

LIGA DE ENSINO DO RIO GRANDE DO NORTE
FACULDADE NATALENSE PARA O DESENVOLVIMENTO DO RIO GRANDE DO
NORTE
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM REDES DE COMUTADORES

ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UMA REDE DE COMPUTADORES QUE
UTILIZA O PADRÃO HOMEPUG

ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UMA REDE DE COMPUTADORES QUE UTILIZA O
PADRÃO HOMEPUG

Antonio Luiz Pereira de Siqueira Campos

NATAL/RN

2007

ANTONIO LUIZ PEREIRA DE SIQUEIRA CAMPOS

FACULDADE NATALENSE PARA O DESENVOLVIMENTO DO RIO GRANDE DO
NORTE

CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM REDES DE COMPUTADORES

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UMA REDE DE COMPUTADORES QUE
UTILIZA O PADRÃO HOMEPLUG**

Monografia apresentada ao Curso de
Especialização em Redes de Computadores da
Faculdade Natalense para o Desenvolvimento do
Rio Grande do Norte como requisito parcial para
obtenção do grau de Especialista em Redes de
Computadores.

Orientador:

Aluízio Ferreira da Rocha Neto, MSc.

NATAL/RN

2007

ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UMA REDE DE COMPUTADORES QUE
UTILIZA O PADRÃO HOMEPLUG

RB- 30.300 M
FARN 004.7
BIBLIOTECA C21a
Nº Reg 000764 0006
14, 12, 07 ex 01

Catálogo na Publicação – Biblioteca da FARN
Setor de Processos Técnicos

Campos, Antonio Luiz Pereira de Siqueira

Análise de desempenho em uma rede de computadores que utiliza o padrão
Homeplug. – Natal: FARN, 2006.
56 f.

Orientador: Aluizio Ferreira da Rocha Neto (M. Sc.)

Monografia (Especialização em Redes de Computadores) – Faculdade
Natalense para o Desenvolvimento do Rio Grande do Norte.

1. Redes Homeplug – Monografia 2. Comunicação em Rede – Monografia. 3.
Taxa de transmissão – Monografia. 4. Interferências – Monografia. I. Título.

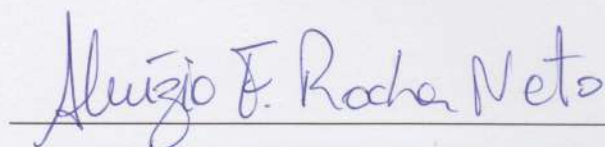
RN/FARN/BC

CDU 004.7

LIGA DE ENSINO DO RIO GRANDE DO NORTE
FACULDADE NATALENSE PARA O DESENVOLVIMENTO DO RIO GRANDE DO
NORTE
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM REDES DE COMUTADORES

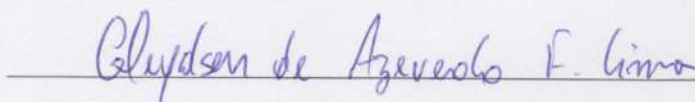
Antonio Luiz Pereira de Siqueira Campos

Monografia apresentada e aprovada em 27 de outubro de 2006, pela banca examinadora composta pelos seguintes membros



Aluizio Ferreira da Rocha Neto, MSc. (Orientador)

Ricardo Kleber Martins Galvão, Msc.



Gleydson de Azevedo Ferreira Lima, Esp.

Natal/RN, 27 de outubro de 2006.

RESUMO

Na literatura, encontram-se diversos trabalhos que estudaram características do meio elétrico para a transmissão de dados, ruídos e técnicas empregadas na comunicação pela rede elétrica. A maioria dos trabalhos que aborda o HomePlug limita-se a fazer testes de desempenho do protocolo. Dentre esses trabalhos, alguns fazem testes comparativos entre a subcamada de controle de acesso ao meio (MAC) do HomePlug com a do IEEE 802.11. Este trabalho complementa as avaliações encontradas na literatura, objetivando o estudo das redes HomePlug no que diz respeito ao seu desempenho em função da demanda de consumo elétrico. Foi analisada a taxa de transmissão de uma rede Homeplug, considerando-se diversas situações de consumo elétrico.

Palavras-Chave: Homeplug, PLC, Redes de computadores, Taxa de transmissão.

LISTA ABSTRACT

In literature, we can find several papers that had studied characteristics of the power network as a way for the data transmission, as well, noises and techniques used in the communication by using the power network. The majority of these works that approaches the HomePlug limit itself to make tests of protocol performance. Amongst these works, some make comparative tests between the sublayer of media access control (MAC) of the HomePlug with the one it IEEE 802.11. This work complements the evaluations found in literature, objectifying the study of the HomePlug computer networks in respect of its performance as a function of the demand of electric consumption. The throughput of a Homeplug computer network was analyzed, considering several situations of electric consumption.

Figura 3.3 – Bloco de serviço: (a) Segmentação e acesso do cliente de serviço e (b)

Key – Words: Homeplug, PLC, Computer networks, Throughput.

Figura 3.4 – Formato MTDU longo.

Figura 3.5 – Uso do campo de controle do quadro MAC: (a) Campos CC + CA usados para prioridade, (b) Tamanho e respostas usadas para VCS e (c) Campos FC e PCB usados para APO.

Figura 3.6 – Cabeçalho do quadro e controle de segmento.

Figura 3.7 – Esquecimento entre quadros.

Figura 4.1 – Rede Homeplug implementada para testes.

Figura 4.2 – Variação em Mbps para a situação 2, sem cargas ligadas.

Figura 4.3 – Variação em Mbps para a situação 2, sem cargas ligadas e com a TV ligada.

Figura 4.4 – Variação em Mbps para a situação 2, sem cargas ligadas e com o carregador V220 ligado.

Figura 4.5 – Variação em Mbps para a situação 2, sem cargas ligadas e com o carregador Xaploc ligado.

Figura 4.6 – Variação em Mbps para a situação 2, sem cargas ligadas e com a lâmpada ligada.

Figura 4.7 – Comparação do efeito de três diferentes tipos de cargas na taxa de transmissão.

Figura 4.8 – Comparação do efeito produzido pelo carregador Startec e pela lâmpada na taxa de transmissão.

Figura 4.9 – Comparação da variação média para cada carga e situação de teste.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Esquema do projeto Barreirinhas.	4
Figura 2.2 – Impedância da linha de potência do oeste da Alemanha.	9
Figura 2.3 – Comparação entre o espectro FDM convencional e o OFDM.	11
Figura 2.4 – Espectro de um sinal QAM com frequência normalizada em função de $1/T$.	11
Figura 2.5 – Subportadoras de um sinal OFDM com frequência normalizada em função de $1/T$.	12
Figura 2.6 – Subportadoras no domínio do tempo.	13
Figura 3.1 – Formato do quadro físico.	15
Figura 3.2 – Composição do controle de quadro (FC).	15
Figura 3.3 – Bloco de serviço: (a) Segmentação e criação do bloco de serviço e (b) Campos do SB.	19
Figura 3.4 – Formato MPDU longo.	20
Figura 3.5 – Uso do campo de controle de quadro MAC: (a) Campos CC + CA usados para prioridade, (b) Tamanho e resposta usados para VCS e (c) Campos FC e FCS usados para ARQ.	22
Figura 3.6 – Cabeçalho do quadro e controle de segmento.	23
Figura 3.7 – Espaçamento entre quadros.	24
Figura 4.1 – Rede Homeplug implementada para testes.	35
Figura 4.2 – Vazão em Mbps para a situação 2, sem cargas ligadas.	39
Figura 4.3 – Vazão em Mbps para a situação 2, sem cargas ligadas e com a TV ligada.	39
Figura 4.4 – Vazão em Mbps para a situação 2, sem cargas ligadas e com o carregador V220 ligado.	40
Figura 4.5 – Vazão em Mbps para a situação 2, sem cargas ligadas e com o carregador Startac ligado.	41
Figura 4.6 – Vazão em Mbps para a situação 2, sem cargas ligadas e com a lâmpada ligada.	41
Figura 4.7 – Comparação do efeito de três diferentes tipos de cargas na taxa de transmissão.	41
Figura 4.8 – Comparação do efeito produzido pelo carregador Startac e pela lâmpada na taxa de transmissão.	41
Figura 4.9 – Comparação da vazão média para cada carga e situação de teste.	44

LISTAS DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

Tabela 2.1 – Características de amplitude e duração de ruídos.	8
Tabela 3.1 – Programação de <i>backoff</i> .	26
Tabela 4.1 – Vazão média e desvio padrão para situação 1 (C2 para G).	37
Tabela 4.2 – Vazão média e desvio padrão para situação 2 (C2 para C1).	37
Tabela 4.3 – Vazão média e desvio padrão para situação 3 (C1 para C3).	43

SNMP	Simple Network Management Protocol
MAC	Media Access Control
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplex
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access/ Collision Avoidance
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
PSK	Phase Shift Keying
QoS	Quality of Service

LISTAS DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

DSL	Digital Subscriber Line	1
UTP	Unshielded Twisted Pair	2
LAN	Local Area Network	3
Mbps	Mega bits por segundo	3
PLC	Power Line Carrier	4
SNMP	Simple Network Management Protocol	5
MAC	Media Access Control	5
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplex	6
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance	6
QAM	Quadrature Amplitude Modulation	7
PSK	Phase Shift Keying	8
QoS	Quality of Service	9

2.8 A TÉCNICA OFDM

3. PROTOCOLO HOMEPLUG 1.0

3.1 INTRODUÇÃO

3.2 ESPECIFICAÇÕES DA CAMADA FÍSICA

3.3 ESPECIFICAÇÕES DA CAMADA MAC

3.3.1 Sensibilidade da Portadora e Detecção de Colisão

3.3.2 Sincronismo do Quadro MPDU

3.3.3 Estrutura do Quadro MPDU

3.3.4 Empacotamento entre Quadros e Timing

3.3.5 Atribuição de Prioridade

3.3.6 Acesso ao Canal

3.3.7 Controle de Erro MAC

3.3.8 Seguridade e Remontagem

3.3.9 Acesso de Segmentos e Acesso Livre de Colisão

3.3.10 Alinhamento MAC

3.3.11 Função de Controle de Estimação do Canal

3.3.12 Criptografia de Chave e Privacidade

4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

5. INTRODUÇÃO

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 ASPECTOS TEÓRICOS	3
2.1 HISTÓRICO	3
2.2 ESTADO DA ARTE	3
2.3 A REDE ELÉTRICA	4
2.4 PRIMEIROS PROTOCOLOS PLC COMERCIAIS	5
2.4.1 Protocolo X10	5
2.4.2 Protocolo CEBus	6
2.4.3 Protocolo <i>LonWorks</i>	6
2.5 RUÍDOS DO CANAL DE COMUNICAÇÃO	7
2.6 IMPEDÂNCIA DO CANAL	8
2.7 ATENUAÇÃO DO SINAL	9
2.8 A TÉCNICA OFDM	10
3 PROTOCOLO HOMEPLUG 1.0	14
3.1 INTRODUÇÃO	14
3.2 ESPECIFICAÇÕES DA CAMADA FÍSICA	14
3.3 ESPECIFICAÇÕES DA CAMADA MAC	17
3.3.1 Sensitividade da Portadora e Detecção de Colisão	18
3.3.2 Encapsulamento do Quadro IEEE 802.3	18
3.3.3 Estrutura do Quadro MPDU	20
3.3.4 Espaçamento entre Quadros e <i>Timing</i>	24
3.3.5 Resolução de Prioridade	25
3.3.6 Acesso ao Canal	25
3.3.7 Controle de Erro MAC	27
3.3.8 Segmentação e Remontagem	29
3.3.9 Rajada de Segmentos e Acesso Livre de Contenção	30
3.3.10 Gerenciamento MAC	30
3.3.11 Função de Controle de Estimação do Canal	32
3.3.12 Gerenciamento de Chave e Privacidade	33
4 RESULTADOS OBTIDOS	35
4.1 INTRODUÇÃO	35

4.2 REDE IMPLEMENTADA E CARGAS UTILIZADAS	35
4.3 METODOLOGIA DOS TESTES	36
4.4 RESULTADOS OBTIDOS	37
5 CONCLUSÕES	45
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	46

Internet em banda larga para usuários residenciais, através de uma conexão cabada e dispositivos DSL. Entretanto, uma possibilidade crescente de compartilhar esse link em redes domésticas, que suportam uma grande faixa de serviços de comunicação de dados e multimídia. Enquanto, geralmente, se usa um hub e uma pequena rede 10/100 Base-T para se ligar diversos computadores em uma única sala ou em um pequeno escritório, é mais complicado fornecer conteúdos de rede em ambientes cômodos de uma casa típica. Uma opção óbvia é cabear a casa com cabos de rede de rede por bandeja 10/100 Base-T CAT-5E UTP. Isso é uma solução cara, principalmente em áreas já construídas sem tabulação para esse tipo de cabotagem.

Outra alternativa é o emprego de uma rede LAN sem fio (wireless) com modems wireless em cada dispositivo conectado-se a uma ou mais hosts wireless (rodas e computadores) ou conectando-se aos outros (redes ad hoc). A opção wireless é viável, especialmente para um pequeno número de dispositivos, seja em uma residência ou em um escritório; e há diversas marcas de equipamentos wireless, principalmente as baseadas no padrão IEEE 802.11b. Infelizmente, para se obter uma realíndia banda para uma rede wireless infraestrutura, é necessário o uso de muitos pontos de acesso.

Uma terceira solução é utilizar a rede elétrica existente como canal de comunicação, disponível em todos os cômodos de uma casa. Uma coalizão de fabricantes formou a HomePlug Alliance, e estabeleceram um novo protocolo, o HomePlug 1.0 que permite a implementação de uma rede Ethernet sobre a rede elétrica existente. Acredita-se que muitos dispositivos de computadores, dispositivos de comunicação e redes, e de periféricos usarão os novos adaptadores de baixo custo baseados no padrão HomePlug 1.0 para possibilitar que os equipamentos sejam conectados não em uma rede residencial ou de escritório, apenas através de equipamentos na tomada. Desse modo, a tomada, que é normalmente usada para fornecer energia elétrica, será utilizada para fornecer um ponto de conexão a altas taxas de transferência para comunicação de dados.

Também é possível utilizar o cabotamento de telefone, de maneira similar a, talvez, que empregada com características mais atraívas. Entretanto, linhas de telefone, aparecem em apenas alguns cômodos de uma residência. De modo que é mais usual ter apenas um ou dois pontos de telefone em uma residência. Por outro lado, a rede elétrica, apesar da sua capacidade, constitui um péssimo canal para comunicação de dados, devido ao alto nível de

1 INTRODUÇÃO

A conexão à Internet em banda larga para usuários residenciais, atualmente, está disponível por meio de modem de TV a cabo e dispositivos DSL. Entretanto, há uma necessidade crescente de compartilhar esse link em redes domésticas, que suportam uma grande faixa de serviços de comunicação de dados e multimídia. Enquanto, geralmente, se usa um hub e uma pequena rede 10/100 Base-T para se ligar diversos computadores em uma única sala ou em um pequeno escritório, é mais complicado fornecer conexões de rede em diversos cômodos de uma casa típica. Uma opção óbvia é cabear a casa com cabos de rede do tipo par trançado 10/100 Base-T CAT-5E UTP. Isso é uma solução cara, principalmente em casas já construídas sem tubulação para esse tipo de cabeamento.

Outra alternativa é o emprego de uma rede LAN sem fio (*wireless*) com modem's *wireless* em cada dispositivo conectando-se a um ou mais *hubs wireless* (redes infraestruturadas) ou conectando-se uns aos outros (redes ad hoc). A opção *wireless* é viável, especialmente para um pequeno número de dispositivos, seja em uma residência ou em um escritório; e há diversas marcas de equipamentos *wireless*, principalmente os baseados no padrão IEEE 802.11b. Infelizmente, para se cobrir uma residência inteira com uma rede *wireless* infraestruturada, é necessário o uso de muitos pontos de acesso.

Uma terceira solução é utilizar a rede elétrica existente como canal de comunicação, presente em todos os cômodos de uma casa. Uma coalizão de fabricantes formou a *HomePlug Powerline Alliance*, e estabeleceram um novo protocolo, o HomePlug 1.0 que permite a implementação de uma rede Ethernet sobre a rede elétrica existente. Acredita-se que muitos fabricantes de computadores, dispositivos de comunicação e redes, e de periféricos usarão circuitos integrados de baixo custo baseados no padrão HomePlug 1.0 para possibilitar que tais equipamentos ajam como nós em uma rede residencial ou de escritório, apenas conectando o equipamento na tomada. Desse modo, a tomada, que é normalmente usada para fornecer energia elétrica, seria utilizada para fornecer um ponto de conexão a altas taxas de transmissão para comunicação de dados.

Também é possível utilizar o cabeamento de telefone, de maneira similar e, talvez, com um canal com características mais atrativas. Entretanto, linhas de telefone, aparecem em apenas alguns cômodos de uma residência. De modo que é mais usual ter apenas um ou dois pontos de telefone em uma residência. Por outro lado, a rede elétrica, apesar da sua ubiquidade, constitui um péssimo canal para comunicação de dados, devido ao alto nível de

ruído elétrico e de sinais interferentes. Além disso, as características do canal variam muito com as cargas que estão conectadas nas tomadas. Apesar dessas dificuldades, testes da versão atual de dispositivos HomePlug 1.0 em aproximadamente 500 casas, mostram que 80% das tomadas seriam apropriadas para se comunicarem umas com as outras a, aproximadamente, 5 Mbps ou mais; e 98% suportariam taxas superiores a 1 Mbps (LIN, 2003). Testes de campo sugerem que uma rede *powerline* forneceria conectividade em situações onde redes *wireless* falhariam devido a fortes atenuações ou obstruções.

Este trabalho tem por objetivo analisar a influência de determinadas cargas elétricas no desempenho de uma rede *powerline*, complementando as avaliações encontradas na literatura, objetivando o estudo das redes HomePlug 1.0 no que diz respeito ao seu desempenho em função das cargas elétricas conectadas à rede elétrica. Para isso, foi montada uma rede HomePlug 1.0, com quatro máquinas. Foi ainda analisada a capacidade de transmissão do meio em função das cargas elétricas. Diversos tipos de cargas foram considerados na análise. Para levantamento da taxa de transmissão foi utilizado o programa computacional de gerenciamento de redes SNMP 7.0, da *Castle Rock*.

No Capítulo 2, são abordados os aspectos teóricos relativos à utilização da rede elétrica como canal de comunicação. Uma descrição do ambiente de comunicação é apresentada, analisando-se parâmetros como impedância, ruído e atenuação. Um breve histórico, bem como o estado da arte em pesquisa da tecnologia PLC no Brasil é analisado. Além disso, são mostrados outros protocolos PLC.

O padrão HomePlug 1.0 é descrito no Capítulo 3. Nesse capítulo, são detalhadas as camadas MAC e física, explicando aspectos sobre o esquema de modulação OFDM e a técnica de acesso CSMA/CA. O protocolo de comunicação do HomePlug 1.0 também será detalhado.

O Capítulo 4 mostra os resultados obtidos para a análise de vazão de uma rede HomePlug1.0. Experimentos em laboratório, cuja rede elétrica se apresenta como um ambiente industrial, são descritos e analisados. Testes de campo realizados em residências também são apresentados.

Por fim, no Capítulo 5 são apresentadas as conclusões dos principais aspectos abordados neste trabalho e propostas sugestões para a sua continuidade.

2 ASPECTOS TEÓRICOS

2.1 HISTÓRICO

A primeira técnica que possibilitou a utilização da rede de distribuição de energia elétrica para a transmissão de sinais de controle foi desenvolvida no início da década de 50. O método, conhecido como *Ripple Control*, era caracterizado pela utilização de baixas frequências, possibilitando comunicação a taxas de transmissão bem baixas e necessitando de alta potência para a transmissão. O sistema possibilitava comunicação unidirecional, sendo utilizado para tarefas simples como o acionamento da iluminação pública e o controle de carga. Novos sistemas com taxas ainda modestas foram desenvolvidos até a década de 80.

Os primeiros estudos referentes à utilização da rede elétrica como canal para comunicações foram conduzidos por algumas empresas de energia na Europa e nos Estados Unidos, ainda nos anos 80. As faixas de frequência entre 5-500 kHz eram as mais consideradas e dois fatores tiveram predominância nestes estudos: a relação sinal/ruído e a atenuação do sinal na rede. Sistemas capazes de fornecer comunicação de forma bidirecional através da rede de distribuição foram obtidos apenas na década de 90, sendo marcados pela utilização de frequências mais elevadas e menores níveis de potência transmitida.

Em 2004, o presidente da Comissão Federal de Comunicações dos EUA (FCC), Michael Powell, aprovou uma tecnologia emergente que pode fornecer acesso de alta velocidade à internet através de redes de eletricidade. Uma casa em um subúrbio do Estado de Maryland foi preparada para demonstrar o novo serviço, que transmite e-mail, páginas da web, serviço de telefonia e outros dados sobre a rede de energia existente (LINUXIT, 2006).

2.2 ESTADO DA ARTE

Diversas experiências já foram realizadas no Brasil, no sentido de se avaliar as potencialidades da tecnologia PLC para transmissão de voz e dados pela rede elétrica. As concessionárias Eletropaulo (São Paulo, SP), CELG (Goiânia, GO), CEMIG (Belo Horizonte, MG), COPEL (Curitiba, PR) e Light (Rio de Janeiro, RJ), fizeram experiências piloto, todas com sucesso (VIDAL, 2006).

Em 2004 a FITec Inovações Tecnológicas, em conjunto com a CELG, Eletropaulo e APTEL (Associação de Empresas Proprietárias de Infra-estrutura e Sistemas Privados de Telecomunicações), também desenvolveu várias experiências com sucesso, incluindo serviços de acesso à Internet e transmissão de dados e vídeo (FITEC, 2006).

A experiência mais recente, ainda em operação, denominada Projeto Barreirinhas, consistiu na implantação de uma 'Ilha Digital' na pequena localidade de Barreirinhas (MA), interligando escolas, prefeitura, postos de saúde e centro de artesanato à Internet, utilizando a rede elétrica como backbone, através da tecnologia PLC (FORUMPLC, 2006). A Figura 2.1 ilustra o projeto da cidade de Barreirinhas.

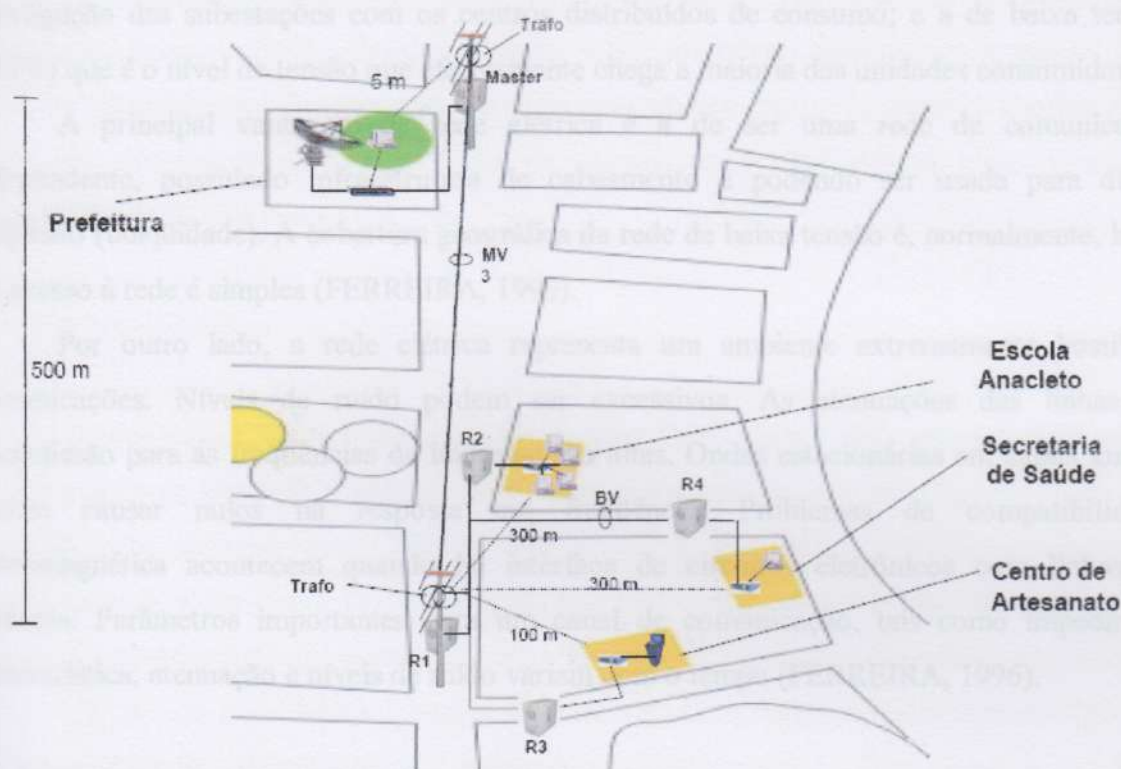


Figura 2.1 – Esquema do projeto Barreirinhas.

A FITEc, juntamente com a APTEL, tem trabalhado intensamente, objetivando criar esta oportunidade para o país. Recentemente coordenou proposta de parceria com a Comunidade Européia, colocando o Brasil como o único país fora da Comunidade Européia para integrar o projeto OPERA (*Open PLC European Research Alliance*), projeto no âmbito do programa *Broadband for all*, das Tecnologias para a Sociedade de Informação (IST) das atividades de pesquisa da Comunidade Européia (FITEC, 2006).

Os fatos acima, o grande número de atividades e experiências em andamento em todo o mundo, inclusive no Brasil, com a tecnologia PLC, os resultados já obtidos com esta tecnologia, as potencialidades da rede PLC para novos serviços permitem a inclusão da tecnologia PLC dentre aquelas com mais amplas possibilidades de revolucionar as comunicações e a inclusão digital brasileira, em futuro muito próximo, a conferir.

2.3 A REDE ELÉTRICA

A rede elétrica foi desenvolvida para transmissão de energia de forma eficiente e é, usualmente, classificada em três níveis (FERREIRA, 1996): a de alta tensão ($>100\text{kV}$) que é utilizada para interligar os centros de geração aos centros de consumo, geralmente percorrendo grandes distâncias; a de média tensão ($1 - 100\text{kV}$) que é responsável pela interligação das subestações com os centros distribuídos de consumo; e a de baixa tensão ($<1\text{kV}$) que é o nível de tensão que efetivamente chega a maioria das unidades consumidoras.

A principal vantagem da rede elétrica é a de ser uma rede de comunicação independente, possuindo infraestrutura de cabeamento e podendo ser usada para duplo propósito (ubiquidade). A cobertura geográfica da rede de baixa tensão é, normalmente, larga e o acesso à rede é simples (FERREIRA, 1996).

Por outro lado, a rede elétrica representa um ambiente extremamente hostil às comunicações. Níveis de ruído podem ser excessivos. As atenuações das linhas de transmissão para as frequências de interesse são altas. Ondas estacionárias em cabos longos podem causar nulos na resposta em frequência. Problemas de compatibilidade eletromagnética acontecem quando há interface de circuitos eletrônicos com linhas de potência. Parâmetros importantes para um canal de comunicação, tais como impedância característica, atenuação e níveis de ruído variam com o tempo (FERREIRA, 1996).

2.4 PRIMEIROS PROTOCOLOS PLC COMERCIAIS

2.4.1 Protocolo X10

O sistema de automação predial chamado X-10 foi desenvolvido pela companhia escocesa, *Pico Eletronics*. O formato de codificação do padrão X-10 é do tipo padrão, porém patenteado, usando a transmissão de corrente portadora (*Power Line Carrier* – PLC).

O X-10 comporta até 256 endereços diferentes, 16 códigos de unidade (1-16) para cada um dos 16 códigos de compartimentos ou setores (A-P). Não existem restrições ao usar múltiplos transmissores, cada um inserido num código de setor sobre o mesmo cabeamento. Assim, vários receptores podem ser colocados sob o mesmo endereço de setor e de unidade, provendo assim, comandos em paralelo.

Podem ser encontrados problemas durante as comunicações no caso da área da rede ser superior a 185 metros quadrados. Este problema pode ser solucionado com a aplicação de

uma ponte ou de um amplificador de sinal. A interface com o computador é realizada através da porta serial RS-232.

O X-10 permite o controle de 128 eventos diários distintos podendo desligar o computador depois de ser feita a programação diária ou semanal e oferece a possibilidade de enviar comandos diretamente do computador para os receptores.

Todos os sistemas baseados nesse padrão são compatíveis entre si. O padrão X-10 proporciona uma automação simples e barata, sendo totalmente modular. A instalação pode ser feita inicialmente com poucos equipamentos, dando espaço a futuras ampliações e agregando simplesmente novos módulos de controle ao sistema. Apesar disso, a taxa de transmissão do X-10 é baixa (120 bps).

2.4.2 Protocolo CEBus

O protocolo CEBus (Consumer Electronics Bus) oferece dois sistemas básicos. O primeiro fornece controle a baixas velocidades, aproximadamente 10 kbps; o segundo é utilizado para sistemas que utilizam altas taxas de transmissão de dados tais como transmissões de vídeo e som. O CEBus opera em redes ponto a ponto, e como resultado, não é essencial a existência de um sistema de controle. A versão padrão é mais versátil, pois permite a utilização de um vasto leque de meios de comunicação e linhas portadoras de energia tais como: par trançado, rádio frequência, infravermelho, cabo coaxial e fibra óptica. A topologia de redes do CEBus é similarmente flexível, permitindo o compartilhamento dos cabos dos serviços telefônicos com a rede CEBus, a qual pode conter pontes e roteadores para interligar outros serviços e sistemas à rede.

O protocolo CEBus standard utiliza o método de transmissão conhecido como espalhamento espectral. As transmissões CEBus são baseadas em pacotes de dados que podem variar de tamanho, dependendo da quantidade de dados incluídos. O tamanho mínimo do pacote é de 64 bits, com uma taxa média de transmissão de 7500 bps.

Os endereços CEBus standard que são ativados na fábrica através do hardware, incluem quatro bilhões de possibilidades ou combinações. Alguns sistemas de expansão de espectro oferecem níveis de segurança elevados.

O protocolo CEBus foca preferencialmente a generalidade, e procura o estabelecimento de regras específicas, as quais vão limitar as oportunidades para um crescimento futuro por restrição da implementação do protocolo em relação a alguns meios de comunicação e plataformas de hardware.

2.4.3 Protocolo LonWorks

LonWorks é uma tecnologia desenvolvida pela empresa *Echelon Corporation*. Essa tecnologia provê um protocolo de comunicação ponto-a-ponto, implementando técnicas de acesso múltiplo por sensibilidade de portadora (*Carrier Sense Multiple Access* – CSMA). Diferente do protocolo CEBus, a tecnologia *LonWorks* é um esquema de modulação de espalhamento espectral com banda estreita (125 – 140 kHz, BPSK), que usa um correlacionador multi-bit necessário para preservar os dados na presença de ruído, com um cancelamento de ruído impulsivo patenteado. Uma vez que essa tecnologia usa banda estreita, os sinais transmitidos estão sujeitos a níveis de distorção muito menores que sinais de espalhamento espectral banda larga. O uso de técnicas de processamento digital de sinais no receptor permite as características mencionadas anteriormente bem como uma filtragem digital de ruídos fora da banda. O transceptor recomendado para estas aplicações é conhecido como PLT-21.

2.5 RUÍDOS DO CANAL DE COMUNICAÇÃO

Como dito anteriormente, a rede de distribuição de energia elétrica de baixa voltagem é um meio extremamente hostil como canal de comunicações. Nessa rede elétrica, as maiores fontes de ruído são os equipamentos eletro-eletrônicos domésticos e os equipamentos de escritório conectados à rede (FERREIRA, 1996).

Vines e outros, em (VINES, 1985), deu a seguinte classificação de ruído para a linha de baixa tensão:

- Ruídos que têm componentes de linha sincronizados com a frequência do sistema de potência: As principais fontes deste tipo de ruído são os retificadores controlados de silício (*silicon controlled rectifier* – SCR) e as máquinas fotocopiadoras. O espectro deste ruído consiste de uma série de harmônicos do dobro da componente fundamental (120 Hz).
- Ruído com o espectro suave: As principais fontes deste tipo de ruído são os motores universais e os pequenos motores com bobinado serial, que podem ser encontrados em diversas aplicações domésticas. Este tipo de ruído pode ser modelado como um ruído branco com espectro limitado, tendo uma densidade espectral de potência maior que o ruído citado anteriormente. Dispositivos com motores universais são

usados por um curto período de tempo. Desta forma, o efeito deste tipo de ruído é reduzido quando um protocolo de controle de erro é implementado.

- Ruído impulsivo de evento único: Este ruído é causado por fenômenos de chaveamento, tal como termostatos, e podem ser modelados como impulsos. Experiências com ruído impulsivo em ambientes de comunicações mostram que este tipo de ruído pode ser sobreposto com alguma técnica de correção de erro.
- Ruído não síncrono: Este é um ruído periódico que ocorre com frequências diferentes da frequência da rede ou de múltiplos de frequência da rede. As principais fontes deste tipo de ruído são os televisores, onde um pulso de sincronismo ocorre a cada 63,5 μ s, causando fortes componentes de ruído em torno de 15734 Hz e com harmônicos superiores. Monitores de computadores também produzem esse tipo de ruído, mas em frequências diferentes das utilizadas pelos televisores.

Marubayashi e Tachikawa em (MARUBAYASHI, 1996) listaram alguns equipamentos eletro-eletrônicos domésticos e suas características de amplitude e duração de ruídos, dos quais, alguns foram listados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Características de amplitude e duração de ruídos.

Equipamento elétrico	Amplitude (mV)		Duração (μ s)	
	Valor médio	Desvio padrão	Valor médio	Desvio padrão
Ferro elétrico	369,3	585,8	760,2	347,9
Forno elétrico	329,2	431,2	1015,8	505,2
Refrigerador	285,4	457,6	755,9	407,7
Lâmpada fluorescente	951,1	1494,4	774,1	462,2
Lâmpada incandescente	556,7	675,8	420,6	209,6
Ventilador	443,6	638,5	357,4	228,7
Televisão	824,1	1157,3	1047,4	468,3
Forno de microondas	505,9	713,3	1008,8	48,6
Aspirador de pó	1457,5	2155,5	Sempre	—

2.6 IMPEDÂNCIA DO CANAL

A rede elétrica é largamente espalhada com inúmeras cargas conectadas em paralelo. A impedância do canal sofre grandes flutuações, que dependem das cargas conectadas à rede (FERREIRA, 1996).

Malack e Engstrom em (MALACK, 1976) apresentaram resultados de várias medições de impedância. Para estes resultados, a impedância variou de 0 a 80 Ω dentro da faixa de frequência de 20 a 100kHz.

De acordo com Vines em (VINES, 1985) a impedância total da rede elétrica de baixa tensão resulta de:

- Impedância do transformador de distribuição: Esta impedância aumenta com a frequência;
- Impedância característica dos cabos usados: Uma grande variedade de cabos é usada, o que pode ser modelado por indutores e resistores conectados em série;
- Impedância dos equipamentos conectados à rede: Esta impedância varia, tipicamente, de 10Ω a 100Ω .

A Figura 2.2 mostra uma curva da impedância em função da frequência apresentada por Vines em (VINES, 1985).

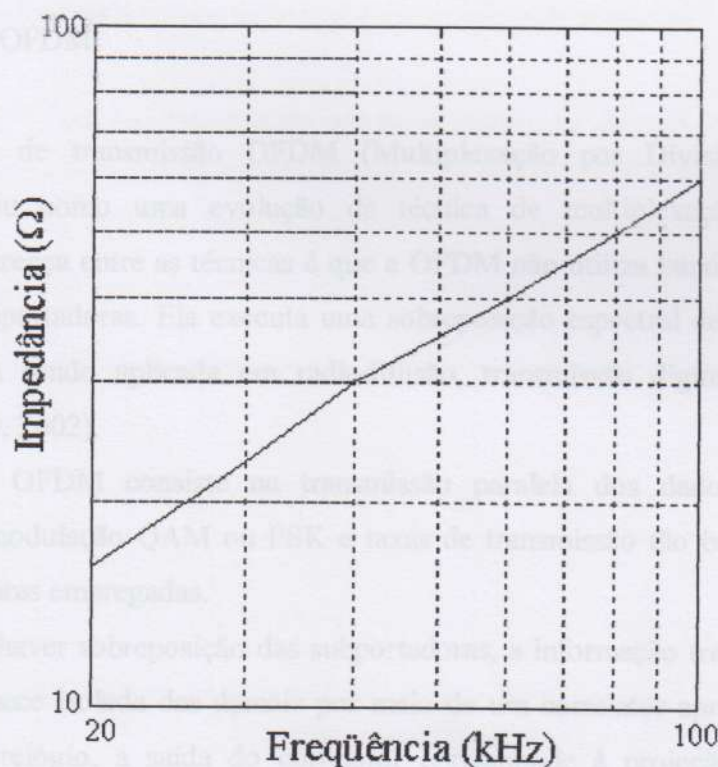


Figura 2.2 – Impedância da linha de potência do oeste da Alemanha.

2.7 ATENUAÇÃO DO SINAL

Para a rede de baixa voltagem a taxa de atenuação é da ordem de 100dB/km (FERREIRA, 1996). A taxa de atenuação de linhas de potência é, principalmente, influenciada pelas perdas nos cabos e desvanecimento de múltiplos percursos devido às

reflexões nos pontos de derivação dos circuitos. Desta forma, cada link tem sua própria taxa de atenuação.

Suh e outros (SUH, 1991) listaram fatores que determinam a atenuação do sinal. Estes incluem:

- Dependência com o tempo: A atenuação varia de acordo com o tempo, t , pois as cargas conectadas à rede mudam instantaneamente.
- Dependência com a frequência: Para frequências superiores a 100kHz, a atenuação aumenta 0,25 dB/kHz.
- Dependência com a distância: em situações práticas, a pior taxa de atenuação é de 100 dB/km.

2.8 A TÉCNICA OFDM

A técnica de transmissão OFDM (Multiplexação por Divisão de Frequências Ortogonais) surgiu como uma evolução da técnica de multiplexação por divisão de frequência. A diferença entre as técnicas é que a OFDM não utiliza bandas de guarda para a separação das subportadoras. Ela executa uma sobreposição espectral dessas subportadoras. Essa técnica vem sendo aplicada em radiodifusão, transmissão digital e redes sem fio (*wireless*) (PINTO, 2002).

A técnica OFDM consiste na transmissão paralela dos dados usando diversas portadoras, com modulação QAM ou PSK e taxas de transmissão tão baixas quanto seja o número de portadoras empregadas.

Apesar de haver sobreposição das subportadoras, a informação transportada por cada uma delas permanece isolada das demais por meio de um correlator apropriado. Utilizando sincronização de relógio, a saída do correlator corresponde à projeção do sinal OFDM recebido sobre a subportadora a ele associado, ou seja, existe ortogonalidade entre as subportadoras. Esta sobreposição espectral produz uma economia significativa de banda, se comparada com a técnica FDM tradicional. Pode-se observar essa economia na Figura 2.3.

A redução na taxa de transmissão implica em uma diminuição da sensibilidade à seletividade em frequência causada por múltiplos percursos. Isso torna essa técnica bastante robusta a esse tipo de desvanecimento (PINTO, 2002).

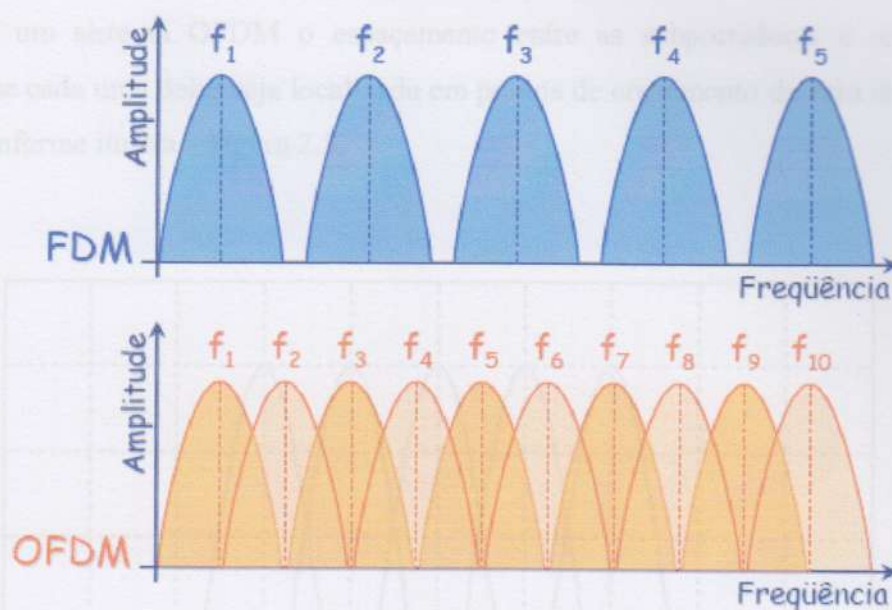


Figura 2.3 – Comparação entre o espectro FDM convencional e o OFDM.

A Figura 2.4 ilustra o espectro de um pulso retangular gerado na modulação QAM, com cruzamentos de zero em pontos múltiplos de $1/T$, em que T é a duração de um símbolo QAM.

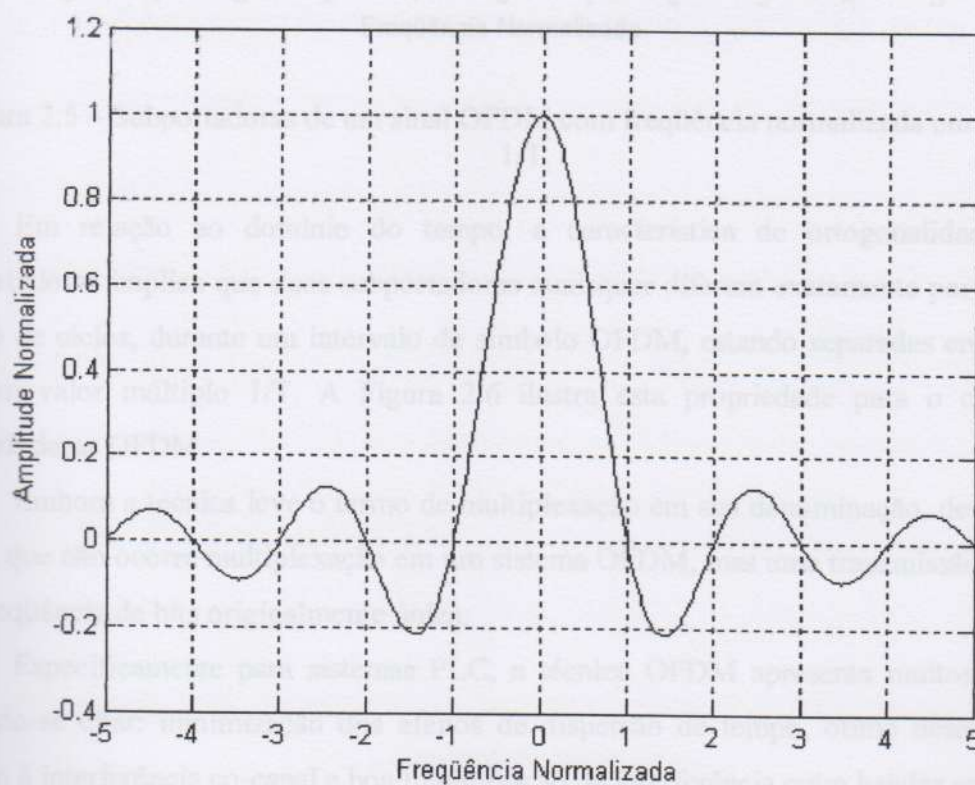


Figura 2.4 – Espectro de um sinal QAM com frequência normalizada em função de $1/T$.

Em um sistema OFDM o espaçamento entre as subportadoras é selecionado de maneira que cada uma delas seja localizada em pontos de cruzamento de zero do espectro das demais, conforme ilustra a Figura 2.5.

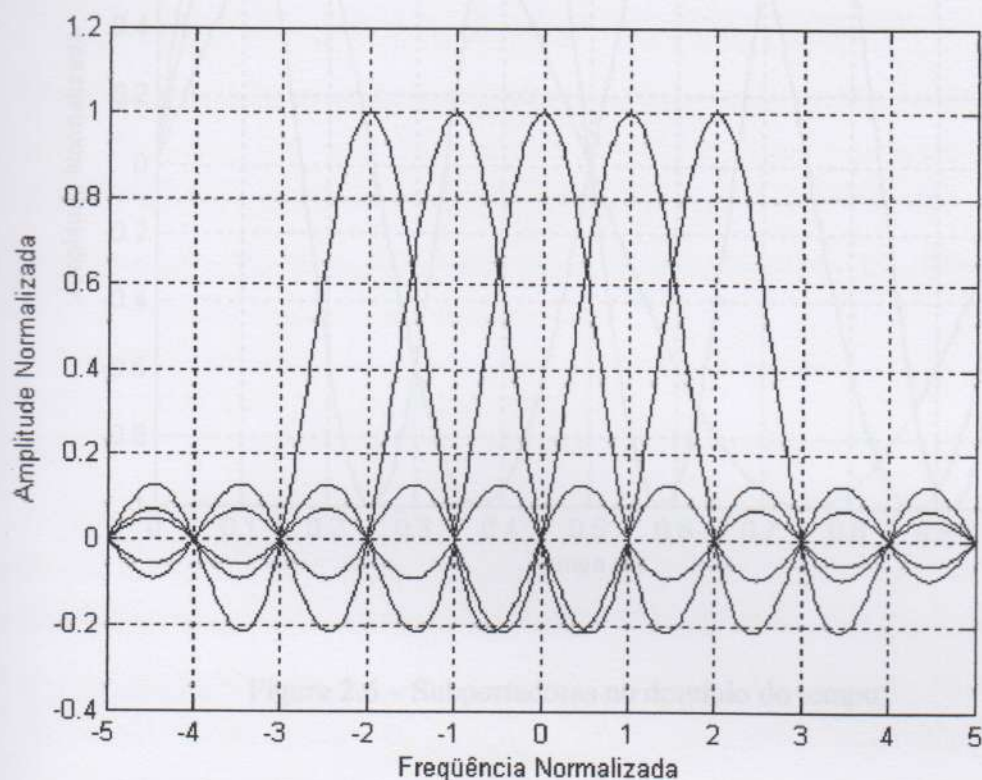


Figura 2.5 – Subportadoras de um sinal OFDM com frequência normalizada em função de $1/T$.

Em relação ao domínio do tempo, a característica de ortogonalidade entre as subportadoras implica que duas subportadoras quaisquer diferem exatamente por um número inteiro de ciclos, durante um intervalo de símbolo OFDM, estando separadas em frequência por um valor múltiplo $1/T$. A Figura 2.6 ilustra esta propriedade para o caso de três subportadoras OFDM.

Embora a técnica leve o termo de multiplexação em sua denominação, deve-se ter em mente que não ocorre multiplexação em um sistema OFDM, mas uma transmissão paralela de uma sequência de bits originalmente única.

Especificamente para sistemas PLC, a técnica OFDM apresenta muitos benefícios, podendo-se citar: minimização dos efeitos de dispersão de tempo, ótimo desempenho em relação à interferência co-canal e boa minimização da interferência entre bandas estreitas.

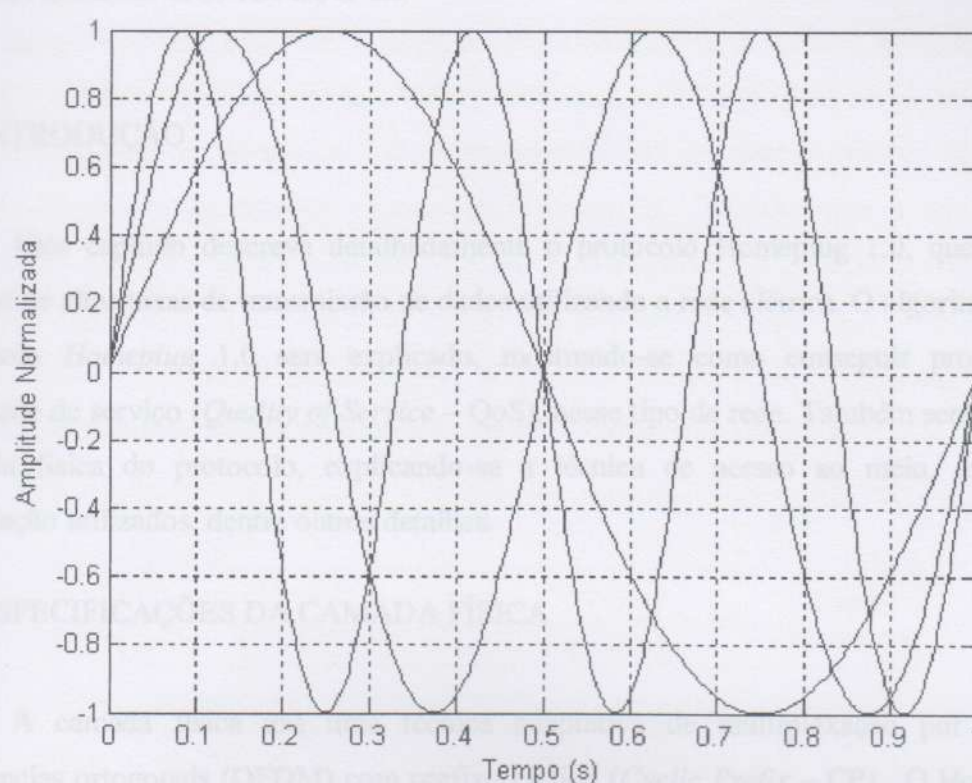


Figura 2.6 – Subportadoras no domínio do tempo.

A comunicação sem fio utiliza uma técnica de multiplexação de frequências ortogonais (OFDM) que permite a transmissão de dados em paralelo. O IEEE 802.11a utiliza a OFDM com uma banda de 4,494MHz a 70,7MHz. A banda de 0 a 250MHz é dividida em 128 portadoras igualmente espaçadas de 3,125MHz (IEEE, 2003). Devido à interferência entre as portadoras, não são utilizadas para evitar interferência em serviços de comunicação de radiomobili- dade (LEE, 2000). Essa técnica avançada permite o uso de diferentes tipos de esquemas de codificação e modulação para cada subportadora (CAMPISTA, 2002). Os códigos Reed-Solomon e de correção de erros convolucionais são usados para correção de erro. Três variações da técnica de modulação por chaveamento de fase (Phase Shift Keying – PSK) são usadas: a PSK binária coerente (BPSK), a BPSK diferencial (DBPSK) e a PSK de quadratura diferencial (DQPSK) (LEE, 2000). Em cada caso a técnica adapta a largura de banda e a taxa de dados de acordo com as condições do canal. A taxa de transmissão pode variar de 1Mbps a 14Mbps. Os nós devem estimar as condições do canal, no mínimo, a cada 5s. Isso permite a sincronização da adaptação da taxa de transmissão (CAMPISTA, 2002).

A Figura 3.1 ilustra um quadro longo da camada física. São transmitidos, basicamente, quatro campos distintos: o pré-âmbulo, o controle de quadro (Frame Control – FC), a carga útil e os sinais de resolução de prioridade.

O pré-âmbulo e o controle de quadro são usados para sincronização e controle. Eles iniciam e finalizam quadros longos e apenas os dados são adaptados para as condições do canal. Há três tipos de delimitadores: os de início e fim de quadro e os de resposta. Eles

3 PROTOCOLO HOMEPLUG 1.0

3.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo descreve detalhadamente o protocolo Homeplug 1.0, que permitiu o alcance de altas taxas de transmissão de dados utilizando a rede elétrica. O algoritmo MAC do protocolo *Homeplug* 1.0 será explicado, mostrando-se como conseguir provimento de qualidade de serviço (*Quality of Service* – QoS), nesse tipo de rede. Também será detalhada a camada física do protocolo, explicando-se a técnica de acesso ao meio, esquemas de modulação utilizados, dentre outros detalhes.

3.2 ESPECIFICAÇÕES DA CAMADA FÍSICA

A camada física usa uma técnica adaptativa de multiplexação por divisão de frequências ortogonais (OFDM) com prefixo cíclico (*Cyclic Prefix* – CP). O HomePlug usa OFDM em uma banda de 4,49MHz a 20,7MHz. A banda de 0 a 25MHz é dividida em 128 portadoras igualmente espaçadas, das quais 84 são usadas (subportadoras 23 a 106). Dessas 84, oito portadoras são descartadas para evitar interferência em serviços de comunicações de radioamador (LEE, 2000). Essa técnica avançada permite o uso de diferentes tipos de esquemas de codificação e modulação para cada subportadora (CAMPISTA, 2002). Os códigos *Reed-Solomon* e de erros convolucionais são usados para correção de erro. Três variações da técnica de modulação por chaveamento de fase (*Phase Shift Keying* – PSK) são usadas: a PSK binária coerente (BPSK), a BPSK diferencial (DBPSK) e a PSK de quadratura diferencial (DQPSK) (LEE, 2000). Em cada caso a técnica adapta a largura de banda e a taxa de dados de acordo com as condições do canal. A taxa de transmissão pode variar de 1Mbps a 14Mbps. Os nós ativos estimam as condições do canal, no mínimo, a cada 5s. Isso permite a maximização da adaptação da taxa de transmissão (CAMPISTA, 2002).

A Figura 3.1 ilustra um quadro longo da camada física. São transmitidos, basicamente, quatro campos distintos: o preâmbulo, o controle de quadro (*Frame Control* – FC), a carga útil e os sinais de resolução de prioridade.

O preâmbulo e o controle de quadro são usados para sincronização e controle. Eles iniciam e finalizam quadros longos e apenas os dados são adaptados para as condições do canal. Há três tipos de delimitadores: os de início e fim de quadro e os de resposta. Eles

incluem o tipo de delimitador e informações de controle de contenção. No delimitador de início de quadro (*Start of Frame* – SoF), o campo de controle de quadro inclui o tamanho do quadro e o índice de mapa de tons (*Tone Map Index* – TMI), para que o receptor possa decodificar o restante do quadro. O delimitador de fim de quadro (*End of Frame* – EoF) contém informações de prioridade usadas para contenção. Delimitadores de resposta contêm informação para que um transmissor verifique se a resposta foi enviada em função de um quadro já transmitido. Um espaço de fim de quadro (*End of Frame Gap* – EFG) de $1,5\mu\text{s}$ é inserido entre a sequência de checagem de quadro (*Frame Check Sequence* – FCS) e o delimitador de fim de quadro para permitir processamento (CAMPISTA, 2002).

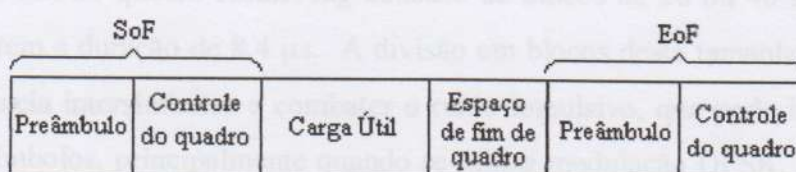


Figura 3.1 – Formato do quadro físico.

A Figura 3.2 ilustra a composição de um FC. Cada FC é formado por 25 bits. O campo de tipo de delimitador distingue entre SoF, EoF e delimitador de resposta. Cada delimitador tem 8bits de CRC na sequência de checagem de quadro (*Frame Check Sequence* – FCS) para detectar erros no FC (LEE, 2000).

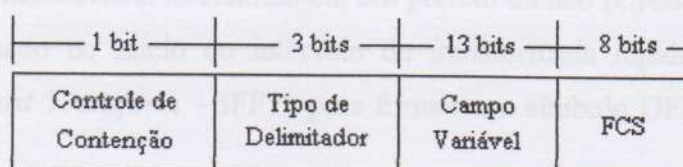


Figura 3.2 – Composição do controle de quadro (FC).

Os delimitadores e os sinais de resolução são detectados e decodificados por todos os receptores, por isso eles usam todas as subportadoras com a mesma modulação e codificação. A carga útil é adaptada às condições do canal através de negociações entre o transmissor e o receptor, durante a estimação do canal. Essa estimação determina quais subportadoras serão usadas e que tipos de modulação e codificação serão aplicados.

A sensibilidade da portadora (*Physical Carrier Sense* – PCS) é desempenhada pela camada física e ajuda à camada MAC a determinar quando o meio está livre. Para evitar colisões, uma estação que deseja transmitir um quadro de dados deve inicialmente escutar o meio. Para determinar se o meio está ocupado, as estações usam detecção física e detecção

virtual de portadora. Só a detecção física não é suficiente devido às atenuações e ruídos existentes na rede elétrica. Essa detecção funciona através do reconhecimento de preâmbulos e transmissões de sinais de prioridade. A detecção virtual da portadora usa informações do quadro “escutado” para conhecer a duração da transmissão e assim estabelecer um vetor de alocação (LEE, 2000).

O preâmbulo também é usado para controle automático de ganho (CAG), bem como para formar a referência de fase para a codificação do controle de quadro. Ele ainda é usado para detecção do delimitador na PCS; e o tempo necessário para se determinar sua presença indica o tamanho do *slot* usado pela camada MAC no período de contenção.

A carga útil do quadro HomePlug consiste de blocos de 20 ou 40 símbolos OFDM. Cada símbolo tem a duração de 8,4 μ s. A divisão em blocos deste tamanho é utilizada para evitar interferência intersímbolos e combater o ruído impulsivo, que pode interferir em uma sequência de símbolos, principalmente quando se utiliza modulação DPSK, na qual, em caso de interferência, pelo menos dois símbolos são perdidos por vez (LEE, 2000).

Quando uma transmissão, que usa um TMI acordado entre transmissor e receptor, falha, uma forma especial de modulação e correção de erro é usada. A técnica OFDM robusta (*Robust OFDM – ROBO*) é baseada na modulação DBPSK com tempo extensivo e diversidade de frequências. Essa redundância reduz as taxas de modulação e de codificação. Em modo ROBO a taxa de transmissão máxima é de 1Mbps.

Para evitar interferência intersímbolos, um prefixo cíclico (*Cyclic Prefix - CP*) de 172 amostras é adicionado no início do intervalo da transformada rápida de Fourier inversa (*Inverse Fourier Fast Transform – IFFT*) para formar um símbolo OFDM de 428 amostras (LEE, 2000).

Antes dos símbolos OFDM serem formados na interface analógica (*Analog Front End - AFE*), os dados são misturados, codificados, puncionados e separados pelo CP no transmissor. Essa interface é formada, basicamente, por cinco blocos: o bloco de mapeamento da constelação, o bloco IFFT, o bloco de preâmbulo, o bloco de prefixo cíclico e o bloco de cosseno modificado (*Raised Cosine – RC*) (LEE, 2000).

O bloco de mapeamento agrupa os bits de dados e os mapeia dentro de um ponto da constelação da técnica de modulação selecionada. Essa seleção também é feita por esse bloco, bem como a escolha das portadoras que serão usadas no bloco IFFT, conforme especificado pelo mapa de tons. O bloco IFFT modula as portadoras definidas no TMI a partir dos pontos da constelação, no tempo discreto. O bloco de preâmbulo insere o

preâmbulo, enquanto que o CP é adicionado pelo bloco de prefixo cíclico. O bloco RC é empregado para reduzir a energia fora do canal (LEE, 2000).

3.3 ESPECIFICAÇÕES DA CAMADA MAC

O protocolo de controle de acesso ao meio (*Medium Access Control – MAC*) do Homeplug 1.0 é um protocolo CSMA/CA modificado, com sinalização de prioridade. Um dispositivo Homeplug 1.0 opera em modo *ad hoc*, já que todos os dispositivos se comunicam uns com os outros livremente, sem qualquer coordenação centralizada (CAMPISTA, 2002).

A camada MAC usa essa técnica CSMA/CA para transportar dados, de 46 a 1500 bytes, encapsulados nos quadros Ethernet IEEE 802.3, como unidades de dados de serviço MAC (*MAC Service Data Units – MSDUs*).

Um esquema de prioridade de quatro níveis garante acesso estritamente priorizado. Segmentação de limites de atraso, para tráfego de alta prioridade e modos de acesso livre de contenção suportam baixas exigências de variações de taxa de atraso (*jitter*). A contenção para o canal é limitada àqueles nós que sobrevivem ao período de resolução de prioridade.

Estações que detectam uma colisão devem invocar o procedimento de *backoff*, pelo qual essas estações aumentam a quantidade de atraso randômico, que elas devem aguardar no período de contenção, até um valor máximo. Esse valor máximo depende do nível de prioridade dos dados transmitidos.

Diferente de outros métodos CSMA/CA, o Homeplug 1.0 usa o número de vezes que uma estação submeteu-se a outras estações, no mesmo nível de prioridade. Isso é feito para se inferir a quantidade de tráfego presente naquele nível e ajustar a faixa de *backoff*, de acordo com esse tráfego.

Funções MAC de gerenciamento suportam estimação do canal, adaptação de taxas e gerenciamento de chaves para criptografia. Essa criptografia é necessária para isolar redes lógicas. Todas as estações da mesma rede lógica compartilham a mesma chave DES (*Data Encryption Standard*), conhecida como chave de encriptação de rede (*Network Encryption Key – NEK*). Isso é necessário uma vez que diferentes casas ou apartamentos compartilham a mesma fase, o que permitiria que uma casa escutasse quadros de uma casa próxima (LEE, 2000).

3.3.1 Sensitividade da Portadora e Detecção de Colisão

Devido à atenuação, ao ruído e à adaptação do canal, é difícil usar somente a sensibilidade física da portadora (*Physical Carrier Sense* – PCS), como é usado em muitos outros sistemas CSMA/CA, tal como o Ethernet. A camada física do Homeplug 1.0 executa a sensibilidade física da portadora detectando preâmbulos ou afirmações do *slot* de prioridade, enquanto a camada MAC executa a sensibilidade virtual da portadora (*Virtual Carrier Sense* – VCS), usando o comprimento do campo SoF, junto com a informação de que se uma resposta é esperada ou não, que está presente tanto no SoF quanto no EoF.

Dessa forma, a detecção direta da colisão, como usada no Ethernet, não pode ser realizada, devido à atenuação e a outros fatores. Assim, as colisões podem apenas serem quantizadas a partir de uma falta da resposta de um quadro emitido. Isto imprime um custo elevado às colisões se comparado aos sistemas de CSMA/CD. Dessa forma, elas devem ser evitadas, sendo menos agressivas quando o meio está ocupado. Apesar de transmitir assim que o meio está inativo, como no padrão Ethernet, o HomePlug 1.0 usa CSMA/CA, similar ao padrão IEEE 802.11, no qual após cada quadro há um período de contenção, que consiste em uma sucessão de *slots* curtos (35,84µs para o HomePlug 1.0), durante o qual qualquer estação pode iniciar uma transmissão, contanto que não tenha detectado que nenhuma outra estação começou a transmitir antes desse *slot* (LEE, 2000).

3.3.2 Encapsulamento do Quadro IEEE 802.3

As MSDUs são recebidas na interface do *host* e incluem o endereço de destino (*Destination Address* – DA), o endereço de origem (*Source Address* – AS), um rótulo opcional de VLAN, o tipo/tamanho e os dados. Todas essas entidades, exceto o AS e o DA, são colocadas em um bloco do serviço (*Service Block* – SB), que é a unidade básica de transferência de informação da camada MAC. Cada SB é emitido ao destino como o corpo do quadro de uma unidade de dados do protocolo MAC (MAC Protocol Data Unit – MPDU), cujo cabeçalho tem os endereços do destino e da fonte.

Cada SB consiste de um do controle de encriptação (ECtl) de 9 bytes, seguidos por um rótulo opcional de VLAN de 4 bytes, um campo de informação de gerenciamento MAC opcional de tamanho variável, 2 bytes para o tipo se contiver um MSDU, os dados do quadro de comprimento variável, terminando em 0 a 7 bytes do PAD da encriptação (E-PAD) e em 4 bytes de ICV, conforme ilustra a Figura 3.3 (LEE, 2000). Somente o controle de encriptação é enviado em branco; o resto é criptografado com a NEK.

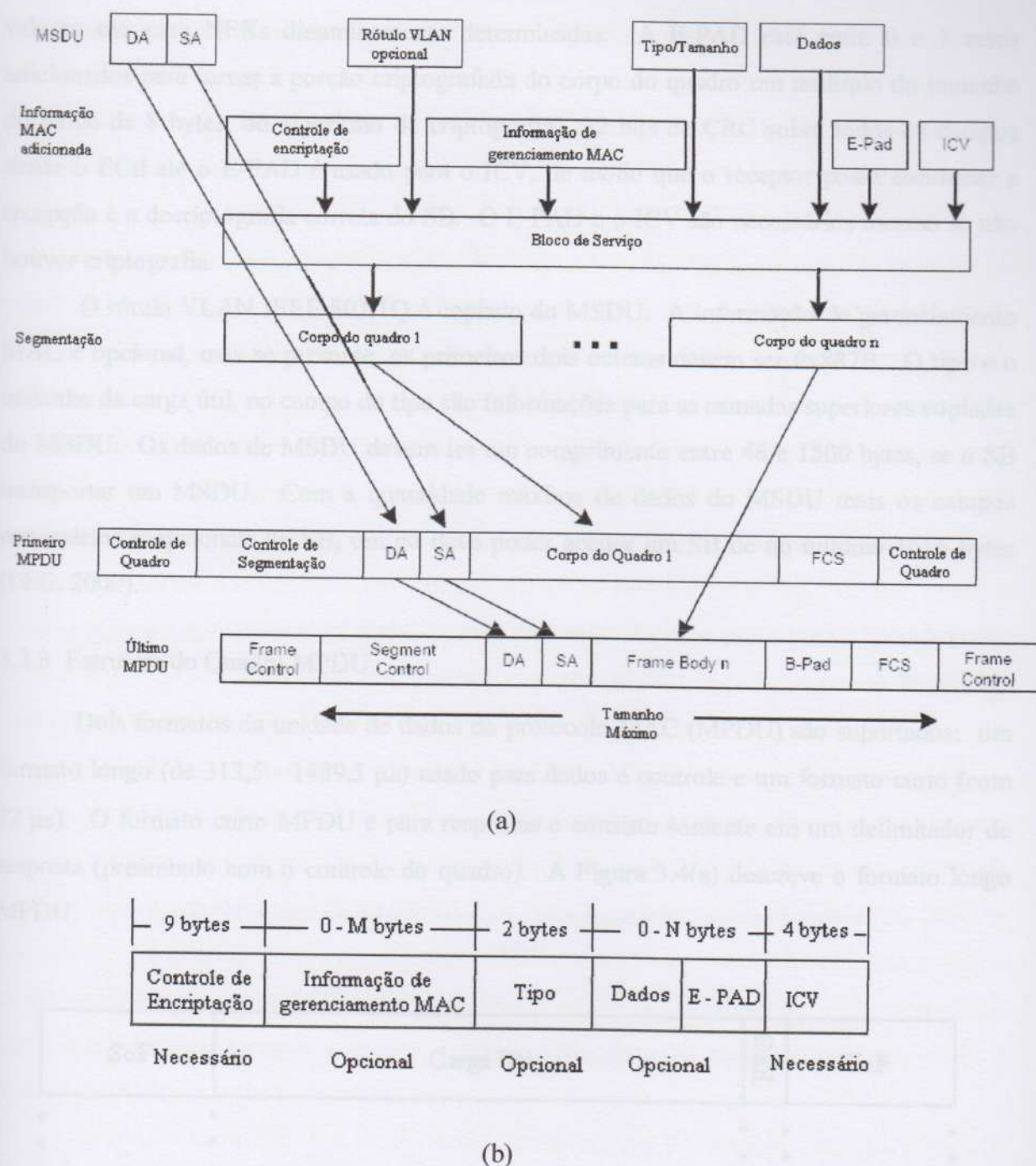


Figura 3.3 – Bloco de serviço: (a) Segmentação e criação do bloco de serviço e (b) Campos do SB.

O ECTl, a E-PAD e o ICV são obrigatórios em todos SBs. O primeiro byte do ECTl é o campo de seleção da chave de criptografia (EKS), seguido por oito bytes do vetor da inicialização (IV) usado pelo algoritmo de criptografia. Um valor de 0x00 para o EKS indica a chave *default*, que é diferente para cada estação e é ajustada pelo fabricante. Outros 255

valores são para NEKs dinamicamente determinadas. A E-PAD está entre 0 e 7 zeros adicionados para tornar a porção criptografada do corpo do quadro um múltiplo do tamanho do bloco de 8 bytes, do algoritmo de criptografia. 32 bits de CRC sobre todos os campos desde o Ectl até o E-PAD é usado para o ICV, de modo que o receptor possa confirmar a recepção e a decifração correta do SB. O E-PAD e o ICV são necessários mesmo se não houver criptografia.

O rótulo VLAN IEEE 802.1Q é copiado do MSDU. A informação de gerenciamento MAC é opcional, mas se presente, os primeiros dois octetos devem ser 0x887B. O tipo e o tamanho da carga útil, no campo do tipo são informações para as camadas superiores copiadas do MSDU. Os dados de MSDU devem ter um comprimento entre 46 e 1500 bytes, se o SB transportar um MSDU. Com a quantidade máxima de dados do MSDU mais os campos necessários e opcionais do SB, um nó deve poder aceitar um SB de no mínimo 1616 bytes (LEE, 2000).

3.3.3 Estrutura do Quadro MPDU

Dois formatos da unidade de dados do protocolo MAC (MPDU) são suportados: um formato longo (de 313,5 - 1489,5 μ s) usado para dados e controle e um formato curto (com 72 μ s). O formato curto MPDU é para respostas e consiste somente em um delimitador de resposta (preâmbulo com o controle do quadro). A Figura 3.4(a) descreve o formato longo MPDU.

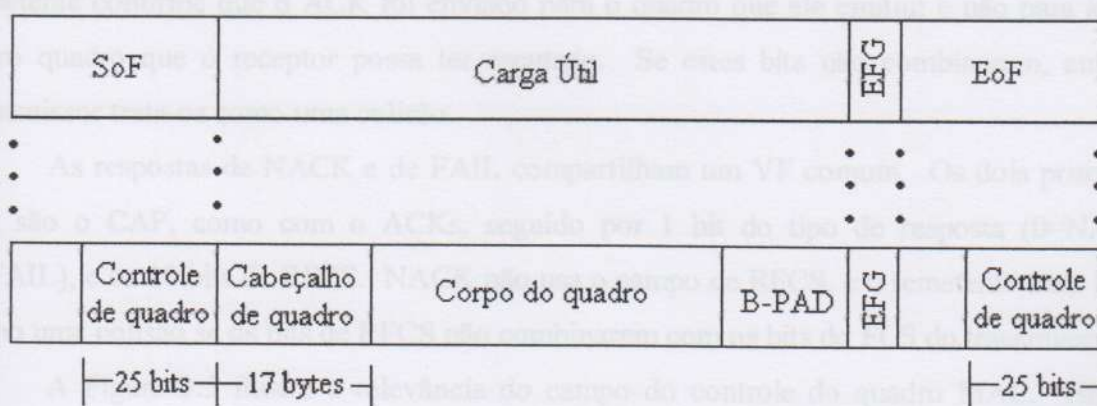


Figura 3.4 – Formato MPDU longo.

Os 25 bits de controle de quadro consistem em: 1 bit para o controle de contenção (CC), seguido por 3 bits do tipo do delimitador (DT), um campo variável de 13 bits (VF), com os últimos 8 bits da seqüência de checagem do quadro. Durante uma rajada de segmentos ou

durante acesso livre de contenção, $CC = 1$ até o último segmento. Neste caso, somente o tráfego de uma prioridade mais elevada pode tomar do transmissor o acesso ao canal, desde a transmissão do seu MPDU até a sua resposta. O campo DT codifica se o delimitador é um SoF, EoF ou um delimitador de resposta. O FCS é um CRC de 8 bits que verifica os outros 17 bits.

No SoF, o campo variável (*Variable Field* – VF) mantém um campo de tamanho de quadro (*Frame Length* – FL) de 8 bits e um campo do índice de mapa de tons de 5 bits. O FL indica o número de blocos de transmissão na carga útil do MPDU longo; e se estes blocos estão seguidos ou não por uma unidade de 20 símbolos. O tamanho codificado suporta 8 tamanhos de 20 símbolos incrementados de 20 a 160 símbolos. O TMI é o índice que o receptor se usa encontrar o mapa de tons necessário para demodular e decodificar a carga útil, conforme acordado após a estimação do canal. Embora haja 5 bits indicando 32 TMIs possíveis, a metade é reservada e um (0b00000) é usado para indicar o modo ROBO, restando 15 disponíveis para serem negociados com o receptor. Deve-se notar que o uso do modo ROBO restringe o campo do FL, porque o modo ROBO suporta somente blocos de transmissão de 40 símbolos físicos.

No EoF, o campo variável mantém 2 bits de prioridade de acesso ao canal (CAP) do quadro. O CAP é usado durante uma rajada para determinar se um nó pode executar a rajada.

O campo variável para ACKs inclui também um CAP de 2 bits que ecoa a prioridade do quadro para o qual a resposta foi gerada. Os 11 bits restantes são o FCS recebido (RFCS), que são o 11 LSBs do campo do FCS do MPDU reconhecido. Estes bits permitem que o remetente confirme que o ACK foi enviado para o quadro que ele emitiu; e não para algum outro quadro que o receptor possa ter escutado. Se estes bits não combinarem, então o transmissor trata-os como uma colisão.

As respostas de NACK e de FAIL compartilham um VF comum. Os dois primeiros bits são o CAP, como com o ACKs, seguido por 1 bit do tipo de resposta (0=NACK, 1=FAIL), e os 10 bits de RFCS. NACK não usa o campo de RFCS, e o remetente trata FAIL como uma colisão se os bits de RFCS não combinarem com os bits do FCS do transmissor.

A Figura 3.5 ilustra a relevância do campo do controle do quadro MAC. Há três maneiras em que FC é usado pelo MAC. A Figura 3.5(a) mostra seu uso para a sentividade virtual da portadora. O campo do tamanho do SoF e o campo do tipo do SoF e do EoF (que incluem se espera-se uma resposta ou não) são usados para determinar quando o período de resolução de prioridade deve terminar e a contenção começar. A Figura 3.5(b) mostra como o bit de controle de contenção de todos os delimitadores e dos bits de prioridade de acesso ao

canal do SoF e dos delimitadores de resposta são usados para a finalidade do controle de contenção. Por fim, a Figura 3.5(c) descreve como a parte do FCS do MPDU é copiado no delimitador de resposta para confirmar ACKs e falha ao remetente no mecanismo de ARQ (LEE, 2000).

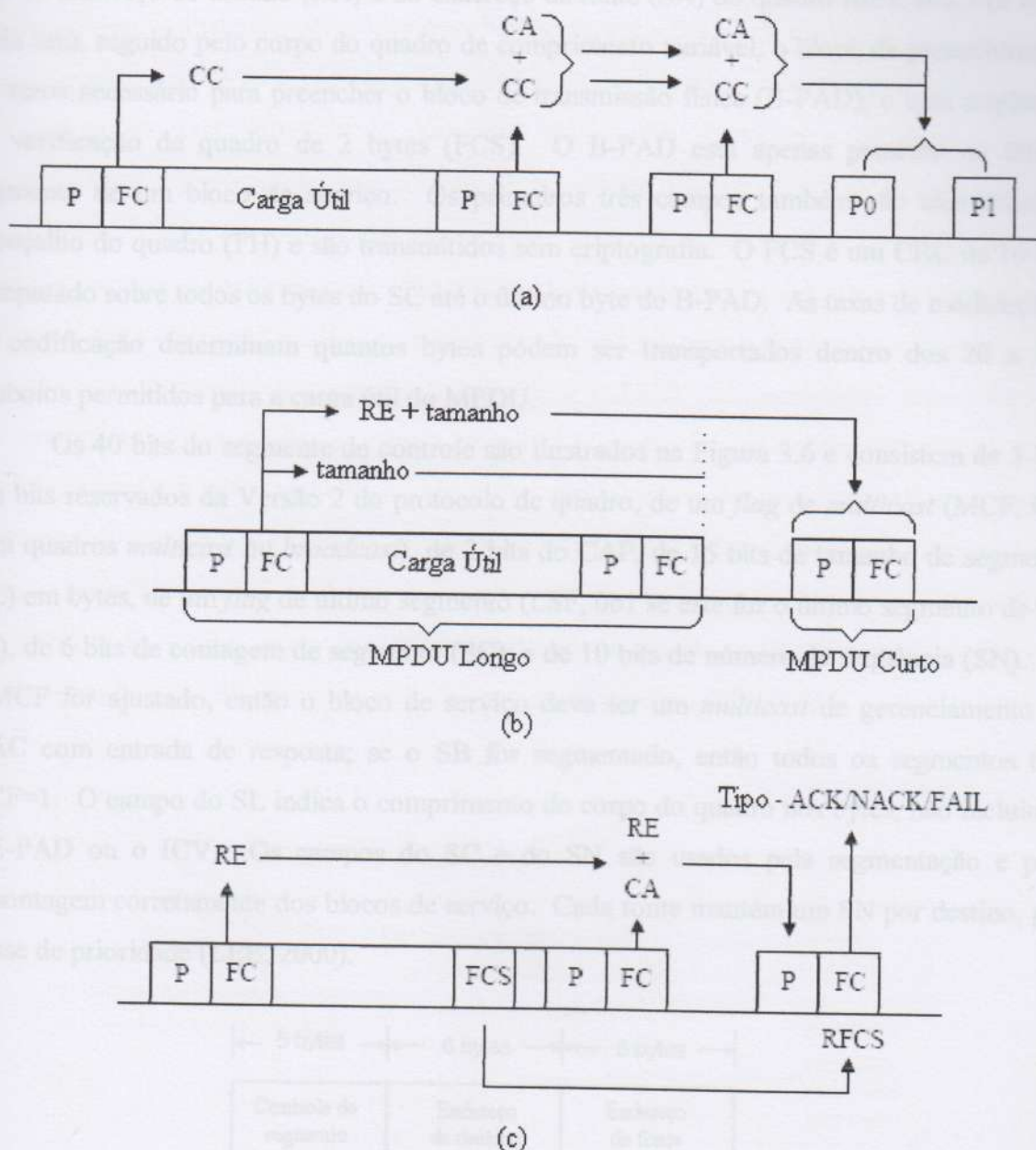


Figura 3.5 – Uso do campo de controle de quadro MAC: (a) Campos CC + CA usados para prioridade, (b) Tamanho e resposta usados para VCS e (c) Campos FC e FCS usados para ARQ.

O MPDU longo consiste do delimitador SoF (preâmbulo e FC), a carga útil de 20 a 160 símbolos, o EFG e o delimitador de EoF. O MPDU coincide com o PPDU desde que os

campos do delimitador FC contêm a informação usada pela camada física e a MAC, mas no MPDU, os índices da carga útil da camada física (PHY) são expostos desde que o receptor tenha o mapa de tons correto para demodular e decodificar esse campo do PPDU. No MPDU longo, a carga útil de PHY é aberta para revelar cinco bytes de controle de segmento (SC), 48 bits do endereço de destino (DA) e do endereço da fonte (SA) do quadro IEEE 802.3 (6 bytes cada um), seguido pelo corpo do quadro de comprimento variável, o bloco de preenchimento de zeros necessário para preencher o bloco de transmissão física (B-PAD), e uma sequência de verificação de quadro de 2 bytes (FCS). O B-PAD está apenas presente no último segmento de um bloco de serviço. Os primeiros três campos também são chamados de cabeçalho do quadro (FH) e são transmitidos sem criptografia. O FCS é um CRC de 16 bits computado sobre todos os bytes do SC até o último byte do B-PAD. As taxas de modulação e de codificação determinam quantos bytes podem ser transportados dentro dos 20 a 160 símbolos permitidos para a carga útil do MPDU.

Os 40 bits do segmento de controle são ilustrados na Figura 3.6 e consistem de 3 bits dos bits reservados da Versão 2 do protocolo de quadro, de um *flag* de *multicast* (MCF, 0b1 para quadros *multicast* ou *broadcast*), de 2 bits do CAP, de 15 bits de tamanho de segmento (SL) em bytes, de um *flag* de último segmento (LSF, 0b1 se este for o último segmento de um SB), de 6 bits de contagem de segmento (SC); e de 10 bits de número de sequência (SN). Se o MCF for ajustado, então o bloco de serviço deve ter um *multicast* de gerenciamento de MAC com entrada de resposta; se o SB for segmentado, então todos os segmentos têm MCF=1. O campo do SL indica o comprimento do corpo do quadro nos bytes, não incluindo a E-PAD ou o ICV. Os campos do SC e do SN são usados pela segmentação e pela remontagem corretamente dos blocos de serviço. Cada fonte mantém um SN por destino, por classe de prioridade (LEE, 2000).

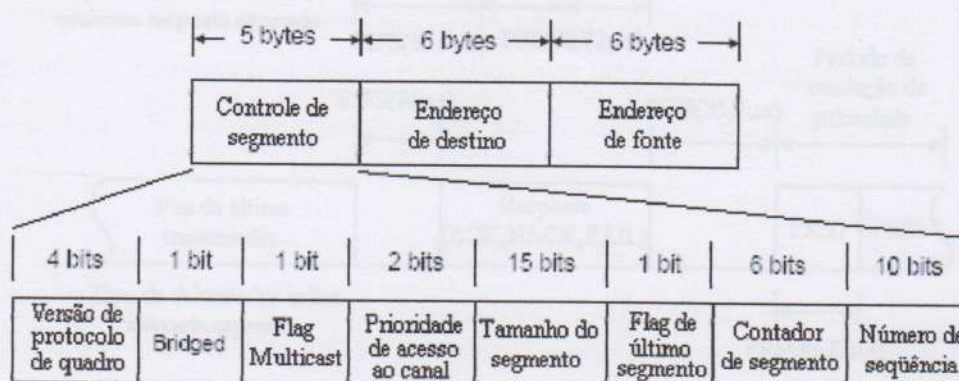


Figura 3.6 – Cabeçalho do quadro e controle de segmento.

3.3.4 Espaçamento entre Quadros e *Timing*

Há diversos pontos nos quais o protocolo requer um atraso para processamento ou para mudar de modo transmissor para modo receptor. Quando uma resposta é esperada, como indicado pelo SoF e pelos campos do EoF e FC, a estação de resposta aguarda por um espaço entre quadros de resposta (*Response InterFrame Space* – RIFS) de $26\mu s$, antes de transmitir sua resposta. Após a resposta ou após o EoF todas as estações consideram o meio ocupado por um espaço entre quadros de contenção (*Contention InterFrame Space* – CIFS) de $35,84\mu s$ antes que o período de resolução de prioridade comece. Cada *slot* de resolução de prioridade de $35,84\mu s$ pode conter um sinal de resolução de prioridade que dura $30,72\mu s$ enviado por uma ou mais estações. Devido à sincronização curta e aos atrasos de propagação mínimos, estes sinais são aditivos e os *slots* têm seu próprio atraso de processamento.

Como ilustrado na Figura 3.7, o RIFS e o CIFS são necessários para tempo de processamento e propagação. O espaço entre quadros estendido (*Extended InterFrame Space* – EIFS) é usado quando uma estação não está certa do estado do meio enquanto ela escuta se outra estação iniciou a transmissão, por exemplo ele conta o tempo máximo de vezes que uma estação poderia transmitir incluindo a duração máxima do quadro não ROBO. Esse tempo é de $1695\mu s$. O EIFS é usado também para determinar quanto tempo o canal é considerado ocupado, após uma colisão ou um erro de controle de quadro (LEE, 2000).

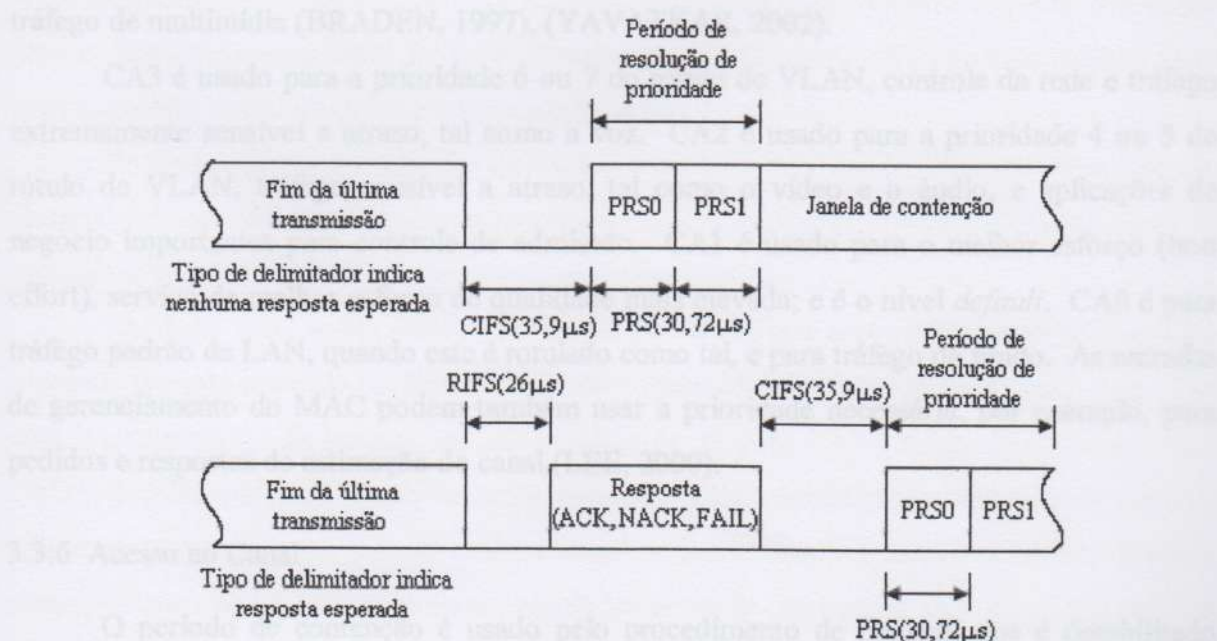


Figura 3.7 – Espaçamento entre quadros.

3.3.5 Resolução de Prioridade

Antes do período de contenção, há um período de resolução de prioridade (PRP) que consiste em dois *slots* de resolução de prioridade (PRS) de 35,84μs. Usando o PRP, somente as estações com o tráfego de prioridade mais elevada para transmitir podem reter o meio no período de contenção.

As estações usam PRS0 e PRS1 para determinar o tráfego máximo de prioridade na rede. Quatro níveis de prioridade são suportados: CA3 e CA2 para o tráfego de alta prioridade sensível a atrasos de tempo; e CA1 e CA0 para o tráfego de prioridade mais baixa. Se o delimitador do EoF ou o delimitador de resposta do quadro imediatamente antes do período PR tiver o bit de controle de contenção ajustado, todos os nós com o mesmo nível de prioridade ou mais baixo adiam a transmissão. Se não, os nós CA3 e CA2 ajustam PRS0, o que faz com que os nós CA1 e CA0 adiem a transmissão. Os nós CA3 ajustam também PRS1, o que faz com que os nós CA2 também adiem a transmissão; se PRS0 não está ativo, então os nós CA1 ajustam PRS1, o que faz com que os nós CA0 adiem a transmissão. Somente os nós vencedores da classe de prioridade mais elevada retêm o acesso ao meio usando a janela da disputa. As prioridades devem ser atribuídas de acordo com os guias 802.1D. Isto permite que as redes Homeplug 1.0 operem de acordo com a RFC 2205 RSVP (*Resource Reservation Protocol*) e com a gerência de largura de faixa de subredes do padrão de esboço da Internet (SBM) para fornecer qualidade diferenciada de serviço (*diffserv*) para o tráfego de multimídia (BRADEN, 1997), (YAVATKAR, 2002).

CA3 é usado para a prioridade 6 ou 7 do rótulo de VLAN, controle da rede e tráfego extremamente sensível a atraso, tal como a voz. CA2 é usado para a prioridade 4 ou 5 do rótulo de VLAN, tráfego sensível a atraso, tal como o vídeo e o áudio, e aplicações de negócio importantes para controle de admissão. CA1 é usado para o melhor esforço (best effort), serviço de melhor esforço de qualidade mais elevada; e é o nível *default*. CA0 é para tráfego padrão da LAN, quando este é rotulado como tal, e para tráfego de fundo. As entradas de gerenciamento do MAC podem também usar a prioridade necessária, por exemplo, para pedidos e respostas de estimação do canal (LEE, 2000).

3.3.6 Acesso ao Canal

O período de contenção é usado pelo procedimento de *backoff*, que é desabilitado durante a segmentação devido a rajadas ou devido a acesso livre de contenção. Primeiramente, PCS/VCS é usado para detectar o estado do meio e esperar até que ele esteja

inativo, ou até que o período de contenção de prioridade (neste caso a estação ajusta sua prioridade a menos que ele adie sua transmissão), ou até que ganhe o PRP e possa reter o meio durante o tempo da janela de disputa.

Quando uma estação começa retendo o canal, ela escolhe aleatoriamente um dos primeiros oito *slots* de disputa que seguem o PRP para começar sua transmissão, ajustando um contador de *backoff* (BC) ao número de *slots*, para deixar vazios para os outros usarem. Se nenhum outro delimitador de SoF for detectado antes que o *slot* selecionado chegue, então a estação inicia sua transmissão nesse *slot* de contenção. Caso contrário ela adia sua transmissão e ajusta seu contador de adiamento (*Deferral Counter* – DC) de acordo com uma programação de prioridade-dependente. Enquanto os *slots* não utilizados por períodos de contenção de mesmo nível de prioridade, que o tráfego que está esperando para ser transmitido pela estação, o contador de *backoff* é decrementado até que uma das duas coisas aconteça: se BC chega a zero, a estação começa a transmissão, a seguir espera uma resposta se ela for esperada. Se DC chega a zero, então muitas estações no mesmo nível de prioridade mostram sua presença, isso faz que o transmissor escolha aleatoriamente um valor novo para BC da próxima escala maior de valores (outra vez, dependendo do nível de prioridade de seus dados), da mesma maneira que se ele tivesse detectado uma colisão. Isto permite que a informação extra dos adiados seja usada para evitar colisões custosas.

Quando uma estação transmite um quadro e não espera uma resposta ou recebe um ACK combinando, do seu destino, o quadro foi transmitido com sucesso e o quadro seguinte é preparado para a transmissão. Se for o último segmento de um bloco do serviço, então o êxito na transmissão é relatado à interface do computador.

Se uma resposta de falha for recebida e o número máximo de falhas de retransmissão (entre 0 e 6) não foi excedido, então a estação espera um tempo estendido (10ms) antes de recomençar seus esforços.

Por outro lado, se ela recebe um NACK ou detecta que uma colisão ocorreu, a estação invoca o procedimento de *backoff*, aumentando o tamanho da janela de contenção, de acordo com a programação de *backoff*, até um máximo de 32 para CA3 e CA2, ou 64 para CA1 e CA0; e escolhe um novo tempo de atraso para BC. Se a estação tentar o número máximo de tentativas que podem ser feitas usando o mapa de tons específico para o destino, o modo é comutado para ROBO e novas tentativas de transmissão do quadro são feitas. Comutar o modo para ROBO pode requerer re-segmentação do bloco de serviço. Se o limite do número de tentativas de transmissão que podem ser feitas for excedido (no total ou para o modo ROBO, ou para NACKs ou para colisões), então o quadro é descartado e a falha é relatada.

Na Tabela 3.1, a prioridade mais elevada é CA3 e CA2, a prioridade mais baixa é CA1 e CA0. BPC é o contador de procedimento de *backoff*, que conta o número de vezes épocas que o procedimento de *backoff* foi invocado devido a colisões ou a adiamentos. O BPC é zerado depois de uma falha, como a quantidade de tráfego se espera mudar após o longo atrasa. O DC é o contador de adiamentos e CW é a máxima janela de contenção (o mínimo é zero, assim o tamanho de CW é realmente CW+1) (LEE, 2000).

Tabela 3.1 – Programação de *backoff*.

CA	Alta	Alta	Baixa	Baixa
BPC	CW	DC	CW	DC
0	7	0	7	0
1	15	1	15	1
2	15	3	31	3
> 2	31	15	63	15

As colisões são detectadas em diversas circunstâncias. Primeiramente, quando se espera uma resposta e nenhuma for detectada, supõe-se que ocorreu uma colisão, embora isto poderia ter ocorrido devido a um canal ruim. Mesmo se um delimitador for detectado, se o campo do DC do delimitador estiver ruim, ou se o FC não indicar que é um ACK, NACK, ou FAIL, quando uma resposta é esperada, então uma colisão é detectada. Finalmente, as respostas FAIL e ACK contêm um campo de FCS de resposta (RFCS) que ecoa os 10 ou 11 LSBs, respectivamente, do FCS do quadro de reconhecimento delas. Se o campo de RFCS não combina com o transmitido, então o transmissor supõe que ocorreu uma colisão (LEE, 2000).

3.3.7 Controle de Erro MAC

O MAC executa um método de controle de erro ARQ do tipo “pare e espere”. O reconhecimento e a retransmissão são executados baseados por segmento. A expectativa de uma resposta é indicada nos campos FC dos delimitadores SoF e EoF. A resposta é enviada pelo destino em um MPDU formato curto, consistindo apenas de um delimitador de resposta. Três tipos de respostas são usados: ACK, NACK, e FAIL. Todos os três incluem um campo FCS de resposta (RFCS) de 10 a 11 bits, o qual é uma cópia dos LSBs dos 16 bits FCS do

MPDU para o qual a resposta foi enviada, assim como a prioridade de acesso ao canal (CAP), que é usada para o controle de contenção e retenção do meio.

Uma resposta do ACK tem 11 bits RFCS e somente se o RFCS combina com os 11 bits menos significativos do FCS do quadro transmitido é que o quadro é considerado reconhecido. Se não, o transmissor trata isso como uma colisão. NACK e FAIL têm campos de 10 bits RFCS. NACK é usado para indicar que um quadro foi recebido com erros, enquanto FAIL é usado para indicar que o receptor não tem registradores disponíveis para remontar o quadro do bloco de serviço ou que o segmento foi recebido fora de ordem. NACK e FAIL com RFCS válido indicam uma falha e a ausência de um ACK válido quando se espera um, é também tomado como falha ou colisão.

Os quadros que recebem um NACK ou nenhuma resposta podem ser aguardar uma retransmissão, mas uma resposta de FAIL requer que o transmissor espere um tempo mais longo (atraso de 10ms para FAIL) antes de retransmitir, na esperança de que o receptor tenha terminado de remontar o bloco de serviço no qual estava trabalhando anteriormente; e terá os recursos disponíveis para começar a remontagem do bloco de serviço ao qual o quadro pertence. De fato, somente os quadros de uma prioridade mais elevada podem ser enviados por essa estação ao endereço de destino que respondeu com um FAIL.

Se o segmento que recebe a resposta de FAIL não for o primeiro segmento, então a tentativa de transmissão de todo o bloco de serviço é abortada e transmissor começa tudo de novo. As estações tentam transmitir o quadro até que o limite de tentativas de retransmissão ou o tempo de vida de transmissão sejam excedidos.

Opcionalmente, ACKs parciais estão disponíveis para quadros *multicast* e *broadcast*; o transmissor pode especificar qualquer estação na sua rede lógica (não apenas aquelas no grupo do *multicast*) para responder a um quadro *multicast* ou *broadcast*. O *multicast* com resposta de entrada de gerenciamento MAC, do bloco de serviço, tem atualmente o endereço de destino *multicast* de 6 bytes, enquanto o DA do quadro da camada de gerenciamento MAC é um *proxy* para *multicast* e gerará uma resposta se o tipo do delimitador indicar que um quadro desse tipo é esperado. No caso de ACKs parciais, FAIL pode ser tratada como um ACK.

Uma resposta curta de intervalo *timeout* é usada para decidir-se quanto tempo esperar por uma resposta antes de detectar que uma colisão ocorreu. Um ACK válido faz com que o nó transmita o segmento seguinte (se há mais do SB a enviar) ou para relatar o sucesso (se este era o último segmento do SB) (LEE, 2000).

3.3.8 Segmentação e Remontagem

Um bloco do serviço é segmentado em quadros MPDU quando necessário, dependendo do número de bytes que um MPDU pode transportar, devido à limitação da carga útil de 160 símbolos e a taxa de dados determinada pelo mapa de tons. Cada MPDU inclui o DA e o SA do MSDU em seu cabeçalho de quadro e cada uma tem seus próprios SC e FCS. Somente o último segmento tem a B-PAD, pois todos os outros devem preencher completamente seu corpo de quadro MPDU. O campo de controle do segmento (SC) está sempre presente, mesmo se o SB não for segmentado (isto é, é um bloco de serviço de um segmento). O SC inclui o comprimento de segmento nos bytes excluindo os do B-PAD, SC, e LSF. Rajada de segmentos é usado para enviar todos os segmentos de um SB em um tempo tão curto quanto possível.

O campo SC do cabeçalho do quadro inclui um número de seqüência (SN), uma contagem do segmento e um *flag* de último segmento (LSF). Eles são usados para detectar duplicatas e recuperá-las. O SN é o mesmo para todos os segmentos no mesmo bloco de serviço e é incrementado para cada novo bloco de serviço. A contagem do segmento indica que segmento dentro de um SB o MPDU mantém, começando com um valor de 0 para o segmento inicial. O LSF indica o último segmento em um bloco de serviço.

Para cada SA e prioridade, um receptor armazena o grupamento (SA, SN, SC, LSF) mais recente. A lista de entradas é comparada aos campos do cabeçalho do quadro para detectar duplicatas e omissões. O novo par (SA, prioridade) cria uma nova lista de entradas, com um ACK, se esse for o primeiro segmento. Do mesmo modo, o primeiro segmento de um novo SN recebido faz com que a lista seja atualizada. Os segmentos recebidos na ordem correta geram naturalmente ACKs e atualizam a lista; e quando o LSF é ajustado, indicando que a remontagem está completa, o bloco de serviço remontado é passado acima para a decriptografia. As duplicatas de segmentos mais recentes sobrescrevem o registrador de remontagem de segmentos e geram um ACK, enquanto segmentos antigos ou segmentos que deixariam uma brecha no registrador de remontagem fazem com que o receptor envie uma resposta FAIL e limpe esse registrador.

As respostas são enviadas somente para MPDUs que requerem uma resposta, e um temporizador de remontagem é usado para impedir que um SB parcialmente remontado utilize recursos indefinidamente. Cada estação deve ter no mínimo um registrador de remontagem de MPDU com temporizador. Mais de um é permitido, mas cada registrador deve ter seu próprio temporizador (LEE, 2000).

3.3.9 Rajada de Segmentos e Acesso Livre de Contenção

Rajada de segmentos usa os campos de prioridade de acesso ao canal e de controle de contenção no delimitador FC para permitir que uma estação envie os segmentos que pertencem a um mesmo bloco de serviço sem repetidamente reter o canal. As estações com tráfego de uma prioridade mais elevada podem executar uma rajada de segmentos ajustando os bits de prioridade entre os segmentos na rajada. A rajada de segmentos é limitado a dois MPDUs consecutivos em CA3, a fim de fornecer baixa variação de tempo de atraso, para tráfego CA3. Este mecanismo permite o uso eficiente do meio, mantendo ainda serviço de qualidade elevada diferenciado.

Para usar a rajada de segmentos, uma estação permanece como usual. Uma vez que ganha o acesso, ajusta os bits do CC nos FCs do SoF e EoF para 1 e insere sua prioridade do MPDU no campo CAP do EoF FC. Depois que cada segmento é enviado (e reconhecido, se necessário), o período de resolução de prioridade (PRP) é aberto às estações com tráfego em um nível de uma prioridade mais elevado. O transmissor também ajusta sua prioridade no PRP, escutando uma estação com tráfego de uma prioridade mais elevada. Se nenhuma transmite, a estação continua a transmitir o restante dos segmentos do bloco de serviço após o PRP. No MPDU que contém o último segmento, o bit CC em FC é limpo para permitir que a contenção normal ocorra. Se o transmissor perde a disputa, então ele volta atrás da sua definição de prioridade e para a contenção como usual.

Uma maneira mais restrita para limitar disputas é suportada. O acesso livre de disputa (CFA) somente é disponível às estações com tráfego CA3 e permite que uma estação envie todos os seus blocos de serviço (mesmo diferentes DA) no nível CA3 usando CC=1 em FC. É limitado a sete MPDUs consecutivos por rajada do CFA. O CC é restaurado a 0 no FC do último segmento, do último MPDU, em uma rajada de CFA (LEE, 2000).

3.3.10 Gerenciamento MAC

O campo de informação opcional de gerenciamento MAC de um bloco de serviço deve começar com os dois bytes do campo MTYPE com valor 0x887B, que é o IEEE Ethertype atribuído. Isto é seguido por 1 byte do campo MCTRL, então pelo campo variável de número de entradas de gerenciamento MAC (MMENTRYs). Cada MMENTRY consiste de um cabeçalho de entrada de gerenciamento MAC de 1 byte (MEHDR), um campo de tamanho de entrada de gerenciamento MAC de 1 byte (MELEN); e de um campo de dados de entrada de

gerenciamento MAC de tamanho variável (MEENTRY). O MSB do MCTRL é reservado, os 7 bits restantes indicam o número de entradas MM a seguir. O campo MELEN permite a extensão das funções de gerenciamento MAC, com os nós mais antigos capazes de saltar sobre os campos que eles não compreendem.

Os primeiros 3 bits de cada MEHDR são a versão da entrada MAC (MEV), que deve ser 0b000 ou a entrada é descartada usando o campo de tamanho MELEN. Os últimos 5 bits são o tipo de entrada MAC (METYPE). As entradas MAC podem vir do computador através da interface M1, ou podem ser geradas dentro do próprio MAC. É importante a ordem das entradas para processamento eficiente; elas devem seguir a seguinte ordem (LEE, 2000):

- *Multicast* com resposta METYPE;
- Pedido de estimação do canal METYPE;
- Resposta de estimação do canal METYPE;
- Substituição de endereço da ponte METYPE;
- Todos os outros METYPES em qualquer ordem.

Os METYPES incluem:

- *Multicast* com resposta;
- Pedido e resposta de estimação do canal (do próprio MAC apenas);
- Substituição do endereço da ponte;
- Ajuste/Confirmação da chave de criptografia da rede;
- Parâmetros do e estados de Requisição/Resposta;
- Vendedor específico;
- METYPE específico de fabricante.

O METYPE específico de fabricante deve ser recebido na interface do computador, enquanto o METYPE específico do vendedor pode aparecer na interface do computador. Os primeiros 3 bytes do METYPE específico do vendedor são o identificador único organizacional (OUI) atribuído pelo IEEE ao vendedor. Esta entrada pode ser ignorada pelo receptor se o OUI do mesmo não combinar com o OUI do remetente. A menos que especificado de outra maneira, o SA do MPDU é tomado como requisitador/respondedor para todas as requisições/respostas em um SB; e o DA é tomado como a estação para a qual as requisições/respostas são pretendidas.

3.3.11 Função de Controle de Estimação do Canal

As estações devem manter as informações atualizadas sobre as condições do canal, sobre o qual elas transmitiram dados *unicast*. Isto é realizado pela função de controle CE, usando as entradas de gerenciamento MAC: requisição CE e resposta CE. Um mapa de tons é considerado obsoleto se o enlace for novo, ou se expirar (mais precisamente, ele não está sendo usado com sucesso por 30s), ou se o transmissor tiver que reverter o modo para ROBO durante o *backoff*. Um TM velho não pode ser usado enviar um SB *unicast* com o MPDU nele. Todo MPDU *broadcast* ou *multicast* são enviados usando modo ROBO com um TMI zerado e por isso não estão sujeitos a esta exigência.

A estimação do canal é feita enviando-se uma requisição MMENTRY. Essa entrada de dados MAC de 1 byte contém 4 bits que indicam a versão de estimação do canal do requisitador (0x0 para Homeplug 1.0); e faz com que o receptor envie uma resposta CE. As requisições CE não devem ser executadas mais freqüentemente que uma vez a cada 4,5s (na média sobre um intervalo de 5 minutos), excluindo requisições CE feitas durante a recuperação, ou seja, depois ter que usar o modo ROBO, ou exceder o limite de novas tentativas. Uma estação forçada a entrar em modo ROBO não tem que obter um novo TM antes que termine de enviar o SB atual. Uma estação que tem que entrar repetidamente em modo ROBO não tem que requisitar CE continuamente, mas não deve usar um TM que não trabalhou a 30s.

A requisição CE MMENTRY deve ser enviada usando modo ROBO e recomenda-se manter o SB curto devido à baixa eficiência de largura de banda desse modo. Uma estação deve evitar a emissão de uma requisição CE MMENTRY a menos que ela também tenha um SB a enviar. Uma vez que um CE e um TMI novos são recebidos através da resposta CE, uma fonte deve começar a usar o TM novo para todos os pacotes *unicasts* enviados a um destino de três SB consecutivos, depois de recebida a resposta CE.

O campo de dados da resposta CE MMENTRY inclui 4 bits do número da versão da resposta CE, 5 bits do TMI para que o requisitador use para os pacotes *unicasts* futuros a este destino, e 84 *flags* de tons válidos (0b1 indica que o tom deve ser usado, sujeito à máscara de tons). Além disso, há um seletor de taxa FEC de 1 bit e um seletor do método de modulação de 2 bits. Um bit do *proxy* da ponte indica que o TM está sendo encaminhado para os endereços seguintes. Um campo de número de DA de pontes (*Number Bridged DAs* – NBDAS) de 7 bits indica o número de DAs para os quais esse TM foi encaminhado, com um endereço MAC de 6 bytes para cada um dos DA das pontes concluindo a entrada. A resposta

MPDU do CE deve ser *unicast* com a resposta esperada. Para evitar a confusão, o TMI usado na resposta CE deve ser diferente do último TMI enviado para aquela fonte usar. Um receptor pode emitir uma resposta CE não solicitada com um TM novo se for necessário, passado menos de 1s desde de que essa estação enviou uma resposta CE a essa fonte. Cada estação pode suportar até 15 remetentes diferentes de cada vez usando a adaptação do canal, enquanto os remetentes adicionais devem usar o modo ROBO (LEE, 2000).

3.3.12 Gerenciamento de Chave e Privacidade

As linhas de potência são compartilhadas por todas as residências conectadas a um mesmo transformador, assim é possível para uma residência ouvir transmissões PLC de uma residência próxima. Por isso, é necessário proteger criptograficamente a privacidade dos usuários, uma vez que a instalação de filtros passa-baixas iria aumentar custos e negaria as vantagens financeiras da tecnologia. Para isso, os nós formam redes lógicas (LNs) baseadas em isolamento por criptografia.

O padrão Homeplug 1.0 usa DES no modo de encadeamento de blocos cifrados (CBC). As chaves são geradas a partir de senhas usando a função PBKDF1 do PKCS#5 V2.0, padrão de criptografia baseado em senha, com o MD5 como o algoritmo da camada *hash*. As estações armazenam e mantêm sua chave default (para operações de recuperação de chave) e todas as chaves NEK recebidas (para qualquer outra transmissão) na memória não volátil.

Todas as transmissões, dentro de uma rede lógica, são criptografadas com a NEK que define essa rede lógica. Para participar de uma LN, uma estação deve ter a NEK dela. As estações podem obter um NEK das seguintes formas:

- Entrada da senha pelo usuário e geração como descrito anteriormente;
- Entrada da rede pelo receptor de um grupo NEK MMENTRY de uma outra estação encriptada usando qualquer chave conhecida por ambas as estações.

Uma estação pode pertencer a mais de uma LN e pode ser necessário armazenar mais de um par (EKS, NEK). As estações não são requeridas para suportar a participação em mais de uma LN ao mesmo tempo, entretanto.

Uma estação sem NEK pode usar a entrada de rede (Network Entry) para obter uma NEK e incorporar-se à LN por meio de uma chave *default* gerada por uma senha única determinada fabricante para a estação particular. Esta senha *default* deve ser incorporada em

uma outra estação que participa da LN e usando a entrada de senha (Password Entry). Após isso, essa estação deve gerar a NEK *default* para a nova estação e usar essa NEK com EKS=0x00 para criptografar e enviar o identificador de NEK e de EKS da LN, à nova estação em um grupo NEK MMENTRY. A nova estação retorna uma confirmação NEK MMENTRY à estação que lhe emitiu o grupo NEK MMENTRY.

O grupo NEK MMENTRY nunca é enviado em texto limpo e se um grupo NEK MMENTRY for recebido em modo texto limpo deve ser rejeitado. Os 9 bytes do campo de dados do grupo NEK MMENTRY contêm o EKS de 1 byte e os 8 bytes correspondentes à NEK. A confirmação NEK MMENTRY tem um campo de dados vazio. Os valores de EKS associados com o NEK de uma LN devem ser os mesmos para todas as estações da mesma rede lógica (LEE, 2000).

Para realizar a análise de desempenho do padrão HomePlug 1.0, foram efetuados testes no campo, durante trinta dias, aproximadamente, na rede montada. A escolha das cargas utilizadas nos testes se deu através de análise da literatura, em artigos de periódicos que as citavam como cargas críticas, tais como: carregadores de celular e lâmpadas com motores eletrônicos.

Foi implementada uma rede de computadores com quatro máquinas, sendo que três eram clientes e uma foi usada como gateway. A estrutura física da rede está descrita na Figura 4.1.



Figura 4.1 – Rede Homeplug implementada para testes

4 RESULTADOS OBTIDOS

4.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo descreve detalhadamente a metodologia utilizada na obtenção das taxas de vazão analisadas para alguns tipos de cargas consideradas críticas. Serão descritas as configurações das máquinas utilizadas, a rede SOHO (*Small Office – Home Office*) montada e as cargas analisadas. Além disso, serão apresentados os resultados obtidos para vazão da rede Homeplug em questão.

4.2 REDE IMPLEMENTADA E CARGAS UTILIZADAS

Para realizar a análise de desempenho do padrão HomePlug 1.0, foram efetuados testes de campo, durante trinta dias, aproximadamente, na rede montada. A escolha das cargas utilizadas nos testes se deu através de análise da literatura, em artigos de periódicos que as citavam como cargas críticas, tais como: carregadores de celular e lâmpadas com reatores eletrônicos.

Foi implementada uma rede de computadores com quatro máquinas, sendo que três eram clientes e uma foi usada como gateway. A estrutura física da rede está ilustrada na Figura 4.1.

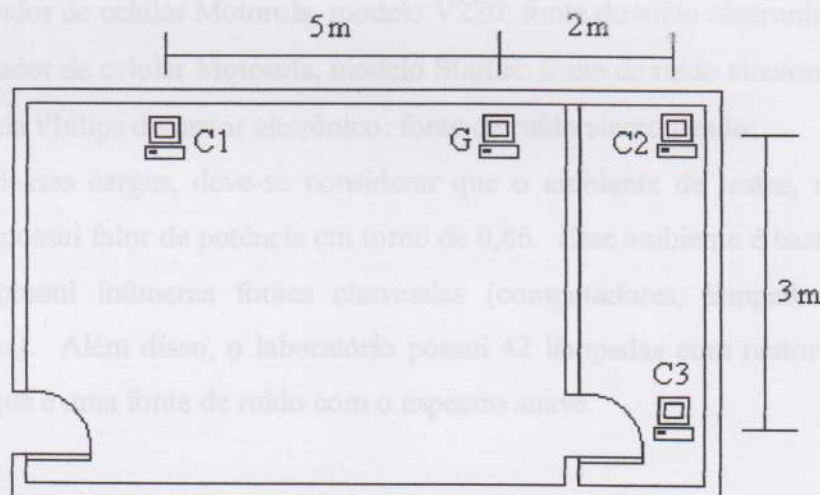


Figura 4.1 – Rede Homeplug implementada para testes.

Como ilustrado na Figura 4.1, a maior distância considerada nas análises foi de 10m. O *gateway* está indicado pela letra G, as demais máquinas são os clientes, que compartilhavam o acesso à Internet com o *gateway*. Os computadores foram conectados à rede elétrica através de pontes Homeplug / USB.

Como dito anteriormente, a topologia física e lógica da rede Homeplug é barramento. Isso representa uma certa desvantagem em termos de segurança, tornado necessário um bom esquema de criptografia de dados.

Os equipamentos usados nos testes foram os seguintes:

- Cliente 1 (C1): Sistema operacional Windows 98, Processador AMD Duron de 1GHz, 128MB de memória RAM, HD IDE ATA Samsung 40GB.
- Cliente 2 (C2): Sistema operacional Windows 2000, Processador Pentium 4 de 2,4GHz, 256MB de memória RAM, HD IDE ATA Samsung 40GB.
- Cliente 3 (C3): Sistema operacional Windows XP PRO, Processador AMD Duron de 800MHz, 256MB de memória RAM, HD IDE ATA Seagate 20GB.
- Gateway (G): Sistema operacional Windows 2000, Processador AMD Duron de 800MHz, 128MB de memória RAM, HD IDE ATA Samsung 20GB.
- Pontes Homeplug: Adaptador de rede USB-Homeplug da IOGEAR, taxa de transmissão superior a 12 Mbps, criptografia DES de 56 bits.

As cargas consideradas na análise foram:

- Televisão Philips 29 polegadas: fonte de ruído periódico não sincronizado;
- Carregador de celular Motorola, modelo V220: fonte de ruído sincronizado;
- Carregador de celular Motorola, modelo Startac: fonte de ruído sincronizado;
- Lâmpada Philips de reator eletrônico: fonte de ruído sincronizado;

Além dessas cargas, deve-se considerar que o ambiente de testes, a UnP, unidade Salgado Filho possui fator de potência em torno de 0,86. Esse ambiente é bastante poluído de ruídos, pois possui inúmeras fontes chaveadas (computadores, lâmpadas com reatores eletrônicos, etc.). Além disso, o laboratório possui 42 lâmpadas com reatores eletrônicos e um exaustor, que é uma fonte de ruído com o espectro suave.

4.3 METODOLOGIA DOS TESTES

Após a implementação da rede Homeplug, no laboratório de Eletrônica da Universidade Potiguar, foi medida a vazão da rede, considerando-se o efeito das cargas

elétricas. Para tanto, foi transferido um arquivo padrão de uma máquina a outra. O arquivo considerado possuía um tamanho de 146MB.

Para se calcular o número total de bytes recebidos e enviados por uma interface utilizou-se os objetos *ifInOctets* e *ifOutOctets*. Para isso, primeiro calcula-se o total de bytes recebidos e enviados em um intervalo de tempo entre 1 e 2, conforme ilustrado na Equação (1) (SCRIPTBRASIL, 2005). Durante o intervalo de transmissão foi medido o tempo decorrido (Δt).

$$\text{totaldebytes} = (\text{ifInOctets_2} - \text{ifInOctets_1}) + (\text{ifOutOctets_2} - \text{ifOutOctets_1}) \quad (1)$$

Depois se calcula o total de bits por segundo, de acordo com a Equação (2):

$$\text{total de bps} = 8 \left(\frac{\text{totaldebytes}}{\Delta t} \right) \quad (2)$$

Para obtenção dos objetos *ifInOctets* e *ifOutOctets*, foi utilizado o programa computacional de gerenciamento de redes SNMPc7, da *Castle Rock*, que usa o protocolo de gerenciamento SNMP, para solicitar objetos remotamente e para configurar dispositivos, estações de trabalho e servidores em redes IP [Castle Rock, 2004]. Esse programa ficou em execução na máquina C2 e nas demais máquinas foi habilitado o cliente SNMP do Windows.

Com base nessas equações, pôde-se medir a vazão da rede para diferentes situações de testes. Os testes foram realizados da seguinte forma: durante vários dias, foram realizadas transmissões na seguinte seqüência: da máquina C2 para G; da máquina C2 para C1; e da máquina C1 para C3. As medições iniciais eram feitas com os equipamentos rotineiros do laboratório ligados. Depois de efetuadas as transmissões iniciais, elas eram repetidas para cada carga considerada, uma por vez, totalizando cinco medições por arranjo, num total de 15 por dia.

4.4 RESULTADOS OBTIDOS

Foram efetuados diversos testes para se analisar o efeito de cada carga na vazão da rede. Os parâmetros estatísticos analisados foram: a média da vazão e o desvio padrão, ou seja, quanto a taxa de vazão oscilou. Os dados são apresentados na forma de tabelas, para facilitar a visualização dos mesmos.

A Tabela 4.1 mostra a vazão média e o desvio padrão, para a primeira situação de teste (transmissão de C2 para G). São apresentados resultados para todas as cargas utilizadas nos testes. Pode-se ver que em termos de vazão média a carga que mais influenciou foi a lâmpada com reator eletrônico, como era de se esperar. Pode-se notar ainda que todas as cargas provocaram flutuações na vazão.

Tabela 4.1 – Vazão média e desvio padrão para situação 1 (C2 para G).

Carga	Vazão média (Mbps)	Desvio padrão
Normal	4,1219	0,1986
TV	4,2403	0,4079
Lâmpada	4,0162	0,3464
Carregador Startac	4,0450	0,1080
Carregador V220	4,0511	0,2792

A Tabela 4.2 mostra os parâmetros estatísticos já citados, para a segunda situação de teste (transmissão de C2 para C1). Com o aumento da distância de transmissão, ocorreu o esperado, ou seja, as taxas de vazão caíram. Além disso, as cargas eram inseridas entre C1 e G e, nesse caso, pode-se observar melhor o efeito das cargas. Dessa vez, o pior efeito foi provocado pelo carregador Startac. Nessa situação, a TV provocou o maior desvio padrão.

Tabela 4.2 – Vazão média e desvio padrão para situação 2 (C2 para C1).

Carga	Vazão média (Mbps)	Desvio padrão
Normal	2,2854	0,2177
TV	2,3585	0,3157
Lâmpada	1,6887	0,1428
Carregador Startac	1,5520	0,1558
Carregador V220	2,0203	0,2721

A Figura 4.2 ilustra a variação da vazão durante os dias de testes, bem como, a vazão média. Pode-se observar que, mesmo sem as cargas utilizadas estarem ligadas, a vazão oscilou bastante, o que mostra a intensa variação de parâmetros da rede elétrica. Essa curva foi traçada para a situação 2.

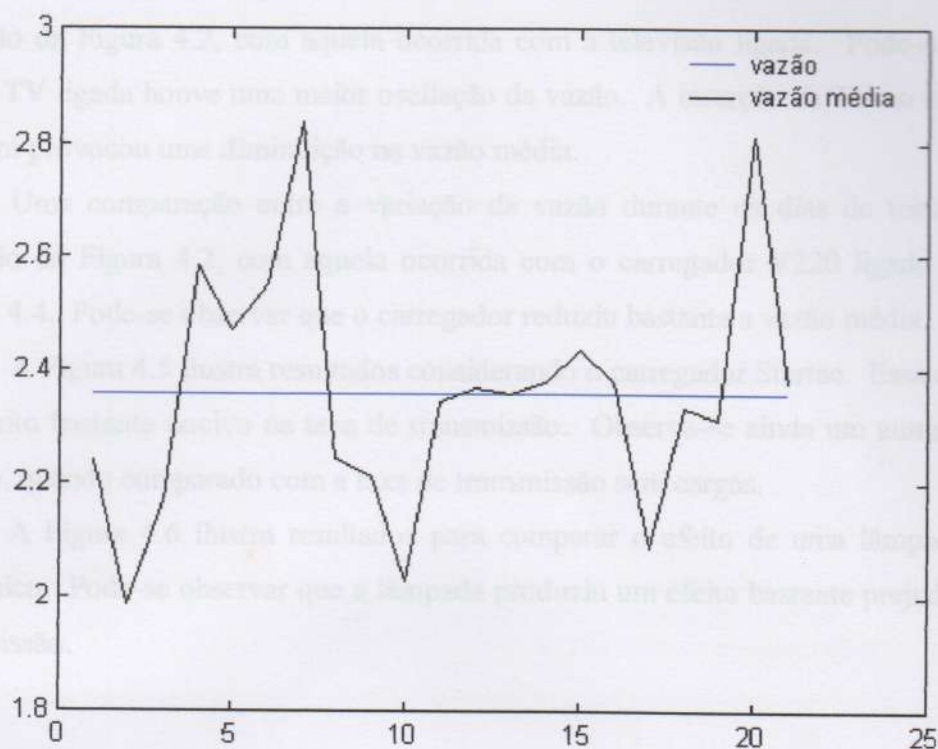


Figura 4.2 – Vazão em Mbps para a situação 2, sem cargas ligadas.

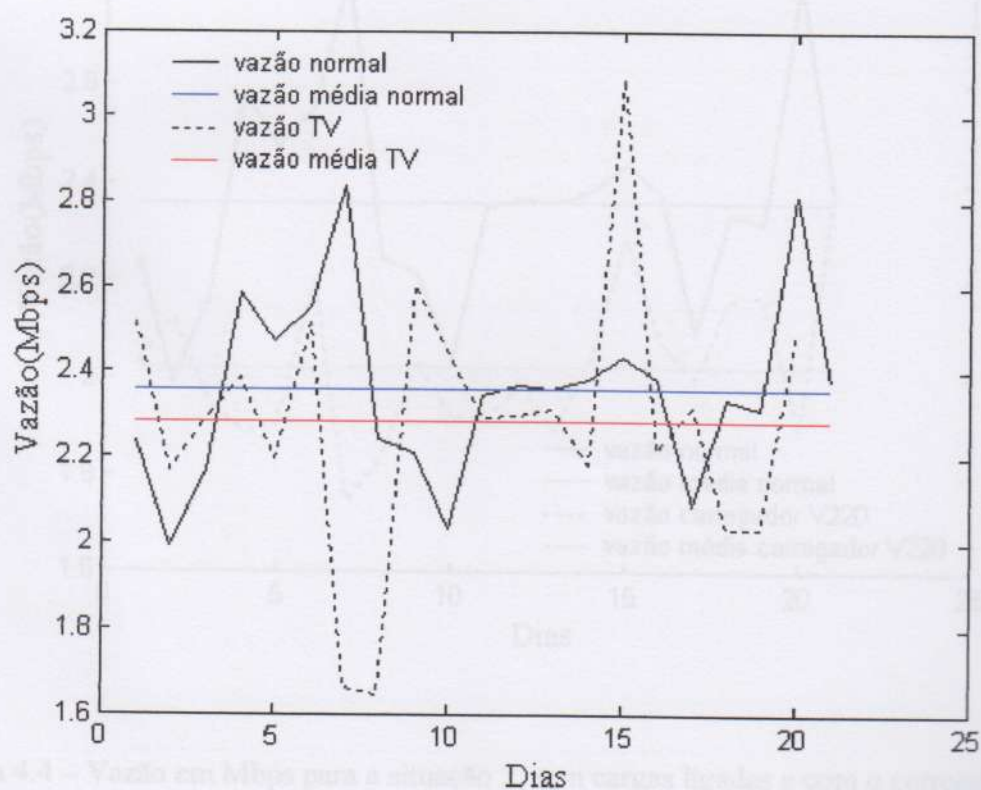


Figura 4.3 – Vazão em Mbps para a situação 2, sem cargas ligadas e com a TV ligada.

A Figura 4.3 compara a variação da vazão durante os dias de testes ocorrida na situação da Figura 4.2, com aquela ocorrida com a televisão ligada. Pode-se observar que com a TV ligada houve uma maior oscilação da vazão. A inserção da TV no circuito elétrico também provocou uma diminuição na vazão média.

Uma comparação entre a variação da vazão durante os dias de testes ocorrida na situação da Figura 4.2, com aquela ocorrida com o carregador V220 ligado é ilustrada na Figura 4.4. Pode-se observar que o carregador reduziu bastante a vazão média.

A Figura 4.5 ilustra resultados considerando o carregador Startac. Essa carga produziu um efeito bastante nocivo na taxa de transmissão. Observa-se ainda um aumento no desvio padrão, quando comparado com a taxa de transmissão sem cargas.

A Figura 4.6 ilustra resultados para comparar o efeito de uma lâmpada com reator eletrônico. Pode-se observar que a lâmpada produziu um efeito bastante prejudicial à taxa de transmissão.

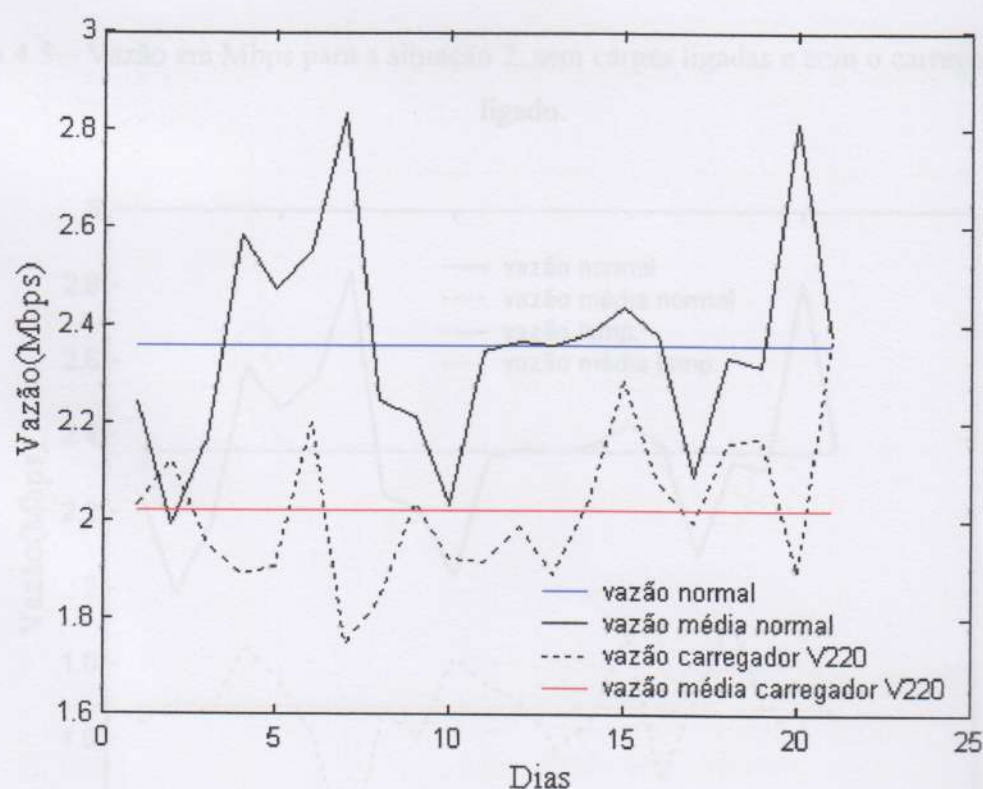


Figura 4.4 – Vazão em Mbps para a situação 2, sem cargas ligadas e com o carregador V220 ligado.

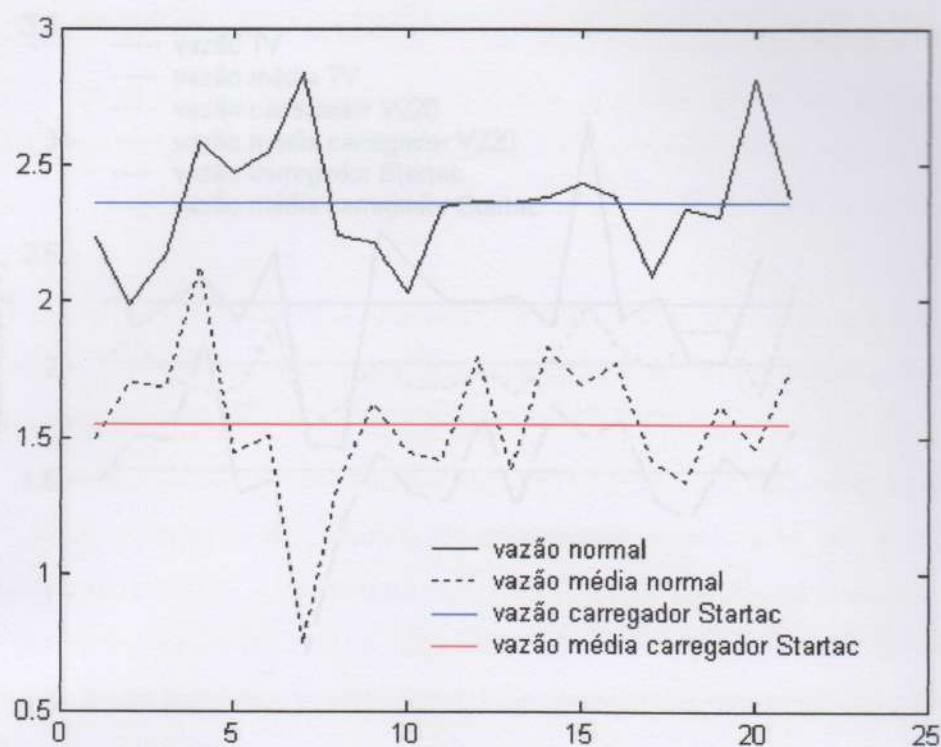


Figura 4.5 – Vazão em Mbps para a situação 2, sem cargas ligadas e com o carregador Startac ligado.

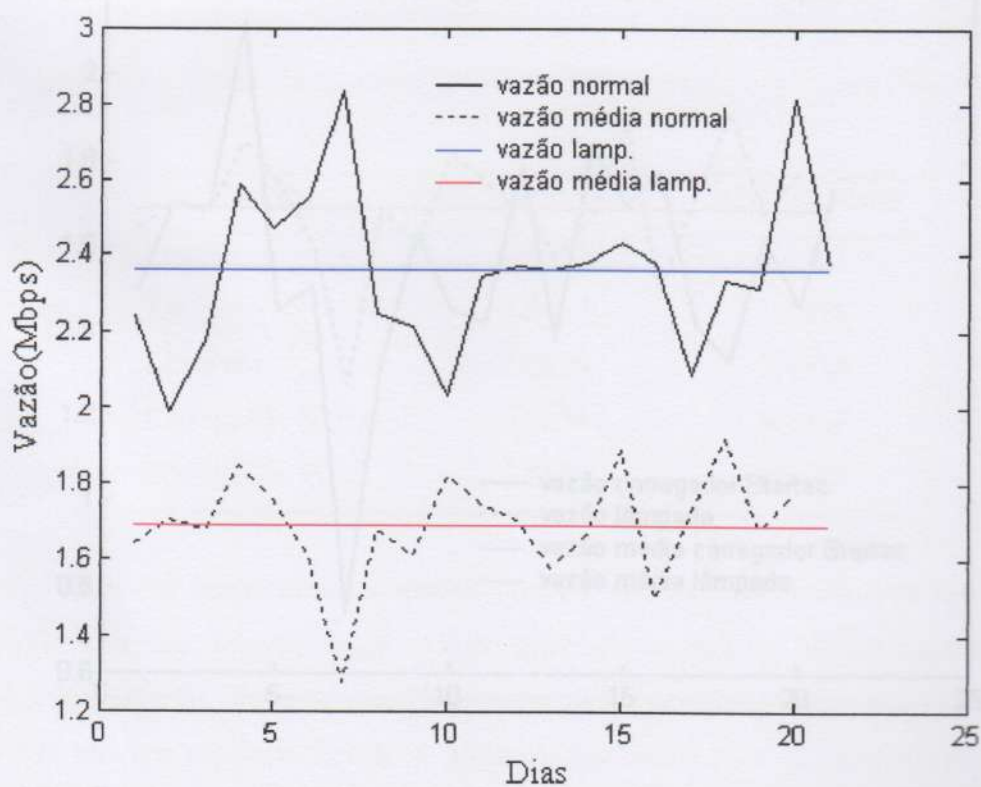


Figura 4.6 – Vazão em Mbps para a situação 2, sem cargas ligadas e com a lâmpada ligada.

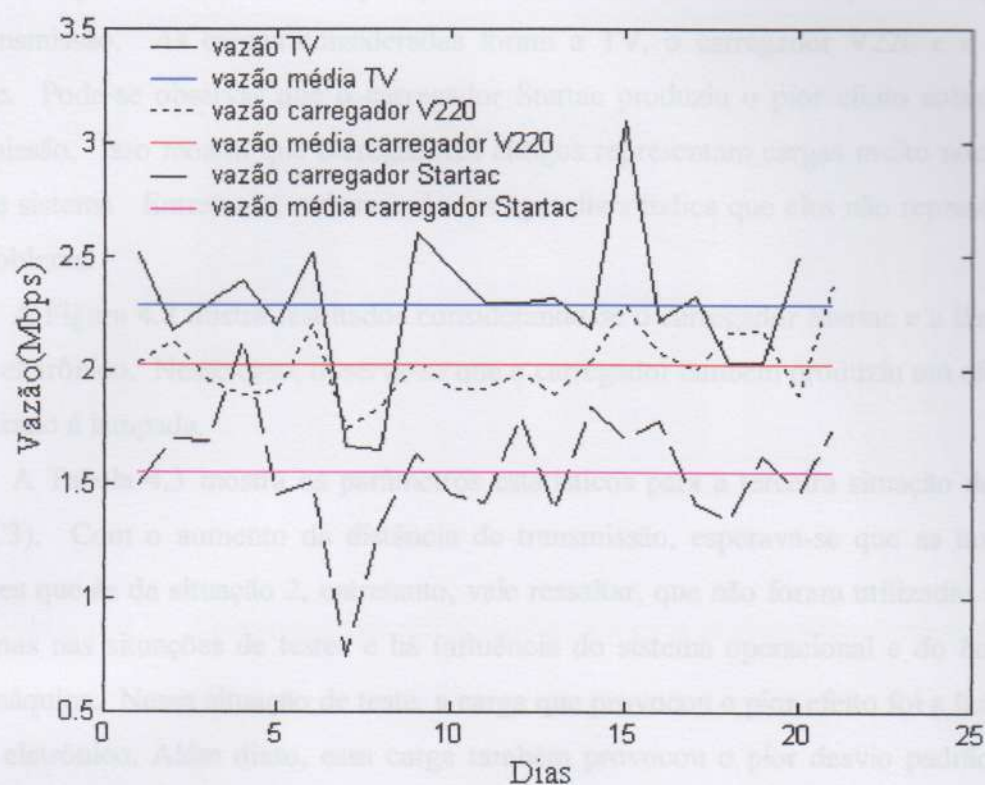


Figura 4.7 – Comparação do efeito de três diferentes tipos de cargas na taxa de transmissão.

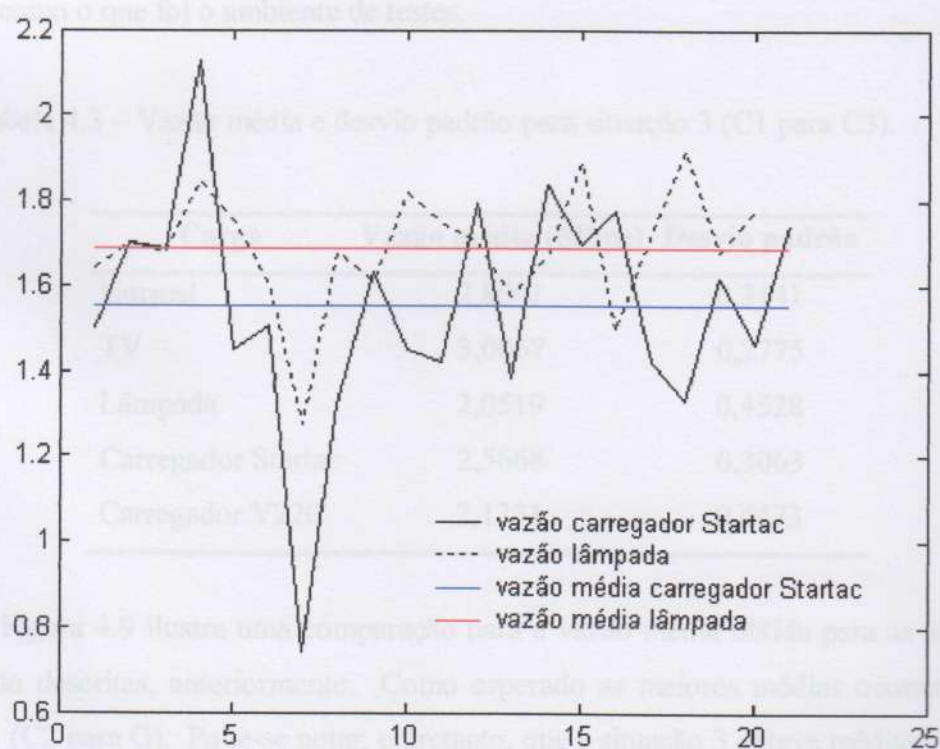


Figura 4.8 – Comparação do efeito produzido pelo carregador Startac e pela lâmpada na taxa de transmissão.

A Figura 4.7 ilustra a comparação do efeito de três diferentes tipos de cargas na taxa de transmissão. As cargas consideradas foram a TV, o carregador V220 e o carregador Startac. Pode-se observar que o carregador Startac produziu o pior efeito sobre a taxa de transmissão. Isso mostra que carregadores antigos representam cargas muito nocivas a esse tipo de sistema. Entretanto, o desuso desses aparelhos indica que eles não representam mais um problema.

A Figura 4.8 ilustra resultados considerando-se o carregador Startac e a lâmpada com reator eletrônico. Nesse caso, observa-se que o carregador também produziu um efeito pior se comparado à lâmpada.

A Tabela 4.3 mostra os parâmetros estatísticos para a terceira situação de teste (C1 para C3). Com o aumento da distância de transmissão, esperava-se que as taxas fossem menores que às da situação 2, entretanto, vale ressaltar, que não foram utilizadas as mesmas máquinas nas situações de testes e há influência do sistema operacional e do *hardware* de cada máquina. Nessa situação de teste, a carga que provocou o pior efeito foi a lâmpada com reator eletrônico. Além disso, essa carga também provocou o pior desvio padrão. Nota-se ainda, que os números da TV são melhores que os da condição normal. Isso mostra que a rede elétrica é um ambiente muito instável, principalmente, em ambientes com altos índices de ruído, como o que foi o ambiente de testes.

Tabela 4.3 – Vazão média e desvio padrão para situação 3 (C1 para C3).

Carga	Vazão média (Mbps)	Desvio padrão
Normal	2,8001	0,3141
TV	3,0067	0,2775
Lâmpada	2,0519	0,4528
Carregador Startac	2,5668	0,3063
Carregador V220	2,1331	0,4473

A Figura 4.9 ilustra uma comparação para a vazão média obtida para as situações de transmissão descritas, anteriormente. Como esperado as maiores médias ocorreram para a situação 1 (C2 para G). Pode-se notar, entretanto, que a situação 3 obteve médias maiores que a 2, o que não era esperado devido à distância ser maior para 3. Isso ocorreu devido à diferença entre as máquinas.

3 CONCLUSÕES

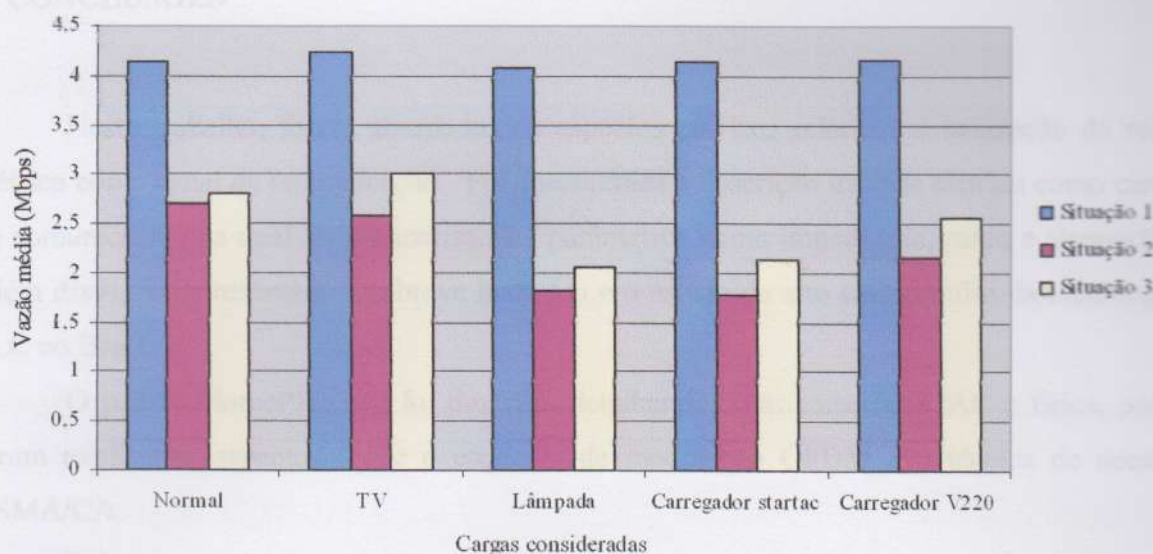


Figura 4.9 – Comparação da vazão média para cada carga e situação de teste.

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho, foram abordados os aspectos teóricos relativos à utilização da rede elétrica como canal de comunicação. Foi apresentada a descrição da rede elétrica como canal de comunicação, na qual foram analisados parâmetros como impedância, ruído e atenuação. Além disso, foi apresentado um breve histórico e o estado da arte em pesquisa da tecnologia PLC no Brasil.

O padrão HomePlug 1.0 foi descrito, detalhando-se as camadas MAC e física, onde foram explicados aspectos sobre o esquema de modulação OFDM e a técnica de acesso CSMA/CA.

Foi montada uma rede HomePlug 1.0, com quatro máquinas, na qual havia um gateway, através do qual três clientes compartilhavam o acesso à Internet.

Foi medido o desempenho da rede implementada considerando-se apenas a vazão da mesma.

Diversas situações de consumo elétrico foram analisadas, considerando-se diversos tipos de cargas elétricas.

Para medição da taxa de transmissão foi utilizado o gerente SNMP7 da *Castle Rock*. Objetos de interface física foram obtidos com esse software e equações apropriadas foram utilizadas, para medição da taxa de transmissão.

Os testes mostraram que carregadores de celular antigos e lâmpadas com reatores eletrônicos provocam uma maior redução na taxa de transmissão.

Apesar dos efeitos comprovados de algumas cargas elétricas, pelos testes apresentados, pôde-se observar que as taxas de transmissão são excelentes para usuários residenciais. Isso mostra que a tecnologia Homeplug 1.0 serve perfeitamente ao seu propósito. Essa tecnologia aparece como mais uma alternativa para redes SOHO e junto com a tecnologia 802.11 oferece uma maior flexibilidade para os usuários.

Este trabalho complementa as avaliações encontradas na literatura, objetivando o estudo das redes HomePlug no que diz respeito ao seu desempenho em função da demanda de consumo elétrico.

Como complementação desse trabalho, sugere-se a realização de testes residenciais, para uma caracterização mais apropriada do ambiente residencial. Podem ser realizados testes de outros parâmetros além da vazão. O desenvolvimento de uma MIB própria para equipamentos Homeplug, também geraria um excelente trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BAIG, S. e GOHAR, N. "A Discrete Multitone Transceiver at the Heart of the PHY Layer of an In-Home Power Line Communication Local Area Network". *IEEE Communications Magazine*, 2003, pp. 48 – 53.
- BIGLIERI, E., "Coding and Modulation for a Horrible Channel", *IEEE Communications Magazine*, 2003, pg. 92-98
- BRADEN, R. et al. "RFC 2205 Resource ReSerVation Protocol (RSVP) – Version 1 Functional Specification". IETF. (Updated by RFC2750) (Status: PROPOSED STANDARD). Set/1997.
- BINGHAM, J.A.C., "Multicarrier modulation for data transmission: an idea whose time has come", *IEEE Communications Magazine*, Vol. 28, no. 5, 1990, pg. 5 -14
- CAMPISTA, M. E. M., "Uma Análise da Capacidade de Transmissão na Rede de Energia Elétrica Domiciliar", Anais do XXI Simpósio Brasileiro De Telecomunicações – SBRt 2004, Belém, PA, 2004.
- CANETE, F. et. al., "Modeling and Evaluation of the Indoor Power Line Transmission Medium", *IEEE Communications Magazine*, 2003, pg. 41-47
- DAI, H. e POOR, V., "Advanced Signal Processing for Power Line Communications", *IEEE Communications Magazine*, 2003, pg. 100-107
- DOSTERT, K. M., "Frequency-hopping spread-spectrum modulation for digital communications over electrical power lines", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol 9, no 3, pp 700 – 710, 1990.
- FERREIRA, H. C.; et all, "Power line communications: an overview", IEEE Africon 4th Africon Conference, África, vol. 2, no. 4, pp. 558 – 563, 1996
- FITEC, "Projeto opera, de padronização da tecnologia PLC, reúne 38 entidades européias". Disponível em: <http://www.fitec.org.br>. Acesso em 11 de abril de 2006.
- FORUM PLC, "Cidades Digitais – Projeto Barreirinhas". Disponível em: <http://www.forumplc.com.br>. Acesso em 02 de abril de 2006.
- GEBHARDT, M. et. al., "Physical and Regulatory Constraints for Communication on the Power Supply Grid", *IEEE Communications Magazine*, 2003, pg. 84-90

- HUANG, H.; *et al.* "Development of an intelligent energy management network for building automation", *IEEE Transactions On Automation Science And Engineering*, vol. 1, no. 1, pp 14 – 25, 2004
- LINUXIT, "Article956". Disponível em: <http://www.linuxit.com.br>. Acesso em 15 de março de 2006.
- LEE, M. K. *et al.*, "HomePlug 1.0 Powerline Communication LANs –Protocol Description and Performance Results version 5.4". *International Journal of Communication Systems*, 2002, pp. 1 – 25.
- LIN, Y. J., LATCHMAN, H. A. e NEWMAN, R. E., "A Comparative Performance Study of Wireless and Power Line Networks", *IEEE Communications Magazine*, vol. 41, no. 4, pp. 54 – 63. 2003.
- MALACK, J.A. e ENGSTROM, J. R. "RF Impedance of United States and European Power Lines". *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. v. 18, no.1. pp. 36-38. Fev./1976.
- MARUBAYASHI, G. e TACHIKAWA, S. "Spread spectrum transmission on residential power line". *Anais do IEEE International Symposium on Spread Spectrum*, Mainz, Germany. pp. 1082–1086. Set/1996.
- PAVLIDOU, N. *et al.*, "Power Line Communications: State of the Art and Future Trends", *IEEE Communications Magazine*, 2003, pg. 34-40
- PINTO, E. L. e ALBUQUERQUE, C. P. "A técnica de transmissão OFDM". *Revista Científica Periódica*. v. 5, no. 1. pp. 1 – 10. Jul/2002.
- SUH, J.D. *et al.* "Measurements of Communication Signal Propagation on Three Phase Power Distribution Lines". *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 6. no.3. pp.945-951. julho/1991.
- VIDAL, A. M. "Power Line Communications: Comunicação em banda larga via rede elétrica". Disponível em: <http://www.eel.ufsc.br/gpqcom/vidal/PLC/relat.html>.2002> Acesso em 04 de abril de 2006.
- VINES, R. M. *et al.* "Noise on residential power distribution circuits". *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatability*, v. 26, no.4, pp. 161-168. Nov./1984.
- YAVATKAR, R. *et al.* "RFC 2814 SBM (Subnet Bandwidth Manager): A protocol for RSVP-based admission control over IEEE 802-style networks". *IETF*. (Status: PROPOSED STANDARD). Maio/2002.