto serão utilizadas somente as taxas máximas de transmissão, 32 Mbps para o HomePNAv2 e 128 Mbps para o HomePNAv3.

Capítulo 4

Um Novo Mecanismo de Acesso ao Meio para o Padrão HomePNA

NO padrão HomePNA são definidos oito níveis de prioridade, que possuem uma propriedade importante: quadros de prioridades diferentes não têm que disputar o meio, já que cada prioridade possui seu *slot* correspondente para a tentativa de acessar o meio para transmissão. Um quadro de maior prioridade é transmitido primeiro, e, em seguida, um de menor prioridade, não havendo colisão entre quadros de prioridades diferentes. Logo, em um caso em que três estações com prioridade 7 queiram transmitir seus quadros, estes colidem um certo número de vezes, até que os três quadros possam ser transmitidos. Considere então que, em outra situação, esses mesmo três quadros recebam prioridades diferentes, sendo elas 7, 6 e 5. Neste caso, os três quadros não iriam colidir, sendo transmitidos em ordem de prioridade. Economizar-se-ia então o tempo gasto com as colisões, precisando, para isso, de somente dois *slots* de prioridade, o que é da ordem de 4 vezes menor que o tempo gasto com somente uma colisão. Isso tornaria a rede mais eficiente, e essa foi a motivação para a criação deste novo mecanismo.

4.1 O Mecanismo Proposto

Neste mecanismo, propõe-se a agregação de alguns *slots* de prioridade para o nível de prioridade mais alto, de forma que os quadros de maior prioridade sejam distribuídos nestes *slots*, evitando colisões. Cada estação, ao transmitir um quadro de prioridade 7, escolheria então, aleatoriamente, um desses *slots*, que seria utilizado para a transmissão do quadro. O mecanismo funcionaria como uma função de *backoff* aleatório dentro da prioridade 7, onde haveria um *slot* de duração maior, e os quadros poderiam ser transmitidos em tempos diferentes, evitando colisões [23]. A idéia poderia ser aplicada a qualquer prioridade, mas a prioridade 7 foi definida para se privilegiar a maior prioridade que é a mais importante em relação à qualidade de serviço.

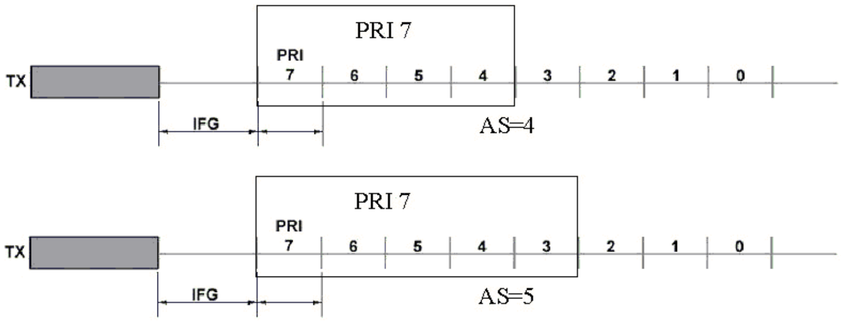


Figura 4.1: Mecanismo proposto para $AS = 4$ e $AS = 5$.

O número de *slots* agregados na maior prioridade foi definido como AS (*Aggregated Slots*). O valor de AS pode variar de 2 a 7, para que se mantenha pelo menos dois níveis de prioridade diferentes. Este mecanismo pode ser utilizado para ambos os padrões HomePNAv2 e HomePNAv3, já que ambos possuem o mesmo esquema de prioridades. Deve ser feita, então, a determinação do melhor valor de AS para cada um dos casos. A utilização de um valor muito grande para AS pode não ser tão eficiente, principalmente em cenários de poucos nós, já que, em média, um tempo extra é adicionado para os *slots* de maior prioridade. Para exemplificar, suponha que três *slots* sejam agregados na prioridade 7. Neste caso, um quadro que deseja acessar o meio deverá aleatoriamente escolher um dos três *slots* agregados. Se escolher o terceiro *slot* há um evidente atraso no acesso ao meio. Portanto, o mecanismo proposto será eficaz ao evitar colisões, na condição de rede com carga alta, mas introduz atrasos desnecessários na condição da rede com carga baixa onde não poderia ocorrer colisões. A Figura 4.1 apresenta um exemplo de como seria a utilização do mecanismo para os casos de $AS = 4$ e $AS = 5$.

Uma característica importante deste mecanismo é que ele não requer que o padrão HomePNAv2 ou v3 seja modificado. As modificações propostas podem ser implementadas em uma subcamada acima da camada MAC. Essa camada funcionaria como uma interface de mapeamento de prioridades. A Tabela 4.1 apresenta um exemplo de como pode ser feito esse mapeamento, utilizando, por exemplo, $AS = 4$. Esse mapeamento pode ser feito da maneira que melhor convier, desde que o número de *slots* do AS seja respeitado.

Tabela 4.1: Exemplo de mapeamento das prioridades para AS=4.

<table>
<tr><th>Prioridade real</th><th>Prioridade no HomePNA</th></tr>
<tr><td>7</td><td>7
6
5
4</td></tr>
<tr><td>6
5</td><td>3</td></tr>
<tr><td>4
3</td><td>2</td></tr>
<tr><td>2
1</td><td>1</td></tr>
<tr><td>0</td><td>0</td></tr>
</table>

Em contrapartida, intuitivamente nota-se que esse mecanismo pode piorar o desempenho de outras prioridades, já que tráfegos de diferentes prioridades vão ser mapeados no mesmo slot de prioridade. Pelo exemplo da Tabela 4.1, os tráfegos de prioridade 6 e 5 irão disputar o meio no mesmo slot de prioridade, 3. Assim, podem ocorrer mais colisões caso essas duas prioridades sejam usadas, e não haverá mais isolamento entre as duas prioridades. Para solucionar esse problema, pode ser feito um novo mapeamento nas prioridades dos tráfegos utilizados na rede, de modo que prioridades concorrentes não sejam utilizadas. O tráfego de prioridade 5 poderia então ser mapeado para a prioridade 4 ou 3, não concorrendo com o tráfego da prioridade 6. Desse modo, no exemplo da Tabela 4.1 seriam mantidas 5 prioridades diferentes, sem perda de desempenho.

Para se achar o melhor valor de AS e analisar o desempenho do mecanismo proposto, ele foi implementado nos módulos de simulação. Para facilitar a apresentação dos resultados, os padrões HomePNAv2 e v3 utilizando o mecanismo proposto serão denominados HomePNAv2+ e v3+, respectivamente.

4.2 Resultados

Com os módulos de simulação HomePNAv2+ e HomePNAv3+ pode-se então analisar a eficiência do mecanismo, e descobrir o melhor valor para AS. Para se chegar ao melhor valor para AS é utilizado como parâmetro a vazão agregada da rede. Nesta seção são comparados os resultados da vazão agregada para vários valores de AS, obtendo-se o melhor valor, e medindo o ganho obtido com o uso do mecanismo proposto.

Em contrapartida, o uso deste mecanismo poderia também aumentar o atraso dos quadros que sorteiam as menores prioridades agregadas. Isso poderia causar um aumento do atraso médio e da variação do atraso (*jitter*) desses quadros. Logo, é feita também uma análise do atraso médio e da variação do atraso com o uso do mecanismo proposto, para avaliar o seu efeito nestes parâmetros. Essa análise leva em consideração o atraso de acesso ao meio, ou seja, o tempo que uma estação leva do fim da transmissão de um quadro até o fim da transmissão do próximo quadro. Não é considerado o atraso em filas ou em camadas superiores, já que estamos interessados somente no atraso adicionado pela subcamada MAC.

4.2.1 HomePNAv2+

Com o módulo HomePNAv2+ pode-se então analisar a eficiência do mecanismo, e descobrir o melhor valor para AS. Utiliza-se um cenário similar ao usado na Seção 3.1.3, onde todas as estações transmitem quadros de 1500 bytes e têm prioridade 7, sendo que no HomePNAv2+ a prioridade 7 representa a prioridade mais alta, incluindo todas as prioridades agregadas. No entanto, como os resultados se mostraram aproximadamente constantes para mais de 15 nós, nesta análise o número de nós variou somente de 1 a 30. Serão apresentados os resultados para a taxa de transmissão máxima de 32 Mbps, pois o comportamento para as outras taxas de transmissão é análogo. O intervalo de confiança utilizado foi de 95%, representado no gráfico por barras de erro verticais.

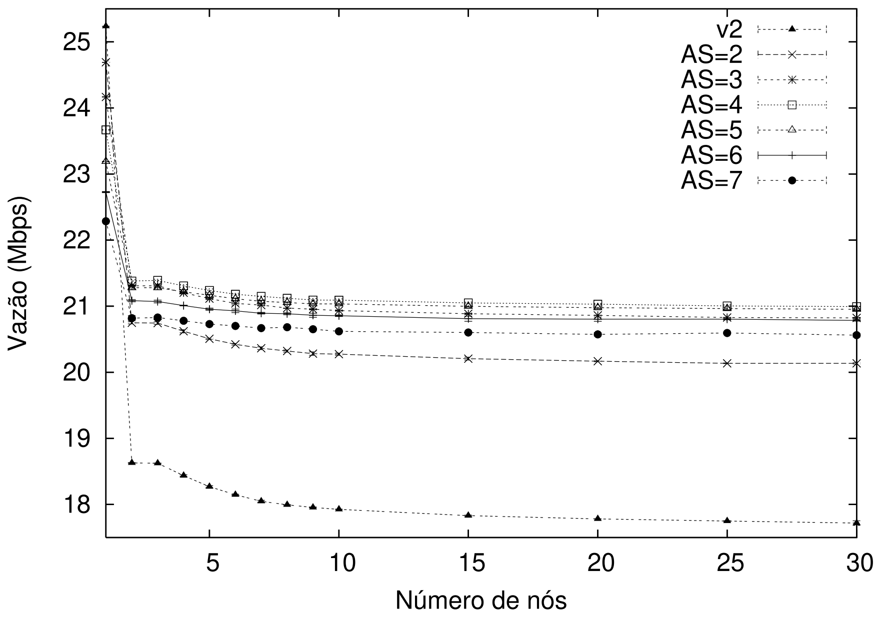


Figura 4.2: Vazão do HomePNAv2+ com taxa de transmissão de 32 Mbps.

A Figura 4.2 mostra os resultados para até 30 nós com taxa de transmissão de 32 Mbps. Aqui são apresentados os resultados do HomePNAv2 e do HomePNAv2+ para valores de AS de 2 a 7. Nota-se que para mais de um nó, pode-se obter um ganho considerável para qualquer valor de AS, mas neste gráfico é difícil diferenciar qual das opções obteve o melhor desempenho. Pode-se perceber também que para apenas 1 nó há uma pequena perda de vazão. Essa pequena perda se deve ao tempo de acesso adicionado devido aos *slots* de prioridades agregados na prioridade 7. Como não há colisão para um nó não há nenhuma vantagem neste caso. O número de *slots* adicionados aos quadros que sorteiam a menor das prioridades agregadas é $AS - 1$, e para os quadros que sorteiam a prioridade 7 não há *slot* agregado, dessa forma tem-se que o número médio de *slots* adicionados, K, é:

$$K = (AS - 1)/2. \tag{4.1}$$

Daí pode-se concluir que quanto maior o valor de AS, maior o valor de K, e maior é a perda para 1 nó, como mostra a Figura 4.2.

Na Figura 4.3 são apresentadas as mesmas vazões da figura anterior, porém agora normalizadas pela vazão do HomePNAv2. A partir desta figura, encontra-se o melhor valor para AS, 4, que foi o valor definido para o HomePNAv2+. Com esse valor de AS, conseguiu-se um ganho entre 14,8% para 2 nós e 18,5% para 30 nós, superando os outros valores de AS para qualquer quantidade de nós. Nota-se que o ganho obtido cresce com o número de nós, mostrando-se mais eficiente para redes com uma grande quantidade de estações.

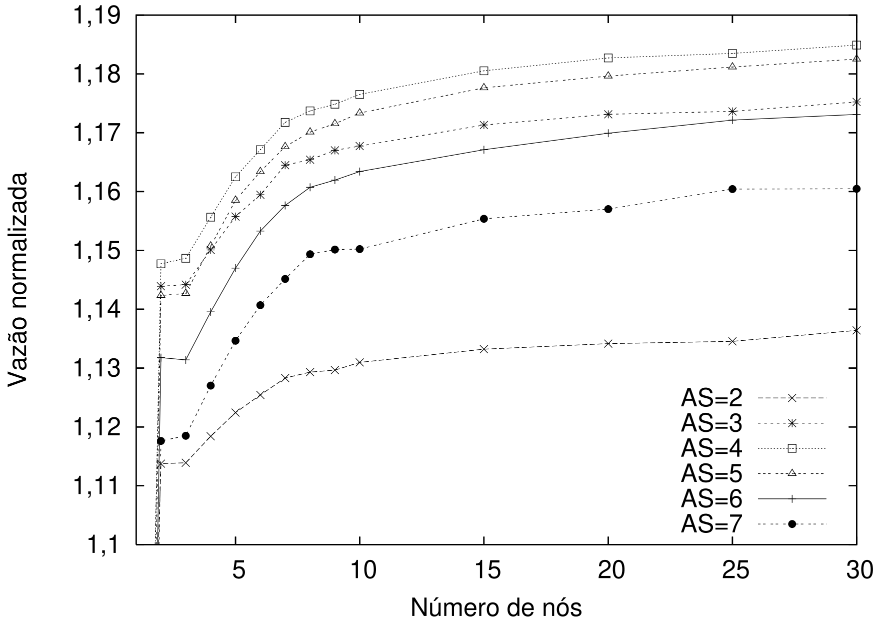


Figura 4.3: Vazão normalizada do HomePNAv2+ com taxa de transmissão de 32 Mbps.

O tamanho do quadro também influencia o ganho que pode ser obtido. Para quadros mais curtos, o tempo de transmissão da carga útil é menor, assim o tempo perdido nas colisões representa uma fração maior do tempo total de transmissão. Logo, espera-se que o ganho aumente para quadros menores. Pelo mesmo motivo, o ganho também deve ser maior para taxas mais altas, razão pela qual utiliza-se a taxa máxima de 32 Mbps. A Figura 4.4 apresenta os resultados da vazão quando se varia o tamanho do quadro de 160 até 1500 bytes, mantendo um número fixo de 15 nós e $AS = 4$. Apesar do ganho absoluto de vazão ser menor para quadros menores, o ganho relativo aumenta, como

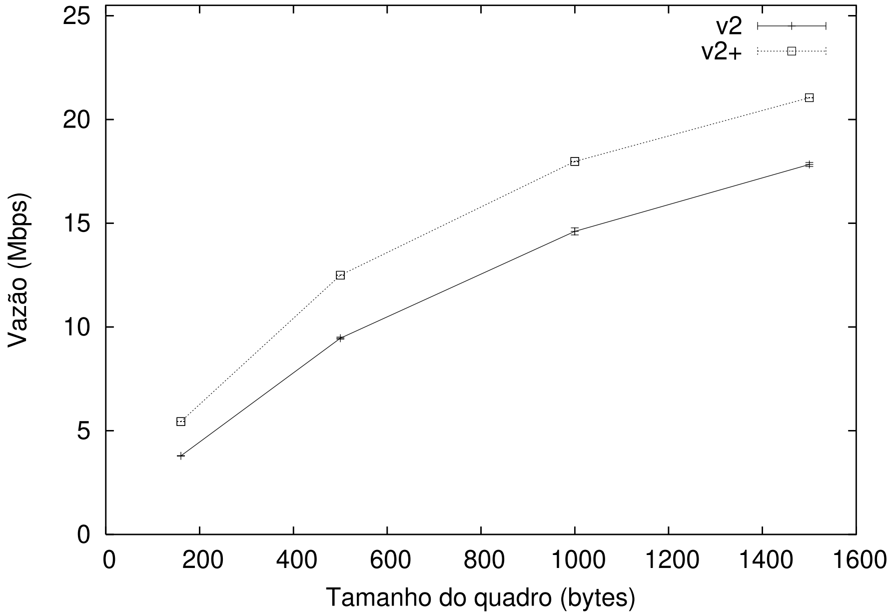


Figura 4.4: Vazão do HomePNAv2+ variando o tamanho do quadro.

mostra a Figura 4.5. Essa figura apresenta as mesmas vazões do gráfico anterior, agora normalizadas, e pode-se observar que, para quadros de 160 bytes, o ganho obtido pelo HomePNAv2+ pode chegar a até 44%.

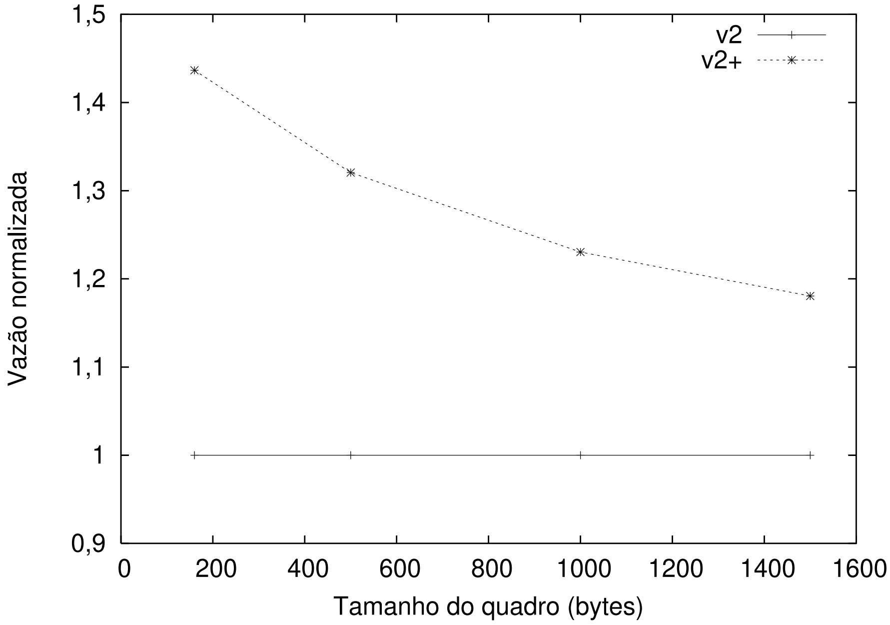


Figura 4.5: Vazão normalizada do HomePNAv2+ variando o tamanho do quadro.

Para analisar o atraso médio e a variação do atraso, foram feitas simulações em um cenário com 1 a 30 nós, todos utilizando quadros de 1500 bytes, prioridade 7 e intervalos de confiança de 95%. A taxa utilizada foi de 32 Mbps, e foi utilizada a mesma condição de ocupação máxima da rede, onde todos os nós transmitem quadros ininterruptamente. Na Figura 4.6 é apresentada uma comparação do atraso médio por quadro para o HomePNAv2 e para o HomePNAv2+. Nota-se que o HomePNAv2+ não aumenta o atraso médio da rede, pelo contrário, há uma ligeira diminuição desse atraso. Para a condição analisada de rede saturada com todo tráfego na prioridade mais alta, tem-se que o somatório desses atrasos para o HomePNAv2+ é menor que para o HomePNAv2. Isto significa que ao se evitar colisões poupa-se mais tempo que se gasta com o atraso no acesso devido a escolha aleatória de um dos *slots* agregados.

Para um cenário com 30 nós, por exemplo, o HomePNAv2 possui um atraso médio de 20,2 ms, enquanto o HomePNAv2+ apresentou um atraso médio de somente 17,1 ms.

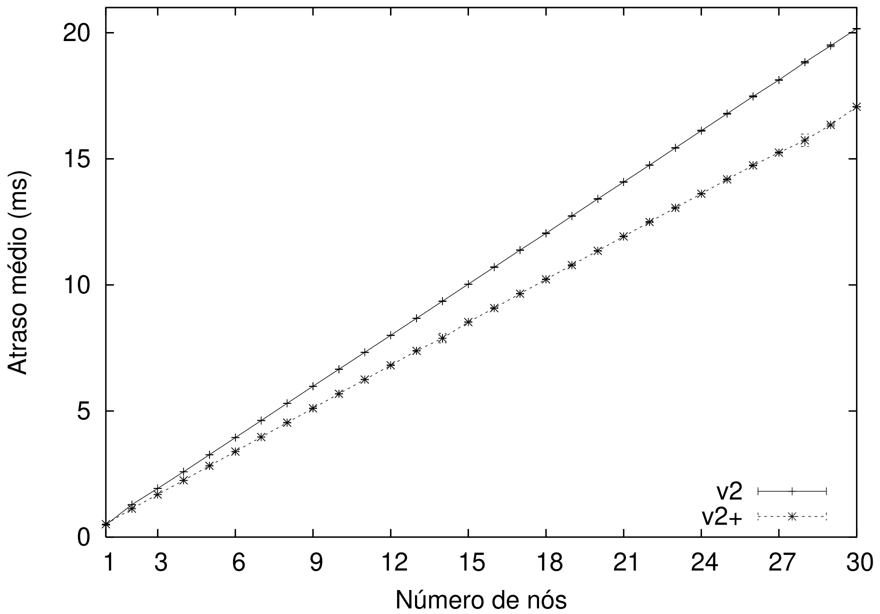


Figura 4.6: Atraso médio do HomePNAv2 e HomePNAv2+.

Em contrapartida, uma conseqüência do uso do mecanismo proposto é o aumento da variação do atraso da rede, como pode se verificar na Figura 4.7. A variação do atraso é definida como o desvio padrão do atraso médio. Enquanto no HomePNAv2 esta variação é de 8,1 ms para o caso de 30 nós, no HomePNAv2+ a variação do atraso chega a 32 ms para o mesmo caso. Esse aumento da variação do atraso acontece por que o mecanismo proposto faz com que a transmissão de alguns quadros seja adiada em favor da transmissão com sucesso de um número maior de quadros nas prioridades mais altas, porque evitam-se colisões. Isso faz com que melhorem a vazão e o atraso médio da rede em detrimento da variação do atraso.

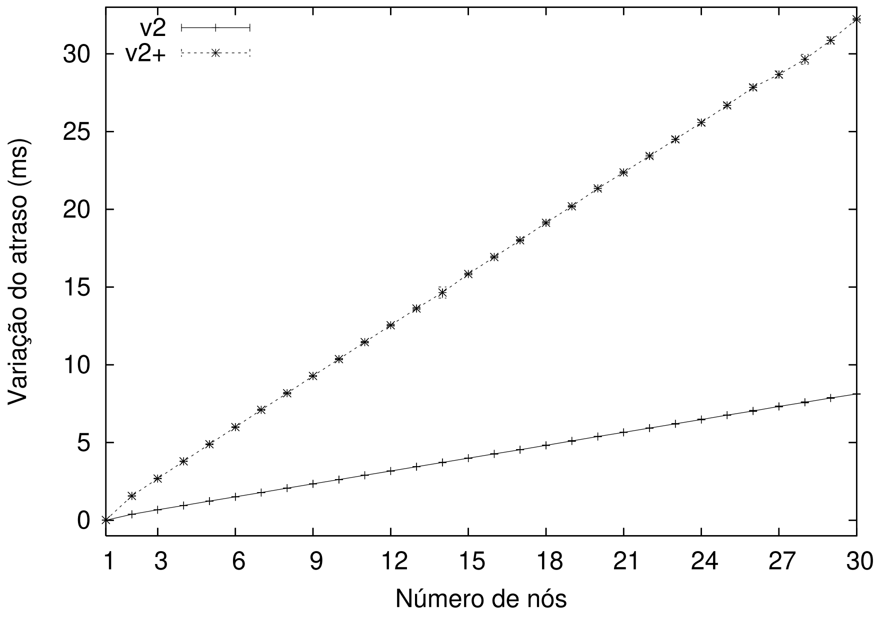


Figura 4.7: Variação do atraso do HomePNAv2 e HomePNAv2+.

4.2.2 HomePNAv3+

A mesma análise foi feita para o HomePNAv3+, para ser determinado o melhor valor de AS. O cenário utilizado é similar ao anterior, porém limitado ao número máximo de 27 nós e utilizando uma taxa de transmissão de 128 Mbps. Novamente foram utilizados quadros de 1500 bytes e prioridade 7. Os conjuntos de *slots* de resolução de colisão foram escolhidos aleatoriamente. O intervalo de confiança utilizado foi de 95%, representado no gráfico por barras de erro verticais.

Como o HomePNAv3 introduz uma técnica de gerenciamento de colisões que diminui o número de colisões em relação ao HomePNAv2, o esperado é que o melhor valor de AS seja igual ou menor que o encontrado para o HomePNAv2, já que agora há menos colisões a tratar. Então, nestas simulações, os casos de $AS = 6$ e $AS = 7$ foram desconsiderados, por estarem longe do melhor valor. O valor de $AS = 5$ foi mantido para que se pudesse analisar o comportamento das curvas.

A Figura 4.8 apresenta os resultados da vazão para o HomePNAv3+. Pode-se notar que, mais uma vez, todas as opções de valores de AS se mostraram mais eficientes que o HomePNAv3 para mais de um nó na rede. Neste caso, as curvas de $AS = 3$ e $AS = 4$ ficaram bem próximas. As curvas de $AS = 2$ e $AS = 5$ se apresentam um pouco abaixo, mostrando que o melhor valor é 3 ou 4. Nota-se também a pequena perda para o caso de apenas 1 nó, devido ao fato de não haver colisões a serem evitadas. Essa perda novamente é proporcional ao número médio de *slots* adicionados, K, conforme a Equação 4.1.

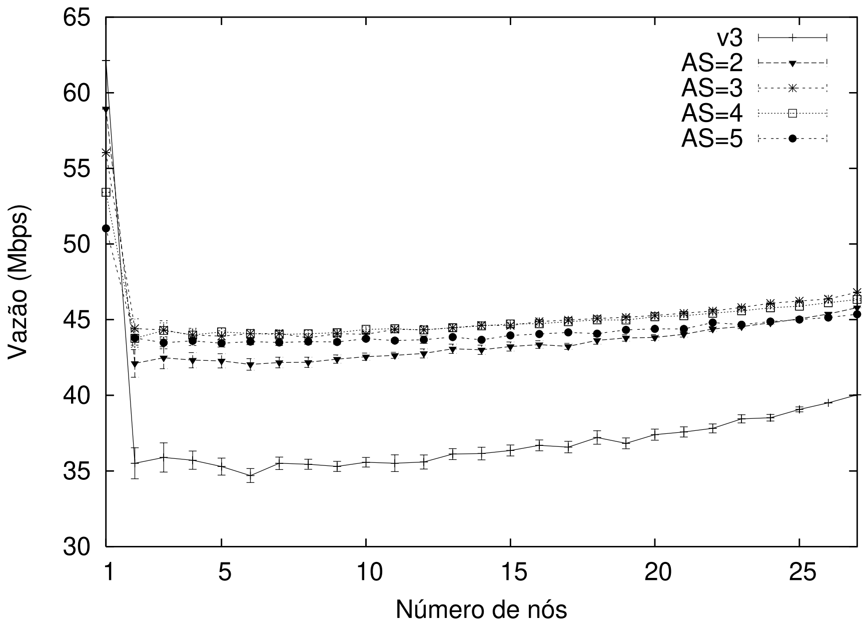


Figura 4.8: Vazão do HomePNAv3+ com taxa de transmissão de 128 Mbps.

A Figura 4.9 repete os valores de vazão, agora normalizados. Para poucos nós, as curvas de $AS = 3$ e $AS = 4$ mantém um desempenho muito parecido. Entretanto, para mais de 15 nós a curva de $AS = 3$ apresenta uma ligeira vantagem. Além disso, a curva de $AS = 3$ também apresenta uma menor perda em relação ao HomePNAv3 para o caso de apenas 1 nó. Assim, o melhor valor encontrado para o HomePNAv3+ foi $AS = 3$. Nota-se também que obteve-se um ganho entre 16,9% e 27%, para 27 e 6 nós, respectivamente.

A vazão do HomePNAv3+ variando-se o tamanho do quadro é apresentada na Fi-

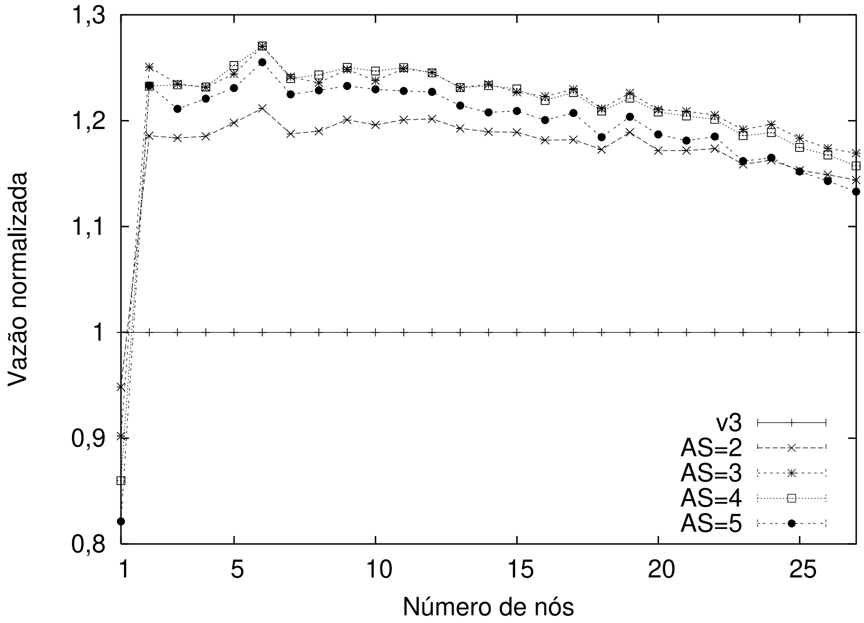


Figura 4.9: Vazão normalizada do HomePNAv3+ com taxa de transmissão de 128 Mbps.

gura 4.10. Nesta simulação, foi utilizado um cenário com 6 nós, o que apresentou o maior ganho na figura anterior. Observa-se que a vazão para quadros de 160 bytes subiu de 4,6 Mbps para 6,3 Mbps. A vazão normalizada é também apresentada na Figura 4.11. Do mesmo modo que o HomePNAv2+, o HomePNAv3+ também apresentou melhores resultados para quadros menores. Isso se deve às mesmas razões, já que o tempo de transmissão da carga útil é menor, e o tempo gasto com uma colisão representa então uma fração maior do tempo total de transmissão. Observa-se que o ganho obtido variou de 27% para quadros de 1500 bytes até 35,8% para quadros de 160 bytes, que foi o ganho máximo obtido com o HomePNAv3+.

Para analisar o atraso médio e a variação do atraso, foram feitas simulações em um cenário com 1 a 27 nós, todos utilizando quadros de 1500 bytes e prioridade 7. Foi utilizada a taxa de transmissão de 128 Mbps, com a condição de ocupação máxima da rede. O intervalo de confiança utilizado foi novamente de 95%. Na Figura 4.12 é apresentado o atraso médio do HomePNAv3+ em comparação ao HomePNAv3. Observa-se que o HomePNAv3+ apresenta novamente uma ligeira diminuição do atraso médio, da mesma forma que no HomePNAv2+. Para o caso de 27 nós, enquanto o HomePNAv3 apresenta um atraso médio de 15,7 ms, o atraso do HomePNAv3+ foi de 14,5 ms.

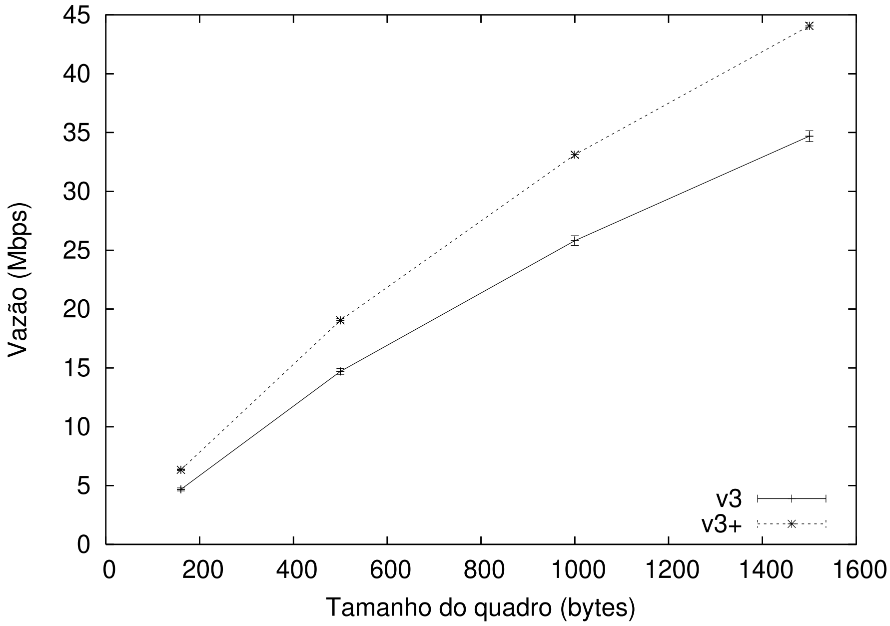


Figura 4.10: Vazão do HomePNAv3+ variando o tamanho do quadro.

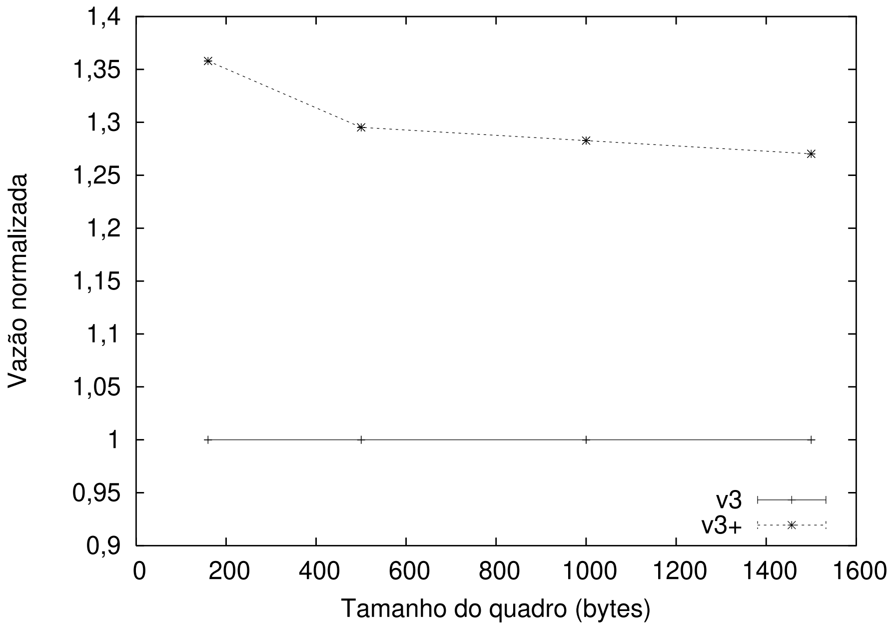


Figura 4.11: Vazão normalizada do HomePNAv3+ variando o tamanho do quadro.

A Figura 4.13 apresenta a comparação da variação do atraso do HomePNAv3 com o HomePNAv3+. Novamente nota-se que o uso do mecanismo proposto aumentou a variação do atraso da rede. Para o HomePNAv3 a variação do atraso é nula para o cenário proposto. Isso acontece porque nesse caso todos os nós já tem uma seqüência de transmissão definida pelos seus *slots* de resolução de colisão. E como todos os nós transmitem qua-

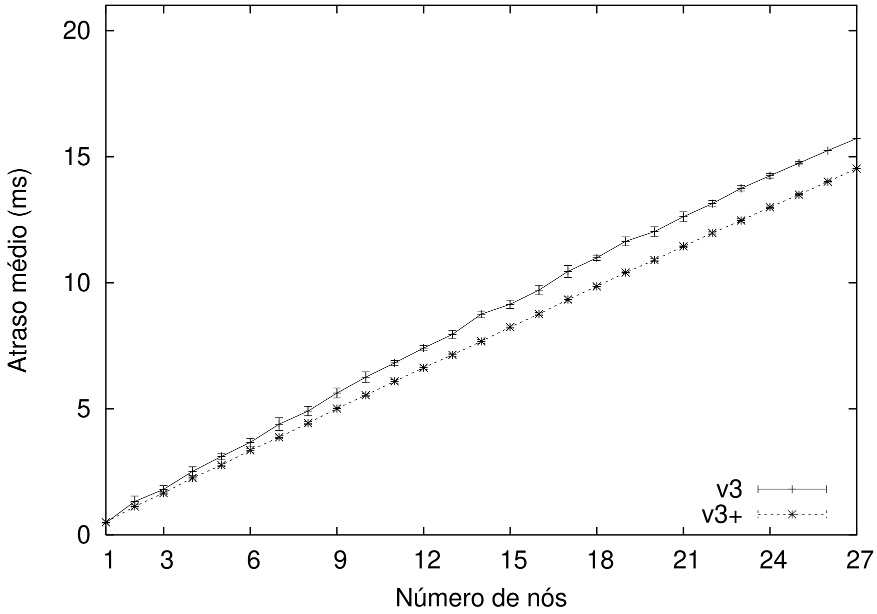


Figura 4.12: Atraso médio do HomePNAv3 e HomePNAv3+.

dros ininterruptamente, o intervalo entre as transmissões será o mesmo, já que a seqüência de transmissão é sempre a mesma. Com o uso do mecanismo proposto, observa-se que houve um aumento da variação do atraso, já que essa seqüência não é mais mantida. No caso de 27 nós, o HomePNAv3+ apresentou uma variação do atraso de 20,2 ms.

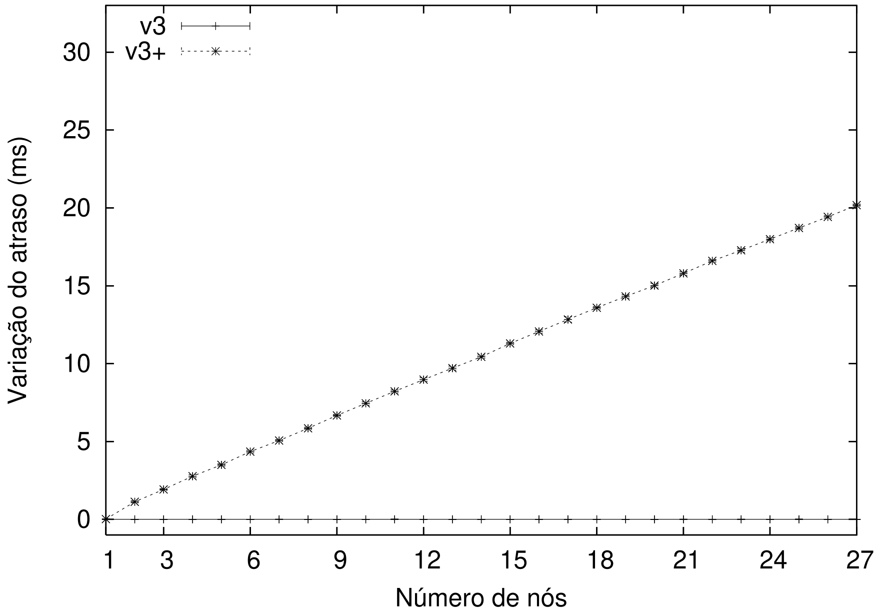


Figura 4.13: Variação do atraso do HomePNAv3 e HomePNAv3+.

4.2.3 Comparação dos Protocolos

Nesta seção são comparadas todas as opções de acesso ao meio apresentadas neste capítulo, ou seja, HomePNAv2, v2+, v3 e v3+, em condições iguais. Para isso, foi utilizada a maior taxa de transmissão comum a todos, 32 Mbps, em um cenário com um número de nós que varia de 1 a 27. Os quadros são de 1500 bytes, todos os nós utilizam prioridade 7 e o intervalo de confiança utilizado foi de 95%.

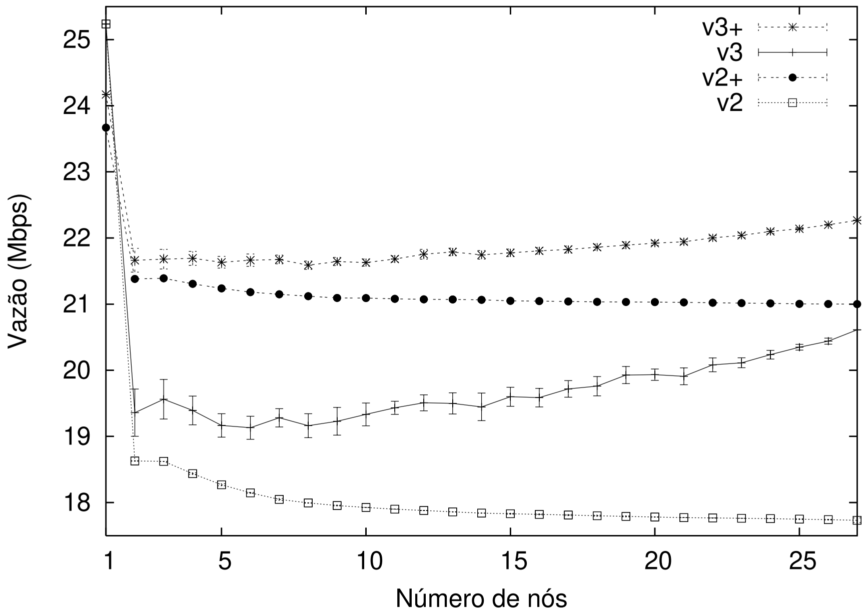


Figura 4.14: Comparação das versões do HomePNA com taxa de transmissão de 32 Mbps.

A Figura 4.14 apresenta os resultados da vazão obtida em função do número de nós da rede. Observa-se que o HomePNAv3+ apresentou a melhor eficiência entre todos, chegando a uma vazão máxima de 22,2 Mbps para mais de 1 nó na rede. No entanto, a desvantagem do HomePNAv3+ e do HomePNAv3 é a limitação do número de nós na rede a 27, enquanto nos padrões HomePNAv2+ e v2 não há limitação do número de nós. Caso seja necessário construir uma rede com mais de 27 nós, somente o HomePNAv2 e o HomePNAv2+ poderão ser utilizados. Nesses casos, o HomePNAv2+ apresenta os melhores resultados, com uma vazão máxima entre 21 e 21,5 Mbps para cenários com mais de 1 nó.

Outro aspecto interessante a ser analisado é a comparação entre os padrões HomePNAv2+ e HomePNAv3. Nota-se pelo gráfico que o HomePNAv2+ apresentou um desempenho melhor que o HomePNAv3, para qualquer quantidade de nós. Esse resultado significa que, quando aplicados em separado ao HomePNAv2, o mecanismo proposto neste trabalho é mais eficiente que a técnica de gerenciamento de colisões introduzida no HomePNAv3, além de permitir que a rede tenha mais de 27 nós. Caso se limite a rede a 27 nós, os dois mecanismos podem ser combinados, e seu uso em conjunto apresentou a melhor eficiência.

Capítulo 5

Conclusões

AS redes domiciliares estão se tornando cada vez mais comuns nos tempos atuais. O número de domicílios com mais de um computador vem crescendo, e entre as tecnologias que se propõem a interconectar estes computadores está o HomePNA, um padrão de redes domiciliares através da fiação telefônica. A sua principal vantagem é a utilização de uma infra-estrutura de cabeamento já existente na casa, diminuindo os custos e tornando a instalação mais fácil para o usuário. Neste trabalho foram abordadas duas versões do HomePNA: a versão 2 que possui taxas de transmissão de até 32 Mbps, e a versão 3 que alcança taxas de até 128 Mbps.

O principal objetivo deste trabalho foi a proposta de um novo mecanismo de acesso ao meio para os padrões HomePNAv2 e HomePNAv3, para aumentar a vazão agregada da rede. O mecanismo propõe a agregação de alguns *slots* de prioridade na prioridade mais alta, de modo que os quadros da prioridade mais alta sejam espalhados aleatoriamente nesses *slots*, diminuindo assim a probabilidade de colisões. Para analisar o desempenho deste mecanismo através de simulações foram implementados no simulador *ns-2* os padrões HomePNAv2 e v3 além do mecanismo proposto. Os padrões HomePNAv2 e v3 utilizando o mecanismo proposto foram batizados de HomePNAv2+ e v3+, respectivamente.

Este trabalho analisou o desempenho do protocolo de acesso ao meio dos padrões HomePNAv2 e v3. Para o HomePNAv2, foi desenvolvida uma análise matemática para os casos mais simples de 1 a 4 nós transmissores, onde foi avaliada a vazão obtida. Os resultados obtidos nas simulações se mostraram coerentes com os resultados obtidos na análise matemática, o que serviu como teste de sanidade para a validação do módulo de simulação. Mostrou-se que a vazão agregada do HomePNAv2 tende a se manter constante com o aumento do número de nós transmissores. Para a taxa de transmissão de 10 Mbps, com apenas 1 nó transmissor obteve-se uma vazão máxima de 9,2 Mbps, ou seja, eficiência de 92%. Mesmo para um número elevado de nós, observou-se que a vazão tende a um valor constante de aproximadamente 7,97 Mbps, com eficiência de 79,7%. Para a taxa de transmissão de 32 Mbps, alcançou-se uma vazão máxima de 25,06 Mbps, com eficiência de 78,3%, e para um número elevado de nós, uma vazão de 17,7 Mbps, com eficiência de 55,3%. A partir destes resultados, chegou-se a um valor máximo para o número médio de colisões por quadro transmitido, C/n, de 0,93. Com este parâmetro, obteve-se a vazão mínima da rede para uma dada taxa e um dado tamanho de quadro, independente do número de nós.

Foi feita também a análise de desempenho do HomePNAv3 através de simulações. Foi utilizada a taxa de transmissão de 128 Mbps, e variou-se o número de nós de 1 a 27, que é o número máximo de nós na rede neste padrão. A análise mostrou que no HomePNAv3 a vazão cresce com o número de nós, devido à técnica de gerenciamento de colisões utilizada por esse padrão. Para um cenário de 27 nós, mostrou-se que o HomePNAv3 apresenta o parâmetro $C/n = 0,48$. Esse parâmetro indica o número médio de colisões na rede, mostrando que no HomePNAv3 ocorrem menos colisões que no HomePNAv2. Com apenas 1 nó transmissor, alcançou-se a vazão máxima de 62,1 Mbps, ou seja, eficiência de 48,5%. Para mais de um nó, essa taxa caiu para quase a metade, chegando a 34,7 Mbps. Essa diferença deve-se à diminuição do tempo de transmissão total do quadro para taxas de transmissão mais altas, pois o tempo gasto com uma colisão é da ordem do tempo de transmissão de um quadro, podendo ser inclusive maior.

A partir dos resultados de simulação, foi determinado o melhor valor para o número de *slots* agregados (AS) para a utilização do mecanismo em cada um dos padrões, HomePNAv2+ e v3+. Para o HomePNAv2+, foram analisados valores de AS entre 2 e 7, e foi encontrado o melhor valor de $AS = 4$. O HomePNAv2+ conseguiu obter ganhos de até 44% em relação ao HomePNAv2, com taxa de transmissão de 32 Mbps e quadros de 160 bytes. Para quadros de 1500 bytes, obteve-se ganhos entre 14,8% e 18,5% para 2 e 30 nós, respectivamente. Observou-se que o mecanismo utilizado se comporta melhor para taxas de transmissão mais altas e para quadros menores. Isso acontece porque, nestes casos, o tempo de transmissão da carga útil é menor, então o tempo perdido nas colisões representa uma fração maior do tempo total de transmissão.

Para o HomePNAv3+, o melhor valor encontrado para AS foi igual a 3. Os resultados mostraram que o HomePNAv3+ possui desempenho melhor que o HomePNAv3, com ganhos de até 35,8%. O ganho máximo também foi obtido para a taxa máxima de transmissão, de 128 Mbps com quadros de 160 bytes. Com quadros de 1500 bytes, o ganho obtido variou entre 16,9% e 27%, para 27 e 6 nós, respectivamente. Novamente o mecanismo proposto apresentou um desempenho melhor para quadros menores e taxas maiores.

Foi também realizada uma análise do atraso médio e da variação do atraso com o uso do mecanismo proposto, para avaliar o seu impacto no atraso da rede. Mostrou-se que o uso do mecanismo proposto não afetou o atraso médio da rede, pelo contrário, houve uma ligeira diminuição desse atraso. Para o HomePNAv2 obteve-se um atraso médio de 20,2 ms em um cenário com 30 nós, enquanto no HomePNAv2+ esse atraso caiu para 17,1 ms. Já no HomePNAv3, o atraso médio encontrado foi de 15,7 ms em um cenário com 27 nós, contra 14,5 ms para o HomePNAv3+. No entanto, o uso do mecanismo proposto causou um aumento da variação do atraso da rede. A variação do atraso do HomePNAv2 que era de 8,1 ms, subiu para 32 ms no HomePNAv2+, e no HomePNAv3+ a variação do atraso foi de 20,2 ms, enquanto no HomePNAv3 essa variação foi praticamente nula.

Finalmente, foi feita uma comparação entre todos os métodos de controle de acesso ao meio analisados. Nesta comparação foi utilizado o mesmo cenário com a mesma taxa de transmissão nominal para todos os protocolos, e observou-se que o HomePNAv3+ apresentou o melhor desempenho. No entanto, uma desvantagem apresentada pelos padrões HomePNAv3+ e HomePNAv3 é a limitação do número de nós na rede a 27. Além disso, o HomePNAv2+ apresentou desempenho melhor que o HomePNAv3. Isso significa que, se aplicados em separado ao HomePNAv2, o mecanismo proposto neste artigo, além de permitir que a rede tenha mais de 27 nós, foi mais eficiente que a técnica de gerenciamento de colisões apresentada no HomePNAv3 para qualquer quantidade de nós na rede.

Como trabalhos futuros, pode ser realizada uma análise do HomePNAv3 em seu modo síncrono, avaliando a sua capacidade de prover melhores parâmetros de qualidade de serviço. É possível também analisar a técnica de agregação de pacotes do HomePNAv3 que visa aumentar a eficiência da rede. Outra possibilidade é realizar uma modelagem do canal físico que leve em conta a topologia utilizada na rede e os possíveis erros de transmissão da camada física. A utilização deste modelo em conjunto com os módulos de simulação usados neste trabalho poderiam fornecer resultados para topologias específicas, que levariam em conta também a probabilidade de erro do canal.

Referências Bibliográficas

[1] 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'2004* (Gramado, Brasil, maio de 2004).

[2] IEEE 802.3. Carrier sense multiple access with collision detection (CSMA/CD) access method and physical layer specifications. IEEE Standard 802.3, março de 2002.

[3] IEEE 802.11a. Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications: High-speed physical layer in the 5 GHz band. IEEE Standard 802.11a, setembro de 1999.

[4] IEEE 802.11g. Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications: High-speed physical layer in the 2.4 GHz band. IEEE Standard 802.11g, junho de 2003.

[5] 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.

[6] CAMPISTA, M. E. M. Aumentando a Eficiência do Método de Acesso Múltiplo em Redes Domiciliares. Tese de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, março de 2005.

[7] 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'2004* (Belém, Brasil, setembro de 2004).

[8] 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. A ser publicado em *XXIII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores (SBRC'05)* (maio de 2005).

[9] VELLOSO, P. B., CUNHA, D. O., AMODEI JR., A., RUBINSTEIN, M. G. E DUARTE, O. C. M. B. Redes domiciliares: Aplicações, tecnologias, desafios e tendências. Em *XXI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações - SBT'2004* (Belém, Brasil, setembro de 2004).

[10] DUTTA-ROY, A. Networks for home. *IEEE Spectrum 36*, 12 (dezembro de 1999), 26–33.

[11] WARING, D. L., KERPEZ, K., GALLI, S. E UNGAR, S. G. Home networks and Internet appliances shape service provider access architectures. Em *XIII International Symposium on Services and Local Access (ISSLS2000)* (Estocolmo, Suécia, junho de 2000).

[12] BISAGLIA, P., CASTLE, R. E BAYNHAM, S. H. Channel modeling and system performance for HomePNA 2.0. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications 20*, 5 (junho de 2002), 913–922.

[13] BISAGLIA, P. E CASTLE, R. A comparison of equalizer structures for frequency diverse QAM. Em *International Symposium on Telecommunications - IST'2001* (Tehran, Irã, setembro de 2001), pp. 499–502.

[14] BISAGLIA, P. E CASTLE, R. Receiver architectures for HomePNA 2.0. Relatório Técnico HPL-2001-247, Hewlett-Packard Laboratories, outubro de 2001.

[15] LAO, R. The twisted-pair telephone transmission line. *High Frequency Electronics 1*, 3 (novembro de 2002), 20–30.

[16] CHUNG, M. Y., KIM, H. C. E LEE, T.-J. HomePNA 2.0 - saturation throughput analysis. *IEEE Communications Letters 7*, 11 (novembro de 2003), 558–560.

[17] KIM, H. C., CHUNG, M. Y., LEE, T.-J. E PARK, J. Saturation throughput analysis of collision management protocol in the HomePNA 3.0 asynchronous MAC mode. *IEEE Communications Letters 8*, 7 (julho de 2004), 476–478.

[18] LOH, L. E OZTURK, Y. Quality of support and priority management in HomePNA 2.0 link layer. Em *8th International Symposium on Computers and Communication - ISCC'03* (Turquia, julho de 2003), pp. 861–866.

[19] KANGUDE, S., COPELAND, J. E SHERMAN, M. An analysis of the Home PNA collision resolution mechanism. Em *28th IEEE Conference on Local Computer Networks - LCN'2003* (Bonn/Konigswinter, Germany, outubro de 2003), pp. 250–259.

[20] STERENSON, R. Guaranteed QoS in the home network environment. Relatório técnico, CopperGate Communications, 2003.

[21] SUB, S. E GREAVES, D. J. Performance of a home LAN using HomePNA 2.0 stations. Em *8th International Conference on Communication Systems - ICCS'2002* (Cingapura, novembro de 2002), pp. 661–668.

[22] 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).

[23] 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.

[24] AMODEI JR., A., COSTA, L. H. M. K. E DUARTE, O. C. M. B. Um novo mecanismo de acesso ao meio para o padrão HomePNA. Relatório Técnico. Submetido para *XXIII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores - SBRC'2005* (Fortaleza, Brasil, maio de 2005).

[25] AMODEI JR., A., COSTA, L. H. M. K. E DUARTE, O. C. M. B. An efficient medium access control mechanism for HomePNA. Aceito para ser publicado em *12th International Conference on Telecommunications - ICT'2005* (Cidade do Cabo, África do Sul, maio de 2005).

[26] HOMEPNA. http://www.homepna.org, acessado em 20 de fevereiro de 2005.

[27] CHEN, W. Y. *Home Networking Basis: Transmission Environments and Wired/Wireless Protocols*, 1^a ed. Prentice-Hall, 2004. ISBN 0130165115.

[28] HOME PHONELINE NETWORK ALLIANCE. Interface specification for HomePNA 2.02.7 10M8 technology. HomePNA 2.0 Standard, maio de 2000.

[29] FRANK, E. H. E HOLLOWAY, J. Connecting the home with a phone line network chip set. *IEEE Micro 20*, 2 (abril de 2000), 27–38.

[30] ITU-T G.989.1. Phoneline networking transceivers - foundation. Recomendação G.989.1, fevereiro de 2001.

[31] ITU-T G.989.2. Phoneline networking transceivers - payload format and link layer requirements. Recomendação G.989.2, novembro de 2001.

[32] ITU-T G.989.3. Phoneline networking transceivers - isolation function. Recomendação G.989.3, março de 2003.

[33] ITU-T MC-107R1. G.PNT: PNT3 proposal overview. Documento MC-107R1, agosto de 2003.

[34] ITU-T PF-042. The proposed MAC for PNT3. Documento PF-042, agosto de 2003.

[35] 2WIRE. http://www.2wire.com, acessado em 20 de fevereiro de 2005.

[36] D-LINK. http://www.dlink.com, acessado em 20 de fevereiro de 2005.

[37] LINKSYS. http://www.linksys.com, acessado em 20 de fevereiro de 2005.

[38] ASOTEL. http://www.asotel.net, acessado em 20 de fevereiro de 2005.

[39] CORINEX. http://www.corinex.com, acessado em 20 de fevereiro de 2005.

[40] FALL, K. E VARADHAN, K. *The ns Manual*. UC Berkeley, LBL, USC/ISI, and Xerox PARC, abril de 2002. http://www.isi.edu/nsnam/ns/ns-documentation.html.

[41] VELLOSO, P. B., RUBINSTEIN, M. G. E DUARTE, O. C. M. B. Uma avaliação da capacidade da transmissão de voz em redes 802.11 em modo ad hoc. *Revista da Sociedade Brasileira de Telecomunicações 18*, 2 (outubro de 2003), 186–197.