

ALEXANDRE DE MOURA VIDAL

**ESTUDO DO ESTADO DA ARTE E ANÁLISE DE
DESEMPENHO DE SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO
PLC DE BANDA LARGA**

FLORIANÓPOLIS

2005

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ESTUDO DO ESTADO DA ARTE E ANÁLISE DE
DESEMPENHO DE SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO
PLC DE BANDA LARGA

Dissertação submetida à
Universidade Federal de Santa Catarina
como parte dos requisitos para a
obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica

ALEXANDRE DE MOURA VIDAL

Florianópolis, dezembro de 2005

**ESTUDO DO ESTADO DA ARTE E ANÁLISE DE
DESEMPENHO DE SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO
PLC DE BANDA LARGA**

Alexandre de Moura Vidal

‘Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em *Comunicações e Processamento de Sinais*, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina’

Carlos Aurélio Faria da Rocha, D.Sc.
Orientador

Alexandre Trofino Neto, Dr.
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora:

Carlos Aurélio Faria da Rocha, D.Sc.
Presidente

Adroaldo Raizer, Dr.

Bartolomeu Ferreira Uchôa Filho, Ph.D.

Leonardo da Silva Resende, Dr.

Resumo da Dissertação apresentada à UFSC como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica

ESTUDO DO ESTADO DA ARTE E ANÁLISE DE DESEMPENHO DE SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO PLC DE BANDA LARGA

Alexandre de Moura Vidal

Dezembro/2005

Orientador: Carlos Aurélio Faria da Rocha, D.Sc.

Área de Concentração: Comunicações e Processamento de Sinais

Palavras-Chaves: PLC, BPL, OFDM

Número de Páginas: 98

RESUMO: Este trabalho apresenta um estudo sobre a utilização das redes de transmissão e de distribuição de energia elétrica para a prestação de serviços de telecomunicações, através do uso da tecnologia PLC (*Powerline Communications*). As principais características destas estruturas, quando utilizadas como um canal de comunicação, são tratadas com especial atenção aos fenômenos de propagação de sinais e às interferências presentes nas mesmas. Como potencial solução para superar as condições adversas apresentadas pelo canal PLC é apresentado o método de modulação OFDM. Considerando a carência de trabalhos práticos com foco neste tema no Brasil, o texto apresenta resultados de experimentos efetuados no sentido de caracterizar três tipos de topologias elétricas *In-Home* tipicamente encontradas no Brasil. Os experimentos realizados mostram ainda o impacto de diferentes tipos de cargas comumente encontradas nas redes elétricas de instalações residenciais, comerciais e industriais brasileiras. Por fim, o estudo mostra uma comparação de desempenho entre o sistema PLC utilizado e as quatro principais soluções atualmente adotadas para a composição de redes de dados locais.

Abstract of Dissertation presented to UFSC as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Electrical Engineering

**STATE OF THE ART AND PERFORMANCE
ANALISYS OF BROADBAND PLC COMMUNICATION
SYSTEMS**

Alexandre de Moura Vidal

December/2005

Advisor: Carlos Aurélio Faria da Rocha, D.Sc.

Area of Concentration: Comunicações e Processamento de Sinais

Keywords: PLC, BPL, OFDM

Number of Pages: 98

ABSTRACT: This work is about the possibility of using both the transmission and distribution electricity networks to provide telecommunication services, based on PLC (Powerline Communications) technology. The most representative characteristics of those structures when considered as a communication channel are investigated, having a special attention to some signal propagation phenomena and interference present in those networks. As a potential solution for the harsh environment presented by the PLC channel, the OFDM modulation scheme is presented. Considering the lack of practical studies focusing on this subject in Brazil, this dissertation presents results of experiments done in order to evaluate the behavior of three different typical Brazilian In-Home electrical grids. Measurements have been made which show the impact of different loads usually connected to Brazilian residential, campuses and industrial grids. Additionally, the study shows a comparison among the used PLC system and all the four main solutions that have been deployed to implement local area networks.

Glossário

AMR – *Automatic Meter Reading* (Leitura Automática de Medidores)

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

PLC – *Powerline Communications*

BPL – *Broadband over Powerlines*

BER – *Bit Error Rate* (Probabilidade de Erro de Bit)

SNR – *Signal-to-Noise Ratio* (Razão Sinal Ruído)

PSD – *Power Spectral Density* (Densidade Espectral de Potência)

QGBT – Quadro Geral de Baixa Tensão

QM – Quadr de Medição

QDP – Quadro de Distribuição Primário

QDU – Quadro de Distribuição da Unidade Consumidora

F_x – Condutor de Fase da Instalação (F₁, F₂ ou F₃)

N – Condutor de Neutro da Instalação

T – Condutor de Aterramento da Instalação

LAN – Local Area Network

WLAN – Wireless Local Area Network

Sumário

1. Introdução	1
1.1. Powerline Communications	1
1.2. Objetivos da Dissertação	2
1.3. Estrutura do Texto	3
2. Powerline Communications	4
2.1. Introdução	4
2.2. Aspectos Motivadores	5
2.2.1. Características Intrínsecas das Redes Elétricas	6
2.2.2. Desregulamentação do Setor de Energia Elétrica	6
2.2.3. Carência de Serviços de Banda-Larga	7
2.2.4. Aspectos Sociais e a Inclusão Digital	8
2.2.5. Estímulo a Competição	8
2.3. Breve Histórico	8
2.3.1. As Primeiras Implementações	9
2.3.2. Os Primeiros Sistemas PLC Digitais	9
2.3.3. Avanços Tecnológicos Recentes	9
2.3.4. A Próxima Geração de Equipamentos PLC	11
2.4. Topologias e Aplicações Típicas	11
2.4.1. Topologia PLC <i>In-Home</i>	12
2.4.2. Topologia PLC para Acesso na Última Milha	13
2.4.3. Topologia PLC para Acesso WAN	14
2.4.4. Outras Topologias PLC	17
2.5. Experiências no Brasil	17
2.6. Conclusões	21
3. Características da Rede Elétrica como um Canal para Comunicação	22
3.1. Introdução	22
3.2. Sistemas de Comunicação Digital	22
3.2.1. Modelo de Sistema	22
3.2.1.1. Fonte de Informação	23
3.2.1.2. Codificação e Decodificação da Fonte	23
3.2.1.3. Codificação e Decodificação do Canal	24
3.2.1.4. Modulação e Desmodulação	24
3.2.1.5. Canal de Comunicação	25

3.3. Sistemas de Energia Elétrica	25
3.3.1. Nível de Transmissão	26
3.3.2. Nível de Sub-Transmissão	26
3.3.3. Nível de Distribuição	26
3.3.3.1. Nível de Tensão Primária de Distribuição	26
3.3.3.2. Nível de Tensão Secundária de Distribuição	27
3.4. Utilização para Fins de Telecomunicações	28
3.4.1. Níveis de Transmissão e Sub-Transmissão	28
3.4.2. Níveis de Distribuição Primária e Secundária	28
3.5. As Redes Elétricas como um Canal para Comunicação	29
3.5.1. Atenuação	30
3.5.1.1. Perdas Ôhmicas	30
3.5.1.2. Correntes de Fuga	30
3.5.1.3. Efeito Corona	31
3.5.1.4. Elementos da Rede	31
3.5.2. Interferências	32
3.5.2.1. Ruído Colorido de Fundo	33
3.5.2.2. Ruído de Faixa Estreita	33
3.5.2.3. Ruído Impulsivo Periódico - assíncrono com a frequência da rede	33
3.5.2.4. Ruído Impulsivo Periódico - síncrono com a frequência da rede	33
3.5.2.5. Ruído Impulsivo Assíncrono	34
3.5.2.6. Caracterizando os Tipos de Interferências	35
3.5.3. Multipercurso no Canal PLC	36
3.5.3.1. Acoplamento do Sinal PLC	36
3.5.3.2. Impedância de Acesso ao Meio	37
3.5.3.3. Estudo de Caso com Propagação por Multipercursos	38
3.5.3.4. Desvanecimento Seletivo em Frequência	40
3.5.4. Modelo de Canal PLC	41
3.6. Conclusões	42
4. OFDM	44
4.1. Introdução	44
4.2. Histórico	45
4.3. Aplicações	46
4.3.1. DAB – Digital Audio Broadcasting	47
4.3.2. DVB – Digital Video Broadcasting	48
4.3.3. WLAN – Wireless Local Area Networks	49
4.3.3.1. HiperLAN/2	50

4.3.3.2. IEEE 802.11	51
4.4. Princípios Básicos da Modulação OFDM	52
4.4.1. O Princípio da Ortogonalidade	53
4.4.1.1. Domínio do Tempo (Sinais Contínuos)	54
4.4.1.2. Domínio do Tempo (Sinais Discretos)	55
4.4.1.3. Domínio da Frequência	56
4.4.1.4. O Conceito de Ortogonalidade e as Sub-Portadoras OFDM	56
4.4.2. Geração dos Sinais OFDM	59
4.4.2.1. A Utilização da FFT nos Sistemas OFDM	61
4.4.3. A Implementação de um Sistema OFDM	62
4.4.3.1. Conversão Série / Paralelo	63
4.4.3.2. Modulação para as Sub-Portadoras	64
4.4.3.3. Cálculo da IFFT	65
4.4.3.4. Inserção do Prefixo Cíclico (CP)	65
4.4.3.5. Receptor OFDM	69
4.5. Conclusões	69
5. Desempenho de Sistemas PLC de Banda Larga em Redes <i>In-Home</i>	70
5.1. Introdução	70
5.2. Tecnologia PLC Utilizada	70
5.2.1. Equipamentos PLC	70
5.2.2. Especificações Técnicas dos Equipamentos PLC	72
5.2.3. Faixas de Frequências Utilizadas	72
5.2.4. Adaptabilidade às Condições do Canal	73
5.3. Metodologia Utilizada nos Experimentos	73
5.3.1. Topologia PLC Empregada	74
5.3.2. Definição dos Cenários	74
5.3.2.1. Cenário Residencial	74
5.3.2.2. Cenário Comercial	78
5.3.2.3. Cenário Industrial	80
5.3.3. Considerações Sobre as Sazonalidades dos Cenários	83
5.3.3.1. Sazonalidades – Cenário Residencial	84
5.3.3.2. Sazonalidades – Cenário Comercial	85
5.3.3.3. Sazonalidades – Cenário Industrial	86
5.3.3.4. Análise das Sazonalidades para os Cenários	87
5.3.4. Aquisição de Dados e Interação com os Equipamentos PLC	88
5.3.5. Tratamento dos Dados Adquiridos	90
5.4. Apresentação dos Resultados dos Experimentos	90

5.4.1. Relação Sinal-Ruído (SNR)	90
5.4.2. Taxa de Transmissão em Camada Física	95
5.5. Conclusões	97
Conclusões Finais	99
Referências Bibliográficas	102
Referências na Internet	105

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Penetração de serviços de banda-larga nos dez países com maior disponibilidade.	7
Figura 2.2 - Topologia PLC <i>In-Home</i>	12
Figura 2.3 - MODEM PLC <i>In-Home</i> (Homeplug Standard).	12
Figura 2.4 - Topologia PLC do tipo celular.	13
Figura 2.5 - Topologia “clássica” de aplicação da tecnologia PLC.	15
Figura 2.6 - MODEM e Equipamento Primário PLC.	16
Figura 2.7 - Instalação do equipamento primário (Master) PLC.	18
Figura 2.8 - Detalhe do equipamento primário no abrigo metálico.	18
Figura 2.9 - Exemplo de acoplamento capacitivo em uma instalação <i>In-Home</i>	19
Figura 2.10 - Detalhe do acoplador capacitivo para redes de baixa tensão (até 1kV).	19
Figura 2.11 - MODEM PLC instalado em cliente residencial.	20
Figura 2.12 - MODEM PLC instalado no cliente comercial.	20
Figura 3.1 - Modelo de um sistema de comunicação digital.	23
Figura 3.2 - Circuitos em tensão primária e secundária de distribuição.	27
Figura 3.3 - Resposta em frequência de um disjuntor de 100A apresentando característica de filtro passa-baixas.	32
Figura 3.4 - Resposta em frequência de um disjuntor de 100A apresentando característica de filtro passa-altas.	32
Figura 3.5 - Forma de onda para ruído impulsivo concentrado.	34
Figura 3.6 - Forma de onda para ruído impulsivo distribuído.	34
Figura 3.7 - PSD para ruído impulsivo concentrado.	35
Figura 3.8 - PSD para ruído impulsivo distribuído.	35
Figura 3.9 - Sistema de comunicação digital aplicado ao canal PLC.	36
Figuras 3.10 e 3.11 - Acopladores PLC para diferentes níveis de tensão.	37
Figura 3.12 - Reflexões devido ao não-casamento de impedâncias.	38
Figura 3.13 - Incidência percentual dos distintos tipos de perdas.	39
Figura 3.14 - Desvanecimento seletivo em frequência devido ao multipercurso no canal.	40
Figura 3.15 - Modelo genérico para um canal de comunicação.	41
Figura 3.16 - Modelo para o canal PLC apresentando distintos tipos de ruído.	42
Figura 4.1 - Exemplo de sinais TDM.	55
Figura 4.2 - Ortogonalidade entre duas sub-portadoras OFDM.	58

Figura 4.3 - Resposta em frequência de um sinal OFDM com 5 sub-portadoras (normalizado)	59
Figura 4.4 - Envoltória do feixe OFDM para 5 sub-portadoras (normalizado)	59
Figura 4.5 - Modelo básico de um transmissor OFDM	60
Figura 4.6 - Diagrama de blocos para um transceptor OFDM	63
Figura 4.7 - Mapeamento de bits/símbolos segundo as técnicas 16-PSK e 16-QAM	64
Figura 4.8 - Estágio IFFT na geração do símbolo OFDM	65
Figura 4.9 - Redução do período de símbolo com o emprego da técnica OFDM	66
Figura 4.10 - Adição do Prefixo Cíclico (CP) a um símbolo OFDM	67
Figura 4.11 - Transmissão em um canal sem multipercurso	68
Figura 4.12 - Importância do CP em um canal com multipercurso	68
Figura 5.1 - MODEM PLC (cliente) instalado no cenário residencial	71
Figura 5.2 - Equipamento primário PLC (master) instalado no cenário residencial	71
Figura 5.3 - Vista externa do edifício representativo do cenário residencial	75
Figura 5.4 – Detalhes da entrada de serviço para o edifício utilizado (cenário residencial)	76
Figura 5.5 – Quadro de medição e prumada elétrica (cenário residencial)	76
Figura 5.6 – Diagrama elétrico unifilar de uma unidade consumidora (cenário residencial)	77
Figura 5.7 - Planta baixa da instalação residencial utilizada	77
Figura 5.8 – Quadro de medição e prumada elétrica (cenário comercial)	78
Figura 5.9 – Diagrama elétrico unifilar de uma unidade consumidora (cenário comercial)	79
Figura 5.10 - Planta baixa da instalação comercial utilizada	79
Figura 5.11 – Linha de inserção automática de componentes (cenário industrial)	80
Figura 5.12 - Linha de inserção semi-automática de componentes (cenário industrial)	80
Figura 5.13 – Detalhes da entrada de serviço para o edifício utilizado (cenário industrial)	81
Figura 5.14 – Diagrama elétrico unifilar de uma unidade consumidora (cenário industrial)	82
Figura 5.15 – Curva de consumo diário (consumidor residencial)	84
Figura 5.16 – Curva de consumo mensal (consumidor residencial)	84
Figura 5.17 – Curva de consumo diário (consumidor comercial)	85
Figura 5.18 – Curva de consumo mensal (consumidor comercial)	85
Figura 5.19 – Curva de consumo diário (consumidor industrial)	86
Figura 5.20 – Curva de consumo mensal (consumidor industrial)	86
Figura 5.21 – Configuração genérica utilizada para os experimentos	88
Figura 5.22 – Matriz de dados (SNR) obtida	89
Figura 5.23 – Matriz de dados (taxa de transmissão) obtida	90
Figura 5.24 – Evolução da SNR média durante as 24 horas de monitoramento	91
Figura 5.25 - Cenário Residencial – Gráficos da relação sinal-ruído	92
Figura 5.26 - Cenário Residencial – SNR (melhor e pior amostras do espectro)	92

Figura 5.27 – Cenário Comercial – Gráficos da relação sinal-ruído	93
Figura 5.28 – Cenário Comercial – SNR (melhor e pior amostras do espectro)	93
Figura 5.29 – Cenário Industrial – Gráficos da relação sinal-ruído	94
Figura 5.30 – Cenário Industrial – SNR (melhor e pior amostras do espectro)	94
Figura 5.31 - Cenário Residencial – Desempenho do sistema PLC <i>In-Home</i>	95
Figura 5.32 - Cenário Comercial – Desempenho do sistema PLC <i>In-Home</i>	96
Figura 5.33 - Cenário Industrial – Desempenho do sistema PLC <i>In-Home</i>	96

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 - Características típicas dos sistemas de energia elétrica no Brasil	27
Tabela 3.2 – Impacto do multipercurso na potência do sinal PLC	40
Tabela 4.1 - Cronologia resumida do desenvolvimento dos sistemas OFDM.....	45
Tabela 4.2 - Parâmetros do sistema DAB (ETS 300 401) para cada modo de transmissão	48
Tabela 4.3 - Parâmetros do sistema DVB-T (ETS 300 744) para cada modo de transmissão.	49
Tabela 4.4 - Parâmetros do padrão HiperLAN/2.....	51
Tabela 5.1 – Especificações técnicas dos equipamentos PLC utilizados nos experimentos ...	72
Tabela 5.2 – Frequências pré-definidas nos equipamentos PLC utilizados nos experimentos	73
Tabela 5.3 – Comparação das sazonalidades para os três tipos de cenários considerados.....	87
Tabela 5.4 –Intervalos para a realização dos experimentos	87
Tabela 5.5 – Parâmetros utilizados no algoritmo de monitoramento dos equipamentos	89
Tabela 5.6 – Estatísticas levantadas para o parâmetro SNR nos três cenários	91
Tabela 5.7 – Características gerais dos sistemas LAN e WLAN de referência.....	95
Tabela 5.8 – Comparação do desempenho do sistema PLC com outras tecnologias	97

Capítulo 1

1. Introdução

1.1. Powerline Communications

Nossa sociedade tem evidenciado uma crescente utilização dos sistemas de telecomunicações. De modo a suprir a demanda gerada por tais serviços, verificamos também um constante aumento da busca por novas soluções tecnológicas que atendam a estas necessidades.

Os movimentos de desregulamentação dos mercados de telecomunicações promovidos durante a última década em todo o mundo, com a conseqüente e natural promessa de lucros, têm motivado grandes investimentos neste setor.

Uma parte importante destes recursos tem sido investida na criação de infra-estruturas capazes de garantir a exploração destes serviços, com especial ênfase na instalação das chamadas “redes de transporte”, estruturas com grande capacidade de transmissão, responsáveis pela conexão dos distintos provedores de serviços às redes de grande porte intercontinentais. Um exemplo típico de rede de transporte são as infra-estruturas de fibra óptica, utilizadas como verdadeiras espinhas-dorsais para toda a infra-estrutura de telecomunicações.

No entanto, redes de transporte não alcançam efetivamente o usuário final, sendo este último enlace obtido por meio de estruturas distribuídas e com maior capilaridade, as chamadas “redes de acesso”. Exemplos deste tipo de estrutura são, dentre outras, as redes de telefonia fixa e de TV-a-Cabo.

Os custos diretos envolvendo o projeto, a instalação e a manutenção das redes de acesso são bastante altos e geralmente representam mais de 50% dos recursos econômicos necessários para a instalação de um sistema de telecomunicações em uma determinada região. Além do investimento em equipamentos e materiais, a implementação de uma rede de acesso costuma ser um processo complexo e dispendioso, sobretudo, devido às obras civis necessárias.

Mesmo após as ações de privatização e de quebra do monopólio das empresas estatais ocorridas no setor de telecomunicações, em vários países a maioria das redes de acesso ainda são controladas por um pequeno grupo de empresas.

Frente ao cenário exposto, percebemos que as empresas entrantes neste mercado precisam, sem abrir mão da competitividade e da agilidade necessárias, buscar alguma solução para compor suas próprias redes de acesso.

A tecnologia PLC¹ (*Powerline Communications*) promete fornecer uma interessante alternativa às tradicionais soluções para composição de redes de acesso. Os sistemas PLC permitem a utilização das redes de distribuição de energia elétrica para a transmissão de dados possibilitando, graças aos avanços tecnológicos recentes, a prestação de avançados serviços de telecomunicações como a transmissão simultânea de voz, dados e vídeo.

Embora existam outros aspectos relevantes, os quais serão abordados mais adiante neste texto, a principal vantagem oferecida pela tecnologia PLC em relação às outras soluções tradicionais é a redução dos custos operacionais, bem como dos investimentos necessários para compor novas redes de acesso.

1.2. Objetivos da Dissertação

Do ponto de vista informativo e bibliográfico, este trabalho tem como objetivo reunir informações sobre o tema, considerando o histórico do desenvolvimento da tecnologia PLC, os aspectos técnicos relacionados com a evolução da mesma e abordando, por fim, o estado da arte no assunto, através de uma análise das realizações mais recentes.

Inúmeros artigos e estudos têm sido publicados apresentando dados reais sobre o desempenho de sistemas PLC em redes de distribuição de energia específicas de vários países. No entanto, trabalhos desta natureza analisando o comportamento de sistemas PLC em topologias elétricas brasileiras ainda são muito escassos e os poucos existentes, em geral, não são de domínio público.

Considerando esta carência, realizamos neste trabalho uma série de experimentos, nos quais equipamentos de última geração foram utilizados para compor redes PLC em topologias elétricas de distintos perfis: residencial, comercial e industrial, permitindo-nos – através da análise dos resultados – avaliar a efetividade da tecnologia para o fim ao qual esta se propõe. Para tanto, comparamos o desempenho apresentado pelos equipamentos PLC com os valores oferecidos por outras tecnologias amplamente utilizadas nestes cenários.

¹ Alguns países utilizam uma outra nomenclatura. EUA – BPL (*Broadband over Powerlines*); França – PLT (*Powerline Telecommunications*).

1.3. Estrutura do Texto

Esta dissertação foi composta em seis Capítulos.

No Capítulo 2, apresentamos alguns outros aspectos que motivam a utilização das redes de transmissão e de distribuição de energia elétrica para o fornecimento de serviços de telecomunicações. O texto traz ainda um breve histórico e um detalhamento das topologias e das aplicações típicas de sistemas PLC. Por fim, tratamos um pouco das experiências realizadas com esta tecnologia no Brasil.

As características técnicas das redes elétricas como um canal para comunicação são abordadas no Capítulo 3. Após uma introdução aos sistemas de comunicação digital, apresentamos uma visão geral dos sistemas de energia elétrica, diferenciando cada nível de tensão segundo as suas características e aplicações. Neste Capítulo trazemos ainda uma análise do comportamento das redes de distribuição de energia elétrica, cobrindo os principais efeitos impostos aos sinais de alta frequência ao serem transmitidos através das mesmas. Ainda neste Capítulo, apresentamos um modelo para o canal PLC.

Após estudarmos as características das redes elétricas, bem como a problemática envolvida na transmissão de sinais através destas, apresentamos no Capítulo 4 a técnica de modulação OFDM, uma das possíveis soluções que visam superar, ou minimizar, as barreiras impostas por este meio à transmissão de sinais.

De modo a explorar algumas características das redes elétricas brasileiras, alguns experimentos foram realizados. No Capítulo 5 apresentamos a metodologia empregada nos mesmos; as características técnicas dos equipamentos utilizados; a descrição de cada um dos cenários – alvos dos experimentos – e, finalmente, apresentamos e discutimos os resultados obtidos.

Finalizando o documento apresentamos, no Capítulo 6, as principais conclusões obtidas, além de indicarmos algumas possibilidades de trabalhos futuros, seguindo a mesma linha deste estudo.

Capítulo 2

2. Powerline Communications

2.1. Introdução

Os sistemas de transmissão e de distribuição² de energia elétrica formam atualmente a maior estrutura, em forma de rede, instalada no planeta. Com mais de três bilhões de usuários em todo o mundo, tais estruturas estão presentes em praticamente qualquer localidade. Durante décadas, através do fornecimento de energia elétrica, tais sistemas têm proporcionado às pessoas um nível de conforto sequer imaginado antes de sua existência.

Algumas características intrínsecas destas grandes malhas despertaram o interesse na utilização das mesmas para outros fins, além do fornecimento de energia, motivo para o qual estas redes foram inicialmente concebidas e implementadas.

Dentre estas características citadas, as seguintes merecem destaque:

- As redes de transmissão e de distribuição de energia elétrica apresentam um elevadíssimo grau de capilaridade e de penetração. O aspecto de capilaridade pode ser evidenciado em duas escalas: de um ponto de vista macro, se considerarmos a penetração das mesmas a nível de territórios, cidades, etc, ou ainda sob uma visão mais localizada e pontual, ao verificarmos que em praticamente qualquer cômodo, seja em um ambiente residencial, comercial ou industrial, existe uma tomada de energia elétrica;
- Distribuídos em todas as classes econômicas e sociais, o número de usuários que têm acesso à eletricidade é inigualável. Nenhum outro sistema, serviço ou facilidade atende atualmente a um contingente de usuários sequer comparável àqueles que têm acesso à energia elétrica;
- Para que este serviço pudesse ser ofertado aos usuários, toda uma infra-estrutura teve que ser desenvolvida e implantada, sendo mantida atualmente em um estado de permanente ampliação. Deste ponto-de-vista, as redes elétricas constituem uma estrutura já instalada e, portanto, disponível.

Deste modo uma primeira e simples análise, baseada apenas nos aspectos apresentados acima, já suscita a seguinte pergunta, ou constatação:

² Em geral a nomenclatura utilizada no setor de sistemas de energia elétrica reserva o termo “transmissão” para o trecho que interliga as unidades geradoras de energia aos centros de carga, enquanto que o termo “distribuição” é utilizado para referenciar o último segmento de toda a cadeia, ou seja, o trecho da rede que efetivamente chega até o usuário final.

O fato de toda essa imensa e incomparável infra-estrutura estar sendo utilizada “apenas” para o fornecimento unilateral de energia elétrica, não caracteriza uma subutilização da mesma?

A tecnologia PLC surge exatamente numa tentativa de mudar esse paradigma, fornecendo uma alternativa para que esta vasta rede possa ser utilizada de forma bidirecional para prover, além da energia elétrica tão importante para a sociedade atual, também o acesso aos serviços de telecomunicações em geral.

A possibilidade de utilizar as redes elétricas como uma alternativa para prover o acesso a algum serviço de telecomunicações para a população é algo realmente muito interessante. Este interesse encontra subsídios não apenas nos interesses econômicos envolvidos, mas representa, sobretudo, uma importante ferramenta para promover a tão debatida questão da inclusão digital, vital para o desenvolvimento da chamada “sociedade da informação”.

A forma acentuada com que o acesso a Internet tem crescido nos últimos anos, contando com aplicativos sofisticados e incorporando recursos multimídia, como áudio e vídeo, tem feito com que tecnologias de acesso, outrora consideradas modernas e atuais, já não atendam mais as necessidades dos usuários.

Se considerarmos ainda que o acesso à rede global tem se tornado cada vez mais importante para que as pessoas possam cumprir com as suas atividades, tanto pessoais como profissionais, a possibilidade de contar com sistemas que, além de garantirem altas taxas de transmissão, proporcionem – a um preço acessível – uma conexão permanente, mostra-se cada vez mais conveniente e desejável.

Atualmente, mesmo nos países mais desenvolvidos, verificamos uma carência notável no que se refere à disponibilidade e à qualidade dos sistemas de comunicação de dados de alta velocidade, comumente chamados de “serviços de banda larga”.

A possibilidade de utilizar as redes de transmissão e de distribuição de energia elétrica para prover serviços de telecomunicações tem motivado a pesquisa e o desenvolvimento de sistemas capazes de superar as características hostis deste ambiente como um canal para comunicações.

2.2. Aspectos Motivadores

São realmente muitos os aspectos que motivam a utilização das redes de transmissão e de distribuição de energia elétrica como uma alternativa para o oferecimento de serviços de telecomunicações. A seguir abordamos alguns destes fatores.

2.2.1. Características Intrínsecas das Redes Elétricas

A primeira, e talvez a principal vantagem oferecida pelas redes de elétricas, reside no fato de as mesmas já estarem instaladas e disponíveis, desonerando os interessados de qualquer custo relativo à implementação e à instalação de um novo meio. Vale citar que, por si só, este aspecto já torna a alternativa das redes elétricas algo realmente interessante, pois é comum que nos sistemas de comunicação com fio os custos relativos à instalação respondam pela maior parte do investimento total.

A rapidez e a agilidade no processo de instalação também representam uma vantagem bastante estratégica. Conforme apresentaremos a seguir, para compor uma rede PLC basta a localização de equipamentos específicos em pontos estratégicos da rede, reduzindo de forma significativa o tempo necessário para compor um sistema de acesso.

2.2.2. Desregulamentação do Setor de Energia Elétrica

Toda tecnologia tem seu desenvolvimento baseado não apenas nos aspectos técnicos, sendo também motivado pelas vantagens que a mesma fornece do ponto de vista econômico e social. A tecnologia PLC não se comporta de maneira distinta com relação a este cenário.

Um importante marco histórico que impulsionou a possibilidade da utilização das redes elétricas para outra finalidade, foram os movimentos de desregulamentação e de privatização experimentados pelo setor de energia em todo o mundo, no final da década de 90.

Do ponto de vista técnico, os principais objetivos destes movimentos foram incrementar os níveis de qualidade, disponibilidade e de cobertura dos sistemas de geração e de distribuição de energia elétrica.

Já do ponto de vista mercadológico, a intenção era criar uma estrutura de mercado com característica de oligopólio, capaz de assegurar a livre competição entre os fornecedores e a possibilidade de escolha por parte do consumidor.

Este fenômeno fez com que as concessionárias de energia elétrica, que até então gozavam de um total monopólio em suas áreas de atuação, passassem a enfrentar outras empresas, numa competição pelos consumidores que até aquele momento, devido à falta de opções de fornecimento, eram considerados como cativos.

Essa mudança no cenário fez com que as empresas iniciassem uma procura por novas oportunidades de negócios, de modo a expandir a sua área de atuação.

Todas as empresas distribuidoras de energia elétrica contam com alguma infra-estrutura de telecomunicações. Este ativo sempre foi necessário para dar suporte às suas atividades internas de operação, controle e manutenção do sistema elétrico como um todo. Alguns exemplos deste tipo de estrutura são os enlaces de fibra óptica que, através de suas linhas de transmissão, interligam subestações; os sistemas de rádio utilizados para a coordenação das

equipes em campo; e mesmo algumas aplicações que utilizam a própria rede elétrica como meio de transporte para alguns canais de voz ou de sinais de controle.

Portanto estas empresas já possuíam alguma experiência na análise, projeto e implementação de estruturas e serviços de telecomunicações, os quais, até aquele momento, serviam apenas às suas necessidades internas.

Esta experiência, aliada às necessidades de mercado já descritas, fizeram com que as concessionárias de energia elétrica passassem a prospectar alternativas de agregar algum valor extra a toda a sua infra-estrutura.

A partir deste momento muitas empresas passaram a ampliar os seus sistemas de telecomunicações, encontrando no excedente de sua capacidade de transmissão de dados um interessante e atrativo produto.

2.2.3. Carência de Serviços de Banda-Larga

Conforme citamos anteriormente, embora a utilização da Internet e dos serviços de telecomunicações tenha aumentado de forma realmente significativa em todo o mundo, com raras exceções, a infra-estrutura necessária para dar o suporte exigido por esta expansão não acompanhou este crescimento com a mesma velocidade.

Especificamente no caso da Internet, atualmente cerca de 80% dos usuários ainda acessam a mesma através de linhas discadas [17]. Mesmo em alguns países bem desenvolvidos a disponibilidade de serviços de banda-larga é ainda modesta. A Figura 2.1 apresenta a situação da disponibilidade dos serviços de banda-larga nos dez países com as maiores percentagens de penetração do mesmo [17], [49].

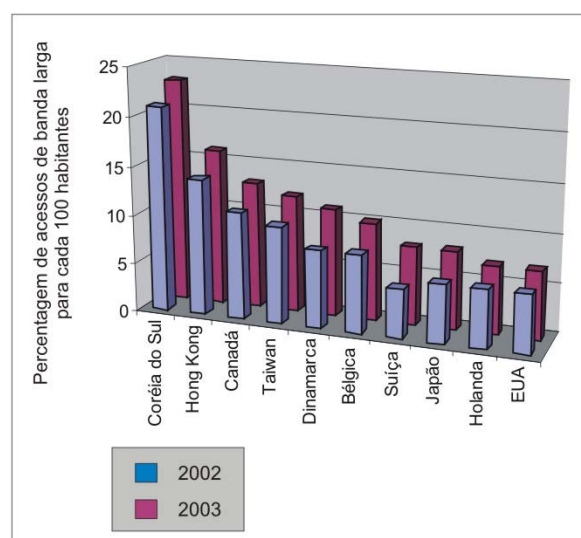


Figura 2.1 - Penetração de serviços de banda-larga nos dez países com maior disponibilidade.

2.2.4. Aspectos Sociais e a Inclusão Digital

Outro importante aspecto a ser considerado é o apelo social relacionado com a possibilidade de fornecer serviços de telecomunicações através das redes elétricas. Mesmo após a recente abertura do mercado de telecomunicações, em países como o Brasil, um grande contingente da população encontra-se ainda sem acesso a nenhum tipo de serviço desta natureza. E vale destacar que não nos referimos aqui a serviços avançados como Internet de alta velocidade, mas sim ao acesso a um serviço básico como telefonia. Neste sentido, no caso do Brasil onde a grande maioria da população é atendida pelas redes elétricas em suas residências, o acesso a serviços básicos de telecomunicações poderia ser disponibilizado de forma mais rápida em locais onde, por motivos diversos, a rede de telefonia ainda não foi instalada ou necessita de expansão.

2.2.5. Estímulo a Competição

Embora o potencial da tecnologia PLC seja função de alguns fatores específicos de cada região, os parâmetros básicos para a análise de viabilidade são: a infra-estrutura existente (redes elétricas e estruturas de acesso), a penetração e a demanda por serviços de banda-larga e, ainda, os aspectos pertinentes à regulamentação vigente.

Devido à redução dos investimentos necessários para compor a infra-estrutura de transporte e à rapidez na implementação, a tecnologia PLC permite que novos operadores possam rapidamente estender sua área de cobertura, estabelecendo uma oferta de serviços em áreas antes atendidas por apenas um, ou poucos, provedores de serviços, aumentando as possibilidades de acesso e favorecendo os consumidores.

2.3. Breve Histórico

O conceito básico por trás da tecnologia PLC consiste na utilização da infra-estrutura das redes de fornecimento de energia elétrica em seus diferentes níveis – alta, média e baixa tensão – como um meio alternativo para trafegar sinais e informações.

Embora este conceito não seja recente e algumas aplicações desta natureza existam e sejam utilizadas há bastante tempo, apenas nos últimos anos, com a evolução das técnicas de processamento digital de sinais, verificou-se a possibilidade real da utilização destas redes para fins de comunicação, garantindo um nível de qualidade satisfatório mesmo para aplicações de grande escala.

2.3.1. As Primeiras Implementações

Os primeiros sistemas a estender o uso das redes elétricas para outras finalidades foram as soluções OPLAT (Onda Portadora em Linha de Alta Tensão), utilizadas pelas empresas distribuidoras de energia elétrica como um canal de comunicação alternativo para o controle de alguns dispositivos remotos, como chaves seccionadoras, reatores de iluminação pública e *taps* de transformadores, dentre outros.

Anteriormente à grande oferta de soluções para o tráfego de voz que evidenciamos atualmente, os sistemas OPLAT eram também utilizados para trafegar alguns canais de voz, permitindo a comunicação entre subestações e unidades remotas de uma concessionária de energia.

São características dos sistemas OPLAT:

- Modestas taxas de transmissão, inferiores a 50kbps;
- Operação em baixas frequências, normalmente na faixa de centenas de kHz;
- Baixo número de portadoras discretas, normalmente operando com altíssimas potências de transmissão.

2.3.2. Os Primeiros Sistemas PLC Digitais

Podemos considerar que a era das comunicações digitais de alta velocidade através das redes elétricas teve início em 1991, quando a empresa *Norweb Communications* – sediada em Manchester na Inglaterra – iniciou uma etapa de testes em campo, no sentido de investigar o uso destas estruturas para a transmissão de sinais.

Estes testes e experimentos prosseguiram de forma que, nos anos subseqüentes, ficou demonstrada a possibilidade de tratar das características adversas apresentadas pelo canal, fazendo com que o conceito de converter as redes elétricas em uma estrutura de telecomunicações poderia ser um feito viável.

A partir desta feita, baseadas em diversas tecnologias, inúmeras empresas se lançaram na busca de soluções eficazes para lograr êxito no desafio de oferecer serviços de telecomunicações de alto desempenho, através das redes de transmissão e distribuição de energia elétrica.

2.3.3. Avanços Tecnológicos Recentes

A presença de distintos fabricantes de equipamentos trabalhando no desenvolvimento de sistemas PLC fez com que, rapidamente, uma variedade de soluções surgissem no mercado.

Embora outras empresas tenham apresentado produtos nesta etapa evolutiva dos sistemas PLC, basicamente três fornecedores, devido às melhores performances alcançadas,

responderam por praticamente a totalidade dos equipamentos utilizados nas implementações de sistemas PLC em diversos países.

A empresa suíça Ascom³ apresentou um sistema que utilizava modulação GMSK (*Gaussian Minimum Shift Keing*) e operava em até três faixas espectrais. Cada grupo de portadoras que compunha esta faixas oferecia taxas de transmissão entre 750kbps e 1,5Mbps, resultando numa capacidade máxima de transmissão – em camada física – de até 4,5Mbps.

Originária de Israel, a empresa Main-Net⁴ desenvolveu uma solução PLC baseada na modulação com espalhamento espectral (*spread spectrum*). O desempenho dos equipamentos baseados na tecnologia desenvolvida por esta empresa era similar ao apresentado pelos equipamentos do fabricante anterior.

Por fim, a empresa espanhola DS2⁵ (*Design of Systems on Silicon*), contrariando a pouca tradição de desenvolvimento de circuitos integrados na Espanha, apresentou um *chipset* exclusivamente dedicado para o processamento necessário aos sistemas PLC. Enquanto as outras empresas utilizavam DSPs (Processadores de Sinais Digitais) de uso genérico para implementar as suas soluções, este fabricante resolveu apostar um pouco mais alto, apresentando a primeira pastilha de silício com alto grau de integração, cujo processamento era totalmente dedicado à realização das operações necessárias para um sistema PLC.

Ao optar pela utilização da então inovadora técnica de modulação conhecida por OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), este fabricante precisou integrar um processador capaz de executar, em tempo real, todo o complexo processamento matemático no qual a teoria de multi-portadoras ortogonais encontra suas bases.

Sistemas PLC equipados com *chipset* DS2 apresentaram performances de até 45Mbps de transmissão em camada física.

Todos os sistemas desenvolvidos neste período tiveram um importante papel no contexto da evolução da tecnologia PLC. Inúmeras instalações foram efetuadas utilizando os equipamentos desta geração e o desenvolvimento dos equipamentos com desempenho superior disponíveis atualmente só foi possível devido às experiências de campo realizadas durante esta fase.

Os avanços técnicos deste período confirmaram a possibilidade de utilizar as redes de distribuição de energia elétrica para o fornecimento de serviços avançados de telecomunicações.

Além das instalações e dos projetos-piloto desenvolvidos – inclusive no Brasil⁶ – este período viu surgir as primeiras aplicações comerciais da tecnologia PLC.

³ www.ascom.com

⁴ www.mainnet-plc.com

⁵ www.ds2.es

⁶ Ver seção 2.5 deste Capítulo – *Experiências no Brasil*

2.3.4. A Próxima Geração de Equipamentos PLC

Além da continuidade do desenvolvimento tecnológico, o grande desafio para os novos sistemas PLC reside na redução do custo dos equipamentos. Operadoras de telecomunicações e distribuidoras de energia elétrica aguardam a chegada de soluções que possam ser competitivas com as outras tecnologias utilizadas na “última-milha”, tais como as variações dos sistemas DSL e o Cable-MODEM.

A própria empresa DS2, já citada, lançou no segundo semestre de 2004 um *chipset* capaz de possibilitar transmissões de até 200Mbps através da rede elétrica. Outros provedores também têm anunciado equipamentos e soluções bastante otimizadas em termos de desempenho e custo.

2.4. Topologias e Aplicações Típicas

Após o ceticismo enfrentado nas fases iniciais do seu desenvolvimento, a utilização da tecnologia PLC como alternativa de acesso para serviços de telecomunicações na última-milha, encontra hoje apoio em vários setores:

- Indústria de telecomunicações, informática e microeletrônica dado o relevante número de empresas que têm apostado no desenvolvimento e na fabricação de equipamentos PLC;
- Centros de pesquisa e desenvolvimento. Sendo notável o aumento do número de trabalhos e estudos publicados com origem em diferentes países, tendo interesse direto ou em alguma área afim com a tecnologia PLC;
- Distribuidoras de energia elétrica, tendo inúmeras empresas em todo o mundo realizado testes e instalações para avaliar a aplicabilidade da tecnologia em suas redes, sendo que uma série destas empresas já iniciaram operações comerciais com a tecnologia [50].

Os resultados dos trabalhos de análise e testes promovidos por estes setores – fabricantes, centros de pesquisa e distribuidoras de energia elétrica – mostraram a possibilidade da implementação de redes PLC com diferentes topologias, cuja aplicação deverá ser avaliada com base em uma série de aspectos, como as necessidades do local escolhido, o modelo de negócios a ser aplicado e ainda estar em concordância com os aspectos regulatórios vigentes.

Embora a tecnologia permita a transmissão de dados através das redes de transmissão e de distribuição de energia elétrica, é importante destacar que existem diferentes possibilidades para a aplicação da mesma.

Apresentamos a seguir as principais topologias das quais, de acordo com a aplicação, poderão derivar uma série de outras possibilidades para a implementação de redes PLC.

2.4.1. Topologia PLC *In-Home*

Este modelo de aplicação tem como objetivo a utilização da rede elétrica interna de uma instalação para conectar alguns computadores em rede ou compartilhar periféricos, como uma impressora ou uma conexão de banda-larga baseada em outra tecnologia de acesso, por exemplo, DSL.

Neste tipo de topologia um pequeno grupo tem acesso à rede, e os administradores da estrutura são, em geral, os próprios usuários. A Figura 2.2 ilustra um exemplo de aplicação da topologia *In-Home* para compor uma pequena rede, interligando algumas estações de trabalho e periféricos em um escritório.

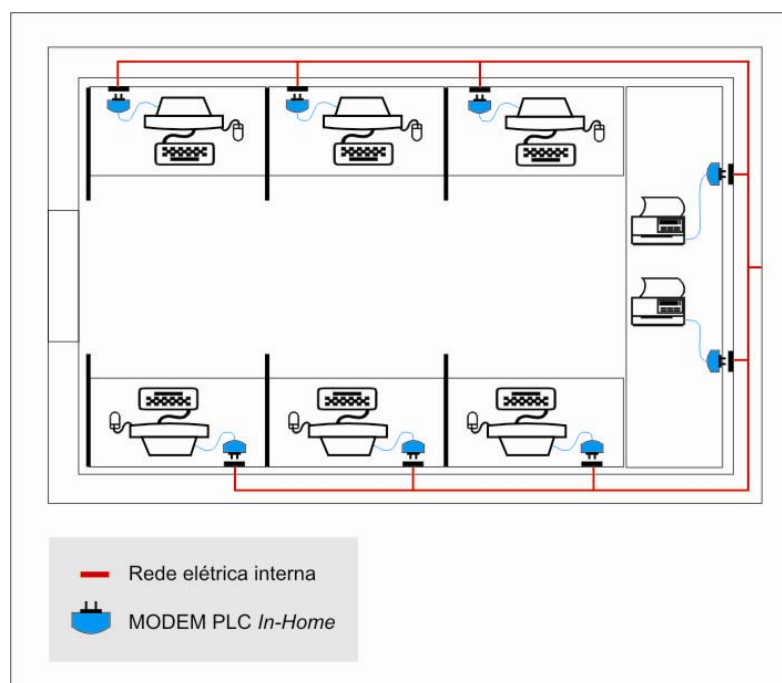


Figura 2.2 - Topologia PLC *In-Home*.



Figura 2.3 - MODEM PLC *In-Home* (Homeplug Standard).

2.4.2. Topologia PLC para Acesso na Última Milha

Este modelo, também conhecido como topologia celular, consiste numa evolução natural do conceito das redes *In-Home*. Nesta aplicação, a rede PLC estende seus limites para além da rede elétrica interna de um local específico, gerando diversas sub-redes de menor porte.

Neste tipo de topologia o sinal PLC é acoplado nas redes de baixa tensão (BT) após o transformador de distribuição, de modo que todos os usuários desta rede passam a ter acesso, por meio de MODEMs, ao sistema. A Figura 2.4 ilustra a aplicação da tecnologia PLC segundo o conceito celular.

Considerando que a distância percorrida por uma rede de baixa tensão tipicamente não supera algumas centenas de metros, a aproximação obtida entre o equipamento primário PLC e os usuários finais permite que, em geral, toda a rede secundária possa ser coberta com o sinal PLC. De todos os modos, para garantir a cobertura em pontos mais afastados do equipamento primário, ou mesmo em trechos mais críticos da rede – com grande número de derivações, ou muito afetados por interferências localizadas – o provedor de serviços pode disponibilizar elementos repetidores, cuja função é regenerar a potência do sinal PLC.

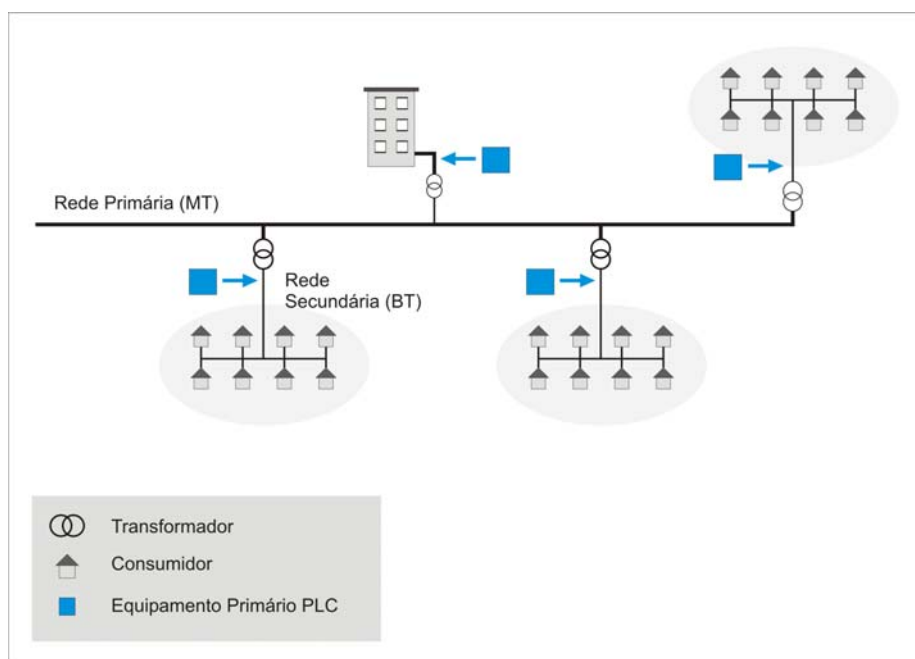


Figura 2.4 - Topologia PLC do tipo celular.

- **Vantagens**

Ao contar com a instalação distribuída dos enlaces, a topologia celular faz com que a distância a ser percorrida pelo sinal PLC seja bastante reduzida, diminuindo a necessidade de elementos repetidores, bem como as complicações oriundas dos custos relacionados a estes.

Adicionalmente, ao se utilizar equipamentos que operam em uma topologia mais distribuída, a tendência é de que os requisitos de capacidade dos equipamentos primários possam ser reduzidos, resultando num decréscimo dos custos individuais dos mesmos.

Do ponto de vista de mercado, outra vantagem deste modelo é a possibilidade de ser mais seletivo quanto às áreas de cobertura, disponibilizando o serviço apenas naquelas regiões de maior interesse por parte do operador do sistema, num dado momento.

Distribuidoras de energia elétrica ou operadores de serviços de telecomunicações que contam com uma rede de fibra óptica de maior porte, ou seja, redes com um maior nível de capilaridade, podem optar mais facilmente pelo modelo celular, contando com a presença desta rede para compor os referidos pontos de acesso necessários.

- **Desvantagens**

Embora o número de equipamentos PLC seja reduzido nessa arquitetura, verifica-se um acréscimo no número de pontos de acesso WAN a serem implementados. Assim, distribuidoras e operadoras que não contam com uma capilaridade considerável de estruturas de *backbone*, devem considerar algum investimento para prover este item.

2.4.3. Topologia PLC para Acesso WAN⁷

Essa topologia apresenta a alternativa mais abrangente e clássica na implementação de sistemas PLC, na qual ambas as redes de média e baixa tensão são utilizadas como meios alternativos para o tráfego de sinais de telecomunicações.

O modelo PLC WAN permite maximizar a utilização de toda a infra-estrutura elétrica já instalada, desde as subestações locais até a tomada de energia elétrica na casa do cliente em potencial.

Conforme apresentado na Figura 2.5, a topologia clássica conta com a instalação de estruturas de *backbone*, como enlaces de fibra óptica, em algumas regiões centralizadas, onde o sinal pode ser injetado em várias linhas. Usualmente esta concentração é feita nas próprias subestações locais onde a energia proveniente das plantas geradoras tem seu nível de tensão reduzido, sendo disponibilizada para diferentes circuitos alimentadores da rede primária, ou de média tensão.

Nestes locais são instalados os equipamentos PLC responsáveis pela interface com a estrutura de telecomunicações e pela injeção do sinal, contando com acopladores específicos para instalação junto às redes de média tensão.

⁷ WAN – *Wide Area Networks*, redes de grande porte que permitem a conexão entre os *clusters* PLC e os demais sistemas de telecomunicações existentes.

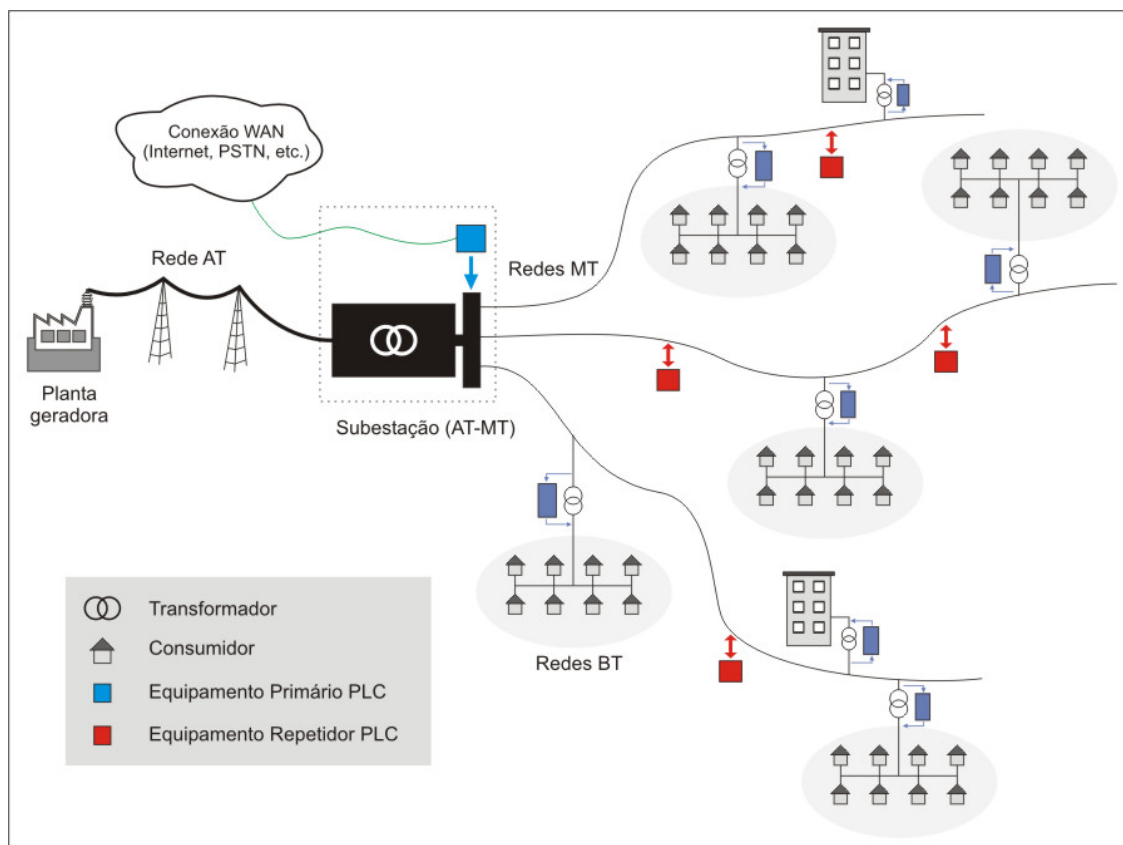


Figura 2.5 - Topologia “clássica” de aplicação da tecnologia PLC.

A partir do barramento da subestação o sinal é transmitido através da rede sendo regenerado sempre que necessário por meio de elementos repetidores, cuja distância de instalação depende de fatores característicos da rede em questão, como o número de derivações, o tipo e o estado dos condutores, dentre outros.

Já mais próximo ao usuário, junto aos transformadores de média para baixa tensão, outro equipamento é responsável por receber o sinal da rede de média tensão e injetar novamente o mesmo na estrutura de baixa tensão. Já comentamos esta necessidade de se implementar alguma solução de *by-pass* para o sinal PLC através do transformador, dado que o circuito magnético destes elementos atuam como uma barreira natural para os sinais de alta frequência. As características dos equipamentos e demais elementos que compõem a infraestrutura das redes de transmissão e distribuição de energia elétrica serão tratadas com maior apressamento no Capítulo 3.

Estando o sinal presente na rede de baixa tensão, novamente a topologia da mesma determinará a necessidade ou não da utilização de técnicas de repetição que permitam a manutenção da qualidade do sinal em trechos críticos, ou mais afastados do equipamento primário.

Finalmente os usuários, através do equipamento terminal disponibilizado pelo prestador de serviços PLC, podem ter acesso ao sinal apenas conectando esta unidade a qualquer tomada de energia elétrica em sua residência ou local de trabalho.

- **Vantagens**

Esta opção maximiza a utilização das redes elétricas, bem como de todas as estruturas da distribuidora de energia já existentes na área de interesse. Além disto, este modelo é baseado numa topologia extremamente simples, onde apenas em alguns pontos centralizados se faz necessária a conexão com as redes de grande porte para acesso aos serviços diversos, como conexão com a Internet e tráfego de voz.

Atualmente é bastante comum a disponibilidade de enlaces de fibra óptica nas subestações das distribuidoras de energia elétrica, reduzindo ainda mais a necessidade de novos investimentos com a infra-estrutura necessária para o oferecimento de serviços através da tecnologia PLC.

Distribuidoras que não contam com grande capilaridade de enlaces de fibra óptica ou outras soluções de *backbone* encontram neste modelo sua melhor opção.

- **Devantagens**

Ao utilizar toda a longitude das redes elétricas, alguns circuitos, tanto de média como de baixa tensão, podem apresentar distâncias demasiadamente longas, demandando um maior número de elementos repetidores para uma total cobertura de sinal.

Como a maioria das tecnologias disponíveis atualmente permite cobrir distâncias que não superam algumas centenas de metros, o custo dos equipamentos, bem como dos procedimentos de instalação e de manutenção dos mesmos, pode elevar o montante de investimentos necessários para que uma determinada região seja totalmente coberta pelo sinal PLC.

Na Figura 2.6 mostramos dois exemplares de equipamentos PLC. À esquerda vemos o MODEM do usuário final e à direita o elemento primário.



Figura 2.6 - MODEM e Equipamento Primário PLC⁸.

⁸ Fonte: Site do fabricante – www.ebaplc.com

2.4.4. Outras Topologias PLC

Citamos nos parágrafos anteriores alguns modelos típicos de arquiteturas de redes PLC. Contudo, modelos híbridos que utilizam combinações das arquiteturas apresentadas, podem naturalmente ser empregados.

Encontramos soluções que combinam enlaces de rádio (IEEE 802.11.b e 802.11g) para o acesso WAN, utilizando a solução PLC apenas para o acesso ao usuário final [57].

2.5. Experiências no Brasil

Diversas empresas distribuidoras de energia elétrica efetuaram testes e instalações piloto, sempre visando à análise de viabilidade técnica e econômica da tecnologia PLC.

A primeira empresa a efetuar testes com sistemas PLC no Brasil foi a COPEL, empresa paranaense, no ano de 2001. Exemplos de outras empresas que já testaram em algum âmbito a tecnologia PLC com o fim de analisar a mesma como possível solução para o fornecimento de serviços de telecomunicações são:

- AES-ELETROPAULO (SP);
- LIGHT (RJ);
- CEMIG (MG);
- CELESC (SC);
- CELG (GO);
- ELEKTRO (SP);
- CPFL ENERGIA (SP);
- BANDEIRANTE ENERGIA (SP);
- IGUAÇÚ ENERGIA (SC);
- ESCELSA (ES).

A seqüência de figuras abaixo apresenta detalhes da instalação de uma rede PLC efetuada no Brasil.



Figura 2.7 - Instalação do equipamento primário (Master) PLC.



Figura 2.8 - Detalhe do equipamento primário no abrigo metálico.

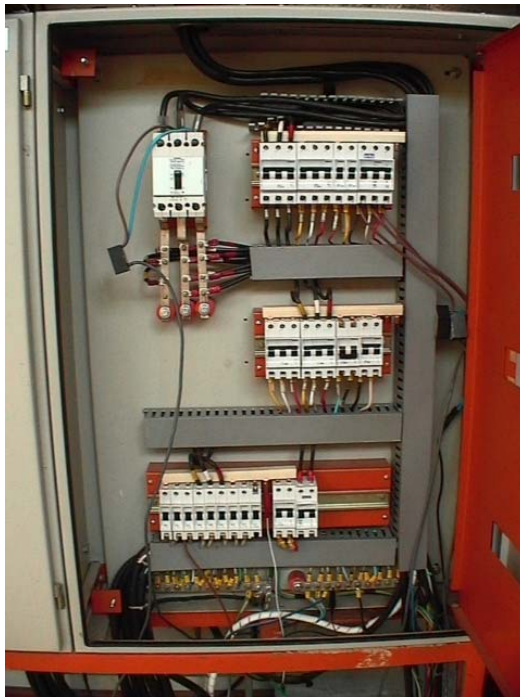


Figura 2.9 - Exemplo de acoplamento capacitivo em uma instalação *In-Home*.



Figura 2.10 - Detalhe do acoplador capacitivo para redes de baixa tensão (até 1kV).



Figura 2.11 - MODEM PLC instalado em cliente residencial.



Figura 2.12 - MODEM PLC instalado no cliente comercial.

2.6. Conclusões

Neste Capítulo tratamos dos aspectos e das características que tornam as redes de transmissão e de distribuição de energia elétrica infra-estruturas interessantes para a oferta de serviços de telecomunicações. Discorremos sobre o crescente aumento na demanda por serviços desta natureza, apresentando alguns dados estatísticos sobre a disponibilidade dos mesmos em diversos países.

Com base nestes referidos dados, verificamos uma carência no que se refere às opções de tecnologias de acesso por parte, tanto dos consumidores, quanto das empresas prestadoras de serviços.

Por meio de um breve histórico, apresentamos as inovações tecnológicas ocorridas no setor, mostrando as diferentes fases do processo evolutivo da tecnologia PLC. Com base em informações disponibilizadas pelos fabricantes mais significativos neste setor, tratamos das soluções e tecnologias adotadas pelos mesmos na composição dos seus produtos.

Finalizamos o Capítulo com a exposição das principais configurações topológicas utilizadas para compor sistemas PLC, analisando as vantagens e as desvantagens de cada método.

Capítulo 3

3. Características da Rede Elétrica como um Canal para Comunicação

3.1. Introdução

Neste Capítulo estudamos algumas características das redes elétricas, considerando a utilização das mesmas para a transmissão de sinais. São discutidos aspectos teóricos, bem como resultados de recentes trabalhos práticos realizados sobre o tema.

Para que se possa compreender a função do canal, o modelo típico de um sistema de comunicação digital é apresentado.

Ainda com o intuito de fornecer subsídios para as seções seguintes, aspectos topológicos, construtivos e alguns fenômenos intrínsecos ao funcionamento das redes elétricas são apresentados.

3.2. Sistemas de Comunicação Digital

Nesta seção apresentamos o modelo de um sistema de comunicação digital, com o intuito de analisar, identificar e compreender a função dos principais componentes do mesmo.

3.2.1. Modelo de Sistema

A Figura 3.1 mostra o modelo simplificado⁹ de um sistema de comunicação digital [1], [9], cujo objetivo é comunicar – transmitir e receber – informações digitais (uma seqüência de dígitos binários) através de um canal real, com a melhor qualidade e a maior taxa de transmissão possíveis.

⁹ Nos referimos como “simplificado” pelo fato de apresentarmos as etapas mínimas necessárias no processo de transmissão de dados. Deste modo, processos comumente empregados nos atuais sistemas de comunicação digitais não foram representados, tais como a etapa de *interleaving*, dentre outros.

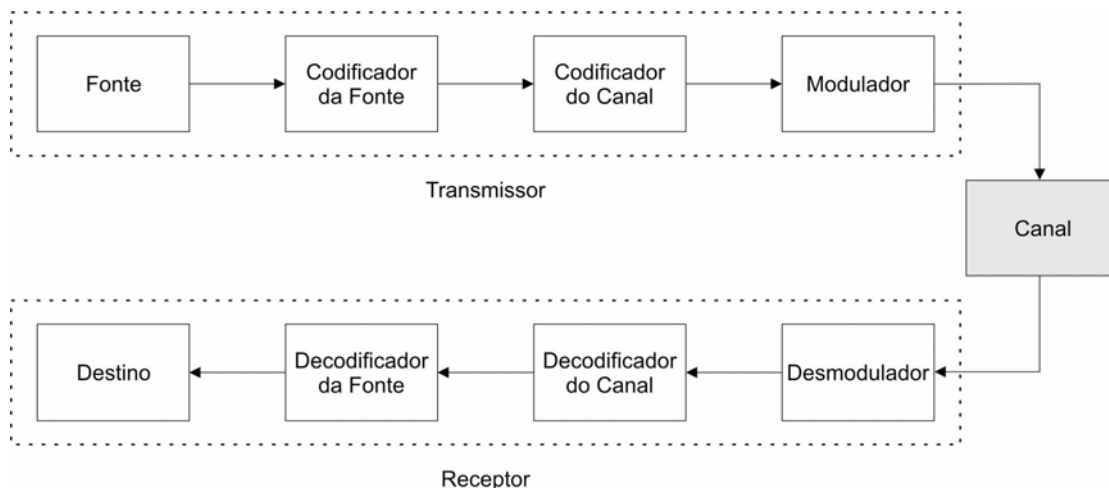


Figura 3.1 - Modelo de um sistema de comunicação digital.

3.2.1.1. Fonte de Informação

Os dados a serem transmitidos podem, a priori, ter origem em qualquer fonte de informação. Caso o sinal proveniente da fonte seja analógico como a voz, por exemplo, uma etapa de conversão analógico-digital (A/D) deve preceder ao transmissor.

3.2.1.2. Codificação e Decodificação da Fonte

A maioria dos dados gerados pela fonte contém algum nível de redundância. Se de alguma maneira este nível de redundância possa ser reduzido, obtemos uma compressão da informação, aumentando a eficiência do sistema.

Este é exatamente o papel do codificador da fonte, eliminar parte da informação redundante de modo a minimizar a quantidade de informação, ou de bits, a serem transmitidos através do canal. No receptor, o decodificador da fonte “descomprime” os dados, inserindo novamente a redundância inicial, de forma a reconstituir a informação originalmente transmitida.

Caso a atuação do conjunto codificador/decodificador restabeleça uma réplica da informação original, a técnica recebe o nome de “compressão de dados sem perdas”. No entanto, se a saída do decodificador da fonte apresentar uma versão distorcida da informação original, dizemos que o sistema efetuou uma “compressão de dados com perdas”.

A escolha entre as duas técnicas descritas acima depende primordialmente da necessidade, ou não, de se obter no receptor uma cópia fiel da informação transmitida. A compressão de dados com perdas apresenta maior eficiência quanto à quantidade de informação a ser transmitida, pois um maior nível de compressão pode ser implementado.

3.2.1.3. Codificação e Decodificação do Canal

De modo a reduzir a probabilidade de erro de bits (BER) o codificador do canal introduz de maneira controlada, certa redundância, na forma de bits extras de controle, à seqüência de bits original. Duas técnicas de codificação amplamente empregadas são os *códigos de bloco* [3] e os *códigos convolucionais* [2], [3].

Desta forma, ao ocorrer um erro em uma seqüência de bits durante a transmissão, a informação extra adicionada pelo codificador do canal pode ser utilizada pelo decodificador para detectar – e possivelmente corrigir – o erro. A quantidade de redundância adicionada depende do nível de robustez desejado, bem como das características do canal considerado para a transmissão.

3.2.1.4. Modulação e Desmodulação

O modulador é responsável pela geração do sinal a ser efetivamente transmitido através do canal de comunicação. É neste estágio do sistema de comunicação que o sinal contendo a informação é convertido, de uma seqüência de bits, a um sinal analógico cujas características – frequência, amplitude e fase – são selecionadas de acordo com o modelo do canal em questão.

O bloco modulador tem ao seu dispor uma série de formas de onda (ondas portadoras) e sua função é mapear, de acordo com um dígito ou uma seqüência de dígitos binários, uma forma de onda específica para a transmissão.

No receptor, o desmodulador – que conhece previamente as formas de onda empregadas pelo transmissor – tenta detectar qual destas foi utilizada e converte novamente o sinal analógico em uma seqüência de bits.

Conforme citado anteriormente, as formas de onda disponíveis no transmissor são cuidadosamente selecionadas de acordo com as características do canal a ser utilizado, de modo a otimizar a transmissão através do mesmo [1], [9]. A forma de onda do sinal de informação apresenta uma frequência bastante modesta se comparada com a frequência da onda portadora. Deste modo, dizemos que o sinal de informação é um sinal de “banda básica”, ou *sinal modulante*, e que o sinal composto pelo modulador é um sinal de “banda passante” ou *sinal modulado*.

Uma grande variedade de técnicas de modulação tem sido considerada para a utilização em sistemas PLC [29], [30], [38] de modo que a pesquisa, bem como a análise da aplicação destas diferentes técnicas, compõe atualmente uma das mais importantes áreas de estudo correlatas ao uso desta tecnologia.

Considerando as características extremamente hostis oferecidas pelas redes elétricas para a transmissão de sinais, escolher, projetar e implementar um esquema de modulação robusto o

suficiente para garantir uma comunicação com alguma qualidade, consiste em uma tarefa bastante complexa.

Discutiremos ainda neste Capítulo uma série de características, intrínsecas ou determinadas por fatores externos, responsáveis pelas dificuldades encontradas no canal PLC.

3.2.1.5. Canal de Comunicação

O canal utilizado para comunicação pode ser composto por qualquer meio físico interligando o transmissor e o receptor. Exemplos de canais de comunicação são: um par de fios metálicos, um cabo coaxial, uma fibra óptica, ou mesmo o ar.

É muito importante conhecer as características de um determinado canal, tais como o perfil de atenuação imposto pelo mesmo aos sinais que neste deverão trafegar, os ruídos ou interferências ali presentes, os fenômenos associados à propagação do sinal neste meio (multipercurso, etc.), dentre outros. O conhecimento prévio destes aspectos relacionados ao canal permitirá a utilização de técnicas corretivas, visando otimizar o desempenho do sistema de comunicação.

Pesquisas recentes [31], [32], [33], [34] têm explorado de forma intensa as propriedades das redes elétricas analisando, sobretudo, o comportamento das mesmas para frequências compreendidas entre 1 e 30MHz. Em breve discutiremos de forma mais detalhada este comportamento, bem como estes limites de frequência.

3.3. Sistemas de Energia Elétrica

O objetivo primordial destes sistemas é garantir, através da geração, da transmissão e da distribuição, o fornecimento de energia elétrica a uma determinada área ou região [11]. Segundo o porte e a complexidade do sistema, esta área pode se limitar a uma pequena cidade, ou estender-se a todo um continente, através de um sistema interligado.

No que tange às topologias típicas de um sistema de energia elétrica, não existem regras gerais relacionadas com a estrutura que se apliquem a *todos* os sistemas. É possível, no entanto, vislumbrar certas similaridades que caracterizam a maioria dos sistemas em operação atualmente.

Todos os sistemas de energia elétrica apresentam uma característica em comum: operam em vários níveis de tensão, separados por transformadores, sendo cada nível adaptado para interligar diferentes distâncias dentro da área total de abrangência [12].

Começando pelo nível de maior tensão, podemos distinguir os seguintes:

- Nível de transmissão;
- Nível de sub-transmissão;

- Nível de distribuição (primária e secundária).

3.3.1. Nível de Transmissão

Transmitindo energia elétrica com tensões entre 100 e 500kV, estas redes são utilizadas para cobrir grandes distâncias, desde algumas centenas até alguns milhares de quilômetros, interligando centros de geração aos grandes centros de consumo. Operando nestes níveis de tensão, as redes apresentam sempre uma topologia composta por cabos aéreos, suspensos por torres ou estruturas similares.

3.3.2. Nível de Sub-Transmissão

Os circuitos de sub-transmissão entregam a energia às subestações de distribuição responsáveis por suprir a demanda de uma certa área geográfica. As distâncias cobertas neste nível de tensão variam desde alguns quilômetros até poucas dezenas de quilômetros. Valores típicos de tensão para este nível estão entre 10kV e 138kV, contudo valores superiores podem ser observados.

Grandes consumidores de energia elétrica, como indústrias de maior porte, podem ser atendidas diretamente neste nível de tensão.

3.3.3. Nível de Distribuição

Os circuitos de distribuição constituem as malhas mais refinadas da rede total. Usualmente dois níveis de distribuição são utilizados:

- Tensão primária de distribuição ou *de alimentação* (por exemplo, 13,8kV);
- Tensão secundária de distribuição ou *de consumidor* (por exemplo, 110/220V).

Os circuitos de distribuição, alimentados a partir das subestações de distribuição, fornecem energia aos consumidores pequenos (domésticos) e médios (pequenas indústrias, comércio e edifícios).

3.3.3.1. Nível de Tensão Primária de Distribuição

Comumente referenciadas como “Redes de Média Tensão”, os circuitos neste nível operam com valores típicos de tensão entre 10kV e 25kV e as distâncias cobertas variam desde alguns quilômetros até poucas dezenas.

Neste nível de tensão é possível encontrar redes tanto aéreas como subterrâneas, sendo que, tipicamente, as redes aéreas atendem áreas rurais ou mais esparsas, enquanto as redes subterrâneas são utilizadas em zonas mais densamente ocupadas.

3.3.3.2. Nível de Tensão Secundária de Distribuição

Além de constituir as malhas mais refinadas do sistema total, este é o nível de tensão que efetivamente chega à maioria das unidades consumidoras, derivando do secundário dos transformadores de distribuição.

Em geral, devido aos fatores de segurança envolvidos em ambientes domésticos, a energia fornecida em tensão secundária não ultrapassa os 400V, justificando a referência a estas redes como “Redes de Baixa Tensão”.

O raio típico de cobertura de uma rede de baixa tensão compreende-se entre 200 e 500 metros. Nesse nível de tensão o comprimento da rede não pode ser muito maior, devido entre outros fatores, à considerável queda de tensão verificada.

A Tabela 3.1 apresenta alguns valores típicos utilizados no Brasil [11], para as principais grandezas discutidas nesta seção. A Figura 3.2 apresenta, a partir de uma subestação de distribuição, a topologia do nível de distribuição, destacando a interação entre as redes de tensão primária e secundária.

Tabela 3.1 - Características típicas dos sistemas de energia elétrica no Brasil

Nível	Tensão	Distância	Topologia
Transmissão	100 – 500 k	100 – 1000 km	Aérea
Sub-Transmissão	10 – 138 kV	1 – 100 km	Aérea
Distribuição Primária	10 – 35 kV	1 – 50 km	Aérea e Subterrânea
Distribuição Secundária	100 – 400 V	100 m – 1 km	Aérea e Subterrânea

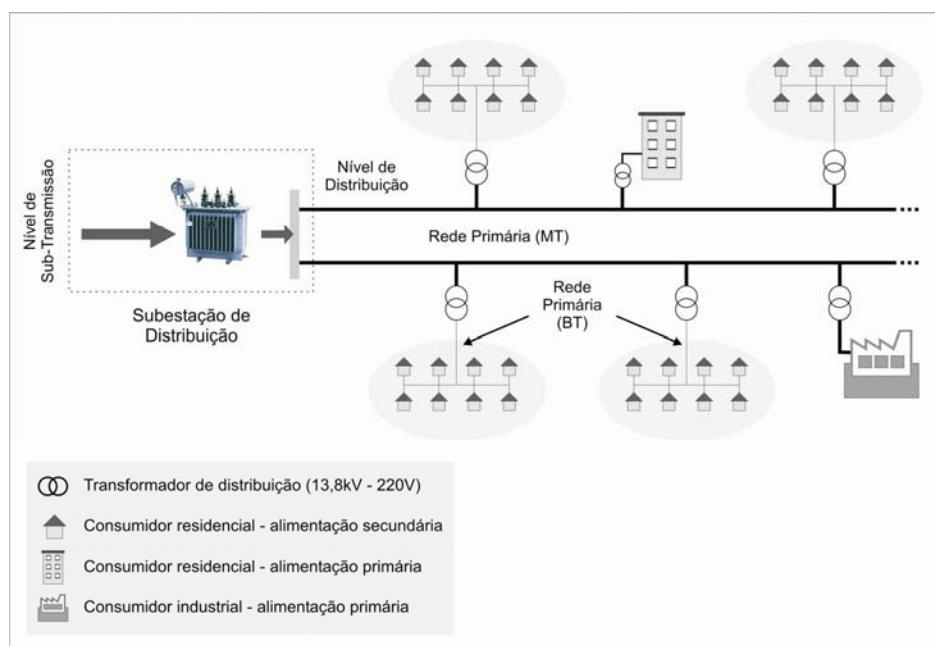


Figura 3.2 - Circuitos em tensão primária e secundária de distribuição

3.4. Utilização para Fins de Telecomunicações

A seguir abordaremos alguns aspectos estratégicos no sentido de analisar a efetividade da utilização das redes de transmissão e de distribuição de energia elétrica para fins de comunicação.

Estudaremos as vantagens e desvantagens de cada nível de tensão, considerando tanto a quantidade de usuários cobertos, como a disponibilidade de outras soluções similares.

Na seção posterior, os aspectos técnicos relacionados a cada tipo de rede serão alvos de nossa análise.

3.4.1. Níveis de Transmissão e Sub-Transmissão

Enquanto os circuitos dos níveis de transmissão e sub-transmissão formam redes praticamente isoladas, interligando grandes distâncias entre os centros de geração e os centros de carga, as redes dos dois níveis de distribuição (primária e secundária) estão, invariavelmente, instaladas próximas entre si e por muitas vezes compartilham da mesma infra-estrutura, seja aérea ou subterrânea.

Desta forma os circuitos dos níveis de transmissão e de sub-transmissão, não necessariamente, percorrem zonas de grande concentração populacional. Neste sentido, a utilização destes circuitos para fins de comunicação acaba se limitando a prover soluções para a utilização interna das próprias empresas do setor elétrico, conforme já mencionamos.

O advento da tecnologia OPGW (*Optical Ground Wire*) [12], fez com que as linhas de transmissão passassem a abrigar condutores de fibra óptica no cabo de proteção que acompanha estes circuitos. Com capacidade de transmissão oferecida pelos cabos ópticos, a maioria das empresas que investiram nesta solução, além de contarem com redes de dados bastante apuradas para suas finalidades internas, passou a comercializar a capacidade de transmissão excedente, encontrando nesta aplicação um interessante negócio.

3.4.2. Níveis de Distribuição Primária e Secundária

Os circuitos de distribuição, seja no nível de tensão primária ou secundária, constituem as redes elétricas de maior interesse para o fornecimento de serviços de telecomunicações através de soluções PLC. Circuitos destes níveis de tensão constituem uma malha de grande capilaridade e, ao contrário das redes de maior tensão, encontram-se muito próximos da maioria dos consumidores finais, cobrindo a chamada última-milha.

Se por um lado as redes elétricas oferecem uma maior capilaridade e penetração justamente na “última milha”, constatamos que é exatamente este segmento geográfico que atualmente apresenta a maior carência de alternativas de acesso a serviços de telecomunicações, conforme discutido no Capítulo anterior.

Em face ao cenário exposto, concluímos que – do ponto de vista estratégico – dentro de todo o sistema elétrico, as redes de distribuição de energia, tanto em nível primário quanto secundário, são as mais interessantes para a aplicação de sistemas PLC. As experiências observadas em diferentes países realmente demonstram que praticamente a totalidade dos sistemas PLC de banda-larga têm sido instalados em redes de distribuição [30].

Da mesma forma no Brasil, as empresas que já detêm alguma experiência com a tecnologia PLC, também vislumbram a aplicação da mesma nos circuitos de distribuição primários e secundários.

3.5. As Redes Elétricas como um Canal para Comunicação

As redes de transmissão e de distribuição de energia elétrica em todos os níveis – transmissão, sub-transmissão ou distribuição – são projetadas de forma a permitir o fluxo da energia da forma mais eficiente possível, ou seja, com os menores índices de perdas.

Deste modo, estas estruturas não foram concebidas visando à transmissão de sinais de alta frequência. Do ponto de vista do uso como um canal para comunicação, as redes elétricas representam um meio extremamente instável e hostil.

Os circuitos de distribuição de energia costumam apresentar um elevado número de emendas, derivações e descontinuidades, sem nenhum tipo de casamento entre as impedâncias nestas porções adjacentes do meio. Nestes pontos de descontinuidade ocorrem reflexões dos sinais de alta frequência, gerando o efeito de multipercurso [27], [28].

O canal PLC apresenta uma característica de resposta em frequência extremamente variante no tempo. Adicionalmente, em certos momentos, estas características variam de modo ainda mais abrupto devido a novas cargas inseridas ou desconectadas do sistema.

No entanto, por meio de distintas abordagens, vários estudos têm demonstrado a possibilidade da transmissão de dados através das redes elétricas, se obtendo taxas superiores a algumas dezenas de Mbps:

- Através de análises teóricas, a partir da aplicação da teoria de Shannon para a estimação da capacidade do canal PLC [4];
- Por meio de atividades de medição em campo, levantando as potencialidades de diferentes tipos e topologias de redes [26], [27], [30], [32], [34], [38], [39], [40], [41], [42], [43], [44], [46].
- Na forma de sistemas disponíveis comercialmente, oferecendo acesso a serviços de voz e dados com alto desempenho, por meio de soluções PLC [47].

Seguindo com a nossa análise, apresentamos alguns aspectos referentes ao comportamento das redes elétricas em altas frequências, bem como as estratégias e técnicas adotadas para possibilitar a utilização das mesmas, frente às condições adversas encontradas.

3.5.1. Atenuação

Conforme comentamos anteriormente, os elementos que compõem a infra-estrutura dos sistemas de energia elétrica são projetados e concebidos de forma a proporcionar a menor perda possível operando nas frequências da rede, ou seja, 50Hz ou 60Hz. Isto faz com que, para frequências mais elevadas – tipicamente utilizadas para a transmissão de sinais – estes elementos apresentem altas impedâncias, representando assim uma barreira natural para os sinais de comunicação.

Apresentamos a seguir as principais causas da atenuação dos sinais de alta frequência quando submetidos à transmissão através de redes elétricas.

3.5.1.1. Perdas Ôhmicas

Uma das causas da atenuação verificada pelos sinais de alta frequência, e que também afeta a energia transmitida pelas redes, consiste nas perdas ôhmicas. Este fenômeno, conhecido como “efeito Joule”, consiste no aquecimento do condutor devido à resistência intrínseca do material que compõe o mesmo, fazendo com que parte da energia do sinal transmitido seja absorvida pela própria rede. É sabido ainda que, devido ao efeito pelicular, as perdas ôhmicas aumentam em função da frequência do sinal transmitido [4].

Embora seja impossível estabelecer um padrão, devido à forma heterogênea com que as redes são compostas, estudos mostram que para as frequências na faixa de interesse dos sistemas PLC (1 à 30MHz), estas perdas apresentam valores próximos a 1dB/km [4], [32], [34].

Outros fatores, como a temperatura ou as condições climáticas, podem aumentar a resistência elétrica dos materiais, prejudicando ainda mais a transmissão dos sinais.

3.5.1.2. Correntes de Fuga

Verificamos ainda a atenuação do sinal transmitido devido ao dielétrico ou material isolante que reveste o condutor. Menos significativas, estas perdas também conhecidas como “correntes-de-fuga” são determinadas pela qualidade do material isolante e pelas condições climáticas que mudam a característica do meio próximo ao condutor.

3.5.1.3. Efeito Corona

Adicionalmente às perdas expostas anteriormente, a alta intensidade de campo elétrico existente ao redor das linhas de alta tensão é responsável por perdas adicionais nas linhas de transmissão. Este fenômeno – descargas elétricas das partículas suspensas na atmosfera próxima aos condutores, como resultado da ionização do ar – é denominado “efeito corona” [4]. Com a atmosfera relativamente seca, estas descargas ocorrem quando o campo elétrico atinge valores superiores a 15 kV/cm. Já com a atmosfera úmida ou em casos extremos de condensação, ou neblina, valores de campo elétrico muito menores são suficientes para desencadear o fenômeno.

Embora as perdas devido ao efeito corona não representem um problema tão crítico do ponto de vista da transmissão de energia, um outro fator associado a este fenômeno deve ser observado. Os arcos elétricos que ocorrem durante as descargas elétricas nas proximidades do condutor representam uma importante fonte de radiação eletromagnética de alta frequência, gerando assim uma fonte de interferências que, além de prejudicar serviços de radio difusão operando nas proximidades das linhas, pode aumentar o nível de ruído no receptor, prejudicando o desempenho dos sistemas PLC.

3.5.1.4. Elementos da Rede

Além das perdas impostas pelo próprio condutor, outros elementos que compõem as redes dos circuitos de distribuição também causam atenuações no sinal transmitido.

Embora possamos constatar que a maioria dos trabalhos publicados tem se baseado em intensas campanhas de medição em campo, evitando a análise individualizada dos componentes da rede, apresentamos dois exemplos com o intuito de ilustrar os efeitos causados pelos mesmos.

É provável que o transformador de tensão represente o exemplo mais clássico de elemento atenuador para os sinais de alta frequência. Do ponto de vista construtivo, o transformador de tensão apresenta uma capacitância em série que deveria oferecer um caminho de baixa impedância para sinais de alta frequência. Porém, em paralelo com esta capacitância, encontramos indutâncias importantes, criando um circuito ressonante que apresenta uma alta impedância para certas faixas de frequência. Como resultado desta interação, observamos que a atenuação dos sinais através de transformadores é extremamente dependente da frequência, podendo facilmente atingir níveis superiores a 20dB na faixa entre 1 e 30MHz [4].

Visando ilustrar a atenuação causada por um elemento típico de rede, as Figuras 3.3 e 3.4 mostram as curvas de resposta em frequência obtidas para dois disjuntores termomagnéticos com capacidade de 100A produzidos por fabricantes de grande

representatividade no Brasil. Embora do ponto de vista elétrico ambos cumpram exatamente a mesma função, o comportamento de ambos na faixa de interesse para os sistemas PLC é bastante distinto. O equipamento produzido pelo fabricante A apresenta uma característica de filtro passa-baixas, enquanto o elemento produzido pelo fabricante B se comporta como um filtro passa-altas.



Figura 3.3 - Resposta em frequência de um disjuntor de 100A apresentando característica de filtro passa-baixas



Figura 3.4 - Resposta em frequência de um disjuntor de 100A apresentando característica de filtro passa-altas

3.5.2. Interferências

Ao contrário de outros canais de comunicação, o canal PLC não pode ser representado pela presença dominante de ruído gaussiano branco aditivo (AWGN). Portanto, uma análise mais apurada das interferências presentes no ambiente PLC é um pré-requisito inevitável para que sejam levantados modelos apropriados para o canal.

Mesmo na faixa espectral onde a utilização do mesmo torna-se interessante para a transmissão de sinais, o canal é predominantemente caracterizado pela presença de ruído de faixa estreita e diferentes formas de ruído impulsivo. Em particular, este segundo componente responde pela significativa variação temporal do canal.

Recentes estudos [26], [31] têm sido realizados com o intuito de analisar e modelar de forma eficiente as características das interferências presentes nas redes elétricas. Os trabalhos mais significativos nesta área apresentam um perfil predominantemente prático, nos quais os resultados são obtidos com base em medições e experimentos efetuados em distintas topologias elétricas. A seguir discorreremos sobre as cinco diferentes classes de ruído presentes no canal PLC.

3.5.2.1. Ruído Colorido de Fundo

Resultado da sobreposição de componentes de ruído de baixa potência provenientes de diversas fontes, a densidade espectral de potência (PSD) desta componente de ruído é relativamente plana, decrescendo com o aumento da frequência.

Embora apresente um comportamento estocástico, o estudo realizado em [26] mostra que a PSD do ruído colorido de fundo varia muito lentamente. Durante o dia, o valor médio da PSD permanece estacionária durante intervalos de vários segundos, ou até mesmo alguns minutos. À noite, devido à redução na dinâmica de inserção e retirada de cargas do sistema, a PSD do ruído colorido de fundo pode permanecer neste estado estacionário por até algumas horas.

3.5.2.2. Ruído de Faixa Estreita

Duas são as fontes mais marcantes deste tipo de ruído: interferências de serviços de rádio difusão em geral e a peculiar interferência gerada pelas harmônicas de maior ordem da frequência de deflexão horizontal dos aparelhos de TV (15,625kHz PAL-Europa e 15,75kHz NTSC-EUA). Embora concentrado em faixas estreitas, este tipo de ruído apresenta uma alta PSD, tendo suas maiores contribuições na faixa inferior aos 500kHz.

3.5.2.3. Ruído Impulsivo Periódico - assíncrono com a frequência da rede

Com frequências variando entre 50 e 200kHz, este ruído é gerado principalmente por fontes de alimentação chaveadas.

3.5.2.4. Ruído Impulsivo Periódico - síncrono com a frequência da rede

Apresentando frequências com valores múltiplos dos tradicionais 50/60Hz utilizados pelos sistemas de energia, este componente de ruído impulsivo tem em geral uma curta

duração, não ultrapassando alguns microssegundos, sendo causado por fontes de alimentação devido à comutação de diodos retificadores operando de forma síncrona com a rede.

3.5.2.5. Ruído Impulsivo Assíncrono

Causado por transientes na rede, este tipo de ruído apresenta curtas durações (10-100 μ s) podendo alcançar picos de tensão de até 2kV, ocorrendo de forma aleatória. Devido a estes altos valores, a PSD deste tipo de ruído pode atingir níveis consideravelmente superiores à PSD do ruído de fundo. Na figuras abaixo apresentamos a forma de onda típica de fenômenos impulsivos detectados nas redes elétricas [26].

A Figura 3.5 mostra, no domínio do tempo, a forma de onda de um ruído impulsivo bastante pontual com duração inferior a 50 μ s e amplitude máxima igual a 1,5V. Já na Figura 3.6 mostramos uma perturbação impulsiva na qual a energia está distribuída de maneira mais uniforme durante praticamente todo o intervalo de ocorrência. Neste exemplo o fenômeno impulsivo apresenta uma duração de cerca de 90 μ s e uma amplitude máxima de 0,1V.

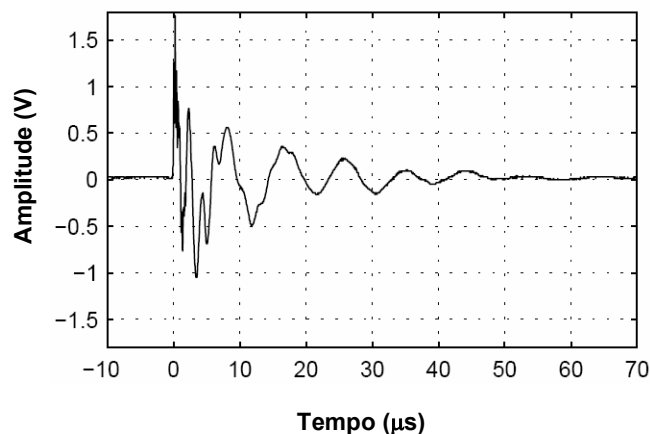


Figura 3.5 - Forma de onda para ruído impulsivo concentrado

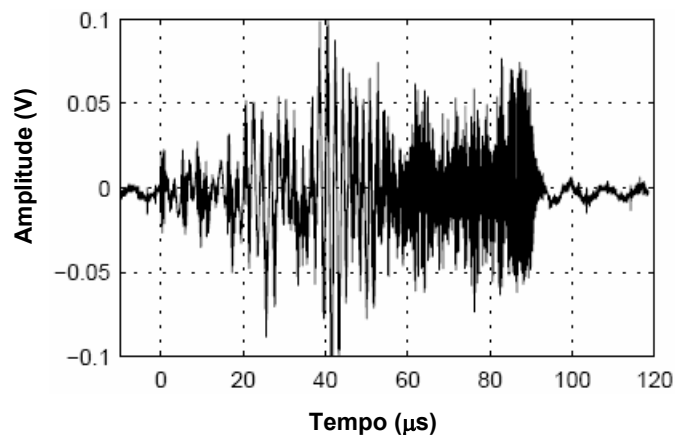


Figura 3.6 - Forma de onda para ruído impulsivo distribuído

Apresentadas as formas de onda para dois tipos de ruídos com característica impulsiva, mostraremos agora o impacto da ocorrência dos mesmos através da visualização de suas PSD's. As Figuras 3.7 e 3.8 mostram que, em toda a faixa de frequências monitorada, a PSD dos ruídos impulsivos supera a PSD do ruído de fundo do canal em mais de 10dB. Em algumas faixas específicas, a PSD do fenômeno de duração mais concentrada chega a ultrapassar os valores de ruído de fundo em mais de 50dB. Mesmo no segundo exemplo de fenômeno impulsivo, onde a energia do evento é mais distribuída durante o intervalo de ocorrência, supera a PSD do ruído de fundo em até 30dB.

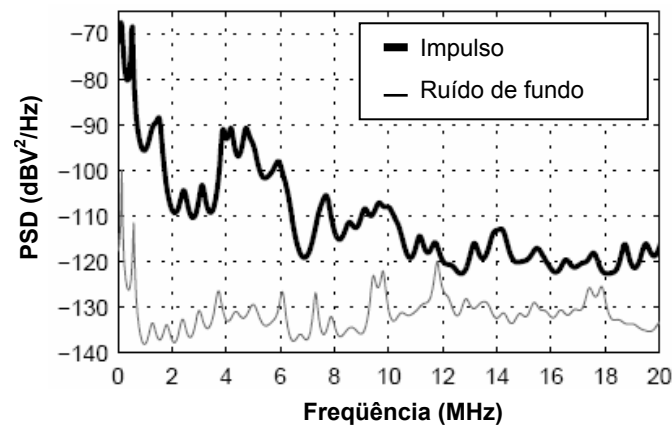


Figura 3.7 - PSD para ruído impulsivo concentrado

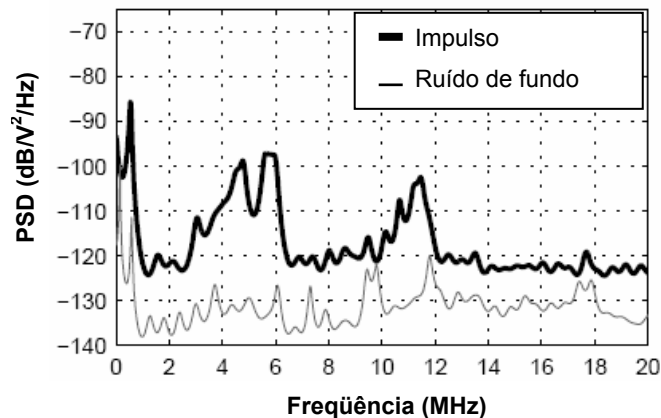


Figura 3.8 - PSD para ruído impulsivo distribuído

3.5.2.6. Caracterizando os Tipos de Interferências

As propriedades dos primeiros três tipos de ruídos apresentados permanecem estacionárias em intervalos de alguns segundos, minutos e algumas vezes mesmo durante horas e, devido a este comportamento, os mesmos podem também ser considerados como ruído de fundo – caracterizado por sua lenta variação e uma PSD com valores moderados.

Contudo, as características dos últimos dois tipos de ruídos citados variam em intervalos muito curtos – na ordem de micro segundos – e durante a ocorrência de tais eventos, a PSD do ruído presente na rede pode aumentar consideravelmente, causando erros na transmissão de dados. O trabalho [26] apresenta um estudo detalhado visando a modelagem dos ruídos presentes no canal PLC.

3.5.3. Multipercurso no Canal PLC

O canal PLC também é caracterizado pela propagação dos sinais através de múltiplos percursos [1], [10]. Embora este fenômeno seja amplamente estudado em sistemas de comunicação rádio-móvel, contando com uma modelagem matemática bastante avançada [10], a investigação do mesmo nas redes elétricas é relativamente recente.

Mostraremos a seguir que, diferentemente do canal rádio-móvel, a ocorrência de multipercursos nas redes elétricas não advém da reflexão física em obstáculos presentes no meio. No canal PLC verificamos a existência deste fenômeno devido à falta de casamento de impedâncias nas transições do meio, como emendas e derivações, além do próprio ponto de conexão dos equipamentos às redes.

3.5.3.1. Acoplamento do Sinal PLC

A Figura 3.9 apresenta um sistema de comunicação digital aplicado ao canal PLC. Além dos elementos descritos previamente, este sistema conta com acessórios específicos para compatibilizar os níveis de tensão utilizados pelos circuitos eletrônicos que compõem o transmissor e o receptor e os níveis de tensão da rede elétrica considerada para a transmissão.



Figura 3.9 - Sistema de comunicação digital aplicado ao canal PLC

A complexidade dos circuitos de acoplamento pode variar substancialmente de acordo com o nível de tensão da rede. Enquanto a conexão com os circuitos do nível secundário de distribuição (baixas tensões, até 1kV) pode ser efetuada através de elementos relativamente simples, a injeção do sinal PLC em circuitos da rede primária (tensões até 50kV) deve cumprir com requisitos de segurança estabelecidos por normas extremamente exigentes que visam garantir a integridade, tanto dos equipamentos, como das pessoas envolvidas.

As Figuras 3.10 e 3.11 ilustram acessórios utilizados para o acoplamento do sinal PLC em distintos níveis de tensão. À esquerda podemos observar um elemento de acoplamento

capacitivo para redes de tensão secundária de distribuição e à direita um elemento projetado para a injeção do sinal em redes de tensão primária de distribuição.



Figuras 3.10 e 3.11 - Acopladores PLC para diferentes níveis de tensão

3.5.3.2. Impedância de Acesso ao Meio

Visando aumentar a eficiência da transmissão, os sistemas de comunicação convencionais procuram estabelecer um perfeito casamento de impedâncias entre os equipamentos transceptores e o meio a ser utilizado. A prerrogativa básica desta técnica reside em conhecer, ou poder controlar, tanto a impedância de entrada e saída dos transceptores, como a impedância característica do canal.

Utilizamos, por exemplo, transceptores apresentando impedâncias de entrada ou saída com 50 ohms para a transmissão através de um cabo coaxial com a mesma característica. Obtemos assim um acoplamento ideal, sem reflexões de sinal tanto no ingresso, quanto na saída do canal.

Contudo, as redes elétricas não apresentam este tipo de comportamento. Os valores de impedância característica variam com o tempo, com a carga e com a topologia da rede. Assim, podemos facilmente nos deparar com impedâncias características, cujos valores variam da unidade até milhares de ohms [4], [32], [37], [44].

Além de não conhecer a impedância de acesso – impedância característica da rede no ponto de acoplamento do sinal – ainda nos deparamos com o fato de que a impedância característica varia muito ao longo da rede, sobretudo, devido às inúmeras transições existentes ao longo do percurso.

3.5.3.3. Estudo de Caso com Propagação por Multipercursos

Para analisar os efeitos da falta de casamento de impedâncias, consideremos a transmissão de dados através da topologia elétrica apresentada na Figura 3.12.

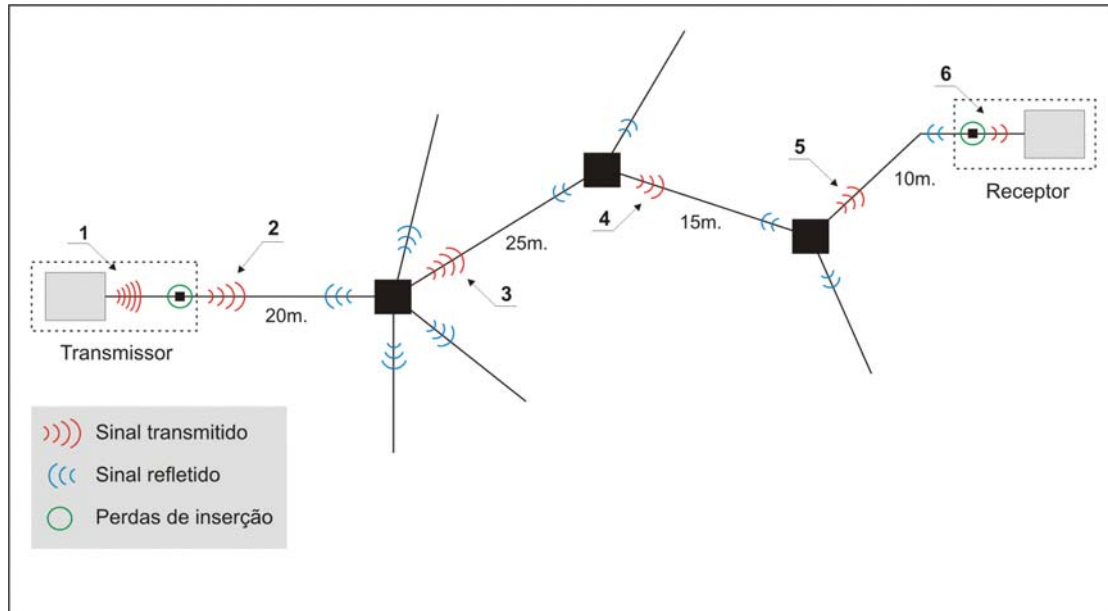


Figura 3.12 - Reflexões devido ao não-casamento de impedâncias

Para esta análise iremos considerar:

- Um percurso total de 70 metros dividido em 4 segmentos, cujas distâncias estão indicadas na figura;
- O fator de atenuação linear da rede é $\sigma = 0,1dB/m$;
- Não existe casamento de impedância entre o transmissor e a rede;
- Não existe casamento de impedância entre o receptor e a rede;
- Não existe casamento de impedância nas derivações da rede;
- A potência gerada pelo transmissor é igual a P_1 (Ponto 1);
- A perda de inserção nos Pontos 1 e 6, devido às não-idealidades dos acopladores, é igual a 6dB.¹⁰
- Após um segmento inicial (20 metros) o circuito se divide em 4 ramais;
- Após o segundo segmento (25 metros) o circuito se divide em 2 ramais;
- Após o terceiro segmento (15 metros) o circuito se divide em 2 ramais.

¹⁰ Valor típico para acopladores capacitivos em redes de baixa tensão.

Neste exemplo verificamos três fontes de atenuação do sinal transmitido:

- (i) Perda linear calculada ao longo de cada segmento do percurso de 70m.

$$P_{(i)} = \sum_{k=1}^N d_k \sigma_k$$

$$P_{(i)} = (20 \cdot 0,1) + (25 \cdot 0,1) + (15 \cdot 0,1) + (10 \cdot 0,1)$$

$$P_{(i)} = 7dB \quad (3.1)$$

- (ii) Atenuação devida à reflexão (multipercursos) nas derivações da rede:

$$P_{(ii)} = 10 \log_{10}(5) + 10 \log_{10}(3) + 10 \log_{10}(3)$$

$$P_{(ii)} = 16dB \quad (3.2)$$

- (iii) Perdas de inserção devido à não idealidade dos acopladores, tanto no transmissor quanto no receptor:

$$P_{(iii)} = 6dB + 6dB = 12dB \quad (3.3)$$

Combinando os efeitos da atenuação linear, da propagação por múltiplos percursos e, por fim, considerando as não-idealidades dos acopladores, obtemos o seguinte valor para as perdas neste cenário:

$$P_{PLC} = P_{(i)} + P_{(ii)} + P_{(iii)} \quad (3.4)$$

\therefore

$$P_{PLC} = 35dB \quad (3.5)$$

A Figura 3.13 apresenta de modo gráfico a contribuição percentual de cada um dos tipos de atenuação na composição das perdas totais para este simples cenário analisado. Notemos a importância das perdas causadas pela ocorrência de multipercursos, representando praticamente a metade da atenuação total imposta pelo canal nesta simples topologia.

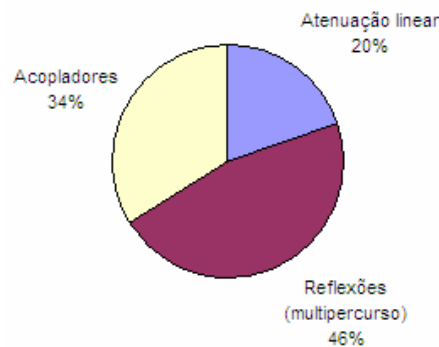


Figura 3.13 - Incidência percentual dos distintos tipos de perdas

Uma análise das perdas oriundas da reflexão dos sinais nos pontos de derivação é apresentada na Tabela 3.2, onde consideramos uma divisão uniforme do sinal refletido nas junções.

Tabela 3.2 – Impacto do multipercurso na potência do sinal PLC

Ponto	Potência	Comentário
1	P_1	Potência gerada pelo transmissor
2	$P_2 = P_1 - 6$	Perda de inserção por falta de casamento
3	$P_3 = \frac{P_2}{5} = \frac{P_1 - 6}{5}$	5 multipercursos: 4 ramos e o retorno
4	$P_4 = \frac{P_3}{3} = \frac{P_1 - 6}{15}$	3 multipercursos: 2 ramos e o retorno
5	$P_5 = \frac{P_4}{3} = \frac{P_1 - 6}{45}$	3 multipercursos: 2 ramos e o retorno
6	$P_6 = P_5 - 6 = \frac{P_1 - 276}{45}$	Perda de inserção por falta de casamento

3.5.3.4. Desvanecimento Seletivo em Frequência

Além da atenuação imposta aos sinais, conforme apresentado no estudo de caso acima, outro importante impacto da propagação através de múltiplos percursos é a alteração na função de transferência do canal. Em canais com multipercursos verificamos um comportamento da resposta em frequência conhecido como desvanecimento seletivo em frequência [48], ocasionando diferentes níveis de degradação em faixas de frequências próximas. Na Figura 3.14 mostramos dados de experimentos realizados com um sistema PLC baseado em OFDM. Podemos distinguir no gráfico várias faixas nas quais o desvanecimento em frequência é bastante seletivo, com destaque para os intervalos: (i) 7,5-12 MHz e (ii) 25-33 MHz.

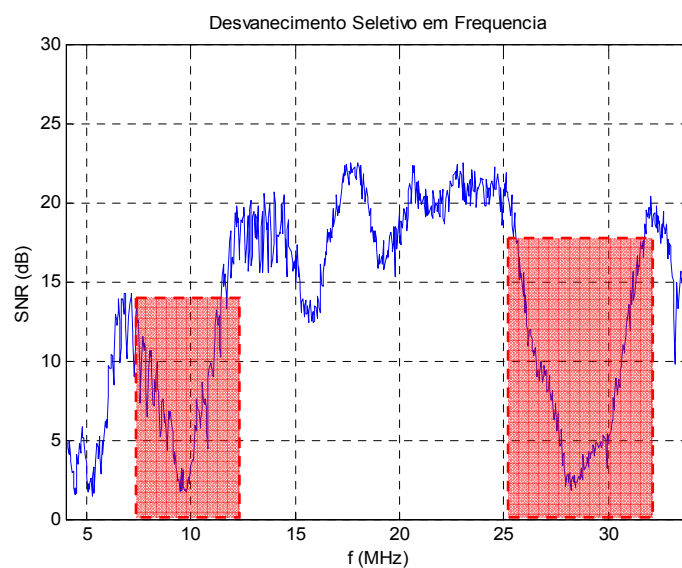


Figura 3.14 - Desvanecimento seletivo em frequência devido ao multipercurso no canal

3.5.4. Modelo de Canal PLC

Diferentes estratégias têm sido propostas para descrever as características das redes elétricas como um canal para comunicação [27], [28], [31], [32]. Constatamos, porém, que a maioria dos trabalhos publicados tem se baseado em intensas campanhas de medição em campo, evitando a análise individualizada dos componentes da rede, tais como condutores, elementos de comutação, etc.

Consideremos um canal com função de transferência $H(f)$, cuja resposta impulsiva é dada por $h(t)$. Durante a transmissão através do mesmo, um sinal de informação $s(t)$ sofrerá, por um lado, uma atenuação determinada pela própria função $h(t)$ e, por outro lado, será corrompido pelo ruído adicionado ao canal, aqui representado por $n(t)$.

Caso a transmissão ocorra com sucesso, teremos no receptor um sinal $r(t)$ que, na realidade, trata-se de uma composição entre uma versão atenuada e/ou distorcida do sinal original, juntamente com o ruído adicionado durante a transmissão. A expressão 3.6 representa a transmissão através do canal com resposta impulsiva $h(t)$, onde $*$ denota a convolução.

$$r(t) = h(t) * s(t) + n(t) \quad (3.6)$$

Para a correta detecção, o fator crucial é a razão sinal-ruído (SNR) do sinal no receptor, dado que esta determina a probabilidade de erro de bit (BER).

O valor da SNR no receptor pode ser calculado sempre que dispusermos das seguintes informações:

- Característica da atenuação imposta pelo canal na faixa de frequências de interesse;
- Perfil das interferências às quais a transmissão esta sujeita;

Segundo a expressão 3.6, a única variável livre é a própria amplitude do sinal a ser transmitido. Contudo, na prática, este valor costuma ser limitado pelas normas aplicáveis para cada sistema de comunicação. A Figura 3.15 mostra um modelo genérico de um canal de comunicações amplamente utilizado na engenharia de sistemas de comunicação.

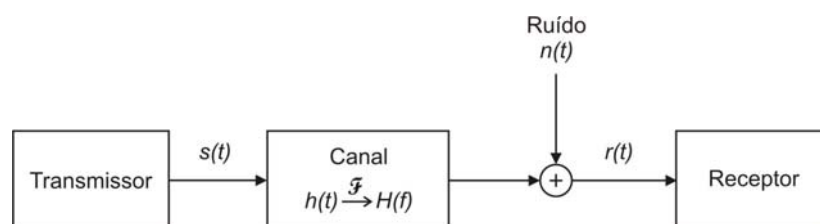


Figura 3.15 - Modelo genérico para um canal de comunicação

Meios criados especialmente para a transmissão de sinais, como as fibras óticas, ou os cabos coaxiais amplamente utilizados atualmente, apresentam funções de transferências que são, ou determinadas a priori¹¹, ou obtidas com relativa facilidade, dada à própria natureza da concepção do meio.

Canais de comunicação não projetados, ou não especialmente desenvolvidos para este fim, devem ter suas características levantadas através de atividades de medição em campo. Este método foi adotado na caracterização de vários meios, como o canal rádio-móvel para diversas aplicações, por exemplo. Para a caracterização do canal PLC, a estratégia não foi diferente.

Considerando os aspectos apresentados no decorrer deste Capítulo, apresentamos na Figura 3.16 um modelo de canal mais adequado ao ambiente PLC. Neste modelo o sinal é transmitido através de um filtro linear com resposta impulsiva novamente representada por $h(t)$. Após esta etapa, os ruídos e as interferências apresentados anteriormente são adicionados ao sinal filtrado, previamente à chegada do mesmo ao receptor.

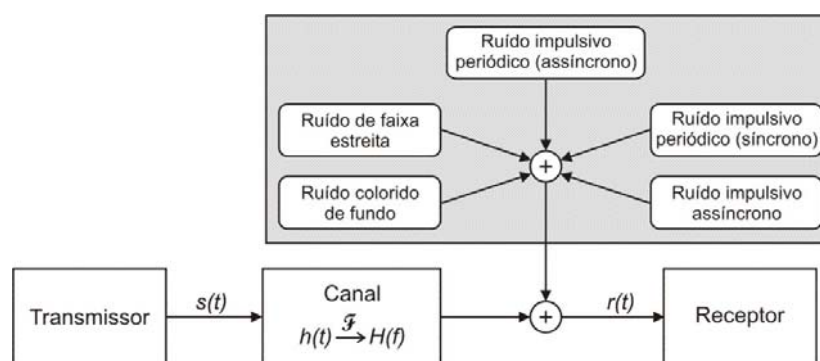


Figura 3.16 - Modelo para o canal PLC apresentando distintos tipos de ruído

Os estudos apresentados em [27], [28], [31], [32] mostram modelos matemáticos, tanto para a função $h(t)$, quanto para os fenômenos interferentes aqui considerados.

3.6. Conclusões

As principais características das redes elétricas do ponto de vista da utilização das mesmas para fins de telecomunicações foram abordadas no presente Capítulo.

Inicialmente apresentamos o modelo típico de um sistema de comunicação digital, destacando os principais componentes do mesmo, dentre estes, o canal de comunicação.

¹¹ O meio já é projetado tendo em vista uma determinada função de transferência para a faixa de frequências de interesse.

Utilizando como referência literaturas clássicas na análise de sistemas de energia elétrica, apresentamos uma descrição geral destas estruturas, diferenciando cada nível de tensão no que tange a sua função, bem como suas características gerais. Vistos estes detalhes, abordamos cada nível de tensão, tratando das possibilidades de utilização dos mesmos para fins de telecomunicações.

Tratados estes aspectos gerais das redes de transmissão e de distribuição de energia elétrica, passamos a analisar as características específicas das mesmas como um canal para comunicação. Distintos fatores foram considerados, como o perfil da atenuação imposta aos sinais, bem como as formas de ruídos e interferências presentes neste meio.

Dedicamos especial atenção às características dos fenômenos impulsivos, dado o impacto dos mesmos no desempenho dos sistemas PLC. Adicionalmente, tratamos com detalhes das características da propagação por múltiplos percursos, responsável pela seletividade em frequência imposta pelo canal PLC.

Finalmente, apresentamos uma breve abordagem sobre um modelo de canal descrito em estudos recentes e amplamente citado nos trabalhos realizados com foco neste tema.

Capítulo 4

4. OFDM

4.1. Introdução

Conforme apresentamos nos Capítulos anteriores, as redes de distribuição de energia elétrica representam um canal de comunicação bastante hostil. Do ponto de vista da transmissão de sinais, as características destas redes tendem a variar com o tempo, com a topologia e o estado das linhas e ainda com o perfil das cargas conectadas às mesmas.

Uma das possíveis soluções a serem empregadas para superar os problemas encontrados neste canal baseia-se na utilização de um robusto esquema de modulação. Além de prover uma importante ferramenta para combater os principais obstáculos apresentados pelo canal, como o efeito de multipercurso ou o desvanecimento seletivo em frequência, uma técnica de modulação bem empregada pode minimizar o impacto de outros efeitos impostos pelo meio de comunicação, como a atenuação e as variações de fase, simplificando a estrutura do receptor.

OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) ou Multiplexação por Divisão em Frequências Ortogonais, também conhecida na literatura como modulação DMT (*Discrete Multi Tone*) ou Multi Tons Discretos, é uma técnica que encontra suas bases no conceito da modulação FDM (*Frequency Division Multiplexing*) [1], na qual múltiplos sinais são transmitidos de modo simultâneo utilizando diferentes portadoras.

Técnicas de modulação FDM são amplamente utilizadas em vários sistemas de comunicação já consagrados, onde o espectro reservado para uma determinada aplicação é dividido em uma série de sub-canais. A técnica OFDM explora ainda mais este conceito de divisão em sub-canais. Em geral o transmissor de um sistema OFDM utiliza um grande número de sub-portadoras ortogonais. Sistemas modernos empregam centenas, ou mesmo milhares de sub-portadoras para compor o chamado feixe OFDM.

Com a aplicação do conceito de ortogonalidade todas as sub-portadoras OFDM são estreitamente espaçadas no espectro, fazendo com que cada uma delas represente, na verdade, uma portadora de banda estreita. Esta característica, associada ao emprego de avançadas técnicas de modulação digital em cada uma das sub-portadoras, é capaz de gerar um sinal extremamente robusto às interferências e aos vários aspectos degradantes impostos pelo canal de comunicação.

Devido às vantagens acima citadas, bem como a uma série de outros aspectos que serão abordados no transcurso deste Capítulo, a técnica de modulação OFDM tem sido adotada em inúmeros padrões de sistemas de comunicação, conforme veremos a seguir.

4.2. Histórico

O conceito da transmissão de dados com canais paralelos através da utilização de técnicas de multiplexação por divisão em frequência (FDM) remonta à metade da década de 60 quando, para aplicações militares, alguns sistemas de comunicação foram implementados com base neste princípio.

Embora existam algumas divergências entre os textos que tratam do histórico e da evolução de sistemas OFDM, todos parecem ser unânimes ao citar a seqüência de desenvolvimentos apresentados na Tabela 4.1, a seguir.

Tabela 4.1 - Cronologia resumida do desenvolvimento dos sistemas OFDM

Ano	Origem / Responsável	Contribuição
1957	Sistema Collins Kineplex	Primeiro MODEM RF com multi-portadoras
1966	Chang (Bell Laboratories)	Utilização de multi-portadoras ortogonais e patente OFDM
1968	Chang (Bell Laboratories)	Desempenho e limitação dos sistemas OFDM
1971	Weinstein & Ebert	Utilização da FFT e a criação do Prefixo Cíclico (CP)
1980-90	ADSL, HDSL, VDSL	DMT para aplicações na telefonia fixa
1995	DAB (ETSI ETS 300 401)	Primeiro padrão baseado em OFDM (Rádio Digital)
1997	DVB-T (ETSI ETS 300 744)	Padrão de radiodifusão de vídeo digital
1999	HIPERLAN/2 (Europa)	Padrão WLAN (Wireless Local Area Network)
1999	IEEE 802.11a (EUA)	Padrão WLAN (Wireless Local Area Network)
2001	IEEE 802.16 (EUA)	Padrão WLAN (Wireless Local Area Network)

Predecessor das futuras e complexas aplicações da técnica de modulação OFDM, o projeto Kineplex [18], concluído em 1957, foi responsável pelo desenvolvimento e pela implementação do primeiro MODEM de rádio frequência capaz de separar uma seqüência original de dados em várias seqüências paralelas, utilizando cada uma destas fontes de informação para modular uma diferente portadora. Tratava-se do início da aplicação das técnicas de modulação conhecidas por empregar múltiplas portadoras (*Multi Carrier Modulation* – MCM).

Apenas uma década mais tarde o conceito de múltiplas portadoras seria revelado com maior profundidade e importância. Em 1966, Robert W. Chang, do Bell Laboratories, nos Estados Unidos, após ingressar com um registro de patente [19] sobre o conceito, apresenta o

primeiro artigo [20] com a análise e a proposição teórica da utilização de múltiplas portadoras, no qual propunha que, uma vez que a condição de ortogonalidade entre estas fosse satisfeita, os espectros das mesmas poderiam ser sobrepostos, aumentando de modo significativo a eficiência espectral do sistema. Surge assim o termo OFDM.

Dois anos mais tarde, Chang publicou outro estudo [21] no qual analisava de modo teórico o desempenho de um sistema OFDM quando sujeito a uma série de fatores degradantes encontrados em aplicações reais. Através do familiar critério do olho aberto para o sinal recebido, Chang neste trabalho preocupou-se fundamentalmente com três fatores: os problemas de sincronização no momento da amostragem dos sinais, o deslocamento de fase das portadoras e, sobretudo, a problemática envolvendo as características não-ideais dos filtros necessários para gerar as sub-portadoras OFDM. Este trabalho demonstra um especial interesse do autor em criar uma ferramenta que facilitasse o projeto dos filtros a serem utilizados, aspecto que – naquele momento – constituía o principal fator limitante para a aplicação prática de sistemas OFDM.

Weinstein e Ebert foram os primeiros a sugerir [22] o uso da Transformada Discreta de Fourier (*Discrete Fourier Transform* – DFT)¹² para a geração e a recepção dos sinais OFDM. Além de eliminar a inconveniente necessidade dos bancos de osciladores analógicos no transmissor, bem como dos desmoduladores coerentes no receptor, a utilização da Transformada Discreta de Fourier viria a permitir uma fácil implementação de sistemas OFDM através da execução computacional de algoritmos de Transformada Rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform* – FFT)¹³. A proposição de Weinstein e Ebert permitiu que sistemas OFDM fossem totalmente implementados por meio de métodos computacionais e de técnicas de processamento digital de sinais.

Contudo, a integração do conceito de ortogonalidade proposto por Chang com o uso das técnicas de DFT sugeridas por Weinstein e Ebert tornou-se economicamente viável apenas no final da década de 80, com os avanços na tecnologia eletrônica e de circuitos integrados. Vencida esta barreira econômica, surgem várias aplicações comerciais baseadas nesta técnica de modulação.

4.3. Aplicações

O final da década de 80 e os primeiros anos da década de 90 testemunharam o aparecimento de uma série de aplicações de sistemas OFDM¹⁴ na composição de soluções de transmissão de dados através dos circuitos da rede pública de telefonia comutada (*Public Switched Telephony Network* - PSTN). Diversas variações da tecnologia DSL (*Digital*

¹² Assim como o uso de sua operação inversa (*Inverse Discrete Fourier Transform* – IDFT)

¹³ Assim como o uso de sua operação inversa (*Inverse Fast Fourier Transform* – IFFT)

¹⁴ Por vezes utilizando outra nomenclatura: DMT (*Discrete Multi Tone*)

Subscriber Line), como ADSL (*Asymmetric Digital Subscriber Line*), HDSL (*Digital Subscriber Line*) e VDSL (*Digital Subscriber Line*) foram concebidas, alcançando taxas de transmissão que variavam desde 2 até 50 Mbps, dependendo da distância e da qualidade do circuito em questão.

4.3.1. DAB – Digital Audio Broadcasting

A primeira aplicação comercial de um sistema baseado em OFDM foi para a radiodifusão, através da criação das “rádios-digitais” (*Digital Audio Broadcasting – DAB*) [51]. Tais sistemas surgiram com o intuito de substituir as tradicionais difusoras FM, provendo sinais de áudio de alta qualidade e agregando novos serviços de informação. O desenvolvimento dos sistemas de radiodifusão digital teve início em 1987 e o primeiro serviço foi ao ar no Reino Unido e na Suécia em 1995 após a criação, pela ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*), do padrão ETSI ETS 300 401 [23], o qual se tornou – mundialmente – o primeiro padrão de um serviço de telecomunicações baseado em OFDM.

A principal motivação do uso de OFDM nos sistemas DAB foi a sua tolerância aos efeitos de multipercurso, uma vez que estes sistemas podem potencialmente operar em distâncias bastante longas (desde 20 até 100 km), ocasionando Interferência Intersimbólica (*Inter-Symbol Interference – ISI*) [1], [7], [70] que, como abordaremos no decorrer deste Capítulo, prejudica a composição do sinal no receptor.

Também mostraremos no transcorrer do texto que nos sistemas de transmissão tradicionais – baseados em apenas uma portadora – os efeitos da ISI são normalmente solucionados através do uso de equalização adaptativa. No entanto a implementação de equalizadores adaptativos é bastante complexa, devido principalmente ao esforço computacional necessário. Esta complexidade aumenta, ainda mais, na medida em que se tenha que equalizar sinais que sofrem ISI com duração de diversos períodos de símbolo.

O fato de a técnica OFDM dividir o sinal a ser transmitido em várias seqüências paralelas reduz significativamente o período dos símbolos – como veremos, de maneira inversamente proporcional ao número de sub-portadoras – diminuindo, ou mesmo eliminando, os efeitos degradantes do multipercurso.

A taxa de transmissão de dados alcançada pelo padrão de DAB da ETSI varia entre 0,6 e 1,8 Mbps, dependendo da complexidade da técnica de correção de erros empregada, através do uso de algoritmos de FEC (*Forward Error Correction*). No sistema DAB o número de canais de áudio gerados depende basicamente da qualidade de áudio, bem como do nível de robustez¹⁵ desejados.

¹⁵ Uma transmissão mais robusta demanda maior proporção de FEC, reduzindo a taxa útil de bits transmitidos.

Para que tenhamos uma idéia quantitativa, 64 canais de áudio com qualidade similar a uma conversação telefônica (24kbps) podem ser disponibilizados, ao passo que apenas três canais de áudio com qualidade similar a um CD (256kbps) seriam suportados por um sistema DAB baseado na referida normal da ETSI.

O padrão DAB da ETSI prevê quatro modos de transmissão, cujos parâmetros referentes à modulação OFDM são apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Parâmetros do sistema DAB (ETS 300 401) para cada modo de transmissão

Parâmetro	Modo de Transmissão			
	I	II	III	IV
Banda	1,536 MHz	1,536 MHz	1,536 MHz	1,536 MHz
Modulação	DQPSK	DQPSK	DQPSK	DQPSK
Frequências	≤ 375 MHz	≤ 1,5 GHz	≤ 3 GHz	≤ 1,5 GHz
Sub-Portadoras	1536	394	192	768
Duração do Símbolo	1000 μs	250 μs	125 μs	500 μs
Duração do CP	246 μs	62 μs	31 μs	123 μs
Duração Total do Símbolo	1246 μs	312 μs	156 μs	623 μs
Cobertura Máxima	96 km	24 km	12 km	48 km

4.3.2. DVB – Digital Video Broadcasting

O desenvolvimento dos padrões mundiais para radiodifusão de vídeo digital (*Digital Video Broadcasting - DVB*) [52] teve início em 1993. Baseado no método de compressão MPEG-2¹⁶, estes sistemas do tipo ponto-multiponto são capazes de transmitir conteúdo de áudio e vídeo de alta qualidade. De modo similar ao sistema DAB, as tecnologias DVB surgiram com o intuito de substituir os tradicionais sistemas analógicos de difusão de sinais de TV, provendo como diferencial a possibilidade da integração de serviços de áudio, vídeo e dados.

A ETSI publicou em 1997 o primeiro padrão de DVB através da norma ETSI ETS 300 744 [24]. Este padrão prevê distintos mecanismos e modos de transmissão, visando cobrir uma vasta gama de aplicações, dentre estas: TV via satélite (DVB-S), sistemas de TV a Cabo (DVB-C) e sistemas para a tradicional aplicação terrestre (DVB-T).

¹⁶ MPEG-2 – padrão de codificação tipicamente utilizado para gravação de áudio e vídeo em vários tipos de mídias, assim com para a radiodifusão. Criado pelo MPEG (*Moving Pictures Experts Group*) e publicado através da norma ISO/IEC 13818 em 1994 (*International Organization for Standardization - ISO*), (*International Electrotechnical Commission - IEC*).

Os parâmetros da camada física¹⁷ de cada um dos três sistemas acima apresentados são otimizados de acordo com o canal a ser utilizado. Importante ressaltar que nem todos os sistemas DVB utilizam OFDM. Para a transmissão via satélite, por exemplo, (DVB-S) uma única portadora é utilizada. Neste caso o emprego de apenas uma portadora é motivado pelas características do meio onde, devido às distâncias envolvidas, grandes deslocamentos Doppler são verificados, podendo afetar de modo desigual múltiplas portadoras, caso utilizadas.

Esta mesma estratégia não permanece válida para sistemas terrestres onde, pela ocorrência de multipercurso, o desempenho de transmissões com alta velocidade¹⁸ baseados em apenas uma portadora é severamente afetado. Por esta razão, a modulação OFDM foi escolhida para as aplicações de DVB terrestres.

Os parâmetros de camada física do padrão DVB-T são bastante similares aos do sistema DAB ora apresentados, no sentido de que a transmissão OFDM emprega um grande número de sub-portadoras, visando mitigar ou reduzir os efeitos do multipercurso. O padrão DVB-T permite dois modos de transmissão, dependendo do número de sub-portadoras utilizadas. A Tabela 4.3 apresenta os parâmetros básicos para ambos os modos do padrão DVB-T [52].

Tabela 4.3 - Parâmetros do sistema DVB-T (ETS 300 744) para cada modo de transmissão.

Parâmetro	Modo de Transmissão	
	Modo 2k	Modo 8k
Banda	7,61 MHz	7,61 MHz
Modulação	QPSK 16-QAM 64-QAM	QPSK 16-QAM 64-QAM
Sub-Portadoras	1705	6817
Duração do Símbolo	896 μ s	224 μ s
Espaço (Sub-Portadoras)	1,116 kHz	4,464 kHz

4.3.3. WLAN – Wireless Local Area Networks

Devido à natureza de suas aplicações, os sistemas DAB e DVB apresentam uma característica intrinsecamente unidirecional, com os sinais gerados por uma estação central sendo transmitidos até os receptores. Deste modo, seja visando maior desempenho, qualidade ou cobertura, qualquer alteração nos parâmetros de modulação terá impacto de modo igualitário em todos os receptores. Se o objetivo for, por exemplo, garantir a melhor robustez

¹⁷ O modelo de referência OSI (*Open Systems Interconnection Reference Model*) compreende uma estrutura hierárquica de sete camadas que define os requisitos de comunicação, permitindo a interoperabilidade e a integração entre sistemas computacionais que operam em rede, independentemente do fabricante dos mesmos.

¹⁸ Ou seja, com períodos de símbolo muito curtos.

possível, os parâmetros deverão ser ajustados considerando as condições estáticas do pior receptor e este efeito limita a flexibilidade e o potencial oferecidos pelo esquema OFDM.

No entanto, se esta potencialidade de ajuste dos parâmetros da modulação puder ser conjugada com um sistema bidirecional, no qual um protocolo de comunicações forneça ao transmissor informações específicas sobre as características do canal e a qualidade do sinal recebido por cada um dos elementos receptores, duas importantes melhorias podem ser agregadas ao sistema:

- A taxa de transmissão para todos os usuários pode ser otimizada de acordo com as características dinâmicas do canal para os piores receptores;
- Para o caso de sistemas do tipo multi-usuário, através do monitoramento das características do canal para cada receptor, o sistema pode ajustar os parâmetros da transmissão OFDM de modo a alcançar, para um determinado usuário, a melhor condição de transmissão a cada instante, provendo um tratamento realmente individualizado para cada receptor.

Uma das principais aplicações de sistemas de comunicação bidirecionais baseados em OFDM inclui os sistemas de redes locais sem fio (*Wireless Local Area Networks* – WLANs).

4.3.3.1. HiperLAN/2

Com o intuito de suprir as crescentes necessidades na área de comunicações móveis, sobretudo visando prover uma alternativa de infra-estrutura para dar suporte ao rápido crescimento das comunicações multimídia através da Internet, a ETSI em 1997 iniciou as pesquisas que levariam, no ano 2000, à criação do padrão HiperLAN/2 [25] (*High Performance Radio Local Area Network*).

Operando na faixa de 5,2 GHz o sistema HiperLAN/2 é capaz de criar redes sem fio com taxas de transmissão de dados de até 54 Mbps, sendo totalmente compatíveis com as redes de dados fixas baseadas no padrão Ethernet (ISO 802.3) ou Token Ring (ISO 8802.5), ambas amplamente difundidas atualmente.

Por se tratar de um sistema do tipo “orientado à conexão” (*connection oriented*), o protocolo do padrão HiperLAN/2 permite que, para cada usuário da rede, possa ser designada uma diferente classificação de qualidade de serviço (*Quality of Service* - QoS), garantindo um tratamento individualizado no que tange à alocação dos recursos de transmissão do sistema. Esta possibilidade de controle e de alocação de diferentes níveis de QoS permite que vários tipos de serviço possam ser prestados através desta tecnologia. Transmissões de voz, dados e vídeo podem ser priorizados de acordo com as necessidades específicas de cada serviço, garantindo requisitos como taxa de transmissão, atraso e robustez. A Tabela 4.4 apresenta os parâmetros de camada física do padrão HiperLAN/2.

Tabela 4.4 - Parâmetros do padrão HiperLAN/2.

Parâmetro	Valor
Banda	16,25 MHz
Modulação	BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM
Sub-Portadoras (dados/piloto)	48 / 4
Duração do Símbolo	3,2 μ s
Duração do CP	0,8 μ s
Duração Total do Símbolo	4,0 μ s
Espaço (Sub-Portadoras)	312,5 kHz

4.3.3.2. IEEE 802.11

Mais do que um padrão, a série 802.11 denota uma família de normas para sistemas WLAN criadas pelo IEEE (*Institute of Electrical and Electronic Engineers*). Este conjunto compreende vários padrões baseados em distintas técnicas de modulação, dos quais os mais populares – devido à enorme difusão comercial – são as versões 802.11a, 802.11b e 802.11g, conhecidas também pela sigla Wi-Fi (*Wireless Fidelity*).

As versões 802.11b e 802.11g operam em 2,4 GHz, faixa de frequências livre de licença¹⁹, ao passo que a versão 802.11a utiliza a faixa de 5GHz, passível de licenciamento. Especificamente na Europa, onde os comitês reguladores esperavam poder adotar o padrão HiperLAN/2 para este tipo de aplicação, a faixa dos 5GHz não havia sido liberada para os padrões da IEEE. Contudo, a falta de adoção do padrão europeu por parte da indústria fez com que, em 2002, o uso do padrão 802.11a fosse liberado na faixa dos 5GHz.

Dentre estes padrões citados, as variações 802.11a e 802.11g utilizam OFDM.

¹⁹ Na verdade estas faixas são livres de licença nas áreas de atuação do FCC (*Federal Communications Commission*), que compreendem basicamente os EUA e o Canadá.

4.4. Princípios Básicos da Modulação OFDM

Conforme citamos anteriormente, a técnica de modulação OFDM é muito similar às já conhecidas e amplamente utilizadas técnicas de multiplexação por divisão em frequência (FDM). Embora ambas utilizem o mesmo conceito, cuja base reside na utilização de várias portadoras para a transmissão, na técnica OFDM estas sub-portadoras são empregadas de uma maneira muito mais controlada, permitindo uma maior eficiência espectral no uso do canal.

Um exemplo simples de aplicação da técnica FDM consiste no uso de diferentes frequências para cada estação de radiodifusão em FM. Todas as estações operam de maneira simultânea, contudo, pelo fato de utilizarem diferentes portadoras, não se interferem mutuamente. Adicionalmente, os sinais de cada emissora são limitados em frequência e suficientemente espaçados entre si, de modo a evitar qualquer tipo de sobreposição no domínio da frequência. No receptor, após a detecção através de um filtro passa-faixa devidamente sintonizado de modo a rejeitar quaisquer sinais fora da banda de interesse para uma determinada estação, a onda portadora é desmodulada e a informação original recuperada.

Nesta aplicação convencional cada emissora transmite através de uma frequência particular, utilizando de maneira clara e explícita o conceito de multiplexação por divisão em frequências para manter uma separação espectral entre as portadoras, simplificando a estrutura do receptor. Não existe, no entanto, nenhum tipo de coordenação ou de sincronização entre estas distintas portadoras.

Em um sistema de transmissão OFDM os sinais de informação de cada portadora são especialmente combinados entre si de modo a compor um único feixe de dados.

Todas as portadoras de um sistema OFDM são sincronizadas mutuamente tanto no tempo quanto na frequência, permitindo que as interferências entre as mesmas sejam cuidadosamente controladas. Embora se sobreponham no tempo, devido à natureza ortogonal da modulação, não ocorre a chamada Interferência Inter-Portadoras (*Inter Carrier Interference* - ICI) no domínio da frequência.

De modo a evitar o uso de filtros complexos no receptor, sistemas baseados em FDM necessitam de uma grande banda-de-guarda entre duas portadoras subseqüentes, reduzindo significativamente a eficiência espectral do mesmo.

Porém, ao garantir a ortogonalidade entre as portadoras utilizadas, a solução OFDM reduz sensivelmente as bandas-de-guarda, aumentando a eficiência espectral da transmissão.

É justamente este comportamento conjunto e coordenado entre as portadoras que permite que, em um sistema OFDM, as mesmas sejam consideradas, ao invés de meras portadoras individuais, *sub-portadoras* de um sistema organizado ou composto.

Todos os sistemas de comunicação utilizam um esquema de modulação para mapear os sinais da fonte de informação em uma forma de onda que possa ser convenientemente transmitida através de um determinado meio. Uma grande variedade de métodos de modulação tem sido desenvolvida, tendo suas características em consonância com o tipo do sinal a ser transmitido, seja este de natureza analógica ou proveniente de uma fonte digital.

Algumas técnicas populares para a transmissão de sinais analógicos incluem: modulação em frequência (*Frequency Modulation* – FM), modulação em amplitude (*Amplitude Modulation* – AM), modulação em fase (*Phase Modulation* – PM), *Single Side Band* (SSB), *Vestigial Side Band* (VSB) e *Double Side Band Supressed Carrier* (DSBSC) [1].

Já para sistemas de comunicação digitais, algumas das técnicas mais conhecidas são: *Amplitude Shift Keying* (ASK), *Frequency Shift Keying* (FSK), *Phase Shift Keying* (PSK) e *Quadrature Amplitude Modulation* (QAM) [1], [9].

Considerando a inexistência de qualquer tipo de relação²⁰ entre as portadoras utilizadas em um sistema FDM, cada sinal pode ser modulado através de um método distinto. De fato, observamos que algumas estações transmitem em FM, enquanto outras operam em AM, sendo que poderíamos ter ainda um sistema digital operando, por exemplo, em FSK.

Em um feixe OFDM todas as sub-portadoras são especialmente combinadas entre si de modo que se restringe para esta aplicação apenas a utilização de técnicas de modulação digital. A composição de um símbolo OFDM pode ser visto como a combinação de um grande número de portadoras de baixa capacidade operando em paralelo. Todas as sub-portadoras são sincronizadas tanto no tempo como na frequência, formando um bloco contíguo no espectro, o chamado feixe OFDM.

4.4.1. O Princípio da Ortogonalidade

Nos sistemas de comunicação a condição de ortogonalidade entre os sinais a serem transmitidos representa uma importante propriedade. Uma vez satisfeita, esta característica permite que múltiplos sinais sejam transmitidos através de um canal comum sem interferências mútuas, possibilitando a correta recepção dos mesmos. A perda da ortogonalidade durante a transmissão resulta em uma mistura indesejável dos sinais, causando uma degradação no processo de comunicação.

Duas funções matemáticas são ditas ortogonais entre si quando o produto interno entre elas é nulo. Mostraremos a seguir como verificar, para o caso de sinais de comunicação representados por meio de funções, esta condição de ortogonalidade tanto no domínio do tempo como no domínio da frequência.

²⁰ Exceto a separação espectral entre as mesmas.

4.4.1.1. Domínio do Tempo (Sinais Contínuos)

Consideremos um conjunto de sinais $\{\psi(t)\}$, sendo $\psi_i(t)$ o i -ésimo elemento deste conjunto. Do ponto de vista matemático, dois sinais $\psi_m(t)$ e $\psi_n(t)$ pertencentes ao conjunto $\{\psi(t)\}$ são ditos **ortogonais no intervalo (a,b)** caso a condição apresentada na equação 4.1 seja atendida [7].

$$\int_a^b \psi_k(t) \psi_m^*(t) dt = \begin{cases} 0, & k \neq m \\ C, & k = m \end{cases} \quad (4.1)$$

Sendo:

$\psi_m^*(t)$ = complexo conjugado de $\psi_m(t)$

C = um valor real

A equação mostra que, para sinais ortogonais, o resultado da multiplicação e da posterior integração dos mesmos através de um período de símbolo deve ser igual à zero.

Adicionalmente, casos os sinais atendam à condição estabelecida na equação 4.2, os mesmos são ditos **normalizados no intervalo (a,b)** [7].

$$\int_a^b |\psi_k(t)|^2 dt = \int_a^b |\psi_m(t)|^2 dt = 1 \quad (4.2)$$

Caso os dois sinais sob análise atendam a ambas as condições de ortogonalidade e de normalização no intervalo em questão, ambos são ditos **ortonormais em (a,b)** .

Um conjunto de sinais $\{\psi(t)\}$ é considerado uma **base ortonormal** caso todos os possíveis pares de sinais $\psi_k(t)$, $\psi_m(t)$ pertencentes ao conjunto atendam às condições estabelecidas pelas equações 4.1 e 4.2 [7].

Vários esquemas de multiplexação utilizados em sistemas de transmissão de dados são inerentemente ortogonais. O método de transmissão por multiplexação no tempo (*Time Division Multiplexing* – TDM) permite a transmissão de vários sinais de informação através de um canal em comum por meio da alocação de intervalos temporais únicos de acesso ao canal para cada uma das fontes de informação. Durante cada um destes intervalos apenas o sinal proveniente de uma determinada fonte é transmitido, evitando qualquer tipo de interferência entre sinais provenientes de distintas fontes. Devido a esta estratégia, segundo a condição estabelecida na equação 4.1, os sinais gerados por um sistema TDM são intrinsecamente ortogonais entre si.

A Figura 4.1 mostra dois sinais $s_1(t)$ e $s_2(t)$ gerados por um sistema TDM.

$$s_1(t) = 1; \quad 3 \leq t \leq 5$$

$$s_2(t) = 1; \quad 6 \leq t \leq 8$$

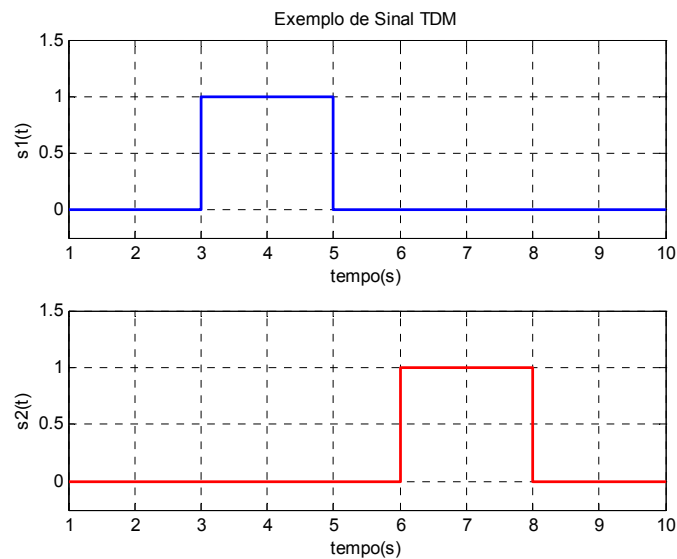


Figura 4.1 - Exemplo de sinais TDM

Aplicando a equação 4.1 nos sinais acima descritos obtemos um resultado igual a zero, satisfazendo assim a condição de ortogonalidade entre os mesmos.

4.4.1.2. Domínio do Tempo (Sinais Discretos)

Apresentamos nesta seção, para o caso de sinais discretos no tempo, a representação da base ortonormal definida previamente neste Capítulo.

Seguindo uma analogia com o caso anterior, dois sinais discretos no tempo, $\phi_k[n]$ e $\phi_m[n]$ pertencentes ao conjunto $\{\phi[n]\}$, são ditos ortogonais no intervalo (N_1, N_2) caso satisfaçam a seguinte condição:

$$\sum_{n=N_1}^{N_2} \phi_k[n] \phi_m^*[n] = \begin{cases} 0, & k \neq m \\ A_k, & k = m \end{cases} \quad (4.3)$$

Sendo:

$\phi_m^*[n]$ = complexo conjugado de $\phi_m[n]$

A_k = um valor real

Além de satisfazer a esta condição, caso os valores das constantes A_k e A_m na equação 4.3 sejam iguais a 1 para qualquer par de sinais $\phi_k[n]$, $\phi_m[n]$ pertencentes ao conjunto $\{\phi[n]\}$, este conjunto é considerado uma base ortonormal.

4.4.1.3. Domínio da Freqüência

Consideremos ainda a base ortonormal $\{\psi(t)\}$ definida na seção anterior. Aplicando a propriedade da linearidade da Transformada de Fourier [3] na equação 4.1 temos:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \Psi_m(f) \Psi_n^*(f) df = \begin{cases} 0, & m \neq n \\ C, & m = n \end{cases} \quad (4.4)$$

Sendo:

$\Psi(f)$ = transformada de Fourier de $\psi_k(t)$

$\Psi_k^*(f)$ = complexo conjugado de $\Psi(f)$

C = um valor inteiro real

De maneira análoga ao exemplo exposto anteriormente, os sinais gerados pela maioria dos sistemas FDM são ortogonais entre si. Neste caso dizemos que existe uma ortogonalidade no domínio da freqüência, dada a existência das chamadas bandas-de-guarda que previnem qualquer tipo de sobreposição entre os espectros dos mesmos.

Na presença destas bandas-de-guarda a aplicação da condição estabelecida na equação 4.4 apresentará um resultado nulo, confirmando a ortogonalidade entre os sinais transmitidos.

4.4.1.4. O Conceito de Ortogonalidade e as Sub-Portadoras OFDM

Embora os dois exemplos utilizados acima apresentem claramente a geração de sinais ortogonais entre si, tanto do domínio temporal como no da freqüência, o termo OFDM é reservado para uma forma particular de sistemas FDM.

As sub-portadoras de um sistema OFDM têm seu espectro comprimido da forma mais otimizada possível – conforme o próprio limite teórico aplicável – sem prejuízo, porém, da importante característica de ortogonalidade entre as mesmas.

Os sinais que compõem o feixe OFDM são formados através da soma de inúmeras ondas sinusoidais, cada uma destas correspondendo a uma sub-portadora. A equação 4.5 apresenta as sub-portadoras não-moduladas²¹ de um sistema OFDM:

$$s_k(t) = \begin{cases} \text{sen}(2\pi k f_0 t), & 0 \leq t \leq T_s \\ 0, & t \geq T_s \end{cases} \quad k = 1, 2, \dots, M \quad (4.5)$$

Sendo:

²¹ Sinal original em banda-base

f_0 = espaçamento entre as sub-portadoras

M = número de sub-portadoras

T_s = período do símbolo OFDM

Considerando que se tratam de sinais em banda-base e que a sub-portadora de maior frequência é dada por Mf_0 , concluímos que a largura de banda do feixe OFDM será também igual a Mf_0 .

A frequência em banda-base de cada sub-portadora é cuidadosamente escolhida de modo a representar um valor múltiplo inteiro da frequência²² do símbolo OFDM, garantindo assim que todas as sub-portadoras tenham um número inteiro de ciclos durante um intervalo de símbolo, conforme consta na equação 4.6.

$$f_0 = \frac{1}{T_s} \quad (4.6)$$

Pode-se demonstrar facilmente que a condição de ortogonalidade estabelecida em 4.1 é satisfeita por qualquer par de sub-portadoras definidas em 4.5, dado que se trata da multiplicação e da posterior integração, em um período de símbolo, de dois sinais sinusoidais cujas frequências estão relacionadas através de um número inteiro, ou seja, sinais sinusoidais harmonicamente relacionados.

A Figura 4.2 mostra de modo gráfico o resultado da aplicação da equação 4.1 em duas sub-portadoras OFDM geradas a partir de 4.5, sendo:

$$\begin{aligned} k &= 1 \quad e \quad 2 \\ f_0 &= \frac{1}{2} \text{ (hz)} \\ T_s &= \frac{1}{f_0} = 2\pi \text{ (s)} \\ s_1(t) &= \text{sen}(t); \quad 0 \leq t \leq T_s \\ s_2(t) &= \text{sen}(2t); \quad 0 \leq t \leq T_s \\ &\quad \vdots \\ s_3(t) &= \text{sen}(t)\text{sen}(2t); \quad 0 \leq t \leq T_s \end{aligned}$$

A representação gráfica de $s_3(t)$ mostrada na Figura 4.2 não deixa dúvidas de que a integração da mesma durante um período de símbolo terá um resultado igual à zero, devido à simetria com relação ao eixo das abscissas.

²² Na verdade se escolhe um valor que seja múltiplo inteiro do inverso do período do símbolo OFDM

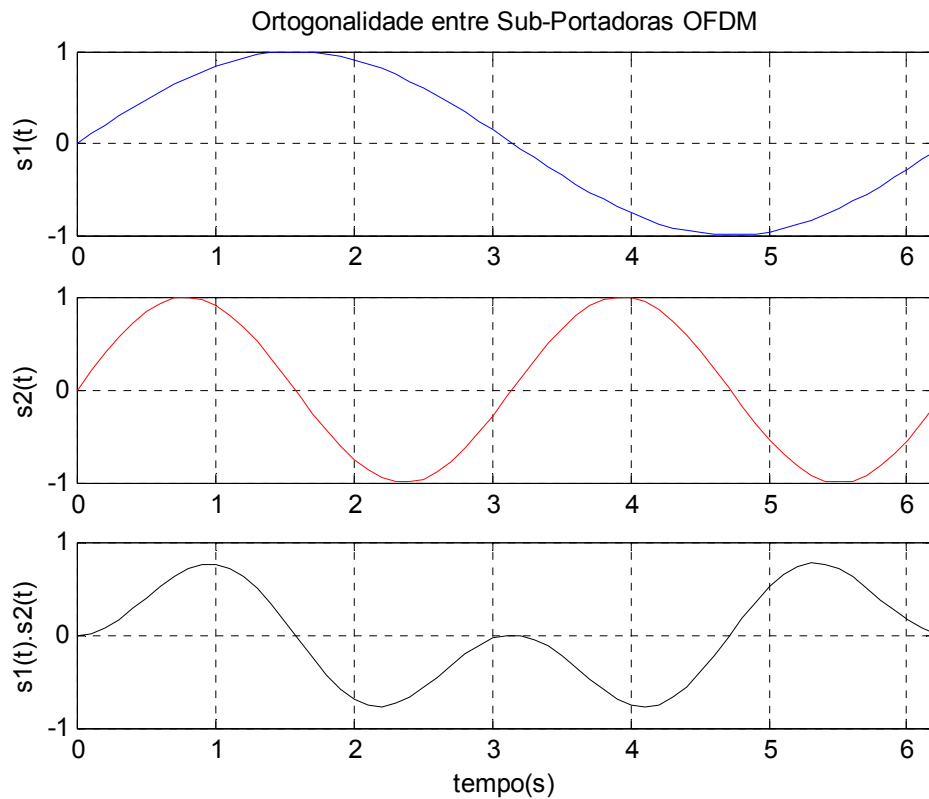


Figura 4.2 - Ortogonalidade entre duas sub-portadoras OFDM

Respeitada a condição estabelecida na equação 4.6, podemos afirmar que todos os sinais pertencentes ao conjunto $\{s_k(t)\}$ serão ortogonais entre si. Se ambos os sinais forem de energia unitária, podemos definir o conjunto $\{s_k(t)\}$ como a base ortonormal em $(0, T_s)$ geradora das sub-portadoras OFDM.

Outra forma de verificar a propriedade de ortogonalidade entre as sub-portadoras OFDM é através da análise do espectro das mesmas.

Devido ao formato de trem de pulsos assumido pelos sinais temporais provenientes da fonte de informação, cada sub-portadora OFDM apresenta um espectro do tipo $\text{sinc}(x)/x$.

O formato do espectro resultante apresenta um lóbulo principal, acompanhado de vários lóbulos laterais cujas amplitudes decaem proporcionalmente com o inverso da frequência, à medida que se afasta da frequência central Mf_0 , conforme mostra as Figuras 4.3 e 4.4.

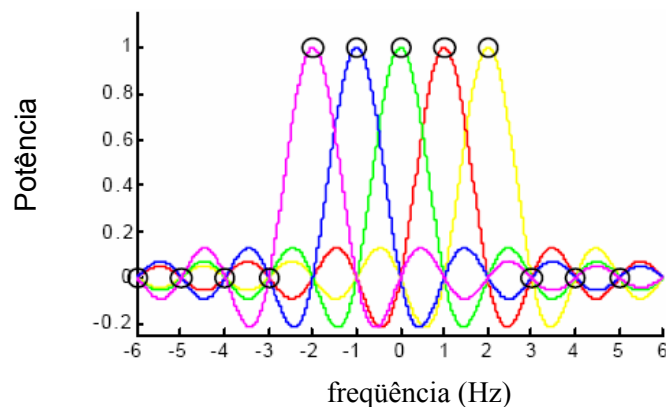


Figura 4.3 - Resposta em frequência de um sinal OFDM com 5 sub-portadoras (normalizado)

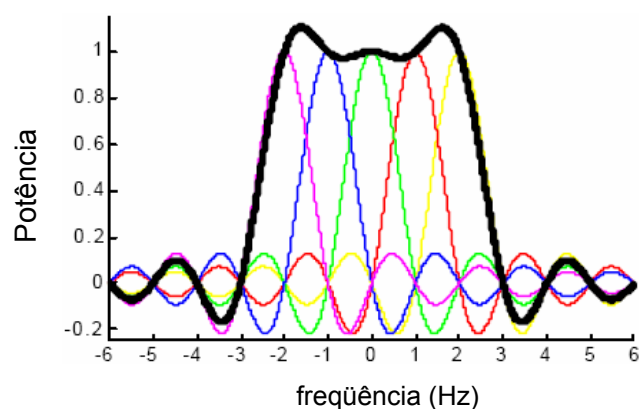


Figura 4.4 - Envoltória do feixe OFDM para 5 sub-portadoras (normalizado)

Cada sub-portadora apresenta seu pico de amplitude coincidindo com a frequência central da mesma, ao passo que nulos igualmente espaçados são observados a cada intervalo igual a f_0 .

Concluimos esta análise com a constatação de que a natureza ortogonal da transmissão OFDM leva ao fato de que, do ponto de vista espectral, o pico de cada sub-portadora corresponde exatamente aos nulos de todas as demais.

4.4.2. Geração dos Sinais OFDM

Os sinais OFDM são tipicamente gerados através do emprego de técnicas de processamento digital, devido às dificuldades relacionadas com a implementação analógica de grandes bancos de osciladores no transmissor e de filtros de alta seletividade no receptor.

A geração dos símbolos OFDM é baseada em dois princípios básicos:

- A série de dados proveniente da fonte de informação é dividida em N seqüências paralelas, cada uma destas modulando uma das N sub-portadoras empregadas na transmissão;
- Garante-se a ortogonalidade entre as sub-portadoras utilizadas, assegurando-se que as mesmas estarão espaçadas no espectro através de um intervalo igual ao inverso do período de duração do símbolo OFDM.

Apresentaremos inicialmente o modelo simplificado de um transmissor OFDM, cujo intuito é servir como exemplo para a aplicação dos conceitos abordados até este estágio do texto. A Figura 4.5 ilustra o modelo básico de um transmissor OFDM [5]. Neste esquema a seqüência de dados proveniente da fonte de informação²³ é dividida em N elementos paralelos, com um intervalo $\Delta t = T_f$, onde T_f representa o período dos símbolos gerados pela fonte. Dando continuidade ao processo, os N elementos obtidos na saída do conversor serial/paralelo modulam cada uma das N sub-portadoras OFDM que, após o estágio de multiplexação no tempo, formam o sinal composto a ser transmitido através do canal.

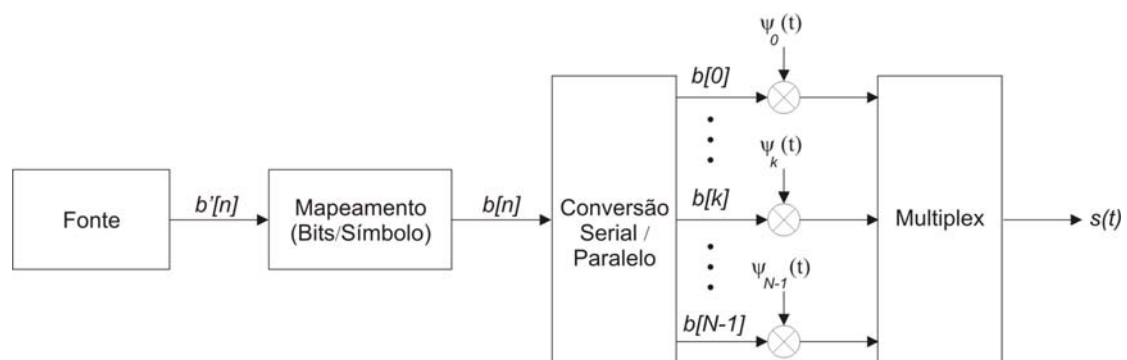


Figura 4.5 - Modelo básico de um transmissor OFDM

Com o artifício da conversão serial/paralelo, o período dos símbolos OFDM passa a ser maior que o período dos símbolos gerados pela fonte, dado por²⁴:

$$T = NT_f \quad (4.7)$$

Mantendo a separação entre as sub-portadoras OFDM de acordo com a equação 4.6 garantimos que, conforme mostrado na Figura 4.2, durante um período de símbolo T as mesmas serão, na ausência de distorções, ortogonais entre si.

Considerando o modelo básico de transmissor OFDM apresentado anteriormente, podemos derivar a seguinte expressão para o sinal $s(t)$.

²³ O modelo não apresenta estágios prévios ao mapeamento de bits/símbolos, tais como a codificação da fonte e/ou do canal, embora estes possam ser utilizados sem prejuízo da análise proposta.

²⁴ Importante ressaltar que nesta fase da geração do símbolo OFDM o Prefixo Cíclico (CP) ainda não foi adicionado ao mesmo, como veremos em breve. Portanto o período final do símbolo no canal será ainda maior, representado por T_s .

$$s(t) = \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=-\infty}^{\infty} b_l[k] \psi_k(t - lT) \quad (4.8)$$

As sub-portadoras pertencentes à base ortonormal $\{\psi(t)\}$ podem ser representadas através de exponenciais complexas:

$$\psi_k(t) = \Pi(t) e^{j2\pi k f_0 t} \quad k = 1, 2, \dots, M \quad (4.9)$$

Onde $\Pi(t)$ é um pulso de amplitude unitária definido no intervalo $(0, T)$, como:

$$\Pi(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t \leq T \\ 0 & t \geq T \end{cases} \quad (4.10)$$

Amostrando o sinal definido na equação 4.8 a uma taxa $T_{\text{Sampling}} = \frac{T}{N}$, obtemos o sinal discreto no tempo:

$$s[n] = \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=-\infty}^{\infty} b_l[k] \prod_N [nT_s - lNT_s] e^{j2\pi kn \frac{T_s}{NT_s}} \quad (4.11)$$

$$s[n] = \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=-\infty}^{\infty} b_l[k] \prod_N [n - lN] e^{j2\pi kn \frac{1}{N}} \quad (4.12)$$

Tomando-se:

$$\prod_N [n - lN] = \begin{cases} 1, & lN < n \leq (l+1)N \\ 0, & \text{outros} \end{cases} \quad (4.13)$$

O sinal amostrado $x[n]$ pode ser escrito da seguinte forma:

$$s[n] = \sum_{l=-\infty}^{\infty} \prod_N [n - lN] \cdot \sum_{k=0}^{N-1} b_l[k] e^{j2\pi kn \frac{1}{N}} \quad (4.14)$$

A equação 4.14 apresenta o sinal OFDM na saída do transmissor representado na Figura 4.5. Conforme comentamos anteriormente, a implementação deste sistema através de técnicas tradicionais demandaria uma série de osciladores analógicos com muita precisão e estabilidade, além de filtros extremamente seletivos no receptor.

Estes e outros aspectos indesejáveis praticamente impossibilitaram a implementação da técnica OFDM apresentada por Chang [19] até a proposição de uma interessante alternativa que será abordada na seção seguinte.

4.4.2.1. A Utilização da FFT nos Sistemas OFDM

A Transformada de Fourier [7] é um importante advento matemático que permite o tratamento de sinais no domínio da frequência. A teoria desenvolvida pelo matemático

francês Jean Baptiste Joseph Fourier no século XIX, encontra atualmente aplicações provavelmente jamais imaginadas pelo seu idealizador.

A Transformada Rápida de Fourier²⁵ [7], [8] se constitui em um método numérico que possibilita a implementação computacional da Transformada Discreta de Fourier²⁶. A existência deste método, juntamente com os avanços tecnológicos que permitiram a implementação do mesmo em circuitos integrados a um preço razoável são, conforme já citamos, os principais fatores que permitiram a utilização da técnica OFDM, bem como promoveram a rápida e contínua adoção da mesma.

Consideremos $x[n]$ um sinal discreto no tempo de duração finita. Tomemos ainda $X[k]$ como sendo a Transformada Discreta da Fourier do mesmo. Conforme abordado em detalhes em [8], a equação 4.15 apresenta a definição da Transformada Discreta de Fourier com N pontos:

$$X[k] = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j\left(\frac{2\pi}{N}\right)kn} \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad [\text{DFT}] \quad (4.15)$$

De modo similar, a equação 4.16 traz a operação inversa, ou seja, a Transformada Discreta Inversa de Fourier²⁷.

$$x[n] = \sum_{k=0}^{N-1} X[k] e^{j\left(\frac{2\pi}{N}\right)kn} \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad [\text{IDFT}] \quad (4.16)$$

Comparemos a equação 4.16 com o segundo termo da equação 4.14:

$$\sum_{k=0}^{N-1} X[k] e^{j\left(\frac{2\pi}{N}\right)kn} \longleftrightarrow \sum_{k=0}^{N-1} b_l[k] e^{j2\pi k \frac{n}{N}} \quad (4.17)$$

Com base nas equações apresentadas em 4.17 deduzimos que, para a geração do sinal do sinal OFDM $s[n]$ na saída do transmissor utilizado como exemplo, um estágio de processamento IDFT pode ser utilizado ao invés dos tradicionais bancos de osciladores e demais recursos que caracterizam os métodos de modulação analógicos.

Conforme exposto anteriormente nesta seção, de modo a otimizar o processo de geração do sinal OFDM, a execução da IDFT pode ser implementada computacionalmente por meio da IFFT.

4.4.3. A Implementação de um Sistema OFDM

Na seção anterior mostramos que os símbolos OFDM podem ser gerados por meio de um estágio de processamento capaz de realizar, de forma controlada, operações de IFFT aos dados provenientes da fonte de informação.

²⁵ FFT – Fast Fourier Transform

²⁶ DFT – Discrete Fourier Transform

²⁷ IDFT – Inverse Discrete Fourier Transform

No entanto uma série de operações complementares deve ser efetuada, antes e após a passagem dos bits através deste bloco de IFFT.

A Figura 4.6 apresenta o diagrama de blocos de um típico transceptor OFDM, o qual utilizaremos como referência para as explicações das próximas seções.

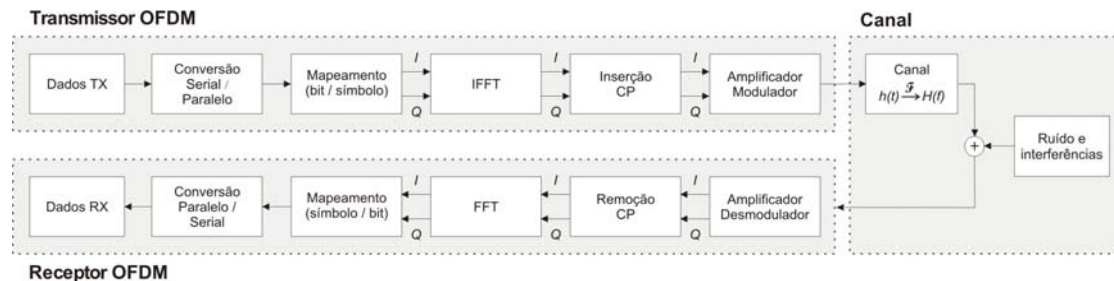


Figura 4.6 - Diagrama de blocos para um transceptor OFDM

4.4.3.1. Conversão Série / Paralelo

Em se tratando de um sistema de comunicação digital, os dados provenientes da fonte de informação assumem tipicamente a forma de uma seqüência de bits. Embora o número de bits inserido no canal por cada símbolo OFDM seja dependente, dentre outros aspectos, da quantidade de sub-portadoras utilizadas, este valor – devido à própria natureza do sistema – varia de algumas dezenas até milhares destas unidades de informação.

Portanto, para que o transmissor possa encapsular em cada símbolo OFDM esta quantidade de bits, um estágio de conversão do tipo série para paralelo deve, necessariamente, ser previsto.

O formato dos dados que compõem o símbolo OFDM depende da técnica de modulação utilizada em cada uma das sub-portadoras. Consideremos, por exemplo, o emprego de uma modulação 16-QAM [1]. Neste caso temos quatro bits de dados para representar todas as posições possíveis na constelação QAM em questão. Se assumirmos uma transmissão OFDM com 64 sub-portadoras, teremos um total de 256 bits para cada símbolo OFDM.

Caso o sistema contemple um esquema de modulação adaptativo [48] ou mesmo uma técnica de *bit loading* o método de modulação pode variar com o tempo, para cada sub-portadora, implicando diretamente em uma variação no número de bits do símbolo OFDM. Em face a estes cenários o estágio de conversão série/paralelo deve também prever mecanismos de adaptabilidade, de modo a garantir a inserção da quantidade correta de bits na entrada do estágio seguinte.

4.4.3.2. Modulação para as Sub-Portadoras

Os bits de informação provenientes do estágio de processamento descrito acima devem ser mapeados segundo algum método de modulação digital, por meio da variação da fase ou amplitude da onda portadora. Conforme mostramos nas normas de referência para alguns padrões mundiais de sistemas baseados em OFDM, as técnicas mais utilizadas são as de PSK (*Phase Shift Keying*) e QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*) [1], [2].

A Figura 4.7 mostra, para constelações 16-PSK e 16-QAM, respectivamente, as componentes do sinal em fase (Q) e em quadratura (I), mapeados com código Gray²⁸ [1].

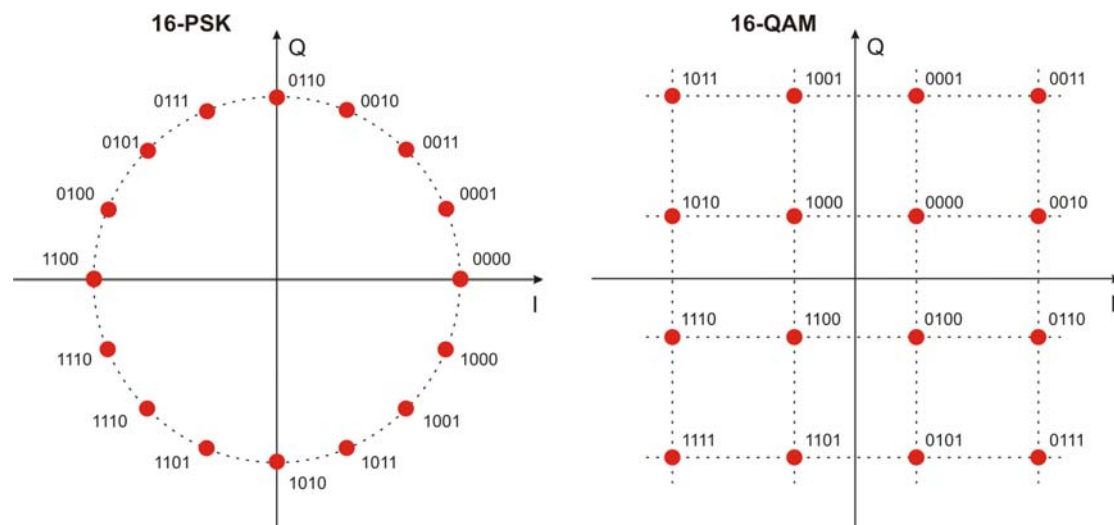


Figura 4.7 - Mapeamento de bits/símbolos segundo as técnicas 16-PSK e 16-QAM

No receptor, antes das etapas de decodificação e *de-interleaving*, o símbolo recebido em cada sub-portadora modulada pelo sinal de informação é convertido novamente na palavra binária original. Contudo, durante o processo de transmissão, ruídos e distorções são acrescentados ao sinal. Em se tratando de sistemas PLC, conforme apresentado no Capítulo 3, estas imperfeições são oriundas das próprias características das redes elétricas, que podem apresentar ruídos impulsivos com alta densidade espectral de potência.

Portanto, como resultado destas imperfeições, os pares (Q,I) da constelação resultante no receptor não terão a mesma distribuição daqueles gerados pelo transmissor, mostrados nas Figuras 4.7 e 4.8. Deste modo cabe ao receptor determinar, dentre os possíveis símbolos para esta constelação, qual o mais provável de ter sido transmitido.

²⁸ Neste tipo de mapeamento, as palavras binárias designadas para símbolos adjacentes na constelação diferem em apenas um dígito.

4.4.3.3. Cálculo da IFFT

Após o processo de modulação, cada uma das sub-portadoras OFDM assume valores de fase e amplitude de acordo com a informação a ser transmitida. Caso o sistema OFDM utilize a já mencionada técnica de modulação adaptativa, podemos encontrar para determinados instantes de transmissão, sub-portadoras desabilitadas devido às más condições do canal de comunicação em sua faixa de operação.

A próxima etapa no processo consiste na geração do feixe OFDM no domínio do tempo, através da operação de IFFT. A Figura 4.8 mostra em detalhes o bloco responsável pela IFFT.

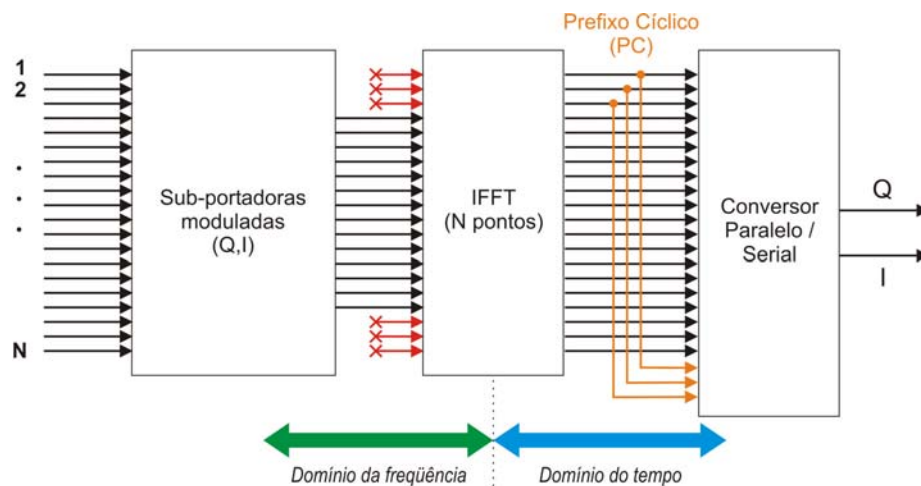


Figura 4.8 - Estágio IFFT na geração do símbolo OFDM

Vemos nesta representação gráfica que a maioria das sub-portadoras encontra-se ativa, ou seja, modulada por um sinal de dados. Sub-portadoras desativadas têm sua entrada no bloco IFFT igual à zero (representadas em vermelho na figura).

Cada amostra discreta na entrada do bloco de IFFT corresponde individualmente a uma sub-portadora OFDM.

4.4.3.4. Inserção do Prefixo Cíclico (CP)

Consideremos um sistema de comunicação com taxa de transmissão de bits igual à R_B dada em bits por segundo (bps), utilizando um esquema de modulação capaz de mapear m bits por cada símbolo²⁹.

Para a implementação do mesmo por meio de um sistema tradicional, ou seja, utilizando uma única portadora, a relação entre a taxa de símbolos R_S e a taxa de bits R_B transmitidos é dada pela equação 4.18.

²⁹ BPSK ($m=1$); QPSK ($m=2$), 8PSK ($m=3$), etc.

$$R_S = \frac{R_B}{m} \quad (4.18)$$

Um sistema com múltiplas portadoras pode dividir o tráfego a ser enviado em N seqüências paralelas, cada uma modulando uma sub-portadora, possibilitando que se obtenha a mesma taxa efetiva de transmissão de bits R_B , com uma taxa de símbolos N vezes menor que a necessária pelo sistema com simples portadora³⁰. A equação 4.19 apresenta a relação entre a taxa de bits transmitidos e a taxa de símbolos para um sistema OFDM.

$$R_S = \frac{R_B}{m \cdot N} \quad (4.19)$$

Consideremos o sistema citado anteriormente operando com uma taxa de transmissão de dados R_B igual a 1Mbps. Na Figura 4.9 apresentamos um comparativo para este sistema onde analisamos a realização do mesmo através da técnica de modulação PSK com distintos níveis ($1 < m < 4$) e incrementando o número de sub-portadoras.

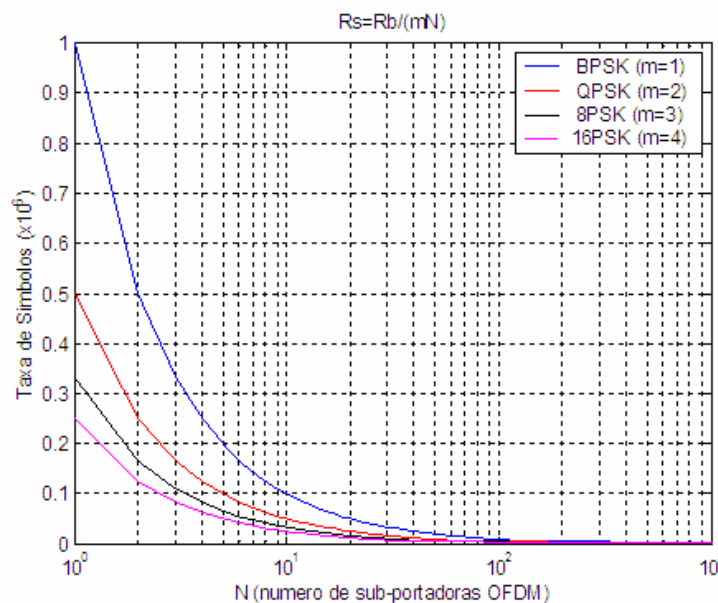


Figura 4.9 - Redução do período de símbolo com o emprego da técnica OFDM

Nos sistemas de transmissão que utilizam o canal rádio-móvel como meio de comunicação os sinais se propagam através de múltiplos percursos devido à reflexão dos mesmos nos obstáculos encontrados no caminho [10].

Embora uma transmissão através do canal PLC evidencie também a propagação por múltiplos percursos – conforme apresentamos no Capítulo 3 – diferentemente do canal rádio-móvel, o fenômeno ocorre neste ambiente devido à falta de casamento de impedâncias nas conexões existentes na rede elétrica, bem como pela impossibilidade, por parte dos

³⁰ Esta comparação permanece válida sempre que o método de modulação e/ou o número de bits por símbolo forem mantidos.

acopladores utilizados pelos equipamentos PLC, em garantir uma injeção e/ou extração ótimas do sinal nas redes.

Devido à propagação por múltiplos percursos o sinal proveniente do transmissor chega ao receptor com diferentes atrasos e atenuações. O fenômeno causa um espalhamento nos limites dos símbolos e, conseqüentemente, provoca ISI.

Em sistemas OFDM o efeito prejudicial da ISI causada pelo multipercurso pode ser ainda reduzido ou mesmo totalmente mitigado, por meio da inserção – após o processamento da IFFT – de um prefixo ao símbolo a ser transmitido. Este prefixo é na verdade uma parte do próprio símbolo inserida de maneira cíclica, conforme mostramos na Figura 4.10.

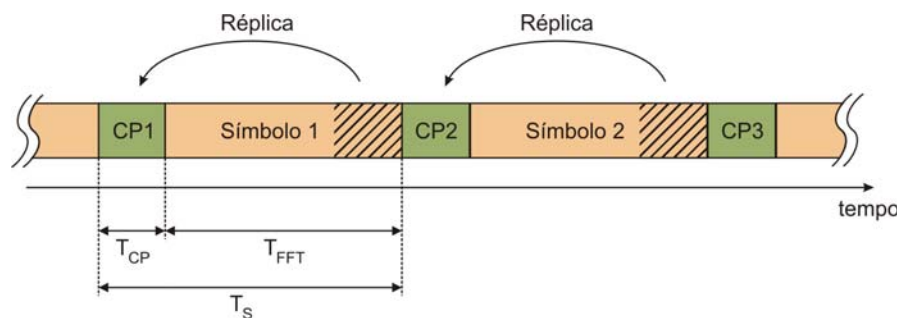


Figura 4.10 - Adição do Prefixo Cíclico (CP) a um símbolo OFDM

Devido à forma com que este prefixo é inserido, o mesmo recebe o nome de Prefixo Cíclico (*Cyclic Prefix* - CP). A utilização deste artifício foi proposta por Weinstein e Ebert em 1971 [22].

Após a inserção do CP percebemos que a duração total do símbolo OFDM sofre uma alteração, conforme indicado na equação 4.20.

$$T_S = T_{FFT} + T_{CP} \quad (4.20)$$

Sendo:

T_S = período total do símbolo OFDM em amostras

T_{FFT} = tamanho da IFFT utilizada para gerar o símbolo OFDM

T_{CP} = duração do CP em amostras

Para que se obtenha a ortogonalidade em um sistema OFDM, os valores de amplitude e de fase de cada sub-portadora devem ser mantidos constantes durante todo o período de símbolo. Caso estes valores não sejam mantidos durante este intervalo, o espectro das sub-portadoras não mais assumirá o formato do tipo $\text{sinc}(x)/x$, os nulos espectrais não se encontraram nos locais corretos e ocorrerá a chamada Interferência Entre Portadoras (ICI – *Inter Carrier Interference*).

Conforme esperado, nos limites de duração de cada novo símbolo a fase e a amplitude das sub-portadoras sofreram mudanças bruscas, de acordo com os valores assumidos pelos próximos dados a serem transmitidos. Em cenários com multipercurso a ISI causa um espalhamento deste transiente no início de cada símbolo, afetando a composição do sinal no receptor.

A Figuras 4.11 e 4.12 mostram as diferenças na transição entre dois símbolos subsequentes, tomando um cenário sem a ocorrência de multipercurso e outro suscetível a este fenômeno.

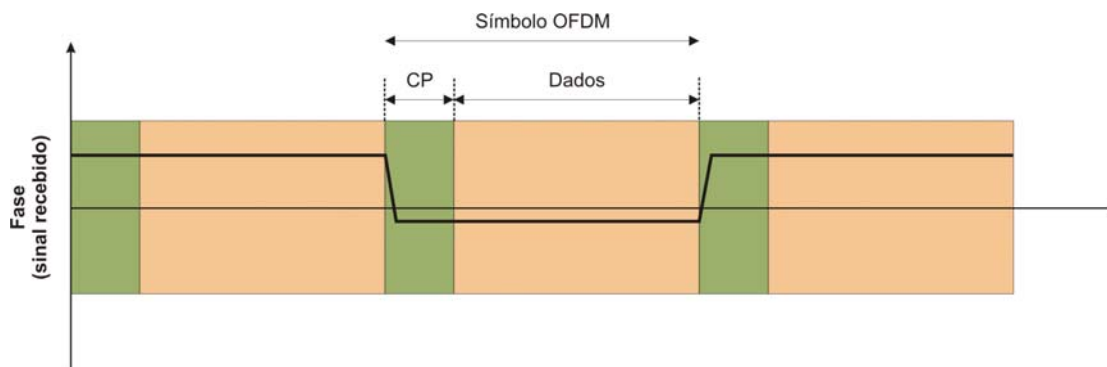


Figura 4.11 - Transmissão em um canal sem multipercurso

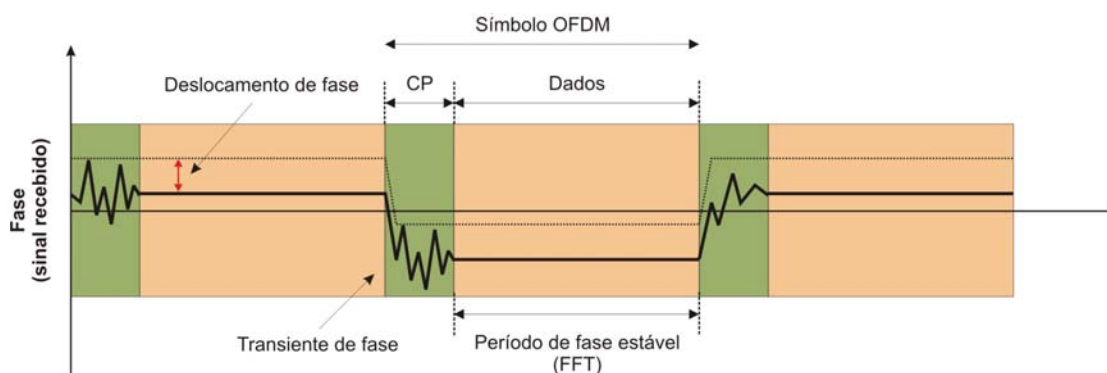


Figura 4.12 - Importância do CP em um canal com multipercurso

Conforme observamos na Figura 4.13, a adição do CP agrega um breve intervalo para que o transiente do sinal seja extinto, permitindo que a FFT seja realizada apenas na porção estável do símbolo.

Segundo proposto por Weinstein e Ebert, a utilização do CP mostrar-se-á uma técnica efetiva sempre que a duração do mesmo for superior ao espalhamento de atraso do canal, definido no Capítulo 3. De modo a corrigir qualquer efeito adicional causado pelo

multipercurso, técnicas de equalização muito mais simplificadas podem ser empregadas individualmente para cada sub-portadora.

4.4.3.5. Receptor OFDM

De modo similar aos processos apresentados nesta seção, após a transmissão através do canal desejado, o receptor deve executar o processamento inverso ao empregado no transmissor, permitindo a recuperação do sinal transmitido.

Considerando a similaridade nos processos de transmissão e recepção, não apresentaremos este segundo com maiores detalhes.

4.5. Conclusões

Dando seguimento à metodologia adotada na dissertação, discutimos no presente Capítulo as principais características do método de modulação OFDM, tendo como motivação as características das redes elétricas como um canal para comunicação apresentadas no Capítulo 3.

Após a composição de um breve histórico e da citação de alguns exemplos de aplicação visando situar o leitor, tratamos das características básicas do método em si, apresentando a formulação matemática do mesmo, bem como alguns aspectos relacionados com a implementação prática de um sistema OFDM.

Discorremos sobre algumas vantagens oferecidas pelo método considerando, sobretudo, a aplicação do mesmo frente aos problemas impostos pelo canal PLC, com base nos modelos também introduzidos no Capítulo 3.

Dentre as vantagens apresentadas pelo esquema de modulação OFDM, destacamos a excelente eficiência espectral, verificada não apenas pela alta relação em termos de bits/s/hz, mas também pela possibilidade de promover uma utilização adaptativa do canal. Vimos que o emprego de técnicas de *bit-loading* permite, de acordo com a relação sinal-ruído detectada a cada instante, adaptar a taxa de transmissão de dados e o tipo de modulação utilizado em cada uma das sub-portadoras, promovendo um uso mais otimizado do canal.

Mostramos no Capítulo 3 que, devido à ocorrência de multipercursos, o canal PLC pode apresentar desvanecimentos em frequência bastante seletivos além de grandes valores de espalhamento de atraso. Deste modo, outra importante contribuição do método OFDM para a transmissão de dados através do canal PLC é a robustez obtida frente à degradação causada pela propagação por múltiplos percursos, devido ao aumento do período dos símbolos e otimizada ainda com a inserção do CP.

Capítulo 5

5. Desempenho de Sistemas PLC de Banda Larga em Redes *In-Home*

5.1. Introdução

Neste Capítulo apresentamos o resultado de uma série de experimentos realizados, visando investigar o desempenho de um sistema PLC de banda larga operando em redes elétricas *In-Home*.

Com este estudo pretendemos demonstrar o impacto causado no sistema por vários fatores discutidos nos Capítulos anteriores, tais como a atenuação causada pelo meio, bem como o efeito das fontes interferentes.

Para estas atividades foram utilizados equipamentos PLC de última geração operando com modulação OFDM, representando, assim, o estado da arte em termos de soluções PLC de banda larga.

Nestas atividades, procedemos com o monitoramento e o registro do desempenho do sistema PLC operando em cenários reais com distintas topologias elétricas e perfis de carga bastante heterogêneos. Nos experimentos nenhum tipo de cuidado especial foi utilizado, no sentido de preparar ou alterar o cenário para a realização dos mesmos, de modo que os ambientes consistem em cenários reais e típicos para a aplicação da tecnologia na prática.

5.2. Tecnologia PLC Utilizada

Apresentaremos nesta seção alguns detalhes e características dos equipamentos utilizados para compor as redes PLC nos cenários selecionados.

5.2.1. Equipamentos PLC

A rede PLC *In-Home* utilizada na realização dos experimentos descritos neste documento, para os quais apresentaremos detalhes nas próximas seções, foi composta por meio de dois elementos básicos: o equipamento primário (HE – *Head End*) e o equipamento terminal de usuário (CPE – *Customer Premises Equipment*), também referenciado simplesmente como MODEM PLC.

O equipamento HE é o responsável por todo o gerenciamento da rede PLC, executa a validação e a autenticação de cada CPE conectado à rede, controla a alocação dos intervalos de transmissão e a garantia da largura de banda para cada cliente, conforme a classe de serviço contratada pelo mesmo. Em uma rede PLC de acesso este equipamento é tipicamente instalado junto ao transformador de distribuição, permitindo o acoplamento do sinal PLC em todas as três fases do circuito secundário de baixa tensão. Contudo, por se tratar de uma rede PLC *In-Home*, ambos os equipamentos foram conectados no circuito interno dos locais escolhidos. Completamos a rede PLC utilizando o equipamento CPE que, através da extração do sinal PLC, atua como uma interface entre a rede elétrica e computador do cliente.

As Figuras 5.1 e 5.2 mostram os equipamentos CPE e HE instalados no cenário residencial, primeiro tipo de topologia analisada durante os experimentos.



Figura 5.1 - MODEM PLC (cliente) instalado no cenário residencial



Figura 5.2 - Equipamento primário PLC (master) instalado no cenário residencial

5.2.2. Especificações Técnicas dos Equipamentos PLC

A solução PLC utilizada mostra-se bastante robusta aos ruídos e às interferências presentes no meio. De acordo com os dados do fabricante, a comunicação PLC pode ser estabelecida e mantida, desde que o nível das interferências não sejam 25dB superiores à potência do sinal no receptor.

A Tabela 5.1 apresenta algumas especificações técnicas referentes aos equipamentos utilizados.

Tabela 5.1 – Especificações técnicas dos equipamentos PLC utilizados nos experimentos

Parâmetro	Descrição (valor ou faixa)
Modulação	OFDM com 1536 sub-portadoras
Modulação nas sub-portadoras	BPSK, QAM
Bit loading	0 – 10 bits/símbolo
Densidade espectral de potência	$\leq -50\text{dBm/Hz}$
Ganho de transmissão	33dB e 21dB
Ganho de recepção	-12dB a +30dB (incrementos de 6dB)
Faixa dinâmica	90dB
Tensão de operação	85 a 265 VAC
Frequência de operação	50/60Hz
Consumo	8W (típico) 13 W (máximo)
Temperatura de operação	-40 a 70°C
Interfaces	Ethernet 10/100Mbps, USB 1.0

5.2.3. Faixas de Frequências Utilizadas

A solução PLC utilizada permite a seleção das faixas de frequências para transmissão, de acordo com seis modos de operação pré-configurados, conforme indicado na Tabela 5.2.

Visando utilizar a maior faixa espectral possível, os experimentos foram realizados com os equipamentos operando no Modo 6, de 4 a 34MHz.

Tabela 5.2 – Frequências pré-definidas nos equipamentos PLC utilizados nos experimentos

Modo	Faixa (MHz)	Início (MHz)	Fim (MHz)	Performance (Mbps)
1	10	3	13	50
2	10	13,5	23,5	50
3	10	24	34	50
4	20	3	23	140
5	20	14	34	140
6	30	4	34	200

5.2.4. Adaptabilidade às Condições do Canal

Cada equipamento efetua, permanentemente, o monitoramento das condições do canal no seu entorno, analisando a atenuação do sinal recebido, bem como o nível das interferências presentes. As informações obtidas a partir deste processo de acompanhamento da qualidade do canal são utilizadas para adaptar os parâmetros de modulação para as sub-portadoras OFDM utilizadas, visando otimizar as taxas de transmissão do sistema frente a uma taxa de erro de bit (BER) constante. Para a correção de erros (FEC – *Forward Error Correction*), um código Reed-Solomon [3] é utilizado.

Através de ferramentas de software fornecidas pelo fabricante, vários parâmetros do algoritmo de monitoramento e de adaptação ao canal PLC podem ser alterados de acordo com as necessidades específicas para cada aplicação do sistema. Alguns exemplos destes parâmetros são:

- Limites de cada modulação (para a comutação entre diferentes constelações);
- BER desejável;
- Habilitação e inibição de grupos de sub-portadoras;
- Potência máxima para grupos de sub-portadoras.

5.3. Metodologia Utilizada nos Experimentos

Neste seção descrevemos a metodologia utilizada para a realização dos experimentos, abordando os seguintes aspectos envolvidos neste processo:

- Definição do tipo de topologia PLC a ser utilizada;
- Cenários contemplados e a descrição dos mesmos;
- Operação e monitoramento dos equipamentos PLC;
- Tratamento dos dados obtidos.

5.3.1. Topologia PLC Empregada

Conforme apresentamos no Capítulo 2, podemos classificar as topologias clássicas para a aplicação de sistemas PLC de banda larga em três tipos principais:

- Topologia PLC *In-Home*;
- Topologia PLC para acesso na última milha;
- Topologia PLC para acesso WAN.

Neste estudo nos dedicaremos à análise do desempenho de sistemas PLC aplicados ao primeiro exemplo de configuração citado, a topologia PLC *In-Home*.

A motivação para a escolha desta variação advém dos seguintes fatores:

1. Representa atualmente mais de 90% dos sistemas PLC de banda larga instalados no mundo;
2. Por questões práticas, envolvendo aspectos favoráveis de logística e de segurança, este tipo de topologia representa o modelo mais viável para a realização de experimentos.

5.3.2. Definição dos Cenários

Uma topologia *In-Home* é caracterizada pelo uso dos circuitos elétricos internos de uma instalação para a composição da rede PLC para a transmissão de dados. Esta variação topológica encontra aplicação em pelo menos três grandes segmentos:

- Instalações residenciais;
- Instalações comerciais;
- Instalações industriais.

De modo a tornar os experimentos abrangentes e significativos, os testes foram realizados em uma amostra representativa de todos os segmentos citados acima. A seguir descrevemos cada um destes cenários.

5.3.2.1. Cenário Residencial

Como amostra de um cenário residencial típico, tomamos um apartamento localizado em um edifício de quatro pavimentos, cuja topologia elétrica é bastante representativa, seguindo o padrão usualmente empregado neste tipo de instalação no Brasil. A Figura 5.3 apresenta uma vista externa do edifício.



Figura 5.3 - Vista externa do edifício representativo do cenário residencial

5.3.2.1.1. Topologia Elétrica da Instalação

- **Entrada de Serviço**

Por se tratar de um edifício de pequeno porte, totalizando apenas 16 apartamentos, a instalação é alimentada a partir da rede secundária de distribuição da concessionária local, cuja tensão padrão de fornecimento para este nível é de 220V (Fase/Neutro) e 380V (Fase/Fase).

A Figura 5.4 mostra alguns detalhes da entrada de serviço da instalação, desde o ponto de entrega³¹ até o Quadro Geral de Baixa Tensão (QGBT) do edifício, local para o qual convergem os três condutores das fases (F1, F2 e F3) e o condutor do neutro (N) provenientes da rede secundária de baixa tensão.

O QGBT concentra os condutores de entrada e o barramento trifásico geral da instalação, a partir do qual derivam os circuitos para cada um dos apartamentos e para as áreas comuns do edifício (lobby, garagens, depósitos, etc.), bem como os circuitos dedicados de uso especial (elevador, bombas para água, etc.).

³¹ Ponto de entrega – delimita o ponto a partir do qual a responsabilidade da instalação fica a cargo do consumidor.

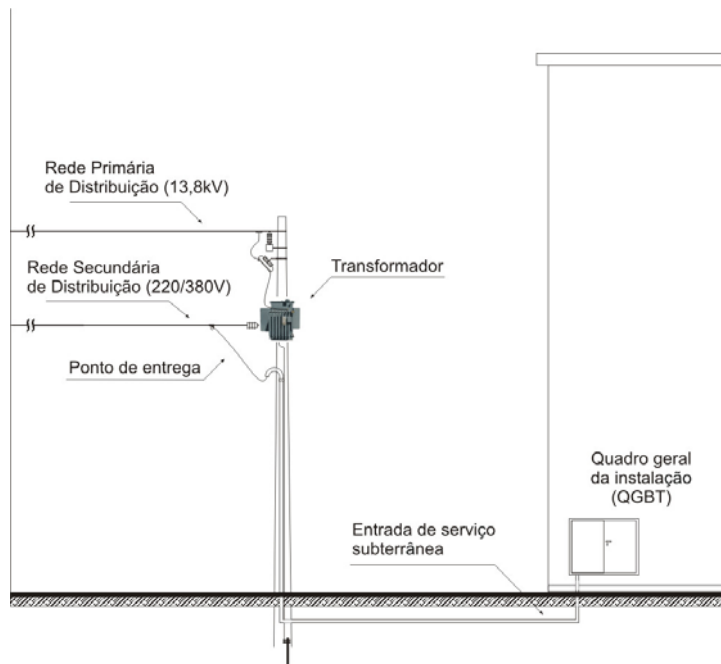


Figura 5.4 – Detalhes da entrada de serviço para o edifício utilizado (cenário residencial)

- **Medição e Prumada Elétrica**

Após o QGBT todos os circuitos elétricos do edifício passam através do Quadro de Medição (QM), onde se encontram os medidores de energia elétrica que, neste caso, são eletromecânicos, monofásicos ou trifásicos, conforme a carga do circuito medido.

Na Figura 5.5 podemos observar a continuidade da instalação elétrica após o QGBT, sua passagem através do QM e o exemplo de um circuito típico, derivando para uma das unidades consumidoras da instalação.

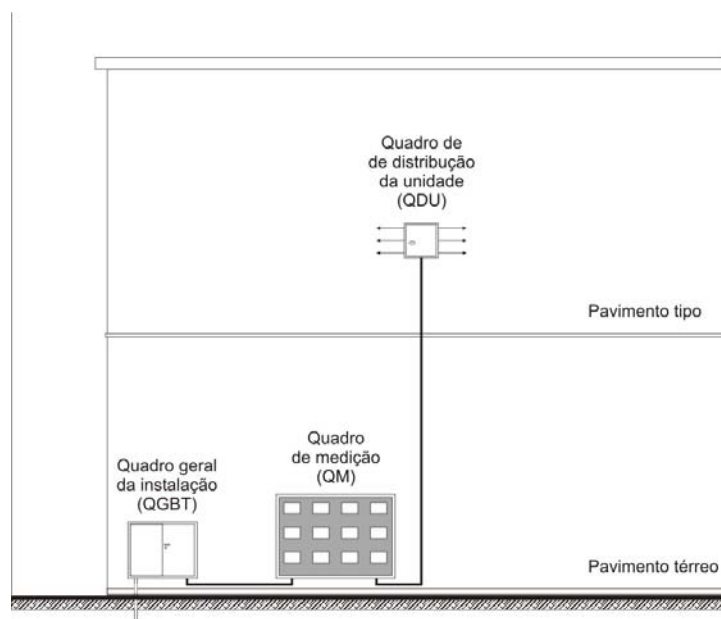


Figura 5.5 – Quadro de medição e prumada elétrica (cenário residencial)

- **Rede Elétrica Interna da Unidade Consumidora**

Do ponto de vista elétrico, cada unidade consumidora do edifício é caracterizada por vários circuitos elétricos monofásicos, todos derivando do Quadro de Distribuição da Unidade (QDU). Cada circuito é individualmente controlado e protegido por meio de um disjuntor termomagnético cuja capacidade, conforme a aplicação do circuito, varia de 15A a 20A.

Na Figura 5.6 é apresentado o diagrama unifilar de uma unidade consumidora do edifício escolhido.



Figura 5.6 – Diagrama elétrico unifilar de uma unidade consumidora (cenário residencial)

5.3.2.1.2. Características Gerais e Perfil de Cargas

Na Figura 5.7 mostramos a planta baixa do apartamento escolhido como amostra representativa para o cenário residencial. A área total da instalação é de aproximadamente 140m², dividida em cômodos de natureza variada: quartos, salas, banheiros, cozinha e área de serviço.

Os perfis das cargas conectadas aos circuitos internos da instalação também seguem o padrão normalmente encontrado em residências deste tipo no Brasil: equipamentos eletrônicos, eletrodomésticos variados, máquina de lavar roupas, geladeira, microcomputadores e lâmpadas (incandescentes e fluorescentes).

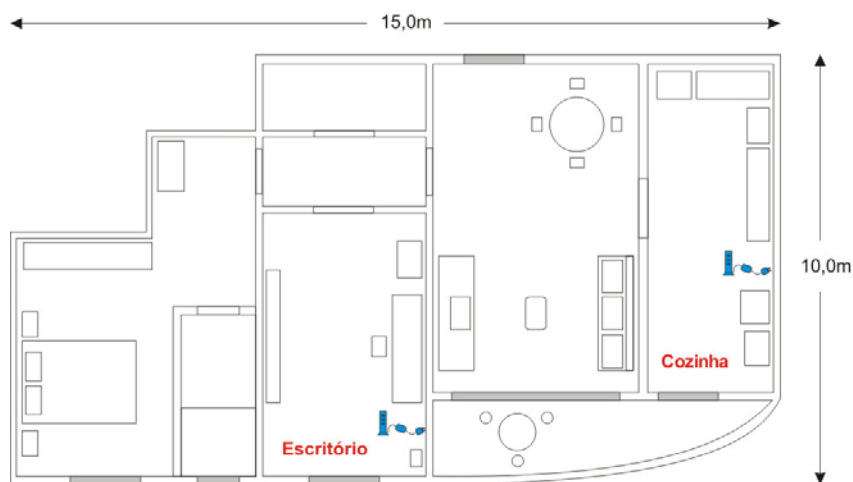


Figura 5.7 - Planta baixa da instalação residencial utilizada

5.3.2.2. Cenário Comercial

Para representar este tipo de cenário, os experimentos foram realizados nas instalações de um laboratório de pesquisa em um campus universitário, no qual os equipamentos foram instalados, compondo a rede PLC *In-Home*.

5.3.2.2.1. Topologia Elétrica da Instalação

- **Prumada Elétrica**

Representamos a seguir o esquema elétrico geral do quadrante do edifício no qual o referido laboratório está localizado. Na Figura 5.8 podemos observar a prumada elétrica do edifício, bem como a derivação até o QDU da unidade.

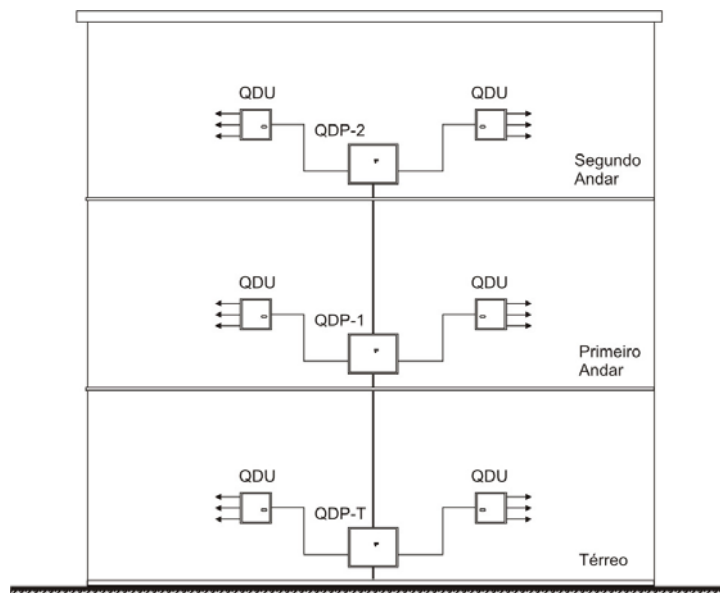


Figura 5.8 – Quadro de medição e prumada elétrica (cenário comercial)

- **Rede Interna da Unidade Consumidora**

A principal diferença na instalação elétrica deste cenário com relação ao anterior, reside no fato de contarmos com um circuito interno polifásico. Segundo a distribuição dos circuitos no interior do edifício, a instalação conta com um Quadro de Distribuição Primário (QDP) para cada um dos pavimentos, dos quais derivam os circuitos para cada uma das unidades consumidoras. De modo semelhante à topologia descrita para o cenário anterior, encontramos um Quadro de Distribuição da Unidade onde cada circuito é igualmente protegido por disjuntores termomagnéticos de capacidades específicas, conforme o perfil de cargas do mesmo.

Na Figura 5.9 é apresentado o diagrama unifilar de uma unidade consumidora que representa o cenário comercial.

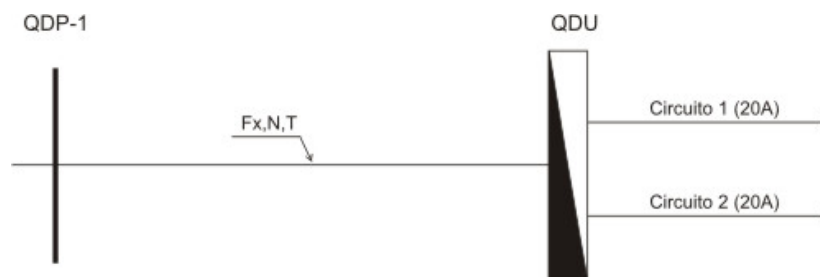


Figura 5.9 – Diagrama elétrico unifilar de uma unidade consumidora (cenário comercial)

5.3.2.2.2. Características Gerais e Perfil de Cargas

Nos circuitos internos do laboratório de pesquisas utilizado como amostra representativa do cenário comercial encontramos cargas cujo perfil é bem mais homogêneo se comparado com as cargas conectadas aos circuitos do cenário residencial. Neste ambiente encontramos basicamente microcomputadores e periféricos de informática (impressoras, scanners, etc.), além da iluminação, exclusivamente composta por lâmpadas fluorescentes com reatores eletrônicos de baixa potência.

Podemos observar na Figura 5.10 a planta-baixa do laboratório de pesquisas, cuja área total da instalação é de aproximadamente 100m², dividida em sete salas e uma área central comum. Os pontos na cor vermelha indicam a distribuição dos equipamentos PLC no interior das instalações.

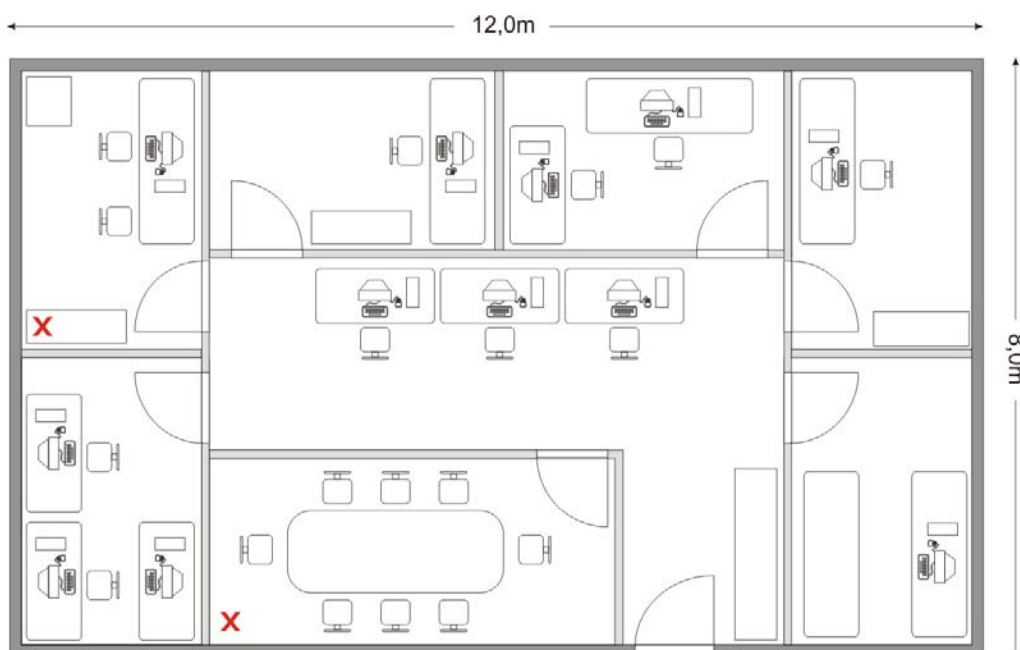


Figura 5.10 - Planta baixa da instalação comercial utilizada

5.3.2.3. Cenário Industrial

Como amostra representativa de um cenário com perfil industrial utilizamos uma planta fabril de montagem de placas eletrônicas e produção de equipamentos eletrônicos em geral.

As Figuras a seguir mostram as instalações do cenário industrial.



Figura 5.11 – Linha de inserção automática de componentes (cenário industrial)



Figura 5.12 - Linha de inserção semi-automática de componentes (cenário industrial)

5.3.2.3.1. Topologia Elétrica da Instalação

- **Entrada de Serviço**

Diferentemente das instalações já apresentadas, a demanda energética desta unidade é bastante significativa, de modo que a mesma é alimentada diretamente da rede primária de

distribuição da concessionária local, cuja tensão padrão de fornecimento para este nível é de 13,8kV (Fase/Fase).

A Figura 5.13 mostra alguns detalhes da entrada de serviço desta instalação, na qual podemos verificar que ponto de entrega é conectado à rede primária de distribuição – ou rede de média tensão.

Do ponto de vista da concessionária de energia elétrica, toda esta instalação representa um único consumidor, portanto, o primeiro elemento após o transformador é o próprio medidor de energia elétrica. Após o medidor encontramos o Quadro Geral de Baixa Tensão (QGBT), local para o qual convergem os três condutores das fases (F1, F2 e F3) e o condutor do neutro (N). O QGBT concentra os condutores de entrada e o barramento trifásico geral da instalação, a partir do qual derivam os circuitos internos da instalação.

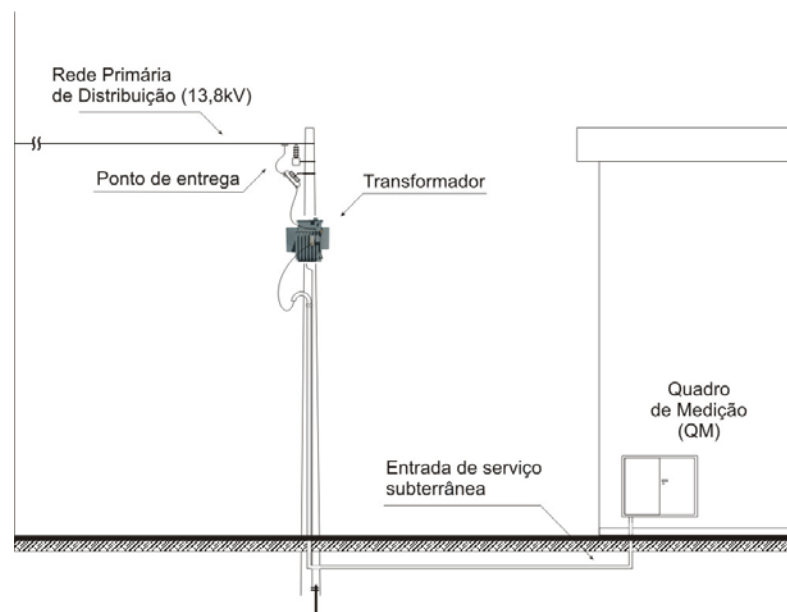


Figura 5.13 – Detalhes da entrada de serviço para o edifício utilizado (cenário industrial)

- **Rede Interna da Unidade Consumidora**

Seguindo a topologia de distribuição elétrica tipicamente utilizada neste tipo de instalação de grande porte, encontramos vários Quadros de Distribuição (QDU) internos, cada um deste responsável pelo controle e pela proteção de um determinado grupo de circuitos internos.

Na Figura 5.14 é apresentado o diagrama unifilar desta unidade consumidora.

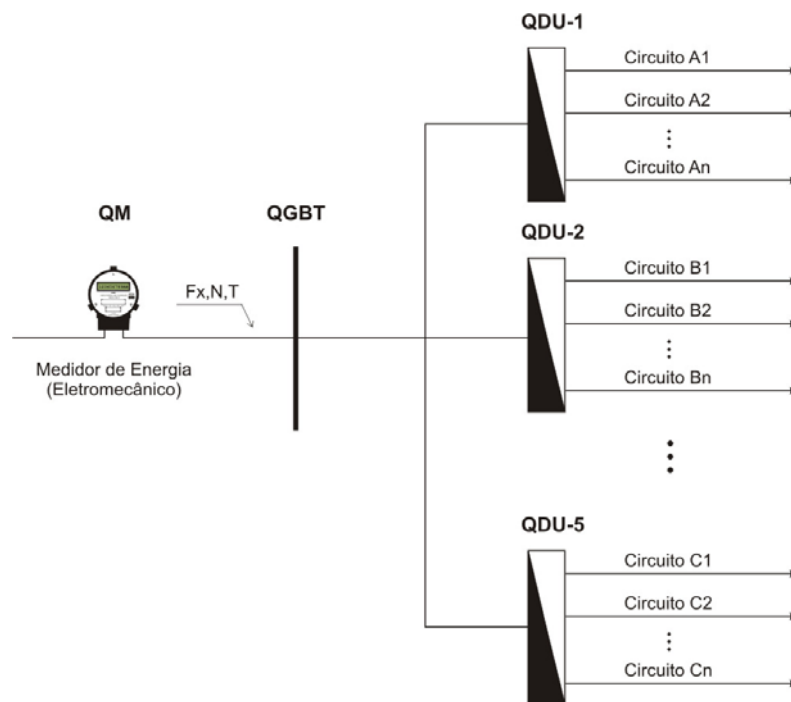


Figura 5.14 – Diagrama elétrico unifilar de uma unidade consumidora (cenário industrial)

5.3.2.3.2. Características Gerais e Perfil de Cargas

A unidade representativa para o cenário do tipo industrial conta com uma completa linha de montagem para placas eletrônica e para a integração final de equipamentos eletrônicos de uso geral. A seguir apresentamos alguns exemplos de equipamentos e máquinas especiais em operação na referida unidade:

- Máquinas de inserção automática de componentes SMD (*Surface Mounted Device*);
- Máquinas de inserção automática de componentes PTH (*Part Through Hole*);
- Máquinas de inserção semi-automática de componentes PTH (*Part Through Hole*);
- Máquina de solda automática com dupla onda e nitrogênio;
- Equipamentos aplicadores de pasta de solda;
- Forno elétrico de refusão;
- Equipamentos de testes de circuitos impressos.

Além dos equipamentos de uso específico listados acima, a planta conta com vários microcomputadores para uso geral e com alguns eletrodomésticos. A iluminação artificial é predominantemente obtida por meio de lâmpadas fluorescentes com reatores eletrônicos de baixa potência.

5.3.3. Considerações Sobre as Sazonalidades dos Cenários

Uma importante definição tomada antes da realização dos experimentos nos cenários descritos acima se refere ao intervalo de monitoramento a ser praticado em cada um dos ambientes, bem como à quantidade de amostras necessárias para uma caracterização satisfatória dos mesmos.

Neste sentido, efetuamos um estudo das principais sazonalidades tipicamente identificadas na demanda de energia elétrica para consumidores pertencentes aos três perfis de cenários abordados.

A análise da série histórica da demanda para consumidores desta natureza nos permitiu identificar três efeitos sazonais bastante definidos:

- Variação da demanda horária durante o dia;
- Consumo diário (diferença entre dias úteis e finais de semana);
- Consumo mensal (variação de acordo com a estação do ano).

Embora não representem especificamente o perfil de consumo das unidades consumidoras sob análise, as curvas de consumo apresentadas a seguir [57] mostram claramente estes efeitos sazonais verificados em consumidores residenciais, comerciais e industriais com perfil similar aos cenários escolhidos.

5.3.3.1. Sazonalidades – Cenário Residencial

As Figuras 5.15 e 5.16 apresentam, respectivamente, as curvas de consumo diário e mensal para um consumidor residencial.

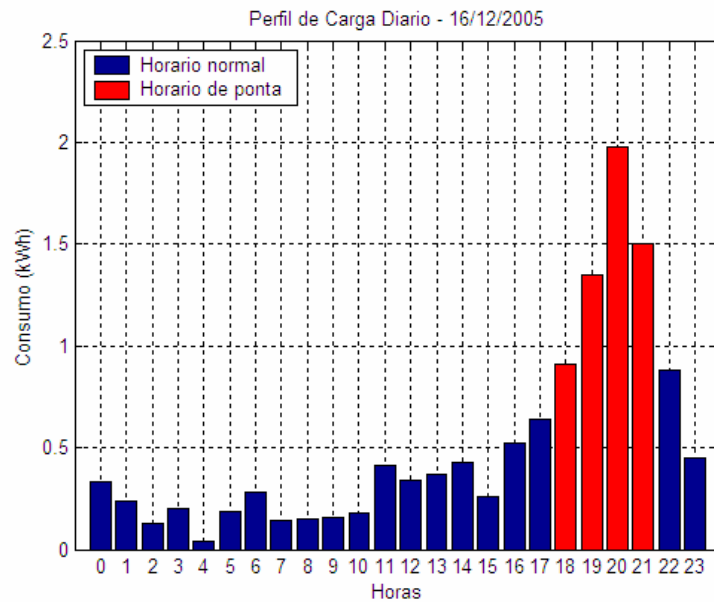


Figura 5.15 – Curva de consumo diário (consumidor residencial)

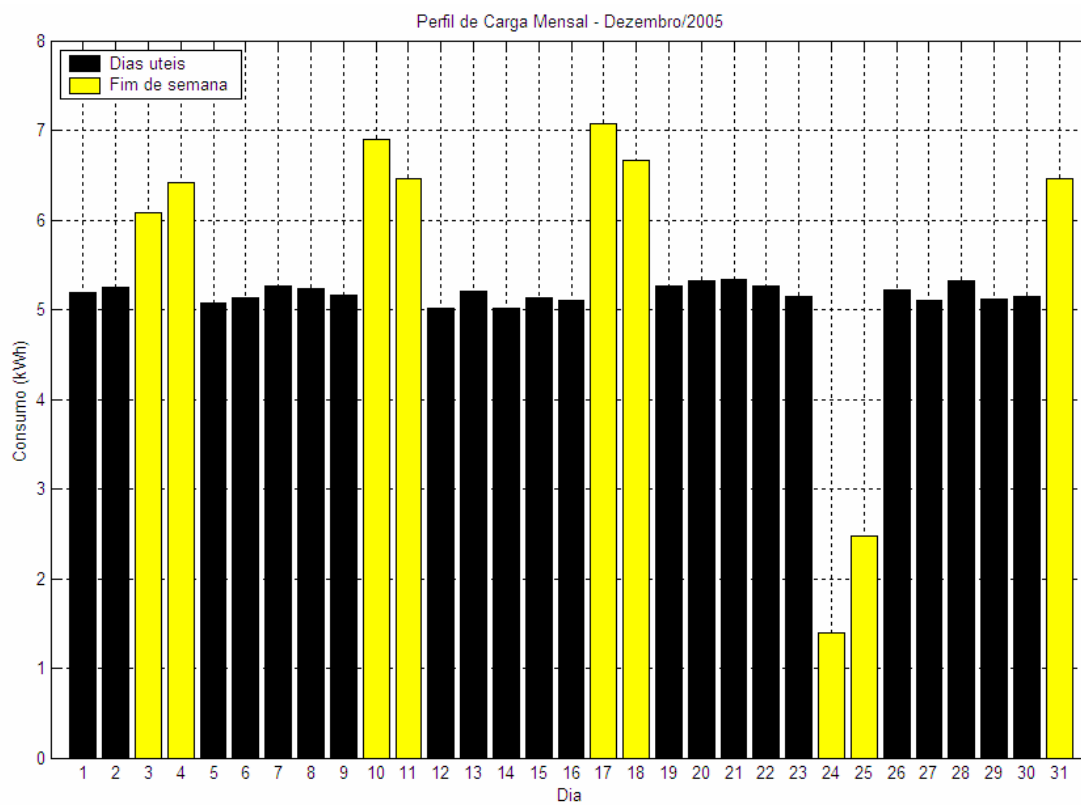


Figura 5.16 – Curva de consumo mensal (consumidor residencial)

5.3.3.2. Sazonalidades – Cenário Comercial

As Figuras 5.17 e 5.18 apresentam, respectivamente, as curvas de consumo diário e mensal para um consumidor comercial.

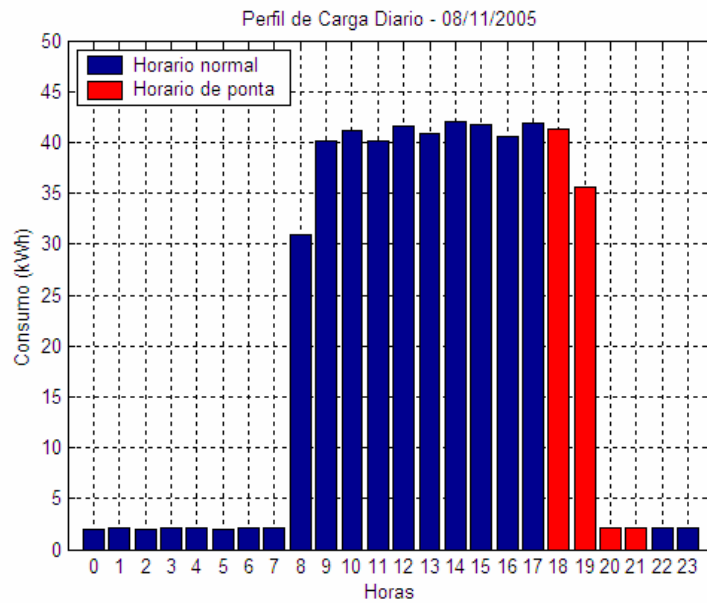


Figura 5.17 – Curva de consumo diário (consumidor comercial)

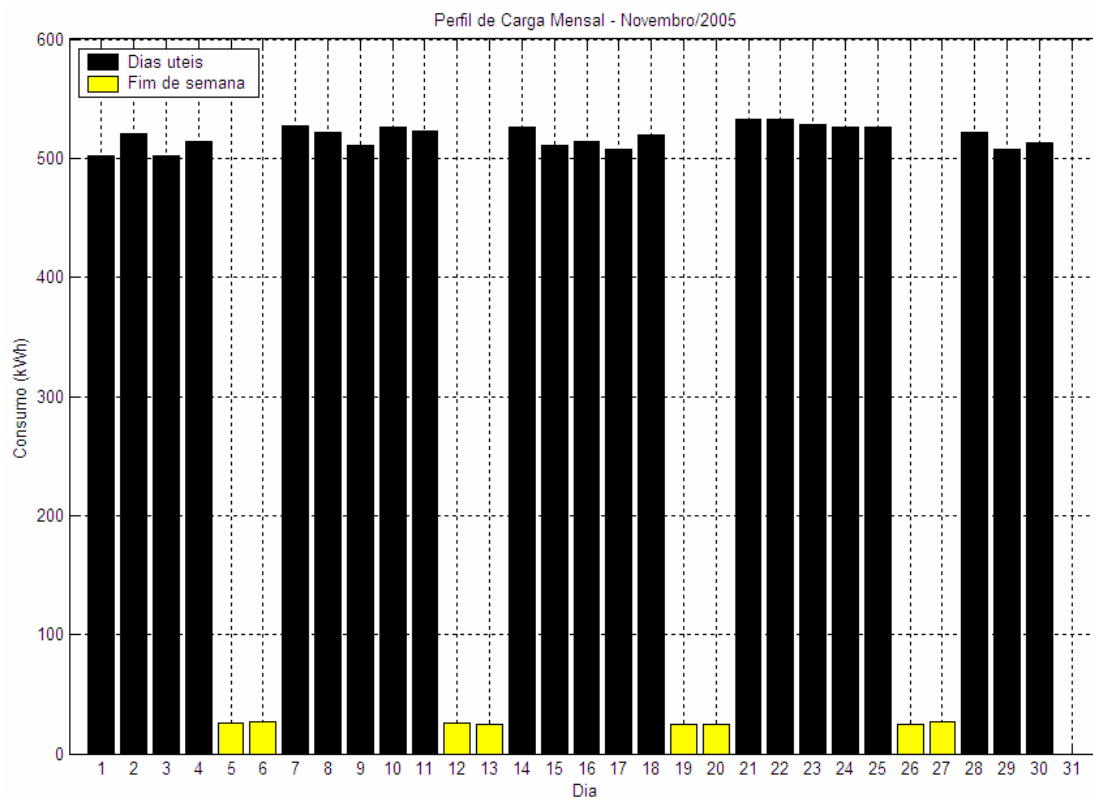


Figura 5.18 – Curva de consumo mensal (consumidor comercial)

5.3.3.3. Sazonalidades – Cenário Industrial

As Figuras 5.19 e 5.20 apresentam, respectivamente, as curvas de consumo diário e mensal para um consumidor industrial.

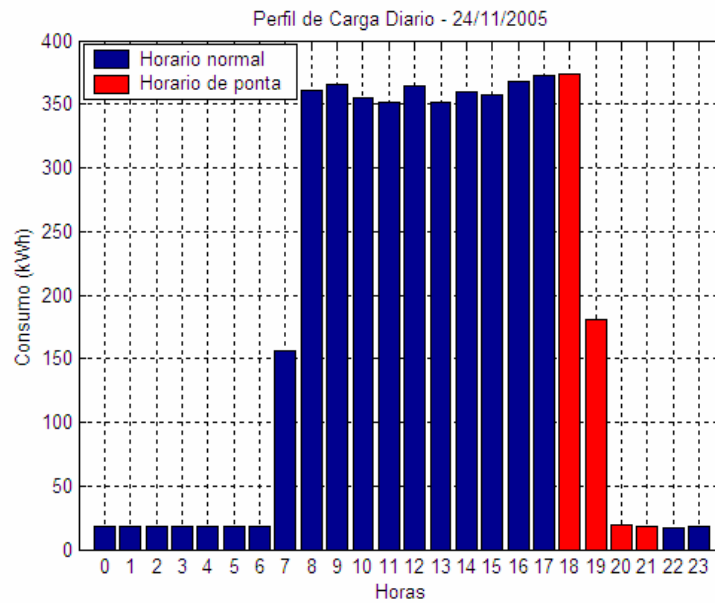


Figura 5.19 – Curva de consumo diário (consumidor industrial)

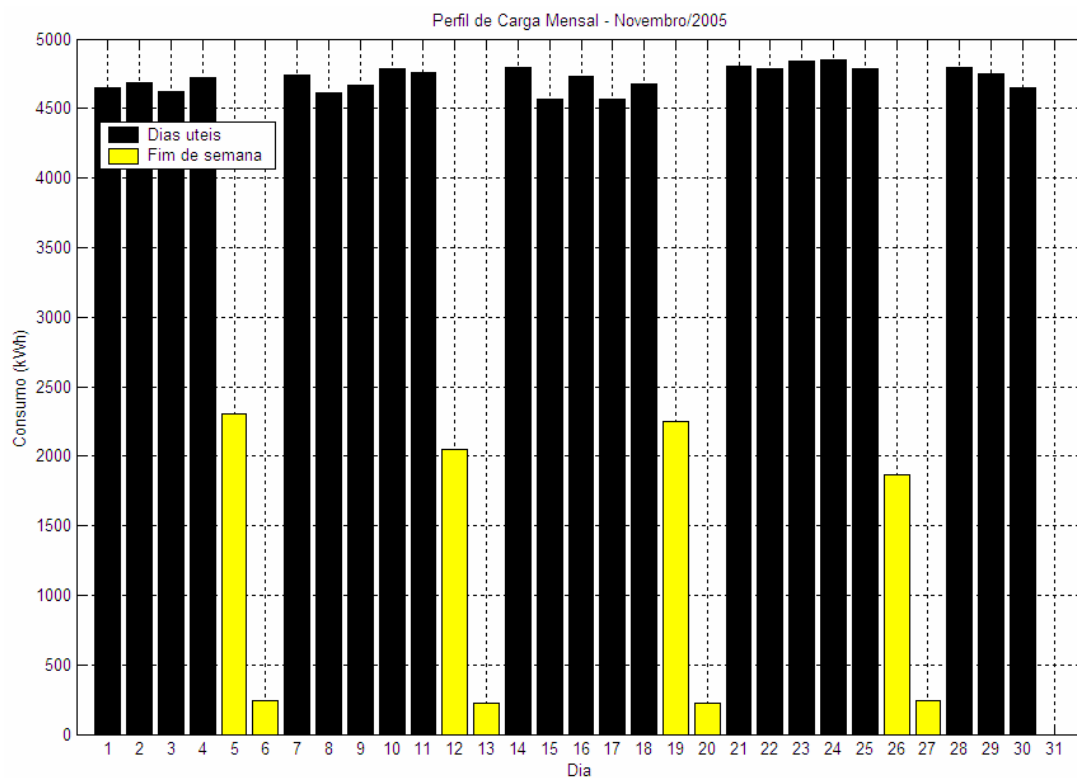


Figura 5.20 – Curva de consumo mensal (consumidor industrial)

5.3.3.4. Análise das Sazonalidades para os Cenários

A Tabela 5.3 traz um resumo do comportamento sazonal verificado em consumidores cujo perfil é similar às amostras escolhidas para a realização dos experimentos.

Tabela 5.3 – Comparação das sazonalidades para os três tipos de cenários considerados

Consumidor	Diário	Mensal
Residencial	Aumento da demanda no horário de ponta compreendido entre 18 e 21 horas, quando as cargas de maior potência são acionadas.	Variação do consumo diário nos fins de semana com relação aos dias úteis, registrando maior consumo nos três primeiros finais de semana e uma redução no último fim de semana do mês.
Comercial	Consumo praticamente uniforme durante o horário comercial, compreendido entre 8 e 19 horas.	Redução significativa do consumo nos dois dias dos finais de semana (cerca de 95% em relação aos dias úteis).
Industrial	Consumo praticamente uniforme durante o horário de produção, compreendido entre 7 e 19 horas.	Redução do consumo nos sábados (cerca de 50% em relação aos dias úteis) e uma redução maior nos domingos (cerca de 90% em relação aos dias úteis)

Um terceiro feito sazonal pode ainda ser observado, onde a carga varia conforme a temperatura média do mês em função das estações do ano. No entanto este é um comportamento sazonal de maior escala temporal, sendo igualmente verificado em consumidores com perfis comerciais e industriais.

Considerando as características de consumo, os perfis de carga e os efeitos sazonais brevemente discutidos nesta seção, consideramos como intervalo mínimo para a realização dos experimentos um período de 24 horas, preferencialmente localizado em um dia de maior consumo.

A Tabela 5.4 mostra a duração e o período escolhidos para a realização dos experimentos em cada um dos cenários.

Tabela 5.4 –Intervalos para a realização dos experimentos

Cenário	Duração	Período
Residencial	24 horas	fim de semana
Comercial	24 horas	dia útil
Industrial	24 horas	dia útil

5.3.4. Aquisição de Dados e Interação com os Equipamentos PLC

Para instalações de grande porte, a tecnologia utilizada conta com ferramentas de hardware e de software especialmente concebidas para gerenciar, monitorar e operar todos os equipamentos PLC de maneira remota. Fazendo uso de metodologias e de protocolos amplamente utilizados na gestão de equipamentos de rede e de telecomunicações, estas ferramentas dispõem de interfaces intuitivas e amigáveis para com o usuário, reduzindo a complexidade do processo e automatizando a maioria das tarefas necessárias.

Devido à complexidade envolvida, bem como aos equipamentos necessários para compor este chamado “Centro de Gestão do Sistema”, não pudemos contar com estes recursos na execução das atividades de investigação prática realizadas.

Visando suprir esta necessidade, após o estudo da documentação dos equipamentos, um aplicativo foi desenvolvido para que pudessemos interagir com os mesmos nesta rede PLC de pequena escala.

Adotando sempre a filosofia do uso de softwares livres de licença [55] e com código aberto [56], utilizamos como plataforma de desenvolvimento um microcomputador com processador x86 genérico executando o sistema operacional Linux [13], [14].

Toda a lógica de execução dos comandos necessários para acessar aos registros dos equipamentos e disponibilizar estes dados em um formato que pudesse ser processado posteriormente por um programa de análise numérica foi escrita em linguagem PERL (*Practical Extraction and Report Language*) [15], [16]. Além da fluência nesta linguagem, optamos pelo uso da mesma, devido à versatilidade que esta oferece para a implementação das funções necessárias neste contexto.

A topologia genérica utilizados nos experimentos é apresentada na Figura 5.21, abaixo.

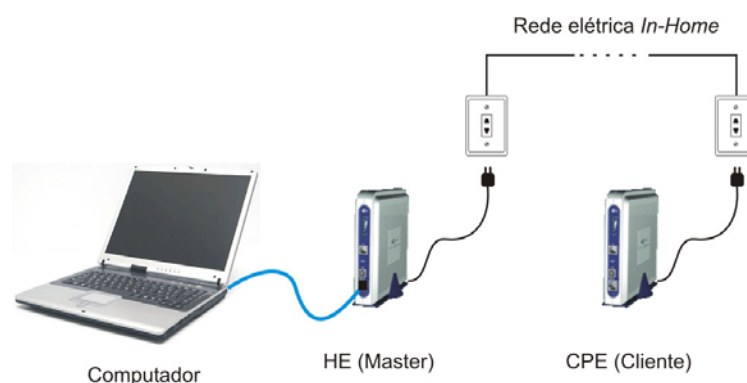


Figura 5.21 – Configuração genérica utilizada para os experimentos.

A lógica implementada no aplicativo desenvolvido consiste na execução das seguintes ações:

- Garantir a utilização completa do enlace PLC, utilizando todas as 1.536 sub-portadoras OFDM disponíveis, através do fluxo contínuo de dados entre os dois equipamentos PLC, obtido por meio do envio de pacotes ICMP;
- Consultar de modo periódico os registradores do equipamento HE, solicitando o envio dos seguintes parâmetros em tempo real:
 - Valor da SNR (dB) para cada uma das 1536 sub-portadoras OFDM
 - Taxa de transmissão³² (Mbps) para ambos os sentidos (*downlink* e *uplink*)³³
 - Registros de períodos de indisponibilidade do enlace PLC e mensagens
- Salvar os registros em arquivos binários com um formato genérico, permitindo a posterior leitura e interpretação dos mesmos por um software de processamento numérico.

A Tabela 5.5 mostra alguns parâmetros dos arquivos de dados SNR obtidos após a execução dos experimentos.

Tabela 5.5 – Parâmetros utilizados no algoritmo de monitoramento dos equipamentos

Variável (unidade)	Valor
Intervalo de amostragem (minutos)	5
Amostras por hora	12
Duração total de cada experimento (horas)	24
Número de amostras do espectro OFDM obtidas $[i]$	288
Número de sub-portadoras OFDM utilizadas	1536
Registros por amostra do espectro $[j]$	768

Com base nestes parâmetros, obtermos uma matriz de tamanho (288,768) onde cada linha representa uma amostra completa do espectro OFDM. A Figura 5.22 mostra o formato da matriz de dados SNR obtida³⁴.

$$\begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_i \\ \vdots \\ A_{288} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{1,1} & S_{1,2} & \cdots & S_{1,j} & \cdots & S_{1,768} \\ S_{2,1} & S_{2,2} & \cdots & S_{2,j} & \cdots & S_{2,768} \\ \vdots & \vdots & & & & \vdots \\ S_{i,1} & S_{i,2} & & \ddots & & S_{i,768} \\ \vdots & \vdots & & & & \vdots \\ S_{288,1} & S_{288,2} & \cdots & S_{288,j} & \cdots & S_{288,768} \end{bmatrix}$$

Figura 5.22 – Matriz de dados (SNR) obtida

³² Taxa de transmissão em camada física.

³³ Downlink: HE → CPE. Uplink: CPE → HE.

³⁴ O equipamento agrupa as portadoras em pares, de modo que se obtém 768 amostras.

De modo similar, obtemos uma matriz de tamanho (288,2) cujos registros de cada linha contém os valores da performance em Mbps, sendo a primeira coluna reservada para o sentido de *downlink* e a segunda para o tráfego em *uplink*. A Figura 5.23 mostra o formato das matrizes de dados de taxa de transmissão obtidas.

$$\begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \vdots \\ B_i \\ \vdots \\ B_{288} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{1,1} & P_{1,2} \\ P_{2,1} & P_{2,2} \\ \vdots & \vdots \\ P_{i,1} & P_{i,2} \\ \vdots & \vdots \\ P_{288,1} & P_{288,2} \end{bmatrix}$$

Figura 5.23 – Matriz de dados (taxa de transmissão) obtida

5.3.5. Tratamento dos Dados Adquiridos

Após a realização dos experimentos nos cenários descritos, o programa de análise numérica MATLAB[®] 35 foi utilizado para o tratamento dos dados coletados. Esta ferramenta permitiu a visualização gráfica dos resultados, bem como o levantamento de várias estatísticas acerca do comportamento do sistema PLC nas redes analisadas.

5.4. Apresentação dos Resultados dos Experimentos

Nesta seção apresentamos, para cada um dos cenários sob análise, o resultado das medições efetuadas para os seguintes parâmetros:

- Relação sinal-ruído;
- Taxa de transmissão em camada física.

5.4.1. Relação Sinal-Ruído (SNR)

Iniciaremos a apresentação dos resultados, através da visualização da relação sinal-ruído para todas as amostras do espectro OFDM, nos três cenários. A Tabela 5.25 traz uma compilação dos principais valores calculados para este parâmetro de desempenho das redes PLC *In-Home*.

³⁵ MATLAB[®] é marca registrada da empresa The MathWorks, Inc.

Tabela 5.6 – Estatísticas levantadas para o parâmetro SNR nos três cenários

Cenário	Média Geral (dB)	Desvio Padrão (dB)	Média Melhor Amostra (dB)	Média Pior Amostra (dB)	Diferença Melhor - Pior (dB)
Residencial	35,8	4,0	37,9	32,2	7,7
Comercial	15,1	8,0	23,6	1,9	21,7
Industrial	22,2	7,6	32,3	14,3	18,0

A Figura 5.24 mostra, para os três cenários abordados, a evolução histórica do parâmetro SNR durante as 24 horas de monitoramento.

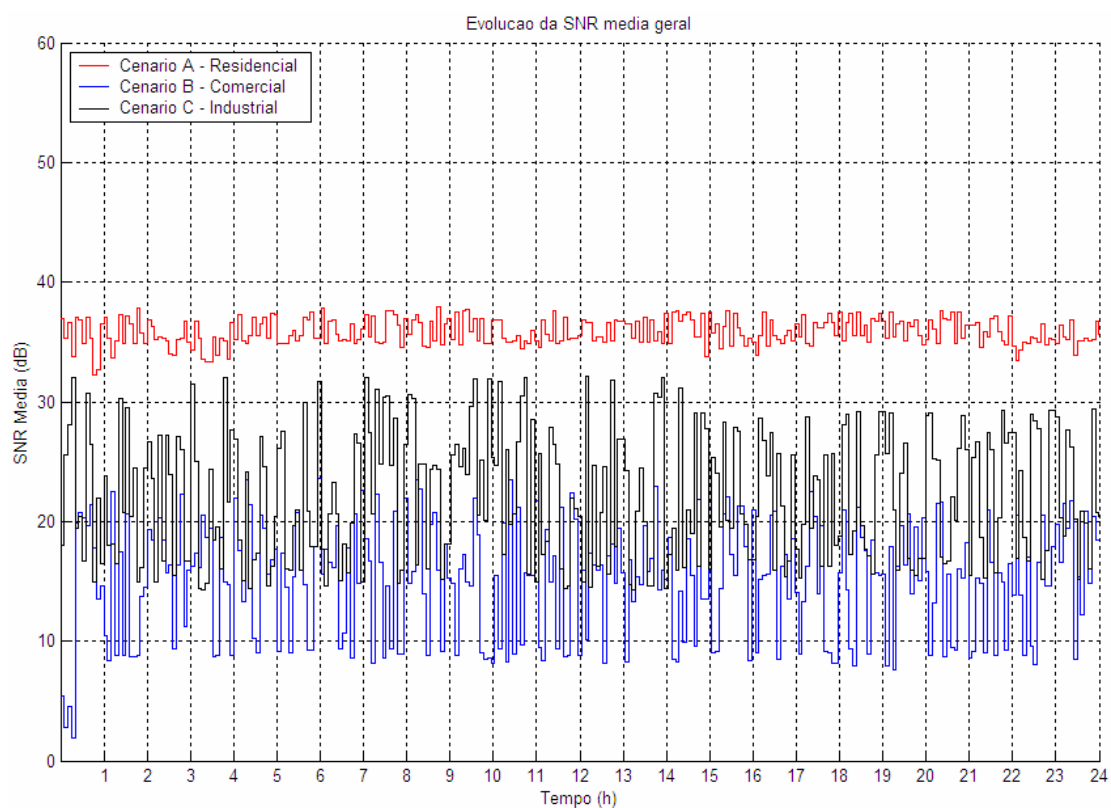


Figura 5.24 – Evolução da SNR média durante as 24 horas de monitoramento

Na seqüência apresentamos, para cada um dos três cenários estudados:

- Representação gráfica de todas as amostras adquiridas do espectro OFDM, juntamente com a curva exibindo a SNR média calculada para cada sub-portadora;
- Gráfico de SNR para as amostras com maior e menor valores médios deste parâmetro.

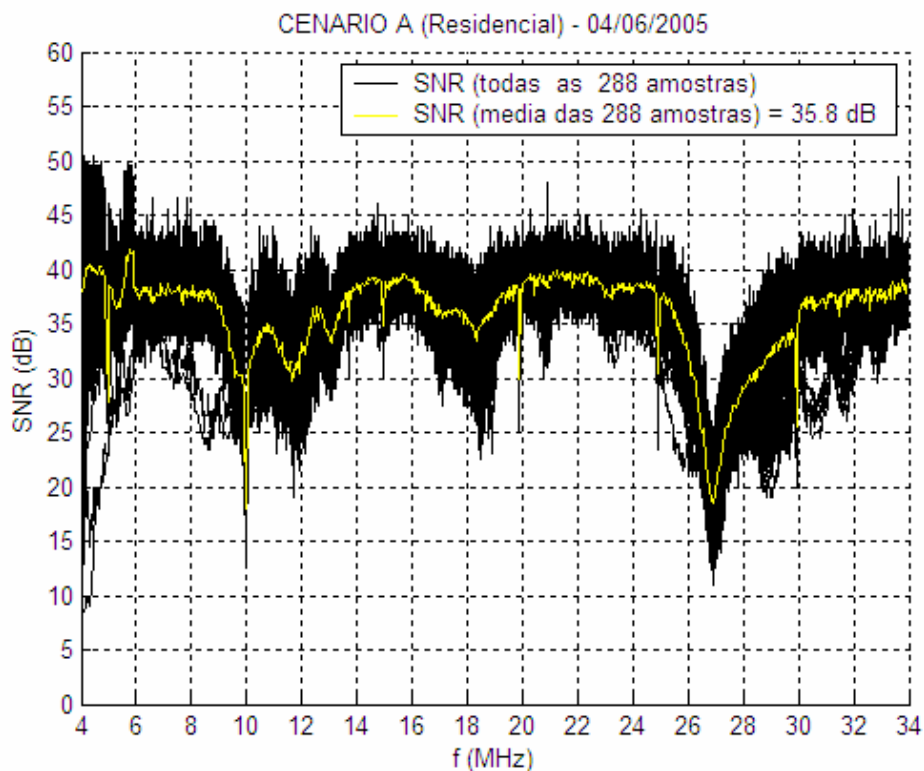


Figura 5.25 - Cenário Residencial – Gráficos da relação sinal-ruído

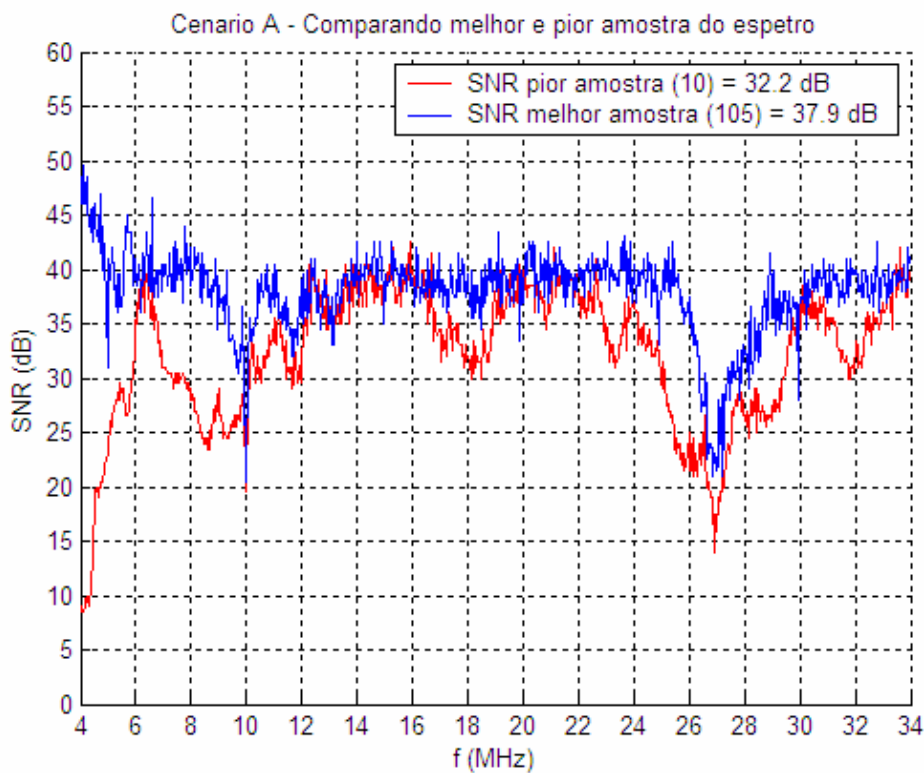


Figura 5.26 - Cenário Residencial – SNR (melhor e pior amostras do espetro)

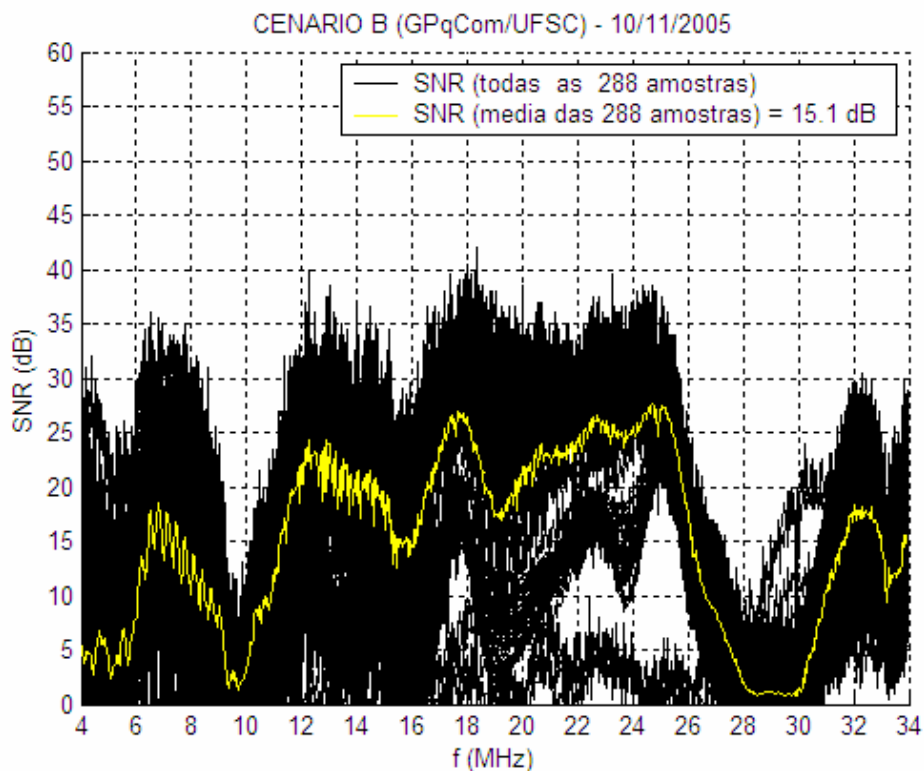


Figura 5.27 – Cenário Comercial – Gráficos da relação sinal-ruído

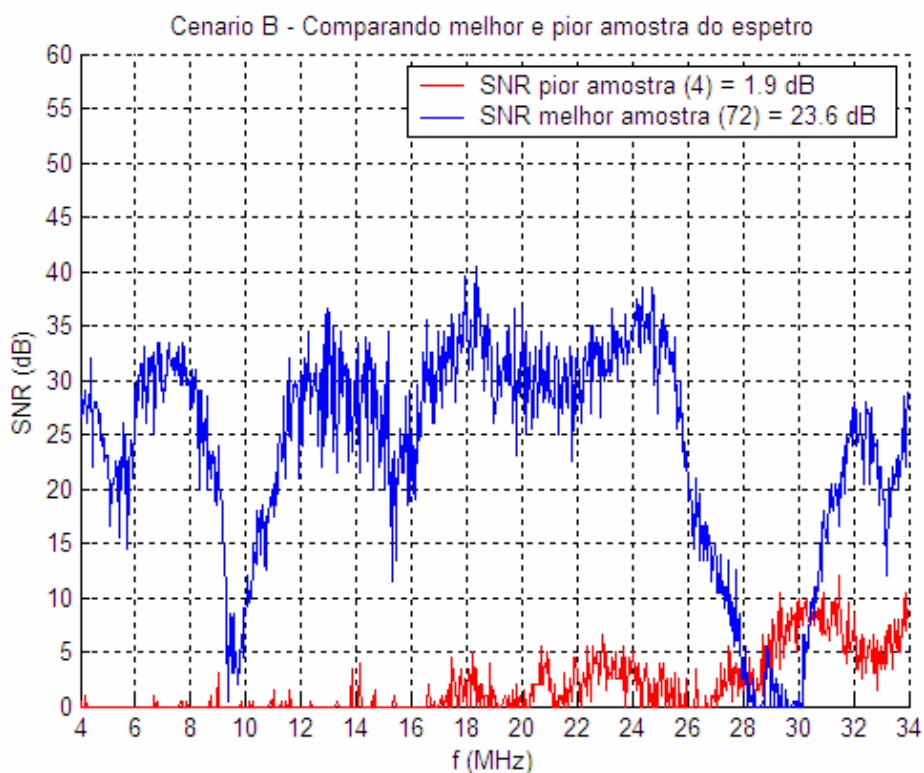


Figura 5.28 – Cenário Comercial – SNR (melhor e pior amostras do espectro)

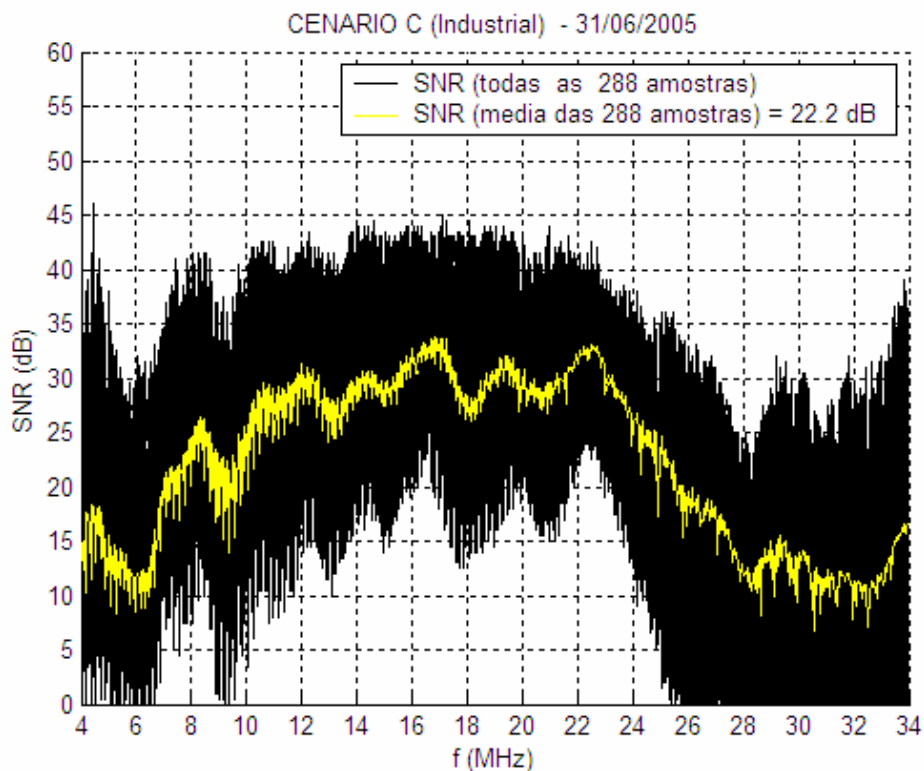


Figura 5.29 – Cenário Industrial – Gráficos da relação sinal-ruído

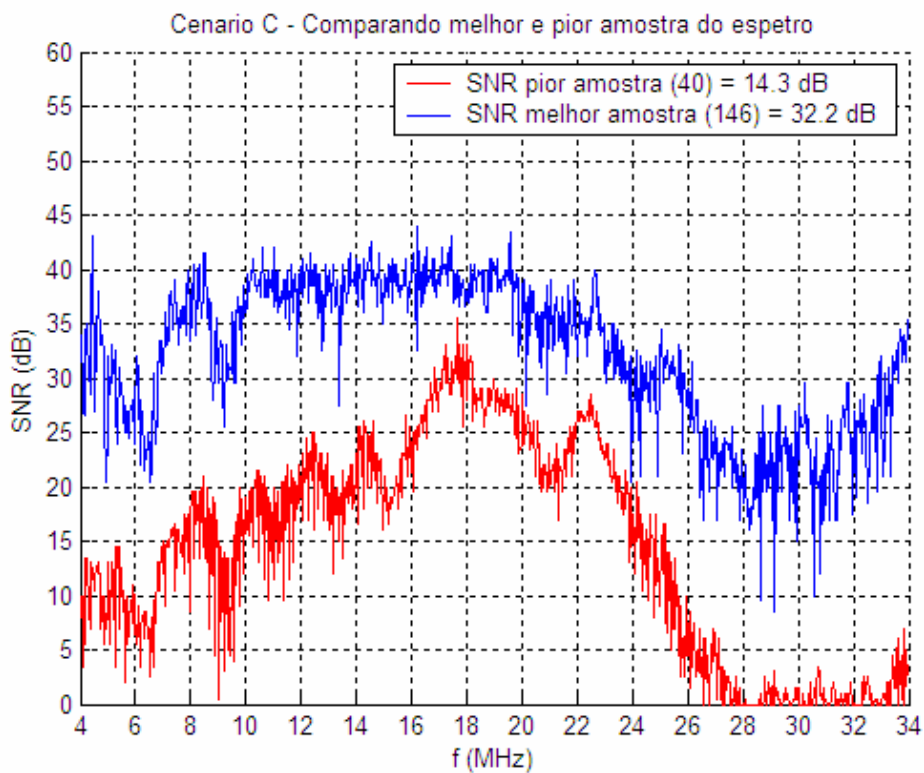


Figura 5.30 – Cenário Industrial – SNR (melhor e pior amostras do espectro)

5.4.2. Taxa de Transmissão em Camada Física

Como referência de desempenho, comparamos os valores da taxa de transmissão em camada física para o sistema PLC *In-Home* com as taxas oferecidas pelas quatro principais soluções tecnológicas utilizadas atualmente para a composição de redes locais.

As primeiras duas soluções usadas como referência utilizam como meio físico o popular cabo de rede UTP (*Unshielded Twisted Pair*), ao passo que as demais estabelecem enlaces de rádio para o mesmo fim.

A Tabela 5.7 mostra algumas informações sobre os sistemas utilizados como referência. As Figuras 5.31, 5.32 e 5.33 exibem a evolução deste parâmetro durante as 24 horas de monitoramento.

Tabela 5.7 – Características gerais dos sistemas LAN e WLAN de referência.

Padrão	Nome Usual	Ano	Meio Físico	Capacidade
IEEE 802.3i	Ethernet	1990	Cabo UTP	10 Mbps
IEEE 802.3i	Fast Ethernet	1995	Cabo UTP	100 Mbps
IEEE 802.11b	Wi-Fi 11	1999	Rádio	11 Mbps
IEEE 802.11g	Wi-Fi 54	2003	Rádio	54 Mbps

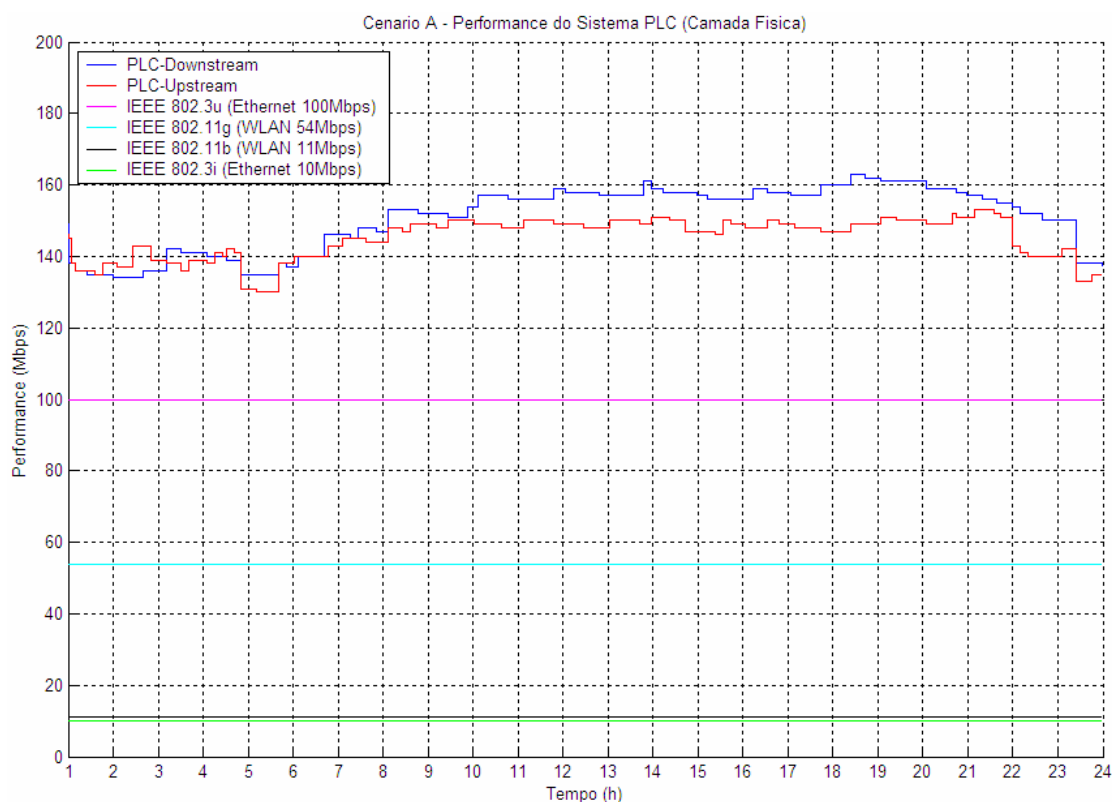


Figura 5.31 - Cenário Residencial – Desempenho do sistema PLC *In-Home*

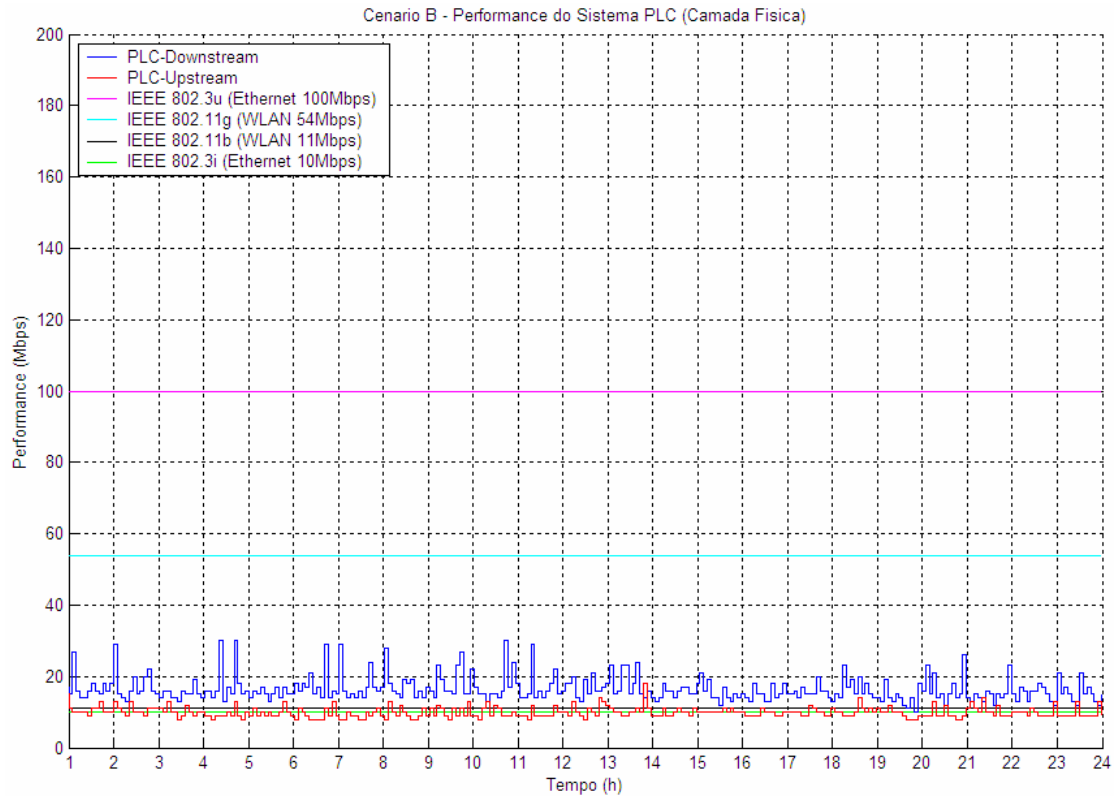


Figura 5.32 - Cenário Comercial – Desempenho do sistema PLC *In-Home*

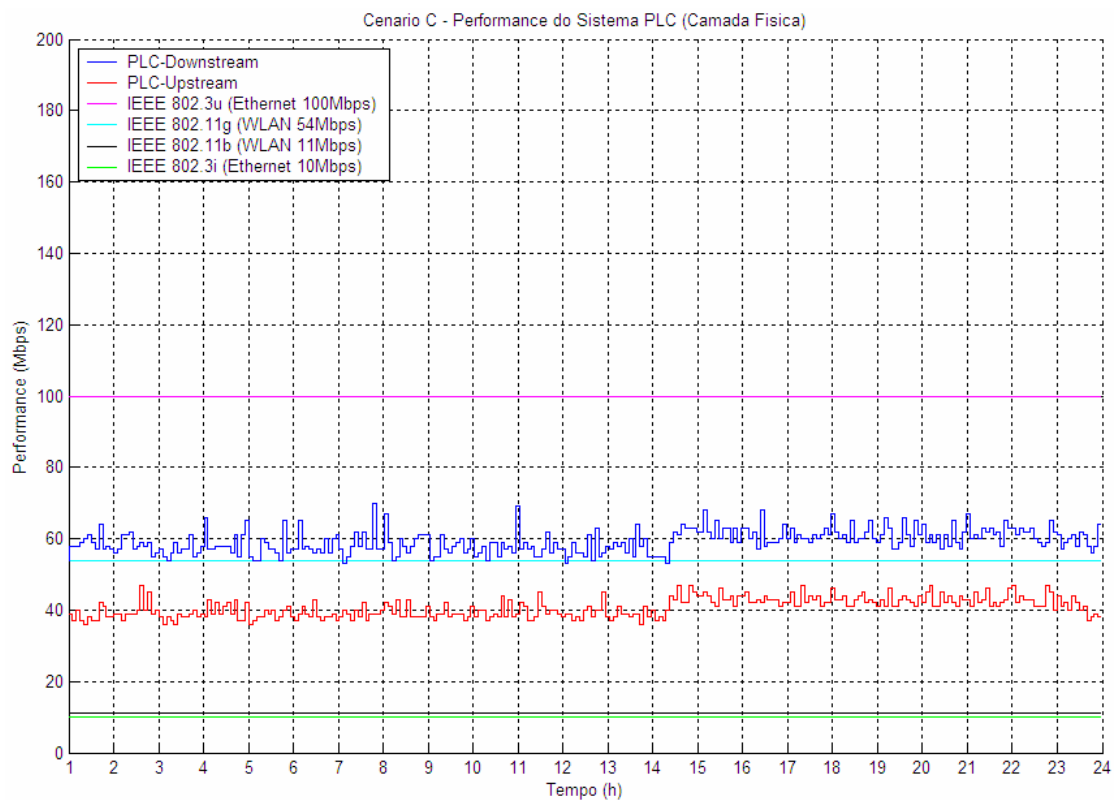


Figura 5.33 - Cenário Industrial – Desempenho do sistema PLC *In-Home*

Na Tabela 5.8 apresentamos um resumo com as comparações entre o desempenho apresentado pelo sistema PLC *In-Home* frente às quatro referências de tecnologia LAN consideradas.

Tabela 5.8 – Comparação do desempenho do sistema PLC com outras tecnologias

PLC <i>In-Home</i>		Padrão IEEE			
Cenário	Sentido	802.3i LAN 10Mbps	802.11b WLAN 11Mbps	802.11g WLAN 54Mbps	802.3u LAN 100Mbps
Residencial	Down	↑	↑	↑	↑
	Up	↑	↑	↑	↑
Industrial	Down	↑	↑	↑	↓
	Up	↑	↑	↓	↓
Comercial	Down	↑	↑	↓	↓
	Up	=	=	↓	↓

Legenda:

↑ Superioridade do sistema PLC

↓ Inferioridade do sistema PLC

= Igualdade entre os sistemas

5.5. Conclusões

Neste Capítulo apresentamos uma série de experimentos realizados com o intuito de verificar o desempenho de um sistema PLC baseado em OFDM operando em distintos cenários do tipo *In-Home*.

Em termos de propagação do sinal PLC, a análise dos valores de SNR medidos, assim como as médias calculadas para este parâmetro, mostram que o comportamento apresentado pelo sistema nos três cenários avaliados é bastante heterogêneo.

Conforme verificamos nos resultados apresentados, do ponto de vista da transmissão de dados através dos circuitos internos de distribuição de energia elétrica, o cenário residencial se mostrou o mais favorável dentre os três avaliados. Os altos valores verificados no parâmetro SNR mostram que as interferências presentes neste tipo de cenário praticamente não degradam o desempenho do sistema PLC. O cenário residencial mostrou-se ainda bastante estável, refletindo no menor valor de desvio padrão observado para o parâmetro SNR entre os três ambientes (7dB). Esta característica de estabilidade pode também ser verificada ao comparar a pouca variação entre a melhor e a pior amostra do espectro OFDM medida neste ambiente, cerca de 5dB.

Com base nesta análise concluímos que, para cenários com perfil similar a este, uma rede local implementada com um sistema PLC do mesmo nível técnico da solução utilizada, provavelmente proporcionará maiores taxas de transmissão, se comparado às quatro principais tecnologias utilizadas atualmente para esta finalidade.

O cenário comercial, aqui representado pela topologia do laboratório de pesquisa utilizado, mostrou-se como ambiente de propagação mais hostil entre os três analisado. A quantidade de cargas com fontes eletrônicas cujas especificações provavelmente não atendam às normas internacionais de compatibilidade eletromagnética, bem como o grande número de derivações verificado na topologia elétrica desta instalação, são as prováveis causas dos baixos valores de SNR medidos. De modo análogo, a intensa dinâmica de inserção e remoção de cargas verificada neste ambiente implica na grande variação das condições da rede elétrica interna como um canal de comunicações. Tanto o alto valor do desvio padrão (8dB), quanto a notável diferença (superior a 20dB) entre a melhor e a pior amostra do espectro colhida atestam este comportamento.

Devido à suscetibilidade a estes fatores, a tecnologia PLC utilizada pode não representar a melhor escolha para a composição de uma rede local em ambientes cujo perfil de cargas e a topologia elétrica se assemelhem à amostra utilizada.

Por fim, embora o cenário industrial represente a topologia elétrica mais complexa e com um consumo bastante superior aos demais, o mesmo mostrou-se um ambiente com uma classificação intermediária, do ponto de vista do desempenho do sistema PLC *In-Home*.

O fato de a planta industrial contar apenas com equipamentos cujas fontes são produzidas dentro dos mais rigorosos padrões de qualidade, no que se refere aos aspectos de compatibilidade eletromagnética, faz com que o impacto dos ruídos locais seja menos significativo neste cenário. Por outro lado as distâncias entre os equipamentos PLC eram cerca de quatro vezes superior àquelas verificadas nos outros dois ambientes.

A análise das curvas de SNR mostra um canal de comunicação de qualidade razoável, apresentando um valor médio de SNR aceitável (22,2 dB), porém com uma característica ligeiramente instável, com um desvio padrão igual a 7,6dB. Neste cenário registramos ainda uma diferença superior a 15dB para a SNR entre a melhor e a pior amostra do espectro OFDM.

Deste modo, o sistema PLC poderia garantir uma performance de transmissão de dados intermediária às duas melhores tecnologias mais utilizadas atualmente para este fim.

Capítulo 6

Conclusões Finais

A possibilidade da utilização das redes de transmissão e de distribuição de energia elétrica para a transmissão de sinais e a prestação de serviços de telecomunicações tem revelado grande interesse por parte de grupos de pesquisas, operadores de telecomunicações, concessionárias de energia elétrica e empresas que desenvolvem atividades afins. Contudo, até o presente momento, poucos são os registros científicos no Brasil acerca deste assunto.

Tendo como um dos propósitos oferecer uma contribuição pioneira a respeito do tema, capaz de motivar o desenvolvimento de trabalhos futuros, este documento reúne informações a respeito da tecnologia PLC, aborda a situação da mesma em termos de adoção mundial e apresenta um trabalho prático sobre a viabilidade de utilização da mesma em ambientes tipicamente cobertos com outras soluções para a transmissão de dados em forma de uma rede local.

Foram resgatados neste estudo, os fatores que impulsionaram o desenvolvimento desta tecnologia, um histórico do desenvolvimento da mesma e os aspectos motivadores desta nova aplicação. Tratamos ainda de detalhes específicos para a implementação de redes PLC, expondo as principais configurações topológicas utilizadas para compor este tipo de sistema, analisando as vantagens e as desvantagens de cada método.

Tratamos das características intrínsecas das topologias elétricas, discorrendo sobre os principais fenômenos detectados neste ambiente, bem como o impacto dos mesmos na transmissão de sinais de alta frequência por este canal.

Ao considerar as redes elétricas como um canal de comunicação, mostramos neste trabalho os principais avanços no sentido de caracterizá-la como tal, bem como distintos modelos apresentados em recentes pesquisas realizadas nesta área.

Frente às dificuldades impostas pelo canal, apresentamos o método de modulação OFDM que tem sido adotado como potencial solução para a implementação de sistemas PLC na prática. Neste sentido mostramos, desde o histórico de desenvolvimento deste método, até os aspectos mais recentes abordados em artigos científicos e literaturas diversas dedicadas ao tema.

Por fim, apresentamos a metodologia empregada e os resultados obtidos em uma série de experimentos realizados, cujo intuito foi monitorar e registrar o desempenho de sistemas PLC em topologias *In-Home* típicas de instalações elétricas brasileiras. Além do caráter

investigativo, esta atividade visou contribuir no sentido de disponibilizar registros deste tipo de estudo, com foco nas topologias elétricas encontradas no Brasil.

De um modo geral, o comportamento da solução PLC utilizada nos experimentos realizados mostrou-se bastante satisfatória, superando em alguns casos o desempenho oferecido por tecnologias amplamente disseminadas para este fim.

Sugestões de Trabalhos Futuros

Apresentamos abaixo algumas sugestões de trabalhos futuros, relacionados com os temas abordados nesta dissertação:

- Estender a metodologia utilizada nos experimentos para as demais topologias de aplicação da tecnologia PLC: Topologia para Acesso na Última Milha e Topologia PLC para Acesso WAN;
- Na realização de experimentos similares, monitorar e registrar, além do desempenho do sistema PLC e das características do canal, o comportamento do entorno eletromagnético nos cenários sob análise, como as emissões irradiadas provenientes de fontes de interferências externas;
- Estender a duração dos ensaios de modo a permitir, através do uso de técnicas específicas, a obtenção de um modelo estatístico para o comportamento do canal PLC nos distintos cenários abordados.

Referências

Referências Bibliográficas

- [1] HAYKIN, S. *Communication Systems*. 3ed. EUA: John Willey & Sons, 1994.
- [2] HAYKIN, S. *Digital Communication*. EUA: John Willey & Sons, 1998.
- [3] LIN, S.; COSTELLO, D. J. Jr. *Error Control Coding: Fundamentals and Application*. EUA: Prentice-Hall, 1983;
- [4] DOSTERT, K. *Powerline Communications*. 1ed. EUA : Prentice Hall, 2001.
- [5] HRASNICA, H.; HAIDINE, A.; LEHNERT, R.; *Broadband Powerline Communications - Network Design*. 1ed. Inglaterra, 2004.
- [6] HEISKALA, J.; TERRY, J.; *OFDM Wireless LANs: A Theoretical and Practical Guide*. 1ed. EUA : SAMS Publishing, 2002.
- [7] OPPENHEIM, A.V.; WILLSKY, A.; *Signals and Systems*. 2ed. EUA : Prentice Hall, 1996.
- [8] OPPENHEIM, A.V.; SCHAFER, R.W.; BUCH, J.R. *Discrete-Time Signal Processing*. 2ed. EUA : Prentice Hall, 1999.
- [9] PROAKIS, J. G. *Digital Communications*. 2.ed. Local : McGraw-Hill, 1995.
- [10] RAPPAPORT, T. *Wireless Communications: Principles and Practice*. 2ed. EUA : Prentice Hall, 2001.
- [11] ROBBA, E.J. *Introdução a Sistemas Elétricos de Potência*. 1ed. Brasil : Edgar Blücher, 1977.
- [12] STEVENSON, W.D.Jr. *Elementos de Análise de Sistemas de Potência*. 1ed. Brasil : McGraw-Hill, 1981.
- [13] BOVET, D.; CESATI, M. *Understanding the Linux Kernel*. 3ed. EUA : O'Reily Media, 2005.
- [14] CORBET, J.; RUBINI, A.; KROAH-HARTMAN, G. *Linux Device Drivers*. 3ed. EUA : O'Reily Media, 2005.
- [15] WALL, L.; CHRISTIANSEN, T.; ORWANT, J. *Programming Perl*. 3ed. EUA : O'Reily Media, 2000.
- [16] SPAINHOUR, S.; SIEVER, E. *PERL - Guia Completo*. 1ed. Brasil : Ciência Moderna, 1999.

- [17] POINT TOPIC. *World Broadband Statistics: Q2 2004*. Londres: Point Topic Ltd.,2004
- [18] MOSIER, R. R.; CLABAUGH, R. G. Kineplex, a Bandwidth Efficient Binary Transmission System. *AIEE Transactions*. Vol. 76 p. 723-728, Jan. 1958.
- [19] CHANG, R. W.; Orthogonal Frequency Division Multiplexing. *US Patent 3,488445*. Requerida em 14 de Novembro de 1966 e concedida em 6 de Janeiro de 1970.
- [20] CHANG, R. W.; Synthesis of Band-Limited Orthogonal Signals for Multichannel Data Transmission. *Bell Systems Technical Journal*, Vol. 46 p. 1775-1796, Dec. 1966
- [21] CHANG, R. W.; A Theoretical Study of Performance of an Orthogonal Multiplexing Data Transmission Scheme. *IEEE Transactions on Communications Technology*, Vol. COM-16, N°4, Aug. 1968.
- [22] WEISTEIN, S. B.; EBERT, P. M.; Data Transmission by Frequency-Division Multiplexing Using the Discrete Fourier Transform. *IEEE Transactions on Communications Technology*, Vol. COM-19, N°5, Oct. 1971.
- [23] ETSI – European Telecommunications Standards Institute; ETS 300 401 – Radio broadcasting systems - Digital Audio Broadcasting (DAB) to mobile, portable and fixed receivers. Valbone, France, 1995.
- [24] ETSI – European Telecommunications Standards Institute; ETSI ETS 300 744 – Framing Structure, Channel Coding and Modulation for Digital Terrestrial Television. Mar 1997.
- [25] ETSI – European Telecommunications Standards Institute; DTS/BRAN002004-2 – Broadband Radio Access Networks – HIPERLAN Type 2. Sept 1999.
- [26] ZIMMERMANN, M.; DOSTERT, K. *An Analysis of the Broadband Noise Scenario in Powerline Networks*. University of Karlsruhe 2000.
- [27] ZIMMERMANN, M.; DOSTERT, K. *A Multipath Signal Propagation Model for the Power Line Channel in the High Frequency Range*. University of Karlsruhe 2000.
- [28] BARNES, J. *A Physical Multi-Path Model for Power Distribution Network Propagation*. Proc. International Symposium on Powerline Communications and its Applications – Japan, 1998.
- [29] BIGLIERI, E. *Coding and Modulation for a Horrible Channel*. IEEE Communications Magazine, Maio 2003.
- [30] JEE, G.; RAO, R. D.; CERN, Y. *Demonstration of the Technical Viability of PLC Systems on Medium- and Low-Voltage Lines in the United States*. IEEE Communications Magazine, Maio 2003.
- [31] HOOIJEN, O. *A Channel Model for the Low-Voltage Power-Line Channel*. Proc. International Symposium on Powerline Communications and its Applications – Japan, 1998.

- [32] BOSTOEN, T.; VAN de VIEL, O. *Modeling the Low Voltage Power Distribution Network in the Frequency band from 0,5 MHz to 30MHz for Broadband Powerline Communications*. IEEE, 2000.
- [33] GÖTZ, M.; DOSTERT, K. *A Universal High Speed Powerline Channel Emulation System*. International Zurich Seminar on Broadband Communications, 2002.
- [34] KIM, C.J.; CHOUIKHA, M.F. *Attenuation Characteristics of High Rate Home-Networking PLC Signals*. IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 17, NO. 4, OCTOBER 2002
- [35] OLSON, R.G. *Technical Considerations for Wideband Powerline Communication - A Summary*. IEEE 2002
- [36] ARZBERGER, M.; *et al.* *Fundamental Properties of the Low Voltage Power Distribution Grid*. Proc. International Symposium on Powerline Communications and its Applications – Germany, 1997.
- [37] VINES, R.M. *et al.* *Impedance of the Residential Power-Distribution Circuit*. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1985.
- [38] ABAD, J.; BADENES, A.; BLASCO, J.; *et al.* *Extending the Power Line LAN Up to the Neighborhood Transformer*. IEEE Communications Magazine, Abril 2003.
- [39] DALICHAU, H. *Evaluation of Different Frequency Bands Regarding Their Qualification for Inhouse Powerline Communication*. Proc. International Symposium on Powerline Communications and its Applications – Sweden, 2001.
- [40] BUKHALA, Z. A.; GLINKOWSKI, M. T.; NELSON, J. K. *et al.* *Radio Frequency Signal Transmission on Medium Voltage Power Distribution Lines*. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.14, N° 1, January 1999.
- [41] KWASNIOK, P. J.; BUI, M. D.; KOSLOWSKI, A. J.; *et al.* *Technique for Measurement of Powerline Impedances in the Frequency Range from 500kHz to 500Mhz*. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol.35, N° 1, February 1993.
- [42] DÉGARDIN, V. LIÉNARD, M.; DEGAUQUE, P. *Transmission on indoor power lines: from a stochastic channel model to the optimization and performances evaluation of multicarrier system*. University of Lille, IEMN/DHS 2004.
- [43] DÉGARDIN, V. LIÉNARD, M.; ZEDDAM, A. *Classification and Characterization of Impulsive Noise on Indoor Power Line Used for Data Communications*. IEEE 2002.
- [44] NGUIMBIS, J.; JIANG, X.; CHENG, S. *Noise Characteristics Investigation and Utilization in Low Voltage Powerline Communication*. IEEE 2000.
- [45] HE, H.; CHENG, S.; ZHANG, Y.; *et al.* *Analysis of Reflection of Signal Transmitted in Low-Voltage Powerline With Complex Wavelet*. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.19, N° 1, January 2004.

- [46] BURR, A. G.; REED, D. M. W.; BROWN, P. A. *Effect of HF Broadcast Interference on Powerline Telecommunications Above 1MHz*. IEEE 1998.
- [47] SHPIGLER, D. *Power Line Is Not Always Power Line*. UTC Journal, July/August 2003.
- [48] LAWREY, E.P. *Adaptive Techniques for Multiuser OFDM*. Doctor Thesis – School of Engineering, James Cook University, 2001.

Referências na Internet

- [49] Internet World Stats – Usage and Population Statistics
www.internetworldstats.com
- [50] PLC Forum
www.plcforum.com
- [51] Digital Audio Broadcasting Forum; Digital Audio Broadcasting - Overview and Summary of the DAB System.
www.worlddab.org/public_documents/eureka_brochure.pdf
- [52] ETSI – European Telecommunications Standards Institute; *Digital Video Broadcasting*.
www.etsi.org/broadcast/dvb.htm
- [53] EBA-PLC, site do fabricante
www.ebapl.com
- [54] Dimat Tecnologia, site do fabricante
www.dimat.es
- [55] The Free Software Foundation
www.fsf.org
- [56] The GNU Operating System
www.gnu.org
- [57] Powertech Sistemas de Comunicação
www.powertechww.com