

Aplicação de Transmissão de Dados via Rede Elétrica para o Canal de Retorno em Televisão Digital

Fabrício Braga Soares de Carvalho

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

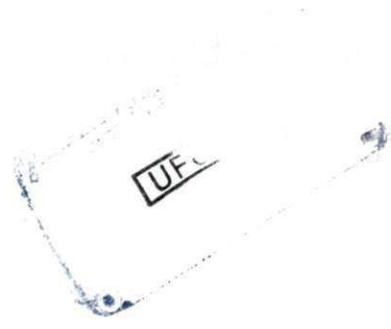
Área de Concentração: Processamento da Informação

Marcelo Sampaio de Alencar, Ph.D., UFCG
Orientador

Campina Grande, Paraíba, Brasil
©Fabrício Braga Soares de Carvalho, Fevereiro de 2006

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE

BIBLIOTECA



FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

C331a 2006 Carvalho, Fabrício Braga Soares de
Aplicação de Transmissão de Dados via Rede Elétrica para o Canal de Retorno em Televisão Digital/ Fabrício Braga Soares de Carvalho. — Campina Grande, 2006.
80 f. il.

Inclui bibliografia.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática.
Orientador: Marcelo Sampaio de Alencar, Ph.D.

1— Televisão Digital 2— Interatividade – Televisão Digital 3— Canal de Retorno – Televisão Digital 4— Televisão – *Power Line Communications* I— Título

CDU 621.397

UFPG - BIBLIOTECA - CAMPUS I

2174	30.04.06
------	----------

UFPG

APLICAÇÃO DE TRANSMISSÃO DE DADOS VIA REDE ELÉTRICA PARA O
CANAL DE RETORNO EM TELEVISÃO DIGITAL

FABRÍCIO BRAGA SOARES DE CARVALHO

Dissertação Aprovada em 23.02.2006

UFCG

Marcelo Sampaio de Alencar

MARCELO SAMPAIO DE ALENCAR, Ph.D., UFCG
Orientador

José Ewerton Pombo de Farias

JOSÉ EWERTON POMBO DE FARIAS, Dr., UFCG
Componente da Banca

Waslon Terllizze Araújo Lopes

WASLON TERLLIZZE ARAÚJO LOPES, D.Sc., Área 1 - BA
Componente da Banca

Iguatemi Eduardo da Fonseca

IGUATEMI EDUARDO DA FONSECA, Dr., UFCG
Componente da Banca

CAMPINA GRANDE - PB
Fevereiro - 2006

UFCG

Dedicatória

Dedico este trabalho aos meus pais, Martha e Ricardo, aos meus irmãos, Marcella e Dimitre, e à minha namorada, Marcella, que sempre me apoiaram e incentivaram para concluir esta etapa de minha vida.

Agradecimentos

- A Deus;
- Aos meus pais, Martha e Ricardo, aos meus irmãos, Marcella e Dimitre, e à minha namorada, Marcella, pelo apoio para concluir este trabalho;
- Ao professor Marcelo Sampaio de Alencar, pela orientação, pelas oportunidades e pela amizade;
- Aos professores Edmar, Iguatemi, José Ewerton e Waslon, pelas valiosas contribuições ao longo deste trabalho e pela amizade;
- Aos professores Bruno Albert e Marcos Barbosa, pela amizade;
- Aos alunos de pós-graduação Ewerton Romulo e Max Neri e aos engenheiros Cléverson Fernandes, Edson Filho, Eliezer Braz e Leonardo Lopes, pela colaboração na elaboração e realização dos testes práticos com o equipamento PLC;
- Aos colegas de pós-graduação Ademar Júnior, Anna Karina, Danilo, Djalma, Ewerton Romulo, Luciano, Luiz Felipe, Luiz Gonzaga, Manoel, Max Neri, Portela, Protásio, Scaico e Tomás, por suas contribuições e, sobretudo, pela companhia e amizade;
- Aos alunos de graduação Adolfo, Danilo, Erik, Gilney, Jerônimo, João Batista, Maí, Orléans, Paulo e Pierre, com quem trabalhei ao longo destes dois anos;
- Aos funcionários Eleonora, Pedro e Ronaldo, do DEE, pela presteza e disponibilidade;
- Ao IECOM, pelas oportunidades de trabalho em projetos e pesquisas;
- Ao CNPq, que financiou este trabalho.

Resumo

A televisão digital vem sendo utilizada em diversos países com sucesso. Além das vantagens técnicas e dos serviços disponibilizados, o principal atributo que a TV Digital oferece em comparação com a analógica é a interatividade. O canal de retorno (ou canal de interatividade) é o meio pelo qual os usuários podem interagir diretamente com as emissoras, adicionando diversas possibilidades aos serviços já oferecidos pela televisão digital. Portanto, o canal de retorno é fundamental para prover interatividade à TV Digital.

O Brasil realiza estudos para definir o meio de transmissão do canal de retorno para o padrão nacional de televisão digital. Uma das propostas analisadas diz respeito à utilização de linhas de distribuição de energia (tecnologia conhecida como PLC – *Power Line Communications*), para que o canal de interatividade possa ser transmitido.

Neste trabalho, é avaliada uma aplicação de transmissão de dados, baseada na rede elétrica, como solução para o canal de retorno da televisão digital. Foram realizados experimentos em diversos ambientes (residências, prédio de apartamentos, escritório, indústria, laboratórios) para analisar a viabilidade da transmissão da interatividade por meio da rede elétrica.

Abstract

Digital television is being successfully used in many countries. Aside from the technical advantages and the available services, when compared to the analog television, perhaps the main attribute that the Digital TV offers is the interactivity. The return channel (or interactive channel) is the way by which users can directly interact with the broadcasters, adding diverse possibilities to the services already offered by the digital television. Therefore, the return channel is very important to provide interactivity to the Digital TV.

Brazil is investing in studies to define the strategy to transmit the return channel of the national standard of digital television. One of the analyzed proposals suggests the use of power lines (known as PLC – Power Line Communications) to allow the transmission of interactivity.

In this work, a data communication application is evaluated, based in the electrical network, as a solution for the return channel of digital television. Experiments in various environments have been carried out (residences, residential apartments, office, industry, laboratories) to analyze the viability of the transmission of the interactive channel by the electrical network.

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Motivação	2
1.2	Objetivos do trabalho	2
1.3	Organização da dissertação	3
2	Televisão digital	4
2.1	HDTV - Televisão de alta definição	5
2.2	Middleware	7
2.3	Interatividade	9
2.3.1	Serviços interativos	11
2.4	Canal de retorno para TV Digital	12
2.5	Padrões de TV Digital	15
2.5.1	DVB-T	16
2.5.2	ATSC	19
2.5.3	ISDB-T	21
3	Comunicação pela rede elétrica	25
3.1	O canal de linhas de distribuição como meio de transmissão	28
3.1.1	Ruído	29
3.1.2	Atenuação	30
3.1.3	Alocação de frequência	30
3.1.4	Impedância da rede elétrica	31
3.1.5	Compatibilidade eletromagnética	31
3.2	Arquitetura de um sistema PLC	32
3.2.1	Camada MAC do PLC	33
3.2.2	Erros no envio de dados via PLC	34
3.3	Vantagens e desvantagens do PLC	34
3.4	Perspectivas	35

4	Transmissão no canal de retorno via PLC	37
4.1	Equipamento utilizado	38
4.2	Procedimentos de medição	39
4.3	Resultados e análise das medições	40
4.3.1	Ambientes residenciais	40
4.3.2	Ambiente industrial e de escritório	49
4.3.3	Prédio de apartamentos	56
4.3.4	Laboratórios	56
4.4	Proposta de implementação do canal de retorno	57
5	Conclusões	60
5.1	Propostas de trabalhos futuros	62
A	Canal de retorno para o SBTVD	63
A.1	GSM ou CDMA	63
A.2	Redes <i>ad hoc</i>	64
A.3	RF intrabanda	64
A.3.1	O padrão europeu	65
A.4	Telefonia fixa	66
A.4.1	Tecnologia DSL	67
A.4.2	TV a cabo	67
B	Modelo de transmissão	68
C	Publicações em congressos	73
	Referências Bibliográficas	75

Lista de Símbolos e Abreviaturas

3G – Telefonia celular de terceira geração

ADSL – Linha Assimétrica Digital do Assinante (*Asymmetric Digital Subscriber Line*)

ADTB – *Advanced Digital Television Broadcasting*

API – Interface de Programação de Aplicações (*Application Programming Interface*)

ARIB – *Association of Radio Industries and Business*

ARQ – *Automatic Repeat reQuest*

ATSC – *Advanced Television Systems Committee*

AWGN – Ruído Aditivo Gaussiano Branco (*Additive White Gaussian Noise*)

BPL – *Broadband Communications over Power Lines*

BST – *Band Segmented Transmission*

BML – *Broadcast Markup Language*

CATV – *Cable Television*

CDMA – *Code Division Multiplex Access*

CDMA 1xEV-DO – *Code Division Multiplex Access Evolution Data Only*

CDMA 1xEV-DV – *Code Division Multiplex Access Evolution Data and Voice*

CENELEC – *Comité Européen de Normalisation Electrotechnique*

CHESF – Companhia Hidro-Elétrica do São Francisco

CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

COFDM – *Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing*

CSMA – *Carrier Sense Multiple Access*

DAE – *Declarative Application Environment*

DASE – *DTV Application Software Environment*

DECT – *Digital Enhanced Cordless Telecommunications*

DES – *Data Encryption Standard*

DiBEG – *Digital Broadcasting Experts Group*

DSL – *Linha Digital do Assinante (Digital Subscriber Line)*

DSSS – *Espalhamento Espectral por Seqüência Direta (Direct Sequence Spread Spectrum)*

DVB – *Digital Video Broadcasting*

DVB-C – *DVB Cable*

DVB-J – *DVB Java*

DVB-MC – *DVB Microwave Cable-based*

DVB-MS – *DVB Microwave Satellite-based*

DVB-T – *DVB Terrestrial*

DVB-RCC – *DVB Return Channel for Cable*

DVB-RCCS – *DVB Return Channel for SMATV*

DVB-RCD – *DVB Return Channel for DECT*

DVB-RCG – *DVB Return Channel for GSM*

DVB-RCL – *DVB Return Channel for LMDS*

DVB-RCP – *DVB Return Channel for PSTN*

DVB-RCS – *DVB Return Channel for Satellite*

DVB-RCT – *DVB Return Channel Terrestrial*

DVB-S – *DVB Satellite*

EDTV – *Televisão de Definição Melhorada (Enhanced Definition Television)*

EPG – Guia de Programação Eletrônica (*Electronic Program Guide*)

ERB – Estação Radiobase

FEC – *Forward Error Correction*

FHSS – Espalhamento Espectral por Salto em Frequência (*Frequency Hopping Spread Spectrum*)

GEM – *Globally Executable MHP*

GMSK – *Gaussian Minimum Shift Keying*

GSM – *Global System for Mobile Communications*

HDTV – Televisão de Alta Definição (*High Definition Television*)

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IECOM – Instituto de Estudos Avançados em Comunicações

ISDB – *Integrated Services Digital Broadcasting*

ISDB-T – *Integrated Services Digital Broadcasting for Terrestrial Television*

ISDN – Redes Digitais de Serviços Integrados (*Integrated Services Digital Networks*)

ISO/OSI – *International Standardization Organization/ Open Systems Interconnection*

JVM – *Java Virtual Machine*

LAN – *Local Area Network*

LLC – *Logical Link Control*

LMDS – Serviço de Distribuição Local Multiponto (*Local Multipoint Distribution Service*)

LDTV – Televisão de Baixa Definição (*Low Definition Television*)

MAC – *Medium Access Control*

MCM – *Multiple-Carrier Modulation*

MHEG – *Multimedia and Hypermedia Experts Group*

MHP – *Multimedia Home Platform*

MMDS – Serviço de Distribuição de Sinais Multiponto Multicanais (*Multichannel Multipoint Distribution Service*)

NTSC – *National Television Standards Committee*

OFDM – *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*

OQAM – *Offset Quadrature Amplitude Modulation*

PAE – *Procedural Application Environment*

PLC – *Power Line Communications*

PLT – *Power Line Telecommunications*

PSK – *Phase Shift Keying*

PSTN – *Public Switched Telephone Network*

QAM – *Quadrature Amplitude Modulation*

QoS – Qualidade do Serviço (*Quality of Service*)

QPSK – *Quadrature Phase Shift Keying*

RTOS – Sistemas Operacionais em Tempo Real (*Real Time Operating Systems*)

RTPC – Rede Telefônica Pública Comutada

SBTVD – Sistema Brasileiro de Televisão Digital

SCM – *Single-Carrier Modulation*

SDTV – Televisão de Definição Padrão (*Standard Definition Television*)

SNR – Relação Sinal Ruído (*Signal to Noise Ratio*)

SMATV – *Satellite Master Antenna Television*

SMC – Serviço Móvel Celular

SMP – Serviço Móvel Pessoal

SMS – *Short Message Service*

SSB – *Single Side Band*

STFC – Serviço Telefônico Fixo Comutado

TCP/IP – *Transport Control Protocol/Internet Protocol*

UMTS – *Universal Mobile Telecommunications System*

USB – Porta Serial Universal (*Universal Serial Bus*)

UWB – *Ultra Wide Band*

VOD – *Video On Demand*

VoIP – *Voice over Internet Protocol*

VSF – *Vestigial Side Band*

Wimax – *Worldwide Interoperability for Microwave Access*

xDSL – família de tecnologias DSL

Lista de Tabelas

2.1	Serviços interativos e modelos de negócio para a TV Digital em alguns países (CPQD, 2005).	13
2.2	Especificações para transmissão em radiodifusão terrestre (TELECO, 2006).	16
2.3	Conjunto de especificações do padrão DVB para o canal de interatividade (REI-MERS, 2005).	20
4.1	Qualidade dos testes com vídeo.	48
4.2	Qualidade do vídeo - Casa 1.	48
4.3	Qualidade do vídeo - Casa 2.	48
4.4	Qualidade do vídeo - Casa 3.	49
4.5	Qualidade do vídeo - Apartamento.	49
4.6	Qualidade do vídeo - Escritório e indústria.	55

Lista de Figuras

2.1	Conjunto de padrões em um sistema de televisão digital para difusão terrestre (GRACIOSA, 2006).	5
2.2	Comparação entre a relação de aspecto 4:3 e 16:9 (HDTV, 2006).	6
2.3	Arquitetura básica dos elementos de um <i>middleware</i> (MC/MCT/FINEP/FUNTTEL, 2004a).	8
2.4	Modelo de <i>set-top box</i> disponível comercialmente (HDTV, 2006).	9
2.5	Modelo de sistema de televisão digital com interatividade.	10
2.6	Modelo para um sistema genérico de serviços interativos (REIMERS, 2005).	14
2.7	Opções de padrões para a TV Digital (FERNANDES et al., 2004).	17
2.8	Arquitetura do padrão DVB (FERNANDES et al., 2004).	18
2.9	Esquema do padrão DVB (TELECO, 2006).	19
2.10	Arquitetura do padrão ATSC (FERNANDES et al., 2004).	21
2.11	Esquema do padrão ATSC (TELECO, 2006).	22
2.12	Arquitetura do padrão ISDB (FERNANDES et al., 2004).	23
2.13	Esquema do padrão ISDB (TELECO, 2006).	24
3.1	Exemplo de aplicação da tecnologia PLC (VIDAL, 2006).	28
3.2	<i>Last inch access</i> , ou acesso dentro das residências.	29
4.1	Terminal PLC utilizado nos testes (ASOKA, 2006).	38
4.2	Conexão dos equipamentos utilizados nos testes.	40
4.3	Taxa de transferência em função da distância em ambientes residenciais sem carga.	41
4.4	Taxa de transferência em função da distância em ambientes residenciais com carga.	41
4.5	Taxa de transferência em função da dimensão dos pacotes em ambientes residenciais sem carga.	43
4.6	Taxa de transferência em função da dimensão dos pacotes em ambientes residenciais com carga.	43
4.7	Teste de carregamento na residência 1.	44
4.8	Teste de carregamento na residência 2.	45

4.9	Teste de carregamento na residência 3.	45
4.10	Teste de carregamento no apartamento.	46
4.11	Testes com vídeo em ambientes residenciais sem carga.	47
4.12	Testes com vídeo em ambientes residenciais com carga.	47
4.13	Taxa de transferência em função da distância em ambientes não-residenciais sem carga.	50
4.14	Taxa de transferência em função da distância em ambientes não-residenciais com carga.	51
4.15	Taxa de transferência em função da dimensão dos pacotes em ambientes não-residenciais sem carga.	52
4.16	Taxa de transferência em função da dimensão dos pacotes em ambientes não-residenciais com carga.	52
4.17	Teste de carregamento na indústria.	53
4.18	Teste de carregamento no escritório.	53
4.19	Testes com vídeo em ambientes não-residenciais sem carga.	54
4.20	Testes com vídeo em ambientes não-residenciais com carga.	54
4.21	Proposta de implementação do canal de retorno.	59
B.1	Aproximação a partir das fórmulas B.8, B.11 e B.13.	70
B.2	Comparação entre os resultados obtidos experimentalmente (com cargas conectadas nos ambientes) e as aproximações do modelo.	71

Capítulo 1

Introdução

A comunidade acadêmica brasileira vem se dedicando, nos últimos anos, às pesquisas relativas à implantação da televisão digital no país. O objetivo é fornecer subsídios para a definição do sistema de TV Digital nacional, seja ele totalmente concebido de acordo com as características brasileiras ou baseado em um dos padrões em uso (americano, europeu ou japonês).

O novo padrão que o Brasil pretende desenvolver deve suportar interatividade. Com ela, a TV Digital passa pela convergência com outras tecnologias, como a Internet e o computador, sendo decisiva a alteração da forma e conteúdo da televisão atual. Programas interativos, comércio eletrônico, ensino à distância, seleção de programas exclusivos e navegação na Internet são alguns dos serviços que podem ser disponibilizados com a implantação da televisão digital (CARVALHO et al., 2005).

A televisão ainda é o principal canal de comunicações disponível para os mais diferentes tipos de usuários (dados de 2004 indicam que cerca de 90,3% das residências no país possuem televisores em cores); em contrapartida, pouco mais de 17,5% dos domicílios possuem computador (sendo que apenas 13,2% das residências têm acesso à Internet) (IBGE, 2005). Portanto, a televisão digital, por ser a evolução natural da televisão analógica, passa a ser vista pelo governo brasileiro como a ferramenta para proporcionar a inclusão digital da população.

Um dos temas mais instigantes que vem sendo estudado diz respeito ao canal de interatividade (ou canal de retorno), mais especificamente à transmissão da interatividade até os telespectadores e o seu caminho inverso (dos usuários para as emissoras). Algumas das principais propostas de transmissão do canal de retorno em estudo para o SBTDV são (MC/MCT/FINEP/FUNTTTEL, 2004b):

- Emprego de canais de comunicação de dados do GSM;
- Emprego de canais de comunicação de dados do CDMA;

- Utilização de radiofrequência;
- Uso de redes *ad hoc*¹;
- Via telefonia fixa (com *modem* telefônico, serviços xDSL ou *cable modem*);
- Uso de comunicações em linhas de distribuição (PLC – *Power Line Communications*).

Além dessas, outras tecnologias estão sendo analisadas, com a intenção de se chegar a uma solução que se enquadre melhor no cenário brasileiro: transmissão via satélite, o uso do WIMAX ou UWB, dentre outros.

1.1 Motivação

No ano de 2004, o governo brasileiro deu início ao projeto de desenvolvimento do Sistema Brasileiro de Televisão Digital (SBTVD). A intenção era congrega os esforços de diversas instituições acadêmicas e centros de pesquisa nacionais com o intuito de definir um padrão de TV Digital brasileiro.

Um dos tópicos que está sendo desenvolvido corresponde à definição da transmissão do canal de retorno, que permitirá ao usuário o acesso à interatividade e à inclusão digital.

A proposta de transmissão do canal de interatividade por meio das linhas de energia elétrica (tecnologia denominada *Power Line Communications*) surgiu como uma das opções para o padrão brasileiro de televisão digital. Apesar das dificuldades de transmissão de sinais de dados de alta frequência nas linhas de energia elétrica, a quase universalidade do fornecimento de energia elétrica no Brasil (99,5% dos domicílios brasileiros (IBGE, 2005)) é um fator relevante. Além disso, a oferta de produtos que utilizam a tecnologia PLC, oferecendo altas taxas de transmissão de dados a preços acessíveis, tem o potencial de baratear e expandir rapidamente o mercado de aplicativos PLC.

A intenção, portanto, é avaliar a adequabilidade da transmissão do canal de interatividade da TV Digital via *Power Line Communications*, de maneira a propor uma solução barata e eficiente para se transmitir a televisão digital no país.

1.2 Objetivos do trabalho

Neste trabalho é desenvolvido um estudo do canal de retorno da televisão digital e é analisada uma proposta de transmissão do canal de interatividade, utilizando a tecnologia PLC. Foram rea-

¹Em uma rede *ad hoc*, os nós podem funcionar tanto como roteadores quanto como receptores, sem a necessidade de uma entidade central (XU et al., 2003), (XU; WALKER, 2001), (CHUNG, 2004).

lizados testes práticos, por meio de equipamentos PLC disponíveis comercialmente, em diversos ambientes: residências, prédio de apartamentos, ambientes de escritórios, indústria e laboratórios. A intenção é traçar um panorama acerca da possibilidade de empregar tal técnica na transmissão do canal de retorno do padrão brasileiro de TV Digital, com a avaliação de diversos parâmetros da transmissão e sua adequação à realidade brasileira.

1.3 Organização da dissertação

A organização desta dissertação é feita como se segue:

- O Capítulo 2 apresenta uma descrição da televisão digital e dos conceitos de interatividade e de canal de retorno;
- O Capítulo 3 descreve a tecnologia PLC;
- O Capítulo 4 apresenta a proposta de transmissão do canal de interatividade da televisão digital via PLC e discorre sobre os testes e experimentos realizados para sua avaliação, além de apresentar os resultados experimentais e a análise destes;
- O Capítulo 5 contém as conclusões e as perspectivas de trabalhos futuros;
- O Anexo 1 discorre sobre as demais propostas de transmissão do canal de retorno do Sistema Brasileiro de TV Digital;
- O Anexo 2 apresenta um modelo para otimizar a transmissão de dados por meio da rede elétrica;
- Por fim, o Anexo 3 lista os artigos do autor publicados em congressos nacionais e internacionais.

Capítulo 2

Televisão digital

A televisão digital surgiu como uma evolução natural da televisão analógica. Anteriormente, todas as etapas envolvidas na produção de um programa (gravação de cenas, edição, acabamento, armazenamento dos vídeos, etc), na transmissão (radiodifusão) e na recepção (antena e receptor do televisor) do sinal pelo usuário eram analógicas; ou seja, os sinais que representavam a imagem e o áudio gerados no estúdio eram analógicos, bem como os sinais transmitidos para os receptores de TV, também analógicos.

No Brasil, atualmente, a informação é gerada digitalmente em estúdio. Estes sinais são convertidos em sinais analógicos e transmitidos para os receptores analógicos de televisão. Na TV Digital, todos os processos passam a ser digitais; portanto, a imagem, o áudio e demais informações são geradas, transmitidas e recebidas na forma de sinais digitais. Ela apresenta melhor definição de imagem e de som: a imagem é mais larga que a atual (tela panorâmica), com maior grau de resolução (alta definição) e som estéreo (GRACIOSA, 2006),(ZUFFO, 2006).

Um sistema de TV Digital é formado por um conjunto de padrões, conforme apresentado na Figura 2.1, que identifica seus componentes básicos: o vídeo e o áudio representam os serviços indispensáveis à transmissão de TV Digital; e a interatividade e os novos serviços (comércio eletrônico, acesso à Internet, etc), que são adicionados ao sistema pelo *middleware*. Esses novos serviços, introduzidos pela televisão digital, são oriundos da transmissão de dados juntamente com o vídeo e o áudio. Eles podem ser empregados para oferecer novos conceitos na transmissão de programas para os usuários, ou mesmo enviar dados para aplicações que não possuem ligação direta com a programação televisiva (CRINON et al., 2006). Na televisão digital, os telespectadores passam a ser denominados de usuários, pois eles não mais participam passivamente, ao interagir com as emissoras e com as empresas/provedoras de serviços (MANHÃES; SHIEH, 2005),(VALDESTILHAS et al., 2005).

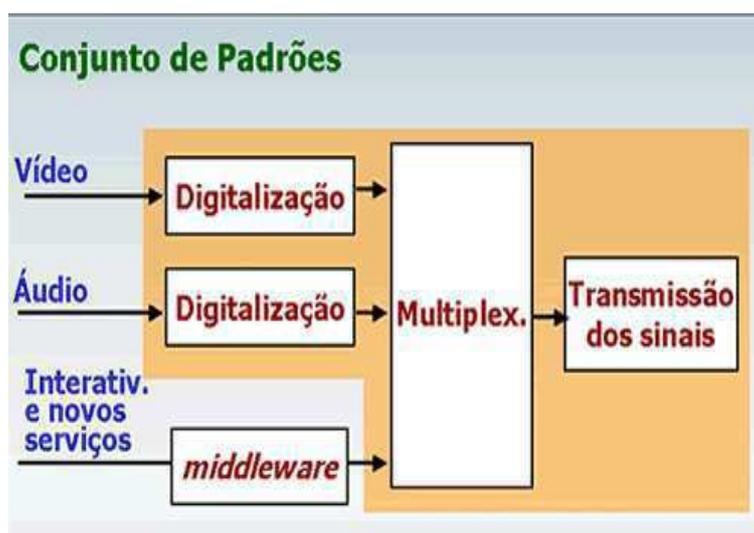


Figura 2.1: Conjunto de padrões em um sistema de televisão digital para difusão terrestre (GRACIOSA, 2006).

2.1 HDTV - Televisão de alta definição

A TV de Alta Definição (*High Definition TV* ou HDTV) é um sistema de televisão digital que apresenta uma qualidade maior da imagem, quando comparada aos sistemas tradicionais de televisão. A HDTV permite a transmissão de imagens com maior número de detalhes, maior largura do quadro (relação de aspecto de 16:9) e com som estéreo de até 6 canais (permitindo a utilização em diversos idiomas, dentre outros serviços (JONES et al., 2006)). A Figura 2.2 apresenta a comparação entre televisores com relação de aspecto 4:3 e 16:9. A comparação mais adequada entre a televisão convencional e a HDTV, todavia, não se baseia na relação de aspecto, e sim no detalhe da imagem (a HDTV permite que a imagem seja observada através de um ângulo muito maior) (POYNTON, 2003).

Atualmente, os sistemas de HDTV mais populares são:

- Sistema com 750 linhas/quadro, 60 quadros/segundo, varredura progressiva de 60 campos/segundo (sem intercalamento) e 720 linhas ativas por quadro;
- Sistema com 1125 linhas/quadro, 30 quadros/segundo e varredura intercalada de 60 campos/segundo e 1080 linhas ativas por quadro.

Na varredura intercalada, apenas metade da figura estará na tela em qualquer momento: enquanto um *frame* mostra apenas as linhas ímpares (1,3,5,...), o próximo *frame* apresentará apenas as linhas pares (2,4,6,...). Este fenômeno acontece tão rápido que o olho humano tem a sensação de que apenas uma imagem é vista. Por sua vez, a varredura progressiva faz com que

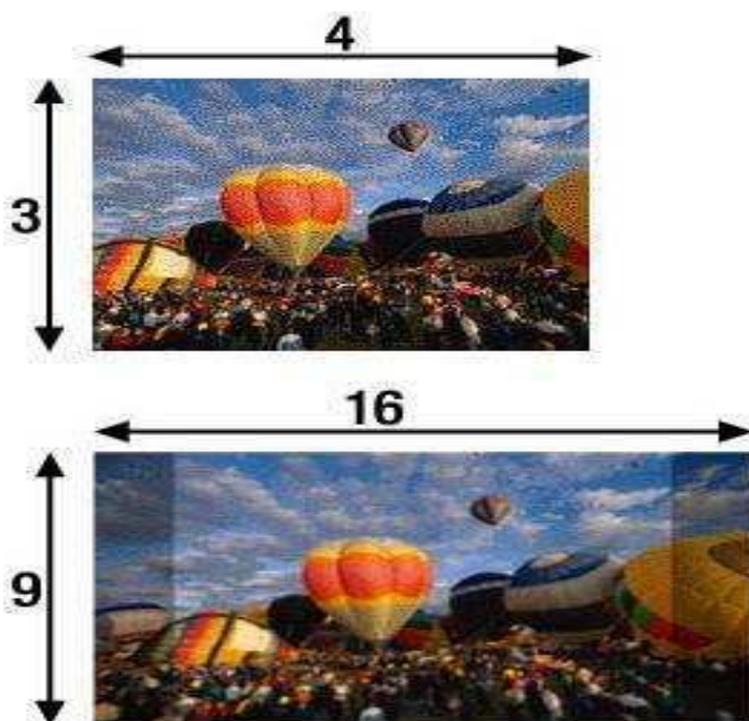


Figura 2.2: Comparação entre a relação de aspecto 4:3 e 16:9 (HDTV, 2006).

cada *frame* seja mostrado completo a cada instante. Em vez de intercalar as linhas, cada *frame* é apresentado como sendo composto da linha 1, linha 2, linha 3, etc. O resultado final é uma imagem muito mais nítida (HDTV, 2006).

Os sinais de HDTV são difundidos, conforme apresentado, no formato de 720p ou 1080i, respectivamente: 720p significa que há 720 linhas horizontais que são varridas progressivamente, e 1080i indica que existem 1080 linhas horizontais que são varridas em forma de intercalamento. Apesar de haver uma diferença significativa entre o número de linhas horizontais que são escaneadas, o resultado das imagens obtidas por meio do 720p e do 1080i é muito semelhante (POYNTON, 2003).

Um canal de TV Digital pode transmitir tanto uma programação de HDTV quanto de SDTV (*Standard Definition Television*), ou mesmo as duas simultaneamente; o número de programas vai depender da largura de banda alocada disponível. Diversos países ainda transmitem sua programação de televisão digital no formato SDTV (JONES et al., 2006). A SDTV é um sistema com uma resolução espacial de 480 linhas (com 640 *pixels*¹ por linha) e uma resolução temporal de 60 quadros por segundo em modo entrelaçado. A qualidade de imagem da SDTV é superior à recebida pelas emissoras abertas de televisão analógica, não apresentando problemas

¹Pixel (*picture element*) é o menor elemento de informação possível em uma imagem, que possui um conjunto único de atributos, como cor e luminosidade.

como o de cores cruzadas ou chuviscos típicos que ocorrem na recepção doméstica de sinais analógicos. Atualmente, a maioria das transmissões é realizada no formato 4:3, mesmo que haja uma tendência à migração para o formato 16:9 (*widescreen*). Comparativamente, a taxa de bits correspondente a um programa de HDTV permite a transmissão de quatro programas de SDTV.

Além da HDTV e da SDTV, também há a possibilidade de transmissão de (HDTV, 2006):

- *Enhanced Definition Television* (EDTV): a TV com Definição Melhorada representa uma definição intermediária que, embora não apresente os valores de resolução da HDTV, apresenta uma qualidade de imagem melhor do que a SDTV. Tipicamente, tem-se uma tela larga (16:9) e resolução de 480 linhas, 720 *pixels*/linha e varredura em modo progressivo. O áudio é o estéreo (5/1), como na HDTV;
- *Low Definition Television* (LDTV): a TV de Baixa Definição tem qualidade ou resolução inferior à SDTV. Um exemplo típico é o sistema com 240 linhas, 320 *pixels* por linha e varredura progressiva. Grande número de *softwares* e placas de captura para microcomputadores, por exemplo, trabalham atualmente com imagens nessa ordem de resolução. Outro exemplo típico é o videocassete doméstico, que apresenta resolução de 480 linhas entrelaçadas e cerca de 330 *pixels*/linha (além de uma sensível degradação na resolução cromática, fato que não ocorre na LDTV).

2.2 Middleware

Middleware é uma camada de *software* entre a rede e suas aplicações, permitindo serviços interativos na TV Digital. Seu objetivo principal é fornecer um conjunto de ferramentas que possibilite a interoperabilidade entre sistemas de transmissão de vídeo para vários tipos de mídias de transmissão, incluindo satélites, cabos, redes terrestres e microondas.

Em seu nível mais básico, o *middleware* possui um *software* que acessa o fluxo de vídeo, áudio e dados, fazendo o roteamento destes para um dispositivo de saída (monitor) ou guardando os dados em um dispositivo de armazenamento. O *middleware* recebe entradas dos dispositivos de entrada (o controle remoto e/ou o teclado) do telespectador, e envia saídas para a tela da televisão e para as caixas de som, além de proporcionar a comunicação com entidades remotas por meio de um canal remoto.

A arquitetura básica da organização dos elementos do *middleware*, apresentada na Figura 2.3, pode ser descrita como a seguir (MC/MCT/FINEP/FUNTTTEL, 2004a):

- *Recursos*: a camada mais inferior representa os recursos de *hardware* e *software* da plataforma, cujos elementos (placas-mães, microprocessadores, subsistemas e sistemas opera-

cionais em tempo real - RTOS) variam conforme o fabricante. O *middleware* visualiza os recursos de forma abstrata, de maneira que os recursos podem ser mapeados em uma ou mais entidades de *hardware* distintas;

- *Middleware*: as aplicações não acessam diretamente os recursos, e o *middleware* fornece às aplicações uma visão abstrata destes. Ele isola a aplicação do *hardware*, possibilitando a portabilidade da aplicação. Além disso, o *middleware* é responsável por gerenciar todas as aplicações, inclusive as aplicações residentes;
- *API*: a API (interface de programação de aplicações) provê os serviços associados às aplicações. Na prática, existem diversas APIs que implementam serviços e interfaces distintas. O *middleware* implementa a API, apresentando um modelo abstrato de:
 - *streams* de áudio e vídeo executados de diferentes fontes e canais para conduzi-los;
 - comandos e eventos;
 - registros ou arquivos de dados;
 - recursos de *hardware*.
- *Aplicações*: implementam serviços interativos na forma de *software* para ser executado em uma ou mais entidades de *hardware*. A API do *middleware* é a visão que as aplicações têm do *software* dos sistemas.

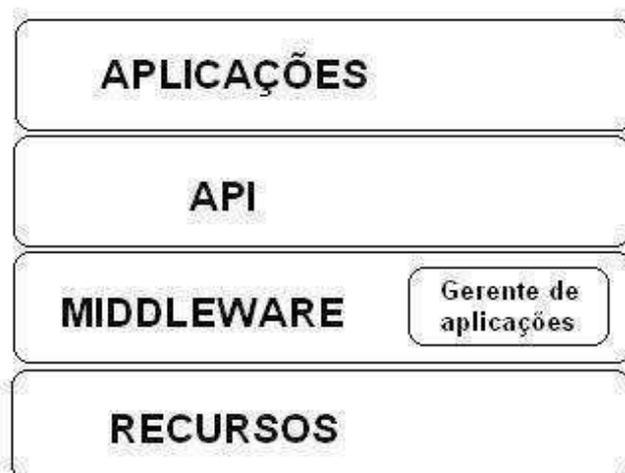


Figura 2.3: Arquitetura básica dos elementos de um *middleware* (MC/MCT/FINEP/FUNTTTEL, 2004a).

Atualmente, há três grandes padrões de *middleware* em uso: o DASE, do padrão americano de televisão digital (ATSC), o MHP, do padrão europeu (DVB) e o ARIB, do padrão japonês (ISDB). Além desses, outros padrões têm sido desenvolvidos para suporte a vídeo interativo, como o MHEG e o MPEG-4.

2.3 Interatividade

Em um sistema de televisão digital interativa, é necessário o armazenamento local das informações. Independentemente da existência ou não do canal de interatividade, a interação do usuário é fornecida basicamente pelo processamento das informações armazenadas localmente. Assim, deve haver o armazenamento local das informações ou a existência de um canal de retorno para prover a interatividade (MOREIRA, 2006). Os novos aparelhos digitais possuem transceptores que permitirão a interatividade, embora os equipamentos de televisão convencional estejam aptos a receber o conteúdo da TV Digital e fazer a interatividade por meio de um equipamento chamado *set-top box*. A Figura 2.4 apresenta um modelo de *set-top box* disponível comercialmente.



Figura 2.4: Modelo de *set-top box* disponível comercialmente (HDTV, 2006).

O *set-top box* surge no cenário atual como opção ao alto custo de um televisor digital. Trata-se de um decodificador que recebe o conteúdo da TV Digital e o converte para o formato analógico, de modo que o usuário possa ter acesso à tecnologia digital. Por meio dele, também é possível navegar na Internet, fazendo uso de um canal de retorno. E, a partir do contato inicial com a tecnologia digital, o usuário pode se decidir pela transição para o equipamento de televisão digital (VALDESTILHAS et al., 2005).

A Figura 2.5 apresenta o modelo de um sistema de televisão digital com interatividade. Este modelo mostra a geração dos programas televisivos pelas emissoras, que distribuem sua programação por radiodifusão aos usuários espalhados pelo país. O usuário recebe a programação digital e o *set-top box* realiza a conversão, permitindo que se assista à TV Digital nos aparelhos analógicos. As informações provenientes da emissora/provedor de serviço de radiodifusão são

transmitidas através do canal de *broadcast*, enquanto que as informações interativas podem ser transmitidas por meio do canal de interatividade ou mesmo pelo canal de radiodifusão. E as informações do usuário são transmitidas pelo canal de interatividade (MOREIRA, 2006).

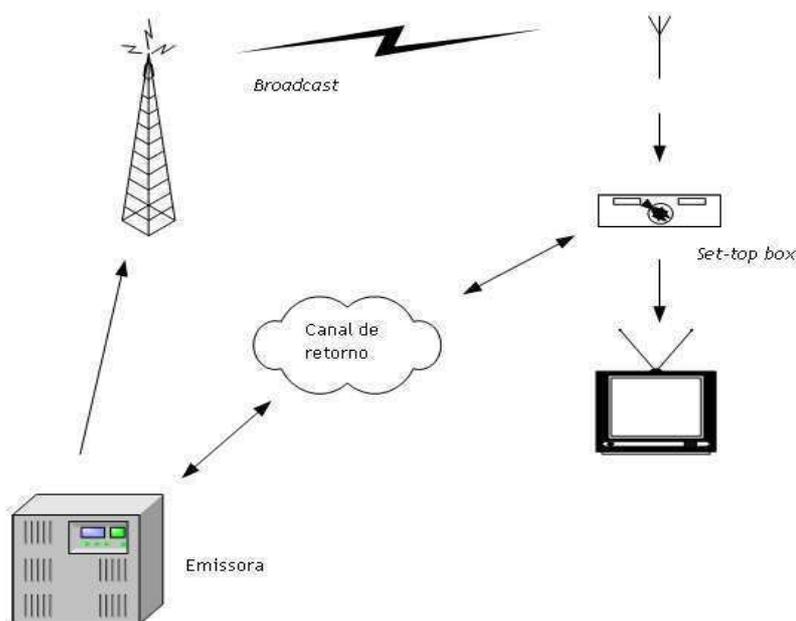


Figura 2.5: Modelo de sistema de televisão digital com interatividade.

A forma mais básica de interatividade é chamada de interatividade local, que pode ser obtida dentro do terminal do usuário ou do *set-top box*; os dados pertencentes a determinados serviços interativos são transmitidos e armazenados no terminal. Este terminal pode reagir às respostas do usuário sem requerer trocas de dados ao longo da rede.

Caso se almeje habilitar o usuário a responder, de alguma maneira, ao serviço interativo, e se o provedor ou o operador da rede devem captar tal resposta e reagir a ela, deve-se prover um canal de interatividade ao longo da rede de transmissão. Essa interatividade pode ser simples, como na votação em um participante de um programa televisivo; neste cenário, seria suficiente apenas um canal de retorno direcional, na direção telespectador – provedor.

Se for necessário um nível maior de interatividade, quando o usuário precisa de uma resposta (na hipótese de uma compra *on-line*, por exemplo, em que o consumidor envia os dados de seu cartão de crédito e deve receber a confirmação da transação efetuada), deve-se implementar um canal direto entre o provedor e o consumidor. O canal de *broadcast* não será suficiente se não dispuser de um endereçamento individual, visto que tal informação é confidencial e deve ser destinada unicamente ao cliente em questão.

Se a informação esperada ou requisitada pelo usuário do serviço interativo for mais complexa

ou exigir uma alta capacidade de transmissão, um outro nível de interatividade deve ser atingido. É o caso de um potencial consumidor que, ao acompanhar o anúncio de um produto de um fabricante, entra em contato com este para informações suplementares. Neste caso, o canal de interatividade direto deverá ser transmitido via radiodifusão. Neste ponto, o serviço interativo se assemelha a uma comunicação bidirecional com exigências similares para a capacidade e a qualidade de transmissão, tanto na direção direta quanto na reversa.

A adição de interatividade à infra-estrutura da televisão digital exige que a instalação do sistema seja estendida aos componentes que fornecem comunicação entre o usuário final e o fornecedor do serviço interativo. Pode-se fazer uso da alta taxa de bits dos canais de *broadcast* da televisão digital na distribuição da informação ao usuário do serviço interativo em taxas que atingem até 20 Mbps por canal em redes de difusão terrestres, e até 38 Mbps por canal em redes de difusão via satélite ou cabo. A capacidade de transmissão do canal de interatividade vai depender, evidentemente, do tipo de rede utilizada para sua transmissão (REIMERS, 2005).

2.3.1 Serviços interativos

O termo *serviços interativos* pode descrever uma gama de diferentes tipos de serviços oferecidos, que exigem um nível variável de interação entre o usuário e o fornecedor do serviço ou operador da rede. A interatividade proporciona algumas novas funcionalidades à televisão; alguns dos serviços que já estão disponíveis, ou que estarão em breve, são (RESENDE, 2004), (CRINON et al., 2006):

- *EPG* - Talvez a mais antiga forma de interatividade pela televisão, o EPG (Guia de Programação Eletrônica) permite aos usuários acompanhar a programação de centenas de canais, facilitando a escolha do programa desejado;
- *Enhanced TV* - É uma evolução para os programas de televisão que já utilizam a interatividade; a diferença reside no formato pelo qual o usuário interagirá com a emissora, que não será mais via Internet (pelo computador) ou via telefone, mas por intermédio do próprio receptor de TV Digital;
- *Individualized TV* - Neste tipo de serviço, o usuário terá à disposição um nível de interatividade semelhante ao de um aparelho de DVD (será possível configurar opções de câmera, som e legenda de acordo com sua vontade);
- *Internet TV* - É o serviço que permite o acesso à Internet na tela da TV;
- *Video On Demand* - O VOD é uma aplicação interativa que teve grande impulso nos últimos anos; trata-se de uma aplicação que fornece aos usuários uma seleção com filmes

ou programas de TV disponíveis naquele instante. O VOD difere do EPG por permitir a busca de um programa dentro de uma base de dados com milhares de atrações, indicando se aquela desejada pelo telespectador está em exibição e em qual canal;

- *Anúncios comerciais* - Propagandas comerciais podem ser incrementadas com a opção de detalhar, caso o usuário se interesse, determinado produto anunciado. Também já há aplicações em que o usuário entra em contato direto com o vendedor, podendo inclusive adquirir o produto por meio da televisão. Aplicação semelhante já é disponibilizada em canais dedicados a vendas;
- Compra de MP3, filmes ou produtos educativos, que podem ser baixados via *download* de um servidor após efetuada a transação.

Além dos serviços interativos, outros serviços disponibilizados pela televisão digital são (CPQD, 2005):

- *Monoprogramação* - exibição de um único programa, com conteúdo de vídeo e de áudio associado, em uma frequência designada exclusivamente para a emissora/programadora. Essa opção, não obrigatória no ambiente da TV Digital terrestre, vem sendo utilizada em alguns países nas transmissões de imagem em alta definição (HDTV);
- *Multiprogramação* - oferta de múltiplas programações simultâneas através de um único canal de frequências. Graças à codificação de sinais de vídeo/áudio e dados, pode-se transmitir de quatro a seis programas simultâneos, em SDTV;
- *Mobilidade/portabilidade* - permite a recepção dos sinais de TV Digital pelo usuário em diferentes condições de movimento (parado, caminhando ou mesmo dentro de um veículo em alta velocidade). A recepção pode ser realizada por meio de aparelhos de televisão em veículos e de receptores de TV integrados a aparelhos celulares ou *palmtops* (FARIA et al., 2006), (ITOH; TSUCHIDA, 2006);
- *Multiserviços* - congregam vários serviços de radiodifusão e de telecomunicações, simultaneamente, em uma mesma plataforma de televisão digital.

Estudo realizado por (CPQD, 2005) faz um panorama mundial das experiências de implantação e exploração da televisão digital terrestre, em alguns dos países pioneiros na sua utilização. Esse levantamento é apresentado na Tabela 2.1. Além dos serviços interativos, nela são relacionados outros serviços: monoprogramação, multiprogramação, serviços baseados em mobilidade ou portabilidade e em ambientes multiserviços.

Tabela 2.1: Serviços interativos e modelos de negócio para a TV Digital em alguns países (CPQD, 2005).

SERVIÇOS	Alemanha	Austrália	Coreia do Sul	Espanha	EUA	Finlândia	Holanda	Itália	Japão	Reino Unido	Suécia
Monoprogramação		X	X		X				X		
Multiprogramação	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X
Interativos											
(sem canal de retorno)	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
(com canal de retorno)			X			X		X	X		
Mobilidade/ Portabilidade			X			X			X		
Multiserviço	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X
MODELOS DE NEGÓCIO											
TV aberta	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X
TV por assinatura				X	X	X	X			X	X
<i>Pay-per-view</i>								X			

2.4 Canal de retorno para TV Digital

O canal de interatividade é conceituado como um sistema que possibilita a cada usuário, individualmente e independentemente dos demais, interagir encaminhando ou recebendo informações e solicitações das emissoras (MANHÃES; SHIEH, 2005). Ou seja, o canal de retorno é o meio pelo qual as emissoras e os anunciantes da televisão atingirão diretamente os telespectadores; é por este canal que se estabelece uma ligação direta entre o usuário e o vendedor de um determinado produto ou entre a direção da emissora. Caso o assinante deseje, pode escolher uma programação diferente da que está sendo exibida, ou pode mudar o ângulo da câmera que está transmitindo a atração.

Além dos benefícios relacionados à exibição normal da programação de uma emissora e da maior interação com os anunciantes, o telespectador pode decidir acompanhar um processo que tramita na Justiça como serviço e-governo, conferir se o salário do mês foi depositado em sua conta bancária por meio do *home banking* ou mesmo chamar os filhos para a aula de inglês *on line*. Todas essas possibilidades podem parecer intangíveis em um curto espaço de tempo, porém

tais avanços podem ser idealizados por meio do canal de interatividade da TV Digital.

O modelo apresentado na Figura 2.6 ilustra um sistema genérico de serviços interativos. O canal de descida (canal de *downlink*) estabelece a comunicação entre a emissora e os telespectadores; ela pode se dar por radiodifusão (aberta e disponível para todos os usuários/assinantes) ou ser individualizada. E o usuário fica habilitado a interagir com a emissora por meio do canal de subida (canal de *uplink*) ou canal de retorno, indicando suas preferências e opiniões. O canal de retorno pode ser implementado por qualquer tecnologia de comunicações que estabeleça a comunicação no sentido dos usuários para as emissoras (MANHÃES; SHIEH, 2005).

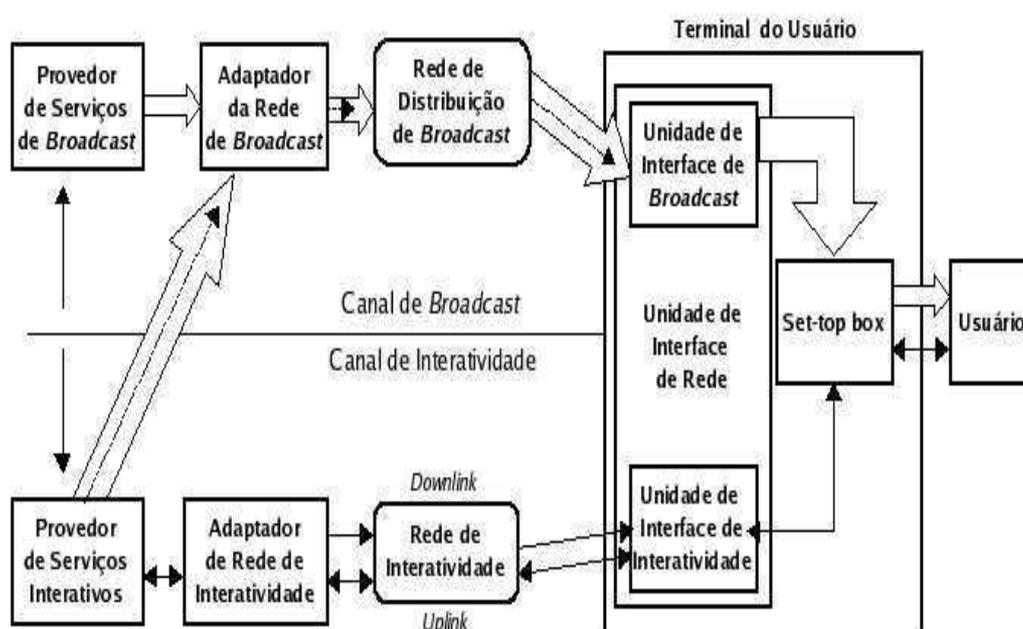


Figura 2.6: Modelo para um sistema genérico de serviços interativos (REIMERS, 2005).

Verifica-se, a partir da Figura 2.6, que dois canais são estabelecidos entre o usuário e o provedor do serviço. O adaptador de rede fornece a conectividade entre o provedor do serviço e a rede, ao passo que a unidade de interface conecta a rede ao usuário final. O provedor do serviço de *broadcast* distribui o *stream* de transporte MPEG-2 do canal unidirecional de difusão até o *set-top box* do usuário. O provedor do serviço interativo oferece um canal de interação para comunicação bidirecional que, por sua vez, é dividido entre o trajeto de interação na direção direta, para o *downstream*, e o trajeto de retorno na direção reversa, para o *upstream*.

A fim de oferecer serviços a altas velocidades até o usuário, o provedor do serviço interativo pode escolher o *link* de difusão para encaixar os dados no *stream* de transporte MPEG-2. Neste caso, o canal de difusão pode conter controle de aplicação ou comunicação de dados, de maneira a se conectar à rede de distribuição. O usuário pode, por exemplo, usar um modem via cabo

em vez de um *set-top box*. Uma aplicação de controle bidirecional e um canal de comunicação também serão exigidos entre os diferentes provedores de serviços, com o intuito de obter sincronização (REIMERS, 2005).

É importante salientar que o canal de interatividade pode ser projetado para ser enviado pelo mesmo canal de *broadcast* das emissoras ou por meio de um canal específico para este fim.

A implantação do canal de retorno, contudo, não é fácil; a partir da Tabela 2.1, observa-se que apenas em quatro países o canal de interatividade já está estabelecido: Coréia do Sul, Finlândia, Itália e Japão (CPQD, 2005). Na Inglaterra, apesar de entrar em funcionamento em 2003, o canal de interatividade não agradou à população e atingiu um nível de penetração muito aquém do esperado.

- Na Coréia do Sul, o padrão de transmissão digital terrestre adotado é o ATSC, fruto da decisão do país em optar pela qualidade de imagem em alta definição (HDTV) e por escolher o mesmo padrão adotado pelo mercado norte-americano (considerado importante para as exportações da indústria eletro-eletrônica sul-coreana). O canal de retorno é implementado por meio da tecnologia ADSL (que apresenta grande penetração no país), e vem sendo utilizado desde 2003 em aplicações do tipo perguntas e respostas em programas de auditório, em programas educativos e em pesquisas de opinião em noticiários televisivos.
- A Finlândia, assim como os demais países europeus, utiliza o padrão de transmissão digital DVB-T. Algumas aplicações de serviços interativos são oferecidas por intermédio do canal de retorno, implementado pelo Sistema Telefônico Fixo Comutado (STFC) ou pelo serviço de mensagens curtas (SMS) das operadoras de telefonia celular.
- A Itália também utiliza o padrão DVB-T para transmissão da TV Digital, e já implementou seu canal de retorno, por meio do STFC.
- No Japão, para estimular a expansão de sua indústria eletro-eletrônica e manter-se na vanguarda mundial do setor de televisão (além de privilegiar a qualidade de imagem em alta definição), foi desenvolvido o padrão ISDB-T. Nele, o canal de retorno é implementado pela tecnologia ADSL.

2.5 Padrões de TV Digital

Existem três sistemas principais de TV Digital em operação no mundo: o sistema americano (ATSC), o sistema europeu (DVB-T) e o sistema japonês (ISDB-T). Os objetivos comuns aos diversos sistemas são: manter as mesmas faixas de frequência hoje utilizadas, aumentar as

resoluções espaciais vertical e horizontal, melhorar a representação de cores, apresentar uma razão de aspecto de 16:9, para aproximar o formato ao da tela de cinema (o aparelho analógico usa uma razão de 4:3), som multicanal de alta fidelidade e transmissão de dados. Esses padrões são utilizados também em TV Digital via cabo ou satélite, com especificações para transmissão dos sinais apresentadas na tabela 2.2, válida para radiodifusão terrestre (TUDE, 2006). Além desses, também merece destaque o sistema chinês (*Advanced Digital Television Broadcasting* ou ADTB), que ainda está desenvolvendo seu *middleware* (RESENDE, 2004). Neste trabalho, serão analisados os três sistemas já estabelecidos: o ATSC, o DVB-T e o ISDB-T.

Tabela 2.2: Especificações para transmissão em radiodifusão terrestre (TELECO, 2006).

	ATSC	DVB-T	ISDB-T
Digitalização de vídeo	MPEG-2	MPEG-2	MPEG-2
Digitalização de áudio	DOLBY AC-3	MPEG-2 ACC	MPEG-2 AAC
Multiplexação	MPEG	MPEG	MPEG
Transmissão dos sinais	Modulação 8-VSB	Multiplex.COFDM	Multiplex.COFDM
<i>Middleware</i>	DASE	MHP	ARIB

Em um padrão de TV Digital, a técnica de modulação utilizada para transmitir o sinal é a principal característica. Dois métodos são geralmente utilizados: o modelo de portadora única (*Single-Carrier Modulation* - SCM) e o modelo de múltiplas portadoras (*Multiple-Carrier Modulation* - MCM); cada modelo proporciona diferentes comportamentos no sinal de comunicações, além de utilizar métodos de codificação distintos.

O sistema americano (ATSC) utiliza a técnica de portadora única, com os esquemas de modulação 8VSB (*Vestigial Side Band com 8 níveis*) e OQAM (*Offset Quadrature Amplitude Modulation*), respectivamente; já os sistemas europeu (DVB-T) e japonês (ISDB-T) fazem uso da técnica de portadoras múltiplas e trabalham com o COFDM (*Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) (RESENDE, 2004).

A Figura 2.7 ilustra as opções de padrões para a TV Digital apresentadas na tabela 2.2.

2.5.1 DVB-T

O padrão europeu de TV Digital, o *Digital Video Broadcasting* - DVB, foi iniciado em setembro de 1993 por um consórcio composto por mais de 300 membros, entre fabricantes de equipamentos, operadoras de redes, desenvolvedores de *software* e órgãos de regulamentação de 35 países. Trata-se de um conjunto de documentos relacionados à transmissão, transporte, codificação e

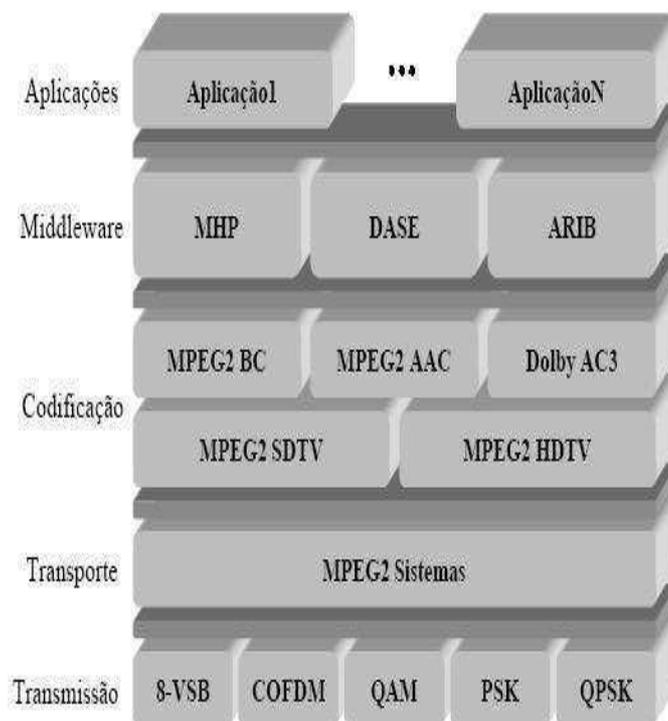


Figura 2.7: Opções de padrões para a TV Digital (FERNANDES et al., 2004).

middleware. Atualmente, o DVB já é adotado na União Européia, Austrália, Nova Zelândia, Malásia, Hong Kong, Singapura, Índia e África do Sul, em mais de sessenta países (DVB, 2006).

O DVB-T (padrão para radiodifusão terrestre) foi desenvolvido para atender às diversas necessidades de vários países e, por isso, é um padrão muito flexível com relação a modos de configuração (um total de 126 possíveis configurações). O sistema de transmissão opera em canais de 6, 7 ou 8 MHz, com multiplexação COFDM, com 1705 portadoras (sistema 2k) ou 6817 portadoras (sistema 8k), e sua taxa de transmissão pode variar entre 5 e 31,7 Mbps. A transmissão SDTV no DVB-T permite a difusão de até seis programas simultaneamente em uma mesma largura de banda terrestre. A codificação do canal é realizada para diminuir o efeito do canal sobre o sinal transmitido, diminuindo assim o número de erros.

Para a proteção contra erros, o padrão DVB usa o código Reed-Solomon, concatenado com um código convolucional, do tipo usado em comunicações móveis celulares, como o sistema CdmaOne (IS-95) da Qualcomm, puncionado (alguns bits são suprimidos). A utilização de intervalos de guarda entre os símbolos das várias portadoras garante mais robustez em relação à interferência intersimbólica.

Ainda com relação à modulação, o DVB-C (transmissão via cabo) utiliza modulação 64-QAM, com 6 bits de dados por símbolo; o DVB-S (transmissão via satélite) usa a modulação

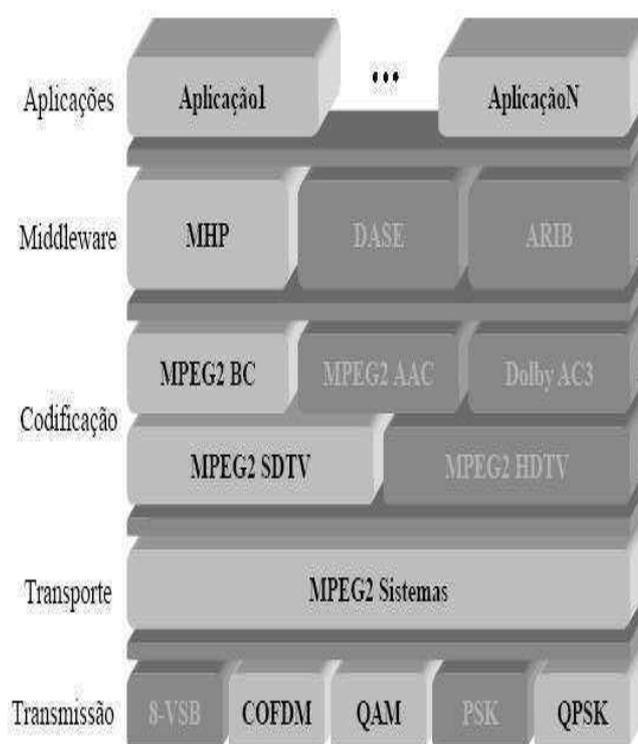


Figura 2.8: Arquitetura do padrão DVB (FERNANDES et al., 2004).

QPSK; o DVB-MC (transmissão via microondas operando em frequências de até 10GHz) se vale do MMDS com 16,32 ou 64 QAM, e o DVB-MS (transmissão via microondas operando em frequências acima de 10GHz) emprega o LMDS com QPSK (ALENCAR, 2004), (RESENDE, 2004), (FERNANDES et al., 2004), (MHP, 2006).

Especificações DVB

O consórcio europeu DVB apresenta um conjunto de especificações para serviços interativos, descrevendo soluções para uma variedade de possíveis configurações de rede, englobando as especificações de difusão de seu padrão, bem como as redes interativas que sejam capazes de prover o canal de retorno aos sistemas de televisão digital. A Tabela 2.3 resume as áreas técnicas especificadas e os respectivos acrônimos.

Embora esse conjunto de especificações tenha sido definido para o padrão europeu de televisão digital, apenas Finlândia e Itália, além da Inglaterra, empregam atualmente o canal de retorno nas suas transmissões de TV Digital (CPQD, 2005).

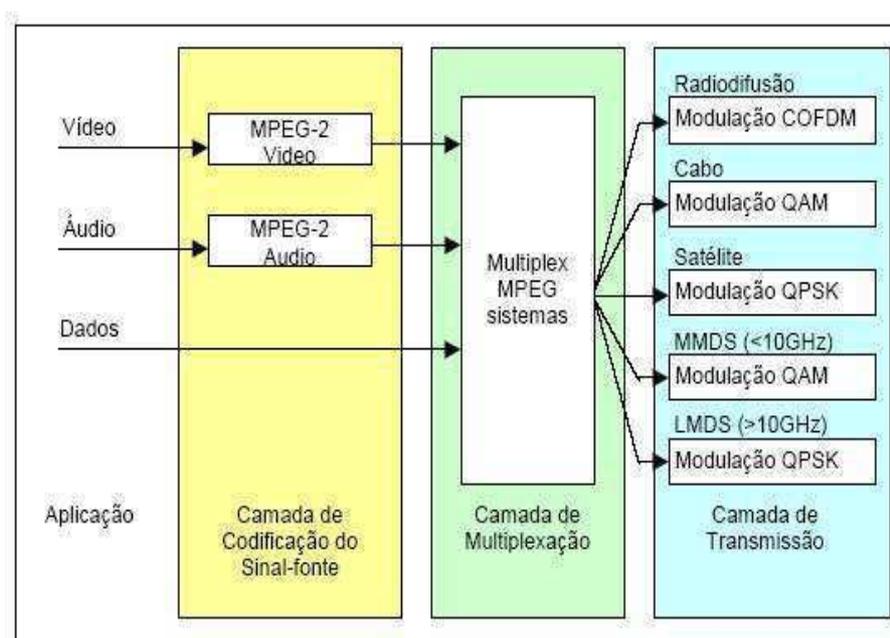


Figura 2.9: Esquema do padrão DVB (TELECO, 2006).

Multimedia Home Platform - MHP

O MHP é o sistema aberto de *middleware* designado para o padrão europeu de televisão digital. Ele define uma interface genérica entre as aplicações digitais interativas e os terminais nos quais estas aplicações são executadas. O MHP expande os padrões existentes do DVB para serviços interativos e de difusão em todas as redes de transmissões, incluindo sistemas terrestres, de satélite, de cabo e de microondas. O MHP baseia-se em uma plataforma denominada DVB-J, que inclui uma máquina virtual definida conforme especificações da *Java Virtual Machine*, da *Sun Microsystems*. Diversos pacotes de *software* provêm interfaces genéricas de programação de aplicativos (APIs) para um grande número de recursos da plataforma. As aplicações MHP acessam a plataforma apenas a partir destas APIs específicas. O MHP possui três diferentes perfis que fornecem conjuntos de recursos e funções para interatividade local, interatividade com canal de retorno e acesso à Internet (MC/MCT/FINEP/FUNTTTEL, 2004a), (MHP, 2006), (PIESING, 2006).

2.5.2 ATSC

O padrão americano de TV Digital, o *Advanced Television Systems Committee - ATSC*, inclui a TV de alta definição (HDTV), a TV com definição normal (SDTV), transmissão de dados, áudio com som multicanal e transmissão direta para residências via satélite (*direct-to-home*

Tabela 2.3: Conjunto de especificações do padrão DVB para o canal de interatividade (REIMERS, 2005).

Canal de Interatividade	Acrônimo DVB
RSDI/ISDN	DVB-RCP
DECT	DVB-RCD
GSM	DVB-RCG
CATV	DVB-RCC
LMDS	DVB-RCL
Satélite	DVB-RCS
SMATV	DVB-RCCS
Terrestre	DVB-RCT

broadcasting).

Iniciado em 1982 e composto, atualmente, por cerca de 130 membros (fabricantes de equipamentos, operadores de redes, desenvolvedores de *software* e órgãos de regulamentação), o ATSC está em funcionamento nos Estados Unidos desde novembro de 1998, e já foi adotado pelo Canadá, Coréia do Sul e México. Os Estados Unidos já contam com mais de vinte e oito milhões de televisores digitais vendidos desde 1998 (ATSC, 2006). É formado por um conjunto de documentos que definem os diversos padrões adotados, incluindo aqueles relacionados à transmissão, transporte, codificação e *middleware* (RICHER et al., 2006).

Na radiodifusão terrestre, opera com canais de 6, 7 ou 8 MHz - a informação original, com taxa de 1 Gbit/s é comprimida para 19,3 Mbit/s e depois codificada, para proteção contra erros, com um codificador Reed-Solomon (mesmo código utilizado no DVD), e outro de treliça. O sinal resultante é modulado em 8-VSB² para transmissão em um canal de 6 MHz, utilizando um esquema de portadora única (SCM); porém, apresenta problemas na recepção por antenas internas e não permite a recepção móvel. Já a TV a cabo utiliza modulação 64-QAM (similar ao DVB), e as transmissões via satélite fazem uso da modulação QPSK (também similarmente ao DVB).

O sistema ATSC utiliza o formato de 1920 x 1080 pixels, com varredura entrelaçada de 60 campos/s ou de 1280 x 720, com varredura progressiva de 30 quadros/s. O vídeo usa codificação

²VSB é a técnica de modulação usada no PAL-M e NTSC atuais; foi usado, em vez do SSB, no início da televisão, por conta da economia de faixa em relação ao AM (para a transmissão de vídeo) e porque sua geração demandava equipamentos menos precisos e mais baratos que os necessários para o SSB. Atualmente, não haveria tal restrição - e o ATSC poderia ter usado um sistema mais moderno de transmissão (ALENCAR, 2004).

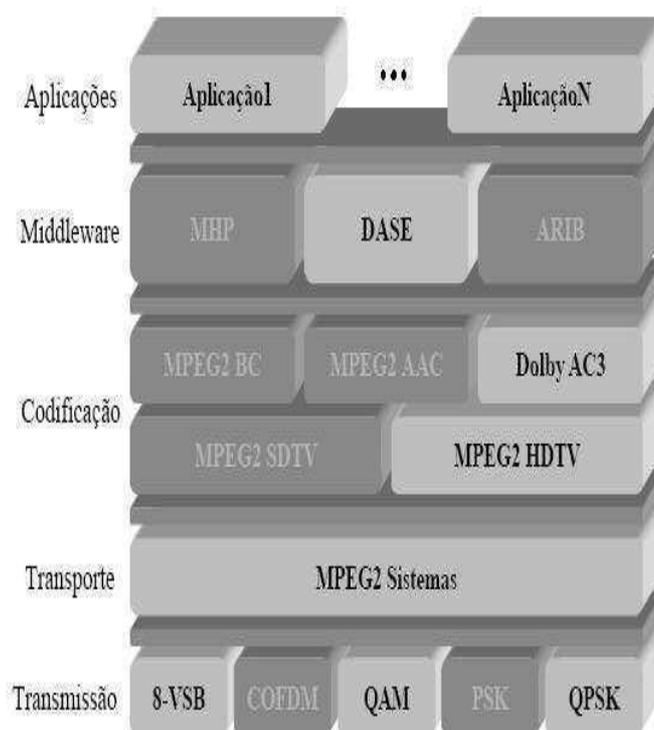


Figura 2.10: Arquitetura do padrão ATSC (FERNANDES et al., 2004).

MPEG-2, criado pelo Grupo de Especialistas em Vídeo, e o áudio segue o padrão *Dolby AC-3*, versão do padrão usada em salas de cinema ou em equipamentos de som de alta qualidade.

O sistema permite atingir várias qualidades de imagem com 18 formatos de vídeo diferentes (SDTV, HDTV ou qualidades intermediárias atingidas por diferentes taxas de quadro), além de permitir a transmissão de dados. Este sistema foi desenvolvido para operar em canais com várias características de atenuação, desde o ruído branco, multipercursos, ruídos impulsivos e de fase. Também é preparado para operar em bandas densamente ocupadas, com ótima eficiência espectral, sem sofrer a interferência do sinal de TV NTSC (ALENCAR, 2004), (RESENDE, 2004), (FERNANDES et al., 2004), (DASE, 2003), (RICHER et al., 2006).

DTV Application Software Environmnet - DASE

O DASE é um padrão ATSC que define a plataforma para funções avançadas do receptor. Ele interage com os serviços da plataforma do receptor, de maneira a aceitar entradas da transmissão de transporte e do usuário final e gerar saídas de áudio e gráficos para os sistemas receptores. A plataforma dos receptores oferece serviços essenciais ao DASE, como operar em serviços de sistemas, serviços de entrada e saída e de memória.

Também possui dois ambientes de aplicações para suporte a aplicações declarativas e pro-

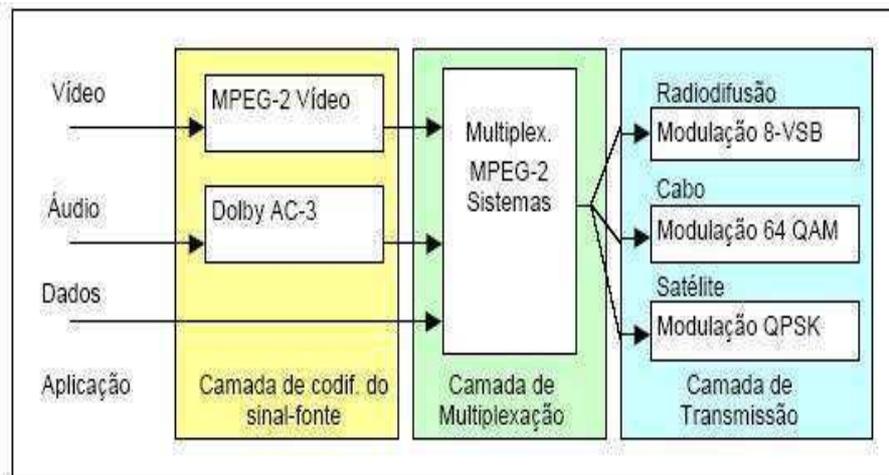


Figura 2.11: Esquema do padrão ATSC (TELECO, 2006).

cedurais. O ambiente de aplicações declarativo é chamado DAE (*Declarative Application Environment*), enquanto que o ambiente de aplicações procedural é chamado PAE (*Procedural Application Environment*) e processa conteúdos com objetos ativos com uma máquina virtual Java. Além do DAE e do PAE, o DASE contém decodificadores de conteúdo que atendem tanto às aplicações procedurais quanto às declarativas para decodificação e apresentação de tipos comuns de conteúdo, como os formatos PNG, *Portable Font Resource* e JPEG (DASE, 2003), (MC/MCT/FINEP/FUNTTEL, 2004a).

2.5.3 ISDB-T

O padrão de TV Digital *Integrated Services Digital Broadcasting for Terrestrial Television* - ISDB-T, foi concebido para executar a transmissão digital dos sinais de televisão, permitindo que o modelo de TV de alta definição HDTV esteja acessível tanto para usuários que utilizam receptores com fio quanto para aqueles com receptores móveis e sem fio, com baixa definição de imagem.

Especificado em 1999 no Japão pelo grupo DiBEG (*Digital Broadcasting Experts Group*), o ISDB-T é composto por várias empresas e operadoras de televisão daquele país. Até o momento tem sido adotado apenas no Japão; em contrapartida, é amplamente divulgado que o ISDB reúne o maior conjunto de facilidades técnicas dentre os três principais padrões de TV Digital: alta definição, transmissão de dados e recepção móvel e portátil (ASAMI; SASAKI, 2006), (TAKADA; SAITO, 2006).

O sistema ISDB-T pode transmitir vídeo, som, dados ou uma combinação dos três, já que apresenta grande flexibilidade de configuração, graças ao modo como foi concebido. O modo

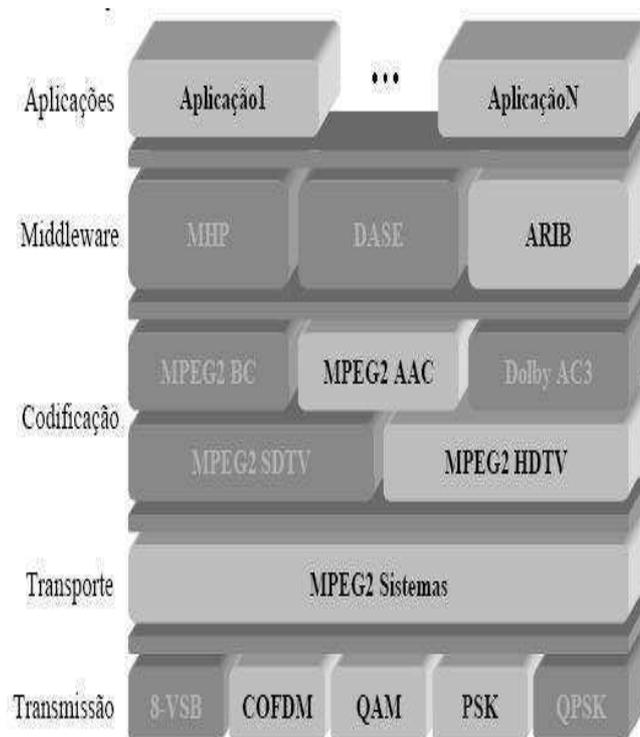


Figura 2.12: Arquitetura do padrão ISDB (FERNANDES et al., 2004).

como sua banda é segmentada define seu método de transmissão, conhecido como BST-OFDM (*Band Segmented Transmission OFDM*). Ele possui 13 segmentos distintos que podem ser configurados de 3 modos diferentes: cada um destes modos, que são denominadas camadas do sistema, podem ser moduladas de forma independente por meio de esquemas de modulação multiníveis, e transmitidos por um sistema MCM, que é o OFDM. Ele pode ser visto como uma variante melhorada do sistema europeu.

Suas principais características são:

- Transmissão de HDTV, SDTV e LDTV (*Low Definition Television*);
- Transmissão de múltiplos programas;
- Serviços interativos e multimídia de alta qualidade para receptores móveis e fixos;
- Transmissão hierárquica, permitindo uma configuração diferenciada para diferentes receptores, inclusive para recepção parcial.

O ISDB-T opera com canais de 6, 7 ou 8 MHz, utiliza a multiplexação COFDM, com variações, e codificação da carga útil do sinal com MPEG-2. A proteção contra erros é provida

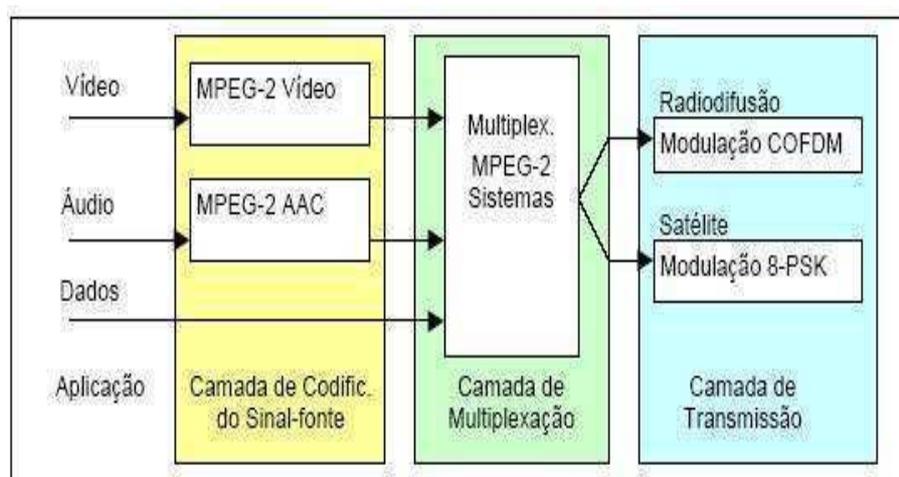


Figura 2.13: Esquema do padrão ISDB (TELECO, 2006).

por código Reed-Solomon concatenado com código convolucional; projetado para suportar sistemas hierárquicos com múltiplos níveis, o ISDB-T alcança uma taxa de transmissão que varia entre 3,65 e 23,23 Mbps. Já a televisão a cabo emprega o esquema de modulação 64-QAM, enquanto que a transmissão via satélite usa a modulação 8-PSK (ALENCAR, 2004), (RESENDE, 2004), (FERNANDES et al., 2004), (ARIB, 2006), (ASAMI; SASAKI, 2006), (TAKADA; SAITO, 2006).

Association of Radio Industries and Business - ARIB

A *Association of Radio Industries and Business* estabeleceu os padrões ARIB para transmissão e codificação de dados para radiodifusão digital, que são baseados em uma especificação XML, consistindo em três partes: codificação de mono-mídia (criada para manter a compatibilidade com o antigo sistema de transmissão de dados multiplexados que já estava em uso no Japão), codificação de multimídia (busca estabelecer uma compatibilidade com os padrões de uso de rede e métodos de transmissão de dados usados nos sistemas europeu e americano) e especificação de transmissão de dados.

Há duas especificações para a execução de aplicações: a primeira é baseada no padrão ARIB B24 e possui suporte a aplicações declarativas, usando a linguagem de marcação BML (*Broadcast Markup Language*), e a segunda se baseia no padrão ARIB B23, que definiu um ambiente de execução de aplicações procedurais baseado nos padrões DVB/MHP e GEM (*Globally Executable MHP*) (ARIB, 2006), (MC/MCT/FINEP/FUNTEL, 2004a).

Capítulo 3

Comunicação pela rede elétrica

As linhas de energia elétrica foram concebidas para a transmissão e distribuição de eletricidade para a população. Em virtude da vasta rede existente, surgiu a idéia de utilizar tais linhas para a transmissão de dados, com diversas finalidades. Elas são divididas em (HRASNICA et al., 2004):

- Alta tensão (110 a 380 kV) – conectam as distribuidoras de energia a grandes regiões. Usualmente, cobrem vastas distâncias, levando eletricidade a todo um território ou continente. Em geral, os cabos elétricos são aéreos;
- Média tensão (10 a 30 kV) – fornecem energia para grandes áreas, como regiões metropolitanas ou grandes indústrias. Cobrem distâncias bem menores que as redes de alta tensão. Podem ser implementadas por cabos aéreos ou subterrâneos;
- Baixa tensão (110/220/380 V) – atinge os pequenos usuários, como os consumidores residenciais. Cobrem pequenas distâncias, no máximo alguns quilômetros. São implementadas por meio de cabos aéreos ou subterrâneos.

Inicialmente, a transmissão de dados via linhas de potência tinha por finalidade o controle do sistema no caso de faltas, que continua sendo uma premissa básica desse tipo de transmissão. De fato, uma comunicação rápida e precisa entre geradoras, subestações e distribuidoras faz-se necessária para minimizar o impacto, sobre o usuário final, de defeitos ou problemas no sistema (CARVALHO; ALENCAR, 2005a).

A vasta e complexa rede elétrica atinge praticamente todas as localidades, ao contrário dos outros meios de comunicação. Portanto, a sinalização e a troca de informações entre as subestações e distribuidoras foram adequadamente baseada na própria linha de transmissão. Atualmente, a telemetria e o sensoramento remoto do sistema são ferramentas modernas e eficazes na manutenção da rede elétrica.

A primeira técnica que fez uso da rede elétrica para transmissão de dados foi desenvolvida por volta da década de 1950. O método denominado *Ripple Control* é caracterizado pelo uso de baixas frequências (entre 100 e 900 Hz) e baixa taxa de dados na rede de alta tensão. O sistema permite uma comunicação unidirecional e é, até hoje, destinado ao controle da iluminação de postes em estradas, chaveamento de cargas e de tarifação, além das aplicações acima citadas (NETO, 2003). Na década de 1970, a Chesf passa a empregar a tecnologia TET-N para transmitir sinais de controle por meio de suas linhas de energia (CHESF, 2006). A partir da década de 1980, novos sistemas foram desenvolvidos, com taxas de dados maiores. E apenas na década de 1990 sistemas capazes de fornecer comunicação de forma bidirecional, através da rede de distribuição, foram obtidos, tendo como característica a utilização de frequências mais elevadas e menores níveis de potência transmitida (VIDAL, 2006).

Nesse panorama, a partir da desregulamentação do mercado de telecomunicações (primeiramente nos EUA e, em seguida, na Europa e na Ásia), e principalmente pelo crescimento da Internet que, impulsionada pelos avanços tecnológicos no processamento digital de sinais, passou a exigir cada vez mais serviços de telecomunicações para diversos fins, a transmissão de dados pela linha elétrica ganhou novo impulso (MAJUMDER; CAFFREY, 2004), (PAVLIDOU et al., 2003), (RIBEIRO, 2005).

A expressão *Power Line Communications* (PLC), também conhecida como *Power Line Telecommunications* (PLT) ou *Broadband Communications over Power Lines* (BPL), é empregada para identificar tecnologias, equipamentos, aplicações e serviços que proporcionem a comunicação entre usuários por meio de linhas de potência (PLCFORUM, 2006). O PLC é apontado como a maneira de implementar uma cadeia de comunicação universal, com a condução de tais serviços via linhas de distribuição, reduzindo o cabeamento interno e efetivamente integrando residências, escritórios e fábricas.

Existem diferentes técnicas para acoplar um sinal com informações ao sinal da portadora que trafega pela rede elétrica (HRASNICA et al., 2004), (PLC-J, 2006), (RTI, 2005a):

- O OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplex*) modula grande número de portadoras de banda estreita distribuídas lado a lado. Apresenta altas taxas de transmissão de dados, robustez contra distorções do canal e utilização ótima da banda disponível. Permite suprimir portadoras interferentes ou variar o número de bits de cada portadora de acordo com a relação sinal/ruído ou atenuação do enlace. É a técnica de modulação mais empregada pelos fabricantes de equipamentos PLC. Todavia, esse sistema exige amplificadores altamente lineares para evitar que as harmônicas das portadoras provoquem interferências.
- A técnica de espalhamento espectral (*spread spectrum*) distribui a potência ao longo de uma ampla faixa de frequências, garantindo que sua densidade espectral seja baixa.

Contudo, a largura de banda necessária para transmissão de taxas na ordem de Mbps é elevada. A principal vantagem é a compatibilidade eletromagnética, por irradiar campos eletromagnéticos fracos no ambiente.

O foco atual nas pesquisas com PLC reside nas linhas de baixa tensão, chamadas de linhas de distribuição (as linhas de média e alta tensão são normalmente referenciadas como linhas de transmissão). Devido principalmente às grandes distâncias que as linhas de transmissão cobrem, a transmissão de dados de comunicações fica comprometida em tal meio.

A linha de distribuição é transformada em uma rede de comunicações com a superposição de um sinal de informação de baixa energia sobre a onda elétrica. Para garantir uma coexistência adequada e uma separação entre os dois sistemas, a faixa de frequência utilizada para comunicações é bem superior à frequência das linhas de energia (50 ou 60 Hz): de 3 a 148,5 kHz para aplicações de PLC em banda estreita (transferência de dados de controle e de comando de equipamentos), e de 1 a 30 MHz para aplicações de PLC em banda de difusão ou banda larga (serviços de Internet de banda larga e transmissão de dados, vídeo e áudio) (CARVALHO et al., 2005).

A Figura 3.1 apresenta um exemplo de aplicação de uma rede PLC. A partir do transformador que interliga os níveis de média e baixa tensão, o equipamento denominado *PLC Master* (usualmente denominado concentrador) injeta o sinal de dados, proveniente de um *backbone* genérico de telecomunicações, na rede elétrica de baixa tensão, permitindo aos usuários residenciais o acesso aos dados transmitidos.

O PLC pode fornecer um enlace de comunicação natural para vários equipamentos, como por exemplo sensores de um sistema de alarme. Diversas pesquisas vêm sendo conduzidas com o intuito de que a rede de transmissão de baixa tensão atue como uma rede local (LAN), conectando convenientemente diversos computadores em um prédio sem a necessidade de uma rede interna, dentre outras aplicações.

O mercado atual envolvendo PLC encontra-se dividido em dois segmentos: o *last mile access*, ou acesso até as residências, e o *last inch access*, ou acesso dentro das residências. Alguns estudos apontam que o uso de PLC seria mais eficaz que a tecnologia a cabo ou outras sem fio para prover o acesso no interior das residências (MAJUMDER; CAFFREY, 2004).

O *last inch access* está integrando um vasto conjunto de equipamentos conectados no interior das habitações por meio de uma rede interna (*in-home*). Tal rede pode transformar todas as tomadas elétricas da casa em conexões de difusão para computadores pessoais, telefones e seus acessórios, bem como para outros dispositivos eletro-eletrônicos, como ilustrado na Figura 3.2.

Para o *last mile access*, o PLC é uma das diversas possibilidades tecnológicas, dentre as quais figura o *cable modem* e diferentes tipos de xDSL e difusão sem fio (*broadband wireless*).

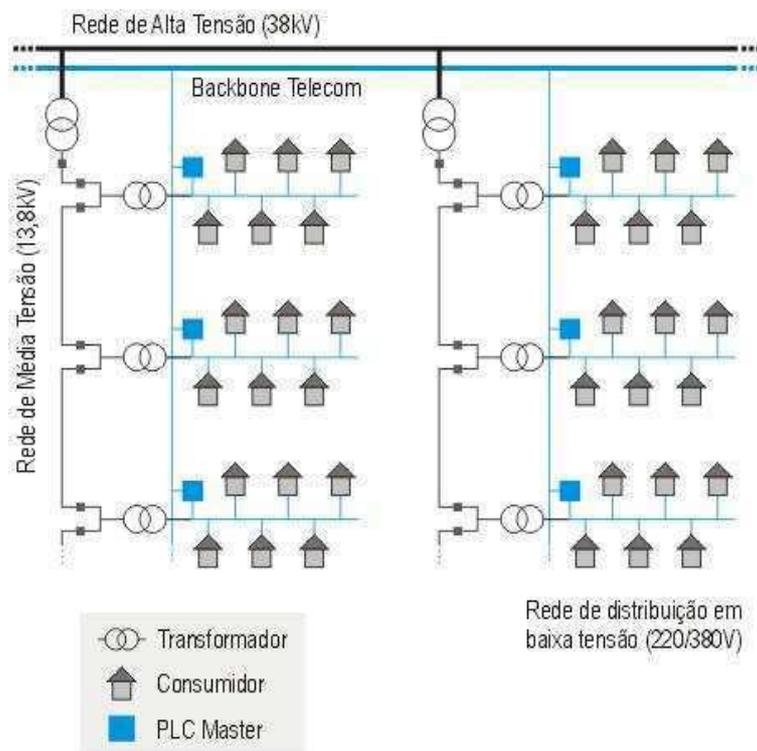


Figura 3.1: Exemplo de aplicação da tecnologia PLC (VIDAL, 2006).

Nenhuma das tecnologias se destaca com relação às demais; nem o PLC apresenta grandes vantagens técnicas com relação às outras técnicas, nem estas são muito superiores ao PLC (MAJUMDER; CAFFREY, 2004).

3.1 O canal de linhas de distribuição como meio de transmissão

As linhas de distribuição de energia elétrica constituem um meio hostil para a transmissão de dados, já que não foram projetadas para tal finalidade. Impedâncias variantes, ruído considerável e altos níveis de atenuação são alguns dos principais problemas referentes à transmissão nesse ambiente.

A propagação do sinal não ocorre em um único percurso entre o transmissor e o receptor; por isso, o eco também é relevante e deve ser considerado, graças aos múltiplos trajetos existentes no canal. A reflexão do sinal geralmente surge devido às várias impedâncias distintas na rede elétrica.

Medições do canal mostram que, para altas frequências, a atenuação do canal aumenta. Desta maneira, o canal pode ser descrito como sendo aleatório e variante no tempo, com uma

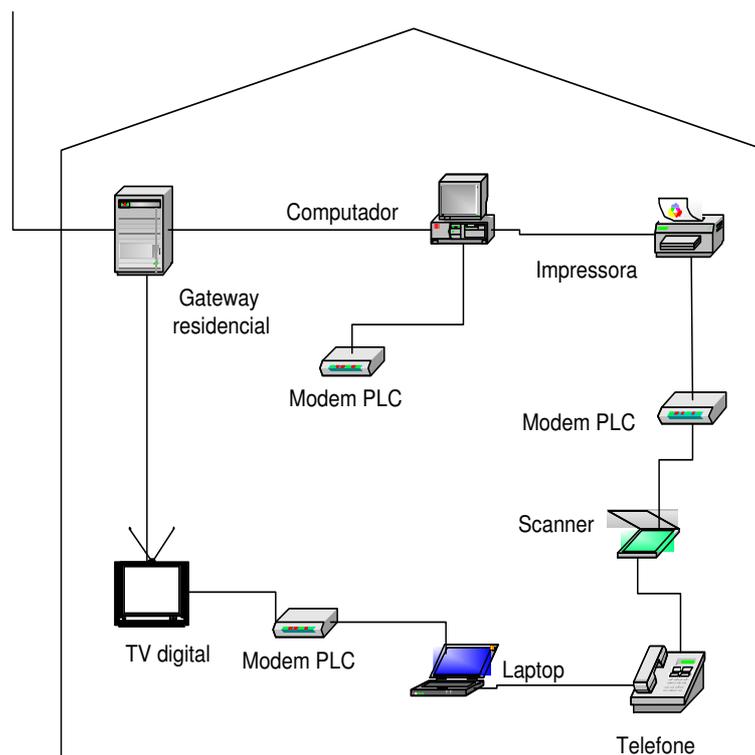


Figura 3.2: *Last inch access*, ou acesso dentro das residências.

razão sinal ruído (SNR) dependente da frequência sobre a largura de faixa da transmissão (MAJUMDER; CAFFREY, 2004), (PAVLIDOU et al., 2003), (FERREIRA et al., 1996).

3.1.1 Ruído

O ruído em linhas de potência constitui um problema significativo para a transmissão de dados, visto que ele dificilmente pode ser modelado como um ruído gaussiano branco. A diversidade das características elétricas dos dispositivos conectados à rede pode alterar as características da linha (MENG et al., 2005).

As características do sinal podem ser tanto dependentes do tempo quanto da frequência, bem como da localização do transmissor e do receptor na infra-estrutura da linha de transmissão. Por exemplo, uma tomada próxima de uma fonte ruidosa pode apresentar uma SNR pequena comparada a outra que se situe mais distante dessa fonte (equipamentos domésticos em funcionamento). Ao se ligar ou desligar eletrodomésticos conectados à rede, a função de transferência do canal é alterada no tempo.

Fontes típicas de ruído são as ligações de equipamentos que utilizam algum tipo de chaveamento, seja ele eletrônico (lâmpadas fluorescentes e halogênicas, fontes chaveadas) ou mecânico (motor de escovas). O ruído nas linhas de transmissão pode ser de natureza impulsiva ou seletivo

em frequência e, algumas vezes, ambos (MAJUMDER; CAFFREY, 2004), (NETO, 2003).

3.1.2 Atenuação

A atenuação da portadora é causada por fatores que dependem do número e da natureza das cargas conectadas, da indutância dos fios, da distância e da topologia da rede, e deve ser considerada na análise do canal elétrico. Para compensar tal situação, utilizam-se repetidores. Outra alternativa é o aumento de potência, mas que pode ser limitado pelas restrições dos padrões em vigor.

A atenuação varia não apenas com a frequência do sinal, como também com o tempo, devido às cargas que são conectadas e desconectadas. Ou seja, as características elétricas da rede são variantes no tempo em razão dos dispositivos que são conectados e desconectados aleatoriamente.

Um canal variante no tempo exige maior complexidade no projeto de um sistema de comunicações; em determinado momento, a comunicação funciona bem, mas, depois, uma fonte de ruído pode bloquear a comunicação. Uma possível solução é a adoção de um sistema que se adapte ao canal, porém isso requer uma implementação complexa.

O canal entre duas tomadas quaisquer de uma casa, para exemplificar, apresenta uma função de transferência complicada. Em tal meio de transmissão, a amplitude e a fase do sinal podem variar drasticamente com a frequência. Embora o sinal possa chegar até o receptor com poucas perdas em determinadas frequências, para outras ele pode ser completamente destruído (MAJUMDER; CAFFREY, 2004), (NETO, 2003).

3.1.3 Alocação de frequência

Nos Estados Unidos, a faixa de frequência de 0 a 500 kHz pode ser usada para comunicações pela rede elétrica. Na Europa, a regulamentação sobre o espectro usado para PLC é mais rigorosa e é regida pela norma europeia CENELEC EN 50065 (CENELEC, 2006). No padrão europeu, a atribuição de frequência para o PLC tem cinco sub-bandas, que variam de 3 a 148,4 kHz, sendo proibido o uso em PLC de frequências superiores a 150 kHz, para evitar interferência em serviços de rádio. Além da atribuição de faixa, órgãos reguladores também impõem limites nos níveis da radiação que é emitida por tais dispositivos. A potência máxima de transmissão é limitada a 5 mW.

A alocação de frequência para o PLC na Europa é dada a seguir (NETO, 2003):

- 3 a 9 kHz: O uso desta faixa de frequências é limitado aos fornecedores de energia;

- 9 a 95 kHz: Também chamada de *Banda A*, esta faixa é limitada aos fornecedores de energia e seus concessionários, e é reservada para uso de telemetria;
- 95 a 125 kHz: Denominada *Banda B*, é destinada aos provedores de clientes. Nenhum protocolo de acesso é exigido para tal banda de frequência;
- 125 a 140 kHz: Limitada aos clientes de fornecedores de energia. Um protocolo de CSMA (*Carrier Sense Multiple Access*), que usa a frequência central de 132,5 kHz para realizar operações simultâneas de vários sistemas dentro desta faixa, foi definido. É referenciada como *Banda C*;
- 140 a 148,5 kHz: Conhecida como *Banda D*, é limitada aos clientes dos provedores de energia. Nenhum protocolo de acesso é definido para essa faixa de frequência.

3.1.4 Impedância da rede elétrica

A linha de potência é uma rede bastante espalhada, com a tensão média/baixa do secundário do transformador como a excitação para as várias cargas conectadas em paralelo. A impedância do canal é, portanto, fortemente variável, dependendo de cargas específicas serem conectadas à rede em momentos específicos. O casamento de impedâncias pode ser importante desde que a potência do sinal no lado do receptor atinja um máximo quando as impedâncias do transmissor, do receptor e do canal estão casadas.

Várias medições mostram que a impedância dos circuitos de rede elétrica residencial aumenta com a frequência e está na faixa de aproximadamente 1,5 a 80 Ω , a 100 kHz. As cargas das residências vizinhas também podem afetar tal impedância. As instalações elétricas aparentam ter um efeito relativamente pequeno e a impedância normalmente é indutiva. Para cargas resistivas típicas, a atenuação aproximada do sinal é de 2 a 40 dB, a 150 kHz, dependendo do transformador de distribuição usado e das cargas. Também é possível que a carga capacitiva entre em ressonância com a indutância do transformador de distribuição e cause uma forte atenuação do sinal para determinada faixa de frequência (NETO, 2003).

3.1.5 Compatibilidade eletromagnética

As redes de baixa tensão, quando empregadas como meio de transmissão de dados, agem como uma antena produzindo radiação eletromagnética. Por outro lado, os sistemas PLC utilizam uma faixa de frequências de até 30 MHz; esse espectro de frequências é reservado para diversos serviços de rádio (serviços de rádio de ondas curtas, como radioamadorismo, além de serviços públicos e militares), que podem ser afetados pelas redes PLC.

Nos dois casos citados, os sistemas PLC devem garantir baixas emissões eletromagnéticas, operando com uma potência limitada (por exemplo, o CENELEC (CENELEC, 2006) estipula um patamar máximo de 5 mW) (HRASNICA et al., 2004).

3.2 Arquitetura de um sistema PLC

A tecnologia PLC trabalha na camada 2 do modelo ISO/OSI (*International Standardization Organization/ Open Systems Interconnection*), ou seja, na camada de enlace. Assim, pode ser agregada a uma rede TCP/IP (camada 3) já existente, além de poder trabalhar em conjunto com outras tecnologias de camada 2 (HRASNICA et al., 2004). O equipamento PLC empregado nos testes desta dissertação utiliza o protocolo TCP/IP.

O modelo de referência ISO/OSI é empregado para a descrição de vários sistemas de comunicação. Ele consiste de 7 camadas, cada uma responsável por uma ou mais funções. Cada camada superior representa um novo nível de abstração, comparada à camada inferior. A primeira camada de rede especifica a transmissão de dados na denominada camada de rede física (meio de transmissão), e cada camada superior especifica processos mais próximos às aplicações para os usuários. As camadas são descritas a seguir (TANENBAUM, 1996):

- A camada 1 (camada física) considera a transmissão de bits ao longo do meio de comunicações, incluindo características elétricas e mecânicas do meio de transmissão, além de sincronização, codificação de sinal, modulação, dentre outros.
- A camada 2 (camada de *link* dos dados) é dividida em duas sub-camadas:
 - MAC (*Medium Access Control*), que é a sub-camada inferior, que especifica os protocolos de acesso
 - LLC (*Logical Link Control*), sub-camada superior, que considera a detecção e correção de erros e o controle do fluxo de dados.
- A camada 3 (camada de rede) é responsável pelo início e término das conexões de rede e também pelo roteamento.
- A camada 4 (camada de transporte) é responsável pelo transporte de dados *end-to-end*, incluindo a segmentação das mensagens transmitidas, controle do fluxo de dados, controle de erros, segurança dos dados, dentre outros.
- A camada 5 (camada de sessão) controla a comunicação entre os terminais (equipamentos) participantes.

- A camada 6 (camada de apresentação) transforma as estruturas dos dados em um formato padrão para a transmissão.
- E a camada 7, denominada camada de aplicação, fornece a interface para o usuário final.

As camadas 5 a 7, por estarem mais próximas do usuário final e das aplicações de comunicações, são referenciadas como Camadas de Aplicação da Rede; já as camadas 1 a 4, por serem responsáveis pela transmissão pela rede, são denominadas de Camadas de Transporte.

Uma rede de acesso PLC consiste em uma estação base e um número de usuários utilizando *modems* PLC. Os *modems* fornecem, normalmente, diversas interfaces que habilitam a conexão de equipamentos de comunicações na rede elétrica. A comunicação entre o meio de transmissão PLC e a interface do usuário é realizada pela terceira camada da rede; a informação recebida na camada física, proveniente da rede elétrica, é enviada pelas sub-camadas MAC e LLC até a camada de rede, que é organizada de acordo com um padrão específico (por exemplo, IP), garantindo a comunicação entre o PLC e a interface de dados (Ethernet ou outras). Assim, a informação recebida pela interface de dados é direcionada para as camadas de aplicação da rede (HRASNICA et al., 2004).

3.2.1 Camada MAC do PLC

A camada MAC é um componente da arquitetura de protocolo comum a qualquer sistema de telecomunicações que disponha de um meio de transmissão. Os protocolos da camada MAC são desenvolvidos para várias aplicações em comunicações.

No caso da transmissão de dados via PLC, quatro fatores representam um impacto direto na camada MAC e seus protocolos: a topologia da rede, o cenário de distúrbios, os serviços de telecomunicações oferecidos e o sistema de transmissão aplicado.

Um esquema de acesso múltiplo e uma estratégia para dividir os recursos (um protocolo) são considerados o núcleo de uma camada MAC. No caso do PLC, tanto o esquema de acesso múltiplo quanto os protocolos MAC devem ser robustos contra as interferências do meio; além disso, as condições desfavoráveis de interferências exigem a aplicação de diversos mecanismos para controle de erros. Portanto, tanto o esquema de múltiplo acesso quanto o protocolo MAC devem ser projetados para permitir uma integração com os mecanismos de prevenção de erros, como os ARQs (*Automatic Repeat reQuest*).

Por outro lado, as redes PLC têm que oferecer diversos serviços de telecomunicações e garantias de QoS para diferentes tipos de tráfego. Assim, tanto os protocolos MAC quanto o esquema de múltiplo acesso devem se adequar para várias requisições. O QoS também é garantido pela aplicação de mecanismos de controle de tráfego adicionais.

Outra exigência da camada MAC para PLC é uma boa utilização da rede, o que acarreta eficiência econômica para as redes PLC. Isto pode ser conseguido por um gerenciamento ótimo dos recursos de transmissão disponíveis, fornecidos pelo protocolo MAC (assim como o controle do tráfego e os mecanismos de prevenção de erros) (HRASNICA et al., 2004).

3.2.2 Erros no envio de dados via PLC

As redes PLC operam com uma potência do sinal que deve ser inferior a um limite definido pelos diferentes órgãos regulatórios. Por outro lado, o nível do sinal deve manter a transmissão ao longo do meio possível. Desta maneira, deve haver um certo nível SNR que torne a comunicação possível. Desde que a relação sinal ruído seja suficiente para evitar distúrbios na rede, os mecanismos contra erros não precisam ser empregados (é o caso do ruído de fundo em uma rede PLC); contudo, quando a SNR não for suficiente para superar as interferências e a resultante transmissão com erros (no caso do ruído impulsivo, por exemplo), deve-se utilizar mecanismos de correção de erros e de entrelaçamento.

Mesmo utilizando alguma correção do tipo FEC (*Forward Error Correction*), ainda há a possibilidade de dano na informação transmitida. No caso de erros, a informação danificada deve ser retransmitida por um mecanismo ARQ. Portanto, para lidar com distúrbios na transmissão, as redes PLC também utilizam mecanismos FEC e ARQ (HRASNICA et al., 2004).

3.3 Vantagens e desvantagens do PLC

Pode-se considerar que a comunicação por linhas de transmissão ou distribuição tem as seguintes vantagens e desvantagens:

- **Vantagens**

- Trata-se de uma rede de comunicações independente, em que a infra-estrutura de cabos elétricos existente pode ser utilizada para a transmissão de dados;
- As redes elétricas de alta e média tensão cobrem grandes distâncias;
- A cobertura geográfica da rede de baixa tensão em regiões habitadas é bem abrangente, facilitando o acesso quase universal à rede;
- Não necessita de fios adicionais e pode prover acesso com fidelidade para aplicações com praticamente 100% de cobertura em uma residência ou escritório, por exemplo;
- É bastante simples de instalar e utilizar. Para o usuário final, basta conectá-lo à tomada e já começa a funcionar.

- Os equipamentos disponíveis comercialmente dispõem de ferramentas de criptografia, que aumentam a segurança na transmissão de dados, evitando que arquivos de um usuário não sejam recebidos indevidamente por terceiros.

- **Desvantagens**

- É um ambiente de comunicações particularmente complicado;
- Os níveis de ruído podem ser excessivos;
- A atenuação para frequências usualmente empregadas em comunicações é muito grande;
- Repetidores devem ser instalados para compensar as perdas nos cabos, bem como concentradores nos transformadores de distribuição;
- A instabilidade da rede elétrica pode levar à formação de transitórios, que anulam a resposta em frequência;
- Problemas de compatibilidade eletromagnética ocorrem entre os circuitos eletrônicos e as linhas de transmissão de energia elétrica;
- Parâmetros importantes do canal, tais quais impedância, atenuação e níveis de ruído, variam indefinidamente em função do tempo e da carga;
- Necessita, para funcionar adequadamente, de um código de controle de erro.

3.4 Perspectivas

O mercado de PLC está se expandindo rapidamente:

- Serviços de energia avançados, capitaneados por companhias de energia e distribuidores, incluem aplicações como telemetria automática, controladores programáveis e gerenciamento de demanda de energia (MAJUMDER; CAFFREY, 2004);
- O *HomePlug 1.0* é a especificação para uma tecnologia que conecta equipamentos entre si por meio da rede elétrica da residência. Os produtos certificados pelo *HomePlug* conectam computadores e outros equipamentos (que utilizam tecnologias como Ethernet, USB e Wi-Fi 802.11) à rede elétrica via um adaptador. Tais produtos oferecem uma solução simples para os consumidores interessados em criar uma rede caseira sem adicionar novos fios. O novo padrão desenvolvido pelo consórcio *HomePlug Alliance* (que inclui companhias de componentes eletrônicos e fornecedores de serviços) está sendo implementado para prover

aplicações de entretenimento, como HDTV e *Home Theater*; o *HomePlug AV* está sendo projetado para suportar grande largura de banda e baixa demanda de latência de vários e simultâneos *streams* de HDTV e VoIP (a intenção é que o serviço seja disponibilizado em mais de 90% das tomadas de uma casa). As aplicações têm como alvo a distribuição *in-home* de áudio, vídeo e dados. Na faixa de frequência de 2 a 28 MHz, o consórcio promete prover tais serviços a taxas de 200 Mbps (HOMEPLUG, 2006);

- Outras grandes empresas e consórcios vêm desenvolvendo diversos produtos para utilização da tecnologia PLC, como *modems*, concentradores, roteadores e adaptadores de rede (ASOKA, 2006), (CENELEC, 2006), (OPERA, 2006), (PLC-J, 2006). Alguns destes equipamentos fornecem, atualmente, uma taxa de cerca de 205 Mbps (ASCOM, 2006).

Capítulo 4

Transmissão no canal de retorno via PLC

Conforme explicitado anteriormente, a definição da transmissão do canal de retorno da televisão digital é importante para se disponibilizar a interatividade aos telespectadores. A proposta que é analisada neste trabalho diz respeito ao emprego da técnica de transmissão de dados por meio de linhas de energia para se prover uma solução para o padrão brasileiro de televisão digital.

Foram realizados diversos testes práticos, empregando equipamentos que fazem uso da tecnologia PLC disponíveis comercialmente, para se avaliar a viabilidade da transmissão do canal de interatividade por tal técnica.

Ressalta-se que não foi possível transmitir um canal de dados idêntico a um canal de interatividade, visto que tal tecnologia ainda está em desenvolvimento no Brasil. Portanto, a estratégia adotada foi a de estudar a transmissão de um equipamento PLC comum, quando utilizado para aplicações típicas da televisão digital: transmissão de vídeo e áudio. Também foram realizados diversos experimentos que consistiram no envio de pacotes de dados, variando de alguns kbits até Mbits, com o intuito de simular a transmissão efetiva do canal de retorno (ou seja, o envio da resposta do usuário para a emissora, o que caracteriza este canal). Por fim, tais testes foram executados nos ambientes selecionados de duas maneiras: inicialmente, com toda a carga elétrica desligada, para representar a situação ótima (sem cargas conectadas, a taxa de transmissão é máxima); em seguida, repetiram-se os testes com todas as cargas elétricas dos recintos conectadas, o que corresponde ao pior caso para a transmissão de dados por meio da rede de energia elétrica.

Merece menção o fato de que em nenhum dos ambientes estudados foi disponibilizado o respectivo esquema elétrico, o que prejudicou em parte a precisão dos testes por inviabilizar a medição exata das distâncias entre as diversas tomadas testadas. Como não se dispunha de

tais dados, a solução encontrada foi a de efetuar a medição física (essa mesma consideração já havia sido adotada em artigos recentes (MARKARIAN; HUO, 2005),(CARVALHO et al., 2005)), em virtude de não se poder medir o comprimento dos fios elétricos e que forneceria as distâncias exatas entre as tomadas elétricas. Além disso, não havia como identificar os diferentes circuitos elétricos que compõem a instalação elétrica dos recintos, o que pode justificar a observância de resultados discrepantes nas medições (como o fato de uma tomada mais distante apresentar, em alguns casos, uma taxa de transmissão maior do que outra posicionada a poucos metros da tomada do transmissor).

4.1 Equipamento utilizado

Foram utilizados dois terminais PLC disponíveis comercialmente (cerca de 80 dólares o par), da marca *Asoka™ USA Corporation* (ASOKA, 2006), com as seguintes características: taxa de transmissão máxima de 14 Mbps, protocolo TCP/IP, interface Ethernet, bivolt (110 V ou 220 V), faixa de frequência entre 4,5 e 21 MHz, alcance máximo de 500 m. O equipamento dispõe de técnicas de correção e detecção de erro de dados e de um algoritmo de criptografia DES de 56 bits¹. Vem acompanhado do *software Asoka™ PlugLink™ Wall Mount*, que fornece a taxa de transmissão em tempo real. A Figura 4.1 apresenta o equipamento utilizado nos testes.



Figura 4.1: Terminal PLC utilizado nos testes (ASOKA, 2006).

¹O *Data Encryption Standard* (DES) é uma chave simétrica de criptografia, que emprega chaves de 56 bits (LEON-GARCIA; WIDJAJA, 2000).

4.2 Procedimentos de medição

Foram escolhidos diversos ambientes para a realização das medições: três residências; um apartamento; um prédio de apartamentos, com quatro andares; um escritório de engenharia; uma empresa de automação industrial e de manutenção de motores industriais; e dois laboratórios situados no campus da UFCG. Em cada um dos ambientes testados, a intenção é obter uma análise da possível transmissão do canal de retorno da televisão digital no maior número possível de ambientes, para avaliar mais adequadamente a tecnologia PLC nesta aplicação. Em cada ambiente testado, foram escolhidas seis tomadas. Todos esses cenários de medição se situam na cidade de Campina Grande, cuja tensão é 220 V.

Os seguintes testes foram realizados nos ambientes citados:

- *Alcance*: deseja-se medir a variação da transmissão com a distância; para tanto, conecta-se o cabo de rede em um dos terminais do PLC, e este é ligado a uma tomada. Então, conecta-se o outro terminal PLC em uma tomada que esteja situada a uma determinada distância do terminal original. E a distância entre eles é aumentada gradualmente, com o intuito de medir o alcance do equipamento. Deve-se salientar que, em virtude da dificuldade de se obter os diagramas elétricos de todos os ambientes testados, a distância considerada diz respeito à distância física entre o transmissor e o receptor, e não ao comprimento dos fios que interligam a rede elétrica dos locais de teste;
- *Taxa de transmissão*: almeja-se medir a taxa média de transmissão no canal; para isto, utiliza-se o *software* que acompanha o equipamento, e que fornece em tempo real a taxa de transmissão. Segue-se, então, o mesmo procedimento descrito anteriormente: variando a distância entre os terminais, mede-se a respectiva taxa de transmissão;
- *Perda de desempenho*: a partir dos valores obtidos nos dois itens anteriores, pode-se analisar a perda de desempenho, qual seja o decaimento da taxa de transmissão em função da distância;
- *Testes de transmissão de dados*: foram realizados testes de transmissão de pacotes, que consistiram na transmissão de pacotes de tamanho variável. O objetivo é medir o tempo médio de atraso na transmissão de dados, para fazer uma simulação da transmissão real do canal de retorno;
- *Teste de carregamento do sistema*: a partir dos procedimentos empregados para a medição da taxa de transmissão, conectam-se diversos equipamentos à rede elétrica, de forma a se avaliar o comportamento da taxa de transferência do sinal nestas circunstâncias;

- *Testes com vídeo*: os testes com vídeos foram baseados em (MARKARIAN; HUO, 2005). Avalia-se a transmissão de um arquivo de vídeo por meio da linha elétrica, analisando a qualidade de vídeo recebida e medindo a queda na taxa de transmissão em função da conexão das cargas. Por meio da conexão PLC entre os dois *laptops*, pode-se acessar remotamente um arquivo de vídeo situado no outro computador e assistir a ele sem a necessidade de conexão de cabos de rede entre eles.

A Figura 4.2 mostra como foram realizados os experimentos, através da conexão dos terminais PLC nos *laptops* e nas tomadas elétricas dos ambientes testados.

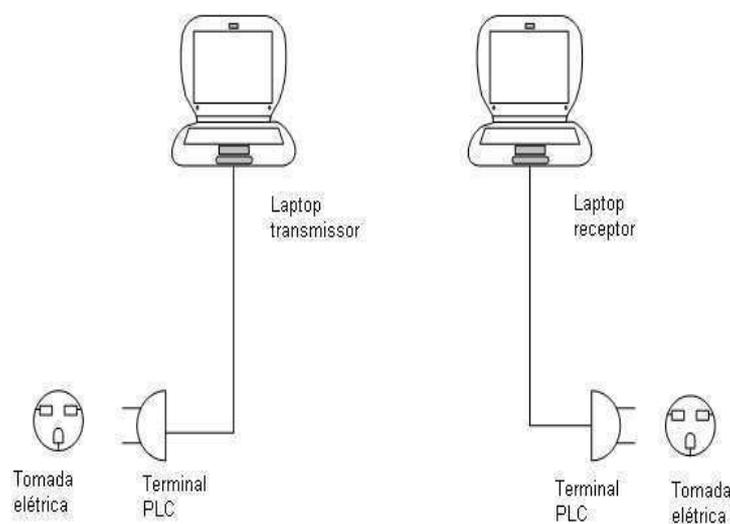


Figura 4.2: Conexão dos equipamentos utilizados nos testes.

4.3 Resultados e análise das medições

4.3.1 Ambientes residenciais

Os resultados dos testes nos ambientes residenciais são apresentados a seguir. Foram utilizadas três residências e um apartamento, situado em um prédio de apartamentos de quatro andares, localizado na cidade de Campina Grande. Os resultados obtidos no apartamento foram agrupados aos obtidos nas casas testadas, em virtude da similaridade dos ambientes e das dimensões dos imóveis.

A Figura 4.3 apresenta o decaimento da taxa de transferência (em Mbps) do equipamento PLC em função da distância, quando não há cargas conectadas à rede elétrica da casa. As curvas obtidas eram esperadas, pois à medida que aumenta a distância entre o transmissor e o

receptor PLC, a taxa de transferência do equipamento diminui. Os resultados são semelhantes aos apresentados em (CARVALHO et al., 2005).

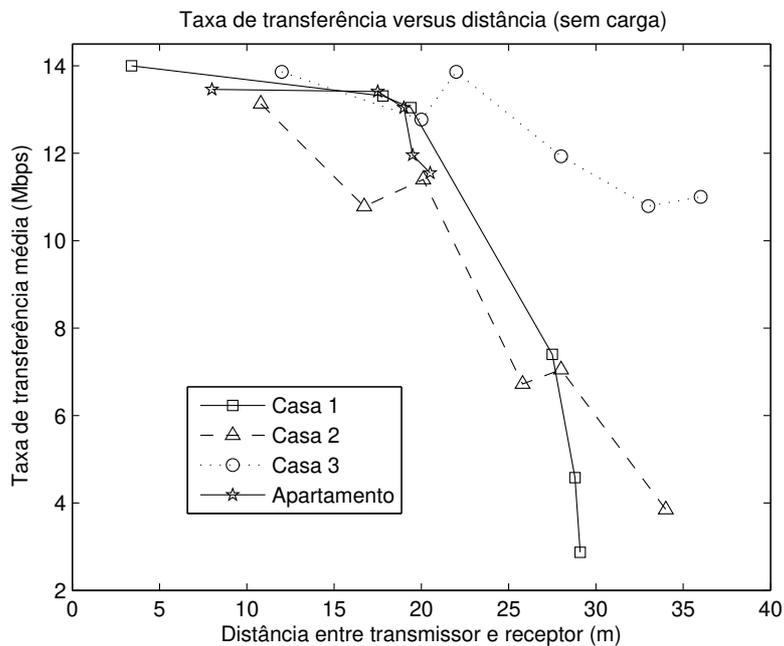


Figura 4.3: Taxa de transferência em função da distância em ambientes residenciais sem carga.

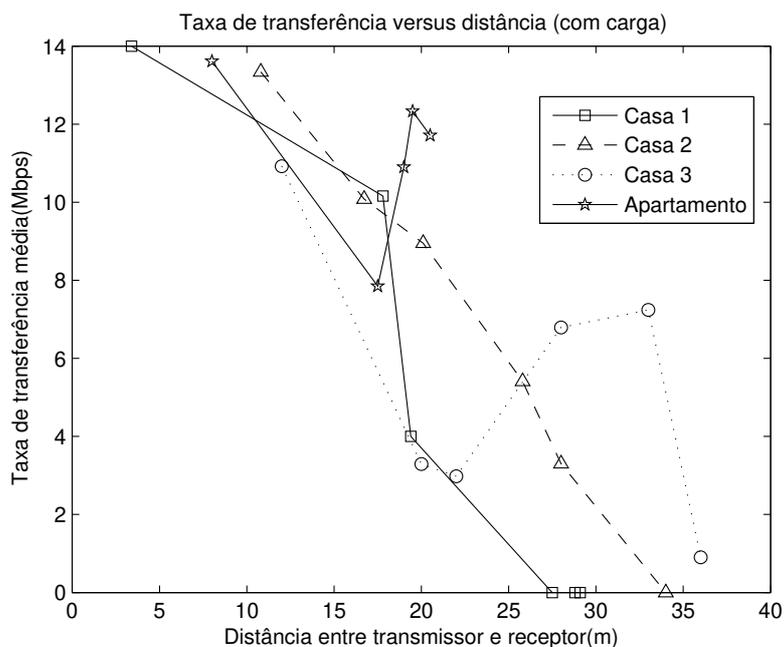


Figura 4.4: Taxa de transferência em função da distância em ambientes residenciais com carga.

Ressalta-se que, em alguns dos ambientes estudados, a taxa não decai acompanhando o aumento da distância, o que resulta em variações significativas na taxa de transferência. Isso pode ser explicado pelo fato de algumas tomadas estarem ligadas ao mesmo circuito elétrico e outras não. Tais curvas poderiam ser melhor explicadas se houvesse conhecimento prévio do diagrama elétrico das residências e dos circuitos aos quais as tomadas estão conectadas.

A Figura 4.4 mostra o decaimento da taxa de transferência (ou seja, a perda de desempenho) do equipamento PLC em função da distância, ao se conectarem todas as cargas elétricas dos ambientes. Verificou-se que as variações na taxa de transferência são mais acentuadas do que na Figura 4.3. Isso também pode ser justificado pela ausência dos diagramas elétricos das residências e do apartamento, já que não se tem ciência dos circuitos aos quais as cargas estão conectadas (para exemplificar, um liquidificador pode estar ligado em uma tomada que não pertence ao mesmo circuito da tomada do transmissor, provocando poucos efeitos na taxa medida; da mesma maneira, se ele estiver conectado ao mesmo circuito mencionado, a taxa de transmissão sofrerá um decaimento mais acentuado). Ressalta-se que, em alguns dos ambientes, a taxa de transmissão chegou a zero, impedindo a transmissão de dados.

A seguir, analisa-se o envio de pacotes de dados por meio da rede elétrica dos ambientes considerados. O teste teve por objetivo mensurar a taxa de transmissão de dados por meio de PLC, para pacotes de diferentes tamanhos. A intenção é avaliar como seria a transmissão do canal de interatividade (que deve consistir em um feixe contínuo de bits), bem como a transferência de dados entre terminais PLC. O tamanho dos arquivos enviados (escolhidos aleatoriamente) foi: 61,3 kb; 113,46 kb; 246,57 kb; 358,3 kb; 511,25 kb; 627,7 kb; 976,5 kb; 1,48 Mb; 2,19 Mb e 5,63 Mb. A Figura 4.5 apresenta a variação da taxa de transferência em função do comprimento dos pacotes, quando não havia cargas conectadas nos ambientes. Mediu-se a taxa de transferência de cada um dos arquivos em cada uma das tomadas dos ambientes (residências e apartamento); em seguida, procedeu-se ao cálculo médio da taxa de transferência para cada um dos quatro ambientes e, finalmente, foram obtidos os gráficos mencionados, em função da dimensão dos pacotes transmitidos.

Observa-se que as curvas obtidas para os quatro ambientes apresentaram o mesmo comportamento; à proporção que o comprimento dos pacotes aumenta, a taxa de transferência em Mbps se estabiliza em um determinado patamar, após ter atingido o ápice da transmissão.

Quando se analisa a taxa de transferência em função da dimensão dos pacotes enviados, ao se conectar as cargas das residências, observa-se que as curvas apresentam o mesmo comportamento da situação sem carga. Verifica-se que a taxa de transferência para o apartamento apresenta uma queda menor que a observada nas residências, conforme apresentado na Figura 4.6. As curvas 4.5 e 4.6 levaram ao desenvolvimento de um modelo que otimize a transmissão de arquivos de

tamanhos variáveis por meio da rede PLC (este modelo é apresentado no Apêndice B).

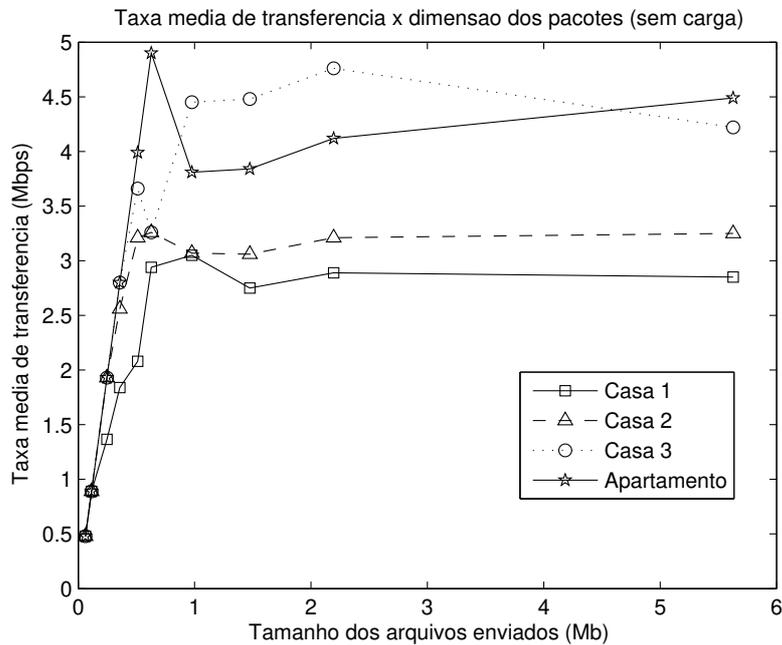


Figura 4.5: Taxa de transferência em função da dimensão dos pacotes em ambientes residenciais sem carga.

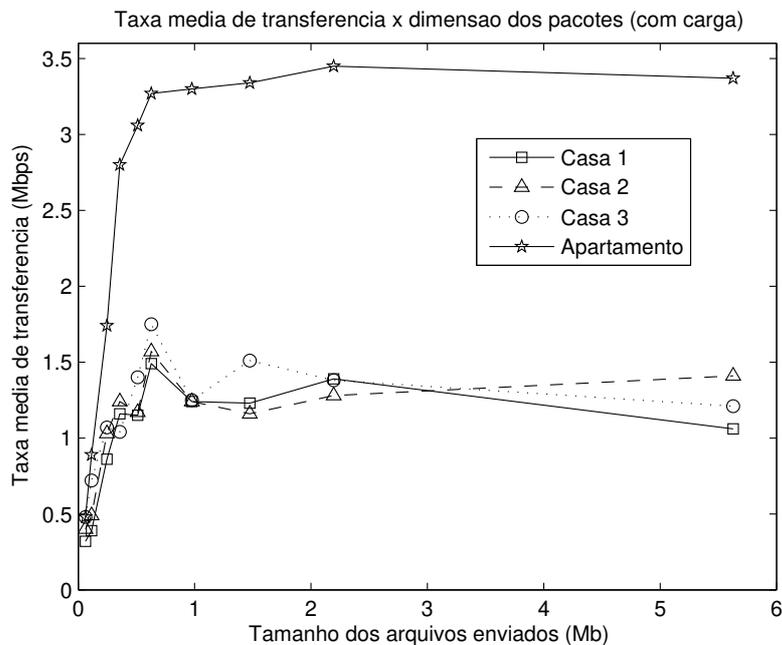


Figura 4.6: Taxa de transferência em função da dimensão dos pacotes em ambientes residenciais com carga.

O próximo passo foi a execução dos testes de carregamento. O experimento consistiu na conexão dos seguintes equipamentos à rede elétrica: liquidificador, forno de microondas, televisores, computadores. Esses equipamentos foram selecionados pelo fato de estarem presentes em todos os ambientes residenciais, além de corresponderem a alguns dos utensílios eletro-eletrônicos mais comuns em residências.

Ao ligar os equipamentos, mediu-se a taxa de transferência disponibilizada pelo terminal PLC; esse valor foi comparado à mesma taxa medida quando não havia cargas conectadas à rede elétrica. Dessa maneira, dispõe-se de uma comparação do comportamento do equipamento PLC com e sem cargas elétricas ligadas. Nas Figuras 4.7, 4.8, 4.9 e 4.10, explicita-se o teste de carga nos quatro ambientes testados, levando em conta o valor medido para a taxa de transferência, em Mbps, de cada uma das seis tomadas testadas em cada ambiente. Verifica-se que o comportamento observado nas quatro situações é similar.

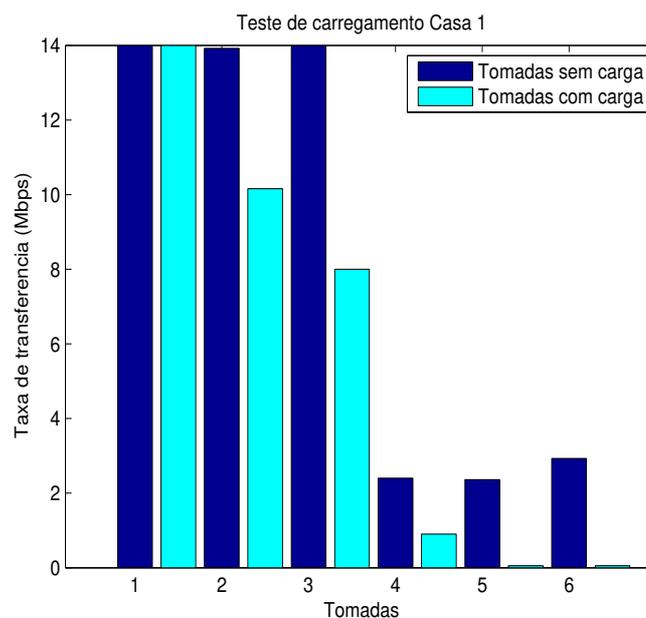


Figura 4.7: Teste de carregamento na residência 1.

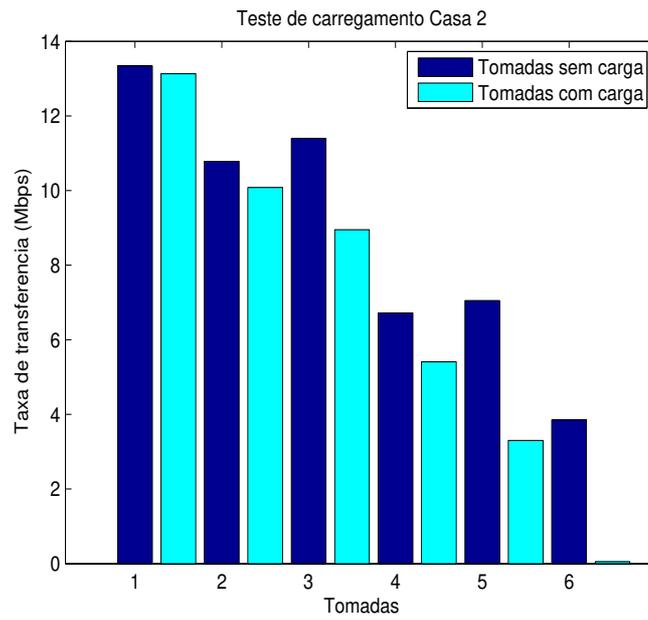


Figura 4.8: Teste de carregamento na residência 2.

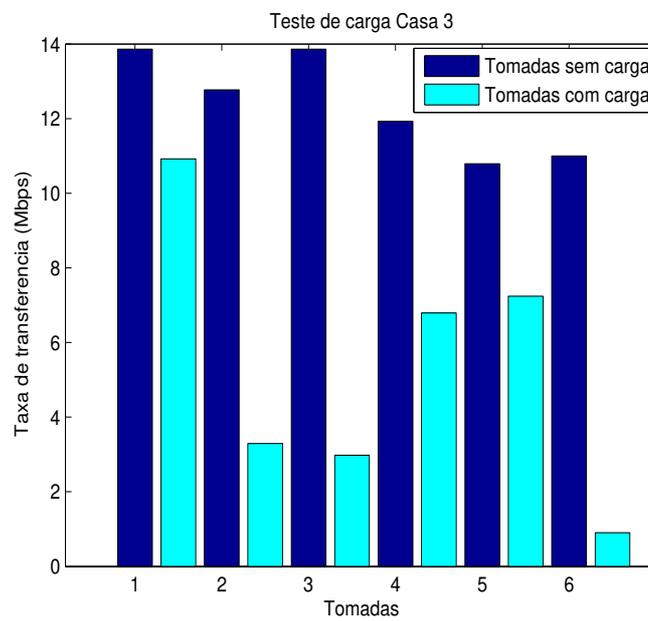


Figura 4.9: Teste de carregamento na residência 3.

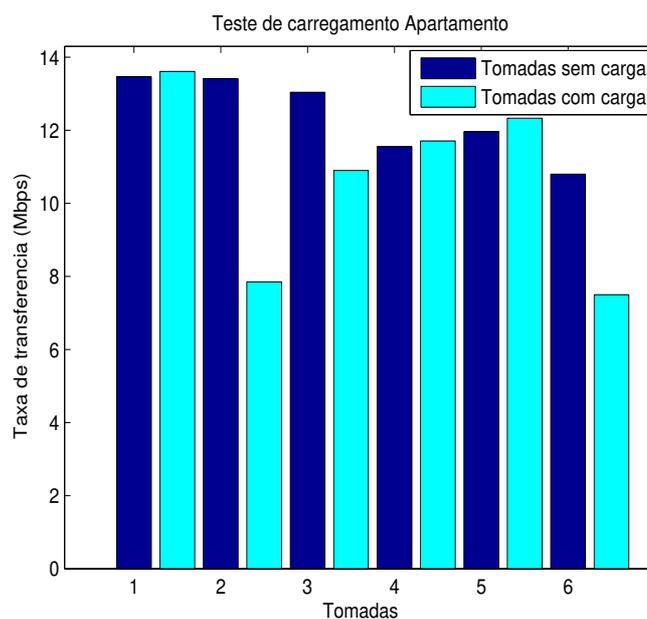


Figura 4.10: Teste de carregamento no apartamento.

Na realização dos testes com vídeo, analisou-se o acesso remoto de um arquivo de vídeo dentro das residências (isto é, assistia-se a um vídeo gravado no *laptop* transmissor, por meio da rede PLC, através do *laptop* receptor). Avaliou-se a qualidade da transmissão do vídeo na situação sem cargas e ao se conectarem todas as cargas elétricas dos ambientes. Os resultados obtidos são apresentados nas Figuras 4.11 e 4.12.

Também foi realizada uma avaliação subjetiva da qualidade da transmissão. A partir de uma escala para o teste de escore médio de opinião (MOS^2), apresentada em (JUNIOR, 2001), foi construída a Tabela 4.1.

Quando da realização dos testes sem cargas, todos os ambientes obtiveram comportamento similar, com poucas variações nas taxas ao se aumentar a distância; apenas a Casa 1 apresentou maior variação na taxa (embora ela tenha sido de apenas 300 kbps). Assim, não houve falhas ao acessar o arquivo de vídeo remotamente. Por outro lado, na situação com cargas conectadas apenas o Apartamento não obteve variação, quando comparada à situação inicial; isso pode ser justificado pelas pequenas dimensões deste, o que diminui a influência do aumento da distância na taxa de transferência e, conseqüentemente, na qualidade do vídeo transmitido pela rede PLC.

Nota-se que a Residência 1 apresentou o pior resultado, o que pode ser compreendido pelo fato de ser a residência mais antiga dentre as testadas; como a rede elétrica da casa data de algumas décadas, possíveis perdas nos fios, dentre outros fatores, podem ter influenciado na

²O escore médio de opinião (MOS) é uma medida subjetiva muito utilizada na avaliação de desempenho de sistemas de compressão de voz e imagem (JUNIOR, 2001).

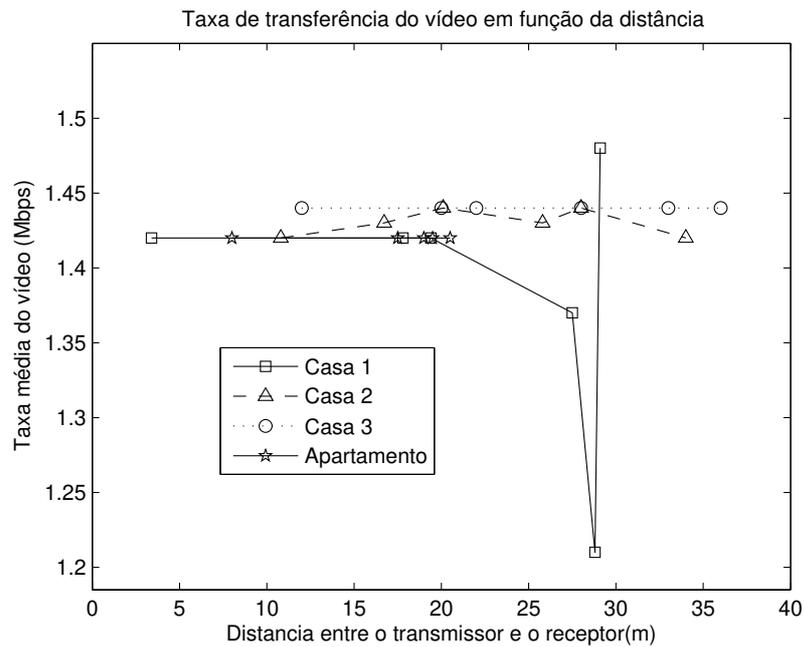


Figura 4.11: Testes com vídeo em ambientes residenciais sem carga.

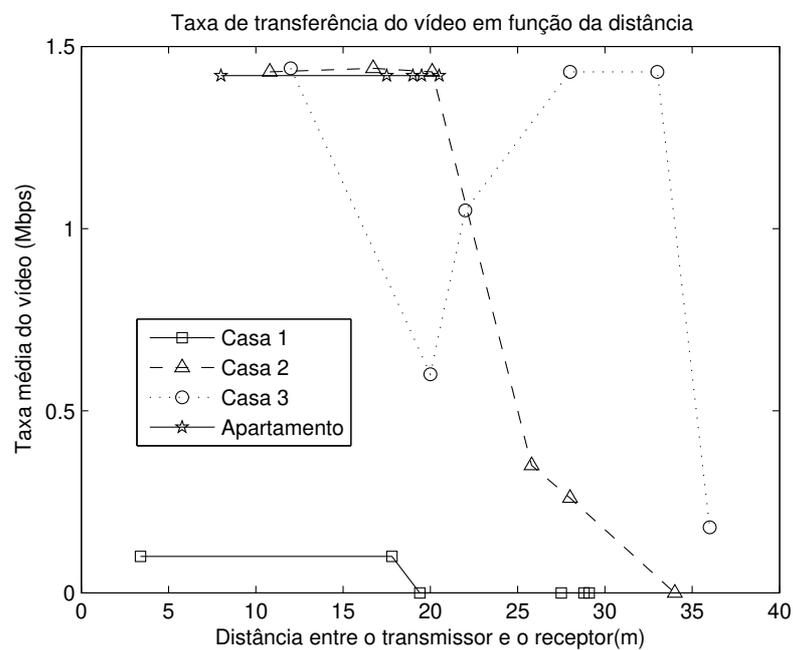


Figura 4.12: Testes com vídeo em ambientes residenciais com carga.

impossibilidade de transmissão do vídeo ao se ligarem todas as cargas. Os dados das Residências 2 e 3 mostram que houve uma grande variação, à medida que a distância entre o transmissor e o receptor aumentou.

Tabela 4.1: Qualidade dos testes com vídeo.

Qualidade do vídeo	Legenda	MOS
Boa	Sem falhas na reprodução do vídeo	0
Intermediária	Reprodução com ocorrência de algumas falhas, de curta duração	1
Ruim	Falhas constantes na reprodução, impossibilitando uma exibição adequada do vídeo	2
Sem sinal	Não há reprodução do vídeo	3

E, a partir da análise subjetiva proposta na Tabela 4.1, observaram-se os resultados apresentados nas Tabelas 4.2, 4.3, 4.4 e 4.5 referentes aos testes de vídeo com e sem cargas elétricas conectadas à rede das residências.

Tabela 4.2: Qualidade do vídeo - Casa 1.

Tomada	MOS (sem cargas)	MOS (com cargas)
1	0	2
2	0	2
3	0	3
4	0	3
5	0	3
6	0	3

Tabela 4.3: Qualidade do vídeo - Casa 2.

Tomada	MOS (sem cargas)	MOS (com cargas)
1	0	0
2	0	0
3	0	0
4	0	0
5	0	2
6	0	3

Tabela 4.4: Qualidade do vídeo - Casa 3.

Tomada	MOS (sem cargas)	MOS (com cargas)
1	0	0
2	0	1
3	0	0
4	0	0
5	0	0
6	0	2

Tabela 4.5: Qualidade do vídeo - Apartamento.

Tomada	MOS (sem cargas)	MOS (com cargas)
1	0	0
2	0	0
3	0	0
4	0	0
5	0	0
6	0	0

Por fim, foram realizados experimentos para verificar a influência dos medidores de energia elétrica (responsáveis pela aferição do consumo energético de um ambiente) na transmissão de dados por meio da tecnologia PLC. Tais experimentos consistiram simplesmente em verificar se os medidores influenciam na transmissão de sinais PLC. Em todos os ambientes residenciais considerados, o *laptop* receptor foi posicionado fora dos recintos, ao passo que o *laptop* transmissor permaneceu dentro das casas. Verificou-se a normalidade na transferência de dados, contrariando as suposições levantadas em (CARVALHO et al., 2005).

4.3.2 Ambiente industrial e de escritório

Os resultados dos testes realizados no escritório e no galpão industrial são apresentados na seqüência. Decidiu-se analisá-los conjuntamente, pelo fato de serem ambientes não-residenciais e apresentarem características semelhantes.

A Figura 4.13 ilustra o decaimento da taxa de transmissão do equipamento PLC com o aumento da distância nesses ambientes. Infere-se do exposto graficamente que a taxa na indústria

apresentou maior queda, fato plenamente justificável pela maior dimensão da área do galpão. Excetuando-se esse fato, nota-se que a queda na transmissão assemelha-se às curvas obtidas nos ambientes residenciais.

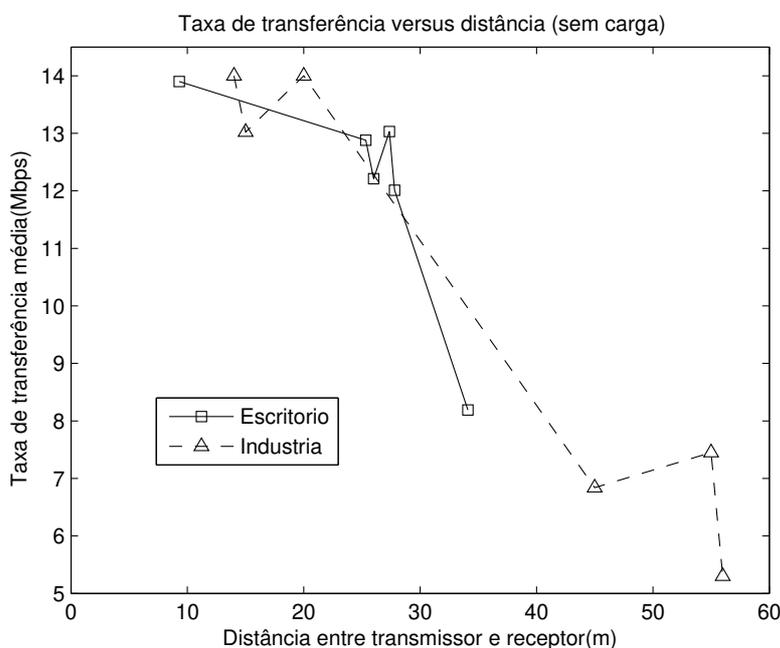


Figura 4.13: Taxa de transferência em função da distância em ambientes não-residenciais sem carga.

Quando as cargas elétricas dos ambientes são conectadas, observa-se um decaimento na taxa em função da distância, conforme esperado pela tecnologia PLC e ilustrado na Figura 4.14. Deve-se salientar, contudo, que a perda de desempenho ao se ligarem os equipamentos nesses ambientes é menor do que a visualizada nas residências. Isso se justifica pela necessidade de um fornecimento contínuo e estável de energia elétrica para uma produção adequada e contínua em ambientes industriais. Verifica-se que, quando todas as cargas estão conectadas e a distância é máxima, no galpão industrial, a taxa cai para cerca de 2 Mbps, patamar ainda razoável para aplicações com PLC.

O envio de pacotes de dados por meio da rede elétrica e a variação na taxa de transferência, nos ambientes não-residenciais, é ilustrado na Figura 4.15. O tamanho dos arquivos enviados é o mesmo explicitado nos testes residenciais.

Observa-se que as curvas obtidas são similares; quando o comprimento dos pacotes aumenta, a taxa de transferência em Mbps se estabiliza. O comportamento das curvas, quando é analisada a taxa de transferência em função do tamanho dos arquivos enviados, ao conectar as cargas desses ambientes, é mostrado na Figura 4.16. Nota-se que as curvas se assemelham às da situação sem carga, com uma diminuição nos valores das taxas de transmissão. A conclusão é idêntica à

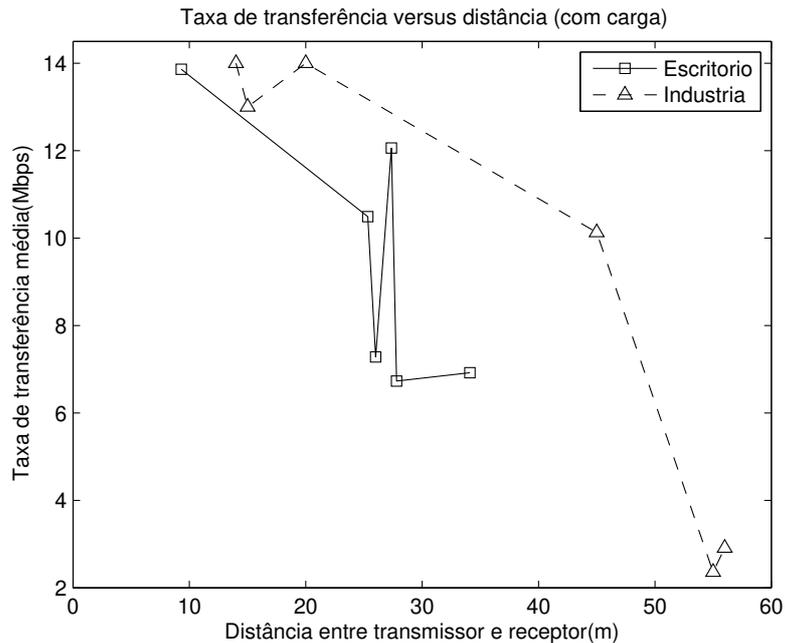


Figura 4.14: Taxa de transferência em função da distância em ambientes não-residenciais com carga.

exposta para os testes residenciais.

No caso dos testes de carregamento nos ambientes não-residenciais, como se tratam de ambientes com características diferentes, optou-se pela apresentação dos resultados isoladamente para cada ambiente. A Figura 4.17 apresenta a comparação entre as duas situações (cargas desligadas e cargas ligadas) para as seis tomadas testadas no galpão industrial. Os equipamentos conectados à rede elétrica consistiram em motores monofásicos e trifásicos, computadores, aparelhos de ar condicionado e equipamentos industriais. Três tomadas não apresentaram variação na taxa de transmissão, enquanto que outra indicou uma taxa discrepante, com uma taxa mais elevada na situação de carregamento.

A Figura 4.18 mostra o resultado dos testes de carregamento nas diversas tomadas do ambiente de escritório. Os equipamentos conectados em tal situação são: computadores, impressoras, aparelhos de ar condicionado, *plotters*, *scanners* e aparelhos de televisão. Todos os resultados condizem com o esperado: a taxa de transmissão na situação com cargas é sempre menor que na situação sem carregamento do sistema.

Na seqüência, analisam-se os testes com vídeo, executados nos dois ambientes. Na observação da variação da taxa de transmissão do vídeo em função do aumento da distância entre o transmissor e o receptor, na situação sem cargas, o ambiente industrial apresentou um resultado constante, sem variações; no escritório, a variação foi um pouco maior, conforme se observa a partir da Figura 4.19.

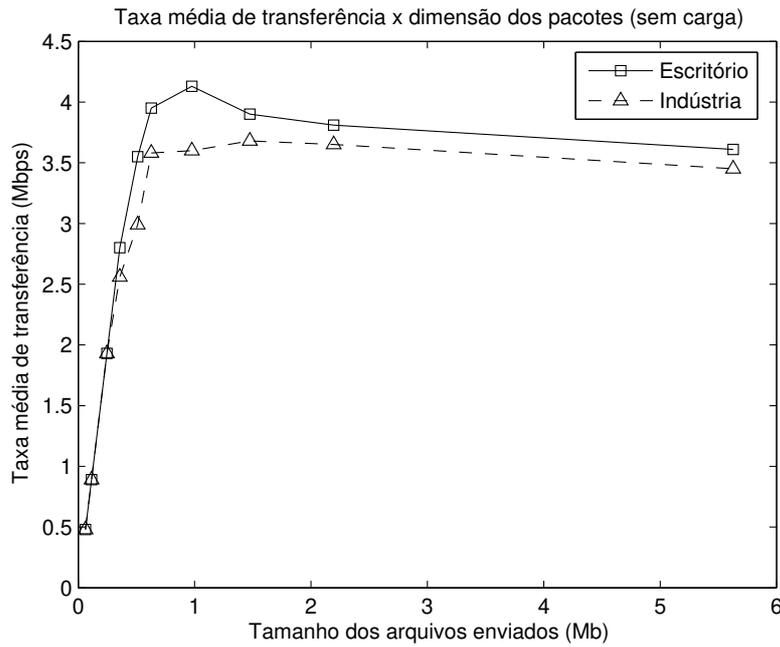


Figura 4.15: Taxa de transferência em função da dimensão dos pacotes em ambientes não-residenciais sem carga.

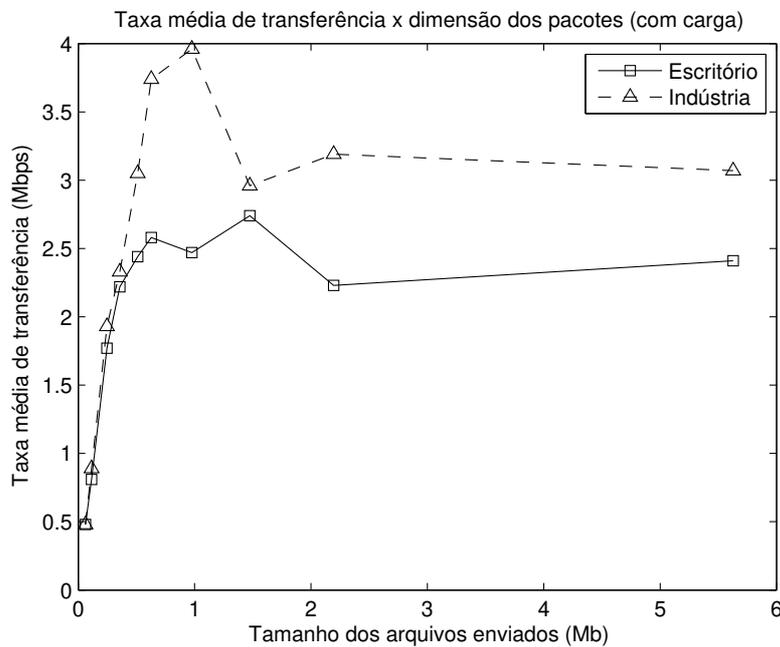


Figura 4.16: Taxa de transferência em função da dimensão dos pacotes em ambientes não-residenciais com carga.

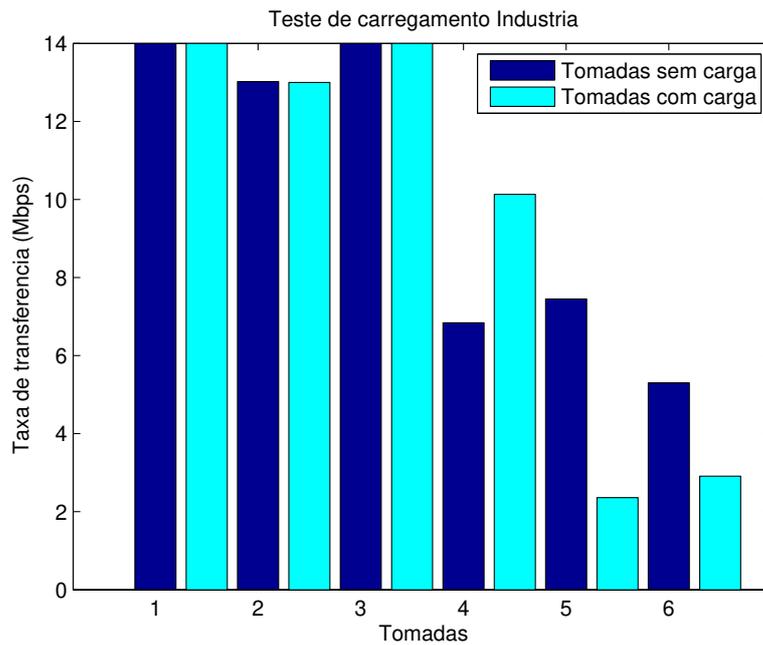


Figura 4.17: Teste de carregamento na indústria.

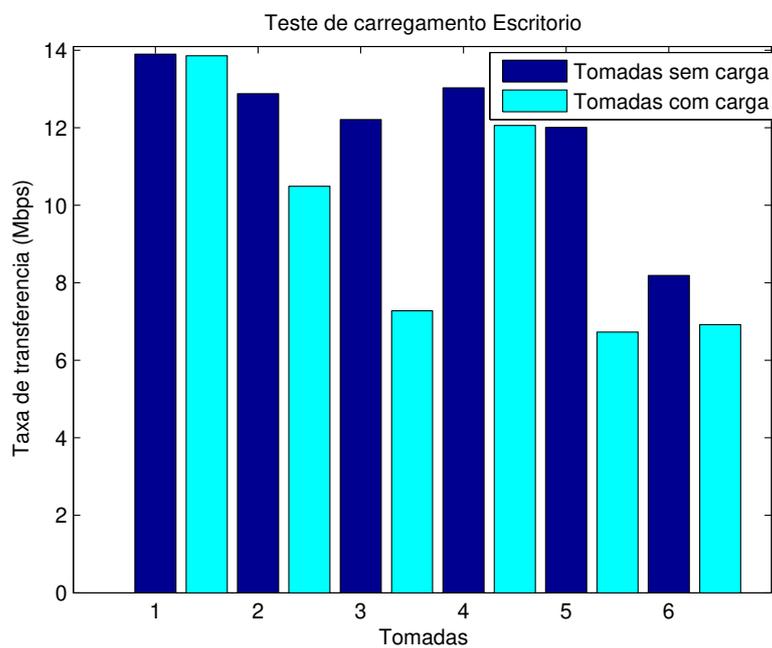


Figura 4.18: Teste de carregamento no escritório.

Quando da realização dos testes com vídeo, ao se conectarem as cargas elétricas desses ambientes, o decaimento da taxa de transmissão em função da distância foi mais irregular no ambiente de escritório, apresentando uma pequena variação, de cerca de 100 kbps. O decaimento

observado na indústria ficou mais próximo do esperado.

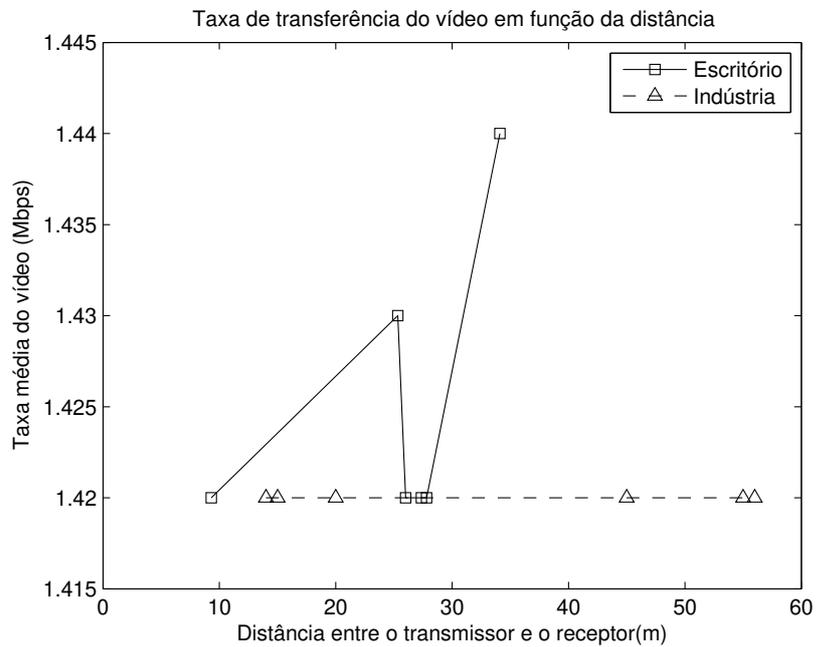


Figura 4.19: Testes com vídeo em ambientes não-residenciais sem carga.

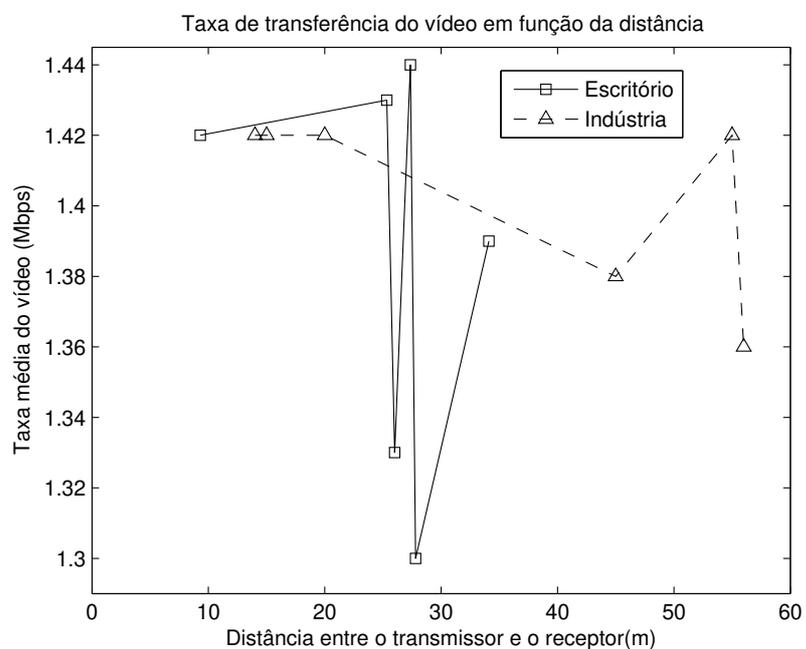


Figura 4.20: Testes com vídeo em ambientes não-residenciais com carga.

Os testes no escritório de engenharia e no galpão industrial apresentaram resultados semelhantes. Como a indústria possui grandes cargas elétricas trabalhando ininterruptamente, sua

alimentação é trifásica, devido às exigências dos equipamentos empregados e pela necessidade de maior estabilidade no fornecimento de energia. O escritório estudado também possui equipamentos de médio porte (como *plotters* e *scanners*), porém sua alimentação não é trifásica. Em contrapartida, apresenta diversos disjuntores e circuitos específicos para as tomadas elétricas, para os aparelhos de ar condicionado e para os computadores.

Nota-se que, nesses ambientes, as curvas são similares às obtidas nas residências, com a ressalva de que não havia grandes perdas de desempenho entre as situações de carregamento e sem cargas elétricas conectadas (o que é explicado pela exigência de um fornecimento de energia elétrica mais estável e robusto). Os testes com vídeo, por exemplo, tiveram praticamente os mesmos resultados nas situações com e sem carga. Além disso, os equipamentos foram projetados para aplicações residenciais; os diversos aparelhos PLC, específicos para tais ambientes e também disponíveis no mercado, devem resultar na melhoria dos testes realizados.

Em seguida, apresenta-se o resultado da avaliação subjetiva a respeito da qualidade da transmissão do vídeo. Como os resultados foram os mesmos para os dois ambientes não-residenciais (apresentando boa qualidade em todas as tomadas, com e sem cargas elétricas conectadas à rede), a Tabela 4.6 condensa os resultados para o escritório e para a indústria.

Tabela 4.6: Qualidade do vídeo - Escritório e indústria.

Tomada	MOS (sem cargas)	MOS (com cargas)
1	0	0
2	0	0
3	0	0
4	0	0
5	0	0
6	0	0

Por fim, foi realizado um teste na indústria, com o objetivo de verificar se as linhas trifásicas impedem a transmissão do sinal de dados PLC, ou seja, se a transmissão entre fases distintas bloqueia o envio de sinais de dados por meio da rede elétrica. A partir de outros experimentos, imaginava-se que o PLC não suportava o envio de dados por meio de fases diferentes em ambientes com alimentação trifásica, sendo adequado apenas para ambientes com tensão monofásica (CARVALHO et al., 2005). Porém, a partir da utilização das fases disponíveis para a alimentação de motores trifásicos, observou-se que não há empecilhos à transmissão PLC entre fases distintas.

4.3.3 Prédio de apartamentos

Os resultados com os terminais PLC em um prédio de apartamentos de quatro andares, conforme descrito anteriormente, não foram satisfatórios por três motivos principais: pelas grandes distâncias entre as diversas tomadas situadas na construção; pelo grande número de equipamentos eletro-eletrônicos que poderiam estar ligados quando da realização dos testes, sobre os quais não se teve controle (pois seria difícil solicitar a todos os moradores de um prédio de quatro andares que ficassem por algumas horas com todos os aparelhos elétricos desligados); e pela falta de um diagrama elétrico do prédio, que poderia guiar melhor a condução dos testes (indicação dos circuitos elétricos e da distância efetiva dos fios elétricos).

Em virtude da grande distância entre as tomadas do prédio (só havia uma tomada externa aos apartamentos em cada andar), bem como à enorme quantidade de cargas conectadas no interior dos vinte e quatro apartamentos do edifício (destes, teve-se acesso apenas a um apartamento, ao passo que aos demais não se obteve acesso; por isso, estes estiveram fora de controle dos testes), não se conseguiu transmitir dados PLC entre os andares.

O máximo que se obteve, e a baixas taxas, foi a transferência de dados entre o apartamento a que se teve acesso e a tomada situada no respectivo andar. Os testes de envio de pacotes e de qualidade do vídeo não puderam ser realizados, portanto verificou-se que os terminais PLC utilizados não são adequados para grandes ambientes.

Uma solução adequada para prédios de apartamentos comportarem transmissões de dados via PLC consiste na adoção de equipamentos como roteadores e *modems*. Tais equipamentos permitem o estabelecimento de uma rede PLC em grandes ambientes. Portanto, para a hipótese de transmissão do canal de retorno da TV Digital no Brasil, tais acessórios seriam fundamentais para prover um acesso adequado a todos os moradores de prédios residenciais.

4.3.4 Laboratórios

Foram utilizados dois laboratórios, situados no bloco de Comunicações do Departamento de Engenharia Elétrica, para a realização dos experimentos com PLC. Nos laboratórios, há diversas cargas elétricas constantemente conectadas, como computadores, impressoras, aparelhos de ar condicionado e equipamentos experimentais (como osciloscópios, analisadores de espectro, dentre outros). Além desses laboratórios, situam-se no bloco diversas salas particulares de professores e estudantes de pós-graduação, além de outro laboratório.

Constatou-se que a perda de desempenho é bem maior do que no interior das casas, à semelhança do que ocorreu no prédio de apartamentos. A principal justificativa seria que a carga elétrica dos laboratórios e do bloco no qual estes estão situados é muito maior do que em

uma casa comum. Verificou-se uma grande variação na taxa quando da realização dos testes em condições normais (dia útil) e no final de semana (domingo à tarde): neste, a taxa foi bem elevada, situando-se na faixa de 10 Mbps e transmitindo adequadamente a até de 50 m, enquanto que na outra situação o alcance do equipamento não passou de cerca de 10 m. Pode-se considerar que os testes postos em prática durante a semana (portanto em condições normais de trabalho) refletem a situação típica do bloco, ao se fazer a analogia quanto ao carregamento do sistema.

Além da área do bloco dos laboratórios, o alcance do equipamento não pôde ser dimensionado; tentou-se conectar um dos terminais PLC em cada um dos laboratórios e o outro no bloco ao lado (aproximadamente 12 m de distância), contudo não houve transmissão de dados entre os terminais. A justificativa deve se basear nas altas cargas presentes na malha elétrica da UFCG, que impossibilitam o envio de dados pela rede elétrica. Os equipamentos usualmente ligados nesse ambiente são computadores, impressoras, *scanners*, aparelhos de fax, além de outros equipamentos diversos (desde máquinas de xerox até grandes transformadores). Nessas condições, o equipamento não consegue prover uma transferência adequada de dados e a comunicação por meio da rede elétrica fica inviabilizada, mesmo em se trabalhando com distâncias situadas dentro dos parâmetros garantidos pelo fabricante dos equipamentos PLC empregados.

Para solucionar tal problema, a utilização de equipamentos específicos para a transmissão PLC (roteadores, *modems*, concentradores) devem melhorar a transmissão dos equipamentos testados, inclusive viabilizando a hipotética transmissão do canal de retorno por meio da rede elétrica.

4.4 Proposta de implementação do canal de retorno

Resta a definição de uma solução para o acesso até os ambientes, ou, novamente fazendo uso da definição em inglês, do *last mile access* (acesso da última milha, ou seja, acesso até os ambientes). Como a tecnologia PLC privilegia a transmissão em linhas de baixa e média tensão, pelo fato de os sinais de dados (de alta frequência) serem destruídos quando enviados pelas linhas de alta tensão, a solução deve prover uma alternativa viável e eficaz para a transmissão do canal de retorno até o transformador abaixador da rua ou quarteirão (já que o transformador age como um filtro passa-baixa, impedindo que sinais de alta frequência passem para a linha de alta tensão).

Um projeto experimental, que vem sendo realizado com sucesso na cidade de Barreirinhas, interior do Maranhão, é descrito em (RTI, 2005b). Uma rede PLC de um quilômetro de extensão foi instalada. Um concentrador é instalado em um ponto próximo ao transformador de energia,

injetando o sinal PLC na rede. Neste ponto também é introduzido um acoplador, que faz a conexão entre o concentrador e a rede elétrica. Nas residências dos usuários, foram instalados *modems* PLC com velocidades de até 14 Mbps, que pode ser conectado em qualquer tomada da residência para receber o sinal transmitido pelo concentrador (estes *modems* são protegidos contra surtos de tensão e possuem isolamento e sistema de aterramento para evitar choques). Segundo os desenvolvedores do projeto, em operação desde dezembro de 2004, a qualidade do sinal é boa até perto de um quilômetro; ao ultrapassar essa barreira, a instalação de repetidores, que amplificam e repetem o sinal, permite o uso adequado dos serviços oferecidos (acesso à Internet de alta velocidade, que é provido por meio de um *link* via satélite).

Portanto, um modelo de difusão do canal de retorno via PLC pode ser implementado a partir do modelo experimental citado. O canal de dados pode ser enviado até o concentrador por meio de satélite (como no caso de Barreirinhas), radiofrequência, fibras ópticas (propostos em (CARVALHO et al., 2005)) ou mesmo por intermédio de outras alternativas, como o uso do canal de dados da telefonia celular (CARVALHO; ALENCAR, 2005b). Atualmente, a Finlândia disponibiliza alguns serviços interativos pelo canal de interatividade via SMS (CPQD, 2005). E a transmissão via satélite poderia ser alocada para cobrir as regiões de difícil acesso e que não dispõem de infra-estrutura energética ou de telecomunicações. Essas alternativas gerariam um sistema híbrido, que não utiliza apenas uma das tecnologias propostas, mas duas ou até três dessas na transmissão do canal de interatividade até os usuários. E o sistema deve permitir, obviamente, a recepção e o envio das respostas e das demandas dos usuários diretamente para as emissoras. A Figura 4.21 apresenta uma proposta de implementação do canal de interatividade, a partir das diversas soluções que podem compor um sistema híbrido de transmissão do canal de retorno.

O sistema imaginado acima não é de difícil implementação, embora exija um investimento inicial relativamente alto; contudo, tendo em vista a quase universalidade da energia elétrica no Brasil (o que torna o sistema de distribuição de energia o meio que atinge praticamente todas as localidades habitadas do país), a infra-estrutura para se atingir todos os cantos da nação está consolidada, o que reduziria em muito os custos.

O governo também deve analisar outros parâmetros cruciais para o estabelecimento do meio de difusão do canal de interatividade. Parâmetros sociais, econômicos, geográficos e demográficos devem ser cuidadosamente estudados, após a análise da viabilidade técnica.

No aspecto econômico, deve-se avaliar o custo necessário para se levar a televisão digital e a interatividade a todos os cidadãos, sem distinção, do contrário a proposta de inclusão digital será comprometida. Todas as tecnologias propostas para o canal de retorno exigem grandes investimentos de capital, com retorno financeiro incerto a curto e médio prazo. Com

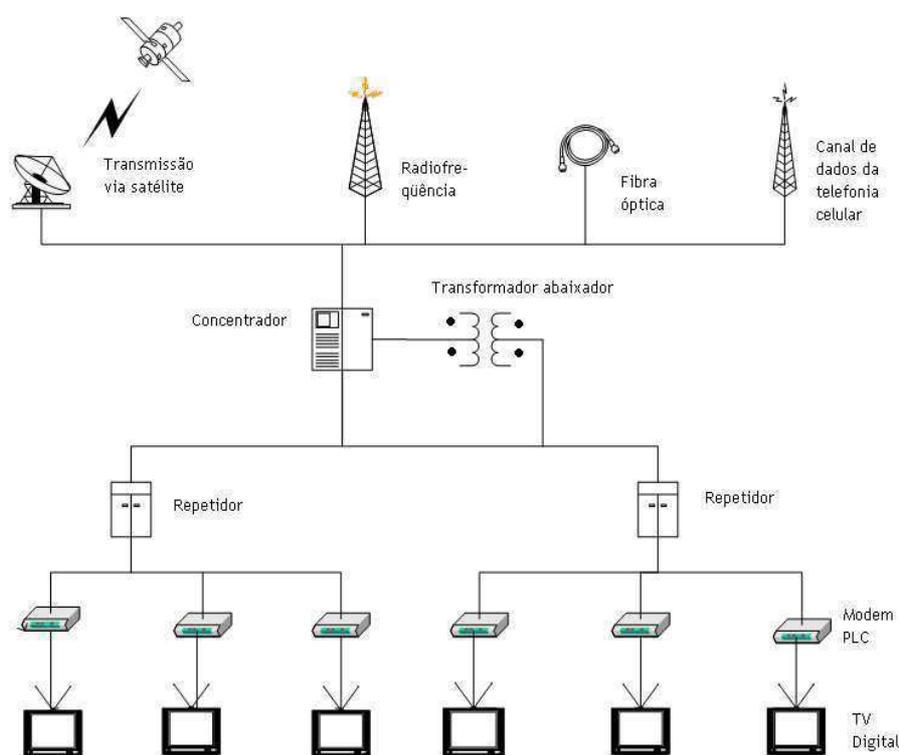


Figura 4.21: Proposta de implementação do canal de retorno.

relação à técnica PLC, alvo desta dissertação, o custo é particularmente elevado, visto que cada residência deve possuir um *modem* que permita a recepção dos dados transmitidos pelas linhas de baixa tensão; conforme exposto em (RTI, 2005b), faz-se necessário instalar repetidores a cada quilômetro, em média, para evitar a atenuação do sinal; concentradores devem ser instalados em cada transformador abaixador, para enviar os dados até os ambientes; roteadores também serão necessários, para controlar o tráfego de dados para cada *modem* e também a resposta destes às emissoras; além, é claro, da montagem de uma infra-estrutura que envie os dados até os concentradores, para que estes disponibilizem o canal de interatividade aos usuários. Ou seja, o custo de implementação de uma rede PLC para este fim será alto, o que pode ser um fator impeditivo a esta técnica.

Nos aspectos geográfico e demográfico, o principal entrave reside nas pequenas concentrações populacionais em locais afastados e de difícil acesso, que não dispõem de nenhuma infra-estrutura de telecomunicações (como, por exemplo, regiões ribeirinhas na Amazônia, pequenos vilarejos no interior do país, favelas, dentre outros). Embora boa parte desses locais tenha energia elétrica, as grandes distâncias inviabilizarão a instalação dos equipamentos citados anteriormente (concentradores, repetidores, etc) até tais localidades. Para esses ambientes mais isolados, a proposta do uso de satélite para cobrir tais regiões deve ser analisada (embora também seja uma alternativa cara).

Capítulo 5

Conclusões

O estudo do canal de retorno da televisão digital é importante para o provimento de interatividade aos usuários. A aplicação da transmissão de dados via rede elétrica, para o canal de retorno, pode ser analisada a partir dos resultados experimentais obtidos.

Não foi possível implementar um canal de retorno real (haja visto que poucos países detêm, atualmente, a tecnologia adequada para sua implantação). Assim, foram simuladas diversas etapas atinentes à transmissão do canal de interatividade (como o envio de dados, arquivos, acesso a vídeo e áudio).

Os resultados dos testes de medição da taxa de transferência e de perda de desempenho em função da distância corroboram as especificações técnicas do fabricante do equipamento (ASOKA, 2006) e, de maneira geral, a fundamentação teórica de *Power Line Communications*, em que, à medida que aumenta a distância entre os terminais PLC, o valor da taxa de transmissão entre eles diminui. O equipamento utilizado promete fornecer uma taxa adequada dentro de um raio máximo de até 500 metros. Vale ressaltar que há equipamentos mais avançados do mesmo fabricante e de diversas outras companhias (INTELPRIMA, 2006), (OPERA, 2006), (HOMEPLUG, 2006), (PLCFORUM, 2006); enquanto o aparelho empregado nos testes disponibiliza até 14 Mbps, outros mais modernos fornecem uma taxa de até 205 Mbps (ASCOM, 2006).

As curvas apresentadas nas Figuras 4.5 e 4.6 são particularmente interessantes. Elas apresentam um mesmo padrão, em que a transmissão de arquivos com comprimentos variáveis é analisada. Verifica-se que, para uma determinada dimensão de arquivo, a taxa de transmissão atinge o ápice, e para arquivos maiores que esse patamar a taxa decai um pouco e tende a se estabilizar. Um modelo que otimize a transmissão de dados por meio da tecnologia PLC pode ser obtido a partir de testes práticos e simulações. O Apêndice B apresenta uma proposta de otimização da transmissão por meio de PLC.

A partir do exposto, infere-se que o equipamento PLC testado está em conformidade com

a sua proposta primordial de utilização: o fornecimento de altas taxas de dados dentro dos ambientes – ou, empregando a terminologia em inglês, o *last inch access* (acesso no interior dos ambientes) (FERREIRA et al., 1996),(MAJUMDER; CAFFREY, 2004). E, assim, é adequado à transmissão do canal de interatividade da TV Digital em pequenos e médios ambientes caseiros. De acordo com os testes realizados, algumas precauções devem ser observadas quando há grandes cargas elétricas conectadas à rede elétrica. Para esses casos, faz-se necessária a instalação de um roteador residencial, que pode transmitir os sinais no interior dos ambientes sem perdas e independentemente da potência elétrica em uso (RTI, 2005a),(VIDAL, 2006),(INTELPRIMA, 2006).

Deve-se lembrar que a aplicação original dos terminais PLC utilizados nos testes exige ao menos um roteador por ambiente, para o adequado provimento dos sinais de dados para todas as tomadas da casa (ver Figura 3.2). O roteador também possui a função de receber os sinais emitidos pela distribuidora de energia, por meio de um concentrador. Logo, em tal cenário a perda de desempenho, quando da realização dos testes de carregamento, envio de dados e testes com vídeo, deveria ser bem menor.

Reitera-se, portanto, que mesmo em uma situação precária, sem os acessórios necessários à transmissão PLC, o equipamento mostrou-se eficiente para as aplicações analisadas. Este é um ponto positivo na avaliação da proposta de transmissão do canal de retorno: mesmo sem todos os equipamentos necessários, o envio de dados foi adequado na maioria dos casos.

Os testes foram realizados em um cenário ponto-a-ponto (qual seja, transmissão de um terminal PLC a outro); a execução de testes em um ambiente de rede, com diversos usuários ligados à rede elétrica, deve convergir para resultados diferentes dos apresentados. Esses testes seriam interessantes, por serem mais condizentes com a realidade do uso da tecnologia *Power Line Communications*. Portanto, a realização desses testes é sugerida como proposta de trabalhos futuros.

Por fim, deve-se ressaltar mais uma vez que a implementação de um canal de retorno exige também estudos econômicos e logísticos. Apenas quatro países (Coréia do Sul, Finlândia, Itália e Japão (CPQD, 2005)), além da Inglaterra, empregam o canal de retorno no mundo, embora a televisão digital já venha sendo utilizada desde o final da década de 1990. Conclui-se que a escolha brasileira deve seguir critérios técnicos, econômicos e sociais, que favoreçam tanto à população quanto permitam a geração de receitas, permitindo a manutenção e a modernização do serviço.

Em suma, o uso do PLC como meio para transmitir o canal de interatividade do padrão brasileiro de televisão digital é uma proposta que, tecnicamente, pode ser realizável, desde que seja implementada com outros equipamentos (como roteadores, concentradores e *modems*). O

investimento inicial, porém, deverá ser alto, o que pode indicar a adoção de um sistema híbrido, barateando os custos e se adequando mais facilmente às nuances do Brasil.

5.1 Propostas de trabalhos futuros

Pelo fato de ter sido a primeira dissertação de mestrado da UFCG a discorrer sobre TV Digital e interatividade, podem ser apontadas algumas propostas de continuação deste trabalho; as mais relevantes são apontadas a seguir:

- Realização dos procedimentos de testes utilizando equipamentos PLC mais modernos, que propiciam taxas de transmissão maiores e podem otimizar a transmissão do canal de retorno da televisão digital por meio desta tecnologia. Também pode ser proveitoso adquirir alguns dos acessórios citados (roteadores, concentradores, repetidores, *modems* PLC) para observar como a transmissão mencionada seria melhorada.
- Execução dos testes apresentados em um cenário de rede, com vários terminais PLC conectados à rede elétrica. Os resultados desses testes seriam um contraponto às medidas obtidas nesta dissertação, quando foi analisado um cenário ponto-a-ponto.
- Implementação de uma rede experimental de transmissão PLC, conforme realizado em (RTI, 2005b).
- Estudo e implementação de um sistema híbrido de transmissão do canal de interatividade (por exemplo, PLC e RF Intrabanda ou PLC e telefonia celular), buscando alternativas para o padrão brasileiro de TV Digital.
- Estudo comparativo com as demais soluções propostas para o canal de retorno do SBTVD (GSM, CDMA, redes *ad hoc*, RF Intrabanda, telefonia fixa), para avaliar todas as alternativas sugeridas.

Apêndice A

Canal de retorno para o SBTVD

Seis propostas de transmissão do canal de retorno foram estabelecidas para o SBTVD:

- Emprego de canais de comunicação de dados da telefonia celular (GSM ou CDMA);
- Uso de redes *ad hoc*;
- Utilização de radiofrequência;
- Via telefonia fixa (com *modem* telefônico, serviços xDSL ou cabo);
- Uso de comunicações em linhas de distribuição (PLC).

A análise da proposta que emprega *Power Line Communications* já foi detalhada ao longo desta dissertação; portanto, será exposto um pequeno resumo das demais técnicas sugeridas para transmitir o canal de retorno do Sistema Brasileiro de Televisão Digital.

A.1 GSM ou CDMA

O canal de retorno para televisão digital, empregando GSM, foi especificado em 1999 (ETSI, 1999). O GSM fornece uma tecnologia de acesso bidirecional e sem fio, conectando o usuário ao provedor do serviço. A rede *wireless* GSM pode formar um canal de interatividade completo ou ser complementado por alguma infra-estrutura disponível, como a RDSI, implementando um trajeto de transmissão completo.

O emprego de canais de comunicação de dados da telefonia celular (tanto para o padrão GSM quanto para o CDMA) no serviço de canal de interatividade é uma proposta recente (CARVALHO; ALENCAR, 2005b), que pode fazer uso da estrutura de torres e antenas de transmissão das estações radiobase. A Finlândia já oferece alguns serviços interativos baseados em SMS (CPQD, 2005). As estações radiobase cobrem áreas de concessão para o serviço móvel celular (SMC)

e serviço móvel pessoal (SMP), regulamentados pela Anatel. Uma cooperação entre as operadoras de televisão digital (serviço ainda a ser regulamentado pela Anatel) e as operadoras do SMC e SMP teria que ser estabelecida, com a criação de regras de convivência e repartição financeira (MC/MCT/FINEP/FUNTTTEL, 2004b).

Contudo, com a evolução da telefonia celular para a terceira geração, passou-se a analisar a viabilidade de se transmitir o canal de retorno da televisão digital pela telefonia 3G. Tal proposta entra em sintonia com a tendência mundial de evolução para a terceira geração, que já está em curso na Europa e América e, em breve, deve ser iniciada no Brasil. O GSM, padrão de telefonia celular de segunda geração com o maior número de assinantes no planeta (GSMWORLD, 2006), está sendo gradativamente substituído pelo UMTS, enquanto que o CDMA, padrão concorrente do GSM em nível global, está migrando para a 3G por meio do CDMA 1xEV-DO e CDMA 1xEV-DV.

A.2 Redes *ad hoc*

Redes *ad hoc* são um tópico muito importante no cenário das comunicações sem fio, e são vistas como uma das chaves para os sistemas 3G. Inicialmente, as redes *ad hoc* foram projetadas para ser utilizadas em caso de catástrofes ou em aplicações militares, em que seria impossível manter uma rede fixa de apoio. Em uma rede *ad hoc*, os nós podem funcionar tanto como roteadores quanto como receptores, sem a necessidade de uma entidade central. Portanto, cada nó pode encaminhar pacotes, além de executar aplicações (XU et al., 2003), (XU; WALKE, 2001), (CHUNG, 2004).

Mas hoje, com o avanço dos dispositivos portáteis e da comunicação sem fio, as aplicações de redes *ad hoc* são muito mais abrangentes. Tecnologias como o *Bluetooth* permitem que dispositivos portáteis possam se comunicar e interagir entre si de forma espontânea.

A formação de redes *ad hoc* criaria um novo paradigma para a transmissão no canal de interatividade, visto que o modelo é ainda experimental, mas tem um grande potencial para atender ao serviço. A rede *ad hoc* pode ser formada com a instalação de equipamento de rede nos televisores digitais, que serviriam como nós. A questão a ser enfrentada é a montagem da rede, que dependeria da aquisição de aparelhos de forma relativamente uniforme, pela população, de maneira que o sistema tenha uma rede amplamente distribuída. Neste cenário, os aparelhos teriam um custo mais elevado. Alguns resultados de simulação que retratam tais hipóteses são apresentados em (HERBSTER et al., 2005), (JUNIOR et al., 2005).

A.3 RF intrabanda

A utilização do espectro de RF intrabanda envolve o emprego de diversas tecnologias de comunicação sem fio, dentre as quais se destacam (MC/MCT/FINEP/FUNTTEL, 2004b), (SANTOS et al., 2005):

- *Sistemas de Modulação*: Na camada física, diversas técnicas de modulação podem ser aplicadas; as técnicas mais comumente empregadas em sistemas correlatos, tais como o IEEE 802.11 (Wi-Fi) e IEEE 802.16 (WiMax), são o DSSS, o FHSS, o OFDM e o OFDMA. O emprego das técnicas OFDM/OFDMA para o canal de interatividade via RF intrabanda está alinhado com as propostas mais recentes em sistemas correlatos, principalmente da família IEEE 802.11 e 802.16; por isso, há uma preferência pelo emprego de OFDM e OFDMA como técnicas de comunicação sem fio para dados e sinais de tempo real pelos pesquisadores e fabricantes de sistemas de comunicação *wireless*.
- *Antenas Múltiplas*: O uso da tecnologia de antenas múltiplas possibilita o aumento da área de cobertura da estação radiobase e o emprego de um menor nível de potência nessas estações.
- *Códigos Corretores de Erros*: Os códigos espaço-temporais, utilizados no padrão IEEE 802.16, formam uma nova classe de códigos adequada à transmissão digital a altas taxas em canais sem fio.

Alguns artigos recentes analisam o emprego de radiofrequência como alternativa à transmissão do canal de retorno da televisão digital: (SANTOS et al., 2005), (BARBOSA et al., 2005).

A.3.1 O padrão europeu

O DVB-RCT (*Return Channel Terrestrial*) é um dos padrões especificados pelo DVB para a transmissão terrestre, tendo sido o último a ser equipado com canal de retorno. O DVB-RCT é capaz de fornecer serviços de interatividade utilizando a infra-estrutura da televisão digital terrestre, sendo baseado em um canal de interatividade que conecta os terminais do canal de retorno terrestre a um adaptador de rede interativo (REIMERS, 2005), (FARIA; SCALISE, 2001), (ETSI, 2002-03).

Uma antena simples é suficiente para receber os canais de interação direta e de difusão e para transmitir o canal de interatividade na direção reversa. Para permitir o acesso de múltiplos usuários, a banda de frequência VHF/UHF usada para o trajeto de transmissão reverso é particionado em subcanais no domínio da frequência e em *slots* no domínio do tempo.

O padrão DVB-RCT é uma solução que oferecerá suporte sem fio para aplicações em tempo real de serviços de interatividade, pelas seguintes razões (ETSI, 2002-03):

- Tem eficiência espectral, baixo custo e potência, além de fornecer múltiplo acesso via um sistema OFDM;
- Pode servir grandes áreas, até um raio de 65km, provendo uma capacidade típica de vários kbps, para cada receptor de TV;
- Suporta grandes picos de tráfego, pois foi especificamente projetado para processar até 20.000 curtas interações por segundo, em cada setor de cada célula;
- Pode ser implantado com pequenas células, para suprir redes densas de até 3,5 km de raio, provendo para o usuário uma capacidade de vários Mbps;
- Foi projetado para o uso em qualquer espaço ou espectro sub-utilizado nas Bandas III, IV e V sem interferência com os serviços analógicos e digitais de *broadcasting*;
- É um padrão capaz de servir aparelhos portáteis, levando interatividade a qualquer lugar onde o sinal DVB-T possa ser recebido;
- Não requer mais que 1W (30dBm) de potência de transmissão do terminal do usuário ou *set-top box* para a estação radiobase.

A.4 Telefonia fixa

A rede telefônica pública comutada, também conhecida por RTPC, é constituída pelo enlace do assinante (que compreende os terminais do assinante e suas respectivas linhas), pela rede local (formada pelas centrais em área urbana e seus entroncamentos) e pelas redes de longa distância (com suas centrais interurbanas e internacionais e seus respectivos entroncamentos).

A maioria das centrais de comutação já é totalmente digital. Os entroncamentos são constituídos de fibras ópticas ou enlace de microondas, que são capazes de dar vazão a uma grande quantidade de dados, sendo também em grande parte digitais. Geralmente, apenas o enlace do assinante ainda é analógico e utiliza par trançado na linha do assinante; dessa forma, o grande gargalo do sistema é o enlace do assinante. E é justamente neste ponto que tecnologias como o DSL podem ser utilizadas para uma maior taxa de transmissão de dados.

Há duas opções principais para se utilizar a infra-estrutura existente da rede telefônica pública comutada na transmissão de dados:

- Via conexão discada, utilizando o par de fios de cobre que liga o assinante até a central telefônica e uma placa de fax/modem;
- Via conexão ADSL, fazendo uso do mesmo par trançado que a opção anterior, uma placa de rede e um modem ADSL.

A.4.1 Tecnologia DSL

DSL (*Digital Subscriber Line*) é uma família de tecnologias de modem que utiliza os pares trançados das linhas telefônicas para transporte digital de dados a altas taxas, tais como multimídia e vídeo, para servir os assinantes. O termo xDSL refere-se a um número de formas DSL similares e ainda competidoras (DSLFORUM, 2006).

As tecnologias xDSL prometem entregar dados a altas taxas para locais dispersos, com modificações relativamente pequenas na infra-estrutura já existente das operadoras de serviços de telecomunicações. Exemplos de serviços xDSL são redes públicas de acesso ponto-a-ponto dedicadas sobre os fios de cobre de pares trançados no enlace do assinante, entre a central local do provedor de serviço de rede e o terminal fixo do assinante. A Coréia do Sul e o Japão já disponibilizaram seus canais de retorno por meio do ADSL (CPQD, 2005).

A.4.2 TV a cabo

As redes de TV a cabo são bastante difundidas em vários países; o emprego do canal de retorno habilita serviços interativos adicionais na atual infra-estrutura. Devido ao fato de que muitos usuários estão conectados ao mesmo cabo coaxial, diversos consumidores podem dividir a largura de banda disponível.

Neste contexto, o projeto DVB desenvolveu um padrão de canal de retorno por meio de cabo. O DVB-Return Channel for Cable (ou DVB-RCC) consiste em um trajeto direto na direção de *downstream* e em um trajeto reverso na direção de *upstream*, ambos interativos, que são adicionados ao sistema de difusão existente.

Com o canal de difusão dedicado à recepção dos programas televisivos, o *set-top box* (ou, em um futuro próximo, os novos aparelhos de televisão digital) pode estabelecer conexões adicionais para explorar os serviços interativos. Esses dois tipos de sistemas podem coexistir na mesma rede, com a ressalva de que diferentes faixas de frequência sejam empregadas para cada sistema (REIMERS, 2005).

Apêndice B

Modelo de transmissão

O padrão de comportamento da curva da taxa de transmissão $R(n)$ versus comprimento do arquivo n indica a possibilidade de modelamento por uma equação do tipo

$$R(n) = f(n, P_f), \quad (\text{B.1})$$

em que P_f é a probabilidade de erro do quadro (*frame*) transmitido no canal. Visto que a taxa cresce naturalmente com o incremento na dimensão do quadro, mas deve ser controlada pela probabilidade de erro, pode-se supor uma simplificação da forma:

$$R(n) = g(n) \cdot h(P_f), \quad (\text{B.2})$$

em que $g(n)$ pode ser pensada como uma função linear de n , do tipo

$$g(n) = K_G \cdot n \quad (\text{B.3})$$

e $h(P_f)$ é função da probabilidade de erro do quadro, que pode ser modelada como $h(P_f) = f(1 - P_f)$, em que $f(\cdot)$ é uma função a ser definida.

A probabilidade de erro do pacote, ou probabilidade de retransmissão, assumindo que não haja codificação e que os símbolos tenham distribuição uniforme, é dada por

$$P_f = 1 - (1 - \epsilon)^n, \quad (\text{B.4})$$

em que ϵ é a probabilidade de erro de bit.

Essa fórmula pode ser simplificada, assumindo que a probabilidade de erro de bit seja pequena, para

$$P_f \simeq n\epsilon. \quad (\text{B.5})$$

A Fórmula B.2 fica, então,

$$R(n) = K_G n h(1 - n\epsilon). \quad (\text{B.6})$$

Uma primeira aproximação para completar a fórmula seria considerar que a taxa de transmissão tivesse uma relação linear com $h(\cdot)$. Uma possibilidade seria

$$h(n) = K_H [1 - n\epsilon], \quad (\text{B.7})$$

que resulta em uma constante, para uma probabilidade de erro nula, e em zero para uma probabilidade de erro de pacote igual a 1, o que é coerente para uma primeira aproximação.

A Fórmula B.6 resulta em

$$R(n) = K n (1 - n\epsilon), \quad (\text{B.8})$$

em que $K = K_G K_H$.

Essa fórmula captura duas características do gráfico de $R(n)$: crescimento quase linear para pequenos valores de n e taxa decrescente para elevada probabilidade de erro do canal PLC. Além disso, permite um cálculo simples para o comprimento ótimo do arquivo na transmissão, bastando para isso derivar a Equação B.8 e igualar a zero:

$$\frac{dR(n)}{dn} = K[(1 - n\epsilon) + n(-\epsilon)] = 0, \quad (\text{B.9})$$

resultando em $n^* = \frac{1}{2\epsilon}$.

Uma alternativa a essa dedução pode ser obtida lembrando que é possível aproximar, para $n\epsilon < 1$:

$$e^{-n\epsilon} \simeq 1 - n\epsilon. \quad (\text{B.10})$$

Fazendo essa substituição em B.8, tem-se que

$$R(n) = K n e^{-n\epsilon}. \quad (\text{B.11})$$

O comprimento que produz a máxima taxa de transmissão no canal PLC é obtido, como descrito anteriormente, a partir de:

$$\frac{dR(n)}{dn} = K[e^{-n\epsilon} + n(-\epsilon e^{-n\epsilon})] = 0, \quad (\text{B.12})$$

Fazendo as simplificações e resolvendo a equação resultante, obtém-se $n^* = \frac{1}{\epsilon}$, que novamente é uma função inversa da probabilidade de erro de bit.

Uma terceira suposição pode ser tomada a partir da Equação B.11; sabendo que, para pequenos valores de x , o termo $\sin x$ pode ser aproximado para o próprio valor de x , ou seja, $\sin x \simeq x$, chega-se a

$$R(n) = K(\sin n)e^{-n\epsilon}. \quad (\text{B.13})$$

Derivando, tem-se que:

$$\frac{dR(n)}{dn} = K[\cos(n)e^{-n\epsilon} - \sin(n)\epsilon e^{-n\epsilon}] = 0, \quad (\text{B.14})$$

Daí, resulta que $\cos(n) - \sin(n)\epsilon = 0$, ou seja, $\frac{\sin(n)}{\cos(n)} = \frac{1}{\epsilon}$, o que leva a um valor ótimo em $n^* = \arctan \frac{1}{\epsilon}$.

O valor de K_G pode ser obtido diretamente do gráfico (como a partir da inclinação da curva), para pequenos valores de n , e situa-se no intervalo 4 a 9,3. O valor de K pode ser então inferido, para o ajuste da fórmula ao caso em estudo.

Uma análise detalhada do problema pode fornecer informações adicionais, para permitir uma formulação mais precisa. O gráfico apresentado na Figura B.1 mostra uma primeira aproximação para as fórmulas obtidas em B.8, B.11 e B.13, mas que ainda necessitam de ajustes para uma melhor adequação às curvas obtidas experimentalmente.

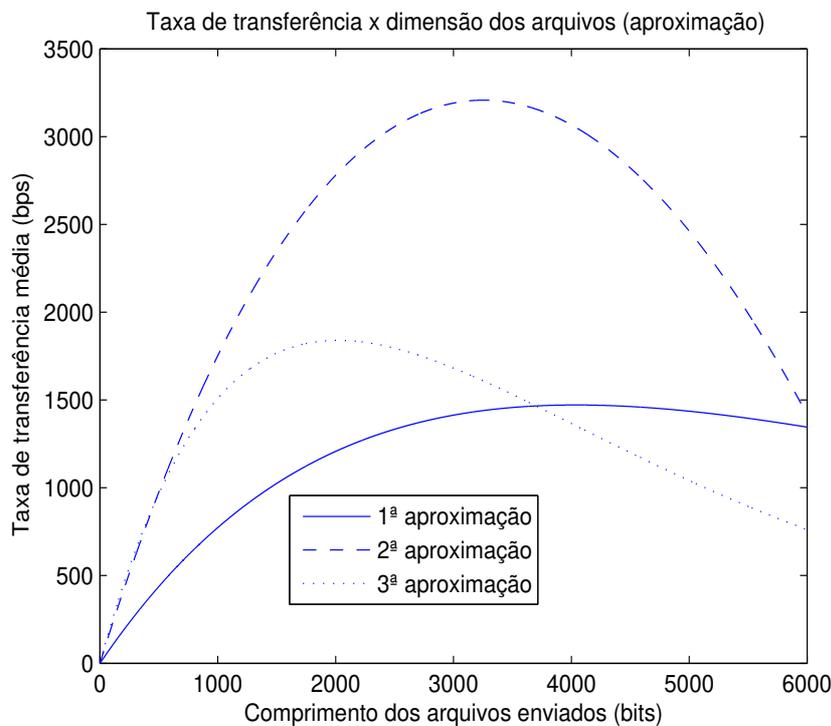


Figura B.1: Aproximação a partir das fórmulas B.8, B.11 e B.13.

A comparação inicial entre as aproximações obtidas por intermédio deste modelo e as curvas experimentais medidas na realização dos testes (na situação com cargas) é apresentada na Figura B.2. Observa-se que as aproximações, embora necessitem de uma melhor adequação, apresentam curvas próximas às obtidas experimentalmente nas residências.

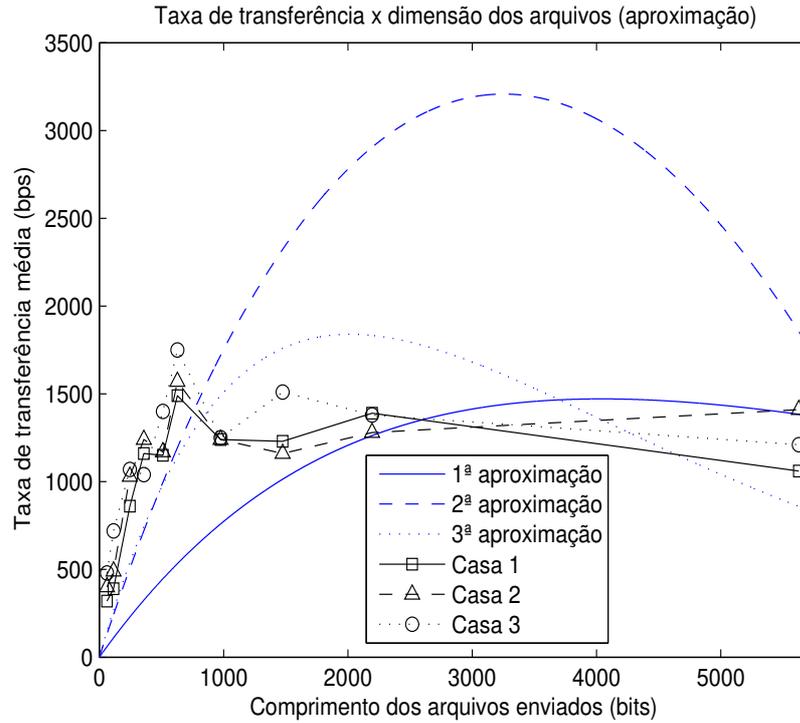


Figura B.2: Comparação entre os resultados obtidos experimentalmente (com cargas conectadas nos ambientes) e as aproximações do modelo.

A partir da Fórmula B.13, pode-se inferir que a resposta do canal, em termos da taxa de transmissão, é descrita por uma equação diferencial com condições de contorno

$$R''(n) + \alpha R'(n) + \beta R(n) = \Gamma, \quad (B.15)$$

em que $R'(0) = K$, taxa inicial de crescimento, e $R(0) = 0$. A máxima taxa de transmissão, ou capacidade do canal, é dada por $R'(n^*) = C$, em que n^* é o comprimento do arquivo que atinge a capacidade.

Substituindo os valores de contorno em B.15, obtém-se

$$R''(0) + \alpha K = \Gamma, \quad (B.16)$$

ou seja,

$$R''(0) = \Gamma - \alpha K. \quad (B.17)$$

A solução para a Equação B.15, com as condições de contorno fornecidas, é

$$R(n) = \Gamma - \left(\frac{K}{\sqrt{\alpha^2 - 4\beta}} \right) e^{\left(\frac{\alpha - \sqrt{\alpha^2 - 4\beta}}{2} \right) n} + \left(\frac{K}{\sqrt{\alpha^2 - 4\beta}} \right) e^{\left(\frac{\alpha + \sqrt{\alpha^2 - 4\beta}}{2} \right) n}. \quad (\text{B.18})$$

Uma equação de diferença também pode ser montada (GABEL; ROBERTS, 1973), para refletir a natureza discreta do processo:

$$R(n + 2) + \alpha R(n + 1) + \beta R(n) = \Gamma, \quad (\text{B.19})$$

considerando o comprimento do pacote discreto.

Apêndice C

Publicações em congressos

- CARVALHO, F. B. S.; ALENCAR, M. S. "Proposta de utilização da Telefonia Celular de 3ª geração (UMTS) na Transmissão do Canal de Retorno da TV Digital". *4th International Information and Telecommunication Technologies Symposium - I2TS'2005*, Florianópolis-SC, dezembro de 2005.
- HERBSTER, A. F.; CARVALHO, F. B. S.; ALENCAR, M. S. "Utilização do Padrão IEEE 802.16 em Redes Ad Hoc como meio de transmissão do Canal de Retorno da TV Digital Interativa". *XI Simpósio Brasileiro de Sistemas Multimídia e Web - WebMedia 2005*, Poços de Caldas-MG, dezembro de 2005.
- VALDESTILHAS, A.; ALMEIDA, F. F.; CARVALHO, F. B. S.; ALENCAR, M. S. "Uma Abordagem sobre Desenvolvimento para Televisão Digital Interativa: Novos Conceitos e Ferramentas". *XI Simpósio Brasileiro de Sistemas Multimídia e Web - WebMedia 2005*, Poços de Caldas-MG, dezembro de 2005.
- SANTOS, D. F. S.; SILVA, E. F.; CARVALHO, F. B. S.; ALENCAR, M. S. "Solução RF-Intrabanda para o Canal de Interatividade do Sistema Brasileiro de Televisão Digital". *Workshop de TV Digital e Interativa - Sibgrapi 2005*, Natal-RN, outubro de 2005.
- CARVALHO, F. B. S.; CASTRO, E. R. S.; ALENCAR, M. S.; ALBERT, B. B.; FARIAS, J. E. P. "Utilização da Plataforma de Simulação PTOLEMY no Ensino da Disciplina Laboratório de Princípios de Comunicações". *XXXIII Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia - COBENGE 2005*, Campina Grande-PB, setembro de 2005.
- CARVALHO, F. B. S.; CASTRO, E. R. S.; BRAZ, E. F.; ALENCAR, M. S. "Avaliação da Qualidade da Transmissão para o Canal de Interatividade da TV Digital utilizando

Power Line Communications". *XXII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações - SBrT'05*, Campinas-SP, setembro de 2005.

- CARVALHO, F. B. S.; ALENCAR, M. S. "Análise da transmissão do canal de retorno do Sistema Brasileiro de TV Digital via Power Line Communications". *III Fórum de Oportunidades em Televisão Digital Interativa - TVDI 2005*, Poços de Caldas-MG, 20 de maio de 2005.
- FARIAS, M. A.; ALENCAR, M. S.; ROSAS, R. J.; ARAÚJO, I. A. C.; CARVALHO, V. B.; ARAÚJO, T. R. M.; CAVALCANTE, A. A.; CARVALHO, F. B. S. "Avaliação da Imunidade Humoral em ratos submetidos à Radiação Eletromagnética não-ionizante". *III Congresso Latino-Americano de Engenharia Biomédica*, João Pessoa-PB, setembro de 2004.

Referências Bibliográficas

ALENCAR, M. S. *Telefonia Celular Digital*. 1ª. ed. Brasil: Editora Érica, 2004.

ARIB. Disponível em <http://www.arib.or.jp>, acessado em Fevereiro, 2006.

ASAMI, H.; SASAKI, M. "Outline of ISDB Systems". *IEEE Proceedings*, v. 94, p. 248–250, January 2006.

ASCOM. Disponível em <http://www.ascom.com>, acessado em Fevereiro, 2006.

ASOKA. Disponível em <http://www.asokausa.com>, acessado em Fevereiro, 2006.

ATSC. Disponível em <http://www.atsc.org>, acessado em Fevereiro, 2006.

BARBOSA, L. M. J.; GONÇALVES, J. V.; MORAIS, E.; MOREIRA, R. B.; SONNTAG, R. H.; MELONI, L. G. P.; BUDRI, A. K. "Uma proposta de canal de interatividade para o SBTVD através de comunicação sem fio em RF intrabanda". *Workshop de TV Digital e Interativa - Sibgrapi 2005*, Natal-RN, Outubro, 2005.

CARVALHO, F. B. S.; ALENCAR, M. S. "Análise da transmissão do canal de retorno do Sistema Brasileiro de TV Digital via Power Line Communications". *III Fórum de Oportunidades em Televisão Digital Interativa - TVDI 2005*, PUC Minas, Poços de Caldas-MG, Maio, 2005.

CARVALHO, F. B. S.; ALENCAR, M. S. "Proposta de utilização da Telefonia Celular de 3ª geração (UMTS) na Transmissão do Canal de Retorno da TV Digital". *4th International Information and Telecommunication Technologies Symposium - I2TS'2005*, Florianópolis-SC, Dezembro, 2005.

CARVALHO, F. B. S.; CASTRO, E. R. S.; BRAZ, E. F.; ALENCAR, M. S. "Avaliação da Qualidade da Transmissão para o Canal de Interatividade da TV Digital utilizando Power Line Communications". *XXII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações - SBrT'05*, p. 1153–1158, Campinas-SP, Setembro, 2005.

CENELEC. *Comité Européen de Normalisation Electrotechnique*. Disponível em <http://www.cenelec.org>, acessado em Fevereiro, 2006.

CHESF. *Companhia Hidro-Elétrica do São Francisco*. Disponível em <http://www.chesf.gov.br>, acessado em Fevereiro, 2006.

CHUNG, W. "Probabilistic Analysis of Routes on Mobile Ad Hoc Networks". *IEEE Communications Letters*, v. 8, p. 506–508, August 2004.

CPQD. *Panorama Mundial de Modelos de Exploração e Implantação*. CPqD Telecom e IT Solutions: Campinas-SP, 2005.

CRINON, R. J.; BHAT, D.; CATAPANO, D.; THOMAS, G.; LOO, J. T. V.; BANG, G. "Data Broadcasting and Interactive Television". *IEEE Proceedings*, v. 94, p. 102–118, January 2006.

DASE. ATSC Standard. "DTV Application Software Environment Level 1 (DASE-1) - PART 1: Introduction, Architecture, and common facilities". [S.l.: s.n.], 2003.

DSLFORUM. Disponível em <http://www.dslforum.org>, acessado em Fevereiro, 2006.

DVB. Disponível em <http://www.dvb.org>, acessado em Fevereiro, 2006.

ETSI. European Standard (EN) 301 195 v1.1.1. *Digital Video Broadcasting (DVB); Interaction channel through the Global System for Mobile Communications (GSM)*. [S.l.: s.n.], 1999.

ETSI. European Telecommunications Standard Institute, ETSI EN 301 958, v. 1.1.1. *Digital Video Broadcasting (DVB): Interaction channel for Digital Terrestrial Television (RCT) incorporating Multiple Access OFDM*. [S.l.: s.n.], 2002–03.

FARIA, G.; HENRIKSSON, J. A.; STARE, E.; TALMOLA, P. "DVB-H Digital Broadcast Services to Handheld Devices". *IEEE Proceedings*, v. 94, p. 194–209, January 2006.

FARIA, G.; SCALISE, F. *DVB-RCT: A Standard for Interactive DVB-T*. [S.l.]: Harris Broadcast Communication, 2001.

FERNANDES, J.; LEMOS, G.; SILVEIRA, G. E. "Introdução à Televisão Digital Interativa: Arquitetura, Protocolos, Padrões e Práticas". *XXIII Jornada de Atualização em Informática do XXIV Congresso da Sociedade Brasileira de Computação (JAI-SBC)*, 2004.

FERREIRA, H. C.; GROVÉ, H. M.; HOOIJEN, O.; VINCK, A. J. H. "Power Line Communications: An Overview". *IEEE AFRICON 4th*, v. 2, p. 558–563, September 1996.

GABEL, R. A.; ROBERTS, R. A. *Signals and Linear Systems*. 2nd. ed. [S.l.]: John Wiley and Sons, 1973.

GRACIOSA, H. M. M. *Tutorial TV Digital no Brasil*. Disponível em <http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialtd2/default.asp>, acessado em Fevereiro, 2006.

GSMWORLD. Disponível em <http://www.gsmworld.com>, acessado em Fevereiro, 2006.

HDTV. Disponível em <http://www.hdtv.net>, acessado em Fevereiro, 2006.

HERBSTER, A. F.; CARVALHO, F. B. S.; ALENCAR, M. S. “Utilização do Padrão IEEE 802.16 em Redes Ad Hoc como meio de transmissão do Canal de Retorno da TV Digital Interativa”. *XI Simpósio Brasileiro de Sistemas Multimídia e Web - WebMedia 2005*, p. 187–194, Poços de Caldas-MG, Dezembro, 2005.

HOMEPLUG. Disponível em <http://www.homeplug.org>, acessado em Fevereiro, 2006.

HRASNICA, H.; HAIDINE, A.; LEHNERT, R. *Broadband Powerline Communications Networks*. 1st. ed. [S.l.]: John Wiley and Sons, 2004.

IBGE. *Síntese de Indicadores Sociais 2004*. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Rio de Janeiro: [s.n.], 2005.

INTELPRIMA. *PLC: Comunicação através da rede elétrica*. Disponível em <http://www.intelprima.com/produtos/plc/nplc.htm>, acessado em Fevereiro, 2006.

ITOH, N.; TSUCHIDA, K. “HDTV Mobile Reception in Automobiles”. *IEEE Proceedings*, v. 94, p. 274–280, January 2006.

JONES, G. A.; DEFILIPPIS, J. M.; HOFFMANN, H.; WILLIAMS, E. A. “Digital television station and network implementation”. *IEEE Proceedings*, v. 94, p. 22–36, January 2006.

JUNIOR, A. A.; MORAES, I. M.; CUNHA, D. O.; CAMPISTA, M. E. M.; ESPOSITO, P. M.; COSTA, L. H. M. K.; DUARTE, O. C. M. B. “Uma Análise da Conectividade do Canal de Interatividade Ad Hoc para a TV Digital”. *XXII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações - SBrT'05*, p. 1147–1152, Campinas-SP, Setembro, 2005.

JUNIOR, F. M. B. “Projeto e Avaliação de Dicionários para Quantização Vetorial de Voz e Imagem”. Tese de doutorado. UFPB, Campina Grande-PB: [s.n.], 2001.

LEON-GARCIA, A.; WIDJAJA, I. *Communication Networks*. 1st. ed. [S.l.]: McGraw-Hill, 2000.

MAJUMDER, A.; CAFFREY, J. "Power Line Communications: An Overview". *IEEE Potentials*, v. 23, p. 4–13, October/November 2004.

MANHÃES, M. A. R.; SHIEH, P. J. "Canal de Interatividade: Conceitos, Potencialidades e Compromissos". *Workshop de TV Digital e Interativa - Sibgrapi 2005*, Natal-RN, Outubro, 2005.

MARKARIAN, G.; HUO, X. "Distribution of Digital TV Signals over Home Power Line Networks". *International Symposium on Power Line Communications and its Applications - ISPLC*, p. 409–413, April 2005.

MC/MCT/FINEP/FUNTTTEL. Carta Convite MC/MCT/FINEP/FUNTTTEL - N° 04/2004. *Formulário de Descrição de Atendimento de Requisitos - Middleware*. [S.l.: s.n.], 2004.

MC/MCT/FINEP/FUNTTTEL. Anexo à Carta Convite MC/MCT/FINEP/FUNTTTEL - N° 14/2004. *Requisição Formal de Proposta (RFP) N° 14/2004 - Canal de Interatividade*. [S.l.: s.n.], 2004.

MENG, H.; GUAN, Y. L.; CHEN, S. "Modeling and Analysis of Noise Effects on Broadband Power-Line Communications". *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 20, n. 2, April 2005.

MHP. Disponível em <http://www.mhp.org>, acessado em Fevereiro, 2006.

MOREIRA, R. A. *Televisão Digital e a Interatividade*. Disponível em <http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialinteratividade/default.asp>, acessado em Fevereiro, 2006.

NETO, J. P. L. Relatório de Estágio. *Estágio realizado no Laboratório de Comunicações da Universidade de Ehime - Japão*. Campina Grande: [s.n.], 2003.

OPERA. *Open PLC European Research Alliance*. Disponível em <http://www.ist-opera.com>, acessado em Fevereiro, 2006.

PAVLIDOU, N.; VINCK, A. J. H.; YAZDANI, J.; HONARY, B. "Power Line Communications: State of the Art and Future Trends". *IEEE Communications Magazine*, v. 23, p. 34–40, April 2003.

PIESING, J. "The DVB Multimedia Home Platform (MHP) and Related Specifications". *IEEE Proceedings*, v. 94, p. 237–247, January 2006.

PLC-J. Disponível em <http://www.plc-j.org>, acessado em Fevereiro, 2006.

PLCFORUM. Disponível em <http://www.plcforum.org>, acessado em Fevereiro, 2006.

POYNTON, C. *“Digital Video and HDTV - Algorithms and Interfaces”*. 5th. ed. [S.l.]: Morgan Kaufmann, 2003.

REIMERS, U. *DVB - The Family of International Standards for Digital Video Broadcasting*. 2nd. ed. [S.l.]: Springer, 2005.

RESENDE, L. E. A. *“Desenvolvimento de uma ferramenta de análise de desempenho para o padrão de TV Digital ISDB-T”*. Dissertação de Mestrado. PUC-RJ, Rio de Janeiro-RJ: [s.n.], 2004.

RIBEIRO, M. V. *Técnicas de Processamento de Sinais Aplicadas à Transmissão de Dados via Rede Elétrica e ao Monitoramento da Qualidade de Energia*. Tese de doutorado. Unicamp, Campinas-SP: [s.n.], 2005.

RICHER, M. S.; REITMEIER, G.; GURLEY, T.; JONES, G. A.; WHITAKER, J.; RAST, R. “The ATSC Digital Television System”. *IEEE Proceedings*, v. 94, p. 37–43, January 2006.

RTI. *Aplicações com PLC para transmissão de voz, dados e imagem*. [S.l.]: Revista *Redes, Telecom e Instalações*, v.63, p.34-41. Aranda Editora, Agosto, 2005.

RTI. *Barreirinhas recebe projeto piloto de PLC*. [S.l.]: Revista *Redes, Telecom e Instalações*, v.63, p.66-71. Aranda Editora, Agosto, 2005.

SANTOS, D. F. S.; SILVA, E. F.; CARVALHO, F. B. S.; ALENCAR, M. S. “Solução RF-Intrabanda para o Canal de Interatividade do Sistema Brasileiro de Televisão Digital”. *Workshop de TV Digital e Interativa - Sibgrapi 2005*, Natal-RN, Outubro, 2005.

TAKADA, M.; SAITO, M. “Transmission System for ISDB-T”. *IEEE Proceedings*, v. 94, p. 251–256, January 2006.

TANENBAUM, A. S. *Computer Networks*. 3rd. ed. [S.l.]: Prentice Hall, 1996.

TELECO. Disponível em <http://www.teleco.com.br>, acessado em Fevereiro, 2006.

TUDE, E. *Tutorial UMTS*. Disponível em <http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialwcdma/default.asp>, acessado em Fevereiro, 2006.

VALDESTILHAS, A.; ALMEIDA, F. A.; CARVALHO, F. B. S.; ALENCAR, M. S. “Uma Abordagem sobre Desenvolvimento para Televisão Digital Interativa: Novos Conceitos e Ferramentas”. *XI Simpósio Brasileiro de Sistemas Multimídia e Web - WebMedia 2005*, p. 313–318, Poços de Caldas-MG, Dezembro, 2005.

VIDAL, A. M. *Power Line Communications - Comunicação em Banda Larga via Rede Elétrica*. Disponível em <http://eel.ufsc.br/gpqcom/vidal/plc>, acessado em Fevereiro, 2006.

XU, B.; WALKE, B. "On the Mac Performance of Self-Organizing Broadband Multihop Multimedia Wireless Networks". *Vehicular Technology Conference 2001 - IEEE VTS 54th*, v. 2, p. 982–986, October 2001.

XU, B.; WALKE, B.; HISCHKE, S. "The Role of Ad hoc Networking in Future Wireless Communications". *Communication Technology Proceedings - ICCT 2003*, v. 2, p. 1353–1358, April 2003.

ZUFFO, M. K. *TV Digital aberta no Brasil - Políticas estruturais para um modelo nacional*. Disponível em <http://www.lsi.usp.br/~mkzuffo>, acessado em Fevereiro, 2006.