

# **Redes Domiciliares: Aplicações, Tecnologias, Desafios e Tendências**

Pedro Braconnot Velloso<sup>1</sup>, Daniel de Oliveira Cunha<sup>1</sup>,  
Aurelio Amodei Junior<sup>1</sup>, Marcelo Gonçalves Rubinstein<sup>2</sup> e  
Otto Carlos Muniz Bandeira Duarte<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Grupo de Teleinformática e Automação - GTA  
Universidade Federal do Rio de Janeiro

<sup>2</sup> Departamento de Eletrônica e Telecomunicações - FEN  
Universidade do Estado do Rio de Janeiro



# Prefácio

A interconexão de equipamentos através de um sistema de comunicação digital de alta velocidade esteve sempre restrita às operadoras de telecomunicações, às universidades e às grandes corporações. Esta mesma necessidade de interconexão a alta velocidade começa a estar presente também dentro dos lares. Os grandes atores que vêm provocando esta demanda por uma rede de computadores de alta velocidade dentro dos nossos lares, aqui denominada de “rede domiciliar”, são a Internet, o Computador Pessoal e o entretenimento.

O uso da Internet em casa vem crescendo dia após dia. Hoje, já é uma prática comum acessar de casa a Internet para ler o correio eletrônico ou para terminar um trabalho. O uso da Internet pelos filhos para trabalhos escolares também é muito freqüente. As aplicações de jogos distribuídos são as maiores responsáveis pelo uso da Internet em casa, pois 75% dos usuários domésticos se servem dos computadores para jogar. Já é comum em diversos lares uma “fila” para se usar o computador e acessar a Internet.

Embora o acesso discado à Internet seja ainda a forma de acesso mais usada, assiste-se hoje um crescimento enorme do acesso em banda larga. O acesso à Internet a alta velocidade a partir de um domicílio nos EUA, via modem a cabo, DSL (*Digital Subscriber Line*) ou RDSI (Rede Digital de Serviços Integrados), passou de 16 milhões em 2001 para mais de 25 milhões em 2002. Guardadas as proporções, o cenário no Brasil é semelhante ao dos EUA. Estima-se que existam no Brasil mais de 18 milhões de microcomputadores e que mais de 13 milhões de usuários acessem, de casa, a Internet. Além disso, em 1999, estimava-se que 20 milhões dos domicílios, nos Estados Unidos, possuíam mais de um computador pessoal e espera-se que este número suba para 35 milhões nos próximos anos. Portanto, o grande mercado hoje para uma rede domiciliar é o compartilhamento de arquivos, aplicações, impressoras, e, principalmente, do acesso à Internet a alta velocidade. Embora o conceito de redes domiciliares seja bem amplo, as empresas, de uma forma bem pragmática, procuram hoje conquistar este mercado para depois estendê-lo para outras aplicações.

Esse trabalho tem por objetivo apresentar os conceitos e as principais técnicas usadas nas redes domiciliares através da fiação telefônica e através da fiação

elétrica. O texto está organizado da seguinte forma. O Capítulo 2 descreve os padrões Ethernet e IEEE 802.11. O Capítulo 3 apresenta o padrão HomePNA de redes domiciliares através da fiação telefônica. No Capítulo 4, é descrito o funcionamento das redes domiciliares através da fiação elétrica, com detalhamento do padrão HomePlug. No Capítulo 5, são apresentadas as tecnologias DSL e PLC (*Power Line Communications*) para o acesso à Internet. Por último, no Capítulo 6, são apresentadas tendências e comparações das redes domiciliares, evidenciando os desafios que fazem deste tema uma área de pesquisa em plena atividade.

# Sumário

<b>1</b>	<b>Redes Domiciliares</b>	<b>7</b>
1.1	A Integração em Semicondutores . . . . .	8
1.2	A Digitalização das Mídias e a Infra-estrutura de Telecomunicações	8
1.3	As Aplicações . . . . .	9
1.4	As Tecnologias Atualmente Disponíveis . . . . .	11
<b>2</b>	<b>As Redes Com Fio e Sem Fio</b>	<b>13</b>
2.1	As Redes Locais . . . . .	13
2.2	A Rede Ethernet . . . . .	14
2.3	Ethernet de Alta Velocidade . . . . .	18
2.4	O padrão IEEE 802.11 . . . . .	20
2.4.1	A Subcamada de Acesso ao Meio . . . . .	24
2.4.2	A Camada Física . . . . .	33
<b>3</b>	<b>As Redes Através da Fiação Telefônica</b>	<b>35</b>
3.1	O Padrão HomePNA . . . . .	37
3.1.1	A Subcamada de Acesso ao Meio . . . . .	40
3.1.2	A Camada Física . . . . .	43
<b>4</b>	<b>As Redes Através da Fiação Elétrica</b>	<b>53</b>
4.1	O Padrão HomePlug 1.0 . . . . .	57
4.1.1	A Subcamada de Acesso ao Meio . . . . .	57
4.1.2	A Camada Física . . . . .	61
<b>5</b>	<b>O Acesso à Internet</b>	<b>69</b>
5.1	A tecnologia DSL . . . . .	69
5.2	PLC como Rede de Acesso . . . . .	72
5.2.1	Padrões e Produtos . . . . .	74
<b>6</b>	<b>Considerações Finais</b>	<b>77</b>



# Capítulo 1

## Redes Domiciliares

No final dos anos 90, o termo Redes Domiciliares (*Home Networking*) surgiu como uma nova tecnologia que iria revolucionar a forma de os cidadãos interagirem e, conseqüentemente, alterar significativamente as suas vidas. Definir o conceito de redes domiciliares não é uma tarefa simples. A primeira imagem que se pode imaginar é a do desenho animado “Família Jetsons” com uma série de robôs e dispositivos acionados por voz. Outra referência mais sensata seria associar este novo termo a uma nova onda de *marketing* relançando o conceito de casa inteligente (*smart house*), ou automação residencial. Em uma residência automatizada, as luzes são automaticamente apagadas quando não se tem ninguém no interior de um cômodo ou a temperatura ambiente é automaticamente ajustada. Empresários, mais pragmáticos e interessados em conquistar um vultoso mercado, definem redes domiciliares como uma rede de computadores que permite a interconexão de computadores e o compartilhamento de acesso à Internet, sem que o consumidor seja obrigado a instalar novos fios em sua residência. A solução pragmática de interconectar, a baixo custo e de forma simples, os diversos computadores de uma residência e permitir o acesso compartilhado à Internet é bastante útil e diversos produtos já se encontram disponíveis comercialmente. Uma definição um pouco mais geral para rede domiciliar seria de um sistema de comunicação que visa a interconexão de dispositivos encontrados em residências, normalmente restritos a uma distância de 300 metros, e que tem como objetivo a comunicação, o conforto, a economia de energia, a segurança, a assistência e o lazer. Portanto, o conceito de rede domiciliar engloba o trabalho domiciliar (*home office*), o lazer (TV, DVD, aparelhagem de som, *home theatre* e a comunicação (telefone, interfone etc.) assim como a tradicional automação residencial.

É importante ressaltar que a tecnologia de redes domiciliares está diretamente ligada ao consumidor final e tem como objetivo criar uma plataforma de comunicação que permita ao ser humano melhorar a sua capacidade de trabalhar e agir, melhorar sua qualidade de vida e segurança, aumentar o seu tempo de lazer

e minimizar os seus custos. Esta tecnologia compreende diversos mercados como, por exemplo, o de dispositivos eletrônicos, o de eletrodomésticos, o das operadoras de telecomunicações, o dos provedores de serviços Internet, o dos produtores de software e de conteúdos, o de áudio/vídeo etc.

O potencial revolucionário da tecnologia de redes domiciliares está na possibilidade de conexão à Internet de qualquer consumidor o tempo todo e, mais que isto, a conexão de qualquer dispositivo ou equipamento disposto em qualquer lugar de uma residência. Este conceito de interconexão de diversos dispositivos com capacidade de processamento embarcada para auxiliar as tarefas humanas está sendo chamado de “computação pervasiva”.

A tecnologia de redes domiciliares está ainda em seu período inicial. Uma característica muito particular desta tecnologia é que ela precisa ser simples e fácil de ser usada para atender aos usuários não especializados, e atender a uma grande variedade de necessidades e diferentes gostos.

Este capítulo enfoca alguns conceitos de informação, de aplicações, de serviços, de telecomunicações, de Internet etc. de forma a melhor situar o leitor no contexto atual das tecnologias em questão.

## **1.1 A Integração em Semicondutores**

A tecnologia de integração em semicondutores evoluiu de forma extraordinária. Os primeiros semicondutores da década de 60 integravam 12 transistores em uma pastilha e hoje mais de um milhão de transistores são integrados para se fazer um microprocessador usado em um computador pessoal. Este fantástico crescimento da capacidade de integração ocasionou um enorme aumento na capacidade de processamento dos dispositivos semicondutores. Isto veio acompanhado de uma drástica redução dos custos de fabricação que permitiu a disseminação dos computadores. Os computadores invadiram os lares deixando de ser apenas um instrumento de trabalho para tornarem-se também uma ferramenta de comunicação, lazer, estudo e comércio. Além dos computadores, dispositivos semicondutores com capacidade de processamento estão hoje por toda parte na nossa casa como, por exemplo, nas TVs, nos vídeo-cassetes, nos refrigeradores, nos brinquedos, nos condicionadores de ar e nas aparelhagens de som.

## **1.2 A Digitalização das Mídias e a Infra-estrutura de Telecomunicações**

A digitalização das mídias, a comunicação digital global e os enormes avanços obtidos na área de integração de circuitos permitiram a tão falada “era da

informação” que está revolucionando a forma dos cidadãos interagirem e trabalharem, além de redefinir alguns fundamentos da economia mundial. A informação, na sua forma digital, é hoje um novo tipo de produto econômico que requer uma infra-estrutura de comunicação para transferi-la de forma ágil e eficiente, e dispositivos semicondutores com inteligência para processá-la. A comunicação e a computação tornaram-se os pilares fundamentais da indústria da Tecnologia da Informação. O conteúdo digital, os serviços e os dispositivos semicondutores transformaram-se em um grande mercado dentro da economia da informação.

A infra-estrutura de telecomunicação vem crescendo incessantemente. As fibras óticas passaram a substituir os meios físicos metálicos com as vantagens de menor atenuação, volume e peso e, principalmente, de uma maior banda passante. As operadoras de telecomunicações realizaram vultosos investimentos em infra-estrutura de cabeamento óptico. Além disso, enormes avanços foram conseguidos recentemente na tecnologia de comunicações óticas. A banda passante em uma única fibra ótica já ultrapassa o terabit por segundo com a multiplexação de mais de mil comprimentos de onda em uma mesma fibra.

O grande sucesso da Internet está permitindo a tão sonhada rede global de telecomunicações. Embora a idéia de uma rede global baseada em uma única tecnologia não tenha vingado, há hoje um determinado consenso em que a rede global se servirá do protocolo IP (*Internet Protocol*). A rede global pode ser vista como a interconexão de diversas sub-redes através do protocolo IP, ou seja, tudo sobre IP (*all over IP*). Cresce dia a dia o número de pessoas que acessam a Internet de casa através dos Provedores de Serviço da Internet (*Internet Service Providers*).

O acesso domiciliar à Internet é majoritariamente realizado hoje através de linhas telefônicas discadas. Devido à pequena banda passante de 4 kHz do canal telefônico, este acesso é limitado a 56 kbps no sistema convencional ou a 128 kbps no sistema RDSI (Rede Digital de Serviços Integrados). No entanto, o grande sucesso da Internet criou uma forte demanda para acessos residenciais a alta velocidade. As tecnologias que procuram atender a esta demanda de acesso a alta velocidade são o xDSL (*Digital Subscriber Line*), o modem a cabo, o satélite, o PLC (*Power Line Communications*) e a comunicação por rádio.

## 1.3 As Aplicações

As redes domiciliares visam diversos tipos de aplicações. Dentre as principais aplicações, algumas podem ser destacadas:

- o monitoramento, a automação e o controle residencial. Estas aplicações estão normalmente associadas à noção de “casa inteligente”. É possível controlar a iluminação e a temperatura gerando um melhor conforto e

uma maior economia de energia. O monitoramento através de sensores de presença e câmeras de vídeo pode ser feito remotamente pela Internet inclusive com a geração de alarmes provendo uma maior segurança. A medição remota de consumo de serviços de utilidade pública é outra facilidade que permitirá uma maior comodidade e redução de custos. No que se refere aos eletrodomésticos, já existem aparelhos de ar condicionado que são monitorados e que enviam automaticamente, pela Internet, relatórios de falhas e solicitação de serviço de manutenção aos fabricantes. Também são vendidos refrigeradores que detectam a falta de alguns produtos e os encomendam através da Internet;

- o compartilhamento de equipamentos, recursos e acesso à Internet. Tal como ocorreu há vinte anos atrás nos escritórios, muitos lares hoje possuem a necessidade de compartilhar equipamentos tais como: impressoras, aparelhos de fax, *scanners* etc. Da mesma forma pode-se compartilhar arquivos de dados, música e filmes racionalizando o uso dos dispositivos de armazenamento. Uma outra necessidade premente é o compartilhamento do acesso à Internet, pois já é significativo o número de lares com mais de um computador onde os usuários desejam se servir da Internet ao mesmo tempo;
- a comunicação. Os telefones fixos ou celulares e os intercomunicadores podem usar a rede domiciliar para comunicação. A telefonia IP permitirá diversas linhas virtuais dentro de uma residência onde todas as pessoas poderão falar no telefone ao mesmo tempo. Além disso, computadores pessoais de mesa, computadores portáteis e assistentes pessoais digitais (PDAs) podem ser interconectados pela rede domiciliar para transferência de dados;
- o entretenimento. Televisores, vídeo-cassetes, aparelhos de DVD, filmadoras, câmeras fotográficas e aparelhos de som podem ser conectados à rede domiciliar, permitindo a distribuição de músicas, imagens e filmes dentro da casa. Jogos com múltiplos participantes interconectados por rede são aplicações de lazer muito difundidas e certamente serão aplicações que se beneficiarão muito das redes domiciliares. A TV de alta definição e a TV interativa também deverão usar as redes domiciliares, pois pode-se imaginar telas de plasma em diversos cômodos de uma residência mostrando diferentes programas.

Os requisitos de rede exigidos para as aplicações de monitoração, automação e controle residencial são normalmente fáceis de se atender. Controle de luzes, de sistemas de climatização e acionar ou desligar uma câmera de vigilância são

aplicações que requerem uma baixa taxa de transmissão [1]. O mercado para estas aplicações relativas à “casa inteligente” ainda está por se desenvolver.

Por outro lado, as aplicações relativas a entretenimento requerem soluções tecnológicas avançadas para assegurar uma boa qualidade. Aplicações de vídeo e áudio requerem alta banda passante, baixo atraso e baixa variação de atraso. Por exemplo, a transmissão de um vídeo codificado em MPEG-2 exige de 4 a 6 Mbps. É importante ressaltar que o rádio e a TV pela Internet não ficam restritos ao alcance das ondas de rádio das estações difusoras. Assim, uma rádio de qualquer parte do mundo poderá ser escutada na Internet. Outra característica é que o número de estações deixa de ser limitado uma vez que o atual fator limitante é o congestionado espectro de frequência alocado para a transmissão do sinal das estações. Além disso, a interatividade com o usuário será primordial nessa nova relação que surgirá com a utilização da Internet nesses equipamentos. Por exemplo, ao assistir uma determinada novela, o usuário poderá solicitar a compra do sapato usado pelo protagonista. Muito embora existam hoje poucos equipamentos de entretenimento interconectados por uma rede, pode-se dizer que é um mercado com enorme potencial, ainda no início de seu desenvolvimento, e onde as empresas pretendem mais investir num futuro próximo.

## 1.4 As Tecnologias Atualmente Disponíveis

As redes domiciliares possuem algumas especificidades. Evidentemente, a rede deve ter um baixo custo e, devido à natureza não profissional da maioria dos usuários, deve ser fácil de instalar e fácil de usar. Embora possa se imaginar as redes iniciais limitadas a poucos cômodos da casa este cenário deve mudar rapidamente com a introdução das aplicações de vídeo e áudio. Portanto, a necessidade de conectividade deverá, em pouco tempo, se estender para todos os cômodos. A tecnologia e a banda passante para atender aplicações de compartilhamento de recursos e de acesso à Internet pode ser considerada como relativamente fácil. No entanto, as soluções de evolução da rede domiciliar para atender as novas aplicações de voz sobre IP, música e vídeo não são triviais. Diversos produtos comerciais com diferentes soluções tecnológicas são ofertados hoje no mercado com suas vantagens e desvantagens. A maioria das tecnologias também propõe evoluções para atender o mercado futuro de aplicações de áudio e vídeo. Portanto, é difícil prever hoje qual a solução tecnológica que melhor se adapta às redes domiciliares.

As tecnologias de redes que podem ser usadas em domicílio podem ser classificadas em com fio, sem fio e sem novos fios. Na tecnologia com fio, a rede Ethernet 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 é a grande “vedete” dos últimos anos e vem sendo acompanhada por um enorme sucesso comercial e 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 vêm sendo constatados, além do clássico problema de segurança. Nos últimos anos, a solução sem novos fios recebeu uma atenção especial. Ela tem como idéia básica usar fios de uma infra-estrutura já existente 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*). A *Home Cable Network Alliance* (HomeCNA), criada em junho de 2001, ainda não apresentou uma previsão para a criação de um padrão para redes domiciliares. Por esse motivo, as redes domiciliares via cabo não serão abordadas neste texto. Dentre as iniciativas para o desenvolvimento de tecnologias de rede domiciliares, se destacam a criação da *Home Phoneline Networking Alliance* (HomePNA), em 1998, que utiliza a fiação telefônica para estabelecer uma rede domiciliar e da *HomePlug Powerline Alliance*, criada em 2000, para prover uma tecnologia de redes baseada na fiação elétrica.

# Capítulo 2

## As Redes Com Fio e Sem Fio

Assiste-se hoje uma grande oferta de produtos de diferentes tecnologias que se propõem a fornecer recursos de rede dentro dos nossos lares e também o compartilhamento do acesso à Internet a alta velocidade. Para compreender suas características este capítulo aborda alguns conceitos de acesso múltiplo e as tecnologias de rede local Ethernet e Wi-Fi.

### 2.1 As Redes Locais

A primeira rede baseada em pacotes foi proposta em 1960 por Norman Abramson e denominada rede ALOHA. Esta rede tinha como objetivo interconectar computadores localizados em diferentes ilhas do Havaí. Precisou-se criar um método de acesso múltiplo ao meio físico adaptado às características específicas de tráfego de dados gerados pelos computadores. As características deste cenário apontavam para a necessidade de se transferir dados entre computadores de forma esporádica. Além disso, o tráfego gerado por aplicações convencionais de dados é do tipo rajada/silêncio (*bursty*). Assim, o compartilhamento do meio físico por multiplexação determinaria uma forma de alocação fixa de banda passante para cada estação que seria muito ineficiente, pois o meio ficaria ocioso a maior parte do tempo. Portanto Abramson propôs um método de acesso que é o mais simples que se pode imaginar, pois uma estação deve transmitir se assim desejar. Caso duas ou mais estações transmitam ao mesmo tempo há uma colisão de pacotes e as estações devem retransmiti-los depois de realizarem temporizações aleatórias. As temporizações para a retransmissão dos pacotes são aleatórias para diminuir a probabilidade de que estes novos pacotes gerados pela retransmissão venham a colidir mais uma vez. Embora extremamente simples e prático, este método de acesso apresenta uma eficiência baixa, pois a utilização efetiva não passa de 18% da capacidade do canal.

Bob Metcalfe e David Boggs da Xerox propuseram, em 1972, uma rede local que se destina à interconexão de computadores, denominada rede Ethernet. O nome Ethernet vem de éter luminoso, pois antigamente acreditava-se ser esse o meio onde a radiação eletromagnética se propagava. A IBM, também nesta época, propôs uma rede em anel para a mesma finalidade. Diversas outras propostas de redes locais eram testadas em empresas e universidades. Já nesta época ficava evidente o grande potencial das redes locais como solução para automação de escritórios. Diante deste cenário, o IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) criou o Projeto 802 que tem como objetivo a padronização das redes locais e metropolitanas. A arquitetura do modelo de referência do Projeto IEEE 802 é baseada no modelo OSI (*Open Systems Interconnection*) da ISO (*International Organization for Standardization*), onde apenas as duas camadas mais baixas são de interesse: a camada física e a camada enlace. A camada enlace foi ainda subdividida em duas subcamadas: a subcamada de controle de enlace lógico (*Logical Link Control - LLC*) e a subcamada de controle de acesso ao meio (*Medium Access Control - MAC*). A camada física provê serviços de transmissão e recepção de bits. Nesse nível, são definidas as interfaces elétricas e mecânicas, as características de sincronização e a especificação do meio de transmissão. A subcamada MAC trata do controle do acesso a um meio compartilhado, da montagem de dados em quadros, endereçamento e detecção de erros. Já a subcamada de enlace lógico provê serviços de comunicação de quadros com controle de fluxo e controle de erros. Essa subcamada oculta as diferenças entre as diferentes propostas de redes locais do Projeto 802, fornecendo uma única interface para a camada de rede.

A camada física e a subcamada de controle de acesso ao meio determinam uma tecnologia de rede local ou metropolitana. Cada tecnologia de rede recebe uma extensão numérica e por isto a rede local em anel com ficha de permissão (*Token Ring*), proposta pela IBM, é denominada IEEE 802.5, a rede local em barramento com ficha de permissão (*Token Bus*) é denominada IEEE 802.4 e assim por diante. De todos os padrões especificados pelo IEEE, dois merecem destaque por serem sucessos comerciais e, conseqüentemente, fortes candidatos a serem utilizados como solução para redes domiciliares: o padrão IEEE 802.3, mais conhecido como rede Ethernet, e o padrão IEEE 802.11, mais conhecido como Wi-Fi (*Wireless Fidelity*).

## 2.2 A Rede Ethernet

A rede Ethernet original é um barramento compartilhado pelas estações. Uma das razões do sucesso da rede Ethernet foi o alto desempenho apresentado pelo método de acesso proposto, o acesso múltiplo com escuta de portadora e detecção

de colisão (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection - CSMA/CD*). Neste mecanismo, uma estação que deseja transmitir um quadro primeiro ouve o meio para saber se o meio encontra-se ocupado (detectando, ou não, a portadora). Caso o meio esteja livre, a estação transmite o quadro. No caso de encontrar o meio ocupado, a estação continua escutando o meio até que fique livre e então transmite o quadro. A escuta da portadora diminui significativamente a possibilidade de colisão de quadros uma vez que a colisão ocorre somente nos casos onde duas ou mais estações escutam o meio vazio e transmitem. Este efeito ocorre devido à “memória” do meio físico que corresponde à propagação do sinal no meio físico. Portanto, existe uma janela de tempo onde pode ocorrer uma colisão uma vez iniciada a transmissão de um quadro. O valor máximo desta janela de tempo é o tempo de propagação do sinal na rede. Assim, quanto maior o tamanho da rede maior é o tempo de propagação do sinal de uma extremidade à outra e maior a probabilidade de ocorrerem colisões. Evidentemente a escuta da portadora é tão mais efetiva quanto menor for o tamanho da rede e por isso o sucesso do acesso múltiplo com escuta de portadora para redes locais. Além da escuta da portadora, a Ethernet detecta colisões. A detecção é realizada pelos transmissores durante as transmissões dos quadros. Para garantir que toda estação detecta colisões é necessário que o meio seja ocupado por um tempo igual ao dobro (ida e volta) do tempo de propagação no meio. O tempo de ida e volta considera o pior caso onde uma estação se encontra em uma das extremidades da rede e começa a transmitir e uma outra estação, posicionada na outra extremidade da rede, ouve o meio livre e começa a transmitir um pouco antes do sinal da primeira transmissão chegar a ela. Logo em seguida haverá colisão percebida por esta segunda estação. No entanto, a primeira estação só perceberá a colisão depois que o sinal se propagar até a primeira estação. Assim, quando uma estação detecta uma colisão ela pára de transmitir o quadro e em seguida envia um reforço de colisão (*jam*) para garantir que todas as estações tomem conhecimento que ocorreu uma colisão. Portanto, para garantir a detecção de colisão o quadro Ethernet possui um tamanho mínimo. Este tamanho mínimo do quadro Ethernet leva em conta a configuração máxima da rede Ethernet de 2500 m, atravessando três segmentos de 500 m e um repetidor de 1000 m. O tempo de ida e volta,  $T$ , é de aproximadamente  $50 \mu\text{s}$ . Para a taxa de transmissão de 10 Mbps isto corresponde a 64 octetos (512 bits). As estações que colidiram devem retransmitir os quadros. Após uma colisão, o tempo é dividido em *slots* discretos de tempo, onde o tamanho do *slot* corresponde ao atraso máximo de propagação de ida e volta (no caso de 10 Mbps, 512 tempos de bit). Para evitar novas colisões cada estação deve esperar por um tempo aleatório (*backoff*) para tentar acessar novamente o meio físico. O tempo aleatório é uniformemente distribuído e depende do número de colisões que o quadro já sofreu. Assim, após uma  $i$ -ésima colisão, a estação escolhe um número aleatório de *slots* de tempo uniformemente distribuído entre 0 e  $2^{i-1}$ . Após esse tempo,

a estação tenta novamente acessar o meio. Esse algoritmo de resolução de colisões é conhecido como *backoff* exponencial binário. O valor máximo do número aleatório é dado por 1023 e após 16 colisões, o quadro é descartado e uma falha é reportada para a camada superior.

A lógica de transmissão de um quadro de dados na Ethernet é apresentada na Figura 2.1.

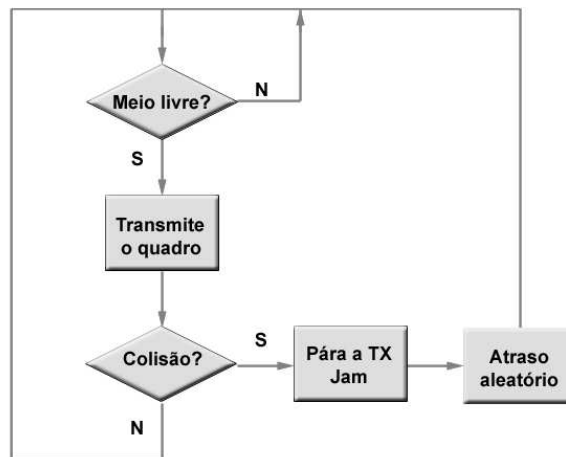


Figura 2.1: Lógica de acesso ao meio na Ethernet.

O formato do quadro Ethernet contém os campos preâmbulo, endereços de destino e de origem, tipo, dados e seqüência de verificação de quadro (Figura 2.2). O preâmbulo de 8 octetos contém o padrão 10101010 a cada octeto, exceto pelo último que contém o padrão 10101011. A codificação Manchester desses octetos produz uma onda quadrada de 10 MHz durante aproximadamente  $6,4 \mu\text{s}$ , a fim de permitir a sincronização entre os relógios do receptor e do transmissor. Os endereços de destino e de origem possuem 48 bits cada. O campo tipo indica o protocolo que será usado pela camada imediatamente superior a subcamada MAC Ethernet. O campo dados possui um tamanho mínimo de 46 octetos e um máximo de 1500 octetos. Caso os dados a serem enviados sejam menores que 46 octetos um enchimento é utilizado para formar o tamanho mínimo de quadro de 64 octetos e, assim, garantir a detecção de colisão. O campo seqüência de verificação de quadro contém uma verificação cíclica de redundância (*Cyclic Redundancy Check* - CRC) de 32 bits.

Existem quatro tipos de cabeamento utilizados pelas redes Ethernet a 10 Mbps. A Ethernet 10Base5, também conhecida como Ethernet grossa, utiliza uma transmissão em banda básica e segmentos de até 500 m. Além disso, essa Ethernet utiliza um cabo coaxial grosso de 1 cm de diâmetro, no máximo 100 estações por



Figura 2.2: Formato do quadro MAC da Ethernet.

segmento, codificação Manchester e sua topologia é em barramento. Para essa rede, o transceptor é ligado ao cabo através de conectores de pressão (*vampire taps*) e à estação através de um cabo AUI (*Attachment Unit Interface*). Devido ao alto custo do cabo coaxial grosso, dos transceptores, do cabo AUI e dos conectores e ainda devido à pouca flexibilidade do cabo grosso, foi normalizada em 1987 a Ethernet 10Base2 ou Ethernet fina. Nesse caso, utiliza-se um cabo coaxial de 0,5 cm de diâmetro, segmentos de no máximo 185 m e no máximo 30 estações por segmento. As ligações das estações ao cabo são feitas diretamente com conectores BNC padrão, mais econômicos e mais fáceis de instalar. Porém, problemas associados à identificação de cabos partidos que dificultavam a utilização dessas redes levaram a um novo tipo de Ethernet chamado 10Base-T, normalizado em 1990. Nesse caso, o T indica o uso de par trançado como meio de transmissão. Cada estação está conectada a um hub central através de dois pares trançados. Apesar de a topologia física ser estrela, como todas as estações estão conectadas eletricamente no hub, a topologia lógica continua sendo o barramento. O cabo de par trançado é flexível e as conexões são simples e utilizam o conector RJ-45. O alcance máximo do cabo a partir do hub é de 100 a 200 m, dependendo da qualidade do cabo utilizado e o número máximo de estações por segmento é 1024. Já a Ethernet 10Base-F utiliza fibra óptica e é uma alternativa cara em função do alto custo dos conectores e dos terminadores. Porém, esse tipo de Ethernet possui excelente imunidade a ruído e tamanho máximo entre segmentos de 2000 m, sendo utilizado para ligações entre edifícios. Além disso, o número máximo de estações por segmento é 1024 e esse meio é mais seguro do que os cabos de cobre pela dificuldade de montagem de derivações em fibras ópticas.

Nenhuma das versões de Ethernet a 10 Mbps utiliza uma codificação binária direta devido a problemas de temporização principalmente ao receber uma seqüência de valores 0 ou 1 consecutivos. Para os receptores determinarem o início e o fim de cada bit sem o uso de um relógio externo, utiliza-se a codificação Manchester. Nessa codificação, cada tempo relativo a um bit é dividido pela metade. Para enviar um bit 1, na primeira metade é utilizada uma voltagem alta e na segunda metade a voltagem é baixa. Para o envio de um bit 0, a primeira metade está associada à voltagem baixa e a segunda à voltagem alta. Com isso, a cada bit haverá uma transição na metade do tempo relativo ao bit, tornando fácil

a sincronização do receptor com o transmissor. No entanto, a largura de banda exigida pela codificação Manchester é duas vezes maior do que a da codificação binária direta.

## 2.3 Ethernet de Alta Velocidade

O sucesso da rede Ethernet e a evolução da capacidade de processamento dos microcomputadores tornaram necessário o aumento da taxa de transmissão. Para aumentar a taxa de transmissão de 10 Mbps para 100 Mbps na topologia de cabo coaxial é necessário dividir por 10 o tamanho máximo do cabo ou aumentar o tamanho mínimo do quadro para 5120 bits. O tempo necessário para detectar colisão na topologia original é de  $51,2 \mu s$  e a uma taxa de 100 Mbps isto corresponde a 5120 bits de tamanho mínimo de quadro. Para manter o tamanho mínimo de quadro a uma taxa de 100 Mbps deve-se diminuir o tempo necessário para detectar colisão para  $5,12 \mu s$  e isto pode ser conseguido dividindo por 10 todos os tamanhos máximos de cabos da rede Ethernet original. Aumentar o tamanho mínimo do quadro Ethernet pode comprometer muito o desempenho de determinadas aplicações e diminuir o tamanho da rede também não é uma boa alternativa. Por isto não existe Ethernet com velocidades maiores que 10 Mbps na topologia a cabo coaxial. A solução encontrada foi usar elementos centralizadores. No caso do hub, o método de acesso múltiplo com escuta de portadora e detecção de colisão ainda é utilizado. Outra opção consiste no uso de uma tecnologia chamada Ethernet comutado. A topologia estrela usada no Ethernet de par trançado tem a característica de conectar ponto-a-ponto cada estação ao elemento central. Assim, se o elemento central tiver a capacidade de processar e armazenar os dados (comutar) que chegam de uma estação e depois transmiti-los para uma outra estação, ao invés de simplesmente repeti-los (função do hub) para as demais estações, a rede Ethernet torna-se escalável. Nesta configuração do elemento central como um comutador (*switch*), os pares trançados não são mais compartilhados e, portanto, não há colisão. As ligações comutadas entre as estações e o elemento central permitem que se transmita por um par e simultaneamente se receba por um outro par (*full-duplex*). Como o comutador processa o quadro, ele pode retransmitir apenas para a estação destinatária. Assim, diversas estações podem transmitir e receber ao mesmo tempo aumentando a eficiência da rede.

Devido à técnica de comutação o Ethernet pode trabalhar a qualquer velocidade passando a limitação para a banda disponibilizada pelo meio físico ou pela capacidade de comutação do elemento central.

A necessidade de uma taxa de transmissão maior do que 10 Mbps, fez com que o IEEE criasse em 1995 a norma 802.3u, mais conhecida como Fast Ethernet. As redes Fast Ethernet utilizam par trançado ou fibra óptica como meio. Por

questões de compatibilidade com as versões antigas, foram mantidos o formato e os tamanhos mínimo e máximo do quadro. O Fast Ethernet funciona nos modos *half* e *full-duplex*. Com o tamanho mínimo do quadro mantido em 64 octetos, o tamanho máximo da rede deveria ser de 250 m no modo *half-duplex*, a fim de garantir que toda estação detecta colisões. Para o Fast Ethernet com par trançado, a limitação do tamanho da rede vem do tamanho máximo do cabo que é de 100 m. O par trançado Ethernet usado na rede 10Base-T é sem blindagem (*Unshielded Twisted Pair* - UTP) de categoria 3 que é capaz de transportar sinais de 25 MHz. Para o Fast Ethernet 100Base-Tx são utilizados cabos de categoria 5, capazes de transportar sinais de 125 MHz a uma distância de 100 m. Dois pares por estação são utilizados, um para transmissão e outro para recepção. Para passar 100 Mbps na banda de 125 MHz, o código Manchester teve que ser abandonado pois exigiria uma banda de 200 MHz. O Fast Ethernet se serve de um sistema de codificação chamado 4B/5B, no qual grupos de 4 bits de dados são mapeados em grupos de 5 bits, com as 16 combinações restantes sendo utilizadas para fins de controle, por exemplo como delimitador de início de quadro. As combinações são escolhidas de modo a fornecerem transições suficientes para a sincronização dos relógios, como ocorria com o Manchester a 10 Mbps. O padrão provê também um esquema de autonegociação para selecionar a velocidade de operação (10 ou 100 Mbps) e o modo de transmissão (*half* ou *full-duplex*).

Ainda como evolução do Ethernet, foi criado, pelo comitê 802.3z em 1998, o padrão Gigabit Ethernet. Assim como no padrão Fast Ethernet, o Gigabit Ethernet mantém o formato do quadro original da Ethernet, incluindo os tamanhos mínimo e máximo do quadro. Os modos de operação *half* e *full-duplex* foram padronizados. Embora o preço dos comutadores esteja bem perto do preço dos hubs, o modo *half-duplex* foi criado para manter a compatibilidade com os padrões anteriores. No modo *half-duplex*, devido à detecção de colisões, o tamanho máximo da rede deveria ser de 25 m para um tamanho mínimo de quadro de 64 octetos. Como esse tamanho de rede é muito pequeno, foram necessários dois artifícios para aumentar o tamanho da rede. Através da extensão de portadora, o *hardware* adiciona um enchimento para estender o quadro até 512 octetos. Como o enchimento é retirado pelo *hardware* da estação receptora, o *software* não tem conhecimento desse artifício, não sendo necessárias mudanças no próprio *software*. Um problema do uso desse enchimento consiste em uma menor eficiência da rede. O outro artifício consiste em enviar quadros em rajadas para aumentar o tamanho da unidade enviada. O envio de quadros em rajadas é mais eficiente do que usar o enchimento. Caso o tamanho da rajada ainda seja menor do que 512 octetos, usa-se o enchimento via *hardware*. Como o tamanho mínimo da unidade transmitida agora é de 512 octetos, o tamanho da rede pode ser estendido para 200 m, garantindo a detecção de colisões. Devido à alta velocidade, o Gigabit Ethernet também utiliza controle de fluxo. Uma estação pode receber um pedido para parar de transmitir

durante até 33,6 ms. A codificação utilizada em fibras ópticas é a 8B/10B. Da mesma forma que no Fast Ethernet, as combinações foram escolhidas de modo a manter a sincronização entre os relógios. Para o padrão 1000Base-T, a codificação é diferente. São utilizados simultaneamente os 4 pares do cabo UTP de categoria 5. Cada símbolo é codificado em um de cinco níveis de voltagem e são enviados 2 bits por símbolo em paralelo em cada um dos pares. Como o relógio roda a 125 MHz, o envio dos oito bits permite o funcionamento a 1 Gbps.

O padrão 802.3ae, a Ethernet de 10 gigabits, foi desenvolvido em 2002. Esse padrão funciona em modo *full-duplex* e normalmente utiliza fibras-ópticas embora esteja sendo padronizado um novo cabo com 8 pares metálicos. São preservados o formato e os tamanhos mínimo e máximo do quadro Ethernet na interface de serviço do cliente MAC.

As redes Ethernet são um sucesso há mais de 20 anos e tudo indica que continuarão a ser por mais algum tempo. A sua evolução nestes anos foi fantástica passando do modo CSMA-CD (*half-duplex*) para o modo comutado (*full-duplex*), alterando a codificação para aumentar a eficiência, melhorando o trançado dos pares e o trançado entre os pares para aumentar a banda etc. Nenhuma outra tecnologia permite oferecer velocidades tão altas a baixo custo. Em que pese todas estas qualidades, a utilização da rede Ethernet como rede doméstica implica a utilização do cabeamento apropriado em topologia estrela o que envolve custos de instalação significativos.

## 2.4 O padrão IEEE 802.11

Atualmente, existem diversas tecnologias para redes sem fio. Dentre as principais, pode-se citar os seguintes padrões: IEEE 802.11, Hyperlan, DECT, IrDA, HomeRF e BlueTooth. No entanto, o padrão IEEE 802.11 é a tecnologia que tem obtido maior êxito comercial e, portanto, esta seção se dedica a esta tecnologia. Alguns autores chamam o padrão IEEE 802.11 de “Ethernet sem fio”. Esta seção mostra que esta denominação é inapropriada, pois as diferenças entre as duas tecnologias são significativas.

As redes sem fio são divididas em duas categorias. A primeira abrange as redes com infra-estrutura, nas quais toda a comunicação é realizada através de um ponto de acesso (Figura 2.3), como é o caso das redes celulares de telefonia. A segunda categoria engloba as redes sem infra-estrutura, também denominadas redes ad hoc (Figura 2.4), nas quais as estações se comunicam diretamente, não existindo o ponto de acesso. Nas redes ad hoc de comunicação direta os nós podem se comunicar, única e exclusivamente, com os nós que estão dentro do seu raio de cobertura. Desta forma, as estações *A*, *B* e *C* não se comunicam com as estações *D*, *E* e *F*, formando duas redes isoladas como mostra a Figura 2.4. Por

sua vez, nas redes ad hoc de múltiplos saltos, as estações da rede também se comportam como roteadores, permitindo a comunicação entre os nós cuja distância ultrapassa o raio de cobertura, sendo, como consequência, bem mais complexas. Na Figura 2.4, as estações *A*, *B* e *C* podem se comunicar com as estações *D*, *E* e *F* através da estação *G*.

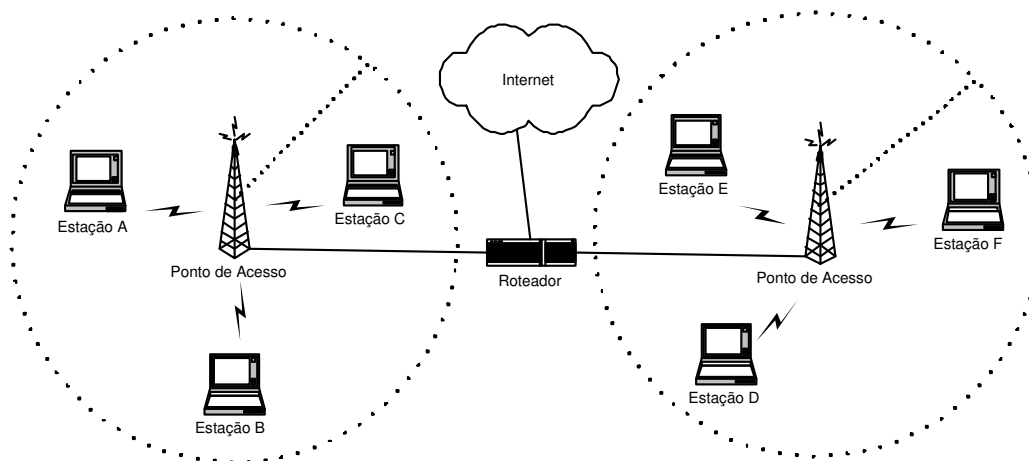


Figura 2.3: Uma rede sem fio no modo infra-estruturado.

As redes ad hoc apresentam diversas vantagens como, por exemplo, a grande flexibilidade, pois podem ser formadas rapidamente mesmo em lugares ermos, o baixo custo de instalação e a robustez, pois podem resistir a catástrofes da natureza e a situações de destruição por motivo de guerra. Desta maneira, as principais aplicações para as redes ad hoc são em ambientes onde não há qualquer tipo de infra-estrutura de comunicação, ou esta seja economicamente inviável, ou ainda, caso a infra-estrutura existente não seja confiável, como é o caso de operações militares em território inimigo.

A facilidade de instalação e o baixo custo estão tornando a tecnologia de redes sem fio muito popular com uso difundido em aeroportos, praças públicas, cafés etc. Uma característica importante, intrínseca e exclusiva das redes sem fio, é a mobilidade. No entanto, uma característica negativa associada às redes sem fio é a segurança, uma vez que qualquer dispositivo que esteja dentro do alcance da rede pode, em princípio, obter acesso. Os problemas relativos a esta vulnerabilidade têm provocado uma resistência forte à sua utilização em ambientes industriais e escritórios profissionais.

A propagação de um sinal pelo ar sofre uma atenuação significativa e as características do canal podem variar consideravelmente de acordo com as condições do tempo ou com o número de obstáculos entre o emissor e o receptor. Ao contrário

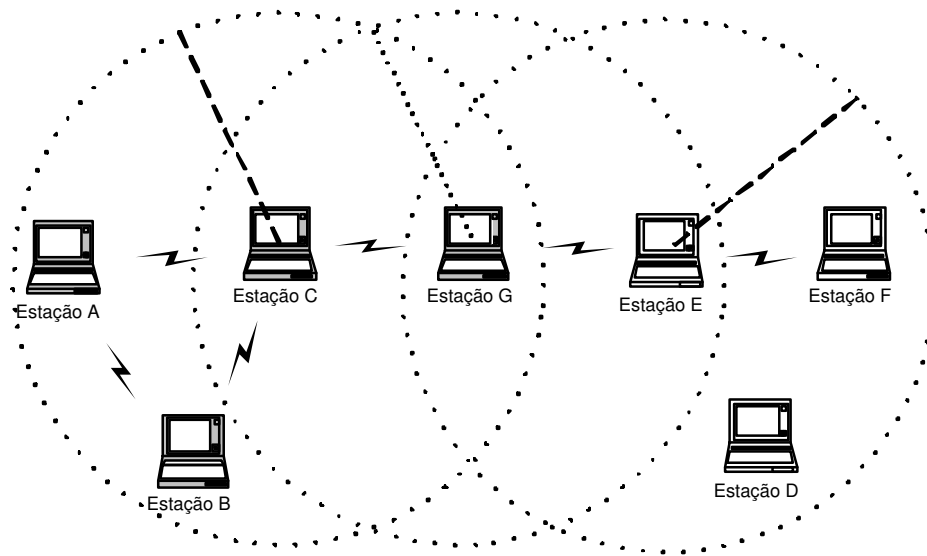


Figura 2.4: Uma rede sem fio no modo ad hoc.

de uma comunicação com fio, o sinal recebido pelo receptor de uma comunicação sem fio é uma composição de sinais vindos de diversas direções e de diferentes caminhos, oriundos da reflexão do sinal em obstáculos encontrados no caminho. Este fenômeno de múltiplos caminhos distorce o sinal e provoca desvanecimentos. Por estes motivos, considera-se que as redes sem fio utilizam um meio de transmissão bastante hostil. Assim, a taxa de erro binária em uma rede sem fio é bem maior que em uma rede Ethernet e, conseqüentemente, o número de quadros que chegam ao transmissor com erros é maior. Também pode-se concluir que a probabilidade de se ter erros em um quadro aumenta com o seu tamanho.

Na rede Ethernet, as colisões são detectadas e, quando isto ocorre, a transmissão é interrompida e retransmite-se o quadro. Não ocorrendo colisão é praticamente certo do quadro ser recebido corretamente pelo receptor. A recuperação de quadros recebidos com erros não é realizada pela rede Ethernet. Esta função, quando necessária é deixada para as camadas superiores, mas deve-se ressaltar que a necessidade de recuperação de quadros com erros é raríssima. Nas redes sem fio, devido à grande diferença da potência entre o sinal transmitido e o sinal recebido, ocasionada pela atenuação do ar, não é possível detectar colisão, tornando difícil o emprego do CSMA/CD. Some-se a este fato a probabilidade dos quadros serem recebidos com erros. Portanto, para se obter uma certa confiabilidade, deve-se prover a rede sem fio de um mecanismo de reconhecimento de quadros (ACK - *acknowledgement*).

Nos casos onde nem todas estações estão no alcance das transmissões surge o problema conhecido como o terminal escondido. A Figura 2.5 ilustra um cenário onde pode ocorrer este problema. As estações *A* e *C* estão fora do raio de alcance mútuo e alcançam apenas a estação *B*, enquanto que *B* alcança *A* e *C*. Se *A* começar a transmitir para *B* e, em seguida, *C* transmitir para *B*, haverá colisão em *B*, pois *C* não consegue detectar a transmissão de *A*.

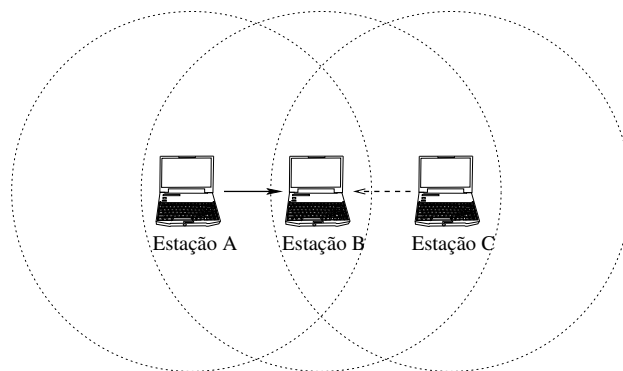


Figura 2.5: O problema do terminal escondido.

A Figura 2.6 ilustra um cenário básico onde pode ocorrer o problema do terminal exposto. Considere que a estação *B* está transmitindo para a estação *A*. Neste caso a estação *C* está no raio de alcance de *B* e portanto consegue escutar a transmissão de *B* para *A*. Considere, agora, que o nó *C* deseje transmitir uma informação ao nó *D*, que está fora do alcance de *A* e de *B*. Neste cenário, *C* inibirá, desnecessariamente, a sua transmissão até que *B* encerre a transmissão para *A*, pois a transmissão da estação *C* para a *D* não causaria colisão em *A*.

Além dos problemas das redes sem fio infra-estruturadas, as redes ad hoc de múltiplos saltos são mais complexas, pois necessitam de mecanismos de roteamento.

Todos os problemas das redes sem fio, acima mencionados, resultam em uma taxa efetiva de transferência bem menor que a taxa de transmissão binária anunciada para o meio físico.

A arquitetura do IEEE 802.11 consiste em vários componentes que interagem para prover uma rede local sem fio com suporte à mobilidade de estações de modo transparente para as camadas superiores.

O conjunto básico de serviços (*Basic Service Set - BSS*) é o bloco fundamental de construção da arquitetura do 802.11 [2]. Um BSS é definido como um grupo de estações que estão sobre o controle direto de uma única função de coordenação (Seção 2.4.1), que determina quando uma estação pode transmitir e receber dados.

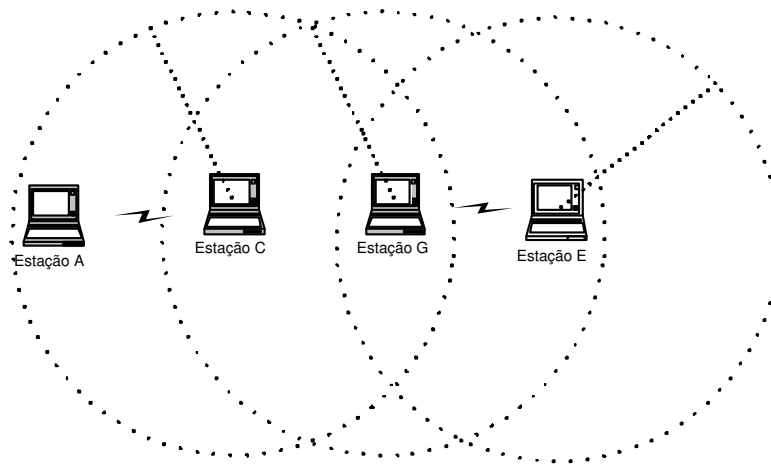


Figura 2.6: O problema do terminal exposto.

O padrão IEEE 802.11 especifica dois tipos de redes sem fio: ad hoc ou infra-estruturada. Uma rede ad hoc é composta somente por estações dentro de um mesmo BSS. Qualquer estação pode estabelecer uma comunicação direta com outra estação no BSS sem a necessidade que a informação passe por um ponto de acesso. O padrão 802.11 refere-se a uma rede ad hoc como um BSS independente. Já em uma rede infra-estruturada, é utilizado um ponto de acesso que é responsável por quase toda a funcionalidade de rede. De modo a aumentar a cobertura de uma rede infra-estruturada, vários pontos de acesso podem ser interligados através de um *backbone* chamado sistema de distribuição (*distribution system*). O conjunto dos pontos de acesso e dos sistemas de distribuição é definido com um conjunto estendido de serviços (*Extended Service Set - ESS*).

### 2.4.1 A Subcamada de Acesso ao Meio

A subcamada MAC do IEEE 802.11 possui dois mecanismos de controle de acesso ao meio, o DCF (*Distributed Coordination Function*) e o PCF (*Point Coordination Function*). O primeiro é um mecanismo distribuído, no qual cada elemento da rede deve escutar o meio e transmitir apenas quando o meio estiver vazio. O PCF é um mecanismo centralizado onde um ponto de acesso controla o acesso ao meio. Logo, este mecanismo só pode ser utilizado em redes infra-estruturadas.

O modo DCF utiliza o protocolo CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*) para controlar o acesso ao meio (Figura 2.7). Assim,

torna-se necessária à utilização de um reconhecimento (ACK) para informar que o quadro foi recebido corretamente. Após escutar o meio vazio, o terminal deve aguardar um certo intervalo de tempo (IFS - *Inter-Frame Space*) antes de começar a transmissão. O valor deste intervalo de tempo é determinado pelo tipo de quadro a ser transmitido. Os quadros ACK utilizam um intervalo de tempo chamado de SIFS (*Short Inter-Frame Space*) e têm prioridade sobre os quadros de dados, que usam o intervalo DIFS (*Distributed Inter-Frame Space*). Além disso, para evitar colisões, um terminal deve esperar, além do tempo DIFS, um tempo aleatório (*backoff*). No caso de vários terminais tentarem transmitir ao mesmo tempo, aquele que tiver o menor tempo de *backoff* irá transmitir primeiro. O processo de *backoff*, no qual a estação escolhe um tempo aleatório uniformemente distribuído entre zero e o tamanho da janela de contenção (CW), evitando assim colisões, e cria um temporizador de *backoff*. Este temporizador é decrementado periodicamente quando o meio está livre por mais de DIFS segundos, ou seja, não há nenhuma estação transmitindo. O período de decremento é dado pelo tempo de *slot* que corresponde ao atraso máximo de ida e volta dentro de uma rede e a outros tempos. O temporizador é parado quando alguma transmissão é detectada no meio. Quando o temporizador expira, a estação envia o seu quadro.

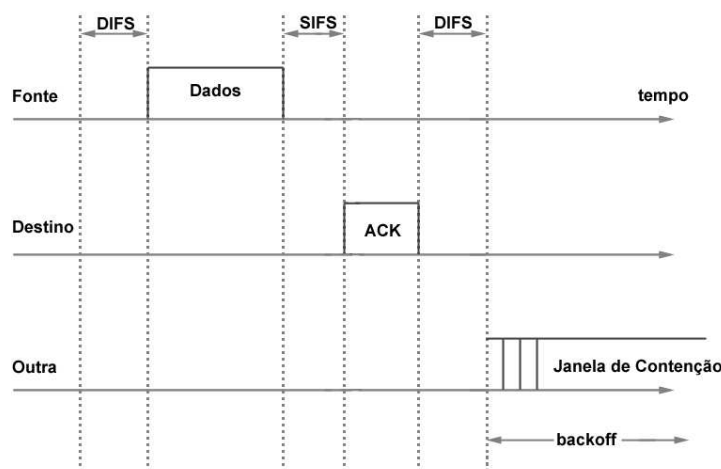


Figura 2.7: Esquema básico de acesso no DCF.

A cada vez que uma estação não recebe um ACK, considera-se que houve uma colisão e o quadro deve ser retransmitido. Para minimizar a probabilidade de ocorrerem futuras colisões, o valor da janela de *backoff* começa com um valor mínimo dado por  $CW_{min}$  e a cada transmissão não sucedida é aumentado para a próxima potência de 2 menos 1, até um limite máximo predefinido chamado

$CW_{max}$ . A fórmula da função que gera o *backoff* pode ser expressa da seguinte maneira:

$$backoff = random(CW) \times st, \quad (2.1)$$

onde  $st$  é o tempo de um *slot* e

$$CW = ((CW_{min} + 1) * 2^{i-1}) - 1, \quad (2.2)$$

onde  $i$  representa o número de tentativas de transmissão.

Os valores de  $CW_{min}$  e  $CW_{max}$  dependem de qual camada física é utilizada; para o DSSS,  $CW_{min}$  é 31 e  $CW_{max}$  é 1023. Caso um número máximo de transmissões seja alcançado<sup>1</sup>, o quadro é descartado. Para evitar a captura do meio, caso a estação transmissora tenha mais algum quadro a transmitir, ela entra na fase de *backoff*.

Este mecanismo é idêntico ao utilizado na Ethernet. As estações que obtiveram sucesso na última transmissão são favorecidas, pois possuem tamanhos de janela de *backoff* menores que as estações que não conseguiram transmitir. Este problema é agravado quando a rede está com uma alta carga, pois a probabilidade de ocorrerem colisões é maior.

A lógica de transmissão de um quadro de dados é apresentada na Figura 2.8.

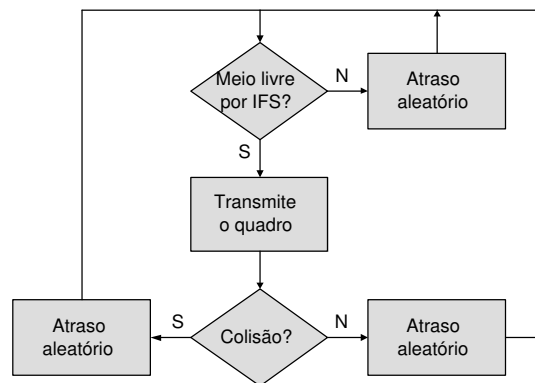


Figura 2.8: Lógica de acesso ao meio no IEEE 802.11.

<sup>1</sup>O número máximo de retransmissões para RTS e quadros de dados de tamanho menor ou igual ao limiar  $RTS_{threshold}$  é chamado *ShortRetryLimit* e para quadros de dados maiores que o limiar  $RTS_{threshold}$  é conhecido como *LargeRetryLimit*.

Com o objetivo de evitar o problema do terminal escondido foram definidos o quadro RTS (*Request to Send*) e o quadro CTS (*Clear to Send*), que armazenam informações referentes à duração das transmissões. Desta maneira, as estações devem enviar, antes de cada transmissão, um quadro RTS e esperar pela resposta da estação destino, que por sua vez deve enviar um quadro CTS, sinalizando que o nó fonte pode iniciar a transmissão, como mostrado na Figura 2.9. Todas as estações que escutarem o RTS ou CTS devem atualizar os valores de seus vetores de alocação (NAV - *Network Allocation Vector*), que contêm o tempo que o canal estará ocupado. Para que este mecanismo funcione, todos os nós no alcance do transmissor ou do receptor devem ser capazes de entender as informações sobre a duração da comunicação. Por isto os quadros RTS e CTS deve ser transmitidos em uma das taxas básicas da rede. Estas taxas básicas devem ser suportadas por todos os nós da rede, independentemente da taxa de transmissão de dados de cada nó. O padrão IEEE 802.11 define que todos os quadros de controle sejam transmitidos em uma taxa básica da rede, o que faz com que o quadro ACK também seja enviado em uma dessas taxas básicas.

Quando quadros RTS e CTS são utilizados, colisões ainda podem existir devido a diferença entre os alcances de transmissão e interferência. O alcance de transmissão determina que a transmissão é possível dentro de um raio em torno do transmissor. Dentro de um segundo raio chamado alcance de detecção, a detecção da transmissão é possível, ou seja, a potência de transmissão é grande o suficiente para diferenciar a transmissão do ruído. Em um terceiro raio chamado alcance de interferência, que é ainda maior, o transmissor pode interferir em outra transmissão [3]. Um nó pode não ser capaz de se comunicar com outro, porém as transmissões desses nós podem colidir em um nó intermediário pois o alcance de interferência é aproximadamente duas vezes maior que o alcance de transmissão para redes sem-fio WaveLAN [4].

Por um lado, este mecanismo aumenta a eficiência da rede por minimizar o número de colisões e por garantir que as colisões ocorram apenas entre quadros RTS, que são menores e não transportam dados. Por outro lado, o mecanismo acrescenta uma sobrecarga (*overhead*) ao DCF, diminuindo a sua eficiência, além de reservar o meio desnecessariamente em algumas situações. Por isso, é previsto pela norma do IEEE 802.11 um tamanho mínimo de quadro, denominado limiar de RTS ( $RTS_{threshold}$ ), a partir do qual este mecanismo deve ser utilizado. Crow et al. [5] analisaram o efeito do RTS e do CTS na vazão da rede e concluíram que o valor ideal para o tamanho mínimo de quadro é em torno de 250 octetos, ou seja, todos os quadros menores que este valor não precisam ser precedidos de quadros RTS e CTS. Já Weinmuller et al. [6, 7] concluíram que o valor do limiar deve mudar dinamicamente de acordo com a carga da rede.

No mecanismo centralizado PCF (Figura 2.10), foi definido um intervalo de tempo, chamado de superquadro, que divide-se em dois períodos. No período li-

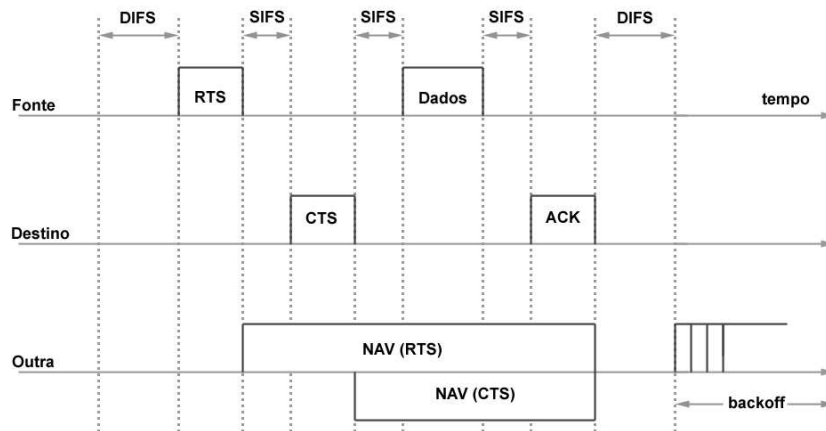


Figura 2.9: O mecanismo DCF com RTS e CTS.

vre de contenção (*Contention Free Period - CFP*), o coordenador de ponto, que pertence ao ponto de acesso, faz enquetes (*polling*) e cada estação deve transmitir apenas quando receber uma enquete. As estações recebem dados quando são consultadas pelo coordenador de ponto. Após o término do período livre de contenção começa o período de contenção (*Contention Period - CP*), no qual é utilizado o mecanismo DCF.

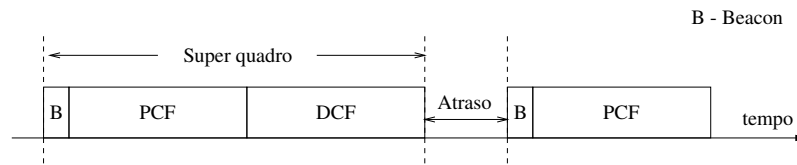


Figura 2.10: Modos PCF e DCF operando juntos.

O coordenador de ponto inicia e controla o tempo livre de contenção. Ele escuta o meio por PIFS (*Point Coordination Interframe Space*) segundos e então começa um período livre de contenção (*Contention Free Period - CFP*) através da difusão de um sinal de *beacon* (Figura 2.10). Como, por definição, PIFS é menor que DIFS, nenhuma estação pode começar a enviar dados no modo DCF antes do coordenador de ponto. Todas as estações adicionam a duração máxima do período de contenção ( $CFP_{maxduration}$ ) aos seus respectivos NAVs. O período livre de contenção pode terminar a qualquer momento através do envio de um quadro  $CF_{end}$  pelo coordenador de ponto. Isso ocorre frequentemente quando a

rede está com pouca carga. Todas as estações adicionam a duração máxima do período de contenção ( $CFP_{maxduration}$ ) aos seus respectivos NAVs. O período livre de contenção pode terminar a qualquer momento através do envio de um quadro  $CF_{end}$  pelo coordenador de ponto. Isso ocorre freqüentemente quando a rede está com pouca carga.

Quando chega a vez de uma estação transmitir, o coordenador de ponto envia um quadro de dados caso exista algum a ser enviado dentro de um quadro de consulta (*piggyback*). O receptor envia de volta um ACK, também com dados se for o caso, depois de SIFS segundos. Após encerrar a transmissão a todas as estações contidas em uma lista de consultas, o coordenador de ponto reinicia o processo de consulta após PIFS segundos. Os usuários que estão sem transmitir por alguns ciclos são retirados da lista de consultas e são consultados de novo no início do próximo período livre de contenção.

Existem dois problemas básicos no acesso centralizado. O primeiro consiste na diminuição do período livre de contenção quando uma estação captura o meio perto do final do superquadro e continua transmitindo o quadro além do tempo previsto para o superquadro. Além disso, a limitação da duração máxima do CFP pode provocar um adiamento de uma transmissão para o próximo CFP, em casos onde o número de fontes de fluxos de tempo-real é superior à capacidade de transmissão em um CFP. Ambos os problemas acrescentam atraso indesejado na transmissão. Além disso, o PCF acrescenta uma grande sobrecarga devido ao *polling*, sobretudo, quando este não é respondido, ou seja, a estação não possui quadros a transmitir.

De modo a diminuir a probabilidade de erros devido ao enfraquecimento do sinal e ao ruído, quadros pequenos devem ser transmitidos. O padrão IEEE 802.11 provê suporte para a fragmentação de quadros em transmissões ponto-a-ponto e é responsável por remontar o quadro, o que torna o processo transparente para a camada superior. O padrão obriga que todos os receptores tenham suporte a fragmentação mas deixa como opcional a fragmentação nos transmissores. Um limiar de fragmentação ( $Fragmentation_{threshold}$ ) é estabelecido, ou seja, um quadro é fragmentado se for maior que o limiar e o tamanho máximo de um fragmento também é dado por  $Fragmentation_{threshold}$ .

Caso não haja interrupção devido à limitação de ocupação do meio para uma camada física, os fragmentos de um quadro são enviados em rajada durante um período de contenção, utilizando uma única invocação do procedimento de acesso ao meio do DCF. Um fragmento é enviado SIFS segundos após o recebimento do ACK relativo ao fragmento anterior. A informação da duração no quadro de um fragmento indica o tempo necessário para a recepção do ACK do próximo fragmento, fazendo com que as outras estações que obtiverem essa informação não transmitam. O campo duração nos quadros de dados e no ACK especifica a duração total do próximo fragmento e do seu ACK. No caso do período livre de

contenção, os fragmentos são enviados como quadros individuais.

O formato do quadro de dados é apresentado na Figura 2.11. O quadro é formado pelo campos controle de quadro, duração, endereço 1, endereço 2, endereço 3, seqüência, endereço 4, dados e CRC.

2 octetos	2 octetos	6 octetos	6 octetos	6 octetos	2 octetos	6 octetos	>= 0	4 octetos
Controle de quadro	Duração	Endereço 1	Endereço 2	Endereço 3	Seqüência	Endereço 4	Dados	FCS

Figura 2.11: Formato do quadro de dados.

O campo controle de quadro contém dois octetos e é subdividido em 11 campos: versão, tipo, subtipo, para DS, de DS, mais fragmentos, repetir, potência, mais, WEP e ordem.

O campo versão (2 bits) indica a versão do protocolo. O campo tipo (2 bits) indica se o quadro é de dados, controle ou gerenciamento. O campo subtipo (4 bits) indica a função do quadro. O campo de DS (1 bit) quando igual a 1 indica que o quadro é destinado ao sistema de distribuição, enquanto que o campo para DS (1 bit) indica que o quadro está deixando o sistema de distribuição. O campo mais fragmentos (1 bit) quando igual a 1, sinaliza que existem mais fragmentos do quadro. O campo repetir (1 bit) representa a retransmissão de um quadro. O campo potência (1 bit) quando igual a 1, significa que o transmissor está no modo dormindo. O campo mais (1 bit) indica se o transmissor tem mais dados para o receptor. O campo WEP (1 bit) indica a utilização do mecanismo WEP (*Wired Equivalent Privacy*). Por último, o campo ordem (1 bit) indica se os dados devem ser processados em ordem.

O campo duração (2 octetos) informa em microssegundos o tempo necessário para a transmissão do quadro de dados e de sua confirmação. Esse campo é utilizado no NAV. Os campos de endereço 1 a 4 (com 6 octetos cada), contém respectivamente os endereços do receptor físico, do transmissor físico, lógico e lógico. Em função do tipo de rede, esses endereços são utilizados. Para uma rede no modo ad hoc, representada pelos campo de DS e para DS iguais a 0, os endereços são respectivamente DA (*Destination Address*), SA (*Source Address*) e BSSID (identificador do BSS). Para uma rede infra-estruturada com o quadro vindo do ponto de acesso, o campo de DS é igual a 1, o campo para DS é igual a 0 e os endereços são DA, BSSID e transmissor lógico. No caso de uma rede infra-estruturada com o quadro indo para o ponto de acesso, de DS é igual a 0, para DS é igual a 1 e os endereços são BSSID, SA e receptor lógico. Por último, para uma rede infra-estruturada dentro do sistema de distribuição, os campos de DS e para DS são iguais a 1 e os endereços são RA (*Receiver Address*), TA (*Transmitter Address*), DA e SA.



O valor do campo RA é copiado do campo TA do RTS precedente.

A diferença entre os quadros CTS e ACK aparece no campo duração. Para o quadro ACK, a duração é zero, se o bit de mais fragmentos for igual a zero no quadro de dados anterior ou um tempo em microssegundos para enviar um quadro de dados e um quadro ACK, se o bit de mais fragmentos for igual a um no quadro de dados anterior.

Talvez o tópico mais importante para a completa aceitação das redes sem fio seja a segurança. As vulnerabilidades intrínsecas à comunicação sem fio tornam inconveniente a utilização de alguns mecanismos de segurança desenvolvidos para as redes convencionais. O IEEE 802.11 apresenta graves furos de segurança.

Um padrão de segurança estabelecido para redes locais sem fio é o WEP (*Wired Equivalent Privacy*). Esse padrão está sendo utilizado nas redes 802.11, porém se provou menos seguro do que anteriormente previsto [8]. O WEP envolve privacidade através do uso de criptografia e integridade através de um CRC. O transmissor e o receptor devem compartilhar uma chave secreta de 40 ou 104 bits. Essa chave é concatenada com um vetor de inicialização (*Initialization Vector - IV*) de 24 bits e então a concatenação é passada por um gerador de números pseudo-aleatórios (*Pseudo-Random Number Generator - PRNG*). Além disso, a mensagem original é concatenada com o valor de verificação de integridade (*Integrity Check Value - ICV*) que utiliza um CRC-32. A saída do gerador de números pseudo-aleatórios e a mensagem concatenada passam por um ou-exclusivo bit-a-bit, sendo esse resultado concatenado com o vetor IV e então transmitido. No receptor, o IV é retirado e então é realizada a mesma operação binária ou-exclusivo entre o que restou da mensagem recebida e a mesma seqüência pseudo-aleatória utilizada na transmissão (gerada pelo receptor através do uso do IV e da chave secreta). Com a mensagem decifrada é realizada a verificação de integridade através do CRC-32 para verificar sua validade. Caso o CRC calculado seja diferente do CRC recebido, a mensagem é descartada.

Um dos problemas do WEP consiste na reutilização e o envio em texto claro dos vetores de inicialização. Através de operações ou-exclusivo de duas ou mais mensagens que utilizaram um mesmo vetor de inicialização, é possível obter as mensagens originais mesmo sem o conhecimento da chave secreta. Se uma das mensagens for conhecida pode-se obter a(s) outra(s). Outro problema consiste no uso de uma única chave secreta. Se a chave fosse modificada de tempos em tempos, seria bem mais difícil para um atacante obter as informações da rede. Além disso, um atacante pode modificar a mensagem original, recalculando o CRC e modificá-lo, fazendo com que a mensagem passa pela verificação de integridade. O padrão IEEE 802.11, finalizado em junho de 2004, resolve esses problemas.

### 2.4.2 A Camada Física

As bandas de rádio frequência usadas pelo padrão IEEE 802.11 são as bandas ISM (*Industrial, Scientific, and Medical bands*), nas frequências 2,4 e 5 GHz, que não requerem licenças.

O padrão define cinco técnicas de transmissão permitidas na camada física. O primeiro padrão, definido em 1997, especificava a transmissão por infra-vermelho, e duas outras técnicas usando espalhamento de espectro. A transmissão por infra-vermelho recebe interferência da luz do dia, não atravessa paredes e as duas taxas de transmissão definidas eram baixas, 1 e 2 Mbps. Por estes motivos, esta opção não é muito usada. As duas outras técnicas usam a banda de 2,4 GHz com espalhamento de espectro por saltos de frequência (*Frequency Hopping Spread Spectrum* - FHSS) e por seqüência direta (*Direct Sequence Spread Spectrum* - DSSS). As taxas de transmissão são limitadas a 1 ou 2 Mbps. Uma extensão a esta norma, denominada IEEE 802.11b, definiu um uma outra técnica de espalhamento de espectro por seqüência direta com uma maior frequência (*High Rate Direct Sequence Spread Spectrum* - HR-DSSS) que atinge 11 Mbps. Este padrão foi o grande responsável pelo alavancamento comercial da redes IEEE 802.11.

Visando uma maior velocidade e, principalmente, aplicações de vídeo foi definido o padrão IEEE 802.11a na frequência de 5 GHz. Este padrão usa a técnica OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) e atinge uma taxa de transmissão de 54 Mbps. A técnica OFDM divide o espectro em múltiplas bandas de frequências bem estreitas. Como o sinal usa diversas frequências, o efeito de espalhamento de espectro é similar às outras técnicas mencionadas. No entanto, espalhamento do sinal em diversas bandas estreitas ao invés de espalhar pela banda toda possui uma maior imunidade a interferência de frequências específicas e a possibilidade de não usar canais onde a interferência é muito alta. Esta técnica não é compatível com as anteriormente descritas.

Em novembro de 2001, foi aprovado padrão IEEE 802.11g que, assim como o padrão IEEE 802.11a, utiliza a técnica OFDM e pode atingir até 54 Mbps de taxa de transmissão. Este padrão utiliza a frequência de 2,4 GHz e tem a grande vantagem de ser compatível com os demais padrões que utilizam a mesma frequência.

As redes sem fio IEEE 802.11 são fortíssimos concorrentes para tornarem-se padrão em redes domiciliares. Sua facilidade de instalação e baixo custo permitiram sua utilização em um grande número de domicílios. No entanto, existem os problemas da cobertura completa do domicílio, pois é comum ter regiões de sombra, da interferência, quando diversos vizinhos se servem do mesmo tipo de rede, da segurança e da capacidade de oferecer qualidade de serviço para aplicações de som e vídeo.



## Capítulo 3

# As Redes 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, apresenta uma topologia que é uma combinação de estrela, com árvore e com multiponto conforme ilustra a Figura 3.1. Desta forma, o problema de reflexões de sinal devido a descasamento de impedância é muito mais grave na fiação telefônica 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

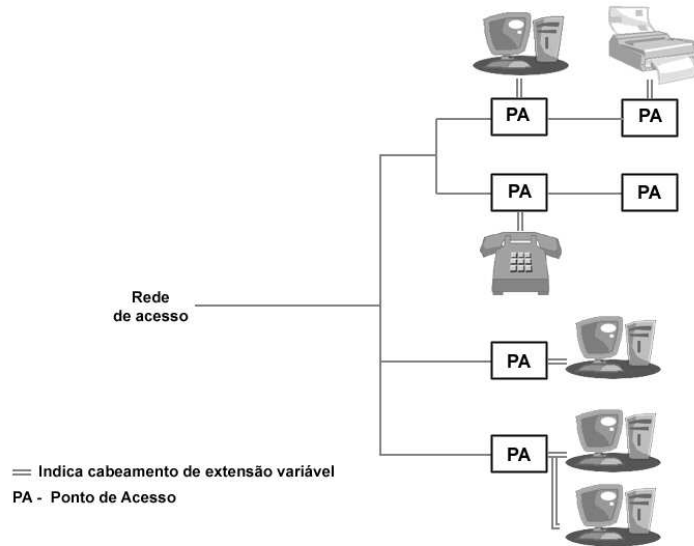


Figura 3.1: Topologia da rede domiciliar através da fiação telefônica.

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 interconectar 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 a 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 cabamentos residenciais que se servem de cabos planos e, portanto, 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, a equalização adaptativa para lidar com as reflexões do sinal.

A importância da equalização nas redes domiciliares através da fiação telefônica pode ser observada na Figura 3.1 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  $100 \Omega$  na frequência de interesse), pode ser capacitiva (em torno de  $300 \text{ pF}$  para um telefone fora do gancho),

ou estar em aberto [9]. 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 atenuação dos sinais nas redes através da fiação telefônica. Os descasamentos de impedância causam padrões complexos de reflexão no domínio do tempo pela rede, isso implica *notches* no domínio da frequência. Além disso, pequenas mudanças nos parâmetros da rede podem prejudicar seriamente a comunicação, por exemplo, mudando um *notch* de uma frequência relativamente inofensiva para uma frequência 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 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.

A principal vantagem da utilização da fiação de telefonia ou da fiação elétrica é o aproveitamento de uma infra-estrutura já existente o que dispensa qualquer custo de instalação de novos cabos. Uma vantagem da rede domiciliar que se serve da fiação elétrica é sua ubiquidade, pois há muito mais tomadas de energia elétrica que de telefone, facilitando a interconexão de dispositivos. No entanto, a fiação telefônica possui uma enorme vantagem que é a privacidade uma vez que o par telefônico é individual por assinante constituindo um meio seguro da casa do assinante até a central telefônica. O mesmo não ocorre nas redes de fiação elétrica e sem fio que estão sujeitas a ação de bisbilhoteiros oportunistas. Além disso, o meio individualizado por assinante oferece um isolamento natural das redes disponibilizando toda a banda passante por domicílio.

### 3.1 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 Phonenumber Networking Alliance*, conhecida como HomePNA [10]. 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 HomePNA 1.0 [11], 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 (*Quadrature Amplitude Modulation - QAM*) para aumentar a taxa de transmissão. Em março de 2000 foi publicada a especificação HomePNA 2.0 [11] que permite taxas de transmissão de até 32 Mbps e é compatível com a versão 1.0. A aliança também vem procurando tornar suas especificações padrões internacionais. Nesse sentido, a ITU-T, baseando-se na especificação HomePNA 2.0, estabeleceu as recomendações G.989.1 [12], G.989.2 [13] e G.989.3 [14].

A banda de frequências usada pelo padrão HomePNA 2.0 é de 4 a 10 MHz. A frequência 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 3.2, o serviço telefônico convencional ocupa, tipicamente, a faixa até 4 kHz, e os sistemas DSL mais utilizados como forma de acesso residencial (Capítulo 5) 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 [15] e à diafonia. Para sistemas cuja banda se sobrepõe à especificada para o padrão HomePNAv2, como o VDSL (Capítulo 5), é necessária a inclusão de uma função de isolamento para eliminar a interferência.

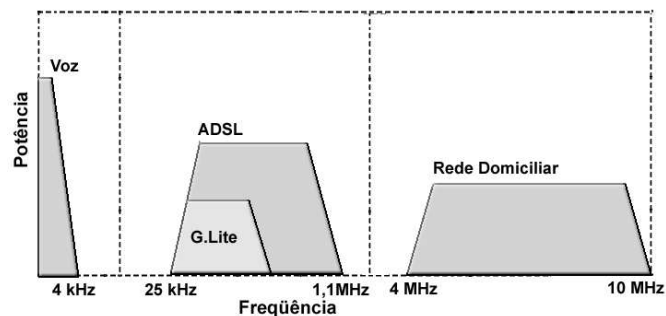


Figura 3.2: Multiplexação dos sistemas de voz, ADSL e HomePNAv2 em frequência.

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 Rádio-Frequência (RF). A Figura 3.3 mostra a máscara de densidade espectral de potência (PSD - *Power Spectral Density*) definida para os transmissores HomePNAv2 [12].

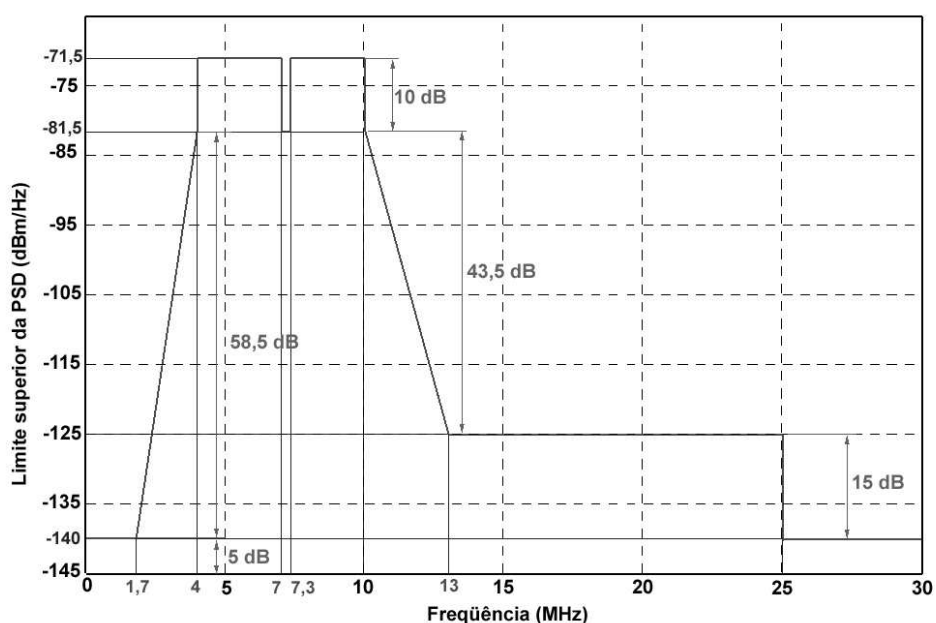


Figura 3.3: Máscara PSD do HomePNAv2.

A portadora utilizada é de 7 MHz. A escolha da banda entre 4 e 10 MHz apenas se sobrepõe a 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 3.3. 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 (Capítulo 5) 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 frequência como mostra a Figura 3.2.

Ao adotar a máscara de densidade espectral de potência mostrada na Figura 3.3, os transmissores podem atender às exigências da FCC (*Federal Communications Commission*) 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.

### 3.1.1 A Subcamada de Acesso ao Meio

O HomePNAv2 utiliza o protocolo CSMA/CD para o compartilhamento do meio entre as estações, como em uma rede Ethernet (Seção 2.2). O quadro MAC é exatamente o mesmo da rede Ethernet com os campos de endereço de destino, endereço de origem, tipo, dados e sequência de verificação de quadro (*Frame Check Sequence* - FCS).

No protocolo de acesso ao meio do HomePNAv2 foi acrescentado um mecanismo de prioridade para dar suporte a qualidade de serviço (*Quality of Service* - QoS). Este mecanismo prevê oito níveis de prioridade de acesso ao meio. Assim, diferentes tipos de tráfego podem ser rotulados com 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 ao final de cada quadro (*Inter-Frame Gap* - IFG), que deve ser no mínimo de  $29 \mu s$ . Como mostra a Figura 3.4, os intervalos de tempo são ordenados 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.

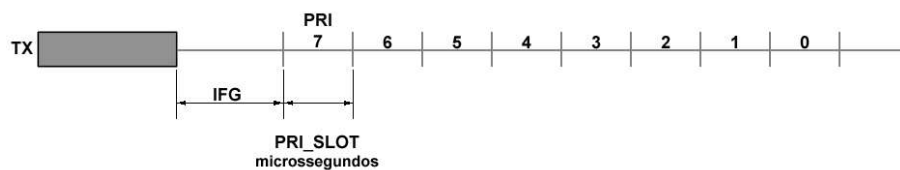


Figura 3.4: *Slots* de prioridade no HomePNAv2.

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, *PRI\_SLOT*, é de  $21 \mu s$ .

Estações que tenham quadros para transmitir devem monitorar a 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 3.5 mostra duas estações, uma com prioridade 7 e outra com prioridade 1, aguardando o final da transmissão de uma terceira estação para transmitirem.

Como pode ser visto na Figura 3.5, embora a estação com prioridade 1 tenha iniciado a escuta do meio antes, a estação com prioridade 7 transmite primeiro, e

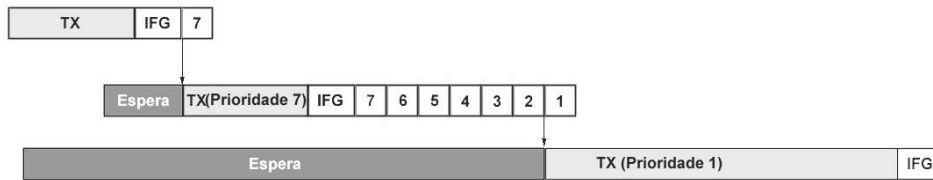


Figura 3.5: Acesso com prioridade no HomePNAv2.

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. Estações podem detectar colisões pela duração da transmissão. Enquanto que a duração mínima de um quadro válido é de  $92,5 \mu s$ , uma estação que detecte a colisão de seu quadro deve parar a transmissão em até  $70 \mu s$  após o seu início [15]. A duração de um quadro não pode ultrapassar  $3122 \mu s$ . 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 3.6.

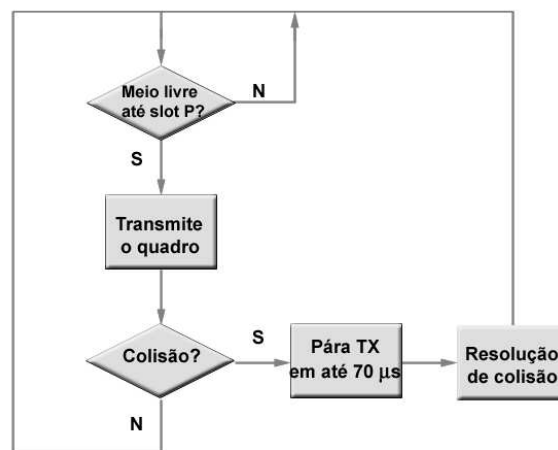


Figura 3.6: Lógica de acesso ao meio no HomePNAv2.

Caso haja uma colisão, as estações iniciam um procedimento distribuído de resolução de colisão chamado *Distributed Fair Priority Queuing* [15]. 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 controlar o meio. Após a transmissão, todas as outras estações decrementam seu nível de *backoff* para uma nova estação no nível 0 de *backoff* assumir 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 com prioridade menor ou igual a dos quadros colididos e que não estavam envolvidas na colisão só podem transmitir após todas as estações envolvidas terem transmitido. Para cada nível de prioridade (de 0 a 7), todas as estações mantêm contadores de nível de *backoff*, BL, e contadores de nível de *backoff* máximo, MBL. Estes contadores são inicializados 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 3.7 mostra, após uma colisão, são utilizados três *slots* especiais de sinalização (S0 a S2) antes dos intervalos de tempo de prioridade. Os contadores de nível de *backoff* são determinados através destes *slots* de sinalização. Os intervalos de tempo de sinalização têm a duração de  $32 \mu\text{s}$  e só são usados após uma colisão, nunca após uma transmissão bem sucedida.

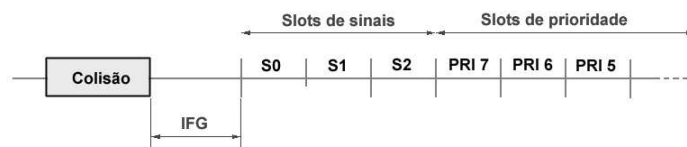


Figura 3.7: Esquema de sinalização no HomePNAv2.

Cada estação participando da resolução de colisão escolhe aleatoriamente um dos três intervalos de tempo de sinalização para transmitir o sinal de *backoff* que determinará os níveis de *backoff*. Estações participando da resolução de colisão incrementam seu nível de *backoff* ao receberem um sinal de *backoff* em um intervalo de tempo de sinalização anterior ao escolhido pela estação. 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 mais alta prioridade podem se adiantar ao fim da resolução de colisão se 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 [12]. Desta forma, enquanto a resolução de colisão estiver ocorrendo, o MBL será diferente de zero.

### 3.1.2 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 octetos 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 frequentes (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. Buscou-se uma modulação que aliasse a alta taxa de transmissão com robustez. A modulação escolhida foi a modulação adaptativa de amplitude em quadratura (*Adaptive Quadrature Amplitude Modulation* - AQAM) [16], que 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 [15].

Para canais com boa resposta em frequência pode ser utilizado o modo a 4 Mbaud, que possibilita transmissões a até 32 Mbps, se utilizada 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 período  $F = \frac{1}{T} = 2$  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 [16]. 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 [15].

O quadro padronizado para a rede domiciliar em linha telefônica é representado na Figura 3.8 [15]. Este consiste de um preâmbulo de 16 octetos, um campo de controle de quadro (Frame Control - FC) de 4 octetos, um campo correspondente ao quadro Ethernet, o campo de CRC de 2 octetos, o campo de enchimento (PAD) de tamanho variável e o campo EOF de um octeto.

O preâmbulo é uma seqüência conhecida de símbolos adaptada à modulação, transmitida a 2 Mbaud que serve para sincronizar a recepção do quadro. O

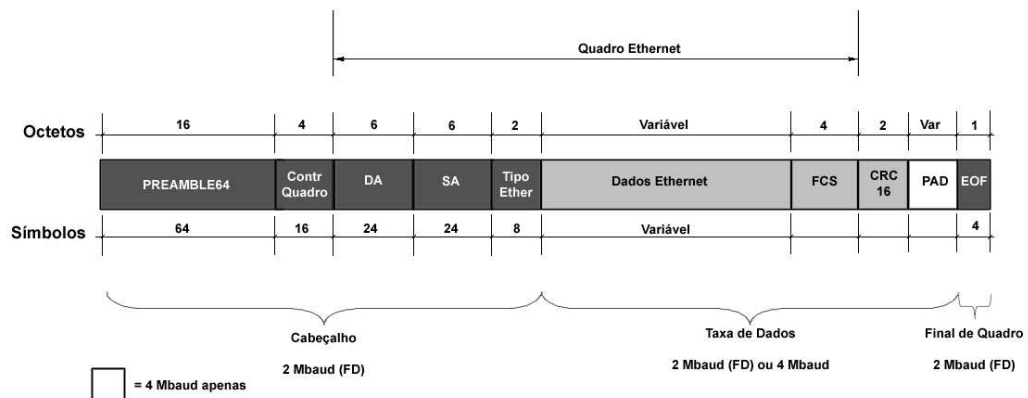


Figura 3.8: Quadro do HomePNAv2.

preâmbulo consiste de 64 símbolos (16 octetos) definido pela seqüência hexadecimal 0xFC483084 repetida quatro vezes.

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

O campo tipo de quadro é destinado a prover flexibilidade para compatibilizar definições futuras de novos formatos e moduladores. Para o HomePNA 2.0 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. Sete níveis de prioridades são especificados sendo a prioridade 7 preferencial à prioridade 0. Parte do quadro deve ser embaralhada para transmissão. O embaralhamento começa no primeiro bit do campo PE e termina no último bit do campo CRC, ou PAD (Figura 3.8), caso este exista. O campo SI deve conter o valor utilizado na inicialização do embaralhador. Como a Figura 3.8 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 3.1 mostra a codificação do campo PE.

O campo HCS (verificação do cabeçalho) consiste de oito bits de verificação de redundância cíclica (*Cyclic Redundance Check - 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 computado, é substituído

Tabela 3.1: 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

por zeros. Para a codificação utiliza-se o polinômio gerador

$$G(x) = x^8 + x^7 + x^6 + x^4 + x^2 + 1 \quad (3.1)$$

Primeiro complementa-se os 8 primeiros bits da seqüência e então utilizam-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

$$H(x) = x^7 + x^6 + x^5 + x^4 + x^2 + x + 1 \quad (3.2)$$

$N(x)$  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, 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 acima, 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 (Seção 2.2).

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

$$G(x) = x^{16} + x^{12} + x^5 + 1 . \quad (3.3)$$

O cálculo é feito de forma similar ao cálculo do campo HCS. Primeiro complementa-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 aumentar a proteção contra erros não detectados.

É importante observar que o cabeamento telefônico convencional se serve de um par trançado de qualidade bem inferior aos cabos recomendados para a rede Ethernet. Além disso, a comunicação na rede Ethernet é ponto-a-ponto enquanto na rede domiciliar em linha telefônica pode se ter configurações multiponto, árvore e estrela misturadas. 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 ordens 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 octeto do campo PAD é colocado um valor, PAD.LENGTH, igual ao número de octetos no campo PAD, menos um. Todos os outros octetos são mantidos em zero. O tamanho do campo PAD deve ser suficiente para que o tempo de transmissão do quadro completo seja pelo menos  $92,5 \mu s$ . 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 octeto) 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

$$G(x) = x^{23} + x^{18} + 1 \quad . \quad (3.4)$$

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). O objetivo do uso de um embaralhador de estado inicial pseudo-aleatório é tornar a densidade espectral de potência (PSD - *Power Spectral Density*) mais uniforme entre os quadros. Assim, elimina-se um problema de geração de frequências específicas em pacotes sucessivos altamente correlacionados.

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. Essas constelações são apresentadas nas Figuras 3.9 a 3.15.

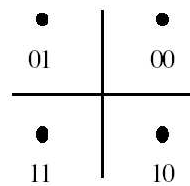


Figura 3.9: 4-QAM - 2 bits por símbolo.

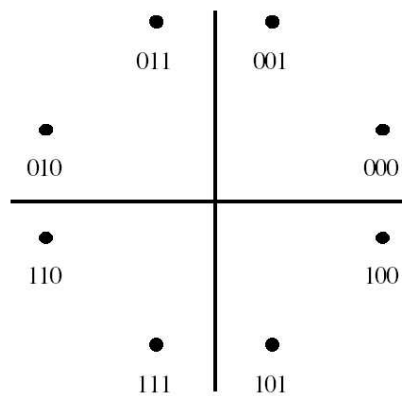


Figura 3.10: 8-QAM - 3 bits por símbolo.

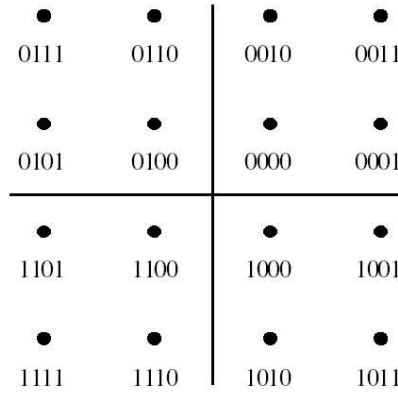


Figura 3.11: 16-QAM - 4 bits por símbolo.

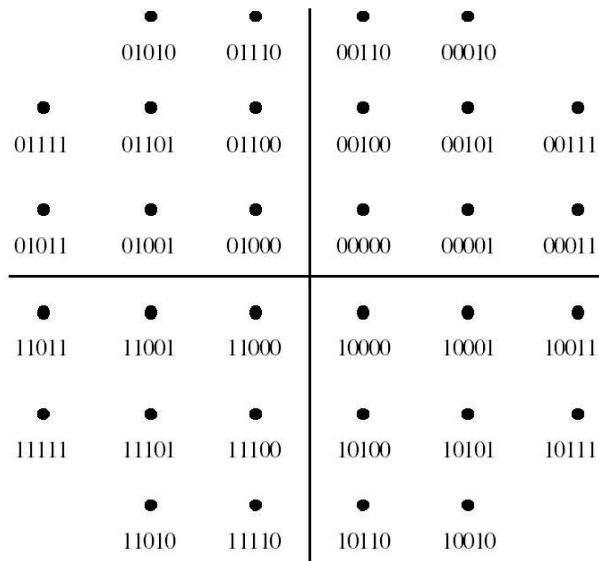


Figura 3.12: 32-QAM - 5 bits por símbolo.

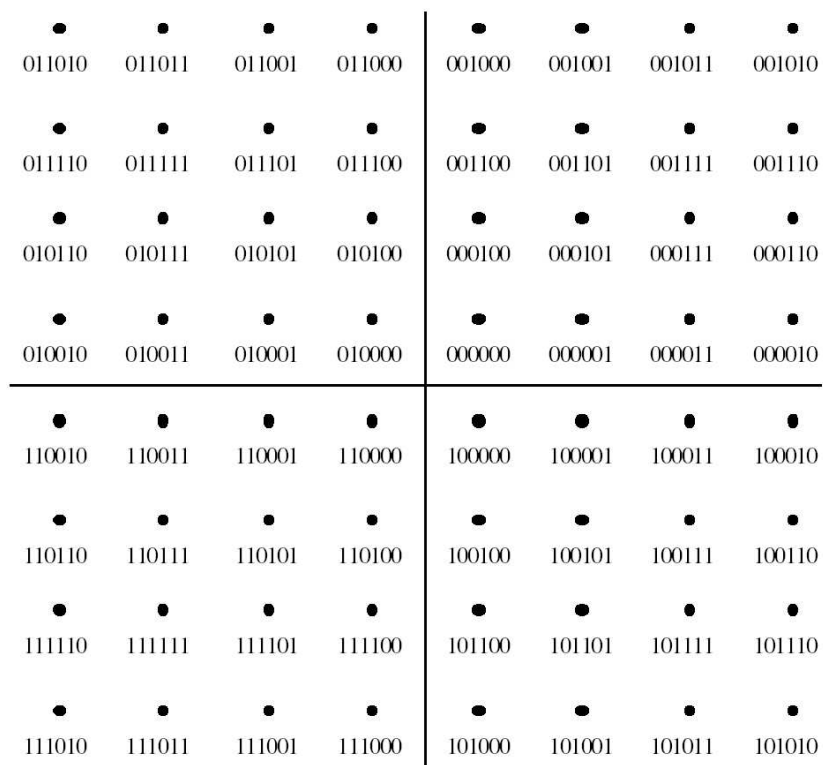


Figura 3.13: 64-QAM - 6 bits por símbolo.

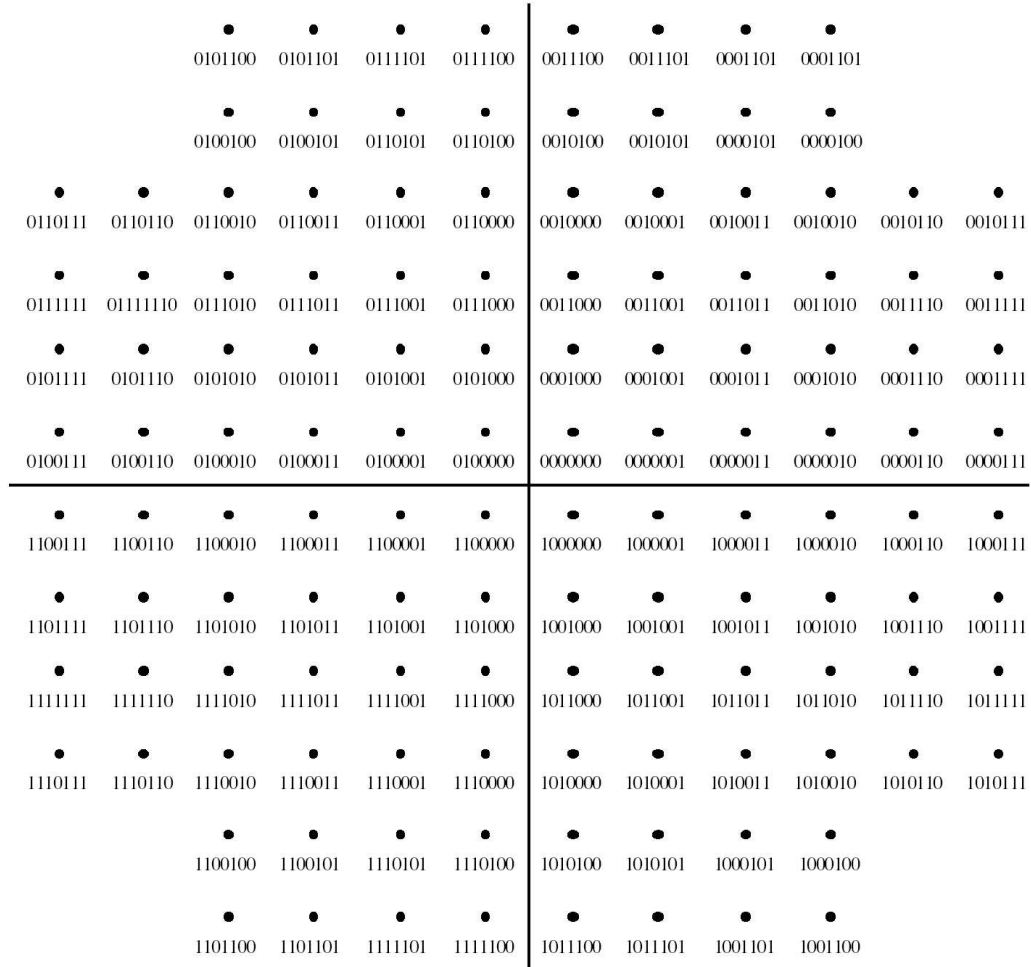


Figura 3.14: 128-QAM - 7 bits por símbolo.

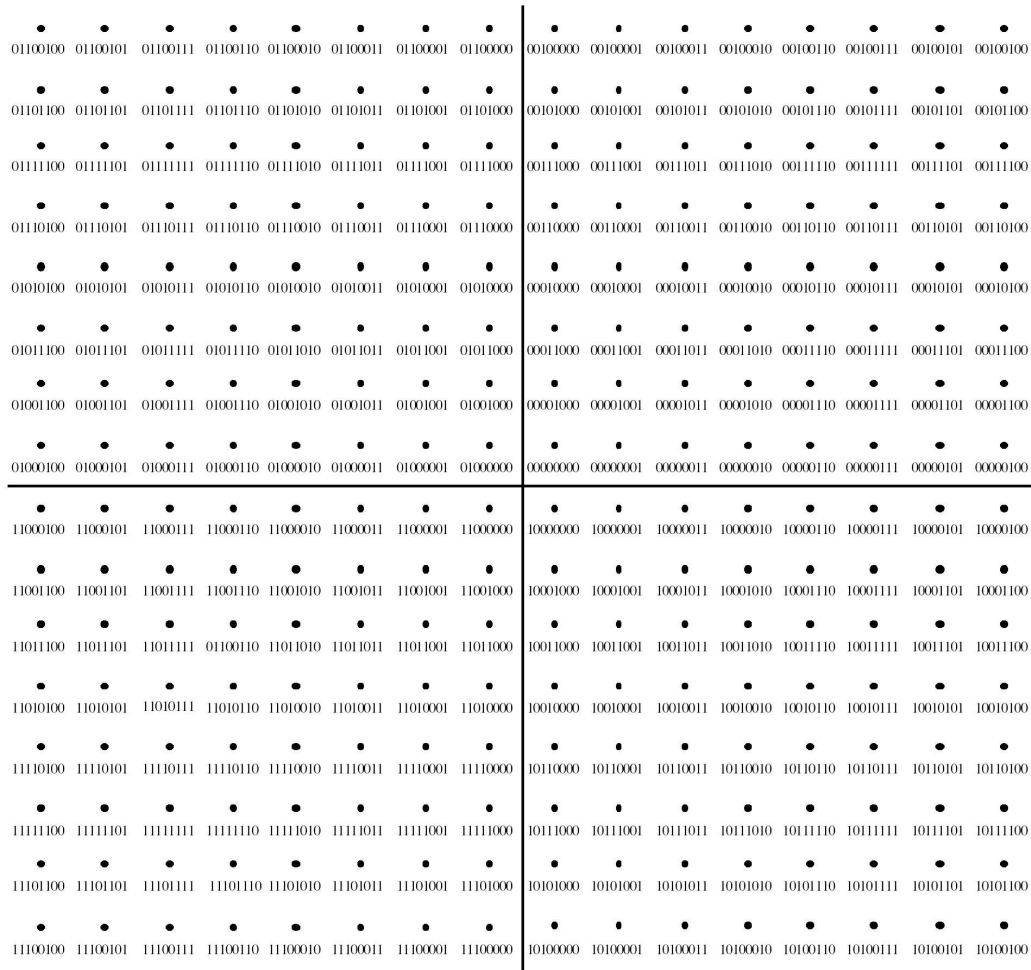


Figura 3.15: 256-QAM - 8 bits por símbolo.

A escala relativa dessas constelações é apresentada na Tabela 3.2, onde o valor apresentado é relativo à amplitude máxima das portadoras ortogonais (I e Q). 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 menores relação sinal-ruído, pode-se utilizar taxas de transmissão menores, que são menos imune a ruídos.

Tabela 3.2: Escala relativa das constelações QAM do HomePNA.

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	$(1 + i)/4$
6	000000	$(1 + i)/7$
7	0000000	$(1 + i)/9$
8	00000000	$(1 + i)/15$

## Capítulo 4

# As Redes Através da Fiação Elétrica

As redes domiciliares através da fiação elétrica utilizam o cabeamento elétrico já existente nas casas para prover a comunicação de dados a alta velocidade. Porém, pelo fato de as redes elétricas não terem sido projetadas para a transmissão de sinais, a comunicação através das linhas de energia (*Power Line Communications* - PLC) é mais difícil de ser realizada do que por pares trançados da rede Ethernet ou da rede telefônica.

A idéia de comunicação pela fiação elétrica não é nova, pois já nos anos 30 existiam aplicações de controle industrial e telemetria. No entanto, apenas recentemente, com os avanços da área de processamento de sinais e transmissão digital, a tecnologia PLC tem sido considerada como uma alternativa viável para comunicações em alta velocidade.

O cabeamento utilizado pela rede elétrica dentro dos lares possui uma topologia análoga à topologia da fiação telefônica. A combinação de estrela, árvore e multiponto (Figura 4.1) faz com que o problema de reflexões de sinais devido ao descasamento de impedância também exista na fiação elétrica. Além disso, a rede domiciliar através da fiação elétrica utiliza geralmente dois fios (uma fase e um neutro) compartilhados entre todos os dispositivos conectados, o que significa que o modo *full-duplex* não pode ser utilizado. Outra questão a ser considerada é a distribuição das fases dentro de uma residência. Normalmente, essa distribuição não segue um padrão preestabelecido. No caso de uma residência bifásica, os cômodos podem estar conectados a diferentes fases. Esse problema pode dificultar a transmissão dos sinais, visto que há uma grande atenuação entre as fases do transformador de média para baixa tensão.

Na rede elétrica os fios de cobre utilizados não são trançados, como na rede Ethernet, aumentando a emissão de sinais de alta frequência. Esta emissão provoca interferência entre os fios, prejudicando a transmissão em altas taxas. Além das questões relacionadas à topologia e à qualidade da fiação, deve-se considerar que, nestas redes, o meio físico é compartilhado com todos os aparelhos eletro-

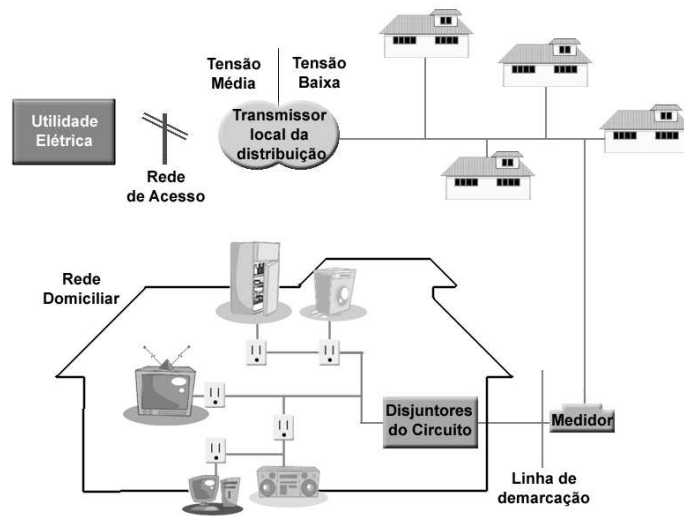


Figura 4.1: Topologia da rede domiciliar através da fiação elétrica.

eletrônicos da casa. Desta forma, o canal apresenta variações imprevisíveis de ruído, impedância e interferência causadas por uma diversidade de aparelhos, tais como: aspiradores de pó, liquidificadores, máquinas de lavar roupa, secadores de cabelo, aparelhos de micro-ondas entre outros. O ato de ligar ou desligar estes aparelhos ou ainda simplesmente conectá-los ou desconectá-los da tomada pode provocar mudanças significativas nas características do meio físico. Por esses motivos, a comunicação neste tipo de rede torna-se um desafio.

Ao contrário das redes sem fio, o ruído da rede elétrica não pode ser representado por um ruído branco gaussiano aditivo (*Additive White Gaussian Noise*) [17], pois diversos equipamentos eletro-eletrônicos podem adicionar diferentes tipos de ruído impulsivo ao canal. Desta forma, o ruído impulsivo pode ser classificado em quatro categorias: síncrono, não síncrono ou tonal, de alta frequência e de apenas uma ocorrência (*single event impulse noise*).

O impulso síncrono é provocado principalmente por *dimmers* [18]. Este dispositivo gera ruído ao conectar a lâmpada à rede elétrica a cada ciclo AC. O ruído gerado é na forma de um impulso com o dobro da frequência da rede AC. O impulso não síncrono ou tonal é provocado por fontes de alimentação chaveadas (*switching power supplies*). Diversos equipamentos possuem este tipo de fonte, tais como: computadores, escova de dentes elétrica, dentre outros. A frequência fundamental destes dispositivos está entre 10 kHz e 1 MHz. O ruído gerado é

rico em harmônicos. O impulso de alta frequência é gerado por equipamentos que utilizam motor universal, tais como: o aspirador de pó, barbeador elétrico, entre outros. Estes motores geram impulsos na faixa de muitos kilohertz [19]. A principal causa do impulso de apenas uma ocorrência é o ato de ligar e desligar aparelhos eletro-eletrônicos. Estes equipamentos possuem um capacitor para a correção do fator de potência, que é carregado e descarregado, conforme o equipamento é ligado e desligado. Este efeito causa grandes voltagens transientes que são proporcionais ao tamanho do capacitor. Existem ainda ruídos causados por fontes externas de ondas de rádio, como por exemplo, intercomunicadores, babás eletrônicas e até mesmo rádios FM.

Outro fator limitante para a transmissão em alta velocidade é a atenuação. Usualmente, o valor da atenuação de um sinal é uma função da frequência e da distância percorrida pelo sinal, o que limita consideravelmente a distância de transmissão em altas frequências. Para o caso específico da rede elétrica, a carga da rede e as descontinuidades de impedância também contribuem para a atenuação do sinal, e podem variar com tempo e com a localização. As descontinuidades de impedância são causadas por emendas nos fios, interruptores e tomadas, provocando zeros na função de transferência do canal. As tomadas causam problemas mesmo sem equipamentos conectados, pois, neste caso, tornam-se pontos da rede sem terminação. Os equipamentos, eventualmente conectados às tomadas, também contribuem para a carga total da rede. A diferença de impedância entre os equipamentos causa um descasamento de impedância, que provoca a reflexão do sinal transmitido. Isto resulta em uma maior atenuação do sinal, pois parte da potência do sinal é perdida. Esta atenuação é dependente da frequência, pois os aparelhos eletro-eletrônicos possuem filtros capacitivos que limitam consideravelmente sinais de baixa frequência. Assim, este tipo de atenuação decai com o aumento da frequência. No caso específico de residências alimentadas por mais de uma fase, há, ainda, a atenuação entre fases intrínseca aos transformadores de média para baixa tensão que pode chegar a 40 dB.

Por último, a impedância da rede exerce uma grande influência na qualidade da transmissão de sinais. O transmissor de um modem deve inserir uma voltagem na rede elétrica que atinja o nível máximo de amplitude permitido pela norma. Portanto, a potência de transmissão é facilmente calculada quando a impedância da rede é conhecida. Quanto menor for a impedância maior terá que ser a potência de transmissão. Entretanto, a impedância da rede elétrica pode variar com o tempo, com a frequência e com a localização, assim, aumentando o custo do estágio de saída dos transmissores. A impedância da rede elétrica de uma casa resulta, basicamente de três fatores. O primeiro deles é a impedância do transformador de distribuição, que aumenta com a frequência. O segundo é a impedância característica do próprio cabo. Existe uma grande variedade de tipos de cabos, que podem ser modelados a partir de indutores e resistores em série. Por último, tem-

se a impedância dos equipamentos que estão conectados à rede elétrica. Este tipo de impedância pode variar entre 10 e 1000 ohms. O descasamento de impedância em uma linha de transmissão aumenta o índice de reflexão do sinal transmitido, acarretando uma diminuição da potência do sinal original e criando múltiplos caminhos. A topologia também exerce influência nos múltiplos caminhos, pois a junção de ramos de uma mesma rede também causa a reflexão do sinal. O problema dos múltiplos caminhos é significativo nas redes através da fiação elétrica e é exemplificado na Figura 4.2.

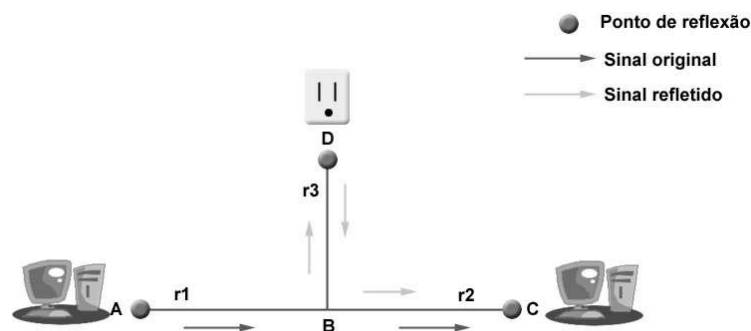


Figura 4.2: Exemplo de múltiplos caminhos.

Para simplificar, considere que as impedâncias do ponto A estão casadas com as do ponto C. O ponto D representa uma ponta não terminada do ramo  $r_3$ . Suponha que um transmissor no ponto A da rede enviar informações ao receptor no ponto C. Neste caso, quando o sinal original chegar em B, uma parte dele seguirá o caminho direto (ABC), pelo ramo  $r_2$ , e outra parte será refletida e seguirá pelo ramo  $r_3$ . O sinal secundário, isto é, que tomou um caminho alternativo, será totalmente refletido no ponto D, e logo em seguida será refletido novamente em B. Resumindo, no final haverá infinitos caminhos alternativos (ABDBC, ABDBDBC etc.), e o sinal resultante recebido em C será um somatório de todos os múltiplos caminhos, sendo que os sinais que percorrem outros caminhos, diferentes do caminho direto, chegam defasados e com diferentes níveis de potência. Portanto, estes sinais são considerados como interferências. A proporção do sinal que será refletida é definida pelo índice de reflexão, que está relacionado com as impedâncias da rede.

Além da vantagem de se aproveitar uma infra-estrutura já existente, outra importante vantagem das redes domiciliares através da fiação elétrica é a ubiquidade, ou seja, a existência de inúmeras tomadas espalhadas por toda a casa, permitindo

o acesso à rede de todos os cômodos da casa e por todos os aparelhos sem a necessidade de adicionar novos fios. Além disso, por ser uma rede amplamente distribuída, pode-se alcançar lugares isolados como pequenas comunidades, assim como áreas carentes. Com a tecnologia atual já é possível transmitir tráfego de dados e multimídia à taxa de 14 Mbps e futuramente será possível alcançar 190 Mbps. Outra vantagem das redes através da fiação elétrica é o fato de não ser necessária a conversão do sinal para RF (Rádio-Frequência), o que diminui o custo do equipamento.

## 4.1 O Padrão HomePlug 1.0

Atualmente, existem diversas tecnologias para redes domiciliares de energia elétrica. Contudo, a grande parte destas tecnologias são proprietárias e não proporcionam uma interoperabilidade, isto é, dispositivos de diferentes tecnologias não conseguem se comunicar. Em março de 2000 foi formada uma aliança com diversas empresas com o objetivo de criar um novo padrão para as redes domiciliares através da fiação elétrica. Este padrão foi denominado HomePlug 1.0. A norma HomePlug especifica a subcamada de acesso ao meio e a camada física para redes de baixa tensão.

### 4.1.1 A Subcamada de Acesso ao Meio

O HomePlug 1.0 utiliza o método de acesso múltiplo CSMA/CA. Embora o método de acesso CSMA/CD seja muito utilizado nas redes IEEE 802.3, ele não é empregado nas redes de energia elétrica devido principalmente à atenuação e ao ruído [20, 21]. Ambos podem gerar variações na potência do sinal recebido e com isso a detecção de colisão através da diferença de potência entre os sinais transmitido e recebido não pode ser garantida.

De modo a dar suporte a qualidade de serviço, o padrão utiliza quatro níveis de prioridade no acesso ao meio, atribuídos em função do tipo de tráfego, de acordo com a norma IEEE 802.1D [22]. As prioridades estão associadas às classes CA0 a CA3, sendo a classe CA3 a de maior prioridade. A classe CA3 é usada para as prioridades 6 e 7 de rótulo de VLAN (controle da rede e tráfego extremamente sensível ao tempo, como a voz) e a CA2 está associada às prioridades 4 e 5 (tráfego sensível ao tempo, como áudio e vídeo, e aplicações de negócios sujeitas a controle de admissão). A classe padrão é a classe CA1 que é usada para um “esforço excelente” (melhor esforço de mais alta qualidade) e a CA0 está associada a tráfego de redes locais e tráfego de fundo [20].

A lógica de transmissão de um quadro de dados no HomePlug é apresentada na Figura 4.3.

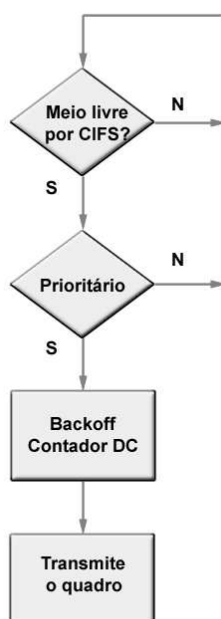


Figura 4.3: Lógica de acesso ao meio no HomePlug.

Uma estação que deseja transmitir um quadro de dados deve primeiramente “escutar” o meio. Para determinar se o meio está ocupado, as estações usam tanto a detecção física quanto a detecção virtual de portadora. A camada física sinaliza à subcamada MAC ao detectar preâmbulos ou intervalos de tempo usados para determinação de prioridade. Além disso, a subcamada MAC utiliza uma detecção virtual de portadora a partir de informações referentes ao tempo de ocupação do canal pela transmissão atual. Assim como no IEEE 802.11, o HomePlug utiliza diferentes intervalos de tempo de modo a dar prioridade a determinados tipos de quadros. Caso o meio permaneça livre por um determinado intervalo de tempo CIFS (*Contention Distributed Interframe Space*), cujo valor é  $35,84 \mu s$ , a estação entra na fase de determinação de prioridade. Caso contrário, a estação aguarda a oportunidade do meio ficar livre durante CIFS. São utilizados dois intervalos de tempo para determinação de prioridade (*Priority Resolution - PR*), a fim de permitir que apenas as estações com fluxos de maior prioridade disputem o meio no período de contenção (Figura 4.4). Cada um dos intervalos de tempo (PR0 e PR1) tem a mesma duração do intervalo CIFS,  $35,84 \mu s$ .

A sinalização da classe de prioridade é feita quadro a quadro através de sinais chamados PRSs (*Priority Resolution Signal*), enviados nos períodos PR0 e PR1. Os sinais de determinação de prioridade usam uma modulação *on-off*, na qual o número de cada classe representa o sinal a ser transmitido em binário [23]. Por

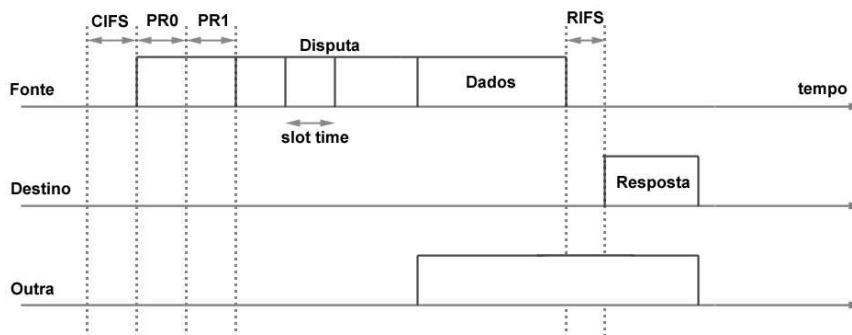


Figura 4.4: Transmissão de um quadro de dados com sua respectiva resposta no HomePlug.

exemplo, para enviar um quadro de classe CA2, uma estação envia um bit 1 em PR0 e não envia nada em PR1 (bit 0 em PR1), ou seja sinaliza 10 (2 em binário). Ao escutar o bit 1 em PR0, todas as estações com quadros de classes inferiores a CA2 adiam suas transmissões, voltando a esperar o meio ficar livre por CIFS. Por outro lado, uma estação de classe CA3 sinaliza em PR0 e em PR1, indicando assim, a sua maior prioridade. Além disso, é dada prioridade à transmissão de segmentos de um mesmo quadro em relação a outros quadros de mesma ou menor prioridade.

No período de disputa, a estação escolhe um número aleatório uniformemente distribuído entre zero e o tamanho da janela de contenção (*Contention Window - CW*) e cria um contador de *backoff*. De forma similar ao padrão IEEE 802.11, o valor da janela de contenção depende do número de vezes que a função de *backoff* é chamada para o quadro a ser transmitido. Para as classes CA3 e CA2, os valores da janela de contenção são 7, 15, 15 e 31, para zero, uma, duas e mais do que duas chamadas da função de *backoff*, respectivamente. Para as classes CA1 e CA0, os valores são 7, 15, 31 e 63. Enquanto o meio estiver livre nos períodos de disputa de mesma prioridade, o contador de *backoff* é decrementado periodicamente a cada intervalo de tempo ( $35,84 \mu s$ ) e quando o contador chega a zero, a estação transmite o quadro. Além disso, um contador de adiamento (*Deferral Counter - DC*) é criado para evitar colisões. Esse contador DC também depende do número de vezes que a função de *backoff* é chamada para o quadro a ser transmitido. Os valores de DC são 0, 1, 3 e 15 para 0, 1, 2 e mais do que 2 chamadas da função de *backoff*, respectivamente. Cada vez que outra estação captura o meio para transmitir um quadro de mesma prioridade, o DC é decrementado. Se o DC alcançar zero, assume-se que há um grande número de estações querendo transmitir com a mesma prioridade, aumentando assim a probabilidade de colisão.

Por isso, a estação chama novamente a função de *backoff*. O uso do contador de adiamento pode ter um efeito melhor do que deixar a colisão acontecer, o temporizador criado no transmissor estourar e só depois escolher um novo valor para a janela de contenção.

Através do mecanismo de detecção virtual, uma outra estação (Figura 4.4) obtém a informação de quando a transmissão irá terminar e se uma resposta é esperada. Com essas informações, os ouvintes adiam suas transmissões pelo período necessário para o envio do quadro e de sua resposta. Em relação à resposta, é utilizada uma solicitação de repetição automática (*Automatic Repeat reQuest* - ARQ) do tipo pára-e-espera. Caso uma resposta seja esperada e o quadro tenha sido corretamente entregue, a estação receptora envia um ACK se o meio estiver livre por um tempo denominado espaço de resposta entre quadros (*Response Distributed Interframe Space* - RIFS). Como RIFS é o menor dos espaços entre quadros (26,0  $\mu$ s), isso garante uma prioridade no envio das respostas em relação ao envio de dados. Além do ACK, existem dois outros quadros de resposta: NACK e FAIL, também enviados após RIFS. O NACK está associado a uma entrega mal sucedida e o FAIL indica que o receptor não pôde armazenar o quadro, seja porque não há *buffer* para a remontagem do quadro completo ou porque o quadro foi recebido fora de ordem. Somente quadros de alta prioridade podem ser enviados pela estação transmissora à estação que respondeu com um quadro FAIL. Se o quadro associado à resposta FAIL não for o primeiro, então toda a tentativa de envio do quadro completo é abortada e a estação transmissora recomeça. A estação tenta transmitir o quadro até que o limite de retransmissões seja ultrapassado ou o tempo máximo de transmissão seja excedido. Caso o quadro recebido pela estação transmissora seja um NACK ou caso a estação transmissora não receba um quadro de reconhecimento dentro de um determinado tempo, deduzindo que houve uma colisão, a estação transmissora escalonará uma retransmissão e entrará no processo de *backoff*. Se o número máximo de tentativas é alcançado, a estação passa para o modo de transmissão mais robusto e novas tentativas são realizadas. Caso, ainda assim, não haja sucesso na transmissão, então o quadro é descartado e uma falha é reportada para a subcamada superior. Opcionalmente ACKs parciais estão disponíveis para quadros em *multicast* e em difusão. Nesse caso, a estação transmissora pode saber que pelo menos uma estação recebeu o quadro corretamente.

Segmentação e remontagem são utilizadas para aumentar a justiça e diminuir o erro na transmissão dos dados. A segmentação é realizada em função do tamanho do quadro e da taxa de transmissão, uma vez que a carga útil não pode ultrapassar 160 símbolos. Todos os segmentos de um quadro são enviados em rajada, sem a necessidade da disputa pelo meio para a transmissão de cada segmento. No entanto, estações com fluxos de maior prioridade podem acessar o canal entre os segmentos de uma rajada, pois após o envio de um segmento e de sua resposta, é

aberto um novo período de determinação de prioridade.

Uma das características das redes através da fiação elétrica é o compartilhamento do meio entre todas as residências servidas pelo transformador, sendo possível escutar transmissões alheias. Ao invés de usar filtros passa-baixa que aumentam o custo, o HomePlug utiliza o padrão de criptografia DES (*Data Encryption Standard*) de 56 bits. Redes lógicas são formadas por estações que compartilham uma mesma chave de encriptação de rede. As estações armazenam uma chave padrão utilizada para obtenção de novas chaves e as chaves de encriptação de rede, pois uma estação pode fazer parte de mais de uma rede lógica. Somente os quadros de gerenciamento da subcamada MAC são enviados sem criptografia para poderem ser recebidos por todas as estações.

### 4.1.2 A Camada Física

As características da rede elétrica tornam a tarefa de utilizá-la para comunicação de dados muito difícil. Para vencer as dificuldades encontradas nesse canal extremamente hostil, o padrão HomePlug 1.0 [20, 23] possui uma camada física robusta, que combina várias técnicas de modulação, processamento de sinais e correção de erros. Todas essas técnicas devem ser utilizadas em conjunto, para alcançar o desempenho desejado. Ainda assim, não é possível determinar com precisão um alcance máximo para a rede, pois este valor está diretamente relacionado às características do meio físico. Desta forma, o alcance de uma rede HomePlug pode variar de acordo com os horários do dia e dias da semana. Usualmente, os valores típicos estão entre 200 e 300 m.

Foi adotado um esquema de modulação utilizando o OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) como a técnica básica de transmissão. O OFDM possui características como alta eficiência espectral e maior imunidade a ruídos e interferências, além de ser bem conhecido na literatura e na indústria, já sendo utilizado em outras tecnologias, como no DSL [24] e nos padrões de redes locais sem fio IEEE 802.11a [25] e 802.11g [26]. Seu funcionamento consiste em dividir o espectro total disponível em diversas sub-bandas. Em técnicas convencionais de FDM, o espaçamento entre canais deve incluir uma faixa de guarda suficientemente grande para evitar a interferência entre canais. Com isso, perde-se uma faixa espectral que é inutilizada. No OFDM, as subportadoras chegam a se sobrepor, com uma utilização espectral bem mais enxuta. Para isso são escolhidas subportadoras ortogonais, ou seja, que mantêm uma certa relação matemática de modo que não haja interferência entre elas. Como elas possuem um espectro do formato  $[\frac{\text{sen}(x)}{x}]$ , colocam-se as subportadoras de modo que elas estejam centradas nos zeros das subportadoras adjacentes, conforme se pode ver na Figura 4.5.

Além disso, é obtida uma maior imunidade a ruídos e interferências que provém do fato de que essas subportadoras são independentes. Assim, se há

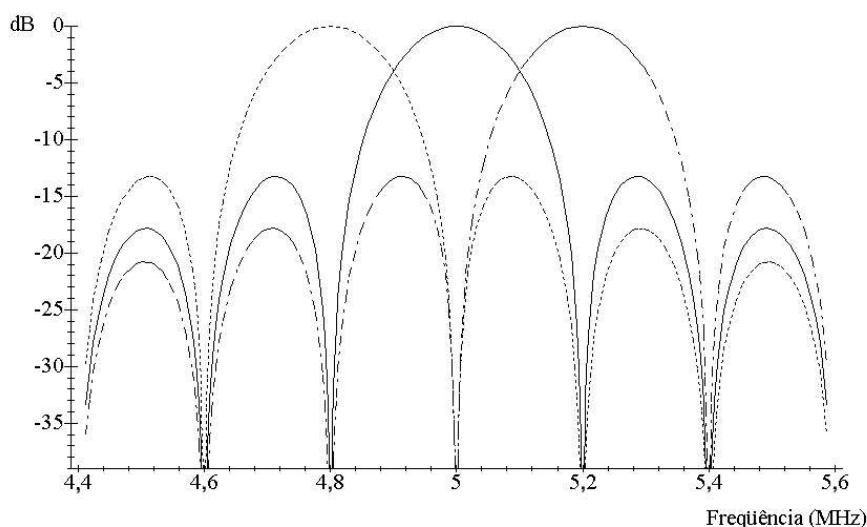


Figura 4.5: Exemplo da densidade espectral de potência de três subportadoras OFDM em 4,8, 5,0 e 5,2 MHz.

uma interferência em uma ou mais de suas subportadoras, essas são descartadas e passa-se a utilizar somente as subportadoras restantes para a transmissão dos dados. Todos os nós ativos em uma rede HomePlug fazem uma estimativa do canal, pelo menos uma vez a cada 5 segundos, para cada nó destino a fim de detectar as condições do canal para aquele nó. Com isto, avaliam-se quais subportadoras estão sujeitas ou não a ruídos e interferências que impossibilitem o seu uso. Essas subportadoras são então descartadas, utilizando-se apenas as subportadoras restantes. Devido ao problema da propagação através de múltiplos caminhos, um símbolo e suas respectivas reflexões podem chegar ao receptor defasados no tempo. Com isso, pode haver interferência entre símbolos. Assim, utiliza-se a técnica de prefixo cíclico (*cyclic prefix*), que consiste na replicação dos últimos microssegundos do símbolo OFDM precedendo o próprio símbolo, de modo a diminuir a interferência entre símbolos ocasionada por esse atraso variável. O uso do prefixo cíclico minimiza os efeitos da interferência entre símbolos, pois a reflexão de um símbolo afeta somente o início do símbolo seguinte que corresponde ao prefixo cíclico. Desta forma, tenta-se evitar que a parte útil do símbolo sofra interferência. Na recepção, essa parte replicada é simplesmente descartada. Com um tempo de prefixo cíclico suficientemente grande em relação ao maior atraso do canal, consegue-se praticamente eliminar a interferência entre símbolos.

Para a modulação das subportadoras, podem ser utilizadas três técnicas dife-

rentes de modulação em fase: o chaveamento binário por deslocamento de fase (BPSK - *Binary Phase Shift Keying*), o BPSK diferencial (DBPSK) e o PSK diferencial em quadratura (DQPSK - *Differential Quadrature Phase Shift Keying*). As duas primeiras têm uma eficiência de 1 bit por símbolo por portadora, enquanto o DQPSK transmite 2 bits por símbolo por portadora, mas é menos imune a ruídos que as outras, necessitando de melhores condições do canal.

O padrão HomePlug 1.0 utiliza uma faixa espectral que vai aproximadamente de 4,49 a 20,7 MHz. O OFDM divide a banda de 0 a 25 MHz em 128 subportadoras igualmente espaçadas, das quais são utilizadas apenas 84. Além disso, outras 8 subportadoras são desabilitadas para evitar interferência com as frequências de rádio-amadores de 17, 20, 30 e 40 metros, deixando então 76 subportadoras para serem utilizadas. A densidade espectral de potência é de -50 dBm/Hz. Este valor atende às regulamentações para dispositivos de RF dos Estados Unidos, contidas nas regras do FCC parte 15. Essa potência é bem inferior à utilizada em tecnologias sem fio.

A modulação OFDM é feita com uma transformada rápida inversa de Fourier (IFFT - *Inverse Fast Fourier Transform*), compondo símbolos de 256 amostras, das quais as 172 últimas são repetidas para formar o prefixo cíclico. Isso é equivalente a um símbolo de duração 5,12  $\mu$ s, mais 3,28  $\mu$ s para o prefixo cíclico, resultando em um símbolo de duração 8,4  $\mu$ s.

A carga útil do quadro do HomePlug consiste de um número de blocos de 20 ou 40 símbolos OFDM, utilizando embaralhamento, códigos de erro convolucional e *Reed-Solomon* concatenados. A divisão em blocos deste tamanho é feita para se combater o ruído impulsivo, que pode danificar uma seqüência de símbolos, principalmente quando se utiliza modulação diferencial, onde pelo menos dois símbolos são perdidos por vez. No embaralhamento, os bits de dados passam por um ou-exclusivo com o seguinte polinômio

$$P(x) = x^7 + x^4 + 1 \quad . \quad (4.1)$$

No codificador convolucional, utiliza-se um comprimento 7 e taxas de código de  $\frac{1}{2}$  ou  $\frac{3}{4}$ , ou seja, isso significa dizer que da quantidade total de bits que está sendo enviada, somente  $\frac{1}{2}$  ou  $\frac{3}{4}$  são bits de dados realmente, sendo o restante um *overhead* adicionado pelo código corretor de erro. Já o código *Reed-Solomon*, que é usado em seguida, utiliza taxas que variam de  $\frac{23}{39}$  a  $\frac{238}{254}$ .

Considerando todas essas opções para os parâmetros de transmissão, a camada física do HomePlug pode oferecer até 139 combinações diferentes de taxas, variando de 1 até 14 Mbps. A taxa máxima de 14 Mbps é obtida através do uso de todas as 84 subportadoras com modulação DQPSK (2 bits por símbolo por portadora) e de eficiência de códigos Reed-Solomon de  $\frac{238}{254}$  e convolucional de  $\frac{3}{4}$ . Contudo, essa é a taxa oferecida pela camada física à camada de enlace, somente para a transmissão da carga útil, não sendo a taxa efetiva real de dados

úteis transmitidos. Ao levar-se em consideração os cabeçalhos, os espaçamentos entre quadros e o tempo de *backoff*, a vazão máxima cai para 8 Mbps quando são utilizados quadros de 1500 octetos [27].

Além desses modos de transmissão, há um modo de transmissão especial, chamado modo ROBO (*ROBust OFDM*). Esse é um modo mais robusto, com maior redundância para suportar condições de muito ruído. Ele é utilizado nos seguintes casos:

- quando duas estações querem iniciar uma comunicação, mas ainda não foi feita uma estimativa do canal e elas não sabem que parâmetros de transmissão utilizar;
- quando a transmissão com os parâmetros estimados falha;
- para transmissão em difusão e *multicast*, onde não se pode determinar parâmetros ideais para todas as estações da rede;
- quando há mais de 16 dispositivos na rede. A especificação do HomePlug suporta até 16 dispositivos na sua taxa de transmissão normal. Caso sejam conectados à rede mais de 16 dispositivos, todos mudam automaticamente para o modo ROBO.

O modo ROBO utiliza a modulação DBPSK com um nível de redundância que reduz a sua taxa de símbolos para  $\frac{1}{4}$  bit por símbolo por portadora. Ele também utiliza um código *Reed-Solomon* com taxas de código diferentes, que variam de  $\frac{31}{39}$  a  $\frac{43}{51}$ , o que reduz a sua taxa de transmissão máxima para 0,9 Mbps.

Existem dois tipos de quadros no HomePlug 1.0. O quadro que carrega os dados é chamado de quadro longo, enquanto o quadro curto é utilizado para o envio do reconhecimento dos quadros de dados. Um quadro longo é composto por um delimitador de início de quadro, seguido da carga útil (*payload*), de um espaço de 1,5  $\mu$ s denominado EFG (*End-of-Frame Gap*), que é utilizado para processamento, e de um delimitador de fim de quadro. O quadro curto compreende apenas um delimitador de resposta, para fazer o reconhecimento da chegada dos quadros. O formato dos quadros pode ser visto na Figura 4.6.

Os delimitadores e sinais de determinação de prioridade devem ser recebidos corretamente por todas as estações, por isso eles são enviados utilizando todas as subportadoras, com a mesma modulação e mesma codificação, independente de quem está enviando ou recebendo os dados. Já a carga útil é adaptada às condições do canal, utilizando os parâmetros determinados na estimativa do canal. Mapas de tons são usados pelos transmissores e receptores para se adaptarem às condições do canal, indicando as subportadoras, a modulação e a taxa de códigos a serem utilizadas após a fase de adaptação do canal.

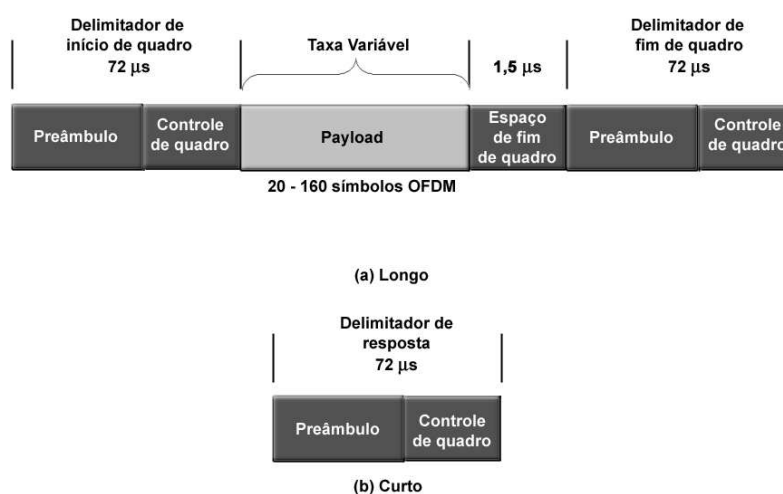


Figura 4.6: Formato dos quadros do HomePlug 1.0.

O preâmbulo é formado por 7,5 símbolos OFDM especiais, sem o prefixo cíclico, com uma duração de  $38,4 \mu\text{s}$ . Ele é utilizado para sincronismo, controle automático de ganho e detecção física de portadora.

O campo controle de quadro (FC - *Frame Control*) possui 25 bits, codificados em quatro símbolos OFDM. Esse campo utiliza um código corretor de erro especialmente projetado, além de um entrelaçamento diferente de bits e modulação BPSK, com uma duração de  $33,6 \mu\text{s}$ . O campo controle de quadro é constituído por um bit para controle de disputa, 3 bits do tipo do delimitador, 13 bits do campo variante e 8 bits de seqüência de verificação. Durante uma rajada de quadros, o bit controle de disputa é igual a 1 até o último segmento. O campo tipo de delimitador indica se o delimitador é de início de quadro, de fim de quadro ou de resposta. Além disso, este campo nos delimitadores de início e fim de quadro indica se uma resposta é esperada. A seqüência de verificação é um CRC (*Cyclic Redundant Check*) calculado sobre os outros 17 bits. A função do campo variante depende do tipo do delimitador. Para o delimitador de início de quadro são usados 8 bits de comprimento de quadro e 5 bits de índice de mapa de tons. Para o delimitador de fim de quadro são usados dois bits de prioridade de acesso ao canal para o quadro, úteis durante transmissões em rajada. No caso do ACK, existem dois bits que repetem a prioridade do quadro para o qual a resposta foi gerada. Os outros bits são os 11 bits menos significativos do campo seqüência de verificação do quadro reconhecido. Para o NACK, existem os dois bits de prioridade, um bit zero (indica o tipo de resposta NACK) e 10 bits de seqüência de verificação. Para o FAIL, a única diferença é no terceiro bit que tem valor um para indicar uma resposta do tipo FAIL.

As unidades de dados de serviço da subcamada MAC (MSDUs) incluem os campos endereço de destino, endereço de origem, rótulo de VLAN, tipo ou comprimento e dados, todos idênticos aos campos do quadro da subcamada MAC do padrão IEEE 802.1Q (Ethernet com suporte a VLANs) [28]. O campo controle de encriptação é enviado em texto claro, porém os campos restantes são encriptados com a chave de encriptação de rede. Os campos controle de encriptação, enchimento de encriptação e valor de verificação de integridade são obrigatórios. O campo controle de encriptação contém um octeto de seleção de chave de encriptação e oito octetos de um vetor de inicialização usado pelo algoritmo de encriptação. O campo enchimento de encriptação adiciona de 0 a 7 zeros a fim de tornar a parte encriptada do corpo do quadro um múltiplo de 8 bits que é o tamanho de bloco utilizado pelo algoritmo de encriptação. Um CRC de 32 bits é calculado sobre os bits entre o campo rótulo de VLAN e o campo enchimento de encriptação. Com isso, o receptor pode confirmar a correta recepção e decriptação do quadro completo. Os campos enchimento de encriptação e valor de verificação de integridade são necessários mesmo sem o uso de encriptação. O rótulo de VLAN, o tipo/comprimento de carga útil (*payload*) são informações vindas da camada superior. A informação de gerenciamento da subcamada MAC é opcional. Caso seja necessário utilizar segmentação, cada segmento é colocado no campo corpo de quadro de um quadro longo (Figura 4.7).

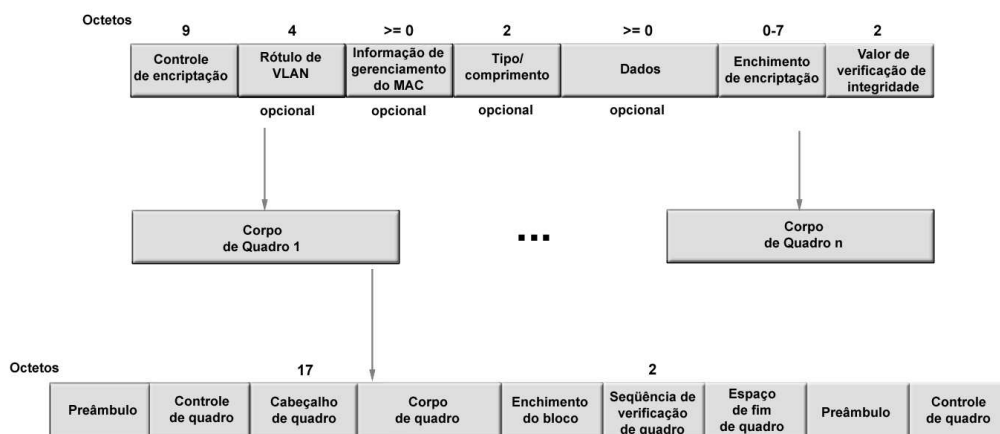


Figura 4.7: Formato do quadro longo do HomePlug 1.0.

Além do delimitador de início de quadro, o quadro longo (Figura 4.7) é formado, ainda, pelo cabeçalho, pelos dados, pelo enchimento de bloco, pela seqüência de verificação de quadro, pelo espaço de fim de quadro e pelo delimitador de fim de quadro.

O cabeçalho do quadro contém um controle de segmento e os endereços de

destino e de origem de 48 bits do formato IEEE 802.1Q. O controle de segmento consiste em 3 bits de controle de versão, 2 bits reservados, um flag de *multicast* usado para sinalizar o envio de quadros em *multicast* ou em difusão, 2 bits de prioridade de acesso ao canal, 15 bits de comprimento de segmento (em octetos, sem incluir o enchimento de encriptação e o valor de verificação de integridade), 1 bit de indicação de último segmento, 6 bits de contagem de segmento e 10 bits de número de seqüência. Os campos contagem de segmento e número de seqüência são utilizados para segmentação e remontagem. O número de seqüência é o mesmo para todos os segmentos do mesmo quadro e a contagem de segmento indica um segmento dentro do quadro. Cada origem mantém um número de seqüência por classe de prioridade.

O enchimento de bloco preenche o bloco físico de transmissão com zeros para formar 20 a 160 símbolos, sendo somente utilizado no último segmento de um quadro. O campo seqüência de verificação de quadro contém um CRC de 16 bits calculado do cabeçalho de quadro até o enchimento de bloco.



# Capítulo 5

## O Acesso à Internet

A infra-estrutura de telefonia e da rede elétrica pode ser utilizada também para prover acesso à Internet. No caso específico da rede telefônica, a utilização como forma de acesso à Internet se estabeleceu antes do crescimento das redes domiciliares. Este processo se iniciou com a utilização de modems com baixa taxa de transmissão e se intensificou na década de 80 com o desenvolvimento da chamada Rede Digital de Serviços Integrados. Com o desenvolvimento da tecnologia DSL (*Digital Subscriber Line*) é possível, atualmente, o acesso 24 horas por dia a altas taxas. O uso da tecnologia PLC para rede de acesso já é mais recente, e vem ganhando bastante espaço, se mostrando como uma boa alternativa em lugares onde não haja outras tecnologias, e a um baixo custo. Com as tecnologias atuais em PLC, podem ser obtidas taxas desde alguns Mbps até dezenas de Mbps, podendo chegar em breve a ordem das centenas de Mbps.

### 5.1 A tecnologia DSL

A tecnologia DSL permite o acesso à Internet através do par de fios metálicos utilizados para telefonia a taxas relativamente altas se comparadas às taxas de acesso alcançadas através de modems na banda de voz. Enquanto os padrões de comunicação por modems na banda de voz mais modernos permitem taxas de até 56 kbps, a tecnologia DSL pode alcançar dezenas de Megabits por segundo. Esta diferença se deve principalmente à banda utilizada. Os modems em banda de voz utilizam a faixa de frequências entre 20 e 3400 Hz, enquanto que a tecnologia DSL pode utilizar bandas com largura de alguns Megahertz.

A utilização de frequências mais altas, no entanto, agrava os dois principais problemas da utilização da rede de telefonia para a transmissão de dados: a diafonia e a atenuação dos sinais com a distância. A diafonia é causada pelo acoplamento eletromagnético entre os diferentes pares de fios metálicos acondicionados

no mesmo cabo. O trançado utilizado nos pares metálicos é capaz de manter a diafonia a níveis baixos na banda de voz, mas à medida que a frequência utilizada aumenta, a eficácia do trançado utilizado diminui. A atenuação dos sinais é um sério problema pois, diferentemente do caso das redes domiciliares onde as distâncias a serem transpostas são curtas, os sinais DSL devem atravessar todo o *loop* do assinante, que pode chegar a alguns quilômetros.

No início da década de 90, foi desenvolvida a técnica *High-bit-rate Digital Subscriber Line*, ou HDSL. O principal objetivo desta tecnologia era a substituição dos serviços de canais T1 e E1 utilizados na época, que devido, principalmente, à largura de banda da modulação utilizada necessitavam da instalação de repetidores ao longo da linha, aumentando, desta forma, o custo de instalação do serviço. O HDSL utiliza o mesmo código de linha adotado na Rede Digital de Serviços Integrados de Taxa Básica [29] em uma banda de aproximadamente 370 kHz. Desta forma, o HDSL possibilita, então, a transmissão dos 1544 kbps equivalentes a um canal T1 dividindo o serviço em dois pares metálicos (quatro fios), cada par transmitindo a 784 kbps. Assim, é possível oferecer o serviço equivalente a um canal T1 sem a utilização de repetidores em *loops* de até 3,6 km.

Com a melhoria dos transceptores empregados e o avanço das técnicas de modulação, foi possível implementar sistemas DSL equivalentes a canais T1 em apenas um par metálico. No entanto, durante muito tempo a evolução destes sistemas se baseou em técnicas que utilizavam a transmissão em banda básica, ou seja, incluindo a frequência de 0 Hz. Estes sistemas utilizam, portanto, a banda utilizada na transmissão de voz pelo sistema telefônico tradicional e impedem a utilização simultânea do serviço de telefonia com a transmissão de dados. Visando o uso residencial, onde a utilização contínua do serviço telefônico é importante, foram desenvolvidos serviços DSL capazes de coexistir com a telefonia. Para isto, estes sistemas são multiplexados em frequência com o sistema telefônico tradicional, evitando interferências. Outra característica levada em conta pelos sistemas DSL mais modernos é a assimetria do canal utilizado. Devido ao maior número de pares metálicos agrupados na área próxima às centrais telefônicas, o efeito da diafonia é mais forte no sentido assinante-central, *upstream*, do que no sentido central-assinante, *downstream*. Com isto, um sinal enviado no sentido central-assinante pode ser corretamente recebido a distâncias maiores do que se ele fosse enviado no sentido oposto.

Desta forma, foram desenvolvidos serviços DSL chamados de *Asymmetric DSL*, ou ADSL, que transmitem dados a taxas mais altas no sentido central-assinante. Na prática, além de se adequar às características do canal utilizado, este modelo de comunicação assimétrico reflete o comportamento da maior parte dos usuários e aplicações, como o http, por exemplo.

A codificação DMT foi a primeira a suportar transmissões a 6 Mbps e, por este motivo, foi selecionada para o padrão oficial ADSL, chamado G.dmt, apro-

vado pela ITU e pela ANSI, que tinha como objetivo a utilização de serviços envolvendo vídeo. Para aplicações de vídeo é necessária, em geral, a utilização de uma taxa constante de dados, no entanto, para aplicações de transmissão de dados variações na taxa são facilmente toleráveis. Baseado nesta característica da transmissão de dados, foi desenvolvido o *Rate Adaptive DSL*, ou RADSL. A variação na taxa de transmissão possível com o RADSL pode ser utilizada para compensar diferenças entre *loops* de assinantes. Assim, linhas maiores ou com maior interferência podem utilizar o serviço a menores taxas.

Embora os canais *upstream* e *downstream* dos sistemas ADSL e RADSL sejam multiplexados em frequência com os sinais telefônicos tradicionais, os sinais DSL ainda podem causar interferência nas frequências mais altas utilizadas na comunicação telefônica. Por este motivo, a implantação destes sistemas exige a utilização de dispositivos conhecidos como *splitters*, capazes de filtrar os sinais DSL que podem interferir com a comunicação telefônica. A instalação do *splitter* requer a presença de profissionais treinados, pois é necessário um roteamento da fiação telefônica na residência, elevando o custo de implantação do sistema. Assim, foi desenvolvida uma variação de baixo custo do ADSL que possibilita a instalação pelo próprio usuário por dispensar a utilização de *splitters*. O padrão G.dmt possui as duas implementações, uma usando *splitters* e outra sem. Uma nova variação do ADSL chamada G.lite não utiliza *splitters*, só necessitando de filtros mais simples chamados microfiltros. A solução adotada neste sistema para a interferência causada pelo sinal DSL é limitar a potência utilizada no canal *upstream* quando algum aparelho telefônico é utilizado. Nos momentos em que nenhum aparelho telefônico está em uso, a potência utilizada é elevada.

Na central telefônica, é necessário o uso de um *splitter* que separa o serviço de telefonia da transmissão de dados. A voz é filtrada e passada para um equipamento comutador de voz enquanto que o sinal acima de 25 kHz é roteado para um dispositivo chamado DSLAM (*Digital Subscriber Line Access Multiplexer*). Esse dispositivo converte o sinal digital no formato de saída do modem ADSL em uma cadeia de bits que vai para o provedor de serviço de Internet.

O sistema DSL mais moderno é o *Very High Speed DSL*, ou VDSL, que utiliza uma banda passante de alguns Megahertz para alcançar taxas de transmissão de dezenas de Megabits por segundo. A utilização de uma banda maior por este sistema limita sensivelmente seu alcance e pode causar interferência com serviços como o HomePNA.

A Tabela 5.1 sumariza as principais características dos sistemas DSL [30] discutidos nesta seção.

Tabela 5.1: Principais características dos sistemas DSL.

<b>Acrônimo</b>	<b>Padrões</b>	<b>Taxa</b>	<b>Banda</b>
HDSL	ITU G.991.1 ETSI TS 101 135 ANSI T1.TR.28	1,544 Mbps simétrico	0-370 kHz
ADSL	ANSI T1.413 ITU G.992.1	até ~1 Mbps <i>up</i> , até ~8 Mbps <i>down</i>	25-138 kHz <i>up</i> , 25-1104 kHz <i>down</i>
RADSL	ANSI T1.TR.59	até ~1 Mbps <i>up</i> , até ~8 Mbps <i>down</i>	25-138 kHz <i>up</i> , 25-1104 kHz <i>down</i>
G.lite	ANSI T1.419 ITU G.992.2	até ~1 Mbps <i>up</i> , até ~1,5 Mbps <i>down</i>	25-138 kHz <i>up</i> , 25-552 kHz <i>down</i>
VDSL	ANSI <i>trial-use</i> <i>standard</i> T1.424 ITU G.vdsl ETSI TS 101 270	até ~13 Mbps <i>up</i> , até ~22 Mbps <i>down</i>	25 kHz-12 MHz

## 5.2 PLC como Rede de Acesso

Foi visto que é viável a utilização da rede elétrica como meio para se criar redes domiciliares de computadores. No entanto, a utilidade das técnicas de PLC não está limitada somente ao interior da casa. Pode-se empregar essas mesmas técnicas utilizadas para fazer uma extensão desta rede, conectando a casa ao transformador da vizinhança. A partir daí, pode-se conectar todas as casas ligadas a um mesmo transformador, e a partir desse transformador, fornecer a elas o acesso a uma rede externa.

Com a grande demanda atual pelo acesso à Internet em alta velocidade, essa se torna uma alternativa atraente para a solução da última milha. Como praticamente toda casa possui ligação com a rede elétrica, a solução de PLC como rede de acesso pode chegar a regiões inalcançáveis por outras tecnologias.

Uma primeira alternativa para a criação de uma rede PLC de acesso é a expansão da rede domiciliar para fora de casa, utilizando a infra-estrutura das linhas de baixa tensão para conectá-la ao modem localizado no transformador de média para baixa tensão. Essa configuração pode ser vista na Figura 5.1.

Esse modem funciona como um *gateway* de acesso à Internet para todas as casas conectadas a ele. Como o acesso é compartilhado, a banda disponível pelo modem é dividida por todas as casas que estiverem utilizando a rede. Assim, nas redes onde o transformador esteja servindo muitas casas, pode haver uma degradação do desempenho devido ao grande número de pessoas que estiverem

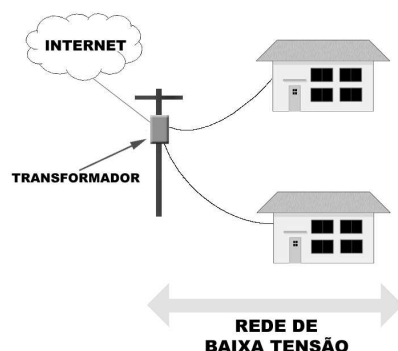


Figura 5.1: Rede PLC de acesso utilizando as linhas de baixa tensão.

utilizando este acesso.

Outro aspecto importante é a distância dos transformadores até as casas. Há lugares onde essas distâncias são pequenas, e não há grandes problemas. Mas conforme essa distância aumenta, faz-se necessário o uso de um modem repetidor, que irá regenerar o sinal e retransmiti-lo para que ele alcance uma cobertura adequada em todas as tomadas das casas. Distâncias típicas alcançadas por um modem estão entre 250 e 300 metros de distância do transformador.

Uma segunda alternativa para a criação da rede PLC de acesso é uma maior extensão dessa rede, utilizando também as linhas de média tensão para a transmissão de dados. As linhas de média tensão ligam a subestação aos transformadores da rua e utilizam valores de tensões entre 1 e 69 kV (como exemplo típico, 13,8 kV). Neste caso, os modems localizados nos transformadores também seriam ligados às linhas de média tensão, conectando então os diversos modems à subestação, conforme a Figura 5.2. O *backbone* estaria ligado na subestação, de onde o acesso seria distribuído para todos os seus transformadores através das linhas de média tensão, para que esses transformadores o distribuam para as casas. Com isso, consegue-se uma redução maior de custos, já que a subestação será a porta de acesso para todos os modems, não necessitando mais de uma conexão à Internet individual para cada um deles. Porém, neste caso há um maior grau de compartilhamento do acesso se comparado à solução que somente utiliza a rede de baixa tensão. Isso poderia causar uma maior degradação do desempenho da rede, caso o ponto de acesso não possua uma vazão suficiente para atender a todas as casas.

As linhas de média tensão possuem características diferentes das linhas de baixa tensão. Elas possuem menos ruído e menos derivações, o que as torna um meio um pouco menos hostil para a transmissão de dados, possibilitando o alcance de distâncias maiores. Porém, um dos problemas na utilização das linhas de média tensão é a necessidade de se utilizar acopladores especiais, capacitivos ou

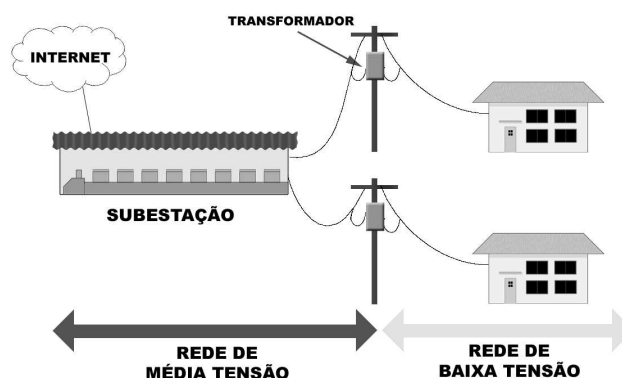


Figura 5.2: Rede PLC de acesso utilizando as linhas de média e baixa tensões.

indutivos, para injetar o sinal na linha, de forma que a alta voltagem não danifique os equipamentos de PLC.

### 5.2.1 Padrões e Produtos

A aliança HomePlug está investindo em um padrão de rede de acesso utilizando as linhas de energia. Esse padrão será compatível com o HomePlug 1.0 e com o HomePlug AV (Capítulo 6). Há também um grupo de pesquisa no ETSI [31] (*European Telecommunications Standards Institute*) que, juntamente com o PLC Forum [32], estão desenvolvendo um padrão de PLC, tanto para rede de acesso, como para redes domiciliares. Também há uma grande preocupação pela criação de normas regulatórias específicas para as potências de transmissão utilizadas, pois, pela irradiação espontânea, há a possibilidade de interferência nos serviços de rádio que utilizam também essa faixa de frequência, como os rádio-amadores.

Entre os fabricantes atualmente no mercado com soluções proprietárias, pode-se destacar a Ascom [33], que possui uma linha completa de produtos para rede de acesso PLC, e a DS2 [34], que é a fabricante do circuito integrado que implementa o HomePlug que é utilizado pelos produtos de muitas empresas desse ramo.

A tecnologia da Ascom utiliza as linhas de baixa tensão para chegar até as casas. Pode chegar a uma velocidade de 4,5 Mbps compartilhado entre as casas servidas por cada transformador. É uma tecnologia bem difundida, principalmente na Europa [35].

Um dispositivo chamado de mestre externo (*Outdoor Master - OM*), ligado ao transformador, faz a função da distribuição do acesso à Internet às casas. Esse dispositivo é servido de interfaces Ethernet/Fast Ethernet para a conexão ao *back-*

bone.

A principal característica dessa tecnologia é a divisão da rede em uma parte interna e outra externa. A rede interna corresponde à rede domiciliar, ou seja, o que faz parte da área privada, enquanto a rede externa cobre a área pública, indo do transformador até a entrada da residência. Também é feita uma divisão das faixas de frequências utilizadas em cada rede para isolar as duas redes. A rede externa usa a faixa de frequências mais baixa, de 1 a 13 MHz, ficando a rede interna com a faixa de 15 a 30 MHz. Como as distâncias apresentadas na rede interna são tipicamente menores que na rede externa, a faixa de frequências mais baixa foi escolhida para a rede externa por apresentar menor atenuação no meio. Assim, podem-se alcançar distâncias maiores na rede externa. Além disso, o ruído produzido pelos aparelhos elétricos na rede interna é geralmente menor em frequências mais altas, minimizando assim os efeitos de interferência.

As faixas de frequência, tanto da rede interna como da rede externa, são divididas em 3 portadoras que empregam a técnica de modulação GMSK (*Gaussian Minimum Shift Keying*) e um código corretor de erro convolucional. Com a mudança da taxa deste código é possível obter três taxas diferentes por portadora: 0,75, 1,1 e 1,5 Mbps, escolhidas dinamicamente de acordo com as condições do canal.

A subcamada de acesso ao meio é baseada em um esquema de acesso múltiplo por divisão de tempo (TDMA). Em cada portadora, o tempo é dividido em quadros, que são então divididos em *slots* de tempo. O dispositivo mestre é responsável por designar aos dispositivos escravos qual portadora eles irão utilizar, e em qual *slot* de tempo dentro de um quadro. Tem-se então uma taxa máxima de 4,5 Mbps que é dividida entre todos os dispositivos presentes em um mesmo segmento.

Como a rede elétrica é um meio compartilhado, para oferecer segurança a tecnologia suporta a criação de VLANs (*Virtual LANs*), seguindo o padrão IEEE 802.1Q [28], e o uso de criptografia, através do algoritmo RC4 (*Rivest's Cipher 4*), com um comprimento de chave de até 128 bits.

Já a tecnologia da empresa espanhola DS2 utiliza as linhas da rede de baixa tensão e opcionalmente também as de média tensão para prover o acesso à Internet às casas. Ela também consiste de um dispositivo localizado no transformador, que é chamado de *Head-end*, que irá se comunicar com os modems dos assinantes, chamados de CPEs (*Customer Premises Equipments*). Cada *Head-end* suporta até 254 CPEs [36].

Esses dispositivos podem chegar a 45 Mbps *full-duplex*, sendo 27 Mbps no sentido do *Head-end* para os CPEs (*downstream*) e 18 Mbps dos CPEs para o *Head-end* (*upstream*). Para chegar a essa velocidade, essa tecnologia utiliza o OFDM como esquema de modulação, permitindo assim uma maior eficiência espectral. As subportadoras são moduladas utilizando modulação QAM (*Quadra-*

ture Amplitude Modulation) [37]. Também são utilizadas algumas das técnicas utilizadas no HomePlug para se obter um melhor desempenho, como o prefixo cíclico, que diminui a interferência entre símbolos, e os códigos corretores de erro, convolucional e *Reed-Solomon*.

Essa tecnologia também provê qualidade de serviço, permitindo a alocação de recursos para garantir parâmetros como banda, atraso e variação do atraso. São oferecidos quatro níveis de prioridade, com um classificador de tráfego programável, que torna a arquitetura compatível com os modelos de qualidade de serviço fim-a-fim IntServ e DiffServ. Além disso, essa tecnologia oferece suporte a SNMP [38], para o gerenciamento da rede, e criptografia, para manter a privacidade dos dados e segurança da rede.

## Capítulo 6

### Considerações Finais

Hoje em dia, o uso das redes domiciliares é voltado principalmente para o compartilhamento de arquivos, periféricos e acesso à Internet. Porém, algumas empresas já prevêem que, no futuro, uma das principais utilizações dessas redes domiciliares será em aplicações como voz sobre IP e distribuição de TV de alta definição. Diante desse cenário, as tecnologias de redes domiciliares estão procurando apresentar altas taxas de transmissão e sendo aprimoradas em relação à oferta de qualidade de serviço. Tanto o HomePNA quanto o HomePlug desenvolveram ou estão desenvolvendo novas versões de seus padrões voltadas principalmente para o entretenimento.

A terceira geração do HomePNA foi publicada na especificação HomePNAv3. O HomePNAv3 foi desenvolvido visando, principalmente, suprir as necessidades de aplicações de entretenimento tais como transmissão de vídeo, voz e transmissão de dados a altas taxas. Para isso, o padrão HomePNAv3 dá grande ênfase à provisão de QoS e aumenta significativamente a taxa de transmissão e a vazão efetiva da rede. Sua alta taxa de transmissão associada ao provimento determinístico de qualidade de serviço tornam esta tecnologia uma boa opção de rede domiciliar para aplicativos de distribuição de vídeo e som de alta qualidade. A taxa de transmissão alcançada nesta versão é de 128 Mbps, com extensão opcional para até 240 Mbps. Este aumento na taxa de transmissão deve-se em grande parte ao aumento da banda utilizada de 6 MHz para 17 MHz. A nova máscara da PSD pode ser vista na Figura 6.1.

Esta nova máscara PSD deve ser compatível com dispositivos mais antigos e por este motivo transmite-se na banda de 4 a 10 MHz com potência suficiente para permitir a detecção de portadora por parte dos dispositivos mais antigos. Como pode ser visto na Figura 6.1, a máscara não é constante, sendo reduzida a uma taxa de 15 dB por década. Esta diminuição na potência com o aumento da frequência é eficiente em relação à diafonia. Além disso, a máscara apresenta *notches* nas frequências de 4, 7, 10,1, 14, 18,068 e 21 MHz para reduzir a emissão nas bandas

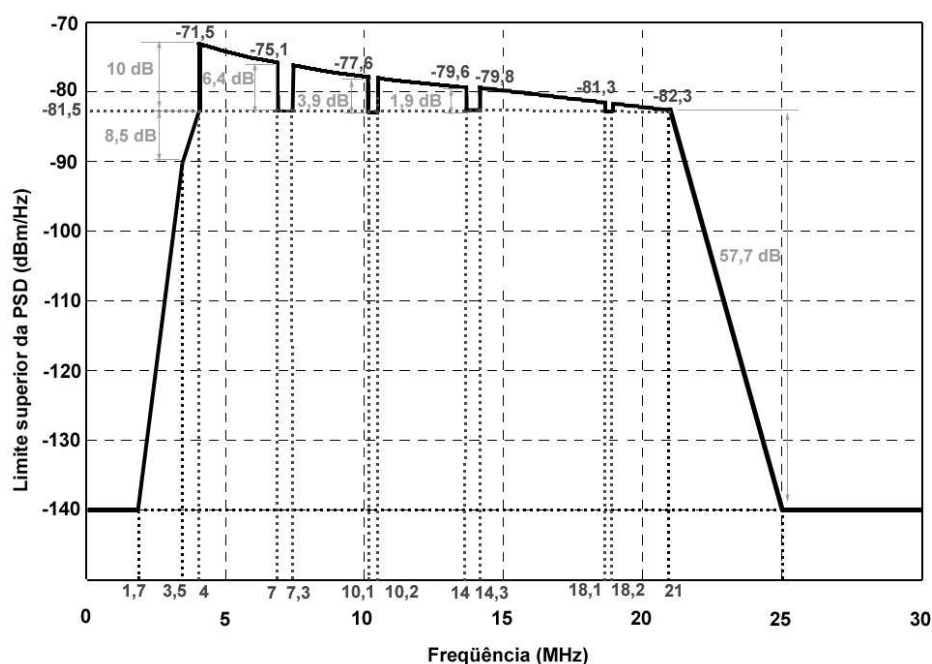


Figura 6.1: Máscara PSD do HomePNAv3.

de rádio-amador [39].

Para aumentar a eficiência do protocolo, o HomePNAv3 prevê a agregação de dados para a transmissão na camada física. A utilização de quadros maiores reduz a parcela de tempo consumida com intervalos entre quadros, cabeçalhos e delimitadores de fim de quadro. A maior duração permitida pelo padrão para a transmissão de um quadro é de 4 ms, o que à taxa de 128 Mbps significa que o quadro pode ter até 64 octetos. Utilizando quadros de 64 octetos, o protocolo alcança uma vazão efetiva de 125 Mbps [40], o que implica uma eficiência do protocolo de aproximadamente 97%. No entanto, a quantidade máxima de dados que podem ser agregados pode ser limitada por restrições de memória dos dispositivos ou de atraso dos serviços. A vazão efetiva da rede diminui para 62 Mbps quando são utilizados quadros de 1500 octetos [40].

Enquanto o padrão HomePNAv2 provê uma qualidade de serviço estatística, o padrão HomePNAv3 tem o objetivo de prover qualidade de serviço de forma determinística. Para isso, este padrão utiliza um protocolo MAC síncrono (SMAC), capaz de prover garantias de vazão, atraso e variação do atraso. É disponibilizado também um MAC assíncrono, compatível com o padrão HomePNAv2. Para funcionar corretamente, o protocolo MAC síncrono necessita de um dispositivo *mestre* na rede para sincronizar todos os elementos. O dispositivo mestre pla-

neja todos os tempos de acesso e gera um Plano de Acesso ao Meio (MAP) que é difundido periodicamente para os outros nós, criando, desta forma, um ciclo MAC [41]. Apesar do uso do dispositivo mestre, a comunicação entre as estações da rede continua sendo par a par (*peer-to-peer*). O MAP divide o acesso ao meio em uma seqüência de oportunidades de transmissão (TXOPs) com início preciso e duração suficiente para suprir as demandas específicas. As TXOPs podem ser alocadas para determinados serviços, nós ou grupo de nós. O mestre aloca TXOPs com contenção ou sem contenção de acordo com os requisitos e os contratos de QoS. A Figura 6.2 mostra a estrutura dos ciclos MAC do HomePNAv3.

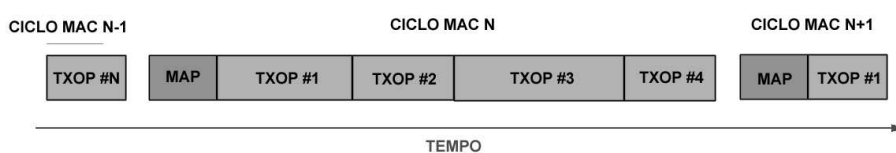


Figura 6.2: Ciclo MAC do HomePNAv3.

Resultados de testes com transmissão de voz mostram que o protocolo MAC síncrono consegue reduzir em cerca de seis vezes o atraso experimentado pelos serviços quando comparado ao protocolo MAC assíncrono. Além disso, o MAC síncrono consegue suprir restrições de QoS para a transmissão de áudio com qualidade de CD que não podem ser atendidas pelo MAC assíncrono [41]. O mecanismo de QoS do HomePNAv3 se baseia no conceito de fluxos. Um fluxo é uma transmissão unidirecional de dados entre estações da rede baseada em parâmetros bem definidos de taxa e QoS. O mestre é responsável por alocar TXOPs para fluxos sob demanda e anunciá-los no MAP. Para evitar a interrupção ou a degradação de serviços já estabelecidos, o mestre deve realizar funções de controle de admissão para novos fluxos. Ao receber um pedido de estabelecimento de fluxo, o mestre deve verificar os recursos disponíveis para analisar a viabilidade da inclusão do novo fluxo. O mestre deve, ainda, executar o algoritmo de escalonamento para incluir TXOPs, de modo a atender a cada ciclo os requisitos de QoS de todos os serviços simultâneos. Os serviços do tipo melhor esforço recebem os recursos excedentes, que podem variar dinamicamente de um ciclo para outro [40].

Pelo lado das redes através da fiação de energia elétrica, a aliança HomePlug também está desenvolvendo um novo padrão chamado HomePlug AV (Áudio e Vídeo) [42], cujo objetivo principal é a distribuição de áudio e vídeo de alta definição (HDTV) em redes domiciliares. Pretende-se equipar com este padrão aparelhos de som e televisores que precisarão apenas ser conectados à tomada para funcionarem em rede. O padrão HomePlug AV será projetado por algumas das

empresas diretoras da aliança. Uma tecnologia desenvolvida pela Panasonic, chamada de HD-PLC (*High Definition ready high speed Power Line Communication*) será a tecnologia de base para o novo padrão, que será compatível com o padrão anterior e alcançará taxas de até 190 Mbps [43]. Segundo [44], o novo padrão também utilizará o esquema de modulação OFDM. Uma banda de 24 MHz, na faixa de 2 a 30 MHz, será dividida em 390 subportadoras (aproximadamente 5 vezes mais que no HomePlug 1.0). O padrão também provê qualidade de serviço, segurança e privacidade. A expectativa é que a especificação do HomePlug AV seja concluída em 2004 ou 2005.

Diante da diversidade de padrões existentes e suas constantes evoluções, a escolha da tecnologia a ser empregada deve levar em consideração o custo e as necessidades dos usuários da rede em questão. Uma comparação entre as principais tecnologias de redes domiciliares é uma tarefa um tanto complexa e um pouco subjetiva, devido a diferenças significativas entre os padrões de cada tecnologia e as possíveis condições de uso em cada domicílio. Em que pese estas dificuldades, segue um resumo comparativo das principais características de cada tecnologia relacionadas aos padrões Ethernet, 802.11, HomePNA e HomePlug.

O meio físico e suas principais características, tais como: atenuação, nível de ruído, interferência e possíveis variações das condições do meio é uma forma importante de classificar as tecnologias. Neste aspecto, o padrão Ethernet utiliza cabos específicos e exclusivos por dispositivo (ligações ponto-a-ponto) apresentando as melhores características. O HomePNA possui um meio físico exclusivo por domicílio, mas compartilha este meio físico com os dispositivos a serem interconectados dentro de cada domicílio. Esta tecnologia já apresenta problemas de reflexões de sinal que não existem na rede Ethernet. Os padrões HomePlug e IEEE 802.11 utilizam meios físicos hostis à transmissão de dados por causa do ruído, da atenuação e da grande variação de suas características.

A taxa de transmissão suportada por cada tecnologia é outra característica importante. É evidente que a tecnologia Ethernet comutado é imbatível neste aspecto. O HomePNAv3 apresenta a taxa máxima de 128 Mbps sob determinadas condições. Os padrões sem fio IEEE 802.11 versões a e g apresentam taxas de 54 Mbps e o HomePlug 1.0 disponibiliza 14 Mbps. A nova geração do padrão do HomePlug promete taxas de até 190 Mbps. Porém, tanto o HomePlug quanto o IEEE 802.11 utilizam o CSMA-CA que apresenta taxas efetivas bem menores que a taxa de transmissão. Portanto, mais importante que a taxa de transmissão no meio físico é a taxa efetiva que se pode conseguir entre as estações e em condições pode-se obtê-la. Uma análise da taxa efetiva requer um estudo mais apurado de cada tecnologia.

A principal questão da segurança está relacionada com a privacidade dos dados, isto é, se usuários não pertencentes a uma determinada rede têm acesso aos dados que trafegam nela. Neste aspecto, a Ethernet e o HomePNA podem ser

considerados seguros por terem cabeamento exclusivo por assinante e, portanto, apenas os usuários conectados fisicamente à rede terão acesso aos dados transmitidos. No padrão HomePlug, a rede é compartilhada por todas as residências que estiverem ligadas no mesmo transformador. Assim, qualquer usuário pode ter acesso a rede desde que se conecte a uma tomada pertencente ao mesmo transformador de energia elétrica. As redes sem fio são as piores no aspecto de segurança, pois basta estar dentro do alcance de transmissão que qualquer usuário pode ter acesso aos dados. Para resolver este problema, pode-se utilizar a criptografia, entretanto esta solução diminui o desempenho da rede.

A ubiqüidade indica a facilidade de acesso à rede em todos os cômodos da casa. Neste quesito, o padrão sem fio, o IEEE 802.11, tem a vantagem de não requerer quase nenhuma infra-estrutura. No entanto, a propagação das ondas de rádio em um domicílio pode não atingir todos os cômodos devido aos obstáculos. No caso de haver necessidade de mais de um ponto de acesso para cobrir um domicílio, o custo em equipamentos e instalação de infra-estrutura deve ser levado em conta. O padrão HomePlug apresenta uma boa característica de cobertura de todos os cômodos de um domicílio, pois já existem instaladas mais de uma tomada de energia elétrica em cada cômodo. A quantidade de tomadas de telefone é bem menor que a de tomadas de energia. Nas residências mais antigas a instalação telefônica é bem insipiente. Nas residências mais modernas e, principalmente, nas destinadas para as classes mais ricas, é comum se ter pelo menos uma tomada de telefone por cômodo da casa inclusive na cozinha e banheiro. A rede Ethernet é a pior opção neste quesito, pois há necessidade de se instalar cabos por todos os cômodos da casa.

Quanto a disponibilidade de mecanismos para a oferta de qualidade de serviço, os novos padrões de redes domiciliares “sem novos fios” saíram na frente. O HomePNAv2 oferece um mecanismo de prioridade bem eficiente e o HomePlug também oferece um CSMA-CA com prioridade. O padrão 802.11 possui uma especificação, denominada IEEE 802.11e, que visa oferecer qualidade de serviço através de um mecanismo semelhante ao do HomePlug. No entanto, os produtos ainda não estão disponibilizados no mercado. Neste item, a proposta HomePNAv3 inovou ao prometer qualidade de serviço determinística. A rede Ethernet não oferece qualquer mecanismo de provisão de QoS. No entanto, a possibilidade de oferta de banda é tão maior que as dos concorrentes que a qualidade de serviço pode ser conseguida através do superdimensionamento da rede.

O fator custo é sem dúvida nenhuma um dos mais importantes. A Ethernet, para desempenho comparável, é a que apresenta o menor custo de equipamentos mas o maior custo de instalação da infra-estrutura necessária. A rede IEEE 802.11 apresenta um baixo custo de equipamentos e nenhum custo de instalação. As tecnologias HomePNA e HomePlug não apresentam nenhum custo de instalação mas o custo dos dispositivos ainda são maiores que seus similares na rede IEEE 802.11.

Os defensores das tecnologias “sem novos fios” afirmam que o custo é apenas um problema de escala de produção uma vez que os produtos associados a estes padrões não possuem a parte de transmissão/recepção de rádio que, em princípio, deveria ser mais onerosa.

A Tabela 6.1 resume as principais características dos padrões de redes domiciliares.

Tabela 6.1: Quadro comparativo das principais tecnologias de redes domiciliares.

	Ethernet	HomePNA	HomePlug	802.11
Meio físico	****	***	*	**
Taxa (Mbps)	****	***	*	**
Segurança	****	****	**	*
Ubiquidade	*	**	****	***
QoS	*	***	***	*
Custo Infra-estrutura	*	****	****	****
Custo equipamentos	***	**	**	**

Pode-se concluir que esta batalha ainda não tem um vencedor certo. É possível que estas tecnologias co-existam por um determinado tempo, pois apresentam diferentes soluções que dependem das necessidades dos usuários e das características dos domicílios e dos recursos financeiros que se pretende investir.

A pesquisa em redes domiciliares abrange diversos aspectos. Na literatura especializada encontram-se diversas propostas de mecanismos de acesso ao meio. As propostas para PLC incluem avaliações de desempenho de alguns mecanismos que procuram oferecer qualidade de serviço através de um controle central e um canal de sinalização compartilhado por todas as estações por onde devem ser feitas as demandas. Para o canal de sinalização são analisados alguns mecanismos convencionais como o ALOHA e *polling* [45, 46, 47]. Hrasnica e Lehnert [48] propuseram um mecanismo híbrido *polling* com alguns *slots* onde o acesso é aleatório como no ALOHA. Desta forma, diminui-se o tempo de acesso a meio e torna-se o mecanismo mais robusto em relação aos distúrbios do canal.

Uma área importante para as redes domiciliares é a modelagem do meio físico. A modelagem para a linha telefônica é bem menos complexa que a da rede de distribuição de energia elétrica. Diversas avaliações de desempenho consideram instalações de redes elétricas realizadas por cabos. Este tipo de instalação é comum na Europa, mas, no Brasil, normalmente se empregam fios separados colocados em conduíte em vez de se utilizar cabos. Esta diferença nas instalações influi significativamente nas características do meio.

No trabalho [49], Cañete et al. apresentam um modelo bem geral do meio físico PLC que descreve a resposta do canal através da soma da resposta do canal ao sinal com o ruído equivalente. O ruído equivalente representa a soma da contribuição de todas as fontes de ruído, mais o ruído de banda estreita, mais o ruído de fundo. A partir deste modelo, pode-se calcular as funções de transferência e ajustar os seus parâmetros para simular a resposta de um determinado canal.

Um novo modelo de meio físico foi proposto por Zimmermann e Dostert [50], no qual o canal é visto como uma caixa preta que apresenta uma determinada função de transferência. A principal característica deste modelo é a simplicidade, pois utiliza um pequeno número de parâmetros. A função de transferência considera três fatores: os múltiplos caminhos devido à reflexão, a atenuação, causada pela distância e pela frequência, e o atraso do canal. Desta maneira, os autores dividiram a função de transferência em três partes.

$$H(f) = \sum_{i=1}^N \underbrace{g_i}_{\text{reflexão}} * \underbrace{e^{-(a_0 + a_1 f^k) d_i}}_{\text{atenuação}} * \underbrace{e^{-j2\pi f \tau_i}}_{\text{atraso}}$$

Figura 6.3: Função de transferência.

A expressão da Figura 6.3 já está na forma simplificada. Todos os parâmetros (Tabela 6.2) devem ser obtidos através de medidas de respostas do canal a ser modelado. Além disso, são apresentados procedimentos para se obter os valores de cada parâmetro. Por último, são definidas algumas categorias de redes (curta distância, longa distância entre outras) e são obtidos os valores dos parâmetros para cada uma das categorias. Este modelo abrange uma faixa de frequência de 500 kHz até 20 MHz, ao contrário da maioria dos outros modelos propostos na literatura, que limitam a faixa de frequência em 150 kHz.

Uma outra abordagem para a modelagem do meio físico de redes PLC é a representação do canal através de redes de duas portas conectadas em cascata [51]. A modelagem das redes de duas portas considera a topologia da rede, na qual cada ramo é representado por uma rede de duas portas. Assim, os parâmetros de uma rede provêm das características físicas de um determinado ramo, como por exemplo a impedância do cabo e dos equipamentos conectados. Desta forma, pode-se obter as matrizes de transmissão. A principal vantagem desta abordagem é viabilizar a modelagem de um canal *à priori*, isto é, sem a necessidade de realizar medidas de resposta do canal para obter os parâmetros do modelo. Em [52], Galli e Banwell, utilizando esta mesma abordagem, propõem um novo modelo, que considera o efeito multi-condutor do meio físico PLC devido à presença de três

Parâmetro	Descrição
$i$	Número de possíveis caminhos para o sinal
$a_0$ e $a_1$	Parâmetros relacionados com a atenuação
$k$	Expoente do fator de atenuação ( $0.5^{ k }$ )
$g_i$	Peso dado aos possíveis caminhos. Está diretamente ligado aos índices de reflexão e de transmissão.
$d_i$	Tamanho do caminho $i$
$t_i$	Atraso do caminho $i$

Tabela 6.2: Parâmetros da função de transferência.

fios condutores (fase, neutro e terra), ao contrário das redes de telefone e Ethernet, que possuem apenas um par.

Uma outra área importante é a garantia de qualidade de serviço. Alguns trabalhos [53, 54] abordam tópicos referentes ao controle de admissão como forma de prover qualidade de serviço ao tráfego de voz. Imre et al. [53] propuseram um mecanismo de controle de acesso baseado em parâmetros da rede a fim de manter a qualidade de serviço por usuário. Foram definidas duas classes de serviço (voz e dados) e, a partir de simulações, foi calculado o número de usuários de cada classe para uma determinada taxa de erro binária (BER - Bit Error Rate). Com estes valores calcula-se a banda efetiva para cada classe de tráfego em diferentes BERs. Assim o trabalho do gerente se resume em verificar, dada uma determinada taxa de erro, se a entrada de um novo usuário, caracterizado por uma banda efetiva, irá exceder o limite da banda total disponível. Begain et al. [54] apresentam um modelo analítico para o canal PLC e propõem uma política de controle de admissão com o objetivo de priorizar o tráfego de voz em relação ao tráfego de dados. A taxa de erro binária é modelada a partir de uma cadeia de markov de dois estados (ON, OFF). No estado ON o canal está disponível e no estado OFF o canal apresenta distúrbios. O tempo de permanência em cada estado é distribuído exponencialmente e foram realizadas medidas em uma rede PLC para se obter o valor da média de permanência em cada estado. Além disso, são mostrados alguns resultados numéricos, para diferentes níveis de BER. Os resultados mostram que a taxa de erro pode degradar consideravelmente o desempenho da rede, realçando assim, a importância de algoritmos de correção de erro (FEC) para redes PLC.

Por fim, uma das principais aplicações das redes domiciliares é o compartilhamento de vídeos e músicas por todos os habitantes de uma residência, porém este tipo de aplicação envolve a transmissão de tráfego multimídia, que exige altas taxas de transmissão. A promessa de aumento das taxas de transmissão dos novos padrões de redes domiciliares pode viabilizar estas aplicações, no entanto, é importante o uso de mecanismos de provisão de QoS em redes domiciliares. Uma

comparação dos diferentes mecanismos propostos para as redes IEEE 802.11e, HomePNAv2 e 3 e HomePlug é necessária para uma melhor avaliação das propostas.



# Agradecimentos

Este trabalho foi realizado com recursos da CNPq, CAPES, COFECUB, FUJB e FAPERJ. Um agradecimento especial a Marcus Vinicius Pereira Venanzoni pela edição das figuras.



## Referências Bibliográficas

- [1] A. Dutta-Roy, “Networks for home”, *IEEE Spectrum*, vol. 36, no. 12, pp. 26–33, dezembro de 1999.
- [2] IEEE, “Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications”. IEEE Standard 802.11, 1999.
- [3] J. Schiller, *Mobile Communications*. Addison-Wesley, 1<sup>st</sup> ed., 2000. ISBN 0201398362.
- [4] S. Xu e T. Saadawi, “Does the IEEE 802.11 MAC protocol work well in multihop wireless ad hoc networks?”, *IEEE Communications Magazine*, vol. 39, no. 6, pp. 130–137, junho de 2001.
- [5] B. P. Crow, I. W. Fujitsu, J. G. Kim e P. T. Sakai, “IEEE 802.11 wireless local area networks”, *IEEE Communications Magazine*, vol. 35, no. 9, pp. 116–26, setembro de 1997.
- [6] J. Weinmiller, H. Woesner e A. Wolisz, “Analyzing the RTS/CTS mechanism in the DFWMAC media access protocol for wireless LANs”, in *IFIP TC6 Workshop on Personal Wireless Communications*, abril de 1995.
- [7] J. Weinmiller, H. Woesner e A. Wolisz, “Analyzing and improving the IEEE 802.11-MAC protocol for wireless LANs”, in *4th International Workshop on Modeling, Analysis, and Simulation of Computer and Telecommunications Systems (MASCOTS’96)*, San Jose, EUA, fevereiro de 1996.
- [8] N. Borisov, I. Goldberg e D. Wagner, “(in)security of the WEP algorithm”, Relatório Técnico, Berkeley University, USA, 2001. <http://www.isaac.cs.berkeley.edu/isaac/wep-faq.html>.
- [9] P. Bisaglia, R. Castle e S. H. Baynham, “Channel modeling and system performance for HomePNA 2.0”, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 20, no. 5, pp. 913–922, junho de 2002.
- [10] <http://www.homepna.org>, 2003.

- [11] W. Y. Chen, *Home Networking Basis: Transmission Environments and Wired/Wireless Protocols*. Prentice-Hall, 1<sup>a</sup> ed., 2004. ISBN 0130165115.
- [12] ITU-T, “G.989.1: Phoneline networking transceivers - foundation”. fevereiro de 2001.
- [13] ITU-T, “G.989.2: Phoneline networking transceivers - payload format and link layer requirements”. novembro de 2001.
- [14] ITU-T, “G.989.3: Phoneline networking transceivers - isolation function”. março de 2003.
- [15] E. H. Frank e J. Holloway, “Connecting the home with a phone line network chip set”, *IEEE Micro*, vol. 20, no. 2, pp. 27–38, abril de 2000.
- [16] P. Bisaglia e R. Castle, “Receiver architectures for HomePNA 2.0”, Relatório Técnico, Hewlett-Packard Laboratories, 2001.
- [17] M. Zimmermann e K. Dostert, “An analysis of the broadband noise scenario in powerline networks”, in *International Symposium on Power-Line Communications and its Applications (ISPLC)*, Limerick, Irlanda, abril de 2000.
- [18] K. H. Zuberi, “Powerline carrier (PLC) communications systems”, Tese de Mestrado, IT-Universitetet, Suécia, setembro de 2003.
- [19] P. Sutterlin e W. Downey, “A power line communication tutorial - challenges and technologies”, Relatório Técnico, Echelon Corporation, 1999.
- [20] M. K. Lee, R. E. Newman, H. A. Latchman, S. Katar e L. Yonge, “Homeplug 1.0 powerline communications LANs - protocol description and performance results”, *International Journal of Communication Systems*, vol. 16, no. 5, pp. 447–473, junho de 2003.
- [21] Y.-J. Lin, H. A. Latchman, M. Lee e S. Katar, “A power line communication network infrastructure for the smart home”, *IEEE Wireless Communications*, vol. 9, no. 6, pp. 104–111, dezembro de 2002.
- [22] IEEE, “Media access control (MAC) bridges”. IEEE Standard 802.1D, 1998.
- [23] S. Gardner, B. Markwalter e L. Yonge, “Homeplug standard brings networking to the home”, *Communication Systems Design Magazine*, dezembro de 2000. <http://www.commsdesign.com/main/2000/12/0012feat5.htm>.
- [24] <http://www.dsforum.org>, 2004.

- [25] IEEE, “Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications: High-speed physical layer in the 5 GHz band”. IEEE Standard 802.11a, 1999.
- [26] IEEE, “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, 2003.
- [27] M. E. M. Campista, P. B. Velloso, L. H. M. K. Costa e O. C. M. B. Duarte, “Uma análise da capacidade de transmissão na rede de energia elétrica domiciliar”, in *XXI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações (SBT)*, Belém, Brasil, setembro de 2004.
- [28] IEEE, “Virtual bridged local area networks”. IEEE Standard 802.1Q, 2003.
- [29] Paradyne Corporation, “The DSL sourcebook: The comprehensive resource on digital subscriber line technology”. <http://www.paradyne.com>, 2000.
- [30] K. Kerpez, “DSL spectrum management standard”, *IEEE Communications Magazine*, vol. 40, no. 11, pp. 116–123, novembro de 2002.
- [31] <http://www.etsi.org>, 2004.
- [32] <http://www.plcforum.org>, 2004.
- [33] <http://www.ascom.com/plc>, 2004.
- [34] <http://www.ds2.es>, 2004.
- [35] W. Liu, H. Widmer e P. Raffin, “Broadband PLC access systems and field deployment in european power line networks”, *IEEE Communications Magazine*, vol. 41, no. 5, pp. 114–118, maio de 2003.
- [36] G. Jee, R. D. Rao e Y. Cern, “Demonstration of the technical viability of PLC systems on medium- and low-voltage lines in the United States”, *IEEE Communications Magazine*, vol. 41, no. 5, pp. 108–112, maio de 2003.
- [37] J. Abad, A. Badenes, J. Blasco, J. Carreras, V. Dominguez, C. Gomez, S. Iranzo, J. C. Riviero, D. Ruiz, L. M. Torres e J. Comabella, “Extending the power line LAN up to the neighborhood transformer”, *IEEE Communications Magazine*, vol. 41, no. 4, pp. 64–70, abril de 2003.
- [38] J. Case, M. Fedor, M. Schoffstall e J. Davin, “Simple network management protocol”, *Internet RFC 1157*, maio de 1990.

- [39] ITU-T, “G.pnt: Revisions to existing G.989.x recommendations”. Draft PO-032, julho de 2003.
- [40] R. Sterenson, “Guaranteed QoS in the home network environment”, Relatório Técnico, CopperGate Communications, 2003.
- [41] ITU-T, “The proposed MAC for PNT3”. Documento temporário PF-042, agosto de 2003.
- [42] <http://www.homeplug.org>, 2004.
- [43] Matsushita Electric Industrial Co. Ltd., “Panasonic develops the world’s first broadband home networking technology using power line capable of high-definition video transmission”. <http://www.matsushita.co.jp/corp/news/official.data/data.dir/en040108-4/en040108-4.html>, janeiro de 2004.
- [44] Y. Hara, “AV powerline spec seen by midyear”, *EE Times*, fevereiro de 2004. <http://www.eetimes.com/issue/mn/OEG20040202S0018>.
- [45] N. Pavlidou, A. J. H. Vinck, J. Yazdani e B. Honary, “Power line communications: State of the art and future trends”, *IEEE Communications Magazine*, vol. 41, no. 4, pp. 34–40, abril de 2003.
- [46] H. Hrasnica e A. Haidine, “Modeling MAC layer for powerline communications networks”, in *SPIE’s symposium on Information Technologies; conference: Internet, Performance and Control of Network Systems*, Boston, EUA, novembro de 2000.
- [47] M. Stantcheva, K. Begain, H. Hrasnica e R. Lehnert, “Application of effective capacity concept in power line communication environment”, in *International Symposium on Power-Line Communications and its Applications (ISPLC)*, Limerick, Irlanda, abril de 2000.
- [48] H. Hrasnica, A. Haidine e R. Lehnert, “Reservation MAC protocols for powerline communications”, in *International Symposium on Power-Line Communications and its Applications (ISPLC)*, Malmö, Suécia, abril de 2001.
- [49] F. J. Cañete, J. A. Cortés, L. Diez e J. T. Entrambasaguas, “Modeling and evaluation of the indoor power line transmission medium”, *IEEE Communications Magazine*, vol. 41, no. 4, pp. 41–47, abril de 2003.
- [50] M. Zimmermann e K. Dostert, “A multipath model for the powerline channel”, *IEEE Transactions on Communications*, vol. 50, no. 4, pp. 553–559, abril de 2002.

- [51] T. C. Banwell e S. Galli, “A new approach to the modeling of the transfer function of the power line channel”, in *International Symposium on Power-Line Communications and its Applications (ISPLC)*, Malmö, Suécia, abril de 2001.
- [52] S. Galli e T. C. Banwell, “The indoor power line channel: New results and modem design considerations”, in *IEEE Consumer Communications and Networking Conference (CCNC'04)*, Las Vegas, EUA, janeiro de 2004.
- [53] G. Zsoldos, F. Balázs e S. Imre, “Application of effective capacity concept in power line communication environment”, in *International Symposium on Power-Line Communications and its Applications (ISPLC)*, Atenas, Grécia, março de 2002.
- [54] K. Begain, M. Ermel, A. Haidine, H. Hrasnica, M. Stantcheva e R. Lehnert, “Modeling of a PLC access network”, in *First Polish-German Teletraffic Symposium (PGTS 2000)*, Dresden, Alemanha, setembro de 2000.