

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
MESTRADO EM ENGENHARIA DE TELECOMUNICAÇÕES

GILBERTO CASTRO LIMA

**ESTUDO PARA TRANSMISSÃO DE DADOS EM FAIXA LARGA  
SOBRE REDES DE ENERGIA ELÉTRICA**

Niterói  
2010

GILBERTO CASTRO LIMA

**ESTUDO PARA TRANSMISSÃO DE DADOS EM FAIXA LARGA SOBRE REDES  
DE ENERGIA ELÉTRICA**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre. Área de Concentração: Eletromagnetismo.

Orientador:  
Prof. MSC MAURO S. ASSIS

Niterói  
2010

GILBERTO CASTRO LIMA

**ESTUDO PARA TRANSMISSÃO DE DADOS EM FAIXA LARGA SOBRE REDES  
DE ENERGIA ELÉTRICA**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre. Área de Concentração: Eletromagnetismo.

Aprovado em dezembro de 2010

**BANCA EXAMINADORA**

---

Mauro S. Assis, M.Sc. - Orientador

---

Leni Joaquim de Matos, D.Sc.  
UFF

---

Eduardo R. Vale, D.Sc.  
UFF

---

Ângelo A. C. Canavitsas, M.Sc.  
PETROBRÁS

## **AGRADECIMENTOS**

Devo reconhecer que este trabalho só foi concluído graças ao apoio divino à minha determinação, ao apoio da minha família e dos meus amigos, especialmente àquelas amigadas construídas durante a realização das pesquisas. Nos momentos de solidão e aflição interior, lá estava Deus para me confortar e realimentar o desejo de levar adiante este desafio; nos dias em que achava impossível continuar, lembrava da minha esposa e das minhas duas filhas, e elas me faziam ver que tinha de ser forte e me impulsionavam para seguir adiante; quando estava quase convencido de que não reuniria as condições mínimas necessárias para me desenvolver e concluir este tema, que é de grande relevância aos serviços de telecomunicações no Brasil, lá estavam os meus amigos e professores no apoio emocional e acadêmico.

## RESUMO

Atualmente, o uso de redes de energia elétrica tem sido amplamente estudado como meio para transmissão de dados em altas taxas. Esse novo meio de transmissão é conhecido como BPL (*Broadband over Power Line*) nos Estados Unidos e no Brasil e, na Europa, como PLC (*Power Line Communications*). Sob o ponto de vista econômico a vantagem do sistema está associada à penetração de sua infraestrutura, aumentando a capilaridade em relação aos sistemas de telecomunicações convencionais. A possibilidade de prover redes de acesso em faixa larga pode popularizar de forma definitiva o uso da Internet, ao atender um número bem maior de usuários em todas as classes sociais, no mundo inteiro. Dessa forma, uma solução que reduza esses gastos pode contribuir para a redução do custo total de implantação dos sistemas de telecomunicações. Esse trabalho apresenta o modelo do canal BPL, os ruídos presentes e a regulamentação brasileira, do ponto de vista das telecomunicações - ANATEL e das redes de energia elétrica - ANEEL. Trata o problema do ruído impulsivo, inerente às linhas de energia elétrica, visto que este se apresenta como o maior ofensor do sistema. Em que pese às características adversas desse meio de transmissão, as dificuldades podem ser superadas através da escolha criteriosa de técnicas de transmissão e esquemas de modulação. As simulações computacionais apresentadas confirmam a viabilidade dos sistemas BPL, utilizando a técnica transmissão multiportadora OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), para combater a seletividade em frequência. Técnicas de modulação QPSK, 8PSK e 16QAM foram aplicadas nas simulações sob efeito do ruído aditivo branco Gaussiano e, em seguida, na presença do ruído impulsivo. Em ambos os casos a melhor performance foi obtida com o esquema de modulação 16QAM. Entretanto, quando o ruído impulsivo foi introduzido observou-se a necessidade de códigos corretores de erros para manter a taxa de erros de bits abaixo de  $10^{-3}$ , sem um acréscimo significativo da relação sinal ruído.

**Palavras-chave:** Broadband over Power Line. BPL. OFDM. Ruído impulsivo

## ABSTRACT

Nowadays, the use of power lines has been extensively studied as a medium for transmitting high data rates to deliver broadband services. This new communication system is known as BPL (*Broadband over Power Line*) in the USA and Brazil and PLC (*Power Line Communications*) in Europe. Under the economical point of view, the advantage of BPL is associated to the penetration of power line networks everywhere, increasing the capillarity of the conventional telecommunication systems. Consequently, the cost for making accessible Internet and other services to the great public is significantly lower. However, there are important technical problems for communications over power lines, such as signal attenuation, multipath propagation and noise. Based on the characteristics of the BPL channel, this dissertation deals with the analysis these problems, emphasizing particularly the effects of selective fading and impulsive noise. In this study, the existing regulation of the Brazilian agencies ANEEL and ANATEL was taken into account. The technique OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex) was used to combat the selective fading. QPSK, 8PSK and 16QAM modulations were employed in the simulations of the BPL channel considering the additive white Gaussian noise (AWGN) alone and together with the impulsive noise. In both cases the best performance were achieved with 16QAM. However, when the impulse noise was introduced, the need for correcting codes was observed to maintain the bit error rate below  $10^{-3}$  without an excessive increase of the signal-to-noise ratio.

**Keywords:** Broadband over Power Line. BPL. OFDM. Impulsive noise

## **SUMÁRIO**

**RESUMO, p. 4**

**ABSTRACT, p. 5**

**LISTA DE FIGURAS, p. 10**

**LISTA DE TABELAS, p. 12**

**LISTA DE SIGLAS, p. 13**

**1 INTRODUÇÃO, p. 16**

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS, p. 16

1.2 ABORDAGEM HISTÓRICA, p. 18

1.3 ALTA TAXA DE TRANSMISSÃO VIA REDE DE ENERGIA ELÉTRICA, p. 20

1.4 A EVOLUÇÃO DA TECNOLOGIA NO BRASIL, p. 21

1.5 FATORES QUE ESTÃO IMPULSIONANDO AS PESQUISAS, p. 22

**1.5.1 Demanda por serviços em faixa larga, p. 23**

**1.5.2 Redes Locais - Lan, p. 23**

**1.5.3 Automação Predial, p. 24**

**1.5.4 Contribuições sociais e a inclusão digital, p. 24**

**1.5.5 Estímulo à Competição, p. 24**

1.6 OBJETIVOS, p. 25

1.7 ROTEIRO DA DISSERTAÇÃO, p. 25

**2 CARACTERÍSTICAS DAS REDES DE ENERGIA ELÉTRICA, p. 27**

2.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS, p. 27

2.2 SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA, p. 28

2.3 NÍVEL DE TRANSMISSÃO, p. 29

- 2.4 NÍVEL DE SUBTRANSMISSÃO, p. 30
- 2.5 NÍVEL DE DISTRIBUIÇÃO, p. 30
- 2.5.1 Nível de tensão primária de distribuição, p. 31**
- 2.5.2 Nível de tensão secundária de distribuição, p. 31**
- 2.6 LINHAS DE TRANSMISSÃO EM TELECOMUNICAÇÕES (WIRELINE), p. 31
- 2.7 LINHAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL, p. 32
- 2.7.1 Linhas aéreas de distribuição em média tensão, p. 33**
- 2.7.2 Linhas aéreas de distribuição em baixa tensão, p. 34**
- 2.8 COMPORTAMENTO DAS LINHAS DE DISTRIBUIÇÃO DE MT E BT, p. 36
- 2.8.1 Linhas de distribuição de média tensão, p. 36**
- 2.8.2 Linhas de distribuição em baixa tensão, p. 38**
- 2.9 MONITORAMENTO INTELIGENTE APOIADO NA TECNOLOGIA BPL, p. 39
- 2.9.1 Tecnologia BPL em redes elétricas inteligentes, p. 41**
- 2.9.2 Protocolos para transmissão de dados, p. 43**

### **3 DESENVOLVIMENTO DE EQUIPAMENTOS E APLICAÇÕES EM REDES BPL, p. 45**

- 3.1 INICIATIVAS PARA O DESENVOLVIMENTO DA TECNOLOGIA, p. 45
- 3.1.1 Projeto Opera, p. 45**
  - 3.1.1.1 Objetivos do Projeto Opera , p.46
  - 3.1.1.2 Objetivo Estratégico, p. 47
- 3.2 NOVOS EQUIPAMENTOS E PROTÓTIPOS, p. 49
- 3.2.1 Canal BPL, p. 50**
- 3.2.2 Testes e Integração, p. 50**
- 3.2.3 Melhoria do Sistema e Equipamentos para Usuários Finais, p. 50**
- 3.2.4 Liberação de serviços sobre redes BPL, p. 51**
- 3.2.5 Padronização e Desenvolvimento de Negócios, p. 51**
- 3.3 ACOPLADORES DE SINAIS, p. 52
- 3.3.1 Acopladores Indutivos para cabos de média tensão - MT, p. 53**
- 3.3.2 Acopladores capacitivos para cabos de média tensão, p. 54**
- 3.3.3 Acopladores mixed indutivos e capacitivos para linhas aéreas de baixa tensão, p. 55**
  - 3.3.3.1 Aspectos de segurança, p. 56
  - 3.3.4 Filtros bloqueadores de RF para utilização *multimaster*, p. 57
  - 3.3.5 Splitter ativo BPL, p. 60**
  - 3.3.6 Instalação e funcionamento do splitter, p. 61**



3.4 AVANÇOS DA TECNOLOGIA, p. 63

**3.4.1 Novos serviços 64**

**3.4.2 Resultados para negócios, p. 64**

3.5 APLICAÇÕES PARA AS REDES BPL, p. 65

**3.5.1 Descrição dos principais equipamentos utilizados em redes BPL, p. 66**

**3.5.2 Redes Indoor – Homenetwork, p. 68**

**3.5.3 Kits para Prédios Residenciais ou Comerciais, p. 71**

**3.5.4 Experiências de sucesso no Brasil, p. 72**

**4 CARACTERIZAÇÃO DO CANAL BPL, p. 73**

4.1 FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA DO CANAL BPL, p. 73

4.2 CLASSES DE RUÍDOS PRESENTES NO CANAL BPL, p. 85

**4.2.1 Ruído colorido de fundo, p. 86**

**4.2.2 Ruído de faixa estreita, p. 87**

**4.2.3 Ruído impulsivo periódico - assíncrono com a frequência da rede, p. 87**

**4.2.4 Ruído impulsivo periódico – síncrono com a frequência da rede, p. 87**

**4.2.5 Ruído impulsivo assíncrono, p. 87**

4.3 PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DOS RUÍDOS PRESENTES EM UM CANAL BPL, p. 88

**4.3.1 Ruído de fundo, p. 88**

**4.3.2 Ruído impulsivo, p. 88**

4.4 TÉCNICAS DE MODULAÇÃO UTILIZADAS EM SISTEMAS BPL, p. 90

**4.4.1 Modulação QAM, p. 90**

4.5 TÉCNICA DE TRANSMISSÃO OFDM, p. 92

**4.5.1 Descrição do cenário das simulações, p. 93**

4.5.1.1 Esquema de Modulação 944.5.1.2 Número de Subportadoras, p. 96

4.5.1.3 Efeito do ruído impulsivo, p. 97

**5 ASPECTOS REGULATÓRIOS, p. 99**

5.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS, p. 99

**5.1.1 Testes Realizados, p. 100**

**5.1.2 Regulamentação da Anatel, p. 101**

**5.1.3 Definições, p. 102**

**5.1.4 Limites de Radiações, p. 106**

**5.1.5 Características técnicas dos sistemas, p. 107**

<b>5.1.6</b>	<b>Controle de interferências, p. 107</b>
<b>5.1.7</b>	<b>Capacidade dos Filtros Utilizados, p. 107</b>
<b>5.1.8</b>	<b>Garantia das configurações, p. 108</b>
<b>5.1.9</b>	<b>Requisitos específicos, p. 108</b>
<b>5.1.10</b>	<b>Controle do uso de radiofrequências, p. 111</b>
<b>5.1.11</b>	<b>Operação em caráter primário e secundário, p. 112</b>
<b>5.2</b>	<b>REGULAMENTAÇÃO DA ANEEL, p. 113</b>
<b>5.2.1</b>	<b>Definições, p. 114</b>
<b>5.2.2</b>	<b>Atribuições e responsabilidades dos setores, p. 114</b>
<b>5.2.3</b>	<b>Compartilhamento da infraestrutura, p. 115</b>
<b>5.2.4</b>	<b>Redução dos custos e modicidade tarifária, p. 115</b>
<b>5.2.5</b>	<b>Relações contratuais, p. 116</b>
<b>5.3</b>	<b>ANÁLISE CRÍTICA DA REGULAMENTAÇÃO EXISTENTE, p. 117</b>
<b>5.3.1</b>	<b>Considerações Gerais, p. 117</b>
<b>5.3.2</b>	<b>Regulamentação no setor elétrico, p. 118</b>
<b>5.3.3</b>	<b>Tarifação e Fiscalização, p. 119</b>
<b>5.3.4</b>	<b>Regulamentação no setor de Telecomunicações, p. 119</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES, p. 121</b>
<b>6.1</b>	<b>RESUMO DAS CONTRIBUIÇÕES DESTE TRABALHO, p. 122</b>
<b>6.1.1</b>	<b>Contribuições Gerais, p. 122</b>
<b>6.1.2</b>	<b>Contribuições Específicas, p. 123</b>
<b>6.2</b>	<b>SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS, p. 125</b>
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS, p. 126</b>
<b>8</b>	<b>ANEXOS, p. 128</b>
<b>8.1</b>	<b>ARTIGO CARACTERIZAÇÃO DO CANAL PARA TRANSMISSÃO DE DADOS ATRAVÉS DAS LINHAS DE ENERGIA ELÉTRICA (LIMA; ASSIS), p. 129</b>
<b>8.2</b>	<b>ARTIGO - EFEITO DO RUÍDO IMPULSIVO EM CANAL BPL UTILIZANDO A TÉCNICA DE TRANSMISSÃO OFDM (LIMA; ASSIS; DIAS), p. 139</b>
<b>8.3</b>	<b>NR 10 – SEGURANÇA EM INSTALAÇÕES E SERVIÇOS EM ELETRICIDADE / ANEXOS I e II, p. 150</b>
	<b>GLOSSÁRIO, p. 172</b>

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 – Estrutura básica de uma rede BPL integrada indoor / outdoor, p. 17
- Figura 2 - Sistema OPLAT, p. 20
- Figura 3 - Nível de distribuição, p. 29
- Figura 4 - Usina hidrelétrica de Itaipu, p. 30
- Figura 5 - Linha convencional de média tensão, p. 33
- Figura 6 – Linha compacta de média tensão, p. 34
- Figura 7 – Linha multiplexada de média tensão, p. 34
- Figura 8 – Linha convencional de baixa tensão, p. 35
- Figura 9 – Descida para linha subterrânea de baixa tensão, p. 36
- Figura 10 - Trecho de uma linha de transmissão, p. 40
- Figura 11 - Acoplador indutivo fabricado pela Eichhoff, p. 53
- Figura 12 - Acoplador indutivo fabricado pela Dimat, p. 54
- Figura 13 - Acopladores capacitivos instalados na rede, p. 54
- Figura 14 - Acopladores capacitivos 24 e 36 KV fabricados pela Dimat, p. 55
- Figura 15 – Linha de MT e BT instaladas no mesmo poste, p. 56
- Figura 16 - Acopladores capacitivos para linhas aéreas de BT, p. 57
- Figura 17 - Área atendida por um único equipamento *master*, p. 58
- Figura 18 - Área atendida no esquema *multimaste*, p. 59
- Figura 19 - Atenuação com e sem filtros bloqueadores, p. 59
- Figura 20 - Diagrama em blocos do *splitter* BPL, p. 60
- Figura 21 - *Splitter* com fonte de alimentação externa, p. 61
- Figura 22 – Diagrama unifilar do *splitter*, p. 63
- Figura 23 – Rede BPL integrada, p. 65
- Figura 24 - Rede BPL integrada até a residência do usuário, p. 66
- Figura 25 - Rede *indoor*, p. 69

- Figura 26 - Kit para instalação em prédios residenciais ou comerciais, p. 72
- Figura 27 - Módulo da resposta de um canal BPL no domínio da frequência, p. 78
- Figura 28 - Resposta ao impulso de canal BPL, p. 78
- Figura 29 - Módulo da resposta de um canal BPL no domínio da frequência - 1,7 MHz a 50 MHz , p. 79
- Figura 30 - Módulo da resposta de um canal BPL - 1,7MHz a 50 MHz, p. 79
- Figura 31 - Resposta no domínio da frequência para três canais BPL diferentes, p. 80
- Figura 32 - Resposta no domínio do tempo para três canais BPL diferentes, p. 81
- Figura 33 - Atenuação dependente da distância e da frequência dependente da frequência e da distância, p. 82
- Figura 34 - Atenuação dependente da distância e da frequência para a faixa de frequências regulamentada pela ANATEL –ambientes *outdoor*, p. 83
- Figura 35 - Atenuação dependente da distância e da frequência, para distâncias típicas de ambientes indoor, p. 84
- Figura 36 – Ruídos presentes em um canal BPL, p. 89
- Figura 37 - Diagrama simplificado em blocos de um sistema de comunicação digital, p. 90
- Figura 38 - Constelação 4 QAM e 8 QAM, p. 91
- Figura 39 - Constelação 16 QAM e 64 QAM, p. 91
- Figura 40 - Diagrama em blocos simplificado de um sistema de comunicações OFDM, p. 93
- Figura 41 - Diagrama em blocos do Sistema de Comunicações, p. 93
- Figura 42 - Desempenho do sistema BPL sem o efeito do ruído impulsivo, p. 95
- Figura 43 - Desempenho do sistema BPL com o efeito do ruído impulsivo, p. 95
- Figura 44 – Desempenho do sistema BPL em função do número de subportadoras, p. 96
- Figura 45 - Comparação entre sistemas BPL afetado pelo e não afetado pelo ruído impulsivo, p. 97

## LISTA DE TABELAS

- Tabela 1 – Estado da arte e objetivos do projeto OPERA 1, p. 49
- Tabela 2 - Evolução dos objetivos do projeto OPERA Fases 1 e 2, p. 51
- Tabela 3 - Comparação de desempenho com 70 dB de atenuação, p. 61
- Tabela 4 – Parâmetros da equação da função de transferência do canal BPL outdoor, p. 76
- Tabela 5 – Parâmetros utilizados para a função de transferência, p.77
- Tabela 6 – Parâmetros utilizados para a função de transferência de três redes representadas pelas Figuras 31 e 32, p. 81
- Tabela 7 - Parâmetros utilizados para caracterizar a atenuação dependente da frequência e da distância, p. 82
- Tabela 8 - Coordenadas geográficas das estações costeiras, p. 103
- Tabela 9 - Coordenadas geográficas das estações terrestres – zona de proteção, p. 105
- Tabela 10 - Coordenadas geográficas das estações terrestres – zona de exclusão, p. 106
- Tabela 11 - Limites de radiações indesejadas causadas por sistemas BPL de RB, p. 106
- Tabela 12 - Limites de radiações indesejadas causadas por sistemas BPL de RMT, p. 107
- Tabela 13 - Faixas de Exclusão , p. 109
- Tabela 14 - Faixas de radiofrequências relativas à zona de proteção de estações costeiras, p. 110

## LISTA DE SIGLAS

ADSL	Asymmetric Digital Subscriber Line
AM	Amplitude Modulation
AMI	Advanced Metering Infrastructure
AMN	Artificial Mains Network
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
APTEL	Associação de Empresas Proprietárias de Infraestrutura e Sistemas Privados de Telecomunicações
ARQ	Automatic Repeat Request
ASK	Amplitude Shift Keying
ATM	Asynchronous Transfer Mode
AWGN	Additive White Gaussian Noise
BALUN	Balanced Unbalanced
BER	Bit Error Rate
BPL	Broadband over Power Line
BT	Baixa Tensão
CGR	Centro de Gerência de Rede
CISPR	Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques
CSA	Câmara Semi Anecóica
DAB	Digital Audio Broadcasting)
DFE	Decision Feedback Equalizer
DPL	Digital Powerline
DVB	Digital Video Broadcasting

EMC	Electromagnetic Compatibility
EMI	Electromagnetic-Interference
FCC	Federal Communications Commission
FEC	Forward Error Correction
FERC	Federal Energy Regulatory Commission
FM	Frequency Modulation
FTP	File Transfer Protocol
HF	High Frequency
IEC	International Electrotechnical Commission
IES	Interferência Entre Símbolos
IP	Internet Protocol
IPTV	Internet Protocol TV
IST	Information Society Technologies
ITU	International Telecommunication Union
LGT	Lei Geral de Telecomunicações
LMDS	Local Multipoint Distribution System
MIC	Mixed Inductive / Capacitive Coupler
MPEG	Moving Picture Experts Group
MT	Média Tensão
MVIC	Médium Voltaje Inductive Couple
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OPERA	Open PLC European Research Alliance
OPLAT	Ondas Portadoras em Linhas de Alta Tensão
OSI	Open Systems Interconnection
PLC	Power Line Communications
PLTF	Power Line Telecommunications Forum
PM -	Phase Modulation
PSD	Power Spectrum Density
PSK	Phase Shift Keying
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QoS	Quality of Service

QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
RBT	Rede de Baixa Tensão
RMT	Rede de Média Tensão
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SIN -	Sistema Interligado Nacional
SSH -	Secure Shell
TCP	Transmission Control Protocol
UDP	User Datagram Protocol
VoIP	Voice over IP
W-LAN	Wireless Local Area Network
WWW	World Wide Web



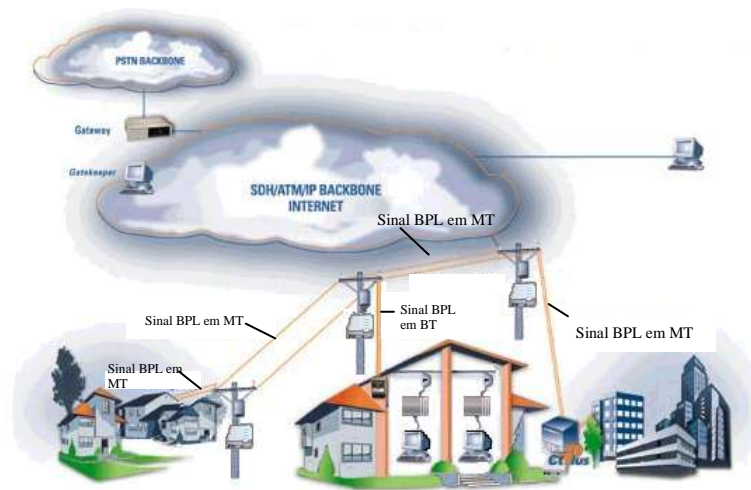
## 1 INTRODUÇÃO

Embora a ideia de utilizar a rede de distribuição de energia elétrica para comunicação não seja recente, essa utilização foi sempre voltada para a transmissão de dados, com baixa velocidade de transmissão para atender, basicamente, às distribuidoras no gerenciamento de plantas. Entretanto, desde o início da década de 90, cresce muito o número de acessos à Internet e à demanda por novos serviços. Esse crescimento e a inclusão de serviços multimídia requerem transmissão de dados em alta velocidade. Dados anunciados, em setembro de 2010, pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), em sua Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios (PNAD) de 2009, revelaram que, em um universo estimado de 58,5 milhões de domicílios, a proporção de lares que possuíam microcomputador subiu de 31,2% para 34,7% de 2008 para 2009. A fatia de domicílios com acesso à Internet também cresceu no mesmo período, saltando de 23,8% para 27,4% do total. Estes dados dão uma idéia de como existe um enorme espaço a ser ocupado pelos acessos em faixa larga no país. Baixar o preço dos serviços e oferecer altas taxas de transmissão constitui-se o grande desafio para as empresas e pesquisadores, tanto para o acesso a dados provenientes da rede mundial de computadores, quanto na concepção de redes inteligentes, utilizadas no gerenciamento das linhas de transmissão e distribuição de energia elétrica.

### 1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

A transmissão de dados em altas taxas, através da rede elétrica, vem despertando um grande interesse nos meios acadêmicos e entre os provedores de serviços. Isto se deve à possibilidade de maior penetração e do acesso em faixa larga, popularizando de forma definitiva o uso da *Internet*, ao atender um maior número de usuários em todas as classes sociais da população. De fato, diversos países dispõem de uma infraestrutura de telecomunicações reduzida. Neste contexto, a tecnologia de transmissão em faixa larga por

linha de potência, designada no Brasil por BPL (*Broadband over Power Line*), é bastante promissora, posto que cerca de 50% do custo de implementação de um sistema de telecomunicações é devido à infraestrutura. Assim sendo, uma solução que reduza os gastos com infraestrutura pode contribuir, decisivamente, para a redução do custo total e para o aumento da penetração dos sistemas de telecomunicações. A tecnologia BPL potencialmente pode transmitir dados sobre a rede de energia elétrica e oferecer as taxas requeridas pelos serviços demandados, aproveitando a infraestrutura instalada. A Figura 1 apresenta a estrutura básica de uma rede BPL integrada.



**Figura 1** – Estrutura básica de uma rede BPL integrada indoor / outdoor

A tecnologia BPL viabiliza a comunicação de dados sobre a rede elétrica de baixa, média e alta tensão e multiplica a capacidade de oferta de novos serviços de telecomunicações. Atualmente é possível alcançar velocidades de transmissão da ordem de 200 Mbps, podendo chegar a 400 Mbps nos próximos cinco anos. Entre novembro de 2008 e janeiro de 2009 a Eletropaulo Telecom lançou comercialmente o serviço em trezentos prédios residenciais na cidade de São Paulo. Cada um deles recebe um link de até 200 Mbps para ser distribuído entre os moradores, que ficam com até 2 Mbps para os serviços de *Internet*. Embora ainda abaixo da capacidade teórica, que pode ser superior a 500 Mbps (LANGFELD, 2001; SANDERSON, 2000), a tecnologia possibilita a implementação de vários serviços digitais simultâneos em edificações, tais como: automação, iluminação, climatização, segurança, comunicação, *triple play* (oferta tripla - áudio, vídeo, dados e acesso à internet) e gerenciamento de recursos para serviços de eletricidade, água, gás etc.

As principais vantagens da tecnologia BPL são:

- Capilaridade da infraestrutura, isto é, quase cem por cento de alcance das localidades, resolvendo o problema de infraestrutura da chamada última milha.
- Diversos pontos de acesso, disponíveis em um mesmo ambiente.
- Alta taxa de transmissão de dados.
- Extensão de pontos de telefonia.
- Automação, controle e supervisão de equipamentos de segurança e eletro-eletrônicos.

Mesmo considerando todas essas facilidades, deve-se levar em conta a presença de capacitores que compõem o conjunto destinado à iluminação pública na rede de distribuição.

Outro aspecto relevante, a ser considerado para os estudos no Brasil, é o projeto do Governo Federal "Luz para Todos". As obras do programa estão em quase todos os estados e contribuíram para que quase 100% dos domicílios brasileiros tivessem eletricidade no ano de 2010. Isto significa que, com a tecnologia BPL, será possível atender os usuários nas localidades mais remotas com serviços de telecomunicações, viabilizando projetos como os de inclusão digital e analfabetismo zero em pontos afastados do território brasileiro, não assistidos pelos projetos do governo e das empresas privadas.

## 1.2 ABORDAGEM HISTÓRICA

Este tópico apresenta um breve histórico sobre a transmissão de dados, utilizando a rede elétrica como canal de comunicações, complementado, com mais detalhes, a partir da transmissão de sinais de voz.

1838: primeira transmissão remota de dados – medição remota de níveis de tensão de baterias do sistema de telégrafo de Londres – Liverpool;

1897: primeira patente (Inglaterra);

1905: primeira patente (EUA);

1913: primeiro produto comercial é lançado nos EUA – medidores eletromecânicos e repetidores;

1920: transmissão de sinais de voz – redes de alta tensão;

- 1930: transmissão de informações nas redes de média e baixa tensão;
- 1935: primeiros sinais de voz transmitidos nas redes de baixa e media tensão – multiplexação TDM;
- 1950: transmissão de mensagens de controle;
- Década 80: até 144 kbps (< 500 kHz);
- Início da década de 90: até 10 Mbps (< 10 MHz);
- Início do século XXI: até 45 Mbps (< 30 MHz);
- Atualmente: possibilidade de até 400 Mbps (1-50 MHz);
- Futuro: > 2 Gbps (1-500 MHz).

A tecnologia, inicialmente designada por Comunicações em Linha de Potência – PLC (*Power Line Communications*), existe há muito tempo, mas sua utilização para aplicações em faixa larga é um desenvolvimento recente, com perspectiva e importância diferenciadas. No cenário industrial e regulatório Norte Americano, foi criada uma nova denominação: *Broadband over Power Line* - BPL. No Brasil, a ANATEL também optou pela denominação americana.

Os sistemas de Portadora em Linhas de Potência (*Powerline Systems Carrier*), chamados no Brasil de OPLAT (Ondas Portadoras em Linhas de Alta Tensão), têm sido utilizados pelas empresas de energia elétrica desde a década de 1920. Estes sistemas ainda são utilizados para telemetria, controle remoto e comunicações de voz. Os equipamentos são muito robustos e normalmente tem uma longa vida útil, superior a trinta anos. Recentemente, com o avanço de instalações em fibras ópticas e o barateamento de sistemas de telecomunicações, diversas empresas de energia elétrica decidiram abandonar o OPLAT. Em efeito resposta, os fabricantes estão deixando de produzir estes equipamentos por falta de demanda. Algumas poucas aplicações em residências, sistemas de segurança e automação predial utilizam ainda tais sistemas de faixa estreita, baixa velocidade e com modulação analógica. Este equipamento não suporta o transporte de um grande volume de informação, sendo necessário então o desenvolvimento de uma nova tecnologia. A Figura 2 mostra o sistema conhecido como OPLAT. Este sistema utiliza uma das fases da linha de transmissão (sistema trifásico) como canal para transmitir um sinal de comunicações (uma faixa de frequência de 30 a 500 kHz). A frequência é selecionada pelo circuito ressonante LC (aqui denominado de UB - Unidade de Bloqueio) nas duas extremidades da linha.

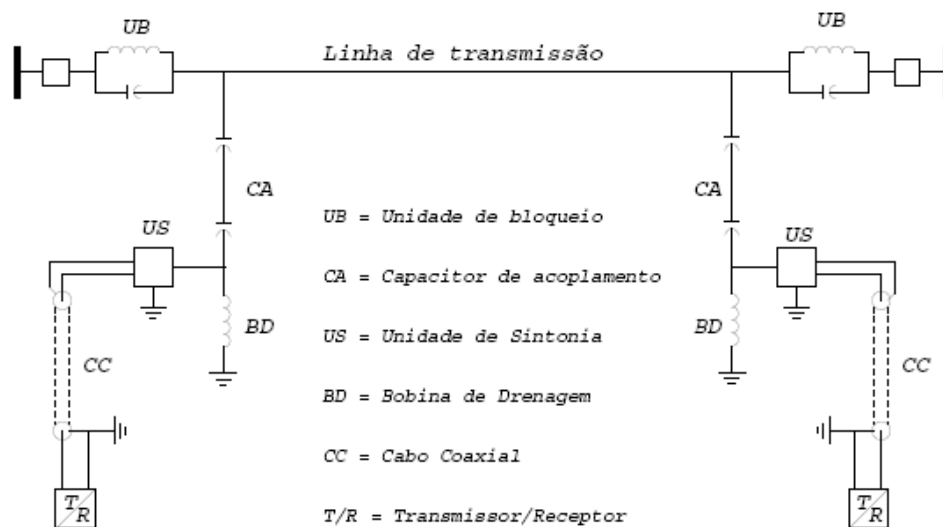


Figura 2 - Sistema OPLAT

### 1.3 ALTA TAXA DE TRANSMISSÃO VIA REDE DE ENERGIA ELÉTRICA

Em 1991, a *Norweb Communications*, empresa de energia elétrica da cidade de Manchester, Inglaterra, iniciou testes com comunicação digital de alta velocidade, utilizando linhas de energia. Entre 1995 e 1997, foi demonstrado que era possível resolver os problemas de ruído e interferências e que a transmissão de dados de alta velocidade poderia ser viável. Em outubro de 1997, a *Nortel* e *Norweb* anunciaram que os problemas associados ao ruído e interferência das linhas de energia estavam solucionados. Dois meses depois, foi anunciado pelas mesmas empresas o primeiro teste de acesso *Internet*, realizado em uma escola de Manchester. Com isso, foi lançada uma nova idéia para negócios de telecomunicações, que a *Nortel/Norweb* chamaram de *Digital Powerline* (DPL). Em março de 1998, a *Nortel* e a *Norweb* criaram uma nova empresa intitulada de *NOR.WEB DPL* com o propósito de desenvolver e comercializar a *Digital PowerLine*. Todas as empresas elétricas do mundo estavam pensando em se tornar provedores de serviços de telecomunicações utilizando, para isto, seus ativos de distribuição.

Convém lembrar que o setor de telecomunicações estava passando por um crescimento explosivo no mundo e, particularmente no Brasil, estava em curso o processo de privatização das estatais de telecomunicações. O acompanhamento dos desenvolvimentos e progressos da tecnologia *Powerline* era feito na época, no Brasil, pelo sub-comitê de Comunicações do GCOI –EE (Grupo de Controle, Otimização e Inteligência Computacional Aplicados a Sistemas de Energia Elétrica), e a APTEL (Associação de Empresas Proprietárias de

Infraestrutura e Sistemas Privados de Telecomunicações), criada em abril de 1999, realizou o seu primeiro Seminário em Setembro de 1999, com o único tema: Tecnologia *Powerline Communications*.

Vale também lembrar que na Europa em 1997 foi criado o PLC Fórum e em 1998 a ITU (*International Telecommunication Union*) lançou nos Estados Unidos o *Power Line Telecommunications Forum* (PLTF). Atualmente, há diversos produtos comerciais com tecnologia PLC/BPL. É importante salientar que, em 23 de Abril de 2003, a Agência Regulatória Federal de Serviços de Telecomunicações dos Estados Unidos – FCC (*Federal Communications Commission*), emitiu diversas declarações de seu Presidente e Conselheiros, favoráveis ao emprego de tecnologia conhecida como PLC (*Power Line Communications*) tendo, inclusive, alterado o nome/referência para BPL (*Broadband over Power Lines*).

#### 1.4 A EVOLUÇÃO DA TECNOLOGIA NO BRASIL

No Brasil, a tecnologia BPL foi introduzida pelo Projeto “Ilha Digital de Barreirinhas” em Dezembro de 2004, com o objetivo de levar a *Internet* à população do município de Barreirinha, no Maranhão, como demonstração e operação prática da aplicação desta tecnologia. Barreirinhas é um município com, aproximadamente, 40.000 habitantes, sendo pouco mais de 13.000 na área urbana. Localizado nos lençóis maranhenses, a 272 km de São Luís, região norte, teve 14 localidades interconectadas através da tecnologia BPL, dentre escolas, bibliotecas, postos de saúde, oficinas de artesanato, prefeitura e secretarias municipais. Esse projeto permitiu o acesso à *Internet* em escolas, prefeitura da cidade, postos de saúde e no centro de artesanato, contando com a parceria de empresas que contribuíram com seus conhecimentos, produtos e serviços. Uma das vantagens, observadas na implantação da tecnologia BPL do projeto Barreirinhas, via rede elétrica, foi o curto período de execução do projeto, comprovando a facilidade de instalação da rede BPL, basicamente proporcionada pela capilaridade da infraestrutura. Devido a essa iniciativa de implantação o Brasil se tornou o único país, fora da comunidade europeia, participante do projeto europeu OPERA (ver Capítulo 3) através da APTEL, que congrega as concessionárias de energia elétrica no Brasil.

A ANATEL, por sua vez, realizou os primeiros testes de campo em 2006, em Goiânia, com equipamentos BPL de primeira geração. Estes testes demonstraram que a tecnologia poderia causar interferências prejudiciais aos sistemas que se encontravam nas proximidades da rede de energia elétrica, uma vez que os equipamentos não haviam sido desenvolvidos com

técnicas de mitigação destas interferências. Além disso, os equipamentos de primeira geração apresentavam baixas taxas de transmissão.

A partir daí, novos testes foram realizados em 2007, em Campinas, no CPqD, com equipamentos BPL de segunda geração, em redes de Baixa e Média Tensão, sendo testados equipamentos de três fabricantes (Mitsubishi, Ilevó e Corinex). Os equipamentos BPL desta geração haviam incorporado novas funcionalidades, e foi possível a configuração de filtros supressores de faixa (*notch*) por meio de software e, com isto, a limitação da potência injetada nas linhas de tensão. A configuração dos filtros permite atenuar o sinal BPL em uma faixa de radiofrequência pré-determinada. Durante a bateria de testes, foram medidos os níveis de emissão irradiada, com a variação da tensão injetada e da distância da linha de transmissão, assim como o efeito gerado pela configuração dos equipamentos que bloqueavam o acionamento de algumas portadoras. Observou-se que o afastamento perpendicular à linha de transmissão e horizontalmente ao modem reduz drasticamente o sinal, inclusive impossibilitando as medidas quando na presença de motores ou transformadores. Seria necessário estabelecer limites máximos para a tensão injetada de forma a proteger os sistemas que operam próximos à linha de transmissão.

Finalmente, em 2008, a ANATEL realizou medições no projeto piloto da Restinga, em Porto Alegre, que estava em operação desde Dezembro de 2006. Naquela ocasião, foram convidados Radioamadores, Forças Armadas e Órgãos de Segurança para acompanhamento dos testes, incluindo as medidas que julgassem

necessárias. As Forças Armadas e os Órgãos de Segurança realizaram transmissões a diversas distâncias da linha de transmissão de energia elétrica para averiguar a que separação o sistema BPL não interferiria nas comunicações. Não foram efetuadas medidas pelos Radioamadores. Após a realização dos testes e em continuação ao processo de elaboração da proposta de regulamentação, a ANATEL buscou um diálogo junto às Forças Armadas, Órgãos de Segurança, Radiodifusores e Radioamadores de forma a resguardar os serviços vitais ao país. (NOTA TÉCNICA ANATEL, 2008).

## 1.5 FATORES QUE ESTÃO IMPULSIONANDO AS PESQUISAS

Além dos aspectos gerais já destacados, no início deste trabalho, diversas abordagens serão detalhadas a seguir, demonstrando uma série de aplicações para o emprego da tecnologia. Estes interesses são os que realmente motivam a utilização das redes de

transmissão e de distribuição de energia elétrica como uma alternativa para a oferta de serviços de telecomunicações.

### **1.5.1 Demanda por serviços em faixa larga**

Apesar da utilização da *Internet* e da oferta de serviços de telecomunicações em geral terem aumentado significativamente em todo o mundo, com raras exceções, a infraestrutura necessária para dar o suporte exigido por esta expansão não acompanhou este crescimento com a mesma velocidade. Especificamente no caso da *Internet*, uma parte dos usuários, atualmente, ainda acessam a internet através de linhas discadas. Mesmo em alguns países desenvolvidos, a disponibilidade de serviços em faixa larga é ainda limitada pelos investimentos requeridos para a infraestrutura da rede. Nos países desenvolvidos e, mesmo no Brasil, a oferta tripla já é comercializada. Esta facilidade trata-se de um mix de serviços de TV, telefonia e acesso à *Internet*, requerendo, portanto, largura de faixa para a ampliação da oferta. No campo da evolução das tecnologias de transmissão, é visível o esforço empreendido no sentido de dotar plataformas como ATM (*Asynchronous Transfer Mode*) e, mais recentemente, IP (*Internet Protocol*), de mecanismos eficientes de controle da qualidade de serviço (QoS), para viabilizar a comunicação multimídia de forma a atender às expectativas dos usuários, em geral.

### **1.5.2 Redes Locais - Lan**

Uma rede local pode ser implementada, em qualquer edificação, através de adaptadores BPL plugados aos circuitos elétricos. Nestas redes destacam-se duas aplicações. Na primeira um edifício novo poderia contar, desde as etapas iniciais do projeto de sua rede lógica, com o emprego de equipamentos BPL. Isto possibilitaria que qualquer tomada de energia elétrica fosse, também, um ponto de acesso à rede interna de dados. Neste tipo de aplicação, a conexão com o mundo externo poderia, ou não, ser efetuada através da rede elétrica. Uma segunda aplicação seria a instalação de redes de dados, não dedicadas, em edifícios mais velhos, ou mesmo em prédios onde, através do BPL, nenhuma mudança estrutural para a instalação de cabeamento seria necessária.



### **1.5.3 Automação Predial**

Nas residências e nos prédios comerciais, existe a necessidade de se controlar e gerenciar utilidades, tais como: sistemas de aquecimento, ventilação, ar condicionado, iluminação, etc. Sistemas de automação predial, capazes de executar estas tarefas de forma automática, poderão ter um mercado bastante atrativo, contudo, os custos deste tipo de solução, através dos meios convencionais, são ainda altos devido ao fato de que um meio dedicado é necessário para efetuar a comunicação entre os componentes dos sistemas: um par trançado ou mesmo um enlace de fibra óptica seria necessário para viabilizar esta automação. Entretanto, todo prédio conta com uma rede elétrica já instalada, que atinge todos os recintos. Com a tecnologia BPL, podem ser desenvolvidas soluções também economicamente viáveis para este tipo de aplicação.

### **1.5.4 Contribuições sociais e a inclusão digital**

Outro importante aspecto a ser considerado é o apelo social relacionado, que pode ser atendido com a possibilidade de fornecer serviços de telecomunicações através das redes elétricas. Assim, as redes BPL podem suprir uma lacuna, promovida pelo desinteresse econômico das grandes operadoras das redes de telecomunicações convencionais. Mesmo após a abertura do mercado, no Brasil, um grande contingente da população encontra-se ainda sem acesso a vários tipos de serviços. Neste sentido, no caso do Brasil, em um espaço de tempo muito curto (previsão para final de 2010), quase a totalidade da população será atendida pelas redes elétricas em suas residências. Desta forma, o acesso a serviços básicos de telecomunicações poderá ser disponibilizado, rapidamente, em locais onde as redes de acesso necessitem de expansão, viabilizando, com isso, a inclusão digital nestas localidades.

### **1.5.5 Estímulo à Competição**

Mesmo considerando a forte tendência das comunicações sem fio, a tecnologia BPL apresenta-se como uma alternativa bastante atraente em termos de investimentos, rapidez na instalação e progressiva redução no custo dos equipamentos necessários para instalar e operar uma rede BPL. Muitas empresas e entidades de pesquisa no Brasil e pelo mundo afora

continuam pesquisando esta tecnologia, em termos de soluções de acesso para o usuário e transmissão de dados em alta velocidade sobre as redes elétricas de média e baixa tensão.

Embora o potencial da tecnologia BPL seja função de alguns fatores específicos de cada região, os parâmetros básicos para a análise de viabilidade são: a infraestrutura 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 infraestrutura e à rapidez na implementação, a tecnologia BPL permite que novos operadores possam, rapidamente, estender a 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, independentemente da classe social.

## **1.6 Objetivos**

O objetivo deste trabalho é apresentar um estudo para auxiliar no desenvolvimento de projetos utilizando a tecnologia BPL, *indoor*, *outdoor* e integrada, que poderá contribuir para a implantação comercial em larga escala destas redes no Brasil. O foco é mostrar a viabilidade da tecnologia BPL a partir da melhor solução tecnológica sob o ponto de vista da Engenharia Elétrica e da Engenharia de Telecomunicações, considerando os equipamentos disponíveis no mercado e as tendências em termos de evolução tecnológica.

## **1.7 Roteiro da dissertação**

Para alcançar os objetivos propostos, esta dissertação está estruturada em seis capítulos, descritos a seguir:

No presente Capítulo, é apresentada uma introdução geral sobre a tecnologia BPL. São definidos os objetivos e uma descrição histórica desta tecnologia. São ainda relacionadas as principais motivações que impulsionaram as pesquisas no mundo e, em particular no Brasil, os aspectos sociais e comerciais envolvidos.

No Capítulo 2, são estudadas as linhas de transmissão e distribuição de energia elétrica como canal para transmissão em taxas altas de dados. São abordadas as características desse meio e as dificuldades para a transmissão da informação sobre as redes elétricas. Este Capítulo inclui uma análise da aplicação da tecnologia BPL no monitoramento e controle das

redes de energia elétrica inteligentes, enfatizando os benefícios que podem ser obtidos com o uso da própria infraestrutura para o monitoramento inteligente da rede.

No Capítulo 3, são descritos os principais equipamentos disponíveis no mercado. São apresentadas as principais soluções desenvolvidas e testadas para operação da rede BPL, especialmente os avanços obtidos no projeto OPERA.

No Capítulo 4, é desenvolvida a caracterização do canal BPL, classes de ruídos presentes e técnicas de modulação e transmissão empregadas. Estas técnicas minimizam as distorções introduzidas pelo canal BPL e pelo ruído aditivo. É apresentado o modelo geral, a função transferência e o modelo de ruído aditivo do canal BPL. Neste Capítulo, também é estudado o efeito do ruído impulsivo no sistema BPL.

No Capítulo 5, são comentados os aspectos regulatórios envolvidos, os testes realizados, o controle de interferências, o controle do uso de radiofrequências, relativos à ANATEL, e ainda os aspectos regulatórios definidos pela ANEEL. É realizada uma análise dos principais pontos abordados na regulamentação.

Finalizando, o Capítulo 6 relaciona as conclusões onde se tem uma síntese da presente dissertação e a lista de possíveis investigações futuras.

Em anexo, são apresentados dois trabalhos desenvolvidos pelo autor e a Norma Regulamentadora ligada à segurança na instalação, operação e manutenção da rede

## **2 CARACTERÍSTICAS DAS REDES DE ENERGIA ELÉTRICA**

O uso da rede de distribuição de energia elétrica, tanto primária (média tensão) quanto secundária (baixa tensão), como meio de transmissão de sinais de comunicações é bastante conhecido. Até pouco tempo atrás, estes sinais transportavam informações de interesse da própria empresa de energia elétrica. O uso da rede elétrica é muito aplicado no envio de sinais para acionamento de dispositivos, seu estado ou dados sobre medição. Dado o pequeno volume de informações requeridas em períodos de tempo relativamente extensos para a realização dessas funções, tem sido possível o uso de sinais com taxas de transmissão não muito elevadas, utilizando portadoras com frequências relativamente baixas.

### **2.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS**

As redes de transmissão e de distribuição de energia elétrica apresentam um alto grau de penetração em prédios de qualquer natureza. O aspecto relativo à capilaridade pode ser evidenciado em duas escalas: de um ponto de vista macro, considerando-se a penetração nos bairros, através do segmento de média e baixa tensão ou, ainda sob uma visão mais pontual, verificando-se, praticamente, que em qualquer cômodo, seja em um ambiente residencial, comercial ou industrial, existe pelo menos uma tomada de energia elétrica.

Por estarem distribuídos em todas as classes econômicas e sociais, pode-se dizer que os usuários que têm acesso à eletricidade são bastante diversificados. Nenhum outro sistema, serviço ou facilidade atende, atualmente, a um contingente comparável àqueles que têm acesso à energia elétrica. Existe uma infraestrutura desenvolvida, implantada, mantida e em estado de permanente ampliação. As redes elétricas constituem uma estrutura já instalada e, portanto, disponível, desonerando os interessados de grande parte dos custos relativos à implementação de um novo meio de transmissão. Deve ser observado que, nos sistemas de

comunicações com fio os custos relativos à instalação da infraestrutura respondem pela maior parte do investimento total.

A rapidez e a agilidade no processo de instalação de uma rede BPL também representam uma vantagem estratégica reduzindo, de forma significativa, o tempo necessário para compor um sistema de comunicações. Deste modo, uma primeira e simples análise, baseada apenas nos aspectos apresentados acima, possibilita afirmar que esta infraestrutura não está sendo utilizada em todo o seu potencial.

## 2.2 SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA

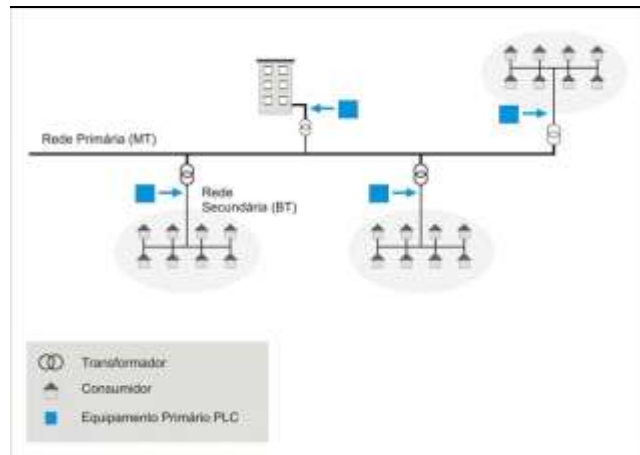
O objetivo primordial destes sistemas é garantir, através da geração, da transmissão e da distribuição, o fornecimento de energia elétrica a uma determinada área ou região. Segundo o porte e a complexidade do sistema, esta área pode se limitar a uma pequena cidade, ou estender-se a todo um continente, 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. É fácil constatar que todos os sistemas de energia elétrica apresentam uma característica em comum: operam em vários níveis de tensão, separados por transformadores, sendo cada nível de tensão adequado para interligar diferentes distâncias dentro da área total de abrangência, coerente com o nível de consumo requerido. Pode-se distinguir os seguintes níveis:

- nível de transmissão;
- nível de sub-transmissão e
- nível de distribuição (primária e secundária).

São tensões típicas de transmissão no Brasil os níveis em alta tensão (AT) de 138 KV e 230 KV, e, em extra-alta tensão (EAT), de 345 KV, 440 KV, 500 KV e 765 KV.

São tensões típicas de subtransmissão no Brasil os níveis de 34,5 KV, 69 KV, 88 KV e 138 KV e, em alguns grandes centros urbanos, o nível de 230 KV.

A Figura 3 ilustra o nível de distribuição de um sistema elétrico.



**Figura 3 - Nível de distribuição**

### 2.3 NÍVEL DE TRANSMISSÃO

Transmitindo energia elétrica, com tensões entre 138 KV e 500 KV, estas redes são utilizadas para cobrir grandes distâncias, desde algumas centenas até alguns milhares de quilômetros, interligando os 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. A partir de 500 KV, um estudo econômico deve ser realizado para decidir se a transmissão será em tensão alternada ou contínua. Para transmissão em corrente contínua, são necessárias uma subestação retificadora, na instalação geradora, e uma estação inversora próxima aos centros consumidores. A usina hidrelétrica de Itaipu (transmissão em 600 KV e capacidade de 12600 MW), mostrada na figura 4, é um exemplo de transmissão em corrente contínua. O objetivo principal da transmissão em corrente contínua é a diminuição das perdas ocasionadas pelo efeito corona. O efeito corona é uma descarga elétrica produzida pela ionização nas redondezas de um condutor, a qual ocorre quando o gradiente elétrico excede um certo valor, mas as condições são insuficientes para causar um arco elétrico, porém ocasiona perdas.



**Figura 4** - Usina hidrelétrica de Itaipu

## 2.4 NÍVEL DE SUBTRANSMISSÃO

Os circuitos de subtransmissão entregam a energia às subestações de distribuição, responsáveis por suprir a demanda em uma 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 34,5 KV e 138 KV, contudo, valores superiores podem ser observados. Grandes consumidores de energia elétrica, como indústrias de maior porte, podem ser atendidas diretamente neste nível de tensão.

## 2.5 NÍVEL DE DISTRIBUIÇÃO

Os circuitos de distribuição constituem as malhas que determinam a penetração junto aos consumidores. As tensões de distribuição são de 3 a 25 KV na rede primária e de 110 a 380 V na rede secundária. Usualmente, dois níveis de distribuição são utilizados:

- Tensão primária de distribuição ou de alimentação (por exemplo, 13,8 KV); e
- Tensão secundária de distribuição ou de consumidor (por exemplo, 127/220 V).

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

### 2.5.1 Nível de tensão primária de distribuição

Comumente referenciadas como “Redes de Média Tensão”, os circuitos neste nível operam com valores típicos de tensão entre 3 KV e 25 KV e as distâncias cobertas variam desde alguns quilômetros até poucas dezenas de quilômetros. Neste nível de tensão é possível encontrar redes tanto aéreas como subterrâneas. Tipicamente, as redes aéreas atendem áreas rurais ou mais esparsas, enquanto as redes subterrâneas são utilizadas em zonas mais densamente ocupadas.

### 2.5.2 Nível de tensão secundária de distribuição

Além de constituir as malhas mais refinadas do sistema, 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 380 V, justificando a referência a estas redes como “Redes de Baixa Tensão”. O raio típico de cobertura de uma rede de baixa tensão acha-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 seguir, as seções 2.6, 2.7 e 2.8 apresentam as principais características das linhas de transmissão convencionais para telecomunicações, e aborda os principais aspectos das linhas de transmissão de energia elétrica em baixa e média tensão.

## 2.6 LINHAS DE TRANSMISSÃO EM TELECOMUNICAÇÕES (WIRELINE)

As linhas de transmissão para telecomunicações (*wireline*) se caracterizam por possuir grande uniformidade construtiva ao longo de toda sua extensão apresentando, desta forma, valores de indutância, capacitância e resistência em série e em paralelo, que se repetem em qualquer trecho que seja considerado (HOWARD W. SAMS & CO. INC., 2001). Em geral, as principais características apresentadas pelas linhas de transmissão *wireline* convencionais são:

- Impedância característica uniforme: esta condição garante que, uma vez realizada a adaptação de impedância da linha com os equipamentos de comunicações em seus



dois extremos, não ocorreram reflexões e ondas estacionárias prejudiciais à qualidade da informação a ser recebida. As reflexões são ocasionadas por descontinuidades nos valores da impedância característica ao longo da linha como, por exemplo: variação em seus parâmetros dimensionais, distância entre seus condutores e interposição de linhas com impedância diferente da impedância característica da linha. Quanto mais precisa, estável e uniforme se apresente a linha em relação às suas propriedades dimensionais, elétricas e construtivas, melhor será seu desempenho, considerando que qualquer reflexão contribui para perda de informação, uma vez que são reenviadas ao transmissor do sinal.

- **Baixa atenuação para a faixa de frequências dos sinais a serem transmitidos para uma distância determinada:** esta característica, válida para as linhas casadas em ambos os extremos, propicia a recepção dos sinais transmitidos com amplitude suficiente para que possa ser tratada a presença de ruído, sem que seja necessária a transmissão de sinais com amplitudes exageradas, técnica e economicamente inviáveis. Os valores aceitáveis de atenuação por unidade de comprimento de linha devem sempre levar em consideração o comprimento total do enlace.
- **Baixa irradiação e captação de sinais:** esta característica se refere à menor tendência de uma linha de transmissão irradiar sinais que possam causar interferências em outros serviços, bem como de sofrer interferências de sinais externos. A condição de baixa irradiação e baixa sensibilidade à interferência de sinais externos é normalmente alcançada através da utilização de linhas previamente blindadas, tais como as linhas constituídas por cabos coaxiais, guias de ondas e fibras óticas. Esta tendência também pode ser verificada em linhas abertas desde que a distância entre os condutores represente uma pequena fração do comprimento de onda da maior frequência utilizada, por exemplo:  $0,1\lambda$ .

## 2.7 LINHAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL

Para efeito de comparação, serão apresentadas a seguir as principais características das redes de energia elétrica instaladas no Brasil.

### 2.7.1 Linhas aéreas de distribuição em média tensão

Estas linhas estão desenvolvidas para apresentarem três diferentes tipos de realização construtiva:

- Linha convencional de média tensão: utiliza cabos condutores não isolados de cobre ou alumínio suportados por isoladores transversais montados na parte superior dos postes. Os cabos podem estar situados em um mesmo plano ou em planos diferentes, com uma distância entre cabos variando entre 30 e 100 centímetros. A figura 5 ilustra este tipo de linha.



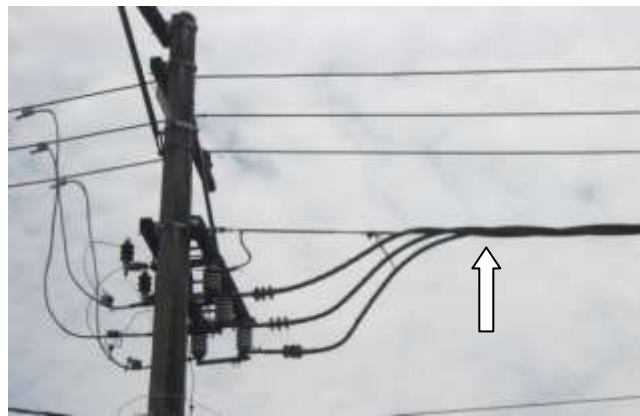
**Figura 5** - Linha convencional de média tensão

- Linha compacta de média tensão: a construção desta linha é viabilizada através da utilização de dispositivos separadores, capazes de manter uma distância constante de 10 a 20 centímetros entre os cabos de média tensão isolados, mas não blindados. A figura 6 mostra um exemplo de linha compacta de média tensão. Por agredirem menos a vegetação no entorno, são chamadas de linhas ecológicas.



**Figura 6** – Linha compacta de média tensão

- **Linhas multiplexadas para média tensão:** estas linhas são formadas por três cabos de média tensão, isolados e blindados, que são enrolados em um cabo de aço e montados em fixadores na parte superior dos postes, conforme exemplificada na figura 7.



**Figura 7** – Linha multiplexada de média tensão

### **2.7.2 Linhas aéreas de distribuição em baixa tensão**

- **Linhas convencionais em baixa tensão:** estas linhas são construídas utilizando quatro cabos condutores, correspondendo a três fases e um neutro (ver figura 8). Os condutores podem ser de cobre ou alumínio, sendo suportados por isoladores montados transversalmente ao longo dos postes. Os cabos são montados em um plano vertical, separados entre si de 15 a 30 centímetros. As redes de distribuição secundárias operam com circuitos trifásicos, com neutro (220 V ou 380 V entre

fases). O número típico de consumidores por transformador é de 40 residências. Além dos consumidores, são ligadas na rede secundária as lâmpadas de iluminação pública de vapor de sódio (70 W e 250 W) e vapor de mercúrio (125 W, 250 W e 400 W). Os consumidores são ligados à rede através de cabos, através dos ramais de ligação, com comprimentos típicos que variam de 17 metros a, no máximo, 30 metros.



**Figura 8** – Linha convencional de baixa tensão

- Linhas multiplexadas em baixa tensão: as características construtivas destas linhas são idênticas àsquelas de média tensão, utilizando-se cabos de baixa tensão sem blindagem.
- Redes subterrâneas em baixa tensão: a rede secundária, constituída por cabos subterrâneos isolados, pode ser do tipo radial ou interligada sendo, neste último caso, alimentada em diversos pontos por diferentes transformadores. Estes, por sua vez, são normalmente alimentados por diversos circuitos primários em anel ou reticulados. As redes subterrâneas utilizam, para suas fases e neutro, cabos isolados simples, não blindados. A figura 9 mostra um exemplo de descida para linha subterrânea de baixa tensão.



**Figura 9** – Descida para linha subterrânea de baixa tensão

## 2.8 COMPORTAMENTO DAS LINHAS DE DISTRIBUIÇÃO DE MT E BT

As subseções 2.8.1 e 2.8.2 apresentam as principais características e os aspectos favoráveis e desfavoráveis para a transmissão de dados, em altas taxas, sobre as redes de energia de média e baixa tensão, utilizadas como meio de transmissão de sinais de telecomunicações.

### 2.8.1 Linhas de distribuição de média tensão

- Linhas aéreas convencionais: estas linhas são semelhantes, sob o ponto de vista construtivo, às linhas abertas de transmissão para telecomunicações com condutores paralelos. Suas características construtivas permitem certa liberdade de movimento lateral dos condutores. Consequentemente, o valor da impedância característica sofre variações em seus diferentes trechos. Por outro lado, essas linhas de comunicações apresentam eventuais cargas ao longo de seu trajeto que são compensadas por casamento de impedância, de forma a mantê-la constante em todos os seus pontos.

Ao longo das linhas de média tensão existem cargas não acopladas que são os circuitos primários dos transformadores MT/BT (média tensão/baixa tensão). Entretanto, este carregamento apresenta, quase sempre, uma impedância relativamente elevada para as altas frequências. Apesar das variações de impedância, espera-se uma transmissão aceitável do

sinal por alguns quilômetros de distância. Em geral, os obstáculos para a transmissão do sinal são os seguintes:

- Ruído gerado por isoladores defeituosos;
  - Interconexão com trechos de outras redes de impedância característica mais baixa, formando pontos de descontinuidade, que podem ocasionar reflexões dos sinais;
  - Linhas atuando como antenas para os sinais de emissões de rádios comerciais e
  - Eventual presença de capacitores para correção do fator de potência instalados ao longo das linhas.
- 
- Linhas aéreas compactas: para estas, linhas as condições são mais favoráveis para a transmissão de sinais de alta frequência, tendo em conta que utilizam o ar como dielétrico e apresentam menores variações de distância entre os condutores, o que, por sua vez, reduz a variação da impedância característica da linha, minimizando as distorções causadas por reflexões. A não existência de isoladores convencionais reduz o nível total de ruído das linhas compactas mas não o elimina, uma vez que estas se conectam às linhas convencionais, onde esta fonte de ruído pode estar presente.
  - Linhas aéreas multiplexadas: estas linhas utilizam cabos blindados, de construção geométrica semelhante à utilizada em cabos para telecomunicações. Desta forma, apresentam comportamento similar aos cabos coaxiais para comunicação, ou seja, imunidade à radiação e captação de sinais interferentes e impedância característica de valor uniforme. Estas semelhanças sugerem que, para a transmissão de sinais de frequências elevadas, estas linhas tenham um melhor desempenho quando comparadas aos outros tipos de linhas. Suas limitações se devem a perdas no material dielétrico (inadequado para uso em altas frequências) e à existência de derivações. Apresentam maior atenuação que as linhas aéreas com condutores paralelos.

### 2.8.2 Linhas de distribuição em baixa tensão

- Linhas de distribuição aéreas: a utilização deste tipo de linha apresenta uma dificuldade prática, pelo fato de que grande parte da rede brasileira de iluminação pública utiliza capacitores para fins de correção do fator de potência dos conjuntos lâmpadas/reatores. Como em muitos casos, a iluminação é alimentada diretamente, a partir da rede aérea de distribuição, estes capacitores atenuam ou bloqueiam a transmissão de sinais de frequências elevadas. As linhas aéreas de baixa tensão têm comportamento semelhante às linhas de comunicações de condutores paralelos aéreos permitindo, em princípio, a transmissão de sinais de frequências mais elevadas, sem risco da ocorrência de irradiações questionáveis. Diferem das linhas aéreas de média tensão devido ao fato de que as cargas dispostas ao longo de sua extensão se repetem em intervalos mais curtos e são representadas por cargas de baixa impedância para os sinais transmitidos. Além do efeito do desacoplamento de sinal, estas cargas apresentam perdas elevadas, aumentando a atenuação total.

Ao contrário das linhas de média tensão, os isoladores nas linhas de baixa tensão não costumam gerar ruído. Entretanto, podem estar presentes ruídos produzidos pelo homem, tais como aqueles provocados por aparelhos elétricos dotados de motores a escova. Além desses ruídos, estão presentes sinais de emissoras comerciais de radiodifusão em nível comparável aos encontrados em linhas de média tensão. Os ramais de serviço, que conectam cada consumidor à linha se constituem em dezenas de pontos de derivação, geradores de reflexões. A combinação dos ruídos presentes nas linhas de baixa tensão, com as frequentes derivações e os elevados valores de atenuação total, faz dessas linhas um ambiente hostil para a transmissão de sinais de telecomunicações.

- Linhas de distribuição multiplexadas: estas linhas apresentam comportamento diferente das linhas secundárias convencionais de baixa tensão, por utilizarem condutores trançados e bem próximos. Isto confere a estas linhas uma menor possibilidade de captação e irradiação, permitindo sua melhor utilização como meio de transmissão de sinais de comunicação.

- Redes de distribuição subterrâneas de baixa tensão: estas redes são formadas por grandes extensões de cabos de baixa tensão, isolados e não blindados, montados juntos ou separados, podendo apresentar, no caso de sistemas reticulados, grande número de interconexões. A ausência de blindagem nos cabos e a proximidade entre as fases fazem com que essa rede se comporte como uma linha de transmissão de um condutor próximo a terra, na qual seu valor de impedância característica é dependente desta proximidade e apresenta valores elevados de capacitância e condutância à terra. Como, normalmente, estas interconexões são frequentes e repetidas, a impedância característica equivalente de alguns trechos pode ser ainda mais reduzida.

A combinação de valores muito baixos de impedância característica e de elevados valores de capacitância e condutância para terra é, quase sempre, associada a elevados valores de atenuação. Para uma determinada concentração de grandes consumidores, alimentados por estas linhas, diversos transformadores poderão ser agregados de tal forma que a circulação de corrente se dê sempre em trechos curtos. Estes trechos de grande concentração de carga devem ser, portanto, os mais críticos para transmissão de sinais de comunicações. Todas estas características fazem com que o comportamento das redes subterrâneas reticuladas, como meio de transmissão de sinais de telecomunicações, tenda a assemelhar-se àquele que seria representado por uma superfície metálica com razoáveis valores de condutância e capacitância para a terra. Este modelo não favorece a transmissão de sinais de frequências elevadas, exercendo sobre estas, elevado efeito de atenuação, devido a perdas por efeito condutivo e corrente de fuga (*bypass*) por efeito capacitivo, acrescidos aos efeitos de desacoplamento. Alguns ruídos descritos para as redes aéreas não devem estar presentes em redes subterrâneas, devido ao efeito de blindagem. Ruídos e impulsos ocasionados por descargas atmosféricas normalmente não estão presentes.

## 2.9 MONITORAMENTO INTELIGENTE APOIADO NA TECNOLOGIA BPL

Com o permanente interesse no custo, na disponibilidade, na confiabilidade e nas conseqüências ambientais do aumento do consumo de energia, o Sistema Elétrico de Potência – SEP (geração, transmissão e distribuição) está se submetendo a uma transição importante. Os sistemas existentes de transmissão e de distribuição disponíveis são antigos e apresentam



monitoramento e controle da rede de forma limitada. A figura 10 ilustra um trecho de uma linha de transmissão.



**Figura 10** - Trecho de uma linha de transmissão

Para modernizar esta infraestrutura e criar um SEP que vá ao encontro das necessidades dos consumidores e de outras partes interessadas, incluindo órgãos reguladores, governos e os clientes em potencial, como é o caso das empresas de telecomunicações, as companhias ligadas ao setor elétrico estão desenvolvendo sistemas de gerenciamento inteligentes, que propiciam detecção de falhas e comunicação, com base em tecnologias avançadas de controle para gerar e distribuir a eletricidade eficientemente, de forma mais econômica e favorável ao meio ambiente.

Uma rede elétrica inteligente (*Smart-Grid*) é fundamentada em um conceito tecnológico que propõe uma ampla arquitetura baseada em sistemas abertos, para as empresas que integram o SEP. Essa arquitetura possibilita a integração de equipamentos inteligentes e redes de comunicação de dados, em um sistema gerenciado de computação distribuído, que abrange as redes e os consumidores. Este conceito é a base que possibilita a implantação de facilidades avançadas, tais como: rede de energia auto-recuperável, comunicação integrada com o cliente e informação em tempo real sobre a energia e fluxo da geração. No Brasil a Eletrobrás, a Eletropaulo, a CELG, a CEEE e a CEMAR já monitoram e operam trechos de suas redes através do conceito *Smart-Grid*.

A tecnologia BPL pode fornecer uma plataforma estável de comunicações, para a evolução do gerenciamento da rede elétrica, enquanto permite o acesso remoto, em tempo real, para o monitoramento do desempenho do serviço. Informações de operação, notificação dinâmica de indisponibilidade, medição remota de consumo de energia, além de outras potencialidades como, por exemplo, o monitoramento através de câmeras e o aperfeiçoamento do serviço de atendimento ao cliente estão em desenvolvimento. Um sistema BPL transforma, rapidamente, a infraestrutura de média e baixa tensão (MT e BT) em uma rede de dados

segura, de alta velocidade, capaz de habilitar qualquer tipo de facilidade, ou mesmo prover dados em faixa larga ao consumidor, em qualquer lugar atendido pela rede de energia elétrica.

Utilizando a rede de energia elétrica como base (*backbone*) para comunicações em um sistema de gerenciamento inteligente, uma concessionária de energia elétrica pode:

- Assegurar avanço rápido devido à adoção de padrões abertos, onde todo o dispositivo que utiliza o Protocolo *Internet* (IP) pode ser integrado na rede suportando, deste modo, aplicações já existentes, detecção de indisponibilidade, automatização da distribuição e resposta à demanda, como também exigências futuras de novas aplicações inteligentes na rede, tais como segurança, fiscalização e predição de eventos;
- Garantir a segurança e a confiabilidade do gerenciamento utilizando seus próprios recursos de comunicações para monitoramento e controle, independentemente das operadoras dos serviços de telecomunicações convencionais e
- Assegurar oferta em escala ao serviço, devido ao fato de que a tecnologia BPL está testada em áreas urbanas densas, em comparação com as tecnologias das redes convencionais de telecomunicações, que podem ou não viabilizar a operação em alguns locais densamente povoados.

Estimativas internacionais indicam que, considerando todos os benefícios da instalação de um *backbone* BPL para redes inteligentes, é possível assegurar custos da ordem de cerca de 5% do custo total do projeto da rede inteligente. (*CORINEX COMMUNICATIONS CORP*, 2008)

### **2.9.1 Tecnologia BPL em redes elétricas inteligentes**

As principais vantagens de uma rede elétrica inteligente são:

- Monitoramento remoto em tempo real.
- Telecomando e telecontrole reagindo a eventos indesejáveis na rede.
- Isolamento de defeitos para a solução de problemas.

- Supervisão do fornecimento.

Para operar uma planta inteligente é necessário obter dados coletados de sensores e processadores instalados nas linhas de transmissão e nos equipamentos da rede de distribuição, tais como: interruptores, disjuntores, transformadores, barramentos, etc. As informações são enviadas ao Centro de Gerência de Rede (CGR) que as disponibiliza, para tomada de decisão e atuação remota ou para levantamentos de desempenho, através de dados estatísticos.

É necessário digitalizar todos os elementos da planta para permitir que a inteligência da rede flua de e para todos os elementos ativos. O fundamento para este controle inteligente é uma rede de comunicação altamente confiável, *full duplex*. Isto permite a detecção da indisponibilidade, a isolamento de falha automatizada e a gerência da carga para melhorar a eficiência do uso e distribuição da potência.

Uma vez que os dispositivos digitais e sensores sejam instalados, a detecção imediata da indisponibilidade e a notificação dinâmica se tornam automáticas. O CGR da concessionária pode monitorar alarmes e alertas de falhas em potencial. A notificação dos técnicos pode ser feita através de *e-mail* ou mensagem no celular; o acionamento e a descrição da anormalidade são gerados imediatamente. Este sistema de comunicações é estendido aos clientes que recebem, automaticamente, as notificações de falha e recuperação do serviço.

Uma rede inteligente também inclui a medição remota em tempo real do consumo de energia elétrica nas instalações comerciais e residenciais. Os sensores na rede, como termostatos e relés, especialmente desenvolvidos, limitam ou deslocam os recursos nos períodos de pico, controlando melhor a capacidade de gerar, transmitir e distribuir potência. Uma rede elétrica inteligente modernizada transforma-se em um sistema de transmissão e distribuição digital de energia elétrica.

Operando uma rede inteligente, com *backbone* de comunicações baseado na tecnologia BPL, a concessionária dispõe de uma alternativa para monitoramento, independente da rede convencional de telecomunicações, facilitando a operação e a manutenção do serviço, além de:

- Reduzir despesas de operação da rede, minimizando e/ou adiando os gastos em recursos para geração, transmissão e distribuição, com a prevenção de sobrecarga, diminuindo o desgaste nos equipamentos que operam além da capacidade, com temperaturas elevadas devido à ausência de monitoramento.

- Detectar problemas em potencial no sistema antes que afetem o serviço ou resultem em falhas que possam acarretar alto custo para recuperação, devido ao agravamento do problema, em decorrência de tomada de decisão e atuação tardia no sistema.
- Automatizar a recuperação do sistema incorporando ações abrangentes, comunicações rápidas, diagnósticos avançados e centralizados, recuperando rapidamente o sistema a um estado estável, após interrupções ou distúrbios.
- Reduzir a indisponibilidade identificando e localizando, rapidamente, as falhas, permitindo que os técnicos sejam despachados com a posição exata do equipamento para reparos.
- Gerenciar a demanda máxima medindo e controlando a demanda, evitando picos de consumo, colhendo informações e identificando estes pontos nos sistema e os consumidores responsáveis por estes picos.
- Aumentar a proteção da rede incorporando sistemas e dispositivos de proteção para combater as ameaças de intempéries da natureza.
- Reduzir o custo total de operação e manutenção através de um gerenciamento centralizado e mais eficiente, inclusive com recursos avançados para a recuperação de falhas remotamente.

Atualmente, os fabricantes de equipamentos oferecem sistemas de monitoramento que disponibilizam os dados e os resultados da análise pela *Internet*, permitindo aos profissionais, que trabalham na engenharia de manutenção das empresas, o acompanhamento em tempo real do estado de funcionamento dos equipamentos.

### **2.9.2 Protocolos para transmissão de dados**

O TCP (*Transmission Control Protocol*) é um dos protocolos sobre o qual atualmente se assenta o núcleo da *Internet*. A versatilidade e robustez deste protocolo o tornaram adequado para redes globais, uma vez que este verifica se os dados são enviados de forma correta, na seqüência apropriada e sem erros pela rede. É um protocolo do nível da camada de

transporte (camada 4) do modelo OSI e é o suporte para a maioria das aplicações da Tecnologia da Informação - TI, como o SSH (*Secure Shell*), que permite a conexão com outro computador na rede, de forma a executar comandos criptografados de uma unidade remota, FTP (*File Transfer Protocol*), que permite a transferência de arquivos, HTTP (*Hipertext Transfer Protocol*), que é utilizado para a transferência de textos digitalizados, ao qual agrega-se outros conjuntos de informações, como por exemplo, sons e imagens, portanto, a *World Wide Web* - *www*.

UDP é um acrônimo do termo inglês *User Datagram Protocol*, que significa “protocolo de datagramas de usuário”. O UDP faz a entrega de mensagens independentes, entre aplicações ou processos, em sistemas *host*. A entrega é não confiável, porque os datagramas podem ser entregues fora de ordem ou até perdidos. Assim como o TCP, é um protocolo do nível da camada 4 do modelo OSI; é utilizado transmitir dados pouco sensíveis, como fluxo de áudio e vídeo. Ex: Telefonia IP (*VoIP*), transmissão de vídeo digital (MPEG), etc.

O monitoramento utilizando recursos da *Internet* depende da instalação de uma infraestrutura de comunicações convencional para transmissão de dados em altas taxas, inclusive com a transmissão de imagens. Neste aspecto, a infraestrutura da rede elétrica assume um papel muito importante, como alternativa para a redução do custo de implantação dos sistemas inteligentes de monitoramento da rede elétrica.

O recurso de visualização de imagens de equipamentos de interesse do CGR representa uma fonte importante de informações para a concessionária de energia. Outra vantagem da câmera é a posição estratégica na instalação: enquanto um ser humano deve manter distâncias seguras dos equipamentos de alta tensão e seu ângulo de visão pode ser prejudicado na inspeção de redes vivas, a câmera pode ser instalada próxima ao equipamento e, em alguns tipos, ainda permitem movimentos de *pan* (horizontal), *tilt* (vertical) e *zoom*, que são recursos que podem ser, também, comandados remotamente.

A infraestrutura de comunicações nem sempre está disponível nos locais que devem ser monitorados, abrindo a possibilidade para utilizar a rede de energia elétrica como meio de transmissão das informações necessárias para o gerenciamento eficaz do sistema elétrico de energia. Esta alternativa, empregando a tecnologia BPL, torna a implantação de um sistema de monitoramento inteligente mais viável, economicamente, visto que a própria concessionária de energia é proprietária da rede de comunicações. Esta situação elimina, portanto, grande parte do custo para o monitoramento da rede.

### **3 DESENVOLVIMENTO DE EQUIPAMENTOS E APLICAÇÕES EM REDES BPL**

No Brasil, os equipamentos que compõem os sistemas BPL devem possuir certificação expedida ou aceita pela ANATEL, de acordo com a regulamentação vigente e atender às normas aplicáveis, referentes ao setor elétrico, expedidas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Atualmente estão disponíveis no mercado diversos equipamentos e dispositivos capazes, sob o ponto de vista de desenvolvimento tecnológico, de atender a oferta de serviços de telecomunicações sobre a rede de distribuição de energia elétrica. Estes equipamentos seguem padrões estabelecidos por entidades locais, como comitês formados especificamente para obter padrões e requisitos técnicos, visando facilitar o comércio entre os países que já adotam ou irão adotar a tecnologia BPL como solução para o gargalo da última milha, otimização de redes domésticas, monitoramento inteligente e limitações existentes nas taxas de transmissão, impostas pelas redes de telecomunicações convencionais.

#### **3.1 INICIATIVAS PARA O DESENVOLVIMENTO DA TECNOLOGIA**

Na Europa, o projeto “*Broadband for all*” é uma das mais relevantes iniciativas para a sociedade da informação chamada de “*Information Society Technologies*” (IST), que tem por finalidade desenvolver tecnologias de redes e arquiteturas que permitam o acesso em faixa larga aos usuários europeus, incluindo aqueles dentro de áreas menos desenvolvidas e regiões rurais.

##### **3.1.1 Projeto Opera**

O termo OPERA (*Open PLC European Research Alliance*) é a sigla que representa uma aliança europeia para pesquisa de uma nova geração de equipamentos, buscando a

integração de redes através da tecnologia BPL (ou PLC – *Power Line Communications*). O projeto teve início em Janeiro de 2004, com 36 empresas participantes e duração prevista de 48 meses, sendo dividido em duas fases de 24 meses para cada etapa – OPERA 1 e OPERA 2. O custo total do projeto foi da ordem de vinte milhões de euros para sua primeira fase. A Comissão Européia, no âmbito do programa do IST (*Information Society Technologies*), (o projeto é referido frequentemente como o IST-OPERA) financiou em parte o projeto, algo em torno de nove milhões de euros. Este projeto desenvolveu-se em duas fases:

- Primeira fase (2004-2005) - Finalizada e revisada em abril de 2006
- Segunda fase (2007-2008) - Finalizada em fevereiro de 2009

Este capítulo se propõe a desenvolver um estudo sumário dos avanços obtidos nas duas fases do projeto OPERA. A empresa que representa o Brasil no OPERA é a CELG (Centrais Elétricas de Goiás) e tem participação em quatro projetos:

- Aplicação em campo.
- Desenvolvimento de negócios.
- Disseminação da tecnologia.
- Pesquisa sobre a tecnologia e sua aplicação na inclusão digital.

Não existem outros projetos desta magnitude, porém várias entidades tentam conduzir uma padronização para a tecnologia, de acordo com seus interesses, tais como:

- a. PLC - Forum, que é uma organização internacional com o objetivo de unificar e representar os interesses das entidades envolvidas com PLC, em todo o mundo e
- b. A *HomePlug Powerline Alliance (HomePlug)*, que é um grupo sem fins lucrativos formado para a criação de especificações destinadas a PLC.

#### 3.1.1.1 Objetivos do Projeto Opera

O objetivo geral do projeto foi criar condições para realização de pesquisas, que tinham por finalidade demonstrar a viabilidade da tecnologia BPL e disseminar a sua aplicação na Europa e em todo mundo, tornando-a competitiva para o uso em escala

comercial. Os objetivos científicos e tecnológicos do projeto podem ser, em linhas gerais, resumidos em:

- Melhorar os sistemas de comunicação via rede de energia elétrica em baixa tensão (BT) assim como em média tensão (MT), abrangendo largura de banda, alcance, operação, compatibilidade eletromagnética, gerência de rede e modelagem do canal. Estes objetivos estavam relacionados a condicionar a rede usando acopladores e filtros, melhorando os equipamentos até então desenvolvidos e
- Desenvolver soluções mais adequadas às redes de telecomunicações para a conexão das redes de acesso, baseadas na tecnologia BPL. O objetivo nesta área foi criar as soluções compatíveis com o *backbone* (LMDS, satélite, BPL em MT, etc.). O alvo final é alcançar os usuários onde quer que estejam com baixo custo.

Além dos objetivos gerais, científicos e tecnológicos, o projeto tinha a missão de:

- Padronizar os sistemas BPL.
- Definir o modelo de negócios, procedimentos para a manutenção da rede e fornecimento dos serviços, incluindo estudos de mercado para identificar as demandas dos usuários finais.
- Disseminar os resultados do projeto, respeitando os direitos de propriedade intelectual.

### 3.1.1.2 Objetivo Estratégico

Desenvolver um sistema BPL compatível, eficiente, integrado com outras tecnologias, e viável para a comercialização, transformando-o em uma alternativa real às tecnologias de faixa larga existentes.

No final da primeira fase as principais conclusões do projeto foram:

É possível uma avaliação favorável da tecnologia BPL, para uso como acesso em faixa larga, tendo sido realizado, inclusive, testes para a oferta de novos serviços de telecomunicações. As pesquisas e testes realizados na rede elétrica possibilitaram a integração de novos dispositivos que demonstraram a compatibilidade com outras tecnologias. Todos esses conhecimentos foram e estão sendo muito úteis para as companhias que operam as redes



de energia elétrica e para as operadoras das redes de telecomunicações. Apesar dos resultados obtidos, entretanto, a aceitação final como padrão global IEEE é um passo ainda crítico, visto que alguns esforços em direções diferentes ocorreram paralelamente. Será necessário um empenho coletivo de toda a indústria para determinar, o quanto antes, um padrão definitivo e completo, considerando que os clientes da tecnologia (concessionárias de energia e operadores das redes de telecomunicações) normalmente relutam em adotar soluções proprietárias.

A conclusão final, nesta primeira etapa, foi que a tecnologia está evoluindo fortemente para tornar-se ainda mais competitiva em escala comercial. As empresas que participaram do projeto OPERA terão excelentes oportunidades para alcançar novos mercados e, por extensão, aumentarem o número de negócios, inclusive o Brasil, que participou da segunda fase do projeto através da APTEL (Associação de Empresas Proprietárias de Infraestrutura e de Sistemas Privados de Telecomunicações). Os resultados dos trabalhos estão disponíveis no site [www.ist-opera.org](http://www.ist-opera.org). A seguir, a Tabela 1 fornece um resumo do estado da arte e os objetivos a serem atingidos por ocasião do início da primeira fase do projeto.

**Tabela 1** – Estado da arte e objetivos do projeto OPERA 1

<b>Requisito do Projeto</b>	<b>Estado da Arte 2004</b>	<b>Objetivo Fase 1 – 2006</b>
Taxa de transmissão	Superior a 45 Mbps	Superior a 200 Mbps
Reuso de frequência	x 1	x 4
Padronização	Soluções proprietárias	Padrão <i>pulg &amp; play multi-vendor*</i>
Instalação nas redes de baixa tensão	Complexa e de custo elevado	Simple e de baixo custo
Acoplamento nas redes de média tensão	Capacitivo	Indutivo
Capacidade de cobertura a usuários	80% a 90%	100%
Disponibilidade em larga escala	Em desenvolvimento	Pronto para atender a demanda
EMC – Padrão e conformidade	Nacional	Europeu
Serviços de voz e vídeo sobre BPL	Testes iniciais	Pronto para comercialização
Equipamentos	Interface não amigável	Uso amigável
Compatibilidade <i>in home</i>	Não garantida	Garantida
Interconexão com outras redes	Ineficiente	Eficiente

\* Funcionamento compatível com equipamentos de fabricantes diferentes

### 3.2 NOVOS EQUIPAMENTOS E PROTÓTIPOS

Após os estudos relativos aos aspectos físicos do meio de transmissão e equipamentos necessários para a instalação de uma rede BPL, verificou-se resultados muito úteis para os usuários da tecnologia. Estes resultados incentivaram e continuam incentivando a indústria a buscar novas soluções que possam ser utilizadas nas diversas topologias das redes elétricas. Durante a primeira fase do projeto os primeiros protótipos foram desenvolvidos, junto com os respectivos procedimentos de instalação, levando em conta, também, os aspectos de segurança. Os protótipos foram testados e validados sob condições reais. No fim da primeira fase, acopladores, filtros e dispositivos adaptadores de linha estavam disponíveis para

utilização com certo grau de otimização. Todo o desenvolvimento seguiu os aspectos regulatórios e os padrões relacionados mais relevantes, considerados comuns a diversos países, inclusive o Brasil.

Nos estudos desenvolvidos na fase 1 demonstrou-se a capacidade do BPL para atuar como uma tecnologia alternativa de acesso em faixa larga. Foram gerados resultados valiosos para as iniciativas de padronização. Entretanto, muito trabalho deve ainda ser conduzido a fim de se obter uma tecnologia padronizada, com características e comportamento que permitam soluções compatíveis com novos serviços e com aqueles já disponíveis aos usuários. Dessa forma, o projeto OPERA fase 2 teve os objetivos científicos e tecnológicos a seguir relacionados.

### **3.2.1 Canal BPL**

- Desenvolvimento e melhoria de dispositivos acopladores de sinais.
- Emulador do canal para teste e desenvolvimento de equipamentos.
- Predição das emissões causadas e maneiras de minimizá-las.
- Ferramentas para facilitar e acelerar o processo de instalação.

### **3.2.2 Testes e Integração**

- Definição do método para realização de testes e validação.
- Suporte para melhoria e estudos para a padronização.
- Integração com outras tecnologias.

### **3.2.3 Melhoria do Sistema e Equipamentos para Usuários Finais**

- Novos desenvolvimentos para novas demandas e demandas preexistentes
- Compatibilização com esforços para a padronização.
- Sistemas de gerenciamento de energia elétrica.

### 3.2.4 Liberação de serviços sobre redes BPL

- Avaliação dos serviços sobre a rede BPL (desempenho dos testes) e
- Pesquisas de novos serviços de telecomunicações e redes inteligentes (*smartgrid*).

### 3.2.5 Padronização e Desenvolvimento de Negócios

- Compatibilidade entre rede de acesso e *homenetwork*.
- Melhoria e atualização dos planos de negócios considerando os resultados da primeira fase.

A Tabela 2 ilustra a evolução dos objetivos científicos e tecnológicos.

**Tabela 2** - Evolução dos objetivos do projeto OPERA Fases 1 e 2

Conceito	Fase 1	Fase 2
Acopladores/filtros e dispositivos adaptadores	Protótipos testados e certificados	Acopladores e dispositivos adaptadores
Modelagem do canal	Simulador	Emulador
Interferência eletromagnética	Medidas, dados e conclusões	Diretrizes, verificação e mitigação
Mecanismos de distribuição	-	Desenvolvimento de testes
Interconexão com o <i>backbone</i> de	Otimizado	Aperfeiçoado para novas tecnologias
Integração do acesso com a rede <i>in-home</i>	Especificação <i>in-home</i> para coexistência	Implementação de padrões para coexistência de acesso
Instalação em campo BT e MT	Procedimentos	Otimização
Sistema BPL e terminais de usuários	Protótipos testados	Equipamentos prontos para fabricação <i>chip</i> integrado em vários dispositivos
Serviços sobre a rede elétrica – BPL	Avaliado satisfatoriamente	Testado
Compatibilidade e conformidade	Padronizado de fato a nível europeu	Padronizado oficialmente a nível europeu
Padrão BPL	Especificações OPERA versão 1	Padrão OPERA a nível europeu

No que segue, são apresentados os principais dispositivos desenvolvidos e suas aplicações.

### 3.3 ACOPLADORES DE SINAIS

O acoplador do sinal é parte fundamental em um sistema de comunicações sobre rede elétrica. Desta forma, foram desenvolvidos estudos para melhorar o desempenho dos acopladores e reduzir os custos da instalação, assim como reduzir a emissão eletromagnética ao ambiente. O acoplador tem que ser muito eficaz no acoplamento do sinal e tem que suportar a tensão nas linhas aéreas. Este dispositivo deve separar o nível de tensão para as redes de energia elétrica e o nível de tensão requerido para os serviços de telecomunicações, o que não é fácil de cumprir. O desempenho do acoplamento pode ser sacrificado para suportar a tensão na linha de potência, considerando ainda que o aspecto segurança tenha sempre maior prioridade.

Unidades de acoplamento são, portanto, as os dispositivos necessários para injetar e adaptar o sinal de telecomunicações às redes de distribuição de baixa tensão e média tensão. Há dois tipos de unidades de acoplamento:

- Acoplamento capacitivo que injeta o sinal por contato direto com a rede de distribuição (por exemplo, feito por “*piercing*”).
- Acoplamento indutivo que injeta o sinal por indução (por exemplo, feito por “*ferrite*”).

A solução de acoplamento a ser implementada é escolhida com base na qualidade do sinal, na facilidade de instalação e nas condições específicas da rede de distribuição utilizada. As soluções de acoplamento têm evoluído bastante, otimizando tempo, procedimentos, desempenho e segurança de instalação.

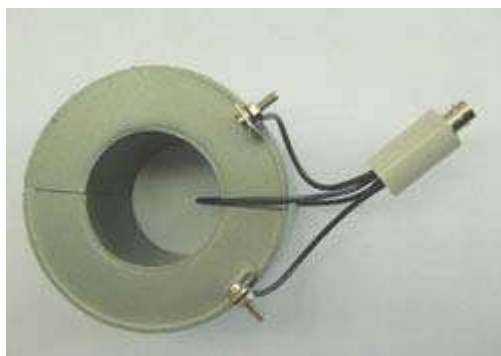
Muitos tipos de acopladores de média tensão estão disponíveis no mercado e podem ser classificados em diversas categorias. A classificação do acoplador é em função do desenvolvimento empregado e da sua aplicação. Normalmente, os acopladores são classificados em passivos e ativos. No caso dos acopladores de MT, normalmente não é fácil fornecer a energia de baixa tensão para a sua alimentação. Desse modo, os acopladores ativos exigem uma fonte de energia separada para o seu funcionamento. Assim, a maioria das instalações se torna mais viável com acopladores passivos.

Os acopladores devem isolar as tensões presentes no cabo de MT para um acoplamento com segurança. Devido a estas limitações, as opções possíveis são acopladores capacitivos, acopladores indutivos, suas combinações e acopladores direcionais passivos.

Todos esses acopladores foram testados e comparados no projeto OPERA. O estado da arte dos acopladores para comunicações em faixa larga, sobre a linha de energia elétrica, se resume em acopladores capacitivos, que são conectados à braçadeira de cabo e acopladores indutivos, que são desenvolvidos com núcleos articulados de ferrite em torno da terminação do cabo. Estes acopladores são fabricados pelas empresas Eichhoff (<http://www.eichhoff.de>, 2010) e Dimat (<http://www.dimat.com>, 2010).

### 3.3.1 Acopladores Indutivos para cabos de média tensão - MT

O acoplador indutivo MVIC (*Medium Voltage Inductive Couple* - Acoplador Indutivo de Média Tensão) foi desenvolvido para injetar o de comunicação sobre as linhas aéreas de MT, na faixa de frequência entre 2 e 30 MHz. A isolação de alta tensão permite que o acoplador seja instalado em condutores desencapados. As Figuras 11, 12 e 13 ilustram os acopladores indutivos. O MVIC é um acoplador indutivo para linhas aéreas desencapadas de MT, que funciona a partir dos mesmos princípios quando é usado nos acopladores para linhas subterrâneas isoladas. Uma vez que será instalado em cabos desencapados, é necessário cumprir todas as exigências de segurança relativas ao setor elétrico. As exigências de isolamento dependem da linha de média tensão e podem ser atendidas sob demanda. A respeito das necessidades de isolação, o projeto mecânico tem que considerar isoladores. A Figura 13 ilustra o esquema da rede e os acopladores indutivos.



a) Acoplador com fixação incorporada



b) Instalação do acoplador

**Figura 11** - Acoplador indutivo fabricado pela Eichhoff  
 Fonte: OPERA. IST *Integrated Project* No 026920



**Figura 12** - Acoplador indutivo fabricado pela Dimat  
 Fonte: OPERA. IST *Integrated Project* No 026920



**Figura 13** - Acopladores capacitivos instalados na rede  
 Fonte: OPERA. IST *Integrated Project* n° 026920

### 3.3.2 Acopladores capacitivos para cabos de média tensão

A unidade de CAMT (Capacitor Acoplador de Média Tensão) é usada acoplando um sistema de comunicação à linha de energia elétrica de média tensão. Apresenta as seguintes especificações:

- Transmissão de sinais na faixa de 2 a 38 MHz.
- Casamento de impedância entre a linha elétrica e o sistema de comunicação.
- Limitação dos surtos de tensão, oriundos da linha elétrica, e aterramento de correntes indesejadas.

As versões consistem de um capacitor de acoplamento, dispositivo de proteção e casadores de impedância. Estes elementos são encapsulados em dois blocos diferentes, unidos para dar forma de uma unidade compacta. Um bloco é composto do capacitor de acoplamento e do elemento para a ligação à linha; o outro bloco consiste da proteção, ajuste e conexão dos elementos de aterramento ao terminal de comunicação. Possui, também, uma haste rosqueada. A figura 14 ilustra os acopladores em duas versões disponíveis 24 KV e 36 KV, diferenciadas pelo tamanho.



**Figura 14** - Acopladores capacitivos 24 e 36 KV fabricados pela Dimat  
Fonte: OPERA. IST *Integrated Project* No 026920

### 3.3.3 Acopladores mixed indutivos e capacitivos para linhas aéreas de baixa tensão

Estes acopladores (MIC – *Mixed Inductive / Capacitive Coupler*) foram desenvolvidos para injetar sinais em linhas aéreas desencapadas de baixa tensão da rede de distribuição de energia. As vantagens são: baixa radiação eletromagnética (EMI) em torno do acoplador, confiabilidade muito elevada e resistência de saturação ilimitada. Usa a interferência indutiva e capacitiva entre o *loop* do cabo e as linhas aéreas desencapadas para o acoplamento. Este princípio é independente do nível de tensão, porém requer desenvolvimento específico.



O projeto é baseado em um cabo isolado ligado nos fios da linha aérea desencapada. Dependendo das exigências locais, torna-se possível para a concessionária de energia elétrica selecionar o tipo do cabo de mais fácil manuseio. Diferentes níveis de tensão podem ser empregados, bastando escolher o tipo de cabo para a tensão aplicada. Nenhuma avaliação é exigida, adicionalmente, contanto que o próprio cabo seja avaliado para as circunstâncias ambientais e elétricas.

### 3.3.3.1 Aspectos de segurança

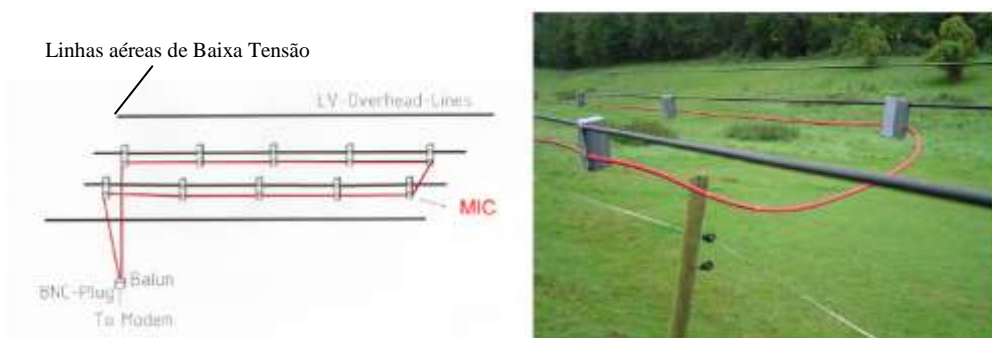
Os níveis de tensão das linhas de baixa tensão são potencialmente perigosos logo, somente profissionais qualificados podem instalar o acoplador. Para a instalação é necessária a permissão da concessionária de energia local. Como a instalação será feita, normalmente, em linha viva, é mandatório seguir todos os procedimentos de segurança relativos aos serviços em instalações elétricas com linhas energizadas. Os principais requisitos de segurança estão regulamentados pela NR-10 - Segurança em instalações elétricas e serviços com eletricidade (ver Anexo 3). O tipo de cabo tem que ser dimensionado para as circunstâncias ambientais e elétricas no ponto da instalação. Os responsáveis pela instalação devem ficar atentos às instalações circunvizinhas, por exemplo, as linhas de média tensão no mesmo poste ou próximas, conforme ilustrado na Figura 15.



**Figura 15** – Linhas de MT e BT instaladas no mesmo poste  
:

O acoplador é um *loop* de corrente feito por um cabo dimensionado para as circunstâncias ambientais e elétricas no ponto da instalação. Este dispositivo contém capacitores para acoplar o sinal e um BALUN simetricamente e distribuir o sinal às linhas de energia elétrica. O cabo deve ter um diâmetro do condutor entre 2 e 3 milímetros e deve ser flexível para facilitar o manuseio. O comprimento do *loop* é da ordem de 22 m, 2 vezes 10 m, ao longo da linha aérea e duas vezes 1 m ao BALUN. O BALUN deve ser conectado ao *loop*. A Figura 16 dá uma ideia parcial da instalação do acoplador.

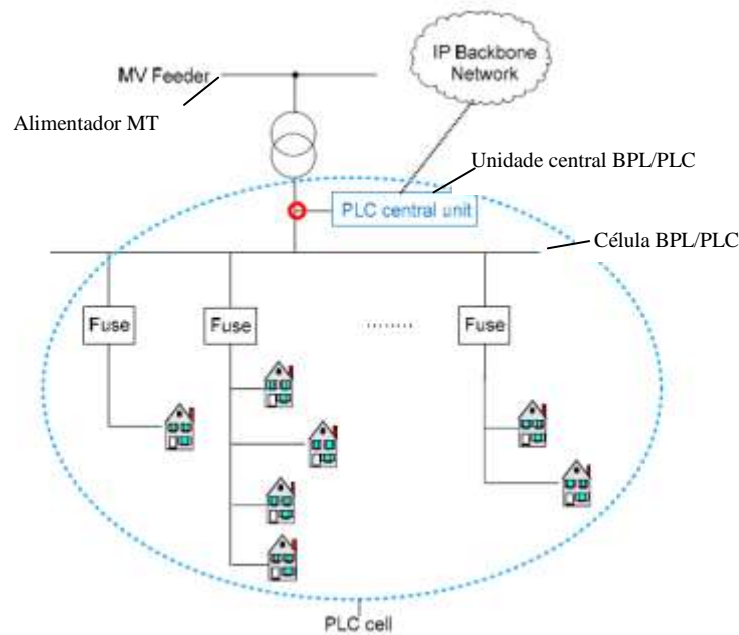
BALUN é o acrônimo das palavras *BALanced* e *UNbalanced*. No geral, a sua função é fazer a compatibilidade entre sistemas, através de acoplamento eletromagnético e frequentemente envolvem estruturas de transformador. Neste caso, o BALUN é um transformador que converte sinais elétricos de um cabo desbalanceado para o cabo de energia elétrica balanceado e vice-versa, fazendo o ajuste de impedância necessário.



**Figura 16** - Acopladores capacitivos para linhas aéreas de BT  
Fonte: OPERA. IST *Integrated Project* N° 026920

### 3.3.4 Filtros bloqueadores de RF para utilização *multimaster*

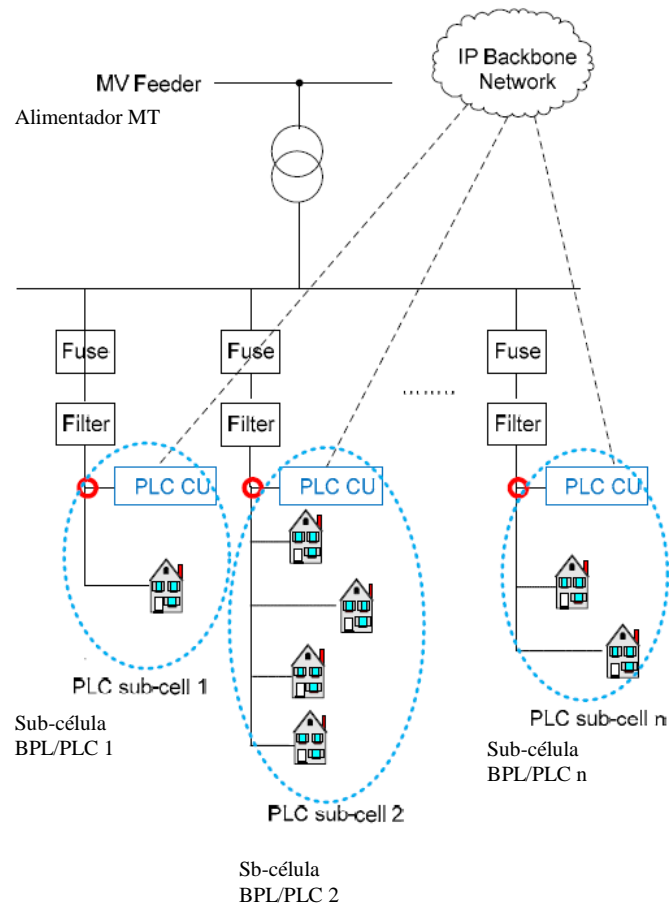
O acesso à rede em áreas com alta densidade populacional exige o aumento do desempenho total do sistema (taxa de transmissão). Com o esquema inicial, o serviço é proporcionado a todos os clientes que pertencem à mesma área de atendimento (célula), através de uma única unidade central (*master*), que é conectada ao condutor de baixa tensão – BT, no secundário do transformador. Isto significa que todos os usuários compartilham a mesma largura de banda disponível pelo equipamento *master*. Esta solução, para o modelo de distribuição em redes de BT é ilustrada na Figura 17.



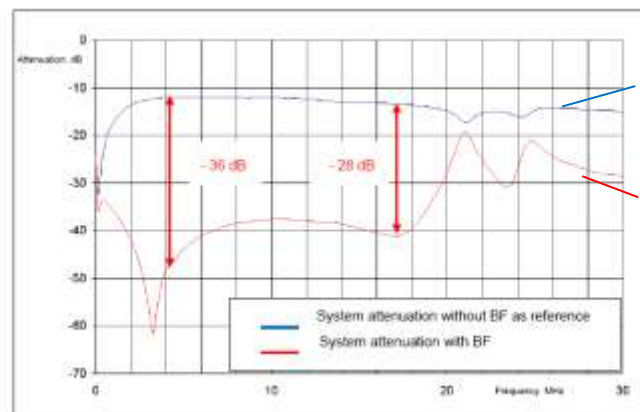
**Figura 17** - Área atendida por um único equipamento *master*  
 Fonte: OPERA. IST *Integrated Project* N° 026920.

Uma outra solução, para aumentar a taxa de transmissão na área de atendimento, é dividir esta célula em diversas subcélulas para reuso de frequências em cada uma delas. Como cada sub-célula é controlada por um equipamento *master*, este esquema é chamado o “*multimaster*”. Para evitar as perturbações entre as subcélulas é necessário isolar as interferências de RF entre elas. A separação eletromagnética dos cabos alimentadores de BT é conseguida usando filtros bloqueadores de RF em cada uma subcélula, como apresentado, esquematicamente, na Figura 18.

Os resultados das medições mostraram que a interferência entre os cabos alimentadores de BT é em uma escala que permite distribuições do tipo *multimaster*. Além disso, outros mecanismos tais como sincronização Rx/Tx e divisão da frequência para *uplink* e *downlink* podem ser utilizados para simplificar as especificações dos filtros e permitir a multidistribuição mestra, para os casos onde a interferência é relativamente elevada. O conceito do filtro é baseado em acoplamento indutivo e usa capacitores para atenuar o sinal nos pontos de terminação no barramento. A Figura 19 mostra o resultado das medições realizadas durante o projeto.



**Figura 18** - Área atendida no esquema *multimaster*  
 Fonte: OPERA. IST *Integrated Project* N<sup>o</sup> 026920.



Atenuação sem filtros bloqueadores

Atenuação com filtros bloqueadores

**Figura 19** - Atenuação com e sem filtros bloqueadores  
 Fonte: OPERA. IST *Integrated Project* N<sup>o</sup> 026920.

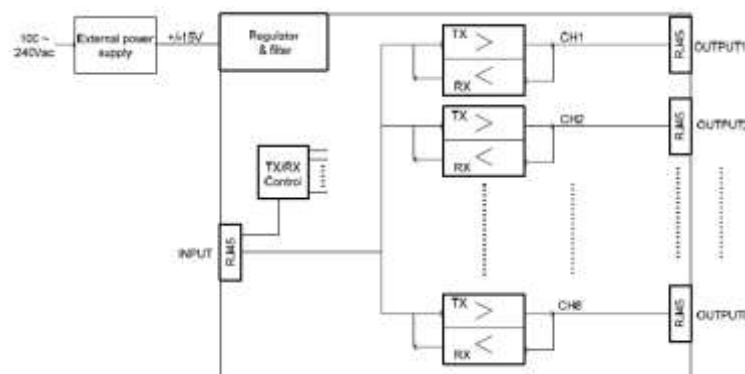
Normalmente, o sinal de um BPL *Master* é injetado no barramento de um transformador no lado de baixa tensão. No caso de um transformador com vários alimentadores, o sinal é distribuído a todos eles e a taxa de dados por cliente se reduz em

função do número de alimentadores presentes no barramento. A injeção individual dos sinais nos cabos só iria melhorar taxa de transmissão e o serviço prestado.

Os novos filtros de bloqueio, desenvolvidos pelo projeto OPERA, conseguem uma melhora em dB em uma faixa de frequência de 2-15 MHz. Assim torna-se possível estabelecer, facilmente, este conceito com baixo custo e taxa transmissão ajustável às demandas dos usuários. Estas demandas são sempre crescentes e exigem taxas cada vez maiores.

### 3.3.5 *Splitter* ativo BPL

Em muitos projetos o sinal de comunicação precisa ser injetado em várias linhas de energia elétrica. Quando esta função é executada por um dispositivo passivo, os divisores têm impacto no desempenho do sistema devido à redução da potência do sinal nas portas de saída. Por esta razão, um *splitter* ativo do sinal do BPL foi desenvolvido para compensar a perda de potência do sinal, a fim de conseguir um melhor desempenho no sistema. O objetivo é compensar as perdas causadas pelos dispositivos convencionais, para ter os níveis de potência de entrada disponíveis em todas as portas de saída. A Figura 20 apresenta o diagrama em blocos do *splitter* ativo.



**Figura 20** - Diagrama em blocos do *splitter* BPL  
Fonte: OPERA. IST *Integrated Project* N° 026920

O *splitter* BPL consiste de:

- Fonte externa de alimentação.
- Filtro de ruído;.
- Controle de Transmissão/Recepção – TX/RX.

- Oito canais amplificadores de TX/RX.

A entrada RJ45 é conectada ao modem BPL, que controla TX/RX.

Há oito amplificadores individuais bi-direcionais para TX/RX. Esses amplificadores de TX e de RX são controlados pelo circuito de controle de TX/RX.

A fonte de alimentação externa fornece a tensão de CC de +/-15V para o *splitter*.

Ainda há dois desafios no projeto do *splitter*: evitar que o amplificador de TX gere o ruído de intermodulação e usar um amplificador de baixo ruído no receptor para evitar a geração de ruído adicional. A Figura 21 apresenta o protótipo desenvolvido no projeto OPERA.



**Figura 21** - *Splitter* com fonte de alimentação externa  
Fonte: OPERA. IST *Integrated Project* N° 026920

Comparado com o divisor passivo do sinal BPL, o divisor ativo melhora o desempenho sistema significativamente. A Tabela 3 mostra o desempenho de TX/RX em um canal com atenuação de 70 dB.

**Tabela 3** - Comparação de desempenho com 70 dB de atenuação

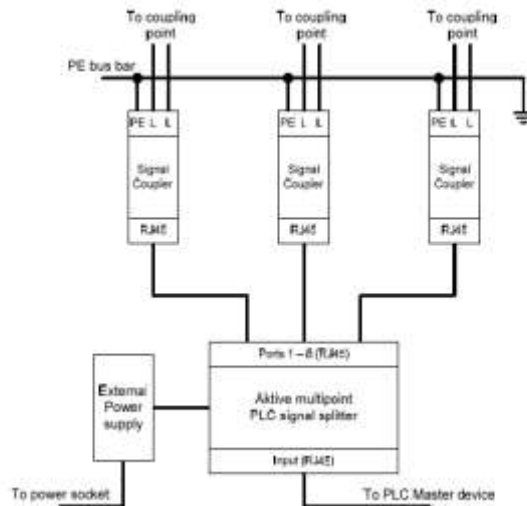
Sentido do teste	<i>Splitter</i> ativo	<i>Splitter</i> passivo
PLC TX	32Mbps	12Mbps
PLC RX	17Mbps	4Mbps

Fonte: OPERA. IST *Integrated Project* N° 026920

### 3.3.6 Instalação e funcionamento do *splitter*

Os elementos de suporte do *splitter* são trilhos padrão DIN e dispositivos de fixação convencionais, presentes na fonte de alimentação. A instalação é feita através da ligação aos

cabos de alimentação individuais dos usuários. A solução consiste em um divisor do sinal do sistema BPL em combinação com um ou diversos acopladores. O acoplador possibilita a devida separação galvânica do sinal de comunicação do sinal de potência da rede de energia elétrica. É instalado no quadro de distribuição próximo do alimentador correspondente ao usuário. O acoplador é provido de um transformador isolador, para separar o sinal de saída do BPL, e de um circuito de proteção para limitar a tensão de saída. O divisor de sinal BPL (*splitter*) compartilha o sinal de alta frequência da unidade da linha elétrica igualmente em suas 8 portas de saída. O *splitter* não pode ser alimentado diretamente pela rede elétrica, ele é ligado a uma fonte de alimentação externa, que pode ser provida por geradores. A Figura 22 apresenta a ligação entre o dispositivo do BPL, o *splitter* BPL e o acoplador do sinal.



**Figura 22** – Diagrama unifilar do *splitter*  
 Fonte: OPERA. IST *Integrated Project* N° 026920

Há dois tipos típicos de injeção do sinal aplicáveis: uma injeção simétrica, alimentando um sinal entre duas linhas elétricas, e a injeção assimétrica, que alimenta o sinal entre a linha elétrica e a terra. O tipo de injeção para acopladores BPL deve ser a injeção simétrica, que tem, normalmente, menor radiação eletromagnética.

### 3.4 AVANÇOS DA TECNOLOGIA

Em termos de melhorias da tecnologia como uma solução do acesso, foram obtidos expressivos resultados em termos de desempenho. Em particular, com a otimização da taxa de transmissão (bits por portadora). Com a melhora significativa da cobertura e da taxa de bits, é possível o fornecimento de novos serviços aos usuários finais. As novas facilidades foram desenvolvidas tanto para endereçar linhas aéreas como para ambientes *In-Building*, ampliando o campo da aplicação da tecnologia. Finalmente, os equipamentos permitem aplicações mais robustas para IPTV, VoIP e transmissão de dados, em geral. A tecnologia está agora mais robusta, mais segura e mais completa para aplicações mais eficientes e mais abrangentes da rede.



### 3.4.1 Novos serviços

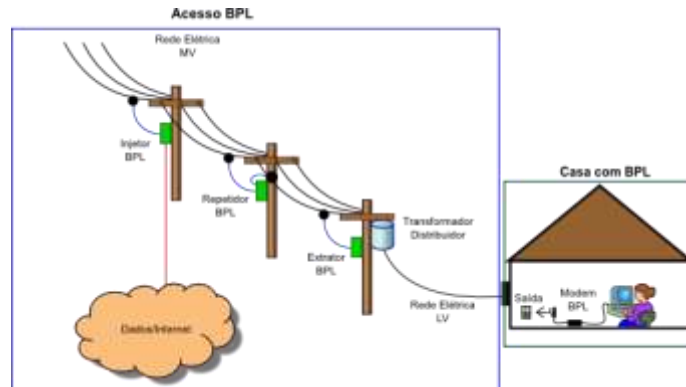
Com o projeto OPERA, novos serviços sobre redes BPL foram disponibilizados ou melhorados. Como por exemplos, o acesso à *Internet*, telefonia (VoIP), distribuição de sinal video (IPTV), fiscalização, gerenciamento de energia e monitoramento inteligente da rede elétrica. O projeto OPERA realizou, com sucesso, três testes de campo na Áustria (LINZ), em Portugal (LISBOA) e na Espanha (MADRID), junto com um teste de campo no Brasil. Os testes de campo, com a tecnologia desenvolvida no OPERA 2, foram concluídos com sucesso nas localidades testadas. Apesar das diferenças entre as redes testadas (topologias, densidade, infraestrutura, etc...) os resultados conseguidos demonstram valores de desempenho similares, indicando que a tecnologia pode se adaptar bem a cenários diferentes de operação. Usando os dispositivos desenvolvidos, os métodos de acoplamento, as alternativas do planejamento, etc..., descritos no projeto OPERA 2, pode-se dizer que a tecnologia se mostra adequada para ser utilizada em escala em toda a rede elétrica com uma porcentagem elevada de sucesso para fins comerciais.

### 3.4.2 Resultados para negócios

O projeto OPERA também concentrou esforços sobre a viabilidade em oportunidades de negócios. Os estudos do plano para negócios tiveram origem na fase 1 do OPERA e foram ampliados com considerações adicionais a respeito das aplicações. Os custos foram avaliados e definidos os valores considerados viáveis para a implantação do sistema. A conclusão resultante é que o BPL será uma alternativa real a outras tecnologias de faixa larga, quando a fabricação do equipamento alcançar uma escala que permita uma redução dos preços dos equipamentos. As redes BPL poderão oferecer uma opção econômica e eficaz para serviços de rede de faixa larga e gerenciamento inteligente.

Após esse estudo, é possível concluir que todos os objetivos do projeto foram alcançados ou excedidos. Houve desenvolvimento tecnológico e inovações relativas aos aspectos físicos do meio de transmissão e dos componentes periféricos, necessários para a tecnologia BPL. Dentre as principais realizações, pode-se mencionar:





**Figura 24** - Rede BPL integrada até a residência do usuário

### 3.5.1 Descrição dos principais equipamentos utilizados em redes BPL

#### - Modem BPL (*Customer Premises Equipments – CPE*)

Na parte *indoor* - ou seja, na casa do usuário, em prédio de apartamentos ou mesmo no escritório, cada PC deve ter um modem, de um lado conectado ao computador via USB ou rede *Ethernet* e do outro, ligado à rede elétrica. Com este dispositivo, potencialmente, qualquer tomada dentro da casa, prédio ou escritório se torna um ponto de *Internet*, e não se fica à mercê de barreiras que possam impedir a expansão da rede.

Usado para a recepção e transmissão dos dados, o Modem BPL é um equipamento que realiza a interface entre os equipamentos dos usuários e a rede elétrica de distribuição, transformando o sinal do equipamento terminal de telecomunicações em sinal modulado, transportando-o sobre a rede elétrica. O Modem recebe alimentação e os sinais de telecomunicações pela rede elétrica de distribuição. Permite, também, separar as aplicações de voz e dados, para os respectivos equipamentos ou computadores pessoais. Funcionalidades adicionais, tais como Modems *Wi-Fi* já estão disponíveis, também, permitindo a cobertura em áreas abertas.

#### - Demodulador Repetidor

O Repetidor recupera e re-injeta o sinal BPL proveniente do Equipamento de Transformador (concentrador *master*), para a rede elétrica de distribuição interna. É instalado, normalmente, junto à sala de medidores de cada prédio, ou em algum local intermediário (por exemplo, postes sem transformador) na rede de distribuição de baixa tensão. Esse equipamento provê acesso direto do usuário do sistema *indoor* para o sistema *outdoor*, através da comunicação com o concentrador *master*.

Algumas vezes, o repetidor pode ser utilizado como um nó intermediário, para expandir a cobertura ou aumentar a largura de faixa em segmentos críticos da rede (por exemplo, devido a uma elevada atenuação entre o equipamento BPL do Transformador e o Modem BPL). Há, também, repetidores para Média Tensão, com propósitos semelhantes. Em alguns casos, dependendo da topologia da rede elétrica, o repetidor pode não ser necessário, caso em que o equipamento BPL do Transformador consegue uma conexão de elevada qualidade com o Modem BPL.

Do ponto de vista do ambiente *indoor*, os dados trafegam pela rede da concessionária de energia elétrica até um concentrador mestre, em geral instalado em uma estação ou subestação de distribuição. A partir daí, os dados trafegam via cabo de fibra óptica, que pode estar sob a responsabilidade de empresa de telecomunicações ou mesmo da própria empresa de energia, até chegar a um ponto de acesso a *web*.

#### - Equipamento de Concentração

Determinados condomínios ou prédios podem exigir um Equipamento de Concentração que otimize a largura de faixa para um conjunto de usuários próximos. Em prédios, este equipamento é geralmente instalado junto à sala de medidores. Algumas vezes, pode ser utilizado como um nó intermediário para expandir a cobertura ou aumentar a largura de banda em segmentos críticos da rede.

#### - Equipamento Transformador (*Master/Gateway*)

O equipamento transformador é o dispositivo BPL instalado junto aos transformadores MT/BT. Sua função é extrair o sinal proveniente da rede de distribuição BPL (média tensão, fibra óptica, rede a cabo, etc) e injetá-lo sobre a rede de acesso (baixa tensão).

Possibilita o fluxo de dados *downstream*, do equipamento transformador até o modem BPL, ou para os repetidores, em uma configuração ponto multiponto *full-duplex*. Esses equipamentos são dotados de uma configuração modular flexível com:

- Placas BT, que injetam o sinal BPL, proveniente da rede de distribuição, sobre os cabos de baixa tensão.
- Placas MT, que permitem a interconexão destes equipamentos sobre a rede de distribuição de média tensão.

Opcionalmente o equipamento transformador pode incluir:

- Placas *WiFi*, que permitem o acesso *wireless* a clientes dentro da área de cobertura do transformador, sem utilizar a rede de baixa tensão, mas utilizando a rede de média tensão para entrega do sinal.
- Placas de *Fast Ethernet* ou *Gigabit Ethernet*, para interconexão destes equipamentos através de interfaces RJ-45 ou *GbEthernet*, o que permite o uso de fibra óptica ou outras tecnologias para a rede de distribuição (xDSL, LMDS, etc).

- Equipamento de Subestação (*High End*)

O Equipamento de Subestação é o dispositivo BPL instalado junto à Subestação. Sua função é, por um lado, permitir a interconexão com os provedores de serviços (Internet ou PSTN, por exemplo) e por outro, injetar o sinal na rede de média tensão. As funções do Equipamento de Subestação podem ser desempenhadas, dependendo da configuração, pelo mesmo equipamento *Master* (Equipamento de Transformador).

- Equipamentos Acessórios (Unidades de Acoplamento)

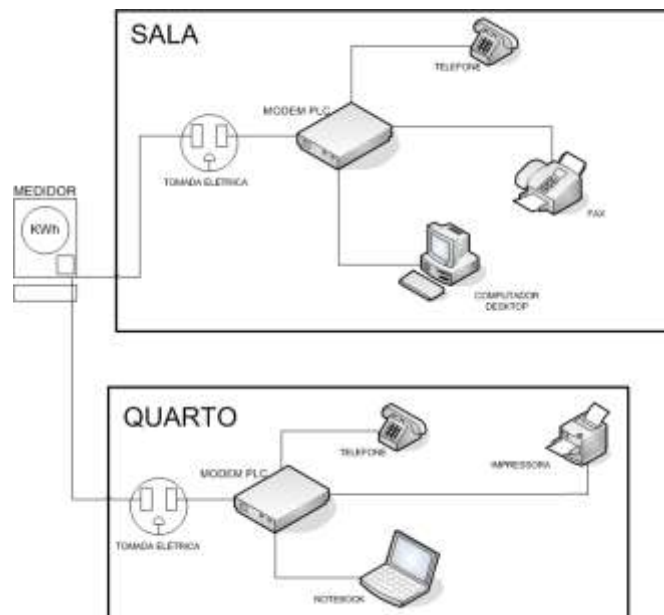
As unidades de acoplamento são os equipamentos acessórios necessários para injetar e adaptar o sinal de telecomunicações do equipamento BPL para a grade de distribuição (MT e BT). Conforme descrito em 3.3, há 2 tipos de unidades de acoplamento. A solução de acoplamento a ser implementada é escolhida com base na qualidade do sinal e facilidade de instalação nas condições específicas da rede de distribuição utilizada. As soluções de acoplamento têm evoluído bastante, otimizando tempos, procedimentos, desempenho e segurança de instalação.

### 3.5.2 Redes Indoor – Homenetwork

Uma rede domiciliar ou *homenetwork* é um sistema de comunicações, que visa a interconexão de dispositivos encontrados em residências, e que tem como objetivo a comunicação, o conforto, a economia de energia, a segurança, a assistência e o lazer. É uma solução apropriada para consumidores que querem desenvolver uma rede multimídia, sem adicionar nenhum cabeamento novo. A solução para transmissão de dados em faixa larga, utilizando a tecnologia BPL suporta, até o momento da conclusão deste trabalho,

transferências a taxas superiores 200 Mbps. A Figura 25 ilustra uma rede *indoor* e as especificações técnicas dos dispositivos utilizados.

Diversos equipamentos fornecem largura de faixa suficiente para transportar sinais vídeo com alta qualidade permitindo, simultaneamente, o acesso à Internet de alta velocidade. Simplesmente conectando um adaptador a uma tomada elétrica e a um modem ou um roteador é possível ter todas as tomadas elétricas prontas para receber sinais em faixa larga. A instalação é simples e promove cobertura em todos os cômodos da residência, o que nem sempre é possível em relação às soluções sem fio (*wireless*). Convém ressaltar também que mesmo optando-se por outras soluções cabeadas, afora o custo da infraestrutura, verifica-se taxas de transmissão menores, em torno de 100 Mbps.



**Figura 25** - Rede *indoor*

A rede domiciliar pode ser conectada ao *backbone* da *Internet*, através de uma conexão ADSL ou um cabo modem, fornecendo uma extensão conveniente da *Internet* à rede elétrica. Quaisquer dispositivos com porta *Ethernet*, tal como um PC, impressoras compartilhadas, computadores portáteis ou câmeras de segurança, podem ser conectados à rede elétrica. Os níveis de prioridade da aplicação podem ser identificados, assegurando que as aplicações com exigências em tempo real, tais como VoIP, com transmissão de vídeos e jogos interativos para múltiplos jogadores, não experimentem retardos e perda de quadros, mesmo se outros usuários na mesma rede estiverem realizando *downloads*.

Atualmente, os equipamentos oferecidos pelos fabricantes já introduzem vantagens adicionais em relação aos equipamentos desenvolvidos anteriormente. Estas vantagens podem ser resumidas pelas seguintes características:

- Maior imunidade ao ruído impulsivo - Ruídos inerentes às linhas elétricas, tais como aqueles provocados por secadores de cabelo e outros eletrodomésticos, têm agora menor influência na qualidade dos dados transmitidos pela rede.
- Sensibilidade melhorada do circuito - Os adaptadores da linha elétrica podem processar dados na rede em velocidades mais elevadas sobre distâncias mais longas, com menos perda de informações.
- Conectores permutáveis de CA – Conectores do adaptador podem ser trocados, significando que os adaptadores podem ser utilizados em diversos países, inclusive no Brasil.
- Modo *Standby*.- Quando não estiver em uso, o equipamento adaptador opera no modo de espera minimizando o consumo de energia elétrica. A unidade entrará automaticamente no modo de espera, quando nenhum dado for detectado na rede.

### 3.5.3 Kits para Prédios Residenciais ou Comerciais

Planejar e instalar uma estrutura eficiente de telecomunicações nem sempre é uma tarefa simples e, normalmente, é tratada à parte nos projetos de construção civil. O planejamento requer alocação de mão de obra e materiais, que demandam tempo e gastos com a compra dos equipamentos e insumos utilizados nas redes convencionais de telecomunicações.

A utilização da infraestrutura da rede elétrica para comunicações, em altas taxas, pode minimizar e até suprimir grande parte dos investimentos, garantindo redução da mão-de-obra e dos materiais necessários e, conseqüentemente, diminuindo o custo total dos projetos. Neste sentido, os fabricantes de equipamentos BPL já demonstram um avanço significativo no que diz respeito ao desenvolvimento de soluções tecnicamente competitivas e viáveis, do ponto de vista financeiro, para atender à crescente demanda pelos serviços de telecomunicações em grandes edifícios.

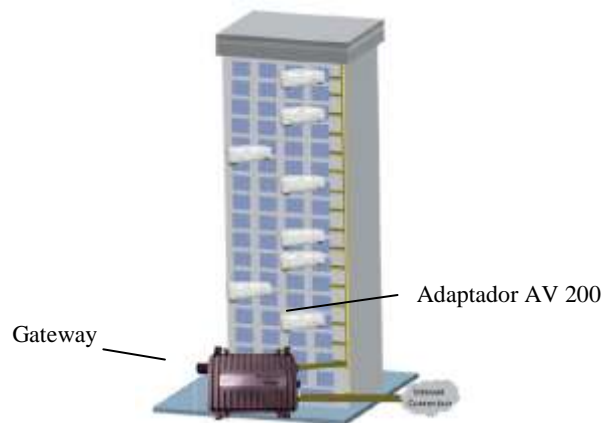
Os equipamentos, atualmente disponíveis no mercado, têm potencial de oferecer taxas superiores a 200 Mbps, que podem integrar o projeto elétrico de novas construções. Estes equipamentos podem, ainda, ser utilizados em construções já concluídas, que necessitem de uma rede de comunicação de dados de maior velocidade, ou para otimizar ou até mesmo substituir redes convencionais. Redes convencionais pré-existentes também podem ser otimizadas, no que diz respeito ao aumento da capacidade de comunicação ou obtenção de maior alcance, com pouco investimento adicional. Uma maior cobertura da rede de dados é possível de ser obtida porque os projetos elétricos prevêm a instalação de tomadas próximas umas das outras, mesmo em ambientes externos. São exemplos dessas construções: hotéis, universidades, hospitais, órgãos do governo, quartéis, prisões, etc.

De fato, o que se busca é uma solução que simplifique o projeto, minimize o esforço necessário para a instalação e que apresente altas taxas para o transporte das informações. A compatibilidade com a demanda dos serviços requeridos (dados, voz, TV por assinatura, vigilância e acesso à *internet*), torna a instalação de uma rede BPL interessante para solucionar a inexistência de uma infraestrutura de telecomunicações convencional e uma alternativa bastante atraente em termos de rapidez de instalação e menor custo.

A empresa canadense CORINEX fabrica *kits* para instalação em prédios residenciais ou comerciais podendo atender de 10 a 20 pontos de ligação com a *Internet*, através da rede de energia elétrica já instalada. Esta solução entrega o acesso em faixa larga a cada cômodo dos apartamentos. O *kit* elimina a necessidade de cabeamentos adicionais, pode ser instalado



rapidamente e a proteção é feita através de senhas. Pode ser instalado em pequenos escritórios, hotéis, blocos de apartamentos ou em algum ponto onde o acesso à *Internet* está sendo exigido e por um custo mais baixo, uma vez que utiliza a fiação existente dos estabelecimentos. Os usuários são adicionados à rede através de um adaptador ao Modem (AV200 - <http://www.corinex.com>) em uma tomada elétrica padrão, na posição desejada. Isso pode ser repetido de 10 a 20 estações de trabalho e não é necessário nenhum *software* a ser instalado. Estes dispositivos apresentam mobilidade e flexibilidade. Em caso de mudança do local da instalação basta desconectar os adaptadores e instalar em uma nova posição. A Figura 26 ilustra o *kit* para a instalação em prédios residenciais e comerciais e a descrição das características dos equipamentos utilizados.



**Figura 26** - Kit para instalação em prédios residenciais ou comerciais  
Fonte CORINEX

### 3.5.4 Experiências de sucesso no Brasil

O projeto OPERA participou da edição e da distribuição de um documentário, que mostra como a tecnologia pode ajudar e está realmente ajudando, não só na inclusão digital, mas também na oferta de novos serviços no Brasil. A experiência do OPERA no Brasil, conduzida pela CELG e em colaboração com a APTEL, já apresenta os resultados esperados. A tecnologia contribui para agregar valor aos serviços de telecomunicações para os cidadãos de localidades remotas e, também, aos moradores dos grandes centros urbanos. São exemplos dessas localidades: Barreirinhas (MA), Restinga (RS) e Goiânia (GO), conforme documentado no *link* <http://www.ist-opera.org/drupal2/?q=node/165>, produzido nas localidades mencionadas, comprovando o êxito e a total viabilidade da tecnologia na área de educação, telemedicina e inclusão digital.

## 4 CARACTERIZAÇÃO DO CANAL BPL

Para reduzir as distorções (atenuações e atrasos) introduzidas pelas redes elétricas, os sistemas BPL utilizam eficientes técnicas de modulação e transmissão com múltiplas portadoras. É usual afirmar que as redes elétricas não foram desenvolvidas para a transmissão de dados em alta velocidade e, portanto, não representam um meio adequado para este fim. Desta forma, o canal para transmissão BPL é um meio caracterizado por elevada atenuação, dependente da frequência, mudanças de impedância, desvanecimentos e ainda forte presença do ruído. Em geral, nos sistemas de transmissão de dados, os problemas gerados pelos ruídos podem ser corrigidos com os mecanismos de Correção de Erros - *Forward Error Correction* (FEC) e de Requisição Automática de Retransmissão - *Automatic Repeat Request* (ARQ). Entretanto, estas técnicas reduzem a capacidade da rede devido à redundância e à necessidade de retransmissão. Para melhorar a eficiência espectral, foram desenvolvidos pelo menos dois trabalhos com a finalidade de otimizar a largura de faixa disponível. (GÖTZ, RAPP, DOSTERT, 2004; RIBEIRO *et al.*, 2006).

### 4.1 FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA DO CANAL BPL

A rede de distribuição de energia elétrica difere, consideravelmente, dos meios convencionais de transmissão de dados. No que se refere, por exemplo, ao modelo do ruído aditivo, nos sistemas de transmissão convencionais, é comum se adotar a modelagem gaussiana com densidade espectral plana; em um canal BPL destaca-se, além da presença do ruído gaussiano, o ruído impulsivo. Considerado mais severo, o ruído impulsivo requer especial tratamento para comunicações em alta velocidade.

De acordo com a literatura disponível sobre o assunto, pode-se afirmar que ao se utilizar a rede elétrica para a transmissão de dados, deve-se lidar de forma apropriada com os seguintes problemas:

- atenuação do sinal em função do aumento da distância.
- atenuação em função do aumento da frequência.
- desvanecimento seletivo em frequência.
- variação da impedância de entrada da rede elétrica quando a frequência varia.
- comportamento ciclo-variante no tempo do canal.

O comprimento do cabo, o tipo do cabo e o número de derivações existentes entre dois pontos de comunicação caracterizam a função de transferência do canal. Para a modelagem de canais BPL, existem dois tipos de abordagem: a abordagem *bottom up* e a abordagem *top down* (ZIMMERMANN; DOSTERT, 1999).

**Bottom-up:** este modelo, restrito a frequências abaixo de 150 kHz, é descrito por matrizes de admitância e impedância do circuito. Essa modelagem requer conhecimento detalhado dos componentes da rede (cabos, junções e dispositivos conectados) e, também, a consideração de um número elevado de parâmetros para que se tenha uma precisão razoável. Na prática, para compor tais matrizes, é quase impossível determinar todos estes parâmetros, com precisão suficiente, para se obter um modelo que represente o canal em situações cotidianas. (THREIN, 1991; BARNES, 1998; KARL, 1997). Outro trabalho relevante, associado a esta abordagem, foi apresentado por (HOOIJEN, 1998), que descreve um modelo de atenuação e ruído baseado em medições, porém, como o anterior, limitado a frequências inferiores a 150 kHz.

**Top down:** neste caso, os canais BPL são descritos como “caixas pretas” e as características do canal são encontradas através da estimação da sua função de transferência. Essa modelagem resulta em uma representação muito mais simples e independente da topologia da rede elétrica. Consequentemente, é mais usada para redes externas, posto ser difícil caracterizar perfeitamente o canal BPL, usando a abordagem *bottom-up*. A abordagem *top down* será vista a seguir com mais detalhe sendo apresentado o modelo proposto para o canal, que tem sido utilizado nas pesquisas e simulações mais recentes.

Além do ruído impulsivo, os canais BPL se caracterizam por apresentarem o efeito do multipercorso devido às várias derivações presentes nas redes elétricas. As primeiras idéias sobre o modelo *top down* foram publicadas por (ZIMMERMANN; DOSTERT, 1999). Ainda em 1999, foi apresentado por (PHILIPPS, 1999) um modelo para a representação da resposta ao impulso do canal, através de N diferentes pulsos, representando a superposição de sinais de diferentes percursos. Cada um desses impulsos é caracterizado por uma amplitude de cada

componente do sinal  $\rho_i$  e um atraso  $\tau_i$  em cada percurso. No entanto, mostrou-se adequado somente para ambientes internos (*indoor*), onde a característica passa-baixa do canal não é relevante para pequenas distâncias. Os fatores de atraso  $\rho_i$  e  $\tau_i$  representam os efeitos provocados pela reflexão do sinal transmitido ao longo de cada percurso, na amplitude e fase do sinal. O modelo *indoor* da função de transferência do canal BPL é definido na equação (4.1),

$$H(f) = \sum_{i=1}^N \rho_i e^{-j2\pi f \tau_i} \quad (4.1)$$

Devido a esta limitação e à pouca precisão no que diz respeito ao multipercurso, este modelo foi adaptado para levar em conta a característica passa-baixa do canal, que se torna considerável para comprimentos de linha superiores a 300 m, comuns em ambientes externos (*outdoor*). Combinando a propagação multipercurso e a atenuação do sinal, crescente com o comprimento da linha e com o aumento da frequência o novo modelo, além de um fator de peso  $g_i$ , que representa a reflexão do sinal, complexo e dependente da frequência  $\varphi g_i(f)$ , considera, também, o comprimento da linha  $d_i$ . A atenuação é representada pelos parâmetros  $a_0$ ,  $a_1$  e por um expoente de atenuação  $k$ , obtidos através de medidas da função de transferência. A expressão (4.2) apresenta o modelo da função de transferência do canal BPL para ambiente *outdoor*,

$$H(f) = \sum_{i=1}^N |g_i(f)| e^{\varphi g_i(f)} e^{-(a_0 + a_1 f^k) d_i} e^{-j2\pi f \tau_i} \quad (4.2)$$

onde:

$$\tau_i = \frac{d_i \sqrt{\epsilon_r}}{c_0}$$

Os fatores que compõem o somatório representam: o fator de peso, atenuação e atraso devido ao multipercurso, respectivamente. Os parâmetros da equação 4.2 estão listados na tabela 4

As diversas de derivações presentes na topologia da rede são pontos de descasamento de impedância, uma vez que a carga ligada à rede é diferente da impedância característica da linha.

A consequência das reflexões na propagação do sinal de alta frequência nessas conexões é o aparecimento do multipercurso. Isso significa que o sinal na recepção é o somatório de diversas réplicas do sinal transmitido, ou seja, o sinal propaga-se por percursos múltiplos.

**Tabela 4** – Parâmetros da equação da função de transferência do canal BPL outdoor

$N$	Número total de caminhos de propagação.
$I$	Número de caminhos, onde o caminho com menor atraso tem índice $i = 1$ .
$a_0$ e $a_1$	Parâmetros de atenuação.
$K$	Expoente do fator de atenuação. (os valores típicos estão entre 0,5 e 1).
$g_i$	Fator peso para o percurso $i$ , em geral complexo, pode ser considerado como uma combinação dos fatores de transmissão e reflexão envolvidos.
$d_i$	Comprimento do percurso $i$ .
$\tau_i$	Atraso do percurso $i$ .
$\epsilon_r$	Constante dielétrica do cabo.
$c_0$	Velocidade da luz.
$\varphi g_i(f)$	Termo que representa o sinal complexo e dependente da frequência

Como os pontos de reflexão podem assumir valores complexos e dependentes da frequência,  $g_i$  também é complexo e dependente da frequência. Extensas medidas indicaram que, de fato,  $g_i$  pode ser complexo, porém independente da frequência. Em muitas situações práticas, os percursos apresentaram o mesmo atraso o que indica que, nestes casos, não é necessário trabalhar com grandezas complexas. Após inúmeras constatações práticas verificadas por (ZIMMERMANN; DOSTERT, 2002), a expressão foi re-escrita de forma simplificada.

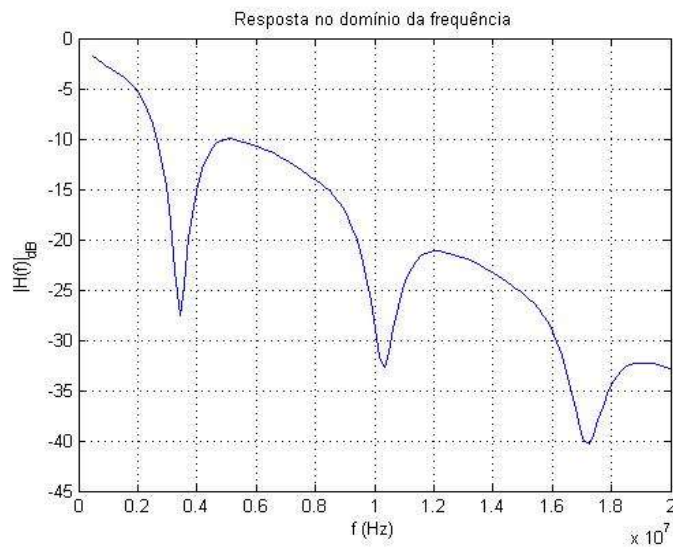
$$H(f) = \sum_{i=1}^N g_i e^{-(a_0 + a_1 f^k) d_i} e^{-j2\pi f \frac{d_i}{v_p}} \quad (4.3)$$

Esta equação representa o modelo simplificado, que vem sendo utilizado para descrever a função de transferência do canal BPL. O fator de peso  $g_i$  define o produto entre transmissão e reflexão do sinal ao longo do caminho  $i$ ; a primeira exponencial corresponde à atenuação típica em uma linha BPL, que se observa com o aumento da frequência e com o aumento do comprimento do cabo. Esta atenuação é caracterizada pelos parâmetros  $a_0$  e  $a_1$  e pelo expoente  $k$ , este último um fator de atenuação entre 0,5 e 1; a segunda exponencial refere-se ao atraso ocasionado pelo cenário multipercurso, para um determinado número de percursos  $N$ , considerando, agora, o comprimento  $d$  da linha no caminho  $i$ ,  $d_i$ , e a velocidade de propagação,  $v_p$ .

A Tabela 5 relaciona os parâmetros utilizados para o modelo apresentado através da equação 4.3. As figuras 27 e 28 ilustram o módulo da função de transferência e a resposta ao impulso, obtidas a partir da equação 4.3, e considerando os parâmetros da Tabela 5 para a faixa de frequência de 0,5 MHz a 20 MHz.

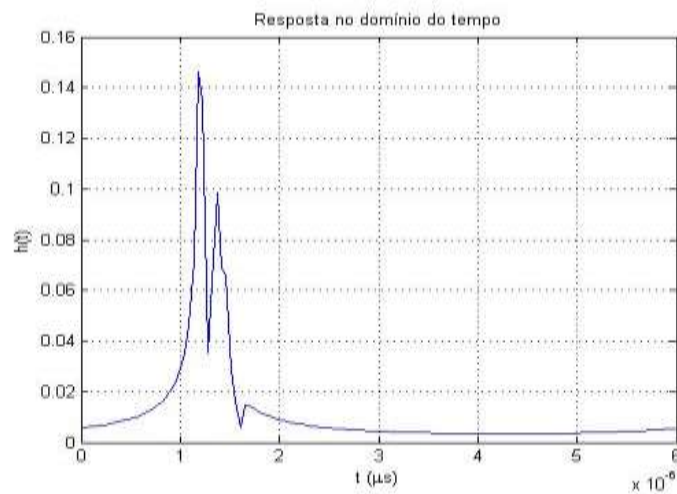
**Tabela 5** – Parâmetros utilizados para a função de transferência

$I$	$g_i$	$d_i(m)$
1	0,64	200.0
2	0,38	222.4
3	-0,15	244.8
4	0,05	267.2
$k = 1$	$a_0 = 0$	$a_1 = 7,8 \times 10^{-10}$



**Figura 27** - Módulo da resposta de um canal BPL no domínio da frequência

Fonte: Zimmermann e Dostert (2002)



**Figura 28** - Resposta ao impulso de canal BPL

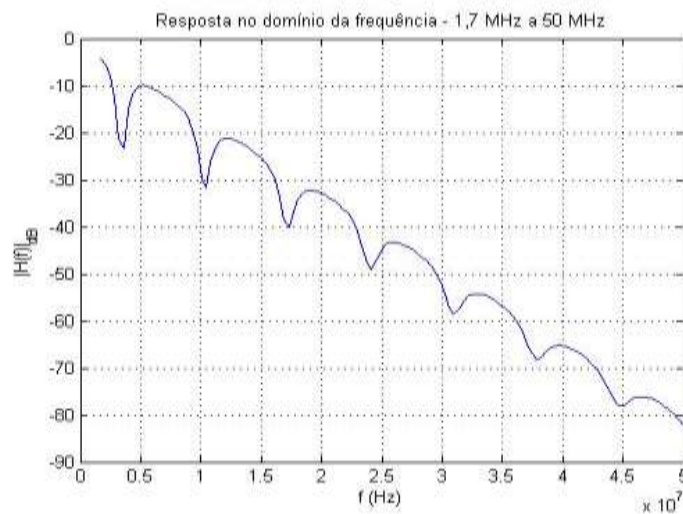
Fonte: Zimmermann e Dostert (2002)

Conforme mostrado na figura 27, o canal BPL possui a característica de ser seletivo em frequência; isto se deve ao fenômeno do multipercurso, verificado nas redes de distribuição de energia elétrica, o qual é produzido pelas diversas derivações. Devido às características hostis do canal BPL (multipercurso, seletividade em frequência e ruído impulsivo), é necessária a aplicação de esquemas de modulação e técnicas de transmissão eficientes, o que contribui para combater a presença de ruídos impulsivos.

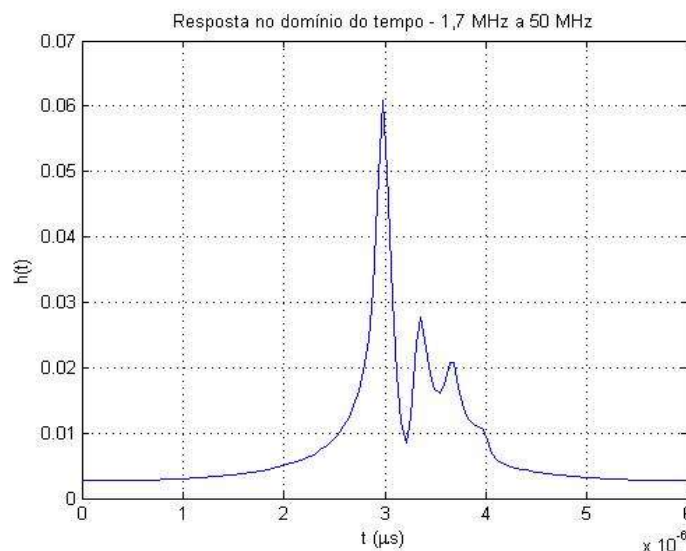
A atenuação nos condutores de uma rede de baixa tensão apresenta características, que dependem da topologia da rede, das cargas conectadas, da distância entre o transmissor e o

receptor e da faixa de frequência utilizada no enlace. Portanto, conforme será demonstrado a seguir, atenuação é maior em faixas mais largas de frequência para a transmissão do sinal.

Considerando a faixa de frequências estabelecida pela ANATEL, serão apresentadas as mesmas figuras exibidas anteriormente (Figuras 27 e 28), para a faixa de frequência compreendida entre 1,7 MHz a 50 MHz, regulamentada pela ANATEL através da Resolução 527 de 08 de Abril de 2009. Estas representações estão evidenciadas na Figuras 29 e 30.



**Figura 29** - Módulo da resposta de um canal BPL no domínio da frequência - 1,7 MHz a 50 MHz

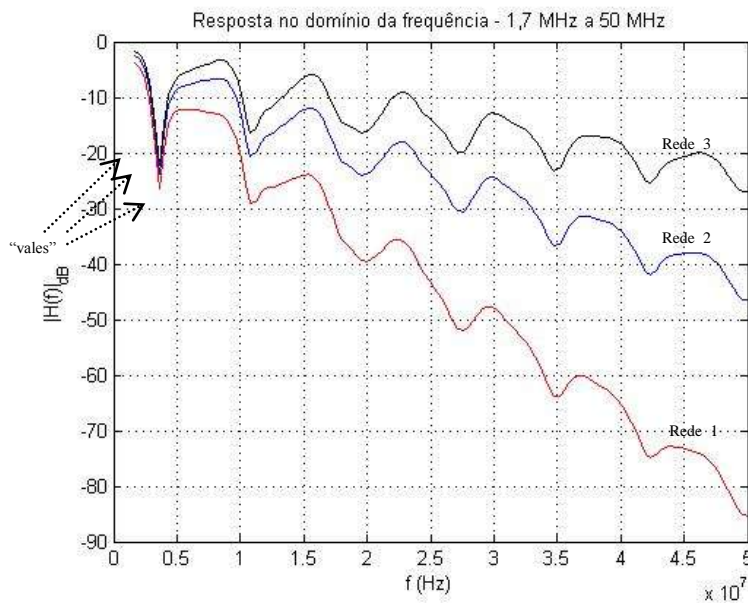


**Figura 30** - Módulo da resposta de um canal BPL - 1,7MHz a 50 MHz

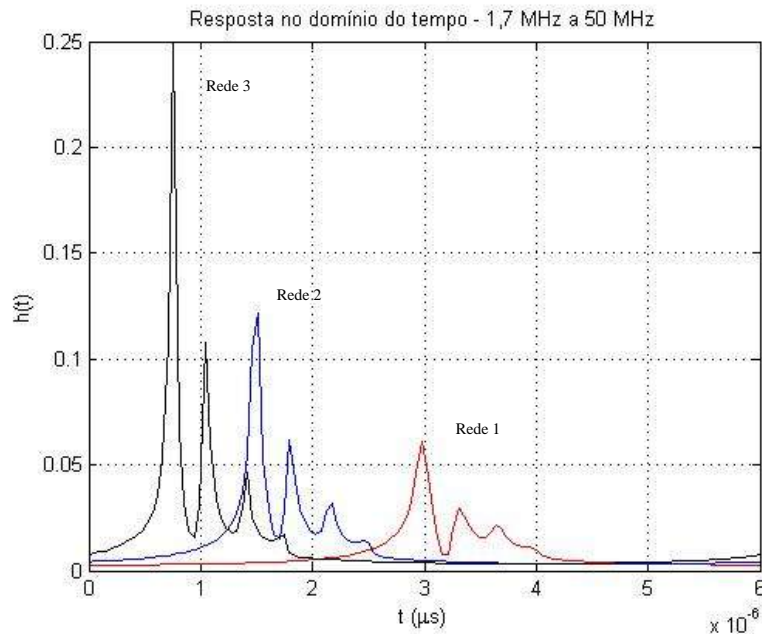
Algumas pesquisas demonstraram que canais BPL *outdoor* que a faixa de frequências mais adequada vai de 1 a 10 MHz. Por outro lado, canais BPL *indoor* podem ocupar a faixa



de frequências que vai de 10 a 30 MHz (LANGFELD, 2001; LIU, WIDMER, RAFFIN, 2003). Isto pode ser demonstrado quando se considera redes BPL com distâncias de percursos diferentes, de forma a caracterizar os dois tipos de ambientes. As figuras 31 e 32 confirmam estas pesquisas, ao exibirem curvas com perfis de atenuação coerentes com as distâncias aceitas como *indoor* ou *outdoor*, levando em conta os multipercursos criados nas derivações apresentadas pelas redes elétricas. Na Figura 31, as redes 2 e 3 representam um ambiente *indoor* (extensões abaixo de 200 m), enquanto que a rede 1 corresponde a um ambiente *outdoor* (extensões acima de 200 m). Pode-se verificar que as redes 2 e 3 apresentam resultados aceitáveis em sistemas de telecomunicações para a faixa de frequências de 10 a 30 MHz. O mesmo acontece na rede 1 que opera na faixa de frequências considerada como *outdoor* (de 1 a 10 MHz). Confirma-se, desta forma, resultados obtidos em trabalhos anteriores.



**Figura 31** - Resposta no domínio da frequência para três canais BPL diferentes



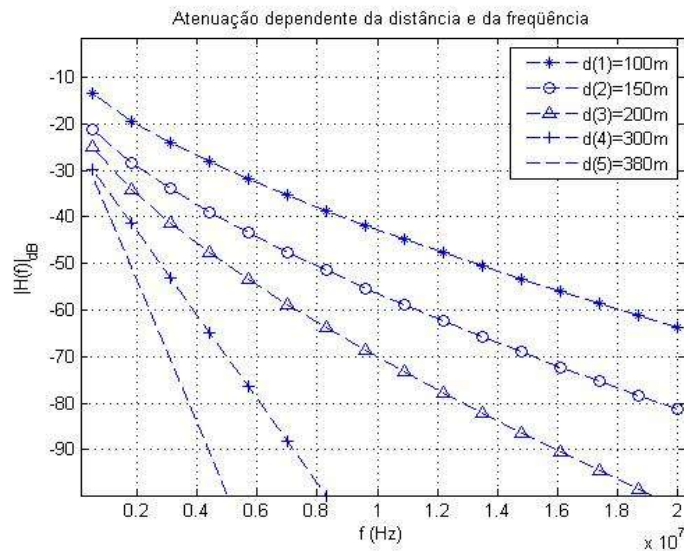
**Figura 32** - Resposta no domínio do tempo para três canais BPL diferentes

Os “vales” coincidentes observados em frequências semelhantes nas três redes ocorrem porque as diferenças nas derivações, consideradas nos quatro percursos ( $i$ ) percorridos pelo sinal até o receptor, para a construção da figura, são as mesmas (20 m), conforme visto na Tabela 6. Por exemplo, próximo a 5 MHz, um pouco depois de 10 MHz e em 20 MHz são observados “vales” praticamente nos mesmos pontos das curvas. Vale também ressaltar que a curva que apresenta maior atenuação (Rede 1) é a rede na qual as distâncias são maiores (ver Tabela 6). O problema se torna crucial à medida que as distâncias aumentam, conforme demonstrado na Figura 33.

**Tabela 6** – Parâmetros utilizados para a função de transferência de três redes representadas pelas Figuras 31 e 32

Parâmetros gerais		Rede 1	Rede 2	Rede 3
$k = 1; a_0 = 0; a_1 = 7,8 \times 10^{-10}$				
$I$	$g_i$	$d_i(m)$	$d_i(m)$	$d_i(m)$
1	0,64	200	100	50
2	0,38	220	120	70
3	-0,15	244	144	94
4	0,05	267	167	117

A dependência da distância e da frequência na atenuação de um sinal transmitido por canais BPL nas redes de energia elétrica, apresentada em (ZIMMERMANN; DOSTERT, 2002), é mostrada na Figura 33. Nesta figura, o perfil de atenuação é função dos parâmetros básicos do canal. Destacam-se cinco situações diferenciadas pelas distâncias de 100 m, 150m, 200 m, 300 m e 380 m, resultando em grupos de funções de atenuação com características diferentes entre si, o que demonstra a forte dependência da atenuação com a distância. Esta figura também demonstra o aumento da atenuação com a frequência.



**Figura 33** - Atenuação dependente da distância e da frequência  
Fonte: Zimmermann E Dostert (2002).

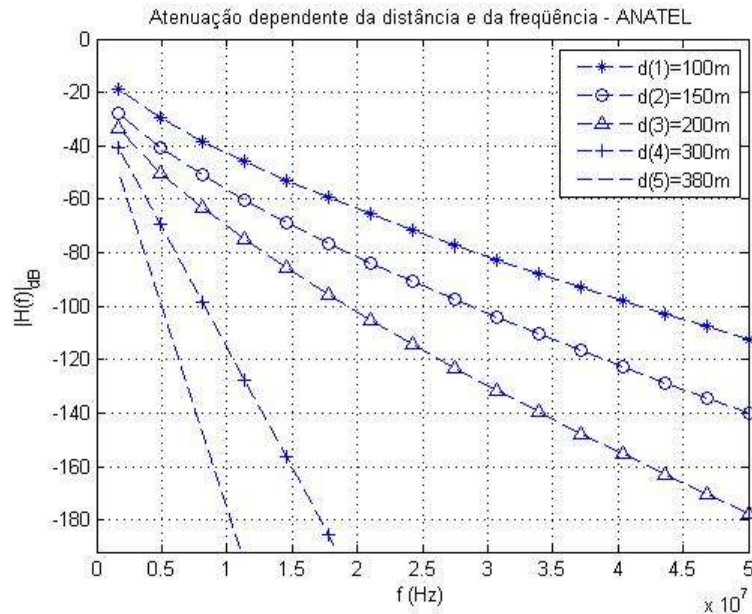
Na elaboração da Figura 33 foram considerados os parâmetros listados na tabela 7.

**Tabela 7** – Parâmetros utilizados para caracterizar a atenuação dependente da frequência e da distância

$d_i$ (m)	$g_1$	$a_0$ ( $m^{-1}$ )	$A_1$ (s/m)	$K$
100	1	$9,4 \times 10^{-3}$	$4,20 \times 10^{-7}$	0,7
150	1	$10,9 \times 10^{-3}$	$3,36 \times 10^{-7}$	0,7
200	1	$9,33 \times 10^{-3}$	$3,24 \times 10^{-7}$	0,7
300	1	$8,40 \times 10^{-3}$	$3,00 \times 10^{-9}$	1
380	1	$6,20 \times 10^{-3}$	$4,00 \times 10^{-9}$	1

Fonte: Zimmermann e Dostert (2002)

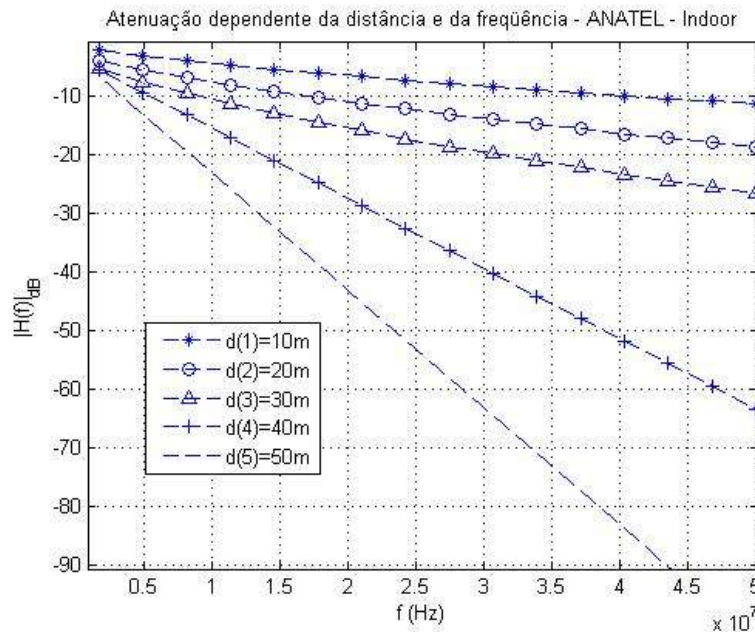
A Figura 34 foi reproduzida para a faixa de frequências de 1,7 a 50 MHz, regulamentada pela ANATEL, conforme Resolução 527 de 08 de Abril de 2009.



**Figura 34** - Atenuação dependente da distância e da frequência para a faixa de frequências regulamentada pela ANATEL – ambientes *outdoor*

De fato, o mesmo comportamento mostrado na figura 33 foi observado, isto é, na medida em que a frequência aumenta a atenuação vai se tornando mais severa. Cabe ressaltar que os mesmos parâmetros da figura 33 foram considerados, porém para a faixa de frequência regulamentada pela ANATEL.

Quando os mesmos parâmetros da Tabela 7 foram utilizados para distâncias bem menores, caracterizando ambientes *indoor*, como era de se esperar, houve uma expressiva melhora, mesmo para frequências um pouco mais elevadas, conforme mostrado na Figura 35.



**Figura 35** - Atenuação dependente da distância e da frequência para distâncias típicas de ambientes indoor

Os canais BPL podem ser caracterizados como um meio termo entre um canal tradicional de telefonia fixa e um canal de comunicações sem fio. Os mesmos apresentam desvanecimento seletivo em frequência e severa atenuação do sinal em função do aumento da distância e da frequência. Adicionalmente, observa-se a presença de ruídos com níveis de potência elevados e com intervalos suficientes para corromper rajadas de dados transmitidos.

A escolha do esquema de modulação, o tipo de técnica de equalização a ser empregada e a transmissão em portadora única ou em múltiplas portadoras são temas que vão se definindo para a viabilização comercial mais competitiva da tecnologia BPL. Os resultados das pesquisas têm revelado a tendência para a transmissão em múltiplas portadoras e modulação adaptativa. Atualmente, os estudos estão concentrados para determinar um algoritmo que otimize a largura de faixa disponível, quando aplicadas técnicas de codificação do canal, de forma a obter maior eficiência em termos de taxa de transmissão.

Vários projetos pilotos, realizados no Brasil, indicam a viabilidade técnica de se utilizar a rede de energia elétrica para a transmissão de dados em altas taxas. As características adversas das linhas de baixa tensão, severamente atingidas por ruídos impulsivos, têm sido superadas através da escolha criteriosa das técnicas de transmissão e esquemas de modulação. As pesquisas estão sendo intensificadas para a determinação de um algoritmo que possibilite um combate mais eficaz do ruído impulsivo.

No que se refere à equalização do canal, o uso de equalizadores do tipo DFE - *Decision Feedback Equalizer* foi inicialmente adotado, no entanto, a utilização de muitos pilotos para a recuperação da mensagem distorcida pelo canal afeta a capacidade de transmissão do canal. O esquema de modulação aplicado também tem a sua influência na taxa de transmissão. Isto significa que a escolha do esquema de modulação e o desenvolvimento de novos algoritmos de baixa complexidade para a equalização do canal é de fundamental importância para tornar o canal BPL competitivo com as outras tecnologias. Esquemas de modulação QAM têm sido utilizados, no entanto, a melhor alternativa pode ser um esquema de modulação adaptativo, controlando a BER (*Bit Error Rate* – Taxa de Erros de Bits).

Técnicas de transmissão em portadora única demonstraram não ser a alternativa mais viável, devido à alta probabilidade de interferência entre símbolos – IES. Por outro lado, a transmissão adotada, que envolve o uso de diversas subportadoras, é a OFDM - *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*, que vem sendo utilizada nos meios acadêmicos e entre os fabricantes. Esta técnica de transmissão tem sido a alternativa mais favorável para a transmissão de dados sobre o canal BPL, uma vez que apenas uma pequena porcentagem de subportadoras é atingida pelo efeito de seletividade em frequência do canal; códigos de correção de erro estão sendo utilizados para otimizar a transmissão dos dados nas subportadoras atingidas.

#### 4.2 CLASSES DE RUÍDOS PRESENTES NO CANAL BPL

É importante realçar que o ruído nas redes de transmissão e distribuição de energia elétrica, ao contrário do que acontece em outros canais de comunicação, não pode ser modelado por um modelo de ruído branco (DOSTERT, 2001). Na faixa espectral onde a utilização do canal 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. Este ruído responde pela significativa variação temporal do canal.

As fontes de ruído incluem aparelhos eletrônicos, eletromecânicos e motores a escova, que são particularmente ruidosos. *Dimmers*, lâmpadas fluorescentes e halogênios criam ruídos impulsivos relacionados ao ciclo de 60 Hz. Fontes de energia criam harmônicas relacionadas com a comutação de frequência. Além destas perturbações, há as interferências por Rádio Frequência (RF), como ondas curtas e radioamadores. O receptor de RF de outras faixas pode ser afetado visto que os sistemas BPL podem causar radiações indesejadas em outras faixas de

frequências utilizadas em radiocomunicações. Estas emissões irradiadas interferem na recepção dos sinais.

As principais interferências presentes em um canal BPL, na faixa de 100 kHz a 30 MHz, são consideradas em (DOSTERT, 2001; ZIMMERMANN, DOSTERT, 2002a), onde a descrição do ruído nas redes elétricas é dada por:

$$N(t) = N_{bkgr}(t) + N_{nb}(t) + N_{pa}(t) + N_{ps}(t) + N_{imp}(t),$$

(4.4)

onde:

$N_{bkgr}(t)$  é o ruído colorido de fundo

$N_{nb}(t)$  é o ruído em banda estreita

$N_{pa}(t)$  é o ruído impulsivo periódico e assíncrono com a componente fundamental

$N_{ps}(t)$  é o ruído impulsivo periódico síncrono com a componente fundamental,

$N_{imp}(t)$  é o ruído o impulsivo assíncrono, sendo este o mais severo.

Desta forma, com base em (ZIMMERMANN; DOSTERT, 2002) serão descritas a seguir as cinco classes de ruído, que atingem o canal BPL e suas principais fontes.

#### 4.2.1 Ruído colorido de fundo

É o resultado da sobreposição de componentes de ruído de baixa potência provenientes de diversas fontes, como por exemplo, diversos aparelhos e eletrodomésticos, utilizados em residências e escritórios, tais como secadores de cabelo, *dimmers* e computadores. A densidade espectral de potência (PSD) deste ruído é relativamente plana, decrescendo com o aumento da frequência. Estudos realizados mostram que a PSD do ruído colorido de fundo varia muito lentamente, quando comparada às taxas de alguns kbps. Permanece, durante o dia, muito próxima de um valor médio por intervalos de vários segundos e até mesmo alguns minutos. Este estado estacionário pode perdurar por até algumas horas durante a noite.

#### **4.2.2 Ruído de faixa estreita**

Consiste principalmente de sinais com modulação em amplitude. É causado, basicamente, pela entrada de estações de transmissão operando nas faixas de ondas médias e curtas. Os níveis variam com a hora do dia.

#### **4.2.3 Ruído impulsivo periódico - assíncrono com a frequência da rede**

Causado por transientes na rede, esse tipo de ruído apresenta curta duração (10-100  $\mu$ s) podendo alcançar picos de até 2 V, ocorrendo de forma aleatória. Devido a esses altos valores, a PSD pode atingir níveis consideráveis, bem acima da PSD do ruído de fundo.

#### **4.2.4 Ruído impulsivo periódico – síncrono com a frequência da rede**

Apresenta-se nas frequências de 60 ou 120 Hz, sincronizado com a frequência da componente fundamental da rede elétrica. Assim sendo, pode-se afirmar que o mesmo é um ruído ciclo-estacionário, ou seja, não se propaga pela rede visto que, esta componente de ruído impulsivo tem, em geral, uma curta duração (alguns microssegundos) e densidade espectral de potência decrescente com a frequência. São causados por fontes de alimentação DC, devido à comutação de diodos retificadores operando de forma síncrona com a rede. Em geral, as repetições ocorrem em múltiplo da frequência da rede (60 Hz).

#### **4.2.5 Ruído impulsivo assíncrono**

O ruído impulsivo é caracterizado por um pulso de forma aleatória, cuja amplitude é muito maior que a do ruído de fundo. Geralmente, aparelhos externos conectados à rede são os responsáveis por esses ruídos impulsivos. Motores elétricos e chaves de manobras são alguns dos mais comuns geradores de ruídos impulsivos.

As propriedades dos ruídos caracterizados em 4.2.1, 4.2.2 e 4.2.3, permanecem estacionárias em intervalos de alguns segundos ou minutos e, algumas vezes, durante horas. Devido a este comportamento podem ser considerados como ruídos de fundo – caracterizados por sua lenta variação e uma PSD com valores moderados. Contudo, as características dos dois últimos tipos de ruídos, caracterizados em 4.2.4 e 4.2.5, variam em termos de micro ou



milissegundos e durante a ocorrência de tais eventos, a PSD do ruído presente na rede pode aumentar, consideravelmente, causando erros na transmissão de dados.

#### 4.3 PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DOS RUÍDOS PRESENTES EM UM CANAL BPL

A seguir, será apresentado um resumo com a classificação dos ruídos. Esta classificação determinada pelo ruído de fundo e pelo ruído impulsivo caracteriza o ruído em um canal BPL.

##### 4.3.1 Ruído de fundo

- Ruído Colorido

Baixa PSD

Variante no tempo e na frequência

Gerado por fontes de baixa potência

- Ruído Faixa Estreita

Variante no tempo

Provocado por radiofrequência

##### 4.3.2 Ruído impulsivo

- Ruído Impulsivo Periódico Assíncrono com a Frequência da Rede

Taxa de repetição entre 60 e 240 kHz

Gerado por fontes chaveadas

- Ruído Impulsivo Periódico Síncrono com a Frequência da Rede

Densidade espectral de potência decrescente com a frequência

Duração da ordem de  $\mu s$

Repete a taxas múltiplas de 60 Hz

Provocado por sistemas eletrônicos de potência

- Ruído Impulsivo Assíncrono e não Periódico

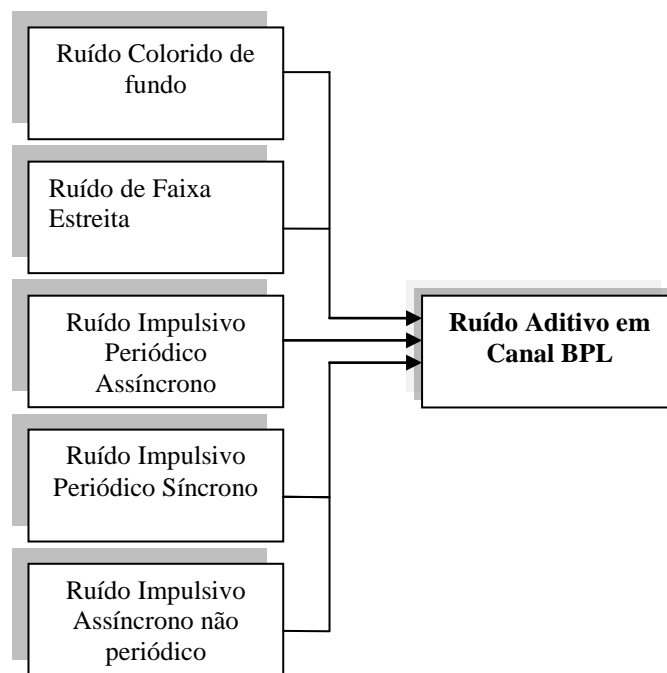
PSD pode alcançar os 50 dB acima do ruído colorido

Natureza aleatória

Duração entre  $\mu s$  e  $ms$

Causado por transientes de chaveamentos na rede

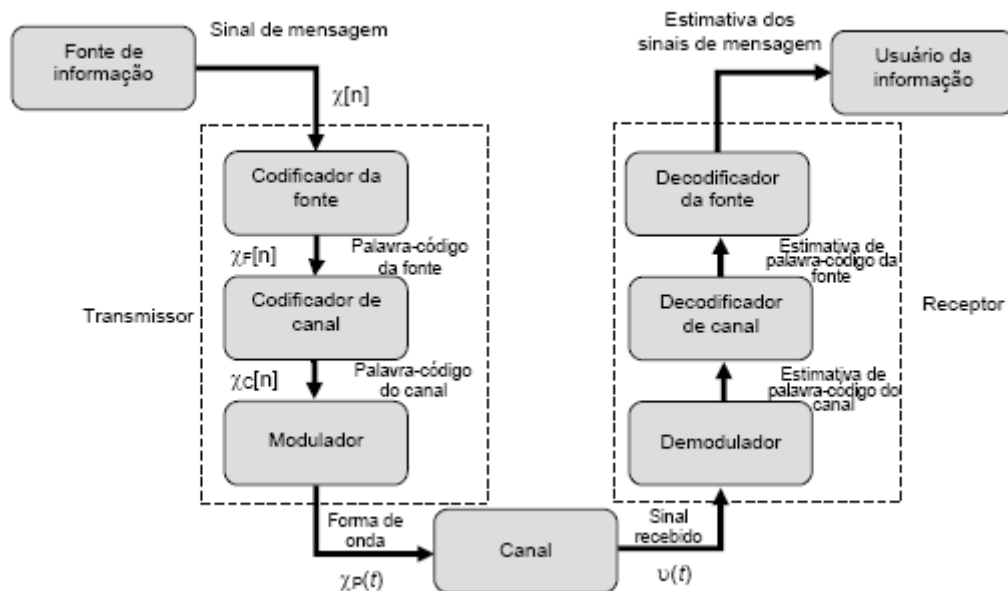
A Figura 36 ilustra os tipos de ruídos presentes em um canal BPL:



**Figura 36** – Ruídos presentes em um canal BPL

#### 4.4 TÉCNICAS DE MODULAÇÃO UTILIZADAS EM SISTEMAS BPL

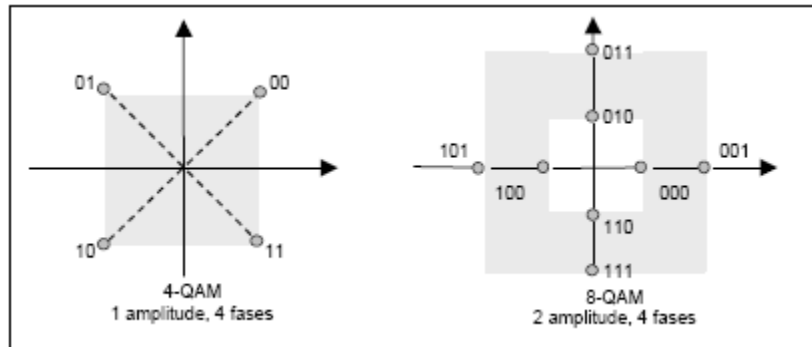
Para atender a demanda crescente dos serviços que requerem faixa larga, torna-se necessário o uso de sistemas de comunicações digitais de alto desempenho. Um sistema de comunicação digital, em seu modelo discreto, pode ser representado pelo diagrama em blocos da Figura 37 (HAYKIN, 2004). Para análise desta configuração, pode-se admitir a transmissão de um sinal de informação ou mensagem desde a fonte de informação até o usuário da informação.



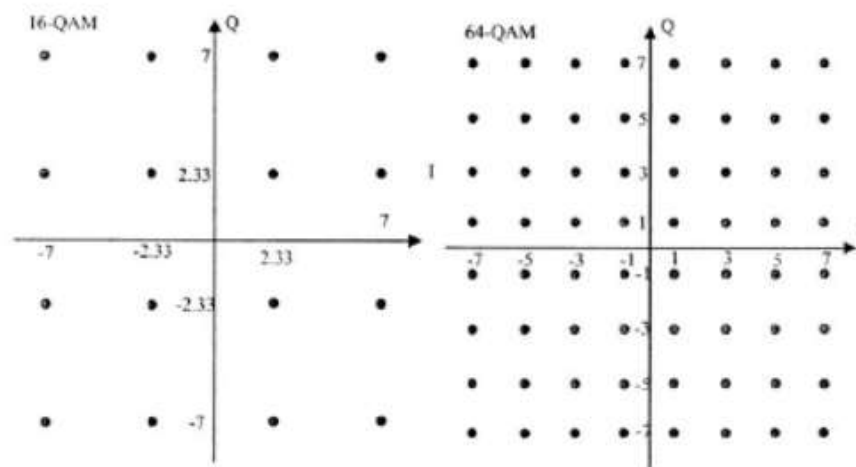
**Figura 37** - Diagrama simplificado em blocos de um sistema de comunicação digital

##### 4.4.1 Modulação QAM

No contexto de conversão de dados (ou sinais), as técnicas de modulação AM, FM e PM são denominadas, respectivamente, chaveamento com desvio de amplitude (ASK), chaveamento com desvio de frequência (FSK) e chaveamento com desvio de fase (PSK). A técnica QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*) é uma combinação das técnicas ASK e PSK, elaborada de maneira a aumentar o número de bits transmitidos por dimensão (*bit, dibit, tritbit, etc.*). Nas Figuras 38 e 39 é possível observar as constelações 4-QAM, 8-QAM, 16-QAM e 64-QAM, em que um número qualquer de amplitudes pode ser combinado com determinada quantidade de variações na fase.



**Figura 38** - Constelação 4 QAM e 8 QAM



**Figura 39** - Constelação 16 QAM e 64 QAM

Pode-se notar que no esquema 16-QAM é alcançada uma taxa de transmissão menor do que no modo 64-QAM, uma vez que cada símbolo transporta um número menor de bits. No entanto, no modo 16-QAM, a distância euclidiana entre os símbolos é maior do que no caso do modo 64-QAM. Isto permite que o modo 16-QAM possibilite uma melhor qualidade de serviço (QoS), pois a maior distância entre os símbolos dificulta erros de interpretação no receptor quando este detecta um símbolo. Assim, o desafio é encontrar um ponto de equilíbrio entre a taxa de erro de bits e a taxa de transmissão, que atenda às demandas mais exigentes em termos de comunicação multimídia.

#### 4.5 TÉCNICA DE TRANSMISSÃO OFDM

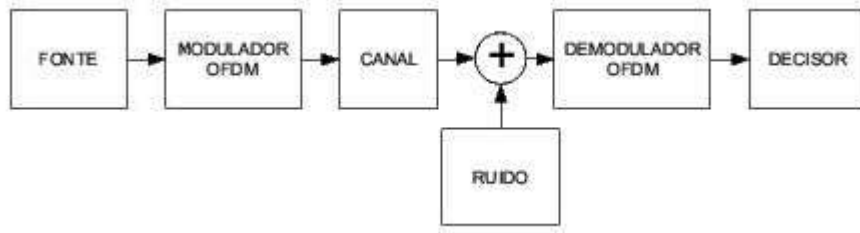
A técnica OFDM é o padrão de transmissão das tecnologias DAB (*Digital Audio Broadcasting*), DVB (*Digital Video Broadcasting*), W-LAN (*Wireless Local Area Network*) e ADSL (*Asymmetric Digital Subscriber Line*), estando fortemente cotada a fazer parte do padrão de comunicações móveis da 4ª geração. Esta tecnologia está sendo, também, utilizada em sistemas BPL. Na transmissão OFDM, a idéia chave é a partição do canal em um conjunto de subcanais, onde cada um possui função de transferência plana. Os dados são transmitidos em paralelo através dos subcanais e, em condições ideais, mantêm-se independente dos demais devido à ortogonalidade entre as subportadoras. Um sinal OFDM constituído de  $M$  subportadoras senoidais terá o seguinte espaçamento entre as portadoras:

$$\Delta f = \frac{1}{MT} = \frac{1}{T_s}, \quad (4.4)$$

onde  $T$  é o intervalo de amostragem e  $T_s$  é o intervalo de um símbolo.

Conforme comentado acima, a divisão em subportadoras combate os efeitos da seletividade em frequência provocados por descasamentos de impedâncias de naturezas diversas na rede elétrica. É realizada de forma que o tempo de um determinado símbolo, a ser transmitido em cada subseqüência, seja maior que o espalhamento multipercurso do canal BPL. Isso aumenta o desempenho do sistema multiportadora diante da interferência entre símbolos consecutivos, se comparado com o procedimento convencional de modulação portadora única.

Variações de impedância e atenuação, provocadas por frequentes chaveamentos de equipamentos elétricos na rede, variação temporal de inúmeras fontes de ruído de natureza impulsiva e a propagação de sinal por múltiplos percursos degradam, consideravelmente, o desempenho do sistema de comunicações. Por isso, interligar residências, centros de ensino e pesquisa, escritórios, empresas e organizações, através da rede elétrica para troca de informações a elevadas taxas de transmissão, significa empregar sistemas de comunicações robustos e espectralmente eficientes. A Figura 40 apresenta o diagrama em blocos simplificado de um sistema de comunicações OFDM.

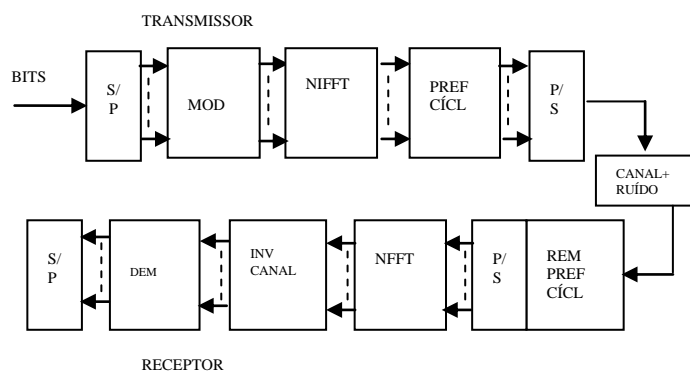


**Figura 40** - Diagrama em blocos simplificado de um sistema de comunicações **OFDM**.

O desvanecimento seletivo em frequência, presente no canal BPL demandaria esquemas complexos de equalização no sistema de transmissão. Desta forma, para minimizar a complexidade computacional do sistema de comunicações, é importante utilizar técnicas de transmissão com múltiplas portadoras que combatem o desvanecimento seletivo em frequência e torna o processo de equalização simples ou até mesmo desnecessário, além de eliminar a interferência entre símbolos e permitir o uso eficiente da faixa de frequência disponível.

#### 4.5.1 Descrição do cenário das simulações

A Figura 41 reúne os principais componentes do sistema de transmissão/recepção, utilizado nas simulações deste trabalho, e a descrição da funcionalidade de cada bloco.



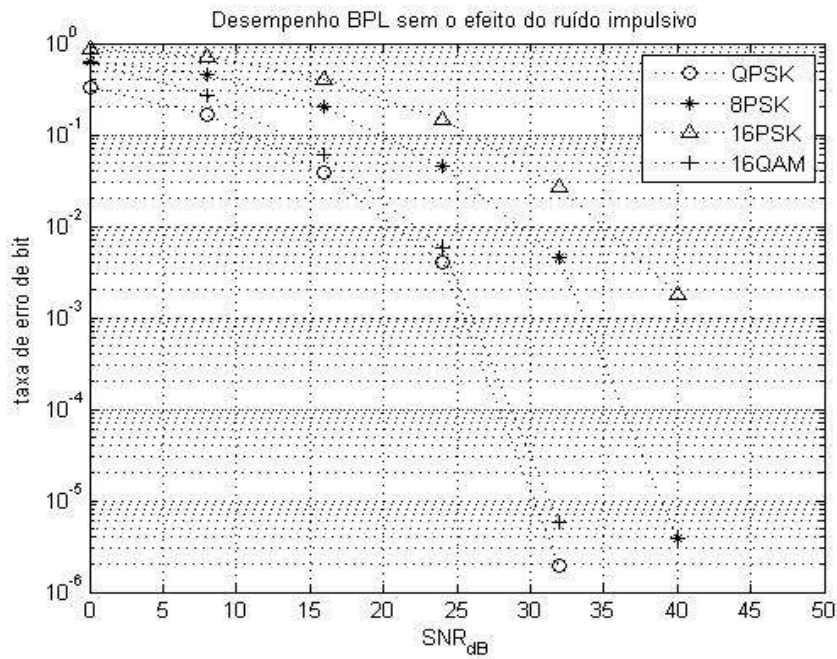
**Figura 41** - Diagrama em blocos do Sistema de Comunicações

- S/P: realiza a conversão de uma seqüência binária serial para uma seqüência binária em paralelo.
- Modulação: Aplica os esquemas de modulação QPSK, 8PSK 16PSK e 16QAM.

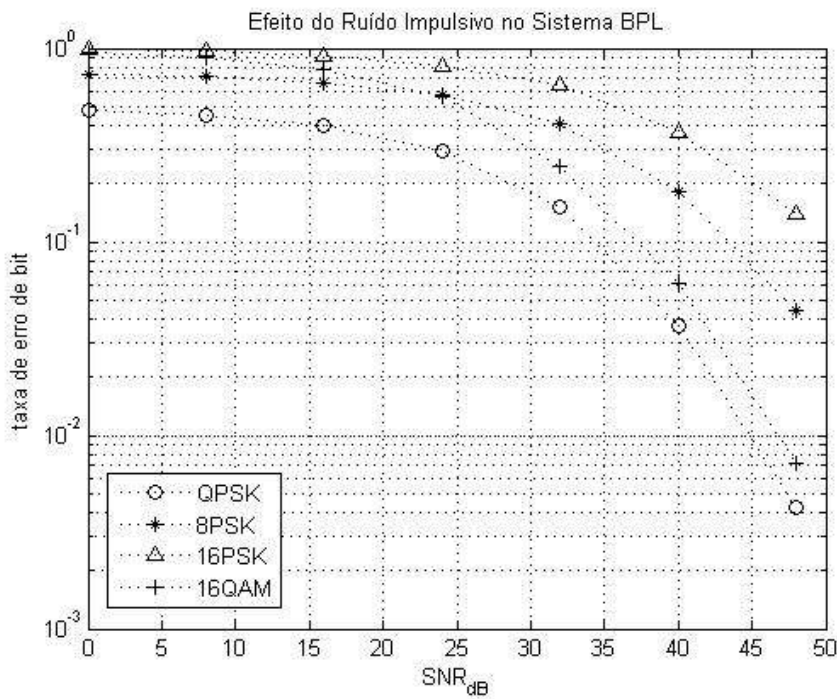
- c. N-IFFT: Aplica a inversa da transformada rápida de Fourier à seqüência.
- d. Prefixo Cíclico: Técnica para inserção de amostras antes do símbolo OFDM, o que reduz a interferência entre símbolos.
- e. P/S: Converte para serial as amostras do símbolo OFDM para a transmissão no canal BPL.
- f. Canal: Representa o canal de comunicação BPL acrescido do ruído.
- g. Remove Prefixo Cíclico: Faz a remoção das amostras inseridas no transmissor.
- h. N-FFT: Aplica a transformada rápida de Fourier ao sinal OFDM obtido após a extração do prefixo cíclico.
- i. Inverte Canal: Aplica a equalização no domínio da frequência.
- j. Demodulador: decodifica a seqüência.

#### 4.5.1.1 Esquema de Modulação

Foi realizada uma simulação visando identificar o melhor esquema de modulação a ser utilizado em uma situação, a mais próxima possível do ambiente real. Foram aplicados na técnica OFDM com 256 subportadoras os esquemas de modulação QPSK, 8PSK, 16PSK e 16QAM e considerada uma largura de faixa de 10 MHz, para viabilizar o desempenho do sistema em termos de BER. Inicialmente, foram comparados os resultados relativos ao desempenho do sistema na presença unicamente do ruído AWGN. O resultado deste procedimento está ilustrado na Figura 42. O passo seguinte foi acrescentar o ruído impulsivo com um nível de 20 dB acima do ruído AWGN (ver Figura 43). Pelas simulações realizadas, é possível observar que os esquemas QPSK e 16QAM são os que apresentam melhor desempenho em termos de taxa de erros de bits. Cabe salientar que apesar de tal resultado, o esquema QPSK não se mostra competitivo em termos de taxa de transmissão, visto que nesse esquema de modulação a taxa de dados cai pela metade. As figuras 42 e 43 foram obtidas utilizando-se a técnica de transmissão OFDM descrita no próximo parágrafo.



**Figura 42** - Desempenho do sistema BPL sem o efeito do ruído impulsivo



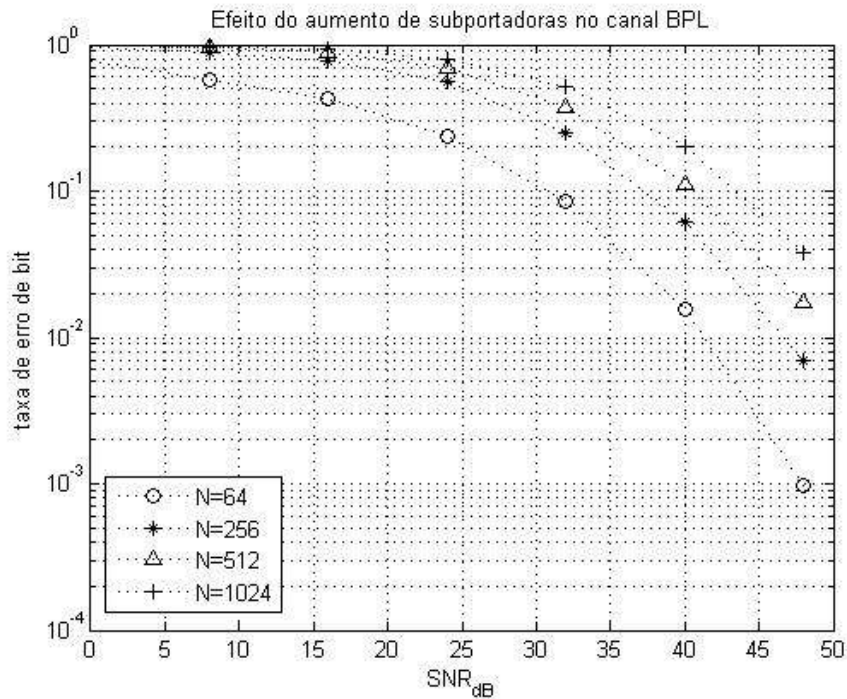
**Figura 43** - Desempenho do sistema BPL com o efeito do ruído impulsivo



#### 4.5.1.2 Número de Subportadoras

A seguir, foi investigado o desempenho do sistema BPL, fixando-se o esquema de modulação 16-QAM e variando-se o número de subportadoras. O resultado desta simulação é mostrado na Figura 44. Fica visível que o aumento do número de subportadoras degrada o desempenho do sistema, o que se justifica pelo aumento da duração do símbolo e sua suscetibilidade ao ruído impulsivo. Entretanto, deve-se considerar que não foi aplicada nenhuma técnica de codificação de canal para melhoria do desempenho.

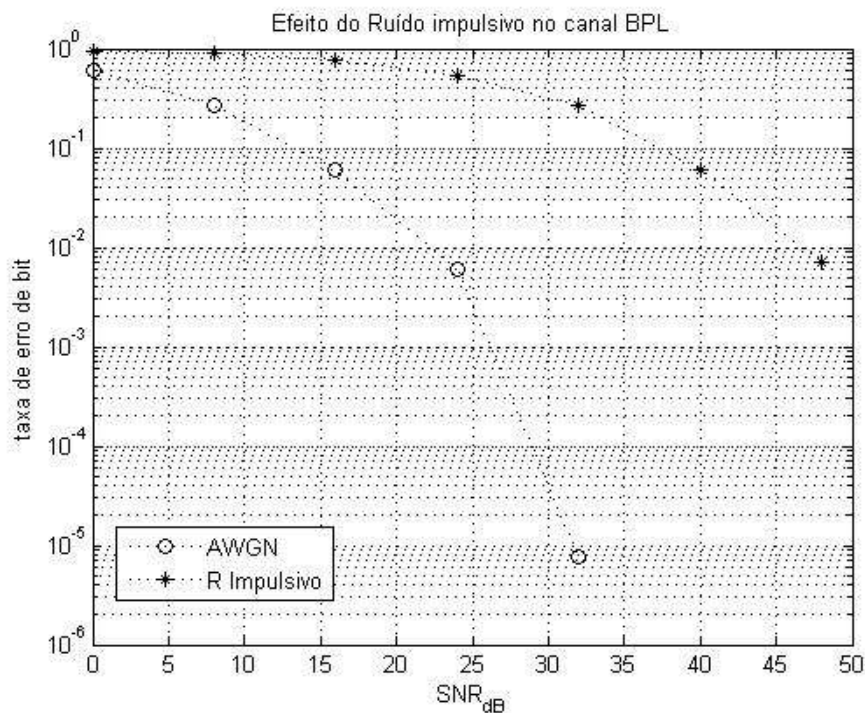
Embora o melhor desempenho tenha sido obtido com 64 subportadoras (ver Figura 44), na situação estudada recomenda-se que  $N = 256$ . Este número representa uma relação de compromisso entre o necessário para combater eficazmente a seletividade em frequência do canal sem que haja degradação significativa do desempenho dos sistemas em termos de taxa de erro de bits.



**Figura 44** – Desempenho do sistema BPL em função do número de subportadoras

#### 4.5.1.3 Efeito do ruído impulsivo

Concluindo esta análise, supondo o sistema OFDM com modulação 16QAM e 256 subportadoras, a Figura 45 compara os desempenhos obtidos na condição de se ter apenas o ruído AWGN e quando o ruído impulsivo é introduzido. Observa-se que o ruído AWGN não constitui problema. Entretanto, considerando o ruído impulsivo, o resultado não pode ser considerado satisfatório, uma vez que a BER se mostra superior a  $10^{-3}$  mesmo para uma SNR da ordem de 50 dB. Tal resultado justifica a utilização de avançados códigos corretores de erro turbo que está sendo aplicada nos equipamentos atuais ([http://www.homeplug.org/certified\\_products](http://www.homeplug.org/certified_products) - último acesso 15/11/10).



**Figura 45** - Comparação entre sistemas BPL afetado pelo e não afetado pelo ruído impulsivo

As figuras 44 e 45 indicam que esquemas de modulação de ordem mais baixa (QPSK, por exemplo) melhoram a taxa de erros de bits e a aplicação de códigos corretores de erros deve confirmar, nessas simulações, a viabilidade comercial da tecnologia BPL para o emprego em larga escala. Essa afirmação está apoiada nos projetos pilotos desenvolvidos no Brasil e nas parcerias firmadas entre empresas do setor elétrico e do setor de telecomunicações para a oferta dos serviços de telecomunicações, via rede de energia elétrica, conforme mencionado ao longo deste trabalho. A aplicação de códigos corretores de erros e esquemas de modulação

de ordem mais alta garantem uma taxa de transmissão competitiva com as tecnologias concorrentes, atuantes no mercado. Os anexos 8.1 e 8.2 referem-se a dois trabalhos, desenvolvidos pelo autor, que já haviam confirmado a caracterização do canal e os resultados apresentados nesse capítulo. Esses trabalhos foram aceitos e apresentados em um seminário de Engenharia e no MOMAG, respectivamente.

## 5 ASPECTOS REGULATÓRIOS

### 5.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Nos Estados Unidos, as agências reguladoras de energia e comunicações, FERC (*Federal Energy Regulatory Commission*) e a FCC (*Federal Communications Commission*) regulamentaram a tecnologia BPL. Seguindo este modelo, no Brasil, os itens relativos às emissões de radiações indesejadas, interferência e padrões foram regulamentados pela ANATEL e os aspectos relacionados com a utilização da infraestrutura, regulamentados pela ANEEL. Esta regulamentação foi realizada com base na observação das experiências de utilização de sistemas BPL ao redor do mundo, além do levantamento das diversas tecnologias disponíveis, seu uso, seus fornecedores e estudos sobre os serviços comerciais possíveis de serem oferecidos.

O artigo 1º da Lei nº 9.472, de 16/07/2007 (Lei Geral de Telecomunicações -LGT) confere à União, por intermédio do órgão regulador - ANATEL, competência para organizar a exploração dos serviços de telecomunicações o que inclui, entre outros aspectos, a utilização dos recursos de órbita e espectro de radiofrequências. Além disso, estabelece o espectro de radiofrequências como um recurso limitado e, nos termos do artigo 157 da LGT, um bem público, cujo uso deve ser otimizado e universalizado para o bem de toda a sociedade brasileira.

O artigo 2º da LGT determina que o Poder Público tem o dever de garantir, a toda a população, o acesso às telecomunicações, a tarifas e preços razoáveis, em condições adequadas e estimular a expansão do uso de redes e serviços de telecomunicações, de interesse público, em benefício da população nacional. Desta forma, o sistema BPL deve operar com frequências na faixa de 1,7 a 50 MHz. Estas frequências, aplicadas a condutores elétricos, são capazes de gerar sinais de radiofrequência, podendo ocasionar interferência em outros equipamentos eletrônicos de radio comunicação. Devido a estes e outros problemas,

vários estudos foram desenvolvidos no Brasil para uso da tecnologia até a sua regulamentação.

### 5.1.1 Testes Realizados

Os sistemas BPL, utilizados para serviços e dados em faixa larga, possuem uma modulação em multi-portadoras que ocupam partes da faixa de HF, hoje utilizadas por vários serviços de radioamador, radiodifusão, serviços aeronáuticos e outros. Em função disto, tais sistemas apresentam um recurso de configuração que permite atenuar portadoras em frequências onde podem ocorrer problemas de interferência radioelétrica. Este procedimento permite atenuar portadoras em frequências onde podem ocorrer problemas de radiointerferência. Estas faixas nas quais as portadoras são atenuadas, também chamadas de *notch*, podem ter tanto sua largura de faixa como sua atenuação, configuradas conforme a necessidade para a mitigação da interferência.

Os sistemas ensaiados pela ANATEL utilizaram equipamentos de primeira e segunda geração. Segundo os fabricantes, as tecnologias envolvidas possuem os recursos de mitigação, sendo que na primeira geração esta configuração era menos amigável. Com relação à configuração nos equipamentos de segunda geração, uma vez conhecidos os comandos necessários, segundo a ANATEL, a configuração mostrou-se bastante simples e imediata (PALETA, 2007).

Considerando os possíveis impactos do BPL em sistemas de radiocomunicações a ANATEL, durante o processo de elaboração da regulamentação brasileira, realizou testes referentes às emissões oriundas dos sistemas BPL na faixa de 1,705 MHz a 50 MHz. Tais testes tiveram por finalidade verificar o potencial interferente dos equipamentos BPL nos sistemas de radiocomunicações licenciados em caráter primário, como por exemplo, o Serviço Móvel Aeronáutico, o Serviço Móvel Marítimo e o Serviço de Radioamador.

Os primeiros testes foram realizados em 2006, em Goiânia, com equipamentos BPL de primeira geração. Estes testes demonstraram que a tecnologia poderia causar interferências prejudiciais aos sistemas que se encontravam nas proximidades da rede de energia elétrica. Isto porque os equipamentos não dispunham de recursos adequados para uma análise criteriosa das técnicas de mitigação de interferências. Além disso, os equipamentos de primeira geração apresentavam baixas taxas de transmissão.

Novos testes foram realizados em 2007, em Campinas, no CPqD, com equipamentos BPL de segunda geração, em redes de Baixa e Média Tensão, com três fabricantes (Mitsubishi, Ileo e Corinex). Os equipamentos BPL desta geração haviam incorporado novas funcionalidades, tornando possível a configuração de filtros supressores de faixa por meio de *software* e limitação da potência injetada nas linhas de tensão (PALETA, 2007).

Em 2008 a ANATEL realizou medições no projeto piloto implantado em uma localidade denominada Restinga, em Porto Alegre, que está em operação desde Dezembro de 2006. A rede BPL de Restinga é a maior em extensão do país, em média e baixa tensões, para fins de inclusão social. Naquela ocasião foram convidados Radioamadores, Forças Armadas e Órgãos de Segurança para acompanharem os testes e realizar as medidas que julgassem necessárias. As Forças Armadas e os Órgãos de Segurança realizaram transmissões a diversas distâncias da linha de transmissão para averiguar a que separação o sistema BPL não interferiria na comunicação. Não foram efetuadas medidas pelos Radioamadores.

### **5.1.2 Regulamentação da Anatel**

Após a realização dos testes e em continuação ao processo de elaboração da proposta de regulamentação, a ANATEL buscou um diálogo junto às Forças Armadas, Órgãos de Segurança, Radiodifusores e Radioamadores de forma a proteger os serviços vitais ao país. As Forças Armadas e os Órgãos de Segurança apresentaram suas preocupações quanto ao sistema BPL e forneceram as coordenadas geográficas de estações estratégicas que necessitavam de proteção, assim como as sub-faixas de radiofrequências utilizadas para socorro e chamada, que necessitariam de proteção especial. Neste contexto, foi providenciado o estabelecimento de zonas de exclusão e zonas de proteção, de forma a resguardar as frequências e zonas necessárias para as aplicações militares, e foram criados dispositivos de forma a resguardar as frequências de uso militar, no caso de missões constitucionais.

No caso dos Radioamadores, estes se limitaram a fornecer a listagem completa com todas as frequências nas quais o serviço opera em caráter primário. Não apresentaram as frequências e localidades críticas para operação do sistema BPL de forma a permitir uma atuação mais pontual da Agência. Mesmo assim, com a finalidade de proteger os serviços licenciados, atualmente em operação, adotou-se, na regulamentação brasileira, faixas de exclusão para o serviço radioamador e previstas medidas quando da notificação do operador do sistema BPL. A mesma abordagem se aplica aos Radiodifusores.

A Resolução 527 de 08 de Abril de 2009 aprovou o Regulamento sobre Condições de Uso de Radiofrequências por Sistemas de Faixa Larga por meio de Redes de Energia Elétrica (BPL). Este documento estabelece os critérios e parâmetros técnicos, que permitem a utilização dessa tecnologia de forma harmônica com as aplicações de radiocomunicações, que usam frequências na faixa entre 1,705 MHz e 50 MHz. Com essa Resolução, a ANATEL permitiu a utilização da tecnologia BPL por meio do uso compartilhado do espectro eletromagnético.

Em síntese, o Regulamento estabelece as condições de uso de radiofrequências por sistema de faixa larga através de redes de energia elétrica (BPL), em especial quanto às radiações indesejadas causadas por estes sistemas. A comunicação a ser estabelecida pelo sistema BPL, confinada nas redes de energia elétrica, somente pode ocorrer na faixa de radiofrequências de 1,705 MHz a 50 MHz. Os equipamentos que compõem o sistema BPL serão tratados como equipamentos de radiocomunicações de radiação restrita, operando em caráter secundário.

### 5.1.3 Definições

Na regulamentação da ANATEL, foram adotadas as seguintes definições:

- BPL - *Broadband Power Line*: faixa larga por meio de redes de energia elétrica.
- Faixas de exclusão: faixas de radiofrequências em que os sistemas BPL não poderão emitir sinais.
- Interferência Prejudicial: qualquer emissão, irradiação ou indução que obstrua, degrade seriamente ou interrompa repetidamente as telecomunicações.
- Linha de distribuição de Baixa Tensão (BT): linha de distribuição de energia elétrica com tensão nominal igual ou inferior a 1 kV, situada entre os transformadores da rede de distribuição de energia elétrica e as instalações do usuário BPL, podendo ser aérea ou subterrânea.
- Linha de distribuição de Média Tensão (MT): linha de distribuição de energia elétrica com tensão nominal maior que 1 kV e menor que 69 kV, situada entre as subestações e os transformadores da rede de distribuição de energia elétrica, podendo ser aérea ou subterrânea.

- Radiação indesejada: fluxo de energia indesejado, liberado sob a forma de ondas de rádio, por uma fonte qualquer.
- Rede de distribuição de Baixa Tensão (RBT): conjunto de instalações de distribuição de energia elétrica, com tensão nominal igual ou inferior a 1 kV.
- Rede de distribuição de Média Tensão (RMT): conjunto de instalações de distribuição de energia elétrica, com tensão nominal maior que 1 kV e menor que 69 kV.
- Zona de proteção de estações costeiras: compreende a área circunscrita ao círculo de raio de 1 km com centro nas coordenadas geográficas das estações costeiras, listadas no Anexo I da Resolução 527, conforme transcrito na tabela 8.

**Tabela 8 - Coordenadas geográficas das estações costeiras**

<b>CIDADE</b>	<b>UF</b>	<b>LATITUDE; LONGITUDE</b>
Arraial do Cabo	RJ	2S5655; 42W0140
Belém	PA	01S2341; 48W2927
Belém	PA	01S2752; 48W3016
Arraial do Cabo	RJ	2S5655; 42W0140
Belém	PA	01S2346; 48W2644
Belém	PA	01S2701; 48W2918
Brasília	DF	15S4707; 47W5130
Brasília	DF	15S5947; 47W5356
Cabo Frio	RJ	22S4258; 42W0017
Duque de Caxias	RJ	22S4813; 43W1727
Itajaí	SC	27S0435; 48W4620
Ladário	MS	19S0014; 57W5357
Manaus	AM	03S0818; 60W0130
Manaus	AM	03S0827; 60W0122
Manaus	AM	03S0616; 59W5416
Natal	RN	05S4730; 35W1313
Natal	RN	05S4732; 35W1152
Niterói	RJ	22S5305; 43W0758



Parnamirim	RN	05S5155; 35W1618
Recife	PE	08S0604; 35W 0 11 8
Rio de Janeiro	RJ	22S4645; 43W0916
Rio de Janeiro	RJ	22S5226; 43W0806
Rio de Janeiro	RJ	22S5357; 43W1037
Rio de Janeiro	RJ	22S4937; 43W 11 0 6
Rio de Janeiro	RJ	22S5451; 43W1701
Rio de Janeiro	RJ	23S0000; 43W3622
Rio Grande	RS	32S0150; 52W0454
Rio Grande	RS	32S0824; 52W0616
Rio Grande	RS	32S0202; 52W0420
Rio Grande	RS	32S0823; 52W0625
Rio Grande	RS	32S0349; 52W0837
Salvador	BA	12S4830; 38W2947
Salvador	BA	12S5827; 38W3055
São Gonçalo	RJ	22S5045; 43W0608
São Pedro da Aldeia	RJ	22S4927; 42W0532

Fonte: Anexo I da Resolução 527

- Zona de proteção de estações terrestres: compreende a área circunscrita ao círculo de raio de 1 km com centro nas coordenadas geográficas das estações terrestres, listadas no Anexo II da Resolução 527, conforme transcrito na tabela 9.

**Tabela 9** - Coordenadas geográficas das estações terrestres  
– zona de proteção

<b>CIDADE</b>	<b>UF</b>	<b>LATITUDE; LONGITUDE</b>
Rio de Janeiro	RJ	225403S; 431128 W
Rio de Janeiro	RJ	225032S; 432328W
Rio de Janeiro	RJ	225319S; 432408W
São Paulo	SP	233500S; 463848W
São Paulo	SP	232854S; 465230W
Porto Alegre	RS	300327S; 511206W
Porto Alegre	RS	300353S; 511305W
Belo Horizonte	MG	214444S; 432130W
Curitiba	PR	252535S; 491618W
Salvador	BA	125841S; 383058W
Recife	PE	080642S; 345410W
Belém	PA	012140S; 482739W
Campo Grande	MS	202700S; 543600W
Campo Grande	MS	202800S; 543800W
Fortaleza	CE	034327S; 383137W
Brasília	DF	154618S; 475508W
Manaus	AM	030406S; 600502W

Fonte: Anexo II da Resolução 527

- Zona de exclusão de estações terrestres: compreende a área circunscrita ao círculo de raio de 1 km com centro nas coordenadas geográficas das estações terrestres listadas no Anexo III da Resolução 527, conforme tabela 10

**Tabela 10** - Coordenadas geográficas das estações terrestres  
– zona de exclusão

CIDADE	UF	LATITUDE LONGITUDE
Brasília	DF	154243,10S 474980,92W
Brasília	DF	154243,58S 474846,61W
Porto Alegre	RS	300958,1S511230,0W
Brasília	DF	154243,10S 474980,92W
Brasília	DF	154243,58S 474846,61W
Porto Alegre	RS	300958,1S511230,0W
Brasília	DF	154243,10S 474980,92W

Fonte: Anexo III da Resolução 527

- Zona de exclusão de presídios: compreende a área restrita aos limites dos estabelecimentos penitenciários.

#### 5.1.4 Limites de Radiações

As radiações indesejadas causadas por sistemas BPL operando na rede de distribuição de Baixa Tensão devem estar limitadas aos valores descritos na tabela 11:

**Tabela 11** - Limites de radiações indesejadas causadas por sistemas BPL de RBT

Faixa de frequência (MHz)	Intensidade de campo $\mu\text{V/m}$	Distância da Medida (m)
1,705 – 30	30	30
30 – 50	100	3

Fonte: Resolução 527 ANATEL

As radiações indesejadas causadas por sistemas BPL, operando na rede de distribuição de Média Tensão, devem estar limitadas aos valores descritos na tabela 12.

**Tabela 12** - Limites de radiações indesejadas causadas por sistemas BPL de RMT

<b>Faixa de frequência (MHz)</b>	<b>Intensidade de campo <math>\mu\text{V/m}</math></b>	<b>Distância da Medida (m)</b>
1,705 – 30	30	30
30 – 50	90	10

Fonte: Resolução 527 ANATEL

### 5.1.5 Características técnicas dos sistemas

No que tange à convivência com outros serviços, que operam na faixa de radiofrequências de 1,705 MHz a 50 MHz, a regulamentação estabeleceu os condicionantes necessários para a implementação dos sistemas BPL no Brasil, de forma a viabilizar esta solução, adicionalmente às demais soluções tradicionais de acesso.

### 5.1.6 Controle de interferências

Os sistemas devem incorporar técnicas de mitigação de interferências que possibilitem reduzir, remotamente, a potência do sinal e remanejar as frequências de operação em tais sistemas, incluindo filtros ou permitindo o completo bloqueio de radiações indesejadas em frequências ou de faixas de frequências.

### 5.1.7 Capacidade dos Filtros Utilizados

O regulamento estabelece a obrigatoriedade da utilização de filtros com as seguintes características:

Para frequências abaixo de 30 MHz, quando da utilização de filtros para evitar interferência em uma faixa de radiofrequências específica, estes devem ser capazes de atenuar as radiações indesejadas dentro desta faixa a um nível de, pelo menos, 20 dB abaixo dos limites especificados no regulamento.

Para frequências acima de 30 MHz, quando da utilização de filtros para evitar interferência em uma faixa de radiofrequências específica, estes devem ser capazes de atenuar as radiações indesejadas dentro desta faixa a um nível de, pelo menos, 10 dB abaixo dos limites especificados no regulamento.

### **5.1.8 Garantia das configurações**

As configurações de mitigação de interferência devem ser mantidas, mesmo quando houver falta de energia na rede ou quando o equipamento for desligado e religado, de forma consecutiva ou esporádica. Além disto, o sistema deve dispor de mecanismo que possibilite, remotamente, a partir de uma central de controle, o desligamento da unidade causadora de interferência prejudicial, caso outra técnica de mitigação não alcance o resultado esperado.

### **5.1.9 Requisitos específicos**

A operação do sistema BPL em RMT não poderá provocar radiações indesejadas nas faixas de exclusão listadas na Tabela 13, que abrangem faixas de radiofrequências atribuídas ao Serviço Móvel Aeronáutico e Radioamador.

As faixas de radiofrequências que vierem a ser atribuídas e destinadas posteriormente ao Serviço Móvel Aeronáutico, no segmento do espectro compreendido entre 1,705 MHz e 50 MHz, também serão consideradas faixas de exclusão.

**Tabela 13 - Faixas de Exclusão**

<b>Faixa de frequências (MHz)</b>	
<b>Inicial</b>	<b>Final</b>
2,754	3,025
3,400	3,500
4,453	4,700
5,420	5,680
6,525	6,876
6,991	7,300
8,815	8,965
10,005	10,123
11,275	11,400
13,260	13,360
13,927	14,443
17,900	17,970
21,000	21,450
21,924	22,000
28,000	29,700

Fonte: Resolução 527 ANATEL

Dentro das zonas de proteção de estações costeiras deverão ser observados os seguintes critérios:

- Na faixa de radiofrequências de 2,1735 a 2,1905 MHz, fica vedada a operação de quaisquer sistemas BPL.
- Nas faixas de radiofrequências listadas na Tabela 14, atribuídas ao Serviço Móvel Marítimo, os limites de radiação indesejada causada pelos sistemas BPL em RMT devem estar atenuados a um nível de, pelo menos, 10 dB abaixo dos limites especificados no item 5.1.4 deste trabalho.

**Tabela 14** - Faixas de radiofrequências relativas à zona de proteção de estações costeiras

<b>Faixa de frequências (MHz)</b>	
Inicial	Final
4,122	4,128
4,177	4,178
4,207	4,208
6,212	6,218
6,268	6,269
6,312	6,313
8,288	8,294
8,364	8,365
8,376	8,377
12,287	12,293
12,520	12,521
12,577	12,578
16,417	16,423
16,695	16,696
19,680	19,681
22,376	22,377
26,100	26,101

Fonte: Resolução 527 ANATEL

Dentro das zonas de proteção de estações terrestres, na faixa de radiofrequências de 1,705 MHz a 30 MHz, fica vedada a operação de quaisquer sistemas BPL.

Dentro das zonas de exclusão de estações terrestres e de presídios, fica vedada a operação de quaisquer sistemas BPL.

As Forças Armadas e/ou os Órgãos de Segurança, quando no cumprimento de suas missões constitucionais, poderão notificar a ANATEL sobre a região geográfica e as faixas de radiofrequências que serão utilizadas. A ANATEL informará ao operador do sistema BPL, que deverá proceder aos ajustes necessários, imediatamente, para não causar interferências prejudiciais aos sistemas daquelas entidades, incluindo a interrupção do serviço, se for o caso.

No caso de interrupção do serviço BPL, por prazo superior a cinco dias, a ANATEL poderá, por solicitação do operador do sistema BPL, intermediar e mediar junto às Forças Armadas e/ou Órgãos de Segurança, na busca por uma solução que permita o restabelecimento da porção do serviço BPL que foi interrompido.

O não cumprimento do estabelecido na regulamentação implica, por solicitação das Forças Armadas e/ou Órgãos de Segurança, ações da ANATEL, que determinarão novas zonas de exclusão e faixas de radiofrequências, onde ficará vedado o uso de sistemas BPL, além das sanções administrativas cabíveis.

#### **5.1.10 Controle do uso de radiofrequências**

Adicionalmente às obrigações provenientes da autorização do serviço de telecomunicações pertinente, a prestadora do serviço que fizer uso de sistema BPL, deve prestar à ANATEL, em até trinta dias antes de início de operação comercial, informações necessárias para a criação e manutenção de uma base de dados pública, disponível a quaisquer interessados. Esta base de dados deverá ser permanentemente atualizada sempre que houver alterações, e especialmente quanto:

- à identificação da prestadora do serviço de telecomunicações;
- ao fabricante do equipamento BPL e os dados da estação certificada em utilização;
- à latitude e à longitude de todas as estações, exceto as estações terminais do usuário;
- ao endereço completo, incluindo o CEP, da localidade atendida;
- à faixa de radiofrequências de operação do sistema BPL;
- à data prevista para o início da operação;
- à data de entrada em operação; e
- ao contato do operador do sistema em cada localidade, incluindo telefone e correio eletrônico.

Antes do início da operação comercial do sistema BPL, a prestadora do serviço de telecomunicações deverá fornecer às Forças Armadas e Órgãos de Segurança locais, assim como às Associações de Radiodifusão e Radioamadorismo da Unidade da Federação as informações a seguir:



- a identificação da prestadora do serviço de telecomunicações;
- o endereço completo, incluindo o CEP, da localidade atendida;
- a faixa de radiofrequências de operação do sistema BPL; e
- o contato do operador do sistema em cada localidade, incluindo telefone e correio eletrônico.

Em caso de interferência prejudicial, a entidade afetada deverá notificar à prestadora do serviço de telecomunicações, que se comprometerá a aplicar técnicas adicionais de mitigação de interferências, conforme o texto do artigo 15 do regulamento, transcrito a seguir:

Se, após o início da operação comercial da estação do sistema BPL, for detectada a existência de alguma interferência prejudicial deverá ser observada:

Se a estação interferida opera em caráter primário, a estação BPL interferente deverá imediatamente cessar a sua transmissão e proceder aos ajustes necessários para eliminar a interferência;

Se a estação interferida também opera em caráter secundário, os interessados devem proceder à coordenação de uso das radiofrequências de forma a eliminar as interferências.

#### **5.1.11 Operação em caráter primário e secundário**

O sistema BPL opera em caráter secundário, o que significa que não haverá exclusividade e a faixa de operação pode ser compartilhada entre serviços que operam em caráter primário e secundário. Esta conceituação é de vital importância, tendo em vista que não estabelece qualquer condição de exclusividade para os serviços, ressalvados os que se destinam para fins exclusivamente militares.

No entanto, caso uma estação do sistema BPL (operando em caráter secundário) gere interferência prejudicial em uma estação de Radioamador (operando em caráter primário), a estação interferente deverá imediatamente cessar a sua transmissão e proceder aos ajustes necessários para eliminar a interferência na estação interferida. Tal entendimento está evidenciado na regulamentação do sistema BPL, descrito anteriormente.

Quanto aos níveis de intensidade de campo elétrico, definidos para os equipamentos BPL de Baixa Tensão, estes são compatíveis com os limites gerais aplicáveis aos equipamentos de radiação restrita. Esta terminologia é um termo genérico aplicado aos equipamentos, aparelhos ou dispositivos que utilizam radiofrequência para aplicações

diversas em que a correspondente emissão produza campo eletromagnético com intensidade dentro de limites pré-estabelecidos. Para os equipamentos BPL a intensidade de campo eletromagnético está especificada no item 5.1.4 deste trabalho. Os valores foram estabelecidos de forma a permitir uma convivência harmônica dos sistemas BPL com os sistemas licenciados que operam na faixa de radiofrequências de 1,705 - 50 MHz. Espera-se que esta convivência não introduza restrição demasiada na operação de sistemas BPL, a ponto de inviabilizar esta tecnologia.

No entanto, apesar do aval da ANATEL, estava faltando a regulamentação da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Um ponto muito discutido foi relativo ao procedimento de atuação das empresas de eletricidade, isto é, se somente com o fornecimento do meio de transmissão ou participando também como operadoras no oferecimento de serviços de telecomunicações. Muitas empresas do setor elétrico precisarão obter licença para operar Serviço de Comunicação Multimídia (SCM). Somente depois de dispor de uma licença poderão atuar nesse mercado. Algumas já haviam se antecipado e obtiveram essa autorização.

## 5.2 REGULAMENTAÇÃO DA ANEEL

Em 25 de Agosto de 2009 foi concluído o arcabouço básico para a oferta de serviços de telecomunicações, em faixa larga, através da rede de energia elétrica. A regulamentação por parte da ANEEL, através da Resolução Normativa 375, determina as condições de utilização da infraestrutura das empresas distribuidoras de energia elétrica, para implantação do sistema BPL, através da rede de distribuição. A concessionária de energia terá que lançar a licitação para uso da rede mediante interesse próprio ou solicitação formal de algum interessado. Como mencionado anteriormente neste trabalho, a regulamentação da ANEEL, uma vez que disponibiliza mais infraestrutura para os serviços de telecomunicações, deve contribuir para o projeto de inclusão digital e para atingir as metas propostas no Plano Nacional de Faixa Larga anunciado pelo Ministério das Comunicações, que define os papéis do governo e das empresas. Este plano deve proporcionar ao país 150 milhões de acessos até 2014, ou seja, atendendo a 75% da população.

### 5.2.1 Definições

Na regulamentação da ANEEL foram adotadas as seguintes definições:

- **Power Line Communications** – PLC (ou *Broadband over Power Line* – BPL): sistema de telecomunicações que utiliza a rede elétrica como meio de transporte para a comunicação digital e/ou analógica de sinais, tais como: *internet*, vídeo, voz, entre outros.
- Cessionário de PLC: toda pessoa jurídica detentora de concessão, autorização ou permissão nos termos da regulamentação da Agência Nacional de Telecomunicações – ANATEL para a exploração comercial de serviço de telecomunicações utilizando a tecnologia PLC.
- Distribuidora: Agente titular de concessão ou permissão federal para prestar o serviço público de distribuição de energia elétrica.

### 5.2.2 Atribuições e responsabilidades dos setores

No que diz respeito à abrangência, a Resolução 375 define, claramente, que as distribuidoras que atuam no Sistema Interligado Nacional – SIN somente poderão desenvolver atividades comerciais com o uso da tecnologia BPL nos casos previstos em lei e nos respectivos contratos de concessão. O SIN é constituído por empresas que têm por finalidade a geração e a transmissão de energia elétrica. As instalações de distribuição de energia elétrica, por serem bens vinculadas aos serviços concedidos, terão sua manutenção sob controle e gestão da distribuidora, de forma a atender às obrigações contidas no contrato de concessão ou permissão.

Por outro lado, o cessionário de BPL poderá utilizar as instalações de distribuição de energia elétrica para a transmissão analógica ou digital de sinais e disponibilizar serviços de telecomunicações aos seus clientes, de acordo com as normas e padrões técnicos da distribuidora e com o disposto na Resolução da ANEEL.

Como relação à destinação do uso comum das instalações de distribuição de energia elétrica, a

resolução estabelece que, para o desenvolvimento das atividades com o uso da tecnologia BPL, as cessionárias serão tratadas de forma não discriminatória e a preços

livremente negociados entre as partes. Entretanto, os custos decorrentes da realização de estudos técnicos para avaliar a viabilidade de disponibilização de infraestrutura para uso da tecnologia serão de responsabilidade do interessado.

### **5.2.3 Compartilhamento da infraestrutura**

Pela regulamentação da ANEEL, as distribuidoras de energia elétrica que desejarem usar suas redes para serviços de telecomunicações deverão disponibilizá-las também, em igual condição, para todos os interessados. A distribuidora de energia elétrica não tem exclusividade, mesmo que por meio de uma subsidiária criada para comercializar os serviços oferecidos pela tecnologia BPL. Ao disponibilizar a sua rede de distribuição, a distribuidora deverá dar ampla publicidade por um prazo mínimo de 60 dias para a manifestação dos interessados. A escolha do prestador do serviço deverá ser divulgada em até 90 dias após o pedido

É importante salientar, entretanto, que as empresas de energia elétrica ganharam, com a regulamentação, o direito de oferecer serviço de acesso à *internet* e TV por assinatura. Adicionalmente, ainda têm perspectiva de uso de suas redes, em futuro próximo, através da tecnologia BPL para a chamada *smart grid*, ou rede inteligente, que deverá contemplar uma série de aplicações pela rede elétrica. Isto porque a utilização do sistema BPL, focada para as atividades próprias, faz parte do conjunto de aplicações desta tecnologia, conforme abordado neste trabalho. Por outro lado, como a tecnologia permite o uso independente dos serviços, a distribuidora de energia elétrica terá a contrapartida de poder, também, utilizar a infraestrutura do prestador de serviço de BPL para atender às suas necessidades e interesses, concentrados na atividade fim, ou seja, o gerenciamento inteligente da distribuição de energia elétrica, utilizando os recursos que estiverem disponíveis no sistema do cessionário.

### **5.2.4 Redução dos custos e modicidade tarifária**

O desenvolvimento da tecnologia possibilita novos usos para as redes de distribuição de energia elétrica sem que haja necessidade de expansão ou adequação significativa da infraestrutura existente. As alternativas de negócios podem representar receitas extras para as distribuidoras de energia elétrica e economia para as empresas de telecomunicações, com a

redução dos custos nos investimentos necessários para alcançar maior capilaridade e conquistar novos clientes.

A ANEEL prevê que a apuração da receita obtida, pelas distribuidoras de energia, com o aluguel dos fios para as empresas de telecomunicações, será revertida para a redução das tarifas de eletricidade, nos termos de legislação específica estabelecida pela agência. Este critério já é utilizado no aluguel de postes para passagem dos cabos da telefonia. Em princípio, devido à economia, simplesmente pelo acréscimo de funções na infraestrutura existente, a adoção deste novo modelo pode significar menores custos aos consumidores.

É importante destacar que as redes de energia elétrica não precisam ser modificadas para a introdução da tecnologia. Somente novos componentes são acoplados e, praticamente, passam despercebidos pela população. Nesse sentido, os consumidores de energia elétrica devem ser beneficiados com os lucros adicionais que a distribuidora pode obter com a cessão de suas instalações refletindo, obrigatoriamente, em uma tarifa mais competitiva. Os consumidores dos serviços de telecomunicações certamente serão beneficiados com a redução dos custos da infraestrutura que não precisa ser implantada, o que pode baixar as tarifas para os consumidores finais. Adicionalmente, também implica na contribuição em prol de maior competitividade das empresas brasileiras no exterior com a redução dos chamados preços administrados, ou seja, aqueles cujos ajustes tarifários são estabelecidos pelo governo, como é o caso das tarifas de energia elétrica e de telecomunicações.

### **5.2.5 Relações contratuais**

Os critérios para celebração de atos e negócios jurídicos entre distribuidoras, suas sociedades controladas ou coligadas e outras sociedades controladas ou coligadas de controlador comum, no que tange à habilitação de cessionário de BPL, considerado como parte relacionada, são os estabelecidos na Resolução Normativa nº 334, de 21 de outubro de 2008 da ANATEL.

Neste contexto, os seguintes pontos deverão ser observados:

- I. O contrato de uso comum das instalações de distribuição com o cessionário deverá dispor sobre as condições gerais dos serviços a serem prestados bem como as condições técnicas e comerciais a serem observadas;

- II. Objetivando resguardar as obrigações associadas às concessões ou permissões, cabe à distribuidora estabelecer, no contrato de uso comum de suas instalações com o cessionário de BPL, cláusulas que definam responsabilidades por eventuais danos causados a sua infraestrutura e que assegurem a prerrogativa de o mesmo fiscalizar as obras do cessionário, tanto na implantação do sistema quanto na manutenção e adequação;
- III. Os contratos deverão se revestir de todas as formalidades técnicas e legais, bem como observar as disposições contábeis previstas no Manual de Contabilidade do Serviço Público de Energia Elétrica - MCSPEE, instituído pela Resolução nº 444, de 26 de outubro de 2001;
- IV. Havendo necessidade de modificação ou adaptação das instalações da distribuidora, os custos decorrentes serão de responsabilidade do cessionário de BPL;
- V. O cessionário de BPL, no desenvolvimento de suas atividades, será responsável pelo ressarcimento de eventuais danos causados às distribuidoras ou aos seus assinantes e
- VI. Os equipamentos a serem utilizados na composição do sistema de BPL que serão integrados às instalações de distribuição de energia elétrica devem obedecer à regulamentação específica da ANATEL.

### 5.3 ANÁLISE CRÍTICA DA REGULAMENTAÇÃO EXISTENTE

A seguir é apresentada uma análise dos principais pontos abordados pela regulamentação, no que diz respeito à participação dos setores elétrico e de telecomunicações, envolvendo critérios para utilização da infraestrutura, tarifação e fiscalização.

#### 5.3.1 Considerações Gerais

A regulamentação se tornou necessária devido ao surgimento e evolução de novas tecnologias que poderiam fazer uso da rede elétrica, tais como *Internet*, TV digital, serviços de multimídia e a própria operação e manutenção das redes elétricas em um formato mais avançado. O projeto do bairro de Restinga, em Porto Alegre, garantiu as regras preventivas

para limitar potências e faixas de exclusão. Esse sistema opera desde 2006, sem que tenham sido registrados problemas de convivência em outros sistemas de transmissões que utilizam Ondas Médias, Ondas tropicais e nos sistemas de TV aberta. A possibilidade de utilização da rede elétrica para a comunicação de sinais não está restrita ao Sistema Interligado Nacional (SIN) e, portanto, os consumidores dos sistemas isolados também serão beneficiados, de acordo com o interesse comercial das distribuidoras.

### **5.3.2 Regulamentação no setor elétrico**

De acordo com a legislação da ANEEL, as empresas de energia elétrica só podem prestar serviços de distribuição de energia. Entretanto, se a controladora tiver interesse em oferecer diretamente os serviços de telecomunicações, esta poderá criar uma subsidiária para essa finalidade. Desta forma, a empresa criada, após autorização para o uso do espectro, nos termos da regulamentação ANATEL, pode explorar comercialmente o serviço de telecomunicações com uso da tecnologia BPL. Esta possibilidade existente na regulamentação, apesar de não ter agradado às empresas do setor elétrico, aumenta a concorrência no setor de telecomunicações. Outra insatisfação demonstrada foi a obrigatoriedade de disponibilizar a rede, em igual condição, para todos os interessados, apesar da contrapartida de a empresa do setor elétrico poder, também, utilizar a infraestrutura do prestador de serviço de BPL para atender às suas necessidades, no que diz respeito ao gerenciamento inteligente da rede de energia elétrica.

Por outro lado, a regulamentação deixa claro que o uso da tecnologia pelas concessionárias só é permitido para as atividades relacionadas à distribuição de energia elétrica, como a incorporação dos serviços de telemedição, corte e religamento à distância, supervisão do fornecimento e da qualidade da energia, controle das perdas técnicas e comerciais e monitoramento remoto das redes elétricas. Outro tipo de permissão é a destinada à aplicação em projetos sociais, com fins científicos ou experimentais. O acesso livre à tecnologia abre a perspectiva de uma redução nos custos de operação e manutenção com a modernização dos Centros de Gerência de Rede.

### **5.3.3 Tarifação e Fiscalização**

O custo do serviço de transmissão de dados será definido entre a prestadora do serviço e o consumidor. Da mesma forma, o valor a ser pago pelo uso da rede de distribuição será acertado entre a distribuidora de energia elétrica e a interessada na prestação do serviço. A ANEEL não regula os valores que serão pagos pelo uso da rede elétrica pelos consumidores nem o custo da locação da rede elétrica pelo prestador do serviço de energia elétrica.

Para o consumidor de energia elétrica poderá haver, em médio prazo, uma redução na tarifa de energia elétrica, uma vez que parte da receita auferida pela distribuidora será revertida em prol da redução tarifária. O aumento da qualidade da prestação do serviço de energia, com a adoção da tecnologia para aprimorar procedimentos operacionais, também deve ser considerado para otimização dos custos. Os consumidores dos serviços de telecomunicações também serão beneficiados, pois o uso de redes existentes evita grande parte dos custos com implantação de novas infra-estruturas.

Embora seja utilizado o mesmo meio físico, a tecnologia permite o uso independente dos serviços e, portanto, a prestação dos serviços pode ser faturada separadamente. Essa facilidade, aliada ao aumento das receitas, tem impacto macroeconômico, visto que as tarifas de energia elétrica têm uma expressiva participação no custo de produção dos produtos fabricados no Brasil.

A implantação e exploração do BPL não podem afetar a qualidade do fornecimento de energia elétrica para os consumidores. Para essa avaliação, a ANEEL utilizará os procedimentos de fiscalização adotados pela Agência. Isto significa que, além da tendência natural de melhoria na qualidade da prestação do serviço, com a disponibilidade de novos recursos para monitoramento, essa melhoria se confirma com a fiscalização exercida pela ANEEL.

### **5.3.4 Regulamentação no setor de Telecomunicações**

A ANEEL não regula ou acompanha a qualidade do serviço de transmissão de dados. Essa função é de competência da ANATEL. A Lei nº. 9.472/1997 determina que a prestação de serviços de telecomunicações depende de prévia outorga da ANATEL, mediante autorização, nos termos da regulamentação. Desta forma, a Resolução nº. 527, de abril de 2009, estabelece que, caso o funcionamento de estações que utilizem sistemas BPL estiver



associado à exploração do serviço de telecomunicações, será necessária a correspondente autorização do Serviço de Comunicação Multimídia (SCM) ou do Serviço Limitado Privado (SLP), bem como o licenciamento das estações que se destinem à interligação às redes das prestadoras de serviços de telecomunicações, ou interligação a outras estações, da própria rede, por meio de equipamentos que não sejam de radiação restrita. Destaca-se ainda que os equipamentos devem cumprir o disposto no Regulamento para Certificação e Homologação de Produtos para Telecomunicações, aprovado pela Resolução ANATEL nº. 242/2000, além dos Requisitos Técnicos para certificação de equipamentos BPL, ([www.ANATEL.gov.br](http://www.ANATEL.gov.br) – último acesso 10/11/10).

A Regulamentação estabelece as condições de uso de radiofrequências, em especial no que se refere às radiações indesejadas, causadas por sistemas BPL, e define que os equipamentos que compõem o sistema sejam tratados como equipamentos de radiocomunicação de radiação restrita em caráter secundário. Desta forma, sistemas BPL não possuem direito à operação exclusiva e não podem causar interferências prejudiciais em sistemas que operam em caráter primário, sob pena de interrupção de transmissão até a execução de ajustes necessários para a eliminação de interferências.

## 6 CONCLUSÕES

Os principais problemas para a transmissão de dados em altas taxas sobre as redes elétricas são a propagação por múltiplos percursos, as perdas verificadas nos cabos e o ruído impulsivo. O modelo do canal utilizado nas pesquisas foi desenvolvido considerando tais efeitos, os quais são provocados pelas linhas de transmissão de energia elétrica em média e baixa tensão, para ambientes externos e internos. Diversos trabalhos têm comprovado a viabilidade da tecnologia BPL utilizando este modelo de canal para analisar o desempenho do sistema BPL. Conforme demonstrado neste trabalho, o modelo utiliza a técnica de transmissão de sinais OFDM e emprega os esquemas de modulação QAM e PSK.

A julgar pelas regulamentações dos órgãos competentes, considera-se que a tecnologia BPL seja uma forte candidata para contribuir de forma relevante para a solução dos problemas de infraestrutura da chamada última milha, reduzindo o tempo de instalação e o custo total do projeto. O aspecto social, através do projeto “inclusão digital”, também será beneficiado, visto que a capilaridade é o grande desafio dos serviços de telecomunicações convencionais nos dias atuais. Este problema poderá ser resolvido em maior escala devido à redução do custo de instalação da infraestrutura necessária, uma vez que esta se encontra quase que totalmente disponível, a ser completada apenas com os equipamentos BPL para a inserção e remoção do sinal na rede elétrica.

Em vista de tal situação, começam a surgir as parcerias entre as empresas prestadoras de serviços de telecomunicações, tanto operadoras de redes fixas como operadoras de redes móveis, e as concessionárias de energia elétrica. As parcerias têm por objetivo reduzir o custo de operação e também utilizar as redes de energia elétrica como uma alternativa para a interconexão e expansão do serviço de telecomunicações.

Desta forma, o sistema BPL vai estimular a competição, visto que as concessionárias de energia elétrica poderão, também, oferecer serviços de telecomunicações através de subsidiárias. É importante, ainda, mencionar que essas empresas poderão utilizar a tecnologia

para atividades relacionadas à própria distribuição de energia elétrica. No que diz respeito às receitas obtidas, com o aluguel da infraestrutura, parte destas receitas será utilizada para a redução das tarifas aos consumidores, o que pode contribuir para a redução do chamado “custo Brasil de produção”, tornando os produtos brasileiros um pouco mais competitivos no cenário internacional. Cabe ainda salientar que uma maior competitividade para a oferta de serviços de telecomunicações tende a reduzir o preço desses serviços, contribuindo, também, para a redução do custo total de produção de produtos brasileiros.

## 6.1 RESUMO DAS CONTRIBUIÇÕES DESTE TRABALHO

A continuidade das pesquisas deve determinar a médio prazo um algoritmo que possibilite melhorar o desempenho das redes BPL. Este trabalho, através das simulações computacionais e das pesquisas realizadas, teve por objetivo principal indicar a viabilidade da tecnologia para competir com os sistemas convencionais.

### 6.1.1 Contribuições Gerais

Foi visto que a tecnologia BPL pode apresentar benefícios, em relação às redes convencionais, ao usar a infraestrutura da rede elétrica. É possível levar o acesso à *internet* a regiões remotas, mesmo as que não integram o SIN (Sistema Interligado Nacional). A rápida implantação desta tecnologia também permite que seja possível o atendimento em períodos de alto crescimento da demanda.

Devido à quantidade de produtos BPL disponíveis no mercado, muitos deles citados neste trabalho, percebe-se que essa tecnologia já atingiu certo grau de maturidade. Muitas empresas fornecem equipamentos para a utilização *indoor*, enquanto já se tem alguns casos de efetivas implementações de redes *outdoor*. Quanto a esse último tipo, é interessante notar que sua utilização como rede de acesso à *Internet* incentiva a competição no setor, principalmente no referente à chamada última milha, portanto, pode-se afirmar que se trata de uma tecnologia comprovada e viável.

Foi desenvolvido um estudo comparativo das características das redes elétricas com as redes de telecomunicações convencionais, necessário para o desenvolvimento de projetos de redes BPL *indoor e outdoor*. Essa comparação mostrou-se bastante útil porque abordou os

pontos onde estão sendo concentrados os esforços das pesquisas, destacando-se o efeito do ruído impulsivo.

Apresentou-se o emprego da tecnologia BPL para o monitoramento inteligente das redes de energia elétrica, visando a modernização da planta instalada, e uma melhoria potencial da qualidade do serviço prestado aos consumidores de energia elétrica. Através de um monitoramento mais eficaz, onde é possível o isolamento de defeitos e o atendimento voltado diretamente para o cliente, com o objetivo de obter soluções de problemas através de comandos remotos e acionamento automático de equipes especializadas, é possível melhorar a eficácia do serviço prestado.

### **6.1.2 Contribuições Específicas**

Foi investigado o problema do ruído impulsivo presente em sistemas BPL e o emprego dos esquemas de modulação viáveis para a tecnologia, inclusive com a publicação de um artigo, anexo a este trabalho, que foi apresentado no MOMAG 2010. Implementou-se diversas simulações computacionais para demonstrar o efeito do ruído impulsivo sobre as redes *indoor* e *outdoor*, verificando o seu desempenho através da taxa de erro de bits e das taxas de transmissão. Os principais resultados desse estudo estão listados a seguir:

- a) O perfil de atenuação em função dos parâmetros básicos para o modelo do canal considerado foi analisado, destacando-se situações diferenciadas pelas distâncias que caracterizam as redes *indoor* e *outdoor* e demonstrando a forte dependência da atenuação com a distância. Os mesmos parâmetros do canal foram utilizados em ambientes definidos como *indoor* e *outdoor*; houve uma expressiva melhora, mesmo para frequências um pouco mais elevadas, quando as distâncias eram menores comprovando o comportamento através de simulações específicas.
- b) A seletividade em frequência se deve ao fenômeno do multipercurso verificado nas redes de distribuição de energia elétrica, o qual é produzido pelas diversas derivações existentes. Para o estudo dessas características do canal BPL através da análise da taxa de erro de bits, aplicou-se diversos esquemas de modulação e a técnica de transmissão OFDM para combater as características hostis e a presença de ruídos impulsivos. As simulações realizadas demonstraram o efeito da variação do número de subportadoras no sistema de comunicações. Definido o esquema de

modulação foi apresentado o desempenho do sistema BPL, fixando-o em 16-QAM e variando o número de subportadoras. Como esperado, verificou-se que o aumento do número de subportadoras degrada o desempenho do sistema.

- c) A atenuação nos condutores de uma rede de baixa tensão apresenta características que depende da topologia da rede, das cargas conectadas, da distância entre o transmissor e o receptor e, também, da faixa de frequências utilizada no enlace. A atenuação dependente da frequência foi confirmada para a faixa de frequências regulamentada pela ANATEL.
- d) Uma rede que representa ambiente *indoor* (distâncias inferiores a 200 m) foi testada através de simulações computacionais para verificação do comportamento seletivo em frequência. Da mesma maneira, foi representada uma rede para ambiente *outdoor* (distâncias superiores a 200 m). Verificou-se que, nas faixas de 10 a 30 MHz (*indoor*) e 1 a 10 MHz (*outdoor*) e para as distâncias consideradas, as redes apresentaram resultados aceitáveis, comparativamente com os correspondentes aos sistemas de telecomunicações convencionais.
- e) Foi desenvolvido um estudo para identificar o esquema de modulação mais competitivo em termos de taxa de transmissão e taxa de erros de bits. O esquema 16QAM foi o que apresentou o melhor desempenho, quando comparado com os esquemas QPSK, 8PSK, 16PSK, tendo sido atingida, em condições ideais, a taxa de 40 Mbps. Neste estudo foi utilizada a técnica de transmissão OFDM, que se mostrou a mais adequada para sistemas BPL;
- f) Relativamente ao ruído impulsivo, foi realizada uma análise comparativa supondo a existência apenas de ruído AWGN. Observou-se que o ruído impulsivo degrada significativamente o desempenho do sistema, justificando o emprego de sofisticados códigos corretores de erro. Nesta análise, considerou-se uma largura de faixa de 10 MHz, esquema de modulação 16 QAM e 256 subportadoras;
- g) Este trabalho apresentou, também, uma visão crítica dos procedimentos regulamentares adotados pela ANATEL e ANEEL. Abordou-se questões relativas à pertinência, à adequação e à eficácia dos aspectos relativos ao compartilhamento da

infraestrutura, exploração do serviço e tarifação, bem como as condições operacionais dos equipamentos e do sistema como um todo.

## 6.2 SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

Para dar continuidade à pesquisa, aqui descrita, e aprimorar as simulações desenvolvidas neste trabalho, recomenda-se:

- a. Aumentar o número de níveis do esquema de modulação (M-QAM) visando à obtenção de taxas de transmissão mais elevadas. Neste particular, não pode ser esquecida a relação de compromisso com o desempenho do sistema.
- b. Introduzir códigos corretores de erro de modo a tornar as simulações mais próximas do estágio atual de desenvolvimento do sistema.

## 7 REFERÊNCIAS

ANATEL. NOTA TÉCNICA ANATEL nº 05/2008 RFCEE 20/10/2008

B BARNES, J. A physical multi-path model for power distribution network propagation, I:n PROC. 1998 INT. SYMP. POWERLINE COMMUNICATIONS AND ITS APPLICATIONS, Tokyo, Japan, Mar. 1998. **Anais...** Japan, 1998, p. 76–89.

BRASIL. RESOLUÇÃO Nº 527, DE 8 DE ABRIL DE 2009. Regulamento sobre Condições de Uso de Radiofrequências por Sistemas de Banda Larga por meio de Redes de Energia Elétrica. **DOU**, de 13 Abr. 2009.

CORINEX COMMUNICATIONS CORP. Disponível em: [www.corinex.com](http://www.corinex.com). Acesso em: 15 jul. 2010

DIMAT S.A. Disponível em: <http://www.dimat.com>. Acesso em: 10 set.2010.

DOSTERT, K. **Powerline Communications**, Prentice Hall PTR, 2001.

EICHHOFF Kondensatoren GmbH Disponível em: <http://www.eichhoff.de> Acesso em: 25 ago.2010.

GÖTZ, Matthias; RAPP, Manuel; DOSTERT, K. Power Line Channel Characteristics and Their Effect on Communication System Design. **IEEE Communications Magazine**, abr. 2004.

HOOIJEN, O. G. A channel model for the residential power circuit used as a digital communications medium. **IEEE Trans. Electromagn. Compat.**, v. 40, n. 4, p. 331–336, Nov. 1998.

HOWARD W. SAMS & CO. INC., Reference data for radio engineers, 2001

KARL, M. Möglichkeiten der Nachrichtenübertragung über elektrische Energieverteilnetze auf der Grundlage Europäischer Normen, Fortschrittsberichte VDI, Reihe 10, VDI-Verlag, Düsseldorf, 500, 1997.

LANGFELD P.J. The Capacity of Typical Powerline Reference Channels and Strategies for System Design. In: PROCEEDINGS OF THE 5TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON POWER-LINE COMMUNICATIONS AND ITS APPLICATIONS, ISPLC-2001, Malmö, Sweden, 4-6 Abr,-6, 2001. **Anais...** Malmö, Sweden, 2001, p. 271-278.

LIU ,W.; WIDMER,H.; RAFFIN, P. Broadband PLC Access systems and field deployment in European power line networks, **IEEE Communications Magazine** 41, mai. 2003.

MA, Y. H.; SO, P. L. Performance Analysis of OFDM Systems for Broadband Power Line Communications Under Impulsive Noise and Multipath Effects. **IEEE Transactions on power delivery**, v.. 20, n.. 2, abr. 2005.

PALETA, R. **Ensaio de Desempenho e Radiointerferência em Sistema PLC**. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Elétrica, Setembro, 2007.

PHILIPPS, H. Modeling of powerline communication channel. In PROC. 3<sup>RD</sup> INT. SYMP. POWERLINE COMMUNICATIONS AND ITS APPLICATIONS, Lancaster, U. K., 1999, **Anais...** Lancaster, U.K, 1999. p. 14-21

RIBEIRO, M. V. et al. Impulsive Noise Mitigation Based on Computational Intelligence for Improved Bit Rate in PLC-DMT. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v.. 21, n. 1, Jan. 2006.

RIBEIRO, M. V; LOPES, R. R.; ROMANO, J. M. T. Performance Analysis of OFDM Systems for Broadband Power Line Communications Under Impulsive Noise and Multipath Effects **IEEE transactions on power delivery**, v. 20, n. 2, abr. 2005.

SANDERSON, 2000

HAYKIN, S. M. MOHER. **Sistemas de Comunicação**, 2004

THREIN, G. Datenübertragung über Niederspannungsnetze mit Bandspreizverfahren, Fortschrittberichte VDI, Reihe 10, VDI - Verlag, Düsseldorf, 156, 1991.

ZIMMERMANN, M.; DOSTERT, K. A Multipath Model for the Powerline Channel. **IEEE Transactions on Communications**, v. 50, n. 4, p. 553-559, abr. 2002.

ZIMMERMANN, M.; DOSTERT, K. A Multi-Path Signal Propagation Model for the Power Line Channel in the High Frequency Range. In: PROC. 3<sup>RD</sup> INT. SYMP. POWERLINE COMMUNICATION AN ITS APPLICATIONS, Lancaster, U. K., 1999. **Anais...** Lancaster, U.K, 1999, p. 45-51.

ZIMMERMANN, M.; DOSTERT, K. Analysis and modeling of impulsive noise in broadband powerline communications, **IEEE Trans. Electromagn. Compat.**, v.. 44, n. 1, p. 249–258, Fev. 2002.



## **8 ANEXOS**

## 8.1 ARTIGO CARACTERIZAÇÃO DO CANAL PARA TRANSMISSÃO DE DADOS ATRAVÉS DAS LINHAS DE ENERGIA ELÉTRICA (LIMA; ASSIS)

### **Caracterização do canal para transmissão de dados através das linhas de energia elétrica**

<sup>1</sup>Gilberto Castro Lima, UFF e <sup>2</sup>Mauro Assis, UFF

Universidade Federal Fluminense (UFF)  
Niterói, RJ, Brasil

[<sup>1</sup>gilcali@yahoo.com.br](mailto:gilcali@yahoo.com.br) [<sup>2</sup>msassis@openlink.com.br](mailto:msassis@openlink.com.br)

#### **RESUMO**

*O uso de redes, na Europa designadas PLC (Power Line Communications) e nos Estados Unidos BPL (Broadband over Power Line), há algum tempo despertam um grande interesse em pesquisas, devido à maior penetração e a possibilidade do acesso em banda larga, popularizando de forma definitiva o uso da Internet, ao atender um maior número de usuários em quase todas as classes sociais da população. Neste contexto, a tecnologia BPL é bastante promissora, posto que cerca de 50% do custo de implementação de um sistema de telecomunicações é devido à infraestrutura. Assim sendo, uma solução que reduza estes gastos pode contribuir decisivamente para a redução do custo total e para o aumento da capilaridade das redes de telecomunicações. Este artigo apresenta o modelo do canal BPL, os ruídos presentes e um resumo da regulamentação brasileira.*

Palavras-chave: Canal. Multipercurso. BPL. Ruído.

#### **1. INTRODUÇÃO**

Apesar da utilização da Internet e da oferta de serviços de telecomunicações em geral terem aumentado significativamente em todo o mundo, com raras exceções a infraestrutura necessária para dar o suporte exigido por esta expansão não acompanhou esse crescimento com a mesma velocidade. Especificamente no caso da Internet, atualmente uma grande parte

dos usuários ainda acessam através de linhas discadas. Mesmo em alguns países desenvolvidos, a disponibilidade de serviços em banda larga é ainda limitada pelos investimentos requeridos para a infraestrutura da rede. O BPL é um sistema de telecomunicações que utiliza a rede elétrica como meio de transporte para a comunicação digital e/ou analógica de sinais, tais como: internet, vídeo, voz, entre outros.

Outro importante aspecto a ser considerado é o apelo social relacionado com a possibilidade de fornecer serviços de telecomunicações através das redes elétricas. As redes BPL podem suprir uma lacuna promovida pelo desinteresse econômico das grandes empresas do setor. Mesmo após a abertura do mercado, no Brasil, um grande contingente da população ainda não tem acesso a vários tipos de serviços de telecomunicações. Neste sentido, no caso brasileiro, em um espaço de tempo muito curto, a quase totalidade da população será atendida pelas redes elétricas em suas residências, através do projeto “Luz para todos”. Desta forma, o acesso a serviços básicos de telecomunicações poderá ser disponibilizado rapidamente em locais onde as redes de acesso necessitem de expansão, viabilizando, com isto, a inclusão digital nestas localidades.

Devido à redução dos investimentos necessários para compor a infraestrutura e à rapidez na implementação, a tecnologia BPL permite que novos operadores possam rapidamente estender a área de atendimento, estabelecendo a oferta de serviços em áreas antes atendidas por apenas um, ou poucos provedores de serviços, aumentando as possibilidades de acesso e favorecendo os consumidores, independentemente da classe social.

## **2. CARACTERIZAÇÃO DO CANAL BPL**

É certo afirmar que as redes elétricas não foram desenvolvidas para a transmissão de dados em alta velocidade e, portanto, não representam um meio adequado para este fim. Desta forma, há alguns desafios a serem vencidos por esta tecnologia, tais como a elevada atenuação do sinal que depende da frequência e da distância, a propagação por múltiplos percursos e ainda a forte presença do ruído. Para reduzir as distorções (atenuações e atrasos) introduzidas pelas redes elétricas, os sistemas BPL utilizam eficientes técnicas de modulação e transmissão com múltiplas portadoras.

No que se refere, por exemplo, ao modelo do ruído aditivo, nos sistemas de transmissão convencionais é comum se adotar a modelagem gaussiana (AWGN) com densidade espectral plana (HOOIJEN, 1998); em um canal BPL destaca-se, além da presença do ruído gaussiano, o ruído impulsivo. Considerado o mais severo, o ruído impulsivo requer

especial tratamento para as comunicações em altas velocidades, por ele afetadas, e por outras situações impostas pelas propriedades dos canais BPL. A figura 1 ilustra os tipos de ruídos presentes em um canal BPL.

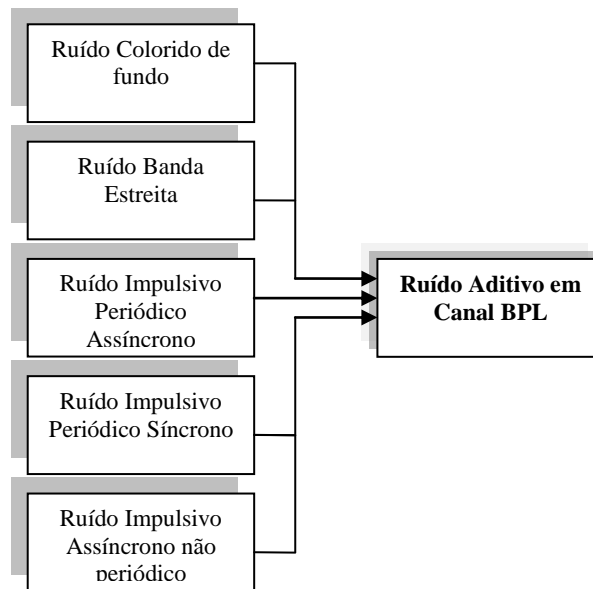


Figura 1. Ruídos presentes em um canal BPL

Os três primeiros tipos de ruído normalmente permanecem estacionários e podem ser chamados de ruídos de fundo. Os dois últimos são variantes no tempo e classificados como ruídos impulsivos. O ruído impulsivo tem curta duração, ocorrência aleatória e alta densidade espectral de potência. Zimmermann e Dostert (ZIMMERMANN & DOSTERT, 2002) mediram a taxa de chegada e a densidade espectral de potência e apresentaram um modelo para descrever este comportamento através de uma cadeia de Markov particionada. Resultados apresentados por (HOOIJEN, 1998) mostraram que a presença do ruído impulsivo segue uma distribuição de Poisson. Em (MA e SO, 2005) foi demonstrado que a técnica de transmissão OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) pode reduzir os efeitos adversos do ruído impulsivo e que a taxa de erros de bits (BER) só é afetada quando o sistema é atingido de forma muito severa pelo ruído impulsivo.

## 2. 1. MODELO DO CANAL

Alguns modelos já estudados na literatura técnica exigiam um grande conhecimento do comportamento da rede através da análise detalhada de um grande número de componentes

distribuídos. Certamente as informações do tipo de cabo, número de derivações e dispositivos conectados é praticamente é inviável. (THREIN, 1991), (BARNES, 1998), (DALBY,1998) e (KARL, 1997) descreveram canais BPL utilizando estes dados, chamados, *bottom-up*. Somente o trabalho apresentado por (HOOIJEN, 1998) descreve um modelo de atenuação e ruído porém, como os anteriores, restrito para frequências abaixo de 150 kHz.

O modelo do canal que será apresentado é baseado nos efeitos físicos que a rede e suas ramificações provocam no sinal. Propagação multipercurso, desvanecimento seletivo em frequência e atenuação do sinal nos cabos, crescentes com comprimento e com o aumento da frequência foram os principais problemas considerados para a modelagem do canal. Este modelo de canal vem sendo utilizado em quase todos os trabalhos de pesquisa, envolvendo a transmissão de dados sobre a rede de energia elétrica em baixa e média tensão.

Em (ZIMMERMANN & DOSTERT, 2002) este modelo é descrito adotando uma abordagem chamada *top-down*, que considera o canal como uma “caixa preta” descrevendo sua função de transferência através da resposta em frequência numa faixa que vai de 500 kHz a 20 MHz, com um número baixo de parâmetros a serem considerados e não mais inúmeros dados sobre a rede e seus componentes como nos modelos apresentados em trabalhos anteriores. Estes parâmetros são obtidos através de medições realizadas no canal e não mais através do conhecimento detalhado das propriedades dos componentes da rede.

## 2. 2. PROPAGAÇÃO ATRAVÉS DE MÚLTIPLOS PERCURSOS

A propagação do sinal entre transmissor e receptor não ocorre somente através de um caminho direto. Chegam ao receptor réplicas do sinal que percorrem outros caminhos impostos pelas derivações que estão presentes na rede, provocando reflexões antes de chegarem ao receptor, caracterizando o fenômeno do multipercurso. No modelo apresentado cada um dos muitos caminhos  $i$  tem um fator de peso  $g_i$  representando o resultado das transmissões e reflexões ocorridas. Conforme indicado em (1), todos os fatores de peso considerados para reflexões e transmissões são menores ou iguais a um; isto ocorre porque nas derivações para cargas em paralelo na linha a impedância é menor que a impedância característica do cabo de alimentação. Quanto maior as transições ao longo de um percurso menor será fator de peso  $g_i$ . Isto porque, considerando que longos percursos apresentam maior atenuação, logo contribuirão menos para a formação do sinal no receptor.

$$|g_i| \leq 1 \tag{1}$$

O retardo  $\tau_i$  pode ser calculado através da expressão:

$$\tau_i = \frac{d_i \sqrt{\epsilon_r}}{c_0} = \frac{d_i}{v_p} \quad (2)$$

Onde:  $\epsilon_r$  é a constante dielétrica do cabo,  $d_i$  o comprimento do caminho  $i$  e  $c_0$  é a velocidade da luz.

Sabendo-se que as perdas nos cabos acarretam uma atenuação  $A(f, d)$  e que esta atenuação aumenta com o comprimento do cabo ( $d$ ) e com a frequência ( $f$ ), as várias réplicas do sinal têm que ser superpostas através de um somatório, logo:

$$\underline{H}(f) = \sum_{i=1}^N g_i \cdot A(f, d_i) \cdot e^{-j2\pi f \tau_i} \quad (3)$$

### 2. 3. PERDAS NOS CABOS

Conforme mencionado anteriormente a propagação do sinal é afetada pelo comprimento do cabo e pelo aumento da frequência. De acordo com os resultados obtidos por (ZIMMERMANN e DOSTERT, 2002) a atenuação nos cabos de linhas de transmissão de energia elétrica é dado pela expressão:

$$A(f, d) = e^{-\alpha(f) \cdot d} \quad (4)$$

$$\alpha(f) = a_0 + a_1 \cdot f^k \quad (5)$$

Logo a atenuação típica de uma linha de energia elétrica para transmissão de dados é expressa por:

$$A(f, d) = e^{-(a_0 + a_1 \cdot f^k) \cdot d} \quad (6)$$

### 2.4. MODELO SIMPLIFICADO PARA A REPRESENTAÇÃO DO CANAL BPL

Finalmente (ZIMMERMANN & DOSTERT, 2002) apresentaram um modelo que foi validado, através de uma rede de testes com quatro percursos. Este modelo vem sendo utilizado em inúmeros trabalhos acadêmicos para demonstrar que é possível transmitir dados em altas taxas através das redes de energia elétrica. Considerando o fator de peso  $g_i$ , a propagação multipercurso dada em (4), a atenuação dependente do comprimento e da

frequência definida em (6) e usando (2), a resposta em frequência para o canal BPL pode ser escrita:

$$\underline{H}(f) = \sum_{i=1}^N g_i e^{-(a_0 + a_1 \cdot f^k) \cdot d_i} \cdot e^{-j2\pi f (d_i/v_p)} \quad (7)$$

A equação 7 define o modelo da função de transferência do canal BPL para ambientes internos e externos. Os termos que compõem o somatório representam: o fator de peso, atenuação e atraso devido ao multipercurso, respectivamente. Os parâmetros das equações 2 e 7 estão listados na tabela 1

Tabela 1 – Parâmetros da equação da função de transferência do canal BPL outdoor

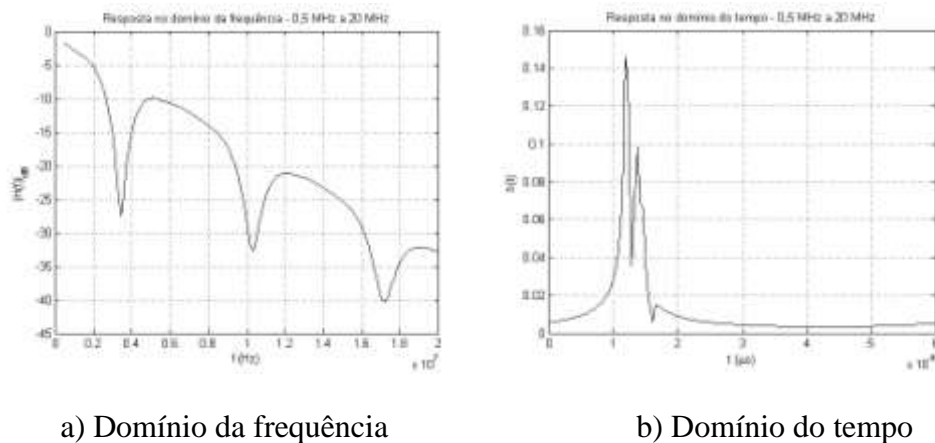
$N$	Número total de caminhos de propagação.
$I$	Número de caminhos, o caminho com menor atraso tem $i = 1$ .
$a_0$ e $a_1$	Parâmetros de atenuação.
$K$	Expoente do fator de atenuação (valores típicos entre 0,5 e 1).
$g_i$	Fator peso para o caminho $i$ , pode ser considerado como uma combinação dos fatores de transmissão e reflexão envolvidos.
$d_i$	Comprimento do caminho $i$ .
$\tau_i$	Atraso do caminho $i$ .
$\mathcal{E}_r$	Constante dielétrica do cabo.
$c_0$	Velocidade da luz.

## 2. 5. VALIDAÇÃO DO MODELO

Em (ZIMMERMANN e DOSTERT, 2002) o modelo foi validado quando comparado com uma rede de testes. Neste trabalho serão reproduzidos os resultados apresentados pelos autores citados sem, no entanto, realizar comparações devido à impossibilidade de realizar, presentemente, as medições requeridas em uma rede BPL experimental. A tabela 2 exhibe os parâmetros utilizados na simulação e as figuras 2 e 3 mostram os resultados obtidos. Serão exibidas duas figuras variando-se apenas as faixas de frequências utilizadas. É importante observar que a faixa de frequência 1,7 MHz a 50 MHz foi a faixa regulamentada pela ANATEL.

Tabela 2 – parâmetros utilizados para a função de transferência

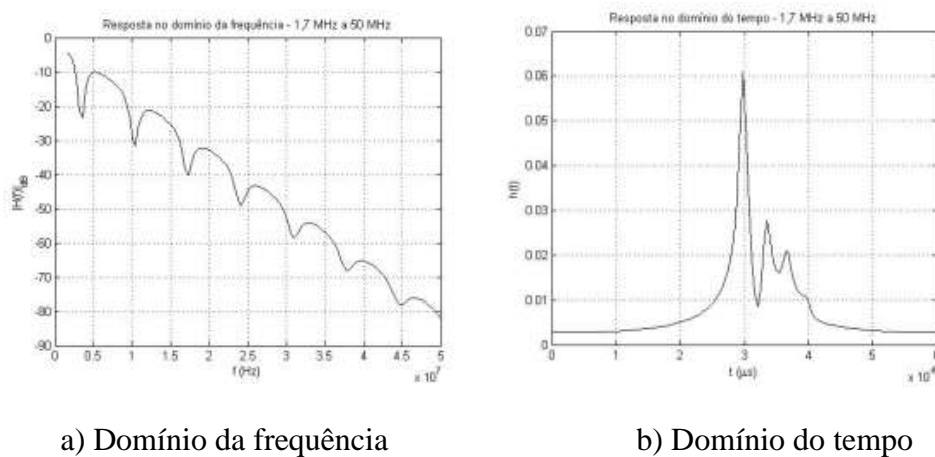
$I$	$g_i$	$d_i(m)$
1	0,64	200.0
2	0,38	222.4
3	-0,15	244.8
4	0,05	267.5
$K = 1$	$a_0 = 0$	$a_1 = 7,8 \times 10^{-10}$
<b>Faixas</b>	0,5 MHz a 20 MHz	1,7 MHz a 50 MHz



a) Domínio da frequência

b) Domínio do tempo

Figura 2 – Módulo da resposta de um canal BPL (0,5 a 20 MHz)



a) Domínio da frequência

b) Domínio do tempo

Figura 3 – Módulo da resposta de um canal BPL (1,7 a 50 MHz)

## 2.6. ATENUAÇÃO DEPENDENTE DA DISTÂNCIA E DA FREQUÊNCIA

A dependência da distância e da frequência na atenuação de um sinal transmitido por canais BPL, nas redes de BT externas, apresentada em (ZIMMERMANN e DOSTERT, 2002), é mostrada na Figura 4. Nesta figura, os parâmetros de atenuação, para cada



comprimento, foram obtidos através de inúmeras medidas realizadas em redes de baixa tensão. Destacam-se cinco situações diferenciadas pelas distâncias de 100 m, 150m, 200 m, 300 m e 380 m, resultando em grupos de funções de atenuação com características diferentes entre si, o que demonstra a forte dependência da atenuação com a distância e com a frequência. Este comportamento foi confirmado para distâncias bem menores, mesmo mantendo-se os mesmos parâmetros de atenuação. Espera-se que estes parâmetros sejam menos severos para distâncias menores. Os parâmetros de atenuação estão listados na tabela 3

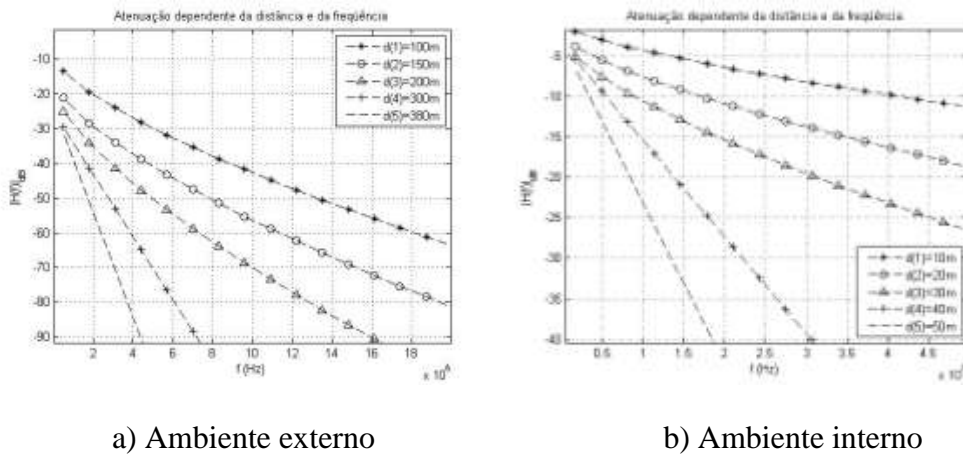


Figura 4 – Dependência da atenuação com a distância e a frequência

Tabela 3 – parâmetros médios obtidos utilizados para caracterizar a atenuação dependente da frequência e da distância (ZIMMERMANN e DOSTERT, 2002)

$d_i$ (m)	$g_1$	$a_0$ ( $m^{-1}$ )	$a_1$ (s/m)	$K$
100	1	$9,4 \times 10^{-3}$	$4,20 \times 10^{-7}$	0,7
150	1	$10,9 \times 10^{-3}$	$3,36 \times 10^{-7}$	0,7
200	1	$9,33 \times 10^{-3}$	$3,24 \times 10^{-7}$	0,7
300	1	$8,40 \times 10^{-3}$	$3,00 \times 10^{-9}$	1
380	1	$6,20 \times 10^{-3}$	$4,00 \times 10^{-9}$	1

### 3. CONCLUSÕES

Os principais problemas para a transmissão de dados em altas taxas sobre as redes elétricas são a propagação por múltiplos caminhos e as perdas verificadas nos cabos. O modelo apresentado foi desenvolvido considerando tais efeitos, provocados pelas linhas de

transmissão de energia elétrica em baixa tensão externas e internas. Os dados para comparação foram obtidos em laboratório e através de inúmeras medições dos parâmetros de atenuação, realizadas em redes operando normalmente na Alemanha. Diversos trabalhos têm utilizado este modelo de canal em pesquisas para demonstrar a viabilidade da tecnologia BPL. Em (RIBEIRO, LOPES, ROMANO e DUQUE, 2005), o modelo foi utilizado para combater o ruído impulsivo baseado em inteligência computacional. Em (MA e SO, 2005) o mesmo modelo foi utilizado para analisar o desempenho do sistema OFDM.

A julgar pelas recentes regulamentações por parte da ANATEL (RESOLUÇÃO 527, 2009) e ANEEL (MINUTA DA RESOLUÇÃO, 2009), podemos afirmar que a tecnologia BPL é uma forte candidata para resolver os problemas da chamada última milha e ambientes *indoor*. O aspecto social, através do projeto “inclusão digital”, também será beneficiado, visto que a última milha é o grande “gargalo” das comunicações nos dias de hoje e este problema poderá ser resolvido em maior escala devido ao menor custo da infraestrutura necessária, uma vez que já encontra-se disponível.

Por outro lado, o sistema BPL vai estimular a competição, visto que as concessionárias de energia elétrica poderão oferecer serviços de telecomunicações através de suas subsidiárias. É importante ainda mencionar que as concessionárias de energia poderão utilizar a tecnologia para atividades relacionadas à própria distribuição de energia elétrica. No que diz respeito às receitas obtidas, com o aluguel da infraestrutura para as empresas de telecomunicações, parte destas receitas será utilizada para a redução das tarifas cobradas atualmente.

#### **4. REFERÊNCIAS**

- O. G. HOOIJEN, “A channel model for the residential power circuit used as a digital communications medium,” IEEE Trans. Electromagn. Compat., vol. 40, no. 4, pp. 331–336, Nov. 1998.
- M. ZIMMERMANN AND K. DOSTERT, “Analysis and modeling of impulsive noise in broad-band powerline communications,” IEEE Trans. Electromagn. Compat., vol. 44, no. 1, pp. 249–258, Fev. 2002.
- Y. H. MA, P. L. SO, “Performance Analysis of OFDM Systems for Broadband Power Line Communications Under Impulsive Noise and Multipath Effects” IEEE Transactions on power delivery, vol. 20, no. 2, Abril 2005

- G. THREIN, “Datenübertragung über Niederspannungsnetze mit Bandspreizverfahren, Fortschrittberichte VDI, Reihe 10,” VDI-Verlag, Düsseldorf, 156, 1991.
- J. BARNES, “A physical multi-path model for power distribution network propagation,” in Proc. 1998 Int. Symp. Powerline Communications and its Applications, Tokyo, Japan, Mar. 1998, pp. 76–89.
- M. KARL, “Möglichkeiten der Nachrichtenübertragung über elektrische Energieverteilnetze auf der Grundlage Europäischer Normen, Fortschrittsberichte VDI, Reihe 10,” VDI-Verlag, Düsseldorf, 500, 1997.
- M. ZIMMERMANN AND K. DOSTERT, “A Multipath Model for the Powerline Channel”. IEEE Transactions on Communications, Vol. 50, No. 4, pp 553-559, April 2002.
- MOISÉS V. RIBEIRO, MEMBER, IEEE, RENATO DA R. LOPES, JOÃO MARCOS T. ROMANO, “Performance Analysis of OFDM Systems for Broadband Power Line Communications Under Impulsive Noise and Multipath Effects” IEEE transactions on power delivery, vol. 20, no. 2, abril 2005.
- RESOLUÇÃO No- 527, DE 8 DE ABRIL DE 2009, “Regulamento sobre Condições de Uso de Radiofrequências por Sistemas de Banda Larga por meio de Redes de Energia Elétrica”. DOU 13 Abril de 2009.

## 8.2 ARTIGO - EFEITO DO RUÍDO IMPULSIVO EM CANAL BPL UTILIZANDO A TÉCNICA DE TRANSMISSÃO OFDM (LIMA; ASSIS; DIAS)

### *Efeito do ruído impulsivo em canal BPL utilizando a técnica de transmissão OFDM*

Gilberto C. Lima; Mauro S. Assis

Dpto de Telecomunicações

Universidade Federal Fluminense

Rio de Janeiro - Brasil

[gilcali@yahoo.com.br](mailto:gilcali@yahoo.com.br); [msassis@openlink.com.br](mailto:msassis@openlink.com.br)

João T. Dias

Coord. de Telecomunicações

Centro Federal de Educação Tecnológica

CEFET Rio de Janeiro - Brasil

[joaotdias@yahoo.com.br](mailto:joaotdias@yahoo.com.br)

**Resumo-** Este trabalho trata do problema do emprego de linhas de energia elétrica na transmissão de dados em alta velocidade. Em que pese as características adversas deste meio de transmissão, para taxas de até 40 Mbps, as dificuldades podem ser superadas através da escolha criteriosa de técnicas de transmissão e esquemas de modulação. As simulações computacionais apresentadas demonstram a viabilidade de sistemas BPL – Broadband over Power Lines que utilizam a técnica transmissão multiportadora OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing).

**Palavras-Chave:** *Transmissão de dados, linhas de energia elétrica, taxa de erro de bit (BER), BPL, OFDM.*

**Abstract –** This paper deals with the problem of data transmission through electric power lines. In spite of the observed difficulties when data rates up to 40 Mbps are considered, it is possible to reach an acceptable performance if the transmission technique, as well as, the modulation schemes are carefully defined. Computer simulations have shown the feasibility of BPL - Broadband over Power Lines when the OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex) is used.

### INTRODUÇÃO

Devido à elevada probabilidade de interferência entre símbolos [1], é reconhecido atualmente que técnicas de transmissão em portadora única não constituem uma alternativa eficaz, para transmissão de dados em sistemas BPL. Por outro lado, por suas características

adequadas para este tipo de transmissão, a técnica OFDM, por se tratar de uma técnica multiportadora, está sendo amplamente difundida, no meio acadêmico e entre os fabricantes de equipamentos BPL. Isto porque, além de combater a interferência entre símbolos, apenas uma pequena porcentagem das subportadoras é atingida pelo efeito da seletividade em frequência.

Os efeitos da seletividade em frequência ocorrem devido aos descasamentos de impedâncias, inerentes à rede elétrica, os quais são causados, principalmente, pelas derivações impostas pelos ramais de ligação na distribuição de energia [5]. Nos sistemas multiportadora, o combate à interferência entre símbolos e à seletividade em frequência aumenta a robustez do sistema, quando comparado com sistemas de comunicações em portadora única.

Por outro lado, cumpre assinalar que inúmeras fontes de ruído, de natureza impulsiva, assim como a propagação do sinal por multipercurso, também degradam consideravelmente o desempenho do sistema de comunicações implantado sobre as redes elétricas. Em [1] foi demonstrado que a técnica OFDM também pode reduzir os efeitos indesejáveis do ruído impulsivo.

Neste contexto, através de simulações computacionais, este trabalho pretende analisar o problema do desempenho de sistemas BPL que utilizam a técnica OFDM, buscando definir o melhor esquema de modulação. Para tal objetivo foi adotada a seguinte estrutura. A Seção 2 resume aspectos básicos da técnica de transmissão OFDM. As principais características do canal BPL são apresentadas na Seção 3, onde também são introduzidos os ruídos presentes no canal. A Seção 4 descreve o cenário das simulações realizadas. Finalizando, a Seção 5 apresenta os resultados obtidos e a Seção 6 reúne as conclusões obtidas a partir destes resultados.

## **DESCRIÇÃO DO SISTEMA OFDM**

Em geral, pode-se dizer que a idéia fundamental da técnica de transmissão OFDM é a partição do canal em um conjunto de sub-canais. Os dados são transmitidos em paralelo, através dos sub-canais criados por este esquema de partição. Em condições ideais, devido à ortogonalidade existente entre as subportadoras, os sub-canais são independentes entre si. Como resultado, um canal seletivo em frequência se torna equivalente a um conjunto de sub-canais planos e a interferência entre símbolos é teoricamente eliminada [2]. Um sinal OFDM constituído de  $M$  subportadoras

senoidais terá o seguinte espaçamento entre as portadoras:

$$\Delta f = \frac{1}{MT} = \frac{1}{T_s}, \quad (1)$$

onde  $T$  é o intervalo de amostragem e  $T_s$  é o intervalo de um símbolo.

A Figura 1 apresenta de forma simplificada o diagrama em blocos de um sistema de comunicações OFDM.

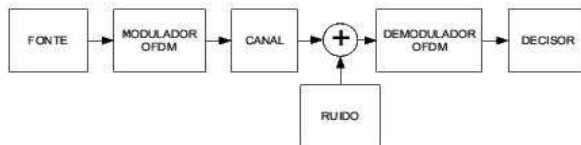


Figura 1 - diagrama em blocos simplificado de um sistema de comunicações OFDM.

É comum utilizar algoritmos de transformada rápida de Fourier (IFFT e FFT) para modulação e demodulação do sinal. Em um caso ideal (frequência de portadora e instante de início de símbolo perfeitamente sincronizados), as amostras recebidas no domínio da frequência podem ser representadas por:

$$R(i) = \sum_{k=0}^{M-1} r(k) \exp\left(-\frac{j2\pi ki}{M}\right), i=0 \dots M-1 \quad (2)$$

sendo  $r(k)$  o sinal recebido acrescido dos ruídos presentes no canal BPL, no domínio do tempo.

## CARACTERÍSTICAS DO CANAL BPL

Afirma-se usualmente que as redes elétricas não foram desenvolvidas para a transmissão de dados em alta velocidade e, portanto, não representam um meio adequado para este fim. No que se refere, por exemplo, ao modelo do ruído aditivo, nos meios de transmissão convencionais é comum adotar a modelagem gaussiana (AWGN), com densidade espectral plana. Em um canal BPL, além da presença do ruído gaussiano, destaca-se o ruído impulsivo [3].

O ruído impulsivo requer especial tratamento para as comunicações em taxas elevadas. Este tipo de ruído contém energia suficiente para afetar seriamente tais sistemas de comunicações, visto que, a duração do impulso frequentemente é maior que o comprimento de um símbolo [4]. As fontes de ruído incluem aparelhos eletrônicos, eletromecânicos e motores a escova, que são particularmente ruidosos. Dimmers e lâmpadas fluorescentes criam ruídos impulsivos relacionados ao ciclo de 60 Hz. Fontes de energia criam harmônicos relacionados com a comutação de

frequência. A Figura 2 ilustra os tipos de ruídos presentes em um canal BPL.

As características específicas dos ruídos mostrados na Figura 2 estão descritas a seguir.

### **Ruído Colorido**

- Baixa densidade espectral de potência
- Variante no tempo e na frequência
- Gerado por fontes de baixa potência

### **Ruído Banda Estreita**

- Variante no tempo
- Provocado por radiofrequência

### **Ruído Impulsivo Periódico Assíncrono com a Frequência da Rede**

- Taxa de repetição entre 60 e 240 kHz
- Gerado por fontes chaveadas

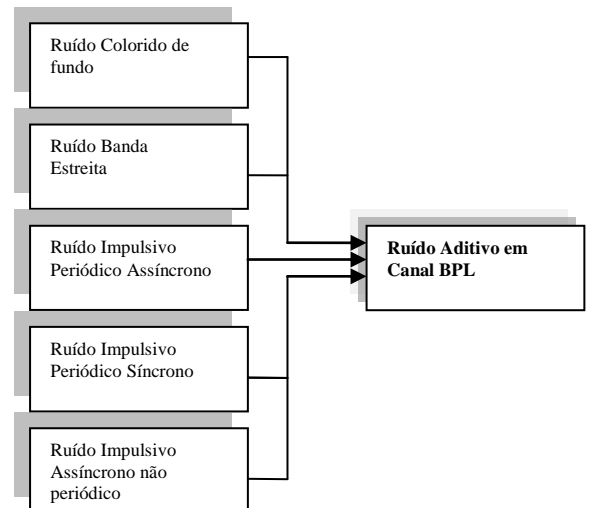


Figura 2. Ruídos que afetam um canal BPL

### **Ruído Impulsivo Periódico Síncrono com a Frequência da Rede**

- Densidade espectral de potência decrescente com a frequência
- Duração da ordem de microsegundos
- Repete a taxas múltiplas de 60 Hz
- Provocado por sistemas eletrônicos de potência

### **Ruído Impulsivo Assíncrono e não Periódico**

- Densidade espectral de potência pode alcançar entre 10 e 30 dB acima do ruído colorido
- Natureza aleatória
- Duração entre microsegundos e milisegundos
- Causado por transientes de chaveamentos na rede.

Os três primeiros tipos de ruídos podem ser considerados como ruídos de fundo e são representados por uma modelagem gaussiana. Os dois últimos são os mais severos e apresentam um comportamento variante no tempo com alta densidade espectral de potência [3].

Para o ruído impulsivo, neste trabalho será utilizado o modelo que considera uma distribuição de Bernoulli para a ocorrência dos impulsos e distribuição gaussiana para a amplitude do ruído. Nesta situação, o modelo é representado por uma probabilidade de ocorrência  $b_k$  e amplitude  $g_k$  [1], onde  $k$  representa o intervalo de amostragem da IFFT. Desta forma, o ruído impulsivo  $I_k$  tem por expressão,

$$I_k = b_k g_k \quad (3)$$

Embora a presença dos impulsos seja relativamente alta, o percentual de eventos impulsivos que provocam sérias perturbações aos sistemas de comunicações é menor que 1% em áreas severamente atingidas, tais como as zonas densamente povoadas [3].

No que se refere aos fenômenos de multipercurso, desvanecimento seletivo em frequência e atenuação do sinal nos cabos, crescentes com comprimento e com o aumento da frequência, a modelagem aqui adotada terá por base o trabalho de Zimmermann e Dostert [5]. Em

consequência, a resposta no domínio da frequência (função de transferência) para o canal BPL será dada por,

$$\underline{H}(f) = \sum_{i=1}^N g_i e^{-(a_0 + a_1 \cdot f^r) \cdot d_i} \cdot e^{-j2\pi f (d_i/v_p)} \quad (4)$$

Os termos que compõem o somatório representam as variáveis que caracterizam o canal, quais sejam: o fator de peso  $g_i$ , a atenuação e o retardo. Os dois últimos estão representados pelas exponenciais da equação (4). A descrição dos parâmetros desta equação consta da Tabela 1, enquanto valores típicos para redes BPL de baixa tensão, estão mostrados na Tabela 2, de acordo com estudos feitos por [5].

Tabela 1 – Parâmetros da equação da função de transferência do canal BPL outdoor

$N$	Total de percursos de propagação
$i$	Número de percursos (o percurso com menor atraso tem $i=1$ ).
$a_0$ e $a_1$	Parâmetros de atenuação.
$r$	Expoente do fator de atenuação (valores típicos entre 0,5 e 1).
$g_i$	Fator peso para o percurso $i$ (fatores de transmissão e reflexão envolvidos).
$d_i$	Comprimento do percurso $i$ .



Tabela 2 – Valores dos parâmetros utilizados para a função de transferência

$I$	$g_i$	$d_i(m)$
1	0,64	200.0
2	0,38	222.4
3	-0,15	244.8
4	0,05	267.5
$r = 1$	$a_0 = 0$	$a_1 = 7,8 \times 10^{-10}$

As Figuras 3 e 4 apresentam, respectivamente, as respostas no domínio da frequência e do tempo do canal BPL, na faixa de 1,7 MHz a 50 MHz, regulamentada pela ANATEL [6].

Embora a discussão nas concessionárias de energia elétrica esteja voltada para a transmissão de dados em dezenas de quilômetros, através das redes de média tensão, este trabalho focará seu estudo nas redes de baixa tensão. Isto se deve a demanda contida pela falta de infraestrutura para atender aos serviços de telecomunicações e ao grande potencial econômico que esta demanda representa. Por outro lado, o aproveitamento das redes de média tensão estaria voltado para o monitoramento inteligente das redes de energia, visto que praticamente não existe gargalo no *backbone* de telecomunicações.

A dependência da distância e da frequência na atenuação de um sinal transmitido por canais BPL, nas redes de baixa tensão externas, é mostrada na

Figura 5. Os parâmetros de atenuação associados a esta figura estão listados na Tabela 3, foram extraídos de [5] para representar um cenário real de redes BPL em baixa tensão.

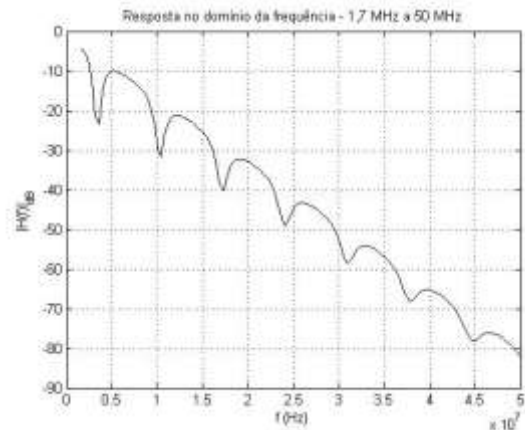


Figura 3 – Módulo da resposta de um canal BPL no domínio da frequência.

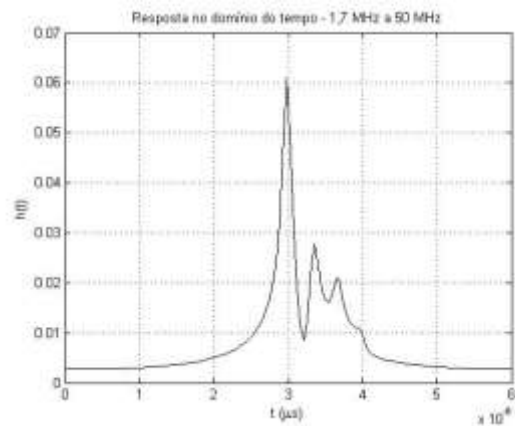


Figura 4 – Módulo da resposta de um canal BPL no domínio do tempo

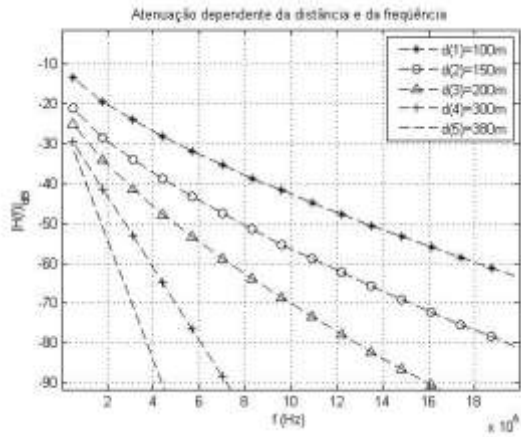


Figura 5 – Atenuação dependente da distância e da frequência

Tabela 3 – Parâmetros utilizados para caracterizar a dependência da atenuação com a distância e a frequência

$d_i (m)$	$g_1$	$A_0 (m^{-1})$	$A_1(s/m)$	$K$
100	1	$9,4 \times 10^{-3}$	$4,20 \times 10^{-7}$	0,7
150	1	$10,9 \times 10^{-3}$	$3,36 \times 10^{-7}$	0,7
200	1	$9,33 \times 10^{-3}$	$3,24 \times 10^{-7}$	0,7
300	1	$8,40 \times 10^{-3}$	$3,00 \times 10^{-9}$	1
380	1	$6,20 \times 10^{-3}$	$4,00 \times 10^{-9}$	1

### DESCRIÇÃO DO CENÁRIO DAS SIMULAÇÕES

Conforme definido anteriormente, este trabalho se propõe a realizar uma análise do desempenho do sistema BPL, buscando o melhor esquema de modulação. A Figura 6 reúne os principais componentes que deram origem ao sistema de transmissão/recepção, utilizado para gerar os resultados.

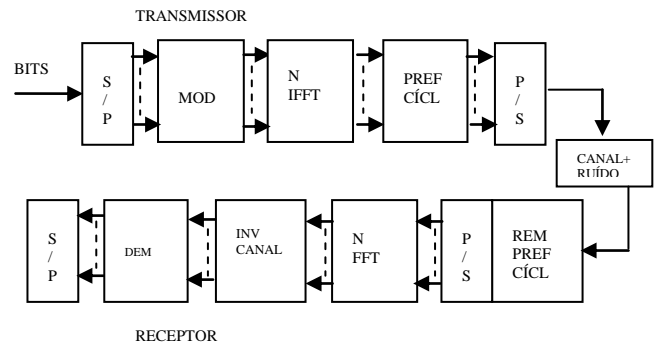


Figura 6 – Diagrama em blocos do Sistema de Comunicação

Uma breve descrição da funcionalidade de cada bloco da Figura 6 é apresentada a seguir.

- a) **S/P:** realiza a conversão de uma seqüência binária serial para uma seqüência binária em paralelo;
- b) **Modulação:** Aplica os esquemas de modulação PSK, 8PSK 16PSK e 16QAM;
- c) **N-IFFT:** Aplica a inversa da transformada rápida de Fourier à seqüência;
- d) **Prefixo Cíclico:** Técnica para inserção de amostras antes do símbolo OFDM, o que reduz a interferência entre símbolos;
- e) **P/S:** Converte as amostras do símbolo OFDM para serial para a transmissão no canal BPL;
- f) **Canal:** Representa o canal de comunicações BPL acrescido do ruído aditivo;

g) **Remove Prefixo Cíclico:** Faz a remoção das amostras inseridas no transmissor;

h) **N-FFT:** Aplica a FFT ao sinal OFDM obtido após a extração do prefixo cíclico;

i) **Inverte Canal:** Aplica a equalização no domínio da frequência

j) **Demodulador:** decodifica a seqüência.

As simulações realizadas demonstram o efeito da variação do número de subportadoras no sistema de comunicações, afetado pelo ruído impulsivo. A Figura 7 apresenta o desempenho do sistema BPL, fixado o esquema de modulação 16 QAM e variando o número de subportadoras. Fica visível que o aumento do número de subportadoras degrada o desempenho do sistema, o que se justifica pelo aumento da duração do símbolo e sua suscetibilidade ao ruído impulsivo. Entretanto, deve-se considerar que não foi aplicada nenhuma técnica de codificação de canal para melhoria do desempenho.

A escolha de 256 subportadoras em vez de 64 é justificada por ser mais robusta à seletividade em frequência, uma vez que para um pequeno número de subportadoras, os sub-canais não são seguramente planos. Desta forma, nas simulações cujos resultados estão

representados pelas Figuras 8, 9 e 10, foram utilizadas 256 subportadoras.

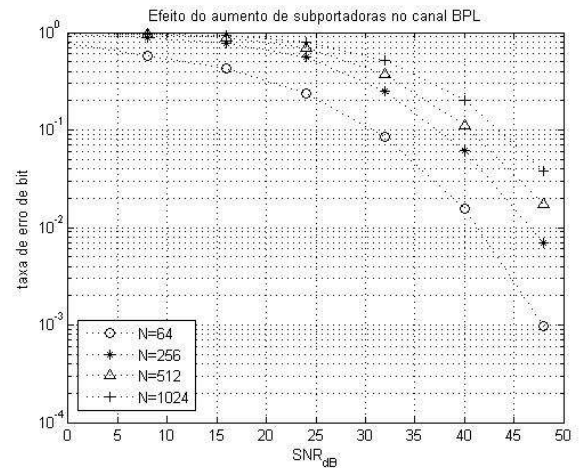


Figura 7– Desempenho do sistema BPL em função do número de subportadoras.

## RESULTADOS OBTIDOS

No simulador mostrado na Figura 6 foram aplicados os esquemas de modulação QPSK, 8PSK, 16PSK e 16QAM. Supondo uma largura de faixa de 10 MHz [7], chega-se aos valores indicados na Tabela 4, correspondentes à máxima taxa de transmissão para os esquemas acima citados a partir da equação  $T = Bw \times m$ , onde  $Bw$  é a largura de banda utilizada e  $m$  é o número de bits por símbolo

Inicialmente, foram comparados os resultados relativos ao desempenho do sistema na presença unicamente do ruído AWGN. O resultado deste procedimento está ilustrado na Figura 8. A seguir, foi

acrescentado a ruído impulsivo com um nível de 20 dB acima do ruído AWGN. O objetivo foi identificar o melhor esquema de modulação a ser utilizado em uma situação, a mais próxima possível do ambiente real.

Para esta situação, chegou-se às curvas da Figura 9.

Tabela 4 – Máxima taxa de transmissão

Modulação	Taxa
QPSK	20 Mbps
8PSK	30 Mbps
16PSK	40 Mbps
16QAM	40 Mbps

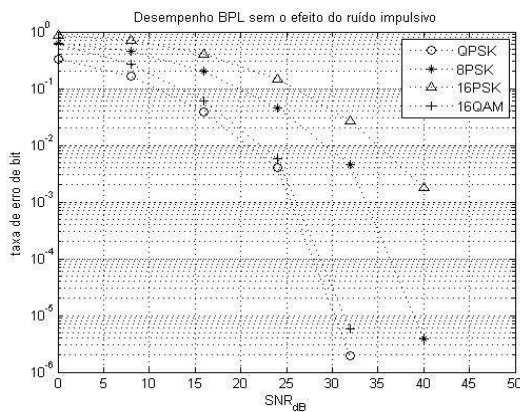


Figura 8 – Sistema BPL sem Ruído Impulsivo

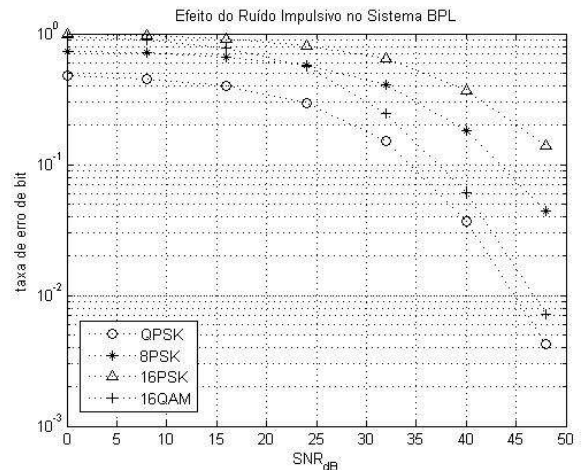


Figura 9 – Sistema BPL afetado pelo Ruído Impulsivo 20 dB acima do ruído AWGN

Pelas simulações realizadas, foi possível observar que, depois do QPSK, o esquema 16QAM é o que apresenta o melhor desempenho em termos de taxa de erros de bits. Cabe salientar que apesar de tal resultado, o esquema QPSK não se mostra competitivo em termos de taxa de transmissão.

Para melhor visualizar o resultado, empregando o esquema de modulação 16QAM, a Figura 10 compara desempenhos com o sistema apenas sob ação do ruído AWGN e quando o ruído impulsivo é introduzido. Tal resultado é uma indicação de que o sistema BPL ainda requer o emprego de alguma técnica de melhoria capaz de torná-lo mais eficiente. Para isto, em trabalhos subsequentes pretende-se introduzir corretores de erro (FEC – Forward Error Correction) utilizando códigos convolucionais na linha

da técnica patenteada pela France Telecom com base em chips fabricados pela aliança Atheros/Intellon Corporation [8].

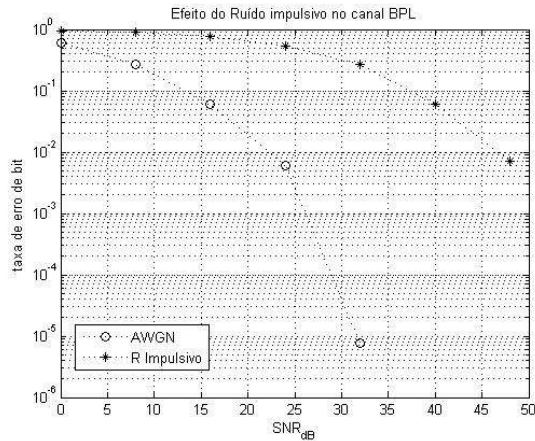


Figura 10 – Comparação de desempenhos no sistema BPL (com e sem ruído impulsivo)

## CONCLUSÕES

Na implementação da técnica OFDM que serviu de base para as simulações do sistema de transmissão descrito neste trabalho foram utilizadas 256 subportadoras. Conforme comentado, este número representa uma relação de compromisso entre o necessário para combater eficazmente a seletividade em frequência do canal, sem degradar de modo significativo o desempenho do sistema em termos da taxa de erro de bits (ver Figura 7).

Por outro lado, embora a modulação 16QAM tenha apresentado o melhor resultado, particularmente para a relação

sinal-ruído (SNR) acima de 25 dB (ver Figura 8), o desempenho, quando considerado o ruído impulsivo, ainda não pode ser considerado satisfatório (ver Figura 9). Isto porque a BER se mostra superior a  $10^{-3}$  mesmo para uma SNR da ordem de 50 dB. Com a finalidade de resolver este problema, pretende-se, na continuidade deste estudo, introduzir corretores de erro com códigos convolucionais.

## Referências

- [1] Y. H. Ma, P. L. So and E. Gunawan, “Performance Analysis of OFDM Systems for Broadband Power Line Communications Under Impulsive Noise and Multipath Effects” IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 20, no. 2, Abril 2005.
- [2] João T. Dias, Juraci F. Galdino e Ernesto L. Pinto. “Desempenho de Algoritmos de Sincronização de Sistemas OFDM” MOMAG-06.
- [3] M. Zimmermann and K. Dostert, “Analysis and modeling of impulsive noise in broad-band powerline communications” IEEE Trans. Electromagn. Compat., vol. 44, no. 1, pp. 249–258, Fev. 2002.

- [4] Matthias Götz, Manuel Rapp and K. Dostert, "Power Line Channel Characteristics and Their Effect on Communication System Design" IEEE Communications Magazine April 2004.
- [5] M. Zimmermann and K. Dostert, "A Multipath Model for the Powerline Channel". IEEE Transactions on Communications, Vol. 50, No. 4, pp 553-559, April 2002.
- [6] RESOLUÇÃO No- 527, DE 8 DE ABRIL DE 2009, "Regulamento sobre Condições de Uso de Radiofrequências por Sistemas de Banda Larga por meio de Redes de Energia Elétrica". DOU 13 Abril de 2009.
- [7] Moisés V. Ribeiro, Renato da R. Lopes, João Marcos T. Romano and Carlos A. Duque, "Impulsive Noise Mitigation Based on Computational Intelligence for Improved Bit Rate in PLC-DMT". IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 21, No. 1, January 2006.
- [8] <http://www.atheros.com/> - Último acesso: 06/03/2010

### 8.3 NR 10 – SEGURANÇA EM INSTALAÇÕES E SERVIÇOS EM ELETRICIDADE / ANEXOS II E II

#### **Publicação D.O.U.**

Portaria GM n.º 3.214, de 08 de junho de 1978 06/07/78

#### **Alterações/Atualizações D.O.U.**

Portaria SSMT n.º 12, de 06 de junho de 1983 14/06/83

Portaria GM n.º 598, de 07 de dezembro de 2004 08/09/04

*(Texto dado pela Portaria GM .nº 598, de 07 de dezembro de 2004)*

## **10.1 - OBJETIVO E CAMPO DE APLICAÇÃO**

**10.1.1** Esta Norma Regulamentadora – NR estabelece os requisitos e condições mínimas objetivando a implementação de medidas de controle e sistemas preventivos, de forma a garantir a segurança e a saúde dos trabalhadores que, direta ou indiretamente, interajam em instalações elétricas e serviços com eletricidade.

**10.1.2** Esta NR se aplica às fases de geração, transmissão, distribuição e consumo, incluindo as etapas de projeto, construção, montagem, operação, manutenção das instalações elétricas e quaisquer trabalhos realizados nas suas proximidades, observando-se as normas técnicas oficiais estabelecidas pelos órgãos competentes e, na ausência ou omissão destas, as normas internacionais cabíveis.

## **10.2 - MEDIDAS DE CONTROLE**

**10.2.1** Em todas as intervenções em instalações elétricas devem ser adotadas medidas preventivas de controle do risco elétrico e de outros riscos adicionais, mediante técnicas de análise de risco, de forma a garantir a segurança e a saúde no trabalho.

**10.2.2** As medidas de controle adotadas devem integrar-se às demais iniciativas da empresa, no âmbito da preservação da segurança, da saúde e do meio ambiente do trabalho.

**10.2.3** As empresas estão obrigadas a manter esquemas unifilares atualizados das instalações elétricas dos seus estabelecimentos com as especificações do sistema de aterramento e demais equipamentos e dispositivos de proteção.

**10.2.4** Os estabelecimentos com carga instalada superior a 75 kW devem constituir e manter o Prontuário de Instalações Elétricas, contendo, além do disposto no subitem 10.2.3, no mínimo:

- a) conjunto de procedimentos e instruções técnicas e administrativas de segurança e saúde, implantadas e relacionadas a esta NR e descrição das medidas de controle existentes;
- b) documentação das inspeções e medições do sistema de proteção contra descargas atmosféricas e aterramentos elétricos;
- c) especificação dos equipamentos de proteção coletiva e individual e o ferramental, aplicáveis conforme determina esta NR;
- d) documentação comprobatória da qualificação, habilitação, capacitação, autorização dos trabalhadores e dos treinamentos realizados;
- e) resultados dos testes de isolamento elétrica realizados em equipamentos de proteção individual e coletiva;
- f) certificações dos equipamentos e materiais elétricos em áreas classificadas;
- g) relatório técnico das inspeções atualizadas com recomendações, cronogramas de adequações, contemplando as alíneas de “a” a “f”.

**10.2.5** As empresas que operam em instalações ou equipamentos integrantes do sistema elétrico de potência devem constituir prontuário com o conteúdo do item 10.2.4 e acrescentar ao prontuário os documentos a seguir listados:

- a) descrição dos procedimentos para emergências;
- b) certificações dos equipamentos de proteção coletiva e individual;

**10.2.5.1** As empresas que realizam trabalhos em proximidade do Sistema Elétrico de Potência devem constituir prontuário contemplando as alíneas “a”, “c”, “d” e “e”, do item 10.2.4 e alíneas “a” e “b” do item 10.2.5.



**10.2.6** O Prontuário de Instalações Elétricas deve ser organizado e mantido atualizado pelo empregador ou pessoa formalmente designada pela empresa, devendo permanecer à disposição dos trabalhadores envolvidos nas instalações e serviços em eletricidade.

**10.2.7** Os documentos técnicos previstos no Prontuário de Instalações Elétricas devem ser elaborados por profissional legalmente habilitado.

## **10.2.8 - MEDIDAS DE PROTEÇÃO COLETIVA**

**10.2.8.1** Em todos os serviços executados em instalações elétricas devem ser previstas e adotadas, prioritariamente, medidas de proteção coletiva aplicáveis, mediante procedimentos, às atividades a serem desenvolvidas, de forma a garantir a segurança e a saúde dos trabalhadores.

**10.2.8.2** As medidas de proteção coletiva compreendem, prioritariamente, a desenergização elétrica conforme estabelece esta NR e, na sua impossibilidade, o emprego de tensão de segurança.

**10.2.8.2.1** Na impossibilidade de implementação do estabelecido no subitem 10.2.8.2., devem ser utilizadas outras medidas de proteção coletiva, tais como: isolamento das partes vivas, obstáculos, barreiras, sinalização, sistema de seccionamento automático de alimentação, bloqueio do religamento automático.

**10.2.8.3** O aterramento das instalações elétricas deve ser executado conforme regulamentação estabelecida pelos órgãos competentes e, na ausência desta, deve atender às Normas Internacionais vigentes.

## **10.2.9 - MEDIDAS DE PROTEÇÃO INDIVIDUAL**

**10.2.9.1** Nos trabalhos em instalações elétricas, quando as medidas de proteção coletiva forem tecnicamente inviáveis ou insuficientes para controlar os riscos, devem ser adotados equipamentos de proteção individual específicos e adequados às atividades desenvolvidas, em atendimento ao disposto na NR 6.

**10.2.9.2** As vestimentas de trabalho devem ser adequadas às atividades, devendo contemplar a condutibilidade, inflamabilidade e influências eletromagnéticas.

**10.2.9.3** É vedado o uso de adornos pessoais nos trabalhos com instalações elétricas ou em suas proximidades.

### **10.3 - SEGURANÇA EM PROJETOS**

**10.3.1** É obrigatório que os projetos de instalações elétricas especifiquem dispositivos de desligamento de circuitos que possuam recursos para impedimento de reenergização, para sinalização de advertência com indicação da condição operativa.

**10.3.2** O projeto elétrico, na medida do possível, deve prever a instalação de dispositivo de seccionamento de ação simultânea, que permita a aplicação de impedimento de reenergização do circuito.

**10.3.3** O projeto de instalações elétricas deve considerar o espaço seguro, quanto ao dimensionamento e a localização de seus componentes e as influências externas, quando da operação e da realização de serviços de construção e manutenção.

**10.3.3.1** Os circuitos elétricos com finalidades diferentes, tais como: comunicação, sinalização, controle e tração elétrica devem ser identificados e instalados separadamente, salvo quando o desenvolvimento tecnológico permitir compartilhamento, respeitadas as definições de projetos.

**10.3.4** O projeto deve definir a configuração do esquema de aterramento, a obrigatoriedade ou não da interligação entre o condutor neutro e o de proteção e a conexão à terra das partes condutoras não destinadas à condução da eletricidade.

**10.3.5** Sempre que for tecnicamente viável e necessário, devem ser projetados dispositivos de seccionamento que incorporem recursos fixos de equipotencialização e aterramento do circuito seccionado.

**10.3.6** Todo projeto deve prever condições para a adoção de aterramento temporário.

**10.3.7** O projeto das instalações elétricas deve ficar à disposição dos trabalhadores autorizados, das autoridades competentes e de outras pessoas autorizadas pela empresa e deve ser mantido atualizado.

**10.3.8** O projeto elétrico deve atender ao que dispõem as Normas Regulamentadoras de Saúde e Segurança no Trabalho, as regulamentações técnicas oficiais estabelecidas, e ser assinado por profissional legalmente habilitado.

**10.3.9** O memorial descritivo do projeto deve conter, no mínimo, os seguintes itens de segurança:

- a) especificação das características relativas à proteção contra choques elétricos, queimaduras e outros riscos adicionais;
- b) indicação de posição dos dispositivos de manobra dos circuitos elétricos: (Verde – “D”, desligado e Vermelho - “L”, ligado);
- c) descrição do sistema de identificação de circuitos elétricos e equipamentos, incluindo dispositivos de manobra, de controle, de proteção, de intertravamento, dos condutores e os próprios equipamentos e estruturas, definindo como tais indicações devem ser aplicadas fisicamente nos componentes das instalações;
- d) recomendações de restrições e advertências quanto ao acesso de pessoas aos componentes das instalações;
- e) precauções aplicáveis em face das influências externas;
- f) o princípio funcional dos dispositivos de proteção, constantes do projeto, destinados à segurança das pessoas;
- g) descrição da compatibilidade dos dispositivos de proteção com a instalação elétrica.

**10.3.10** Os projetos devem assegurar que as instalações proporcionem aos trabalhadores iluminação adequada e uma posição de trabalho segura, de acordo com a NR 17 – Ergonomia.

#### **10.4 - SEGURANÇA NA CONSTRUÇÃO, MONTAGEM, OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO**

**10.4.1** As instalações elétricas devem ser construídas, montadas, operadas, reformadas, ampliadas, reparadas e inspecionadas de forma a garantir a segurança e a saúde dos

trabalhadores e dos usuários, e serem supervisionadas por profissional autorizado, conforme dispõe esta NR.

**10.4.2** Nos trabalhos e nas atividades referidas devem ser adotadas medidas preventivas destinadas ao controle dos riscos adicionais, especialmente quanto a altura, confinamento, campos elétricos e magnéticos, explosividade, umidade, poeira, fauna e flora e outros agravantes, adotando-se a sinalização de segurança.

**10.4.3** Nos locais de trabalho só podem ser utilizados equipamentos, dispositivos e ferramentas elétricas compatíveis com a instalação elétrica existente, preservando-se as características de proteção, respeitadas as recomendações do fabricante e as influências externas.

**10.4.3.1** Os equipamentos, dispositivos e ferramentas que possuam isolamento elétrico devem estar adequados às tensões envolvidas, e serem inspecionados e testados de acordo com as regulamentações existentes ou recomendações dos fabricantes.

**10.4.4** As instalações elétricas devem ser mantidas em condições seguras de funcionamento e seus sistemas de proteção devem ser inspecionados e controlados periodicamente, de acordo com as regulamentações existentes e definições de projetos.

**10.4.4.1** Os locais de serviços elétricos, compartimentos e invólucros de equipamentos e instalações elétricas são exclusivos para essa finalidade, sendo expressamente proibido utilizá-los para armazenamento ou guarda de quaisquer objetos.

**10.4.5** Para atividades em instalações elétricas deve ser garantida ao trabalhador iluminação adequada e uma posição de trabalho segura, de acordo com a NR 17 – Ergonomia, de forma a permitir que ele disponha dos membros superiores livres para a realização das tarefas.

**10.4.6** Os ensaios e testes elétricos laboratoriais e de campo ou comissionamento de instalações elétricas devem atender à regulamentação estabelecida nos itens 10.6 e 10.7, e somente podem ser realizados por trabalhadores que atendam às condições de qualificação, habilitação, capacitação e autorização estabelecidas nesta NR.

## **10.5 - SEGURANÇA EM INSTALAÇÕES ELÉTRICAS DESENERGIZADAS**

**10.5.1** Somente serão consideradas desenergizadas as instalações elétricas liberadas para trabalho, mediante os procedimentos apropriados, obedecida a seqüência abaixo:

- a) seccionamento;
- b) impedimento de reenergização;
- c) constatação da ausência de tensão;
- d) instalação de aterramento temporário com equipotencialização dos condutores dos circuitos;
- e) proteção dos elementos energizados existentes na zona controlada (Anexo I);
- f) instalação da sinalização de impedimento de reenergização.

**10.5.2** O estado de instalação desenergizada deve ser mantido até a autorização para reenergização, devendo ser reenergizada respeitando a seqüência de procedimentos abaixo:

- a) retirada das ferramentas, utensílios e equipamentos;
- b) retirada da zona controlada de todos os trabalhadores não envolvidos no processo de reenergização;
- c) remoção do aterramento temporário, da equipotencialização e das proteções adicionais;
- d) remoção da sinalização de impedimento de reenergização;
- e) destravamento, se houver, e religação dos dispositivos de seccionamento.

**10.5.3** As medidas constantes das alíneas apresentadas nos itens 10.5.1 e 10.5.2 podem ser alteradas, substituídas, ampliadas ou eliminadas, em função das peculiaridades de cada situação, por profissional legalmente habilitado, autorizado e mediante justificativa técnica previamente formalizada, desde que seja mantido o mesmo nível de segurança originalmente preconizado.

**10.5.4** Os serviços a serem executados em instalações elétricas desligadas, mas com possibilidade de energização, por qualquer meio ou razão, devem atender ao que estabelece o disposto no item 10.6.

## **10.6 - SEGURANÇA EM INSTALAÇÕES ELÉTRICAS ENERGIZADAS**

**10.6.1** As intervenções em instalações elétricas com tensão igual ou superior a 50 Volts em corrente alternada ou superior a 120 Volts em corrente contínua somente podem ser realizadas por trabalhadores que atendam ao que estabelece o item 10.8 desta Norma.

**10.6.1.1** Os trabalhadores de que trata o item anterior devem receber treinamento de segurança para trabalhos com instalações elétricas energizadas, com currículo mínimo, carga horária e demais determinações estabelecidas no Anexo II desta NR.

**10.6.1.2** As operações elementares como ligar e desligar circuitos elétricos, realizadas em baixa tensão, com materiais e equipamentos elétricos em perfeito estado de conservação, adequados para operação, podem ser realizadas por qualquer pessoa não advertida.

**10.6.2** Os trabalhos que exigem o ingresso na zona controlada devem ser realizados mediante procedimentos específicos respeitando as distâncias previstas no Anexo I.

**10.6.3** Os serviços em instalações energizadas, ou em suas proximidades devem ser suspensos de imediato na iminência de ocorrência que possa colocar os trabalhadores em perigo.

**10.6.4** Sempre que inovações tecnológicas forem implementadas ou para a entrada em operações de novas instalações ou equipamentos elétricos devem ser previamente elaboradas análises de risco, desenvolvidas com circuitos desenergizados, e respectivos procedimentos de trabalho.

**10.6.5** O responsável pela execução do serviço deve suspender as atividades quando verificar situação ou condição de risco não prevista, cuja eliminação ou neutralização imediata não seja possível.

## **10.7 - TRABALHOS ENVOLVENDO ALTA TENSÃO (AT)**

**10.7.1** Os trabalhadores que intervenham em instalações elétricas energizadas com alta tensão, que exerçam suas atividades dentro dos limites estabelecidos como zonas controladas e de risco, conforme Anexo I, devem atender ao disposto no item 10.8 desta NR.

**10.7.2** Os trabalhadores de que trata o item 10.7.1 devem receber treinamento de segurança, específico em segurança no Sistema Elétrico de Potência (SEP) e em suas proximidades, com currículo mínimo, carga horária e demais determinações estabelecidas no Anexo II desta NR.

**10.7.3** Os serviços em instalações elétricas energizadas em AT, bem como aqueles executados no Sistema Elétrico de Potência – SEP, não podem ser realizados individualmente.

**10.7.4** Todo trabalho em instalações elétricas energizadas em AT, bem como aquelas que interajam com o SEP, somente pode ser realizado mediante ordem de serviço específica para data e local, assinada por superior responsável pela área.

**10.7.5** Antes de iniciar trabalhos em circuitos energizados em AT, o superior imediato e a equipe, responsáveis pela execução do serviço, devem realizar uma avaliação prévia, estudar e planejar as atividades e ações a serem desenvolvidas de forma a atender os princípios técnicos básicos e as melhores técnicas de segurança em eletricidade aplicáveis ao serviço.

**10.7.6** Os serviços em instalações elétricas energizadas em AT somente podem ser realizados quando houver procedimentos específicos, detalhados e assinados por profissional autorizado.

**10.7.7** A intervenção em instalações elétricas energizadas em AT dentro dos limites estabelecidos como zona de risco, conforme Anexo I desta NR, somente pode ser realizada mediante a desativação, também conhecida como bloqueio, dos conjuntos e dispositivos de religamento automático do circuito, sistema ou equipamento.

**10.7.7.1** Os equipamentos e dispositivos desativados devem ser sinalizados com identificação da condição de desativação, conforme procedimento de trabalho específico padronizado.

**10.7.8** Os equipamentos, ferramentas e dispositivos isolantes ou equipados com materiais isolantes, destinados ao trabalho em alta tensão, devem ser submetidos a testes elétricos ou ensaios de laboratório periódicos, obedecendo-se as especificações do fabricante, os procedimentos da empresa e na ausência desses, anualmente.

**10.7.9** Todo trabalhador em instalações elétricas energizadas em AT, bem como aqueles envolvidos em atividades no SEP devem dispor de equipamento que permita a comunicação

permanente com os demais membros da equipe ou com o centro de operação durante a realização do serviço.

## **10.8 - HABILITAÇÃO, QUALIFICAÇÃO, CAPACITAÇÃO E AUTORIZAÇÃO DOS TRABALHADORES**

**10.8.1** É considerado trabalhador qualificado aquele que comprovar conclusão de curso específico na área elétrica reconhecido pelo Sistema Oficial de Ensino.

**10.8.2** É considerado profissional legalmente habilitado o trabalhador previamente qualificado e com registro no competente conselho de classe.

**10.8.3** É considerado trabalhador capacitado aquele que atenda às seguintes condições, simultaneamente:

- a) receba capacitação sob orientação e responsabilidade de profissional habilitado e autorizado;
- b) trabalhe sob a responsabilidade de profissional habilitado e autorizado.

**10.8.3.1** A capacitação só terá validade para a empresa que o capacitou e nas condições estabelecidas pelo profissional habilitado e autorizado responsável pela capacitação.

**10.8.4** São considerados autorizados os trabalhadores qualificados ou capacitados e os profissionais habilitados, com anuência formal da empresa.

**10.8.5** A empresa deve estabelecer sistema de identificação que permita a qualquer tempo conhecer a abrangência da autorização de cada trabalhador, conforme o item 10.8.4.

**10.8.6** Os trabalhadores autorizados a trabalhar em instalações elétricas devem ter essa condição consignada no sistema de registro de empregado da empresa.

**10.8.7** Os trabalhadores autorizados a intervir em instalações elétricas devem ser submetidos a exame de saúde compatível com as atividades a serem desenvolvidas, realizado em conformidade com a NR 7 e registrado em seu prontuário médico.



**10.8.8** Os trabalhadores autorizados a intervir em instalações elétricas devem possuir treinamento específico sobre os riscos decorrentes do emprego da energia elétrica e as principais medidas de prevenção de acidentes em instalações elétricas, de acordo com o estabelecido no Anexo II desta NR.

**10.8.8.1** A empresa concederá autorização na forma desta NR aos trabalhadores capacitados ou qualificados e aos profissionais habilitados que tenham participado com avaliação e aproveitamento satisfatórios dos cursos constantes do ANEXO II desta NR.

**10.8.8.2** Deve ser realizado um treinamento de reciclagem bienal e sempre que ocorrer alguma das situações a seguir:

- a) troca de função ou mudança de empresa;
- b) retorno de afastamento ao trabalho ou inatividade, por período superior a três meses;
- c) modificações significativas nas instalações elétricas ou troca de métodos, processos e organização do trabalho.

**10.8.8.3** A carga horária e o conteúdo programático dos treinamentos de reciclagem destinados ao atendimento das alíneas “a”, “b” e “c” do item 10.8.8.2 devem atender as necessidades da situação que o motivou.

**10.8.8.4** Os trabalhos em áreas classificadas devem ser precedidos de treinamento específico de acordo com risco envolvido.

**10.8.9** Os trabalhadores com atividades não relacionadas às instalações elétricas desenvolvidas em zona livre e na vizinhança da zona controlada, conforme define esta NR, devem ser instruídos formalmente com conhecimentos que permitam identificar e avaliar seus possíveis riscos e adotar as precauções cabíveis.

## **10.9 - PROTEÇÃO CONTRA INCÊNDIO E EXPLOSÃO**

**10.9.1** As áreas onde houver instalações ou equipamentos elétricos devem ser dotadas de proteção contra incêndio e explosão, conforme dispõe a NR 23 – Proteção Contra Incêndios.

**10.9.2** Os materiais, peças, dispositivos, equipamentos e sistemas destinados à aplicação em instalações elétricas de ambientes com atmosferas potencialmente explosivas devem ser avaliados quanto à sua conformidade, no âmbito do Sistema Brasileiro de Certificação.

**10.9.3** Os processos ou equipamentos susceptíveis de gerar ou acumular eletricidade estática devem dispor de proteção específica e dispositivos de descarga elétrica.

**10.9.4** Nas instalações elétricas de áreas classificadas ou sujeitas a risco acentuado de incêndio ou explosões, devem ser adotados dispositivos de proteção, como alarme e seccionamento automático para prevenir sobretensões, sobrecorrentes, falhas de isolamento, aquecimentos ou outras condições anormais de operação.

**10.9.5** Os serviços em instalações elétricas nas áreas classificadas somente poderão ser realizados mediante permissão para o trabalho com liberação formalizada, conforme estabelece o item 10.5 ou supressão do agente de risco que determina a classificação da área.

## **10.10 - SINALIZAÇÃO DE SEGURANÇA**

**10.10.1** Nas instalações e serviços em eletricidade deve ser adotada sinalização adequada de segurança, destinada à advertência e à identificação, obedecendo ao disposto na NR-26 – Sinalização de Segurança, de forma a atender, dentre outras, as situações a seguir:

- a) identificação de circuitos elétricos;
- b) travamentos e bloqueios de dispositivos e sistemas de manobra e comandos;
- c) restrições e impedimentos de acesso;
- d) delimitações de áreas;
- e) sinalização de áreas de circulação, de vias públicas, de veículos e de movimentação de cargas;
- f) sinalização de impedimento de energização;
- g) identificação de equipamento ou circuito impedido.

## **10.11 - PROCEDIMENTOS DE TRABALHO**

**10.11.1** Os serviços em instalações elétricas devem ser planejados e realizados em conformidade com procedimentos de trabalho específicos, padronizados, com descrição detalhada de cada tarefa, passo a passo, assinados por profissional que atenda ao que estabelece o item 10.8 desta NR.

**10.11.2** Os serviços em instalações elétricas devem ser precedidos de ordens de serviço específicas, aprovadas por trabalhador autorizado, contendo, no mínimo, o tipo, a data, o local e as referências aos procedimentos de trabalho a serem adotados.

**10.11.3** Os procedimentos de trabalho devem conter, no mínimo, objetivo, campo de aplicação, base técnica, competências e responsabilidades, disposições gerais, medidas de controle e orientações finais.

**10.11.4** Os procedimentos de trabalho, o treinamento de segurança e saúde e a autorização de que trata o item 10.8 devem ter a participação em todo processo de desenvolvimento do Serviço Especializado de Engenharia de Segurança e Medicina do Trabalho - SESMT, quando houver.

**10.11.5** A autorização referida no item 10.8 deve estar em conformidade com o treinamento ministrado, previsto no Anexo II desta NR.

**10.11.6** Toda equipe deverá ter um de seus trabalhadores indicado e em condições de exercer a supervisão e condução dos trabalhos.

**10.11.7** Antes de iniciar trabalhos em equipe os seus membros, em conjunto com o responsável pela execução do serviço, devem realizar uma avaliação prévia, estudar e planejar as atividades e ações a serem desenvolvidas no local, de forma a atender os princípios técnicos básicos e as melhores técnicas de segurança aplicáveis ao serviço.

**10.11.8** A alternância de atividades deve considerar a análise de riscos das tarefas e a competência dos trabalhadores envolvidos, de forma a garantir a segurança e a saúde no trabalho.

**10.12 - SITUAÇÃO DE EMERGÊNCIA**

**10.12.1** As ações de emergência que envolvam as instalações ou serviços com eletricidade devem constar do plano de emergência da empresa.

**10.12.2** Os trabalhadores autorizados devem estar aptos a executar o resgate e prestar primeiros socorros a acidentados, especialmente por meio de reanimação cardio-respiratória.

**10.12.3** A empresa deve possuir métodos de resgate padronizados e adequados às suas atividades, disponibilizando os meios para a sua aplicação.

**10.12.4** Os trabalhadores autorizados devem estar aptos a manusear e operar equipamentos de prevenção e combate a incêndio existentes nas instalações elétricas.

### **10.13 – RESPONSABILIDADES**

**10.13.1** As responsabilidades quanto ao cumprimento desta NR são solidárias aos contratantes e contratados envolvidos.

**10.13.2** É de responsabilidade dos contratantes manter os trabalhadores informados sobre os riscos a que estão expostos, instruindo-os quanto aos procedimentos e medidas de controle contra os riscos elétricos a serem adotados.

**10.13.3** Cabe à empresa, na ocorrência de acidentes de trabalho envolvendo instalações e serviços em eletricidade, propor e adotar medidas preventivas e corretivas.

**10.13.4** Cabe aos trabalhadores:

- a) zelar pela sua segurança e saúde e a de outras pessoas que possam ser afetadas por suas ações ou omissões no trabalho;
- b) responsabilizar-se junto com a empresa pelo cumprimento das disposições legais e regulamentares, inclusive quanto aos procedimentos internos de segurança e saúde; e
- c) comunicar, de imediato, ao responsável pela execução do serviço as situações que considerar de risco para sua segurança e saúde e a de outras pessoas.

### **10.14 - DISPOSIÇÕES FINAIS**

**10.14.1** Os trabalhadores devem interromper suas tarefas exercendo o direito de recusa, sempre que constatarem evidências de riscos graves e iminentes para sua segurança e saúde ou a de outras pessoas, comunicando imediatamente o fato a seu superior hierárquico, que diligenciará as medidas cabíveis.

**10.14.2** As empresas devem promover ações de controle de riscos originados por outrem em suas instalações elétricas e oferecer, de imediato, quando cabível, denúncia aos órgãos competentes.

**10.14.3** Na ocorrência do não cumprimento das normas constantes nesta NR, o MTE adotará as providências estabelecidas na NR 3.

**10.14.4** A documentação prevista nesta NR deve estar permanentemente à disposição dos trabalhadores que atuam em serviços e instalações elétricas, respeitadas as abrangências, limitações e interferências nas tarefas.

**10.14.5** A documentação prevista nesta NR deve estar, permanentemente, à disposição das autoridades competentes.

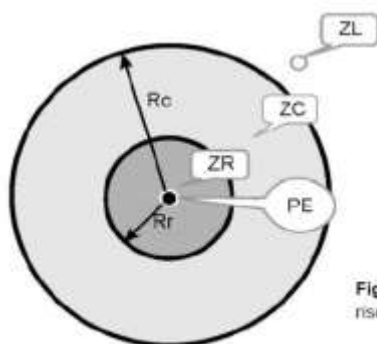
**10.14.6** Esta NR não é aplicável a instalações elétricas alimentadas por extra-baixa tensão.

## ANEXO I DA NR-10

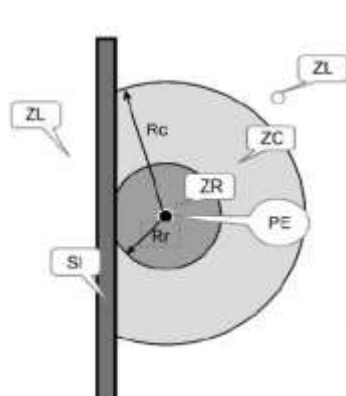
## ZONA DE RISCO E ZONA CONTROLADA

TABELA DE RAIOS DE DELIMITAÇÃO DE ZONAS DE RISCO, CONTROLADA E LIVRE			
Faixa de tensão nominal da instalação elétrica em kV		RR – Raio de delimitação entre zona de risco e controlada em metros	RC – Raio de delimitação entre zona controlada e livre em metros
< 1		0,20	0,70
≥ 1	e < 3	0,22	1,22
≥ 3	e < 6	0,25	1,25
≥ 6	e < 10	0,35	1,35
≥ 10	e < 15	0,38	1,38
≥ 15	e < 20	0,40	1,40
≥ 20	e < 30	0,56	1,56
≥ 30	e < 36	0,58	1,58
≥ 36	e < 45	0,63	1,63
≥ 45	e < 60	0,83	1,83
≥ 60	e < 70	0,90	1,90
≥ 70	e < 110	1,00	2,00
≥ 110	e < 132	1,10	3,10
≥ 132	e < 150	1,20	3,20
≥ 150	e < 220	1,60	3,60
≥ 220	e < 275	1,80	3,80
≥ 275	e < 380	2,50	4,50
≥ 380	e < 480	3,20	5,20
≥ 480	e < 700	5,20	7,20

Figura 1 - Distâncias no ar que delimitam radialmente as zonas de risco, controlada e livre



**Fig. 1** – Distâncias no ar que delimitam radialmente as zonas de risco, controlada e livre – NR10.



- ZL** = Zona livre.
- ZC** = Zona controlada, restrita a trabalhadores autorizados.
- ZR** = Zona de risco, restrita a trabalhadores autorizados e com adoção de técnicas, instrumentos e equipamentos apropriados ao trabalho.
- PE** = Ponto da instalação energizada.
- SI** = Superfície isolante construída com material resistente e dotada de todos os dispositivos de segurança.

**Fig. 2** – Distâncias no ar que delimitam radialmente as zonas de risco, controlada e livre, com interposição de superfície de separação física adequada – NR10

**ANEXO II DA NR-10****TREINAMENTO****1. CURSO BÁSICO – SEGURANÇA EM INSTALAÇÕES E SERVIÇOS COM ELETRICIDADE**

I - Para os trabalhadores autorizados: carga horária mínima – 40h:

Programação Mínima:

1. introdução à segurança com eletricidade.
  
2. riscos em instalações e serviços com eletricidade:
  - a) o choque elétrico, mecanismos e efeitos;
  - b) arcos elétricos; queimaduras e quedas;
  - c) campos eletromagnéticos.
3. Técnicas de Análise de Risco.
  
4. Medidas de Controle do Risco Elétrico:
  - a) desenergização.
  - b) aterramento funcional (TN / TT / IT); de proteção; temporário;
  - c) equipotencialização;
  - d) seccionamento automático da alimentação;
  - e) dispositivos a corrente de fuga;
  - f) extra baixa tensão;
  - g) barreiras e invólucros;
  - h) bloqueios e impedimentos;
  - i) obstáculos e anteparos;
  - j) isolamento das partes vivas;
  - k) isolação dupla ou reforçada;
  - l) colocação fora de alcance;



m) separação elétrica.

5. Normas Técnicas Brasileiras – NBR da ABNT: NBR-5410, NBR 14039 e outras;

6. Regulamentações do MTE:

a) NRs;

b) NR-10 (Segurança em Instalações e Serviços com Eletricidade);

c) qualificação; habilitação; capacitação e autorização.

7. Equipamentos de proteção coletiva.

8. Equipamentos de proteção individual.

9. Rotinas de trabalho – Procedimentos.

a) instalações desenergizadas;

b) liberação para serviços;

c) sinalização;

d) inspeções de áreas, serviços, ferramental e equipamento;

10. Documentação de instalações elétricas.

11. Riscos adicionais:

a) altura;

b) ambientes confinados;

c) áreas classificadas;

d) umidade;

e) condições atmosféricas.

12. Proteção e combate a incêndios:

a) noções básicas;

- b) medidas preventivas;
- c) métodos de extinção;
- d) prática;

#### 13. Acidentes de origem elétrica:

- a) causas diretas e indiretas;
- b) discussão de casos;

#### 14. Primeiros socorros:

- a) noções sobre lesões;
- b) priorização do atendimento;
- c) aplicação de respiração artificial;
- d) massagem cardíaca;
- e) técnicas para remoção e transporte de acidentados;
- f) práticas.

#### 15. Responsabilidades.

## **2. CURSO COMPLEMENTAR – SEGURANÇA NO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA (SEP) E EM SUAS PROXIMIDADES.**

É pré-requisito para frequentar este curso complementar, ter participado, com aproveitamento satisfatório, do curso básico definido anteriormente.

Carga horária mínima – 40h

(\*) Estes tópicos deverão ser desenvolvidos e dirigidos especificamente para as condições de trabalho características de cada ramo, padrão de operação, de nível de tensão e de outras peculiaridades específicas ao tipo ou condição especial de atividade, sendo obedecida a hierarquia no aperfeiçoamento técnico do trabalhador.

I - Programação Mínima:

1. Organização do Sistema Elétrico de Potencia – SEP.
2. Organização do trabalho:
  - a) programação e planejamento dos serviços;
  - b) trabalho em equipe;
  - c) prontuário e cadastro das instalações;
  - d) métodos de trabalho; e
  - e) comunicação.
3. Aspectos comportamentais.
4. Condições impeditivas para serviços.
5. Riscos típicos no SEP e sua prevenção (\*):
  - a) proximidade e contatos com partes energizadas;
  - b) indução;
  - c) descargas atmosféricas;
  - d) estática;
  - e) campos elétricos e magnéticos;
  - f) comunicação e identificação; e
  - g) trabalhos em altura, máquinas e equipamentos especiais.
6. Técnicas de análise de Risco no S E P (\*)
7. Procedimentos de trabalho – análise e discussão. (\*)
8. Técnicas de trabalho sob tensão: (\*)
  - a) em linha viva;
  - b) ao potencial;
  - c) em áreas internas;
  - d) trabalho a distância;

- e) trabalhos noturnos; e
- f) ambientes subterrâneos.

9. Equipamentos e ferramentas de trabalho (escolha, uso, conservação, verificação, ensaios) (\*).

10. Sistemas de proteção coletiva (\*).

11. Equipamentos de proteção individual (\*).

12. Posturas e vestuários de trabalho (\*).

13. Segurança com veículos e transporte de pessoas, materiais e equipamentos(\*).

14. Sinalização e isolamento de áreas de trabalho(\*).

15. Liberação de instalação para serviço e para operação e uso (\*).

16. Treinamento em técnicas de remoção, atendimento, transporte de acidentados (\*).

17. Acidentes típicos (\*) – Análise, discussão, medidas de proteção.

18. Responsabilidades (\*).

## GLOSSÁRIO

**Alta Tensão (AT):** tensão superior a 1000 volts em corrente alternada ou 1500 volts em corrente contínua, entre fases ou entre fase e terra.

**Área Classificada:** local com potencialidade de ocorrência de atmosfera explosiva.

**Aterramento Elétrico Temporário:** ligação elétrica efetiva confiável e adequada intencional à terra, destinada a garantir a equipotencialidade e mantida continuamente durante a intervenção na instalação elétrica.

**Atmosfera Explosiva:** mistura com o ar, sob condições atmosféricas, de substâncias inflamáveis na forma de gás, vapor, névoa, poeira ou fibras, na qual após a ignição a combustão se propaga.

**Baixa Tensão (BT):** tensão superior a 50 volts em corrente alternada ou 120 volts em corrente contínua e igual ou inferior a 1000 volts em corrente alternada ou 1500 volts em corrente contínua, entre fases ou entre fase e terra.

**Barreira:** dispositivo que impede qualquer contato com partes energizadas das instalações elétricas.

**Direito de Recusa:** instrumento que assegura ao trabalhador a interrupção de uma atividade de trabalho por considerar que ela envolve grave e iminente risco para sua segurança e saúde ou de outras pessoas.

**Equipamento de Proteção Coletiva (EPC):** dispositivo, sistema, ou meio, fixo ou móvel de abrangência coletiva, destinado a preservar a integridade física e a saúde dos trabalhadores, usuários e terceiros.

**Equipamento Segregado:** equipamento tornado inacessível por meio de invólucro ou barreira.

**Extra-Baixa Tensão (EBT):** tensão não superior a 50 volts em corrente alternada ou 120 volts em corrente contínua, entre fases ou entre fase e terra.

**Influências Externas:** variáveis que devem ser consideradas na definição e seleção de medidas de proteção para segurança das pessoas e desempenho dos componentes da instalação.

**Instalação Elétrica:** conjunto das partes elétricas e não elétricas associadas e com características coordenadas entre si, que são necessárias ao funcionamento de uma parte determinada de um sistema elétrico.

**Instalação Liberada para Serviços (BT/AT):** aquela que garanta as condições de segurança ao trabalhador por meio de procedimentos e equipamentos adequados desde o início até o final dos trabalhos e liberação para uso.

**Impedimento de Reenergização:** condição que garante a não energização do circuito através de recursos e procedimentos apropriados, sob controle dos trabalhadores envolvidos nos serviços.

**Invólucro:** envoltório de partes energizadas destinado a impedir qualquer contato com partes internas.

**Isolamento Elétrico:** processo destinado a impedir a passagem de corrente elétrica, por interposição de materiais isolantes.

**Obstáculo:** elemento que impede o contato acidental, mas não impede o contato direto por ação deliberada.

**Perigo:** situação ou condição de risco com probabilidade de causar lesão física ou dano à saúde das pessoas por ausência de medidas de controle.

**Pessoa Advertida:** pessoa informada ou com conhecimento suficiente para evitar os perigos da eletricidade.

**Procedimento:** seqüência de operações a serem desenvolvidas para realização de um determinado trabalho, com a inclusão dos meios materiais e humanos, medidas de segurança e circunstâncias que impossibilitem sua realização.

**Prontuário:** sistema organizado de forma a conter uma memória dinâmica de informações pertinentes às instalações e aos trabalhadores.

**Risco:** capacidade de uma grandeza com potencial para causar lesões ou danos à saúde das pessoas.

**Riscos Adicionais:** todos os demais grupos ou fatores de risco, além dos elétricos, específicos de cada ambiente ou processos de Trabalho que, direta ou indiretamente, possam afetar a segurança e a saúde no trabalho.

**Sinalização:** procedimento padronizado destinado a orientar, alertar, avisar e advertir.

**Sistema Elétrico:** circuito ou circuitos elétricos inter-relacionados destinados a atingir um determinado objetivo.

**Sistema Elétrico de Potência (SEP):** conjunto das instalações e equipamentos destinados à geração, transmissão e distribuição de energia elétrica até a medição, inclusive.

**Tensão de Segurança:** extra baixa tensão originada em uma fonte de segurança.

**Trabalho em Proximidade:** trabalho durante o qual o trabalhador pode entrar na zona controlada, ainda que seja com uma parte do seu corpo ou com extensões condutoras, representadas por materiais, ferramentas ou equipamentos que manipule.

**Travamento:** ação destinada a manter, por meios mecânicos, um dispositivo de manobra fixo numa determinada posição, de forma a impedir uma operação não autorizada.

**Zona de Risco:** entorno de parte condutora energizada, não segregada, acessível inclusive acidentalmente, de dimensões estabelecidas de acordo com o nível de tensão, cuja aproximação só é permitida a profissionais autorizados e com a adoção de técnicas e instrumentos apropriados de trabalho.

**Zona Controlada:** entorno de parte condutora energizada, não segregada, acessível, de dimensões estabelecidas de acordo com o nível de tensão, cuja aproximação só é permitida a profissionais autorizados.