

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO
MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO

CONTRIBUIÇÕES PARA REGULAMENTAÇÃO DA TECNOLOGIA
PLC NO BRASIL COM BASE EM TESTES DE CAMPO

Fábio da Silva Marques

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Granato de Araújo

GOIÂNIA, 2009

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.



Termo de Ciência e de Autorização para Disponibilizar as Teses e Dissertações Eletrônicas (TEDE) na Biblioteca Digital da UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás–UFG a disponibilizar gratuitamente através da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações – BDTD/UFG, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

1. Identificação do material bibliográfico: ☒ Dissertação ☐ Tese

2. Identificação da Tese ou Dissertação

Autor(a):	Fábio da Silva Marques				
CPF:		E-mail:	fabio@ifgoias.edu.br		
Seu e-mail pode ser disponibilizado na página? ☒ Sim ☐ Não					
Vínculo Empregatício do autor	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás - IFGOIÁS				
Agência de fomento:					Sigla:
País:	Brasil	UF:	GO	CNPJ:	
Título:	Contribuições para regulamentação da tecnologia PLC no Brasil com base em testes de campo				
Palavras-chave:	PLC, desempenho, interferência, capacidade do canal, HomePlug.				
Título em outra língua:	Contributions to regulation of PLC technology in Brazil based on trial test				
Palavras-chave em outra língua:	PLC, performance, interference, channel capacity, HomePlug				
Área de concentração:	Engenharia da Computação				
Data defesa: (dd/mm/aa)	27/02/2009				
Programa de Pós-Graduação:	Mestrado em Engenharia e de Computação				
Orientador(a):	Prof. Dr. Sérgio Granato de Araújo				
CPF:		E-mail:	granato@eee.ufg.br		
Co-orientador(a):					
CPF:		E-mail:			

3. Informações de acesso ao documento:

Liberção para disponibilização?¹ ☒ total ☐ parcial

Em caso de disponibilização parcial, assinale as permissões:

- ☐ Capítulos. Especifique: _____
- ☐ Outras restrições: _____

Havendo concordância com a disponibilização eletrônica, torna-se imprescindível o envio do(s) arquivo(s) em formato digital PDF ou DOC da tese ou dissertação.

O Sistema da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações garante aos autores, que os arquivos contendo eletronicamente as teses e ou dissertações, antes de sua disponibilização, receberão procedimentos de segurança, criptografia (para não permitir cópia e extração de conteúdo, permitindo apenas impressão fraca) usando o padrão do Acrobat.

Data: / /2009

Assinatura do(a) autor(a) _____

¹ Em caso de restrição, esta poderá ser mantida por até um ano a partir da data de defesa. A extensão deste prazo suscita justificativa junto à coordenação do curso. Todo resumo e metadados ficarão sempre disponibilizados.

Fábio da Silva Marques

**CONTRIBUIÇÕES PARA REGULAMENTAÇÃO DA TECNOLOGIA
PLC NO BRASIL COM BASE EM TESTES DE CAMPO**

Dissertação apresentada ao Programa de **Pós-Graduação Strictu Sensu** da Escola de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Federal de Goiás, para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Elétrica e de Computação**.

Área de Concentração: Engenharia da Computação

Linha de Pesquisa: Telecomunicações

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Granato de Araújo

GOIÂNIA, 2009

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
(GPT/BC/UFG)

Marques, Fábio da Silva.
M357c Contribuições para regulamentação da tecnologia PLC no Brasil
com base em testes de campo [manuscrito] / Fábio da Silva Marques.
– 2009.
xv, 104 f. : il., figs., tabs..

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Granato de Araújo.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Goiás,
Escola de Engenharia Elétrica e Computação, 2009

Bibliografia: f.90-94.
Inclui lista de figuras, tabelas e de publicações relacionadas a este
trabalho.
Anexo.

1. Internet (Redes de computação) – Transmissão de dados –
Redes elétricas 2. PLC (Power Line Communications) 3. Smart Grid
(Redes elétricas inteligentes) 4. IntelliGrid (Redes elétricas inteli-
gentes) 5. Tecnologia – Regulamentação I. Araújo, Sérgio Granato de
II. Universidade Federal de Goiás, **Escola de Engenharia Elétrica e
de Computação** III. Título.

CDU: 004.738.5:621.316

CONTRIBUIÇÕES PARA REGULAMENTAÇÃO DA TECNOLOGIA PLC NO BRASIL COM BASE EM TESTES DE CAMPO

Esta Dissertação de mestrado foi submetida à Escola de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Federal de Goiás, como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau do Título de Mestre em Engenharia Elétrica e de Computação.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Sérgio Granato de Araújo
(Orientador)

Prof. Dr. Rodrigo Pinto Lemos.

Prof. Dr. Marcos Antônio Cardoso de Lima

Prof. Dr. João Batista José Pereira

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR:

Fábio da Silva Marques

TÍTULO DO MESTRADO:

Contribuições para regulamentação da tecnologia PLC no Brasil com Base em Testes de Campo

GRAU/ANO:

Mestre/2009

É concedida à Universidade Federal de Goiás a permissão para reproduzir cópias desta Dissertação e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação pode ser reproduzida sem a autorização por escrito dos mesmos.

Fábio da Silva Marques

fabio@ifgoias.edu.br

Dedico este trabalho aos meus pais (Lurdes e Osvaldo), por não medirem esforços para que minha formação, tanto pessoal quanto acadêmica, fosse a melhor possível; ao meu filho Henrique fonte de inspiração e à minha esposa Sheila, pela dedicação e companheirismo.

Fábio da Silva Marques.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que me iluminou no meu caminho. Também ao CEFET-GO, que faz parte de minha vida desde antes do início de nossa vida profissional, e me proporcionou não só uma formação profissional de qualidade, mas também de responsabilidade e caráter. Agradeço ao meu orientador Prof. Sérgio Granato, pela disponibilidade, pela confiança e pela oportunidade que me foi dada de trabalhar com essa nova tecnologia.

Agradeço aos amigos do CEFET, representados pelos professores João Batista José Pereira e Samir Youssif Wehbi Arabi, que me ajudaram nos momentos de dificuldade, disponibilizando as informações e o apoio necessário.

Agradeço aos colegas da CELG, que me ajudaram, disponibilizando as informações e até as instrumentações fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

RESUMO

Este trabalho descreve a tecnologia de transmissão de dados denominada PLC (*Power Line Communications*), que tem demandado discussões no sentido de se avaliar o potencial de interferência nos serviços atualmente em operação e que utilizam radiofrequências na faixa de 1,705MHz a 30MHz. São descritos os equipamentos utilizados nesse tipo de tecnologia, bem como seu princípio de funcionamento baseados em testes de campo em ambientes internos e externos. Também é apresentado neste trabalho um estudo de caso acerca da influência causada no desempenho em uma rede PLC em virtude de interferências eletromagnéticas. Assim, foi possível determinar a influência de ruídos oriundos de equipamentos eletro-eletrônicos no desempenho de uma rede PLC e quais tipos de equipamentos são mais prejudiciais à comunicação, e finalmente apontar possíveis sugestões como o uso de técnicas de mitigação em que a tecnologia tem maior potencial de sucesso contribuindo para a regulamentação e padronização no Brasil.

Palavras-Chave – PLC, desempenho, interferência, capacidade do canal, Homeplug.

ABSTRACT

This work describes the data transmission technology called PLC (Power Line Communications) that demanded discussions in order to assess the potential for interference in services currently in operation and using radio frequency in the range of 1,705MHz to 30MHz. The equipment used in this type of technology, and its principle of operation principle based on the field trials in indoor and outdoor environments are described. It is presented in this paper a case study about the influence caused in carrying on a network PLC because of electromagnetic interference. It was possible determining the noise influence from electric-electronic equipment in the performance of a network PLC and what types of equipment are more harmful to the communication. Finally some suggestions are pointing, as the use of mitigation techniques which technology has greatest potential for success by contributing to the regulation and standardization in Brazil.

Keywords – PLC, performance, interference, channel capacity, Homeplug.

SUMÁRIO

RESUMO	vii
ABSTRACT	viii
LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE TABELAS	xiii
LISTA DE PUBLICAÇÕES RELACIONADAS A ESTE TRABALHO	xvi
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	1
1.1 Motivação para a Utilização da Tecnologia PLC	1
1.2 Padronização e Regulamentação	4
1.3 Roteiro de Trabalho	5
CAPÍTULO 2 – SMART GRID	7
2.1 Introdução	7
2.2 Características	7
2.3 Equipamentos Utilizados	9
2.4 Implantações	12
CAPÍTULO 3 - TECNOLOGIA PLC	16
3.1. Introdução	16
3.2. Histórico	16
3.3. Rede PLC	21
3.3.1. Equipamentos que compõem a rede PLC	22
3.3.2. Topologia da Rede PLC	26
3.3.3. Padrão HomePlug	28
3.3.4. PLC em Média Tensão	29
3.4. Especificações Técnicas	30
3.4.1. Faixas de frequência	30
3.4.2. Técnicas de modulação	30
3.4.3. Correção de erros	32
3.5. Restrições de Operação e Dificuldades de Implementação	32
3.6 Arquitetura <i>IntelliGrid</i>	33
3.6.1 Necessidade para a Arquitetura <i>IntelliGrid</i>	35
3.6.2 Objetivos da Arquitetura <i>IntelliGrid</i>	36
3.6.3 Estrutura da Arquitetura <i>IntelliGrid</i>	37
CAPÍTULO 4 – TESTES DE CAMPO	39
4.1 Introdução	39
4.2 Estudo Teórico	40
4.3 Ambiente Indoor	44
4.4 Equipamentos Utilizados	45
4.5 Cenário do Ensaio	47
4.5.1 Local do ensaio	47
4.5.2 Topologia da rede	48
4.5.3 Configurações realizadas nos equipamentos	49

4.6 Procedimentos Realizados e Apresentação dos Resultados	50
4.7 Análise dos Resultados	56
4.8 Ambiente Outdoor	63
4.8.1 Escolha das posições dos equipamentos PLC e equipamentos de medição	64
4.9 Conclusões sobre o Acesso em Faixa Larga Utilizando Redes de Energia Elétrica no Brasil	67
5. 1 Introdução	69
5. 2 Regulamentação Brasileira para o PLC	69
5.3 Regulamentação de Testes de Desenvolvimento de Sistemas PLC em Empresas de Energia Elétrica	69
5.4 Ações de Regulamentação no Mundo	71
5.4.1 Situação – Europa	71
5.4.2 Situação – Estados Unidos	72
5.5 Projeto OPERA	73
5.5.1 Grupo de Trabalho 2 (Work package 2)	76
5.5.2 Campo de Teste: Iberdrola	77
5.5.3 Campo de Teste: Linz	81
5.5.4 Campo de Teste: ONI	83
5.5.5 Monitoramento do Canal PLC	86
5.5.6 Conclusões	86
<i>CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES</i>	88
6.1 Sugestões de Trabalhos Futuros	89
<i>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</i>	90
<i>ANEXO 01 – CONSULTA PÚBLICA ANATEL Nº 38</i>	95

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Medidores Inteligentes 04].....	10
Figura 2.2 – Medição Externa Centralizada[3].....	11
Figura 2.3 – Smart Grid [8].....	12
Figura 3.1 – Equipamentos de uma Rede PLC [15].....	21
Figura 3.2 – Exemplos de Modems PLC [20].....	22
Figura 3.3 – Exemplo de Repetidor PLC [20].....	23
Figura 3.4 – Exemplo de Master PLC [20].....	24
Figura 3.5 – Exemplos de Acopladores PLC [21].....	26
Figura 3.6 – Exemplo de uma Topologia de Rede PLC [15].....	28
Figura 3.7 – Adaptador HomePlug [22].....	29
Figura 3.8 – Faixas de Frequência na Rede PLC [24].....	30
Figura 3.9 – Técnicas de Modulação Utilizadas no PLC [19].....	31
Figura 4.1 – Desempenho Teórico <i>Indoor</i> : Taxa de Bits versus Relação Sinal-Ruído do Canal.....	42
Figura 4.2 – Desempenho Teórico <i>Outdoor</i> : Taxa de Bits versus Relação Sinal-Ruído do Canal.....	43
Figura 4.3 – Circuito do Filtro Passa-Alta	47
Figura 4.4 – Bancada de testes do CEFET-GO	48
Figura 4.5 – Equipamentos utilizados para os testes Indoor.....	49
Figura 4.6 – Bancada de testes do laboratório de eletricidade da UCG.....	49
Figura 4.7 – Tensão da rede elétrica.....	51
Figura 4.8 – Tensão de Saída do Divisor de Tensão (Sem Filtro Passa-Alta).....	51
Figura 4.9 – Rede Elétrica com PLC transmitindo, sem Interferências.....	52
Figura 4.10 – Taxas de Transmissão Sinal PLC Puro.....	52
Figura 4.11 – Espectro da rede elétrica com ruído (liquidificador)	53
Figura 4.12 – Espectro da rede elétrica com ruído (secador de cabelo).....	53
Figura 4.13 – Espectro da rede elétrica com ruído (furadeira)	54
Figura 4.14 – Espectro de rede elétrica com ruído (carregador de celular)	54
Figura 4.15 – Espectro de rede elétrica com ruído (liquidificador+ secador+furadeira).....	55
Figura 4.16 - Gráfico de Desempenho da rede PLC.....	55
Figura 4.17 – Taxa de bits para sinal PLC com influência de uma furadeira.....	57
Figura 4.18 – Taxa de bits para sinal PLC com influência de um carregador de celular.....	58

Figura 4.19 – Taxa de bits para um sinal PLC com influência de secador de cabelo.....	59
Figura 4.20 – Taxa de bits sinal PLC com influência de um liquidificador.....	60
Figura 4.21 – Taxa de bits para um sinal PLC com influência (liquidificador+ secador+furadeira).....	60
Figura 4.22 - Arquitetura da rede PLC [40].....	63
Figura 4.23 - Topologia das medições.....	64
Figura 4.24 - Medições no Campus UFG.....	65
Figura 4.25 - Espectro com PLC.....	65
Figura 4.26 - Espectro com PLC e filtros Notch.....	66
Figura 4.27 - Topologia dos testes Outdoor.....	66
Figura 4.28 - Faixa de frequência de 1-30 MHz com presença de sinal PLC.....	67
Figura 5.1 – Projeto OPERA[45].....	73
Figura 5.2 – Rede PLC de baixa tensão [45].....	74
Figura 5.3 – Participantes do Projeto OPERA[45].....	75
Figura 5.4 – Campo de Teste – Iberdrola [45].....	77
Figura 5.5 – Equipamentos – Iberdrola [45].....	78
Figura 5.6 – Arquitetura de Rede – Iberdrola [45].....	78
Figura 5.7 – Localização – Iberdrola [45].....	79
Figura 5.8 – Localização dos Equipamentos – Iberdrola [45].....	79
Figura 5.9 – Localização dos Equipamentos II – Iberdrola [45].....	80
Figura 5.10 – Resultados – Iberdrola [45].....	80
Figura 5.11 – Campo de Teste – Linz [45].....	81
Figura 5.12 – Equipamento – Linz [45].....	81
Figura 5.13 – Topologia – Linz [45].....	82
Figura 5.14 – Campo de Teste – Oni [45].....	83
Figura 5.15 – Topologia – ONI [45].....	83
Figura 5.16 – Localização – ONI 45].....	84
Figura 5.17 – Localização II – ONI[45].....	84
Figura 5.18 – Desempenho – ONI [45].....	85
Figura 5.19 – Equipamentos – ONI [19].....	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Análise estatística das taxas de transmissão.....	61
Tabela 4.2 – Requerimentos das aplicações tradicionais.....	62
Tabela 4.3 – Limite de emissão radiada [49]	68

LISTA DE ABREVIATURAS

ADSL	- <i>Asymmetrical Digital Subscriber Line</i> (Linha de Subscrição Digital Assimétrica)
AM	- <i>Amplitude Modulation</i> (Modulação em Amplitude)
ANATEL	- <i>Agência Nacional de Telecomunicações</i>
ANEEL	- <i>Agência Nacional de Energia Elétrica</i>
APTEL	- <i>Associação de Empresas Proprietárias de Infra-Estrutura e Sistemas Privados de Telecomunicações</i>
ASK	- <i>Amplitude Shift Keying</i> (Modulação em Amplitude por Chaveamento)
BPL	- <i>BroadBand Over Power Line</i> (Banda Larga sobre Linha Elétrica)
BT	- <i>Baixa Tensão</i>
CAP	- <i>Carrier-less Amplitude Phase</i> (Modulação de <i>Amplitude</i> e Fase Sem Portadora)
CELG	- <i>Companhia Energética de Goiás</i>
CENELEC	- <i>European Committee for Electrotechnical Standardization</i> (Comitê Europeu para a Normalização Electrotécnica)
CISPR	- <i>Special International Committee on Radio Interference</i> (Comitê internacional especializado em interferências de rádio)
CMTS	- <i>Cable Modem Termination System</i> (<i>Sistema de Terminação via cabo</i>)
CPE	- <i>Customer Premises Equipment</i> (Equipamento do usuário final)
CTP	- <i>Carrier Transmission over Powerline</i> (Transmissão de Portadora via Rede Elétrica)
DMT	- <i>Discrete Multi Tone</i> (Modulação de Várias frequências discretas)
DPL	- <i>Digital Power Line</i> (Linha Elétrica Digital)
DSL	- <i>Digital Subscriber Line</i> (Linha de Subscrição Digital)
DSSS	- <i>Direct Sequence Spread Spectrum</i> (Sequência Direta de Espalhamento do Espectro)
EMC	- <i>Electromagnetic Compatibility</i> (Compatibilidade Eletromagnética)
ETSI	- <i>European Telecommunications Standards Institute</i> (Instituto de Padronização de Telecomunicações Europeu)
FCC	- <i>Federal Communications Commission</i> (Órgão regulador da área de telecomunicações e radiodifusão dos Estados Unidos)
FDM	- <i>Frequency Division Multiplexing</i> (Multiplexação por divisão de frequência)
FDMA	- <i>Frequency Division Multiple Access</i> (Múltiplo Acesso por divisão de frequência)
FEC	- <i>Forward Error Correction</i> (Correção Antecipada de Erros)
FHSS	- <i>Frequency Hopping Spread Spectrum</i> (Espalhamento por Saltos em Frequências)
FI	- <i>Frequência Intermediária</i>
FM	- <i>Frequency Modulation</i> (<i>Modução em Frequencia</i>)
FSK	- <i>Frequency Shift Keying</i> (Modulação por Chaveamento de Fase)
GMSK	- <i>Gaussian Minimun Shift Keying</i> (Chaveamento Por Deslocamento Mínimo Gaussiano)
GPS	- <i>Global Positioning System</i> (<i>Sistema Global de Posicionamento</i>)
HR-DSSS	- <i>High Rate Direct Sequence Spread Spectrum</i> (Sequência Direta de Espalhamento do Espectro com Alta Taxa)
ID	- <i>Identifier</i> (Identificador)

IDSL	- <i>ISDN Digital Subscriber Line</i> (Linha de Subscrição Digital em Rede Digital de Serviços Integrados)
IEC	- <i>International Electrotechnical Commission</i> (Comissão Eletrotécnico Internacional)
IEEE	- <i>Institute of Electrical and Eletronics Engineers</i> (Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos)
ISDN	- <i>Integrated Services Digital Network</i> (Rede Digital de Serviços Integrados)
ISM	- <i>Industrial, Scientific and Medical</i> (Industrial, Médico e Científico)
ISP	- <i>Internet Service Provider</i> (Provedor de Serviço de Internet)
ITU	- <i>International Telecommunication Union</i> (União Internacional de Telecomunicações)
LAN	- <i>Local Area Network</i> (Área de Rede Local)
LEO	- <i>Low-Earth Orbit</i> (Órbita baixa em torno da Terra)
LMDS	- <i>Local Multipoint Distribution Service</i> (Serviço de Distribuição de Sinais Multiponto Local)
MAN	- <i>Metropolitan Area Network</i> (Área de Rede Metropolitana)
MEC	- <i>Medição Externa Centralizada</i>
MT	- <i>Média Tensão</i>
OFDM	- <i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i> (Multiplexação por Divisão de Frequencia Ortogonal)
OPERA	- <i>Open PLC European Research Alliance</i> (Aliança de Pesquisa Européia sobre PLC)
OPLAT	- <i>Ondas Portadoras em Linhas de Alta Tensão</i>
PAN	- <i>Personal Area Network</i> (Área de Rede Pessoal)
PLC	- <i>Power Line Communications</i> (Comunicação em Linhas de Rede Elétrica)
PLT	- <i>Power Line Transmission</i> (Transmissão em Linhas de Rede Elétrica)
PPP	- <i>Point-to-Point Protocol</i> (Protocolo Ponto a Ponto)
PSK	- <i>Phase Shift Keying</i> (Manipulação por deslocamento de fase)
P&D	- <i>Pesquisa e Desenvolvimento</i>
QAM	- <i>Quadrature Amplitude Modulation</i> (Modulação pela Amplitude da Quadratura)
QoS	- <i>Quality of Service</i> (Qualidade de Serviço)
RAS	- <i>Remote Access Server</i> (Servidor de Acesso Remoto)
RF	- <i>Rádio Frequência</i>
SCM	- <i>Serviço de Comunicação Multimídia</i>
SDSL	- <i>Symmetric Digital Subscriber Line</i> (Linha de Subscrição Digital Simétrica)
SOHO	- <i>Small Office Home Office</i> (Escritório em casa)
STFC	- <i>Serviço Telefônico Fixo Comutado</i>
STM	- <i>Synchronous Transfer Mode</i> (Modo de Transferência Síncrona)
TCM	- <i>Trellis Coded Modulation</i> (Modulação Codificada em T)
TDMA	- <i>Time Division Multiple Access</i> (Acesso Múltiplo por Divisão de Tempo)
U-NII	- <i>Unlicensed National Information Infrastructure</i> (Informação Nacional de Infra-estrutura não licenciada)
UFG	- <i>Universidade Federal de Goiás</i>
USB	- <i>Universal Serial Bus</i> (Barramento Serial Universal)
VSAT	- <i>Very Small Aperture Terminals</i> (Estação terrestre de pequeno porte para a transmissão via satélite)
WAN	- <i>Wide Area Network</i> (Rede de Longa Distância)
Wi-Fi	- <i>Wireless Fidelity</i> (Fidelidade Sem Fios)

LISTA DE PUBLICAÇÕES RELACIONADAS A ESTE TRABALHO

Produções Acadêmicas:

1. MARQUES, F.S.; TEIXEIRA, E. A. ; SOUZA, E. M. ; REGE, E. L. ; RIBEIRO, M. V. ; JOHNSON, T. M. . **“Regulation Issues about Broadband PLC: A Brazilian Experience and Perspective”**. IEEE International Symposium on Power-Line Communications and Its Applications, 2007. 26-28 March 2007 Page(s):523 - 527
2. MARQUES, F.S.; TEIXEIRA, E. A. ; SOUZA, E. M.; ARAÚJO, S. G.; RIBEIRO, M. V. ; JOHNSON, T. M. . **“Modeling and performance analysis of PLC channels with external interference in outdoor and indoor environments”**. IEEE International Symposium on Power-Line Communications and Its Applications, 2008. Volume , Issue , 2-4 April 2008 Page(s):222 – 227
3. MARQUES, F.S.; BORGES, C. S.; PEREIRA, J.B.J.; FLEURY, C. A.; ARAÚJO, S. G.; FERNANDES, D. C. **“Análise de transmissão e desempenho em Redes PLC em Baixa Tensão”**. 7th International Information and Telecommunication Technologies Symposium – I2TS 2008.
4. MARQUES, F.S.; BORGES, C. S.; SOUZA, E. M.; ARAÚJO, S. G.; JÚNIOR, G. A. D. **“Análise de modelagem e desempenho em canais PLC com interferência Externa em Ambientes Indoor e Outdoor”**. XXVI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações – SBrT 2008. (Submetido).

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

Atualmente, um dos fatores que mais dificultam e encarecem a popularização do acesso à Internet Faixa Larga é o provimento do acesso de “última milha” (tradução do termo em inglês *last mile*), ou seja, levar o acesso ao usuário final, esteja ele em uma metrópole ou em uma cidade pequena, ou até mesmo na zona rural. Levar a infra-estrutura de telecomunicações a todos estes locais seria um alto investimento, em alguns casos inviável economicamente[1].

Por isso, para se prover o acesso de última milha, procura-se aproveitar a infra-estrutura existente, como a rede telefônica, de TV a cabo, ou até mesmo a área de cobertura do celular. Porém, nenhuma dessas redes possui uma capilaridade suficiente para atingir a quase totalidade dos domicílios.

A tecnologia *Power Line Communications* (PLC) se apresenta como uma alternativa capaz de tornar possível esta popularização, visto que a rede de energia elétrica está presente em todos os municípios do território nacional, em quase todas as residências, inclusive na zona rural, podendo levar o acesso de faixa larga a locais que uma rede de telefonia ou de TV a cabo dificilmente seriam implementadas[1].

Porém, a rede de energia elétrica não é um meio ideal para a transmissão de sinais de telecomunicações, devido à presença de harmônicos e ruídos gerados por diferentes aparelhos conectados à rede. Muitos desses aparelhos são utilizados frequentemente em residências e empresas, ou seja, no mesmo ambiente em que a rede PLC deve operar. Portanto, quando se fala em comunicação de dados por meio da rede elétrica, existe a preocupação com o comportamento do sistema diante de situações críticas de ruído.

1.1 Motivação para a Utilização da Tecnologia PLC

As redes de Baixa Tensão (BT), Média Tensão (MT) e Alta Tensão (AT) oferecem uma extensa cobertura e infra-estrutura já instalada na última milha e nos últimos metros. O uso dos cabos de energia para transmissão de dados em ambientes rurais, onde a disponibilidade de sistemas de telecomunicações é reduzida ou inexistente, oferece ainda grande vantagem já que toda a infra-estrutura de cabos já está instalada.

Em termos mundiais, cerca de 95% das residências dispõem desta infra-estrutura e, no Brasil, é esperado que este índice ultrapasse 98% quando o projeto do governo federal denominado Luz para Todos for finalizado em 2008. Por outro lado, a infra-estrutura de telecomunicações para aplicações banda larga baseada nas tecnologias xDSL (*Digital*

Subscriber Line) e TV a cabo alcança menos do que 10% da população mundial, embora cerca de 15% das residências nos países desenvolvidos e em desenvolvimento estejam conectados à Internet.

Pode-se afirmar que mesmo em países desenvolvidos, a tecnologia PLC pode fornecer ganhos significativos para as empresas concessionárias de energia elétrica e para os seus clientes [1].

A tecnologia PLC permite que sistemas de acesso na última milha sejam estabelecidos rapidamente com baixo custo. Isto se deve ao fato de que a infra-estrutura de telecomunicações corresponde a cerca de 50% do investimento total de um novo sistema de telecomunicações. Uma vez que os cabos de energia já estão instalados, reduções consideráveis dos custos associadas com instalação da infra-estrutura de telecomunicações e do tempo na instalação, são observadas.

Essa tecnologia é de fácil instalação pelo usuário final, uma vez que o mesmo deve apenas conectar o modem PLC na rede elétrica. Neste caso, supõe-se que toda a infra-estrutura de transmissão de dados já esteja funcionando.

O estágio atual dessa tecnologia permite a transmissão de até 200Mbps nos cabos de energia de BT e internos (prédios e residências). Esta taxa de transmissão permite que vários serviços de telecomunicações tipicamente residenciais, comerciais e industriais sejam atendidos. Para o usuário final, a grande vantagem é a redução dos gastos com instalação e manutenção dos cabos usados para prover serviços de telecomunicações internos[2].

Por outro lado, as seguintes desvantagens ou problemas desencorajaram o uso da tecnologia PLC nas últimas décadas:

A potência dos ruídos nas redes elétricas é elevada, principalmente nas redes de BT internas e externas. De fato, a presença de diversas cargas não lineares acionadas em intervalos aleatórios de tempo são fontes de distúrbios nocivas à transmissão de dados através das redes elétricas[2].

As contribuições passadas afirmavam que a capacidade teórica (máxima taxa de transmissão de dados livre de erros) das redes de energia elétrica era muito baixa e, conseqüentemente, tais redes não seriam adequadas e promissoras para a transmissão de dados. De fato, as redes de energia elétrica são meios de comunicação de dados que se assemelham aos canais de comunicação sem fio, posto que as mesmas variam aleatoriamente no tempo[1][2].

No entanto, trabalhos recentes apontam que é possível transmitir até 2Gbps através dos cabos de energia se a faixa de frequência entre 1 e 100MHz é considerada [2].

A segurança e a privacidade são questões apontadas como fonte de desconfiança em relação à tecnologia PLC, pois os dados que trafegam pelos cabos de energia podem ser obtidos sem o contato físico com a rede de energia. No entanto, é importante ressaltar que as tecnologias de comunicação sem fio também apresentam esse problema e funcionam, posto que as mesmas fazem uso de dispositivos de criptografia que dificultam de forma significativa o acesso não autorizado por terceiros aos dados trafegados através das redes de comunicação sem fio[2].

No que tange à tecnologia PLC, o uso de algoritmos de criptografia também é o principal mecanismo de combate ao acesso não autorizado por terceiros aos dados transmitidos. A segurança e a privacidade possíveis nos sistemas PLC são equivalentes às aquelas encontradas em outros sistemas de transmissão de dados[2].

A interferência eletromagnética gerada pela tecnologia PLC é nociva aos outros sistemas de telecomunicações operando na mesma faixa de frequência entre 3kHz e 100MHz e vice-versa. De fato, o problema de compatibilidade eletromagnética é importante e deve ser levado em consideração na regulamentação do uso da tecnologia PLC na faixa entre 3kHz a 100MHz[2].

Devido à compatibilidade eletromagnética, alguns países propuseram recomendações bastante restritivas ao uso desta tecnologia e, conseqüentemente, não apenas inviabilizaram o uso das mesmas, mas também inibiram o desenvolvimento de novos dispositivos PLC.

Como exemplo de tais países temos a Inglaterra, Japão e Alemanha[2]. Por outro lado, os países que ofereceram menores restrições ao uso da tecnologia PLC em comparação com as outras tecnologias operando na faixa de frequência observaram um aumento expressivo dos investimentos no desenvolvimento de novas tecnologias PLC que, atualmente, permitem a transmissão de até 200Mbps no nível da camada física. Como exemplo, podemos citar a Espanha, a França, os E.U.A., a China e outros[2].

Entretanto, há falta de um padrão internacional para as camadas física – *physical layer* (PHY) e camada de acesso ao meio – *medium access and control layer* (MAC) dos sistemas PLC voltados para as aplicações banda larga e banda estreita de forma a garantir a interoperabilidade entre os dispositivos PLC fornecidos por diferentes fabricantes[2].

A falta de uma padronização mundial acarreta o surgimento de soluções proprietárias e de escala de produção baixa[2]. Conseqüentemente, estas soluções proprietárias apresentam custos elevados e dificultam, por razões óbvias, o uso maciço e competitivo da tecnologia PLC no mundo. No entanto, é importante ressaltar que esta é uma questão que

será no futuro próximo resolvida com a introdução do primeiro padrão mundial para sistemas PLC pelo *Institute of Electrical and Electronic Engineers* (IEEE) [1][2].

1.2 Padronização e Regulamentação

A falta de padronização nos produtos utilizados em redes PLC faixa larga é um forte inibidor para o desenvolvimento rápido desse tipo de rede. Sem padronização, não há interoperabilidade entre equipamentos de fabricantes diferentes.

Assim, um provedor de rede, após a escolha da tecnologia, fica dependente da evolução tecnológica e dos preços da tecnologia escolhida. Além disso, os custos dos equipamentos permanecem elevados, dificultando uma adoção mais ampla da tecnologia.

Os processos adotados pelo IEEE na criação de padrões são bastante democráticos, envolvendo todas as partes interessadas de uma forma equânime. Todas as decisões técnicas devem ser aprovadas por pelo menos metade dos votantes. Além disso, o padrão final deve ser escolhido por pelo menos 75% dos membros, que podem ser qualquer empresa, ou até mesmo pessoa, de qualquer parte do mundo, que tenha interesse em determinado padrão [1][2].

Pagando-se uma taxa anual, é possível participar dos grupos de trabalho. No entanto, exige-se presença nas reuniões promovidas pelo IEEE, sendo que não se pode faltar a dois encontros consecutivos [1][2].

Em junho de 2005, o IEEE deu início a um grupo relacionado à tecnologia PLC faixa larga. O processo de padronização do PLC está sendo debatido já há algum tempo, e o projeto *Open PLC European Research Alliance* (OPERA), com a ajuda da *European Commission* (Comissão Européia), tem trabalhado na especificação de um Sistema de Acesso PLC que deverá ser proposta ao IEEE [1][2].

Apesar de o IEEE não ser o único órgão de padronização existente, o processo iniciado junto a ele aparenta ser bastante interessante, na medida em que possui um cronograma claro. Espera-se que com a criação deste grupo de trabalho finalmente seja criado um padrão reconhecido mundialmente. Além disso, diversas empresas atuantes na tecnologia *Broadband PLC* têm criado fóruns de discussão, cujo objetivo é contribuir com os órgãos de padronização. Dentre esses fóruns podemos destacar:

- *PLCForum*: criado no início de 2000, é constituído em sua maioria por entidades européias, incluindo fornecedores de produtos e desenvolvedores de soluções [1][2];

- *PLC Utilities Alliance*: criado no início de 2002, é formado por empresas de energia elétrica européias que atuam em diversos países no mundo todo [1][2];
- *HomePlug Powerline Alliance*: formada em grande parte por fornecedores de produtos, visa basicamente estabelecer padronização aberta dos equipamentos PLC de redes internas[1][2].

A respeito da regulamentação do PLC no Brasil, a Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) é o órgão responsável por este processo. O PLC faixa larga permite o fornecimento de diversos serviços de dados, vídeo e voz, que são exatamente os mesmos que podem ser fornecidos pelas outras tecnologias de faixa larga.

Com relação aos equipamentos utilizados nas redes PLC, eles obrigatoriamente precisam receber certificação da ANATEL, buscando, com isso garantir, dentre outras coisas, a compatibilidade funcional, a compatibilidade eletromagnética, segurança elétrica e atendimento aos requisitos de emissão de frequências, objetivando minimizar interferências em outros sistemas[1][2].

1.3 Roteiro de Trabalho

O objetivo deste trabalho é apresentar uma análise e proposta de regulamentação para o uso da tecnologia de acordo com as características técnicas da tecnologia PLC e a influência das interferências eletromagnéticas no desempenho da rede, através de pesquisa e da realização de testes de desempenho em laboratório e testes de campo, visando a comprovação da eficiência dos equipamentos PLC quando submetidos a um alto nível de ruído na rede.

No Capítulo 2, é apresentada a tecnologia Smart Grid, que propõe uma convergência entre os sistemas de energia elétrica e de comunicação de dados, sendo um sistema de Transmissão e Distribuição (T&D) o qual possibilita a disponibilidade da informação no local e momento desejado, tornando-o assim uma tecnologia de rede elétrica inteligente.

No Capítulo 3, é apresentada a tecnologia PLC, mostrando seu histórico, os equipamentos que geralmente são usados em sua rede, suas funcionalidades e também uma topologia geral de uma rede que utiliza esta tecnologia. Também são mostrados os padrões e especificações técnicas dos equipamentos PLC, restrições de operação e dificuldades encontradas na implementação desta tecnologia.

No Capítulo 4, é apresentado o estudo de caso, que tem como objetivo de analisar a influência da interferência eletromagnética gerada por alguns tipos de equipamentos eletrônicos no desempenho da rede PLC em ambiente interno. O estudo começa na criação de uma rede PLC local, permitindo a observação das características do sinal PLC nessa rede, além da medição da taxa de transmissão da rede e verificação de possíveis dificuldades de implementação da tecnologia. Depois de configurada a rede, são introduzidas as interferências, ao mesmo tempo em que é feito um acompanhamento da taxa de transmissão. Finalmente, os resultados são comparados com as leituras do espectro da rede PLC e das fontes geradoras de harmônicos.

No Capítulo 5, é apresentada a análise dos aspectos de regulamentação da tecnologia PLC no mundo com base nos testes de campo com medições internas e externas.

No Capítulo 6, são apresentadas as conclusões.

CAPÍTULO 2 – SMART GRID

2.1 Introdução

A importância de se usar *Smart Grid* encontra-se na adição de vários serviços, que podem ser úteis tanto aos consumidores quanto às concessionárias, às entidades públicas e às operadoras de telecomunicações, com serviços de controle, medição e supervisão a distância de energia, água e gás através de serviços de corte/religação remoto, integração de serviços básicos de telecomunicações, segurança pública e inclusão digital através do acesso a Internet pela rede elétrica. Tudo sendo feito com uma comunicação integrada e instantânea, apresentando um trabalho rápido e eficiente, melhorando assim o desempenho do sistema, prestando uma ampla variedade de adicionais aos clientes[3][4].

A tecnologia *Smart Grid* baseia-se em um conceito tecnológico que propõe uma convergência entre o sistema de energia elétrica e comunicação de dados, sendo um sistema de Transmissão e Distribuição, o qual possibilita a disponibilidade da informação no local e momento desejado, tornando-o assim uma tecnologia de rede elétrica inteligente definida principalmente pelas funcionalidades que possui [3] [4].

A rede de energia elétrica é um sistema interconectado de linhas de força distribuindo a eletricidade às extremidades: os usuários. É um sistema de transmissão e distribuição que vem aumentando o ritmo de acordo com a era digital, requerendo serviços em maior quantidade, que sejam rápidos, confiáveis e de qualidade. Outra questão importante é a limitação ambiental, que vem aumentando a pressão por uso de fontes renováveis, forçando assim uma canalização de capital para investimentos em tecnologias de menor impacto ambiental [3][4].

2.2 Características

Existem algumas funções que caracterizam uma *Smart Grid*, e definem uma rede elétrica como sendo um sistema inteligente, como:

- Auto-recuperação – caracteriza-se pela utilização dos dados em tempo real evitando ou mitigando os problemas na qualidade e rompimento do serviço, por meio de sensores automatizados capazes de detectar e responder aos problemas do sistema.
- Capacitação e integração do Consumidor – considera o uso da rede elétrica inteligente em função dos consumidores, utilizando o sistema em tempo

real para melhorar a qualidade de energia e reduzir o consumo e os custos, permitindo aos usuários melhor controle do uso de sua energia. Considera horários de pico e até mesmo tarifações diferentes para horários diversos.

- Tolerante a ataque – utilizando os dados em tempo real, é possível responder a rompimentos e quedas de energia em determinados locais, e até mesmo dar uma solução instantaneamente.
- Qualidade de energia aos usuários – como a energia tradicional ainda continuará sendo distribuída pela rede inteligente, ela deverá ter uma melhora na qualidade, atendendo às necessidades do consumidor e das indústrias.
- Grande variedade de opções de geração de energia – para se ter um avanço na qualidade de energia, tem que se ter primeiramente uma evolução na tecnologia utilizada para a geração dessa energia.
- Amadurecimento do mercado de eletricidade – Sugere a abertura do mercado, tornando-o competitivo entre as concessionárias de energia, forçando-as para os avanços nos serviços e tecnologias.
- Otimização de recursos – uma rede inteligente pode otimizar seus recursos, diminuindo principalmente os custos de manutenção, podendo ser reduzido o desperdício dessa energia, repassando esse menor custo ao consumidor [5] [6].

A rede inteligente pode utilizar as tecnologias já existentes, que são usadas em outros setores, como em telecomunicações, podendo ser usadas as tecnologias já existentes. Essas tecnologias podem ser utilizadas das seguintes formas:

- Uso de tecnologia de comunicação integrada , incluindo automatização da subestação, leitura de medidor inteligente, automatização da distribuição, supervisão no controle e aquisição de dados, sistema de gerência de energia, uso da tecnologia wireless e fibra óptica. O uso dessas tecnologias, permite assim a comunicação em tempo real dos dados, obtendo um sistema confiável e seguro.
- Implementação de sistema de detecção e medição de energia elétrica, o que garante um controle da rede, previne roubo de energia, sobrecarga da rede e integridade da mesma. Podem-se utilizar recursos como: medidores

avançados com microprocessadores inteligentes e equipamento de leitura do medidor, sistemas de monitoração em tempo real.

- Componentes avançados utilizados para o comportamento elétrico da rede, diminuindo falhas e quedas de energia, como dispositivos flexíveis na transmissão da corrente, cabos de distribuição avançados com maior condutividade e que suportam altas temperaturas e dispositivos inteligentes.
- Tecnologias avançadas de controle como algoritmos para diagnósticos, obtendo soluções precisas às falhas específicas da rede, utilizando-se de agentes inteligentes distribuídos, ferramentas analíticas e aplicações operacionais.
- Além de todo o sistema inteligente há a necessidade de operadores treinados e com conhecimentos específicos para operar e gerenciar a rede inteligente, que pode ser melhor aproveitado com visuais de fácil entendimento, softwares de múltiplas opções para ações e simuladores para treinamento [5].

2.3 Equipamentos Utilizados

Para se obter uma rede elétrica inteligente, são necessárias algumas modificações, inclusive físicas, como é o caso da substituição dos medidores eletromecânicos por medidores mais avançados ou inteligentes, apresentados na Figura 2.1. Esses medidores são capazes de comunicar nos dois sentidos, recebendo e enviando dados, fornecendo serviços mais avançados e completos aos clientes e também em benefício da operadora. Estes serviços irão além da simples função de leitura até os mais completos que irão atender aos consumidores, como monitorar o aumento da qualidade de energia que chega a casa do consumidor, conexão remota e desconexão dos clientes, detecção de interrupções dos serviços e medição pela hora de uso [4] [5].



Figura 2.1 – Medidores inteligentes [4]

Serão necessários também outros equipamentos de energia mais avançados, como é o caso de um Concentrador PLC, que deverá ficar entre a linha de baixa tensão (110/220Vca) e o medidor inteligente na propriedade do usuário, fazendo assim uma comunicação entre o medidor inteligente e o transformador, sendo chamada também de Medição Externa Centralizada (MEC).

A MEC é considerada um Gateway Universal na rede, tendo a função de Centro de Controle, sendo responsável por enviar as informações através do transformador à linha de distribuição, além dos serviços remotos, como medição da energia ativa e serviço de corte/religação.

A linha de baixa tensão que trafega os dados antes de entregar à linha de alta tensão pelo transformador tornar-se-á uma rede secundária protegida, sendo um cabo anti-fraude que acopla os quatro cabos (três fases e um neutro), transformando-o visivelmente como se fosse um só, denominado de cabo multiplex.

Os medidores que ficarão na propriedade dos usuários terão a função principal de medição da energia consumida, pois os outros serviços, como controle de qualidade e serviço de corte/religação serão executados pela MEC, obviamente com a intenção de aniquilar com as fraudes e possíveis artimanhas com relação à energia elétrica: é possível perceber também a função da rede secundária protegida (multiplex) [3]. A Figura 2.2 ilustra a Medição Externa Centralizada.

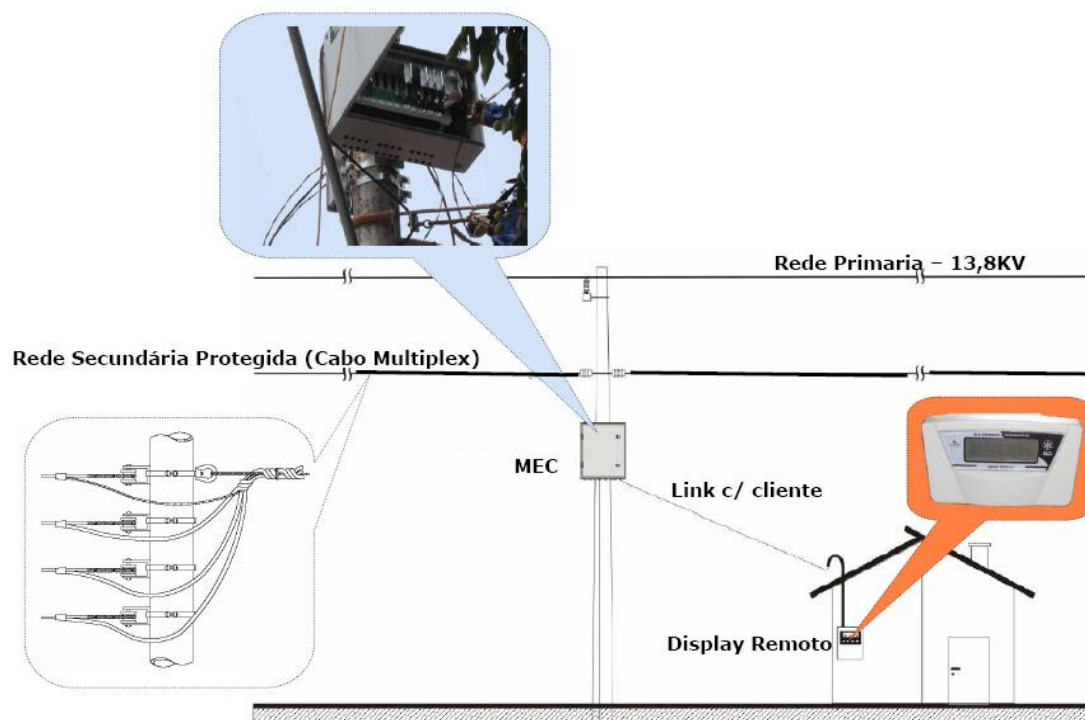


Figura 2.2 – Medição Externa Centralizada [3]

Os transformadores também terão um importante papel nessa rede inteligente, com a função de monitoramento da energia transmitida, monitorando a tensão, verificando sobrecargas e controle de perdas, enviando os dados automaticamente pela rede de distribuição à subestação para os possíveis reparos.

As redes de distribuição e subestações serão automatizadas para poderem receber as informações e possibilitar os reparos em tempo hábil, aumentando a eficiência e proporcionando uma auto reconfiguração com a utilização de chaves automatizadas.

Toda essa comunicação será feita através do sistema de comunicação mais utilizado na atualidade, a Internet, usando também a transmissão das empresas de telecomunicações, inclusive a fibra óptica [3]. A Figura 2.3 ilustra a tecnologia *Smart Grid*.

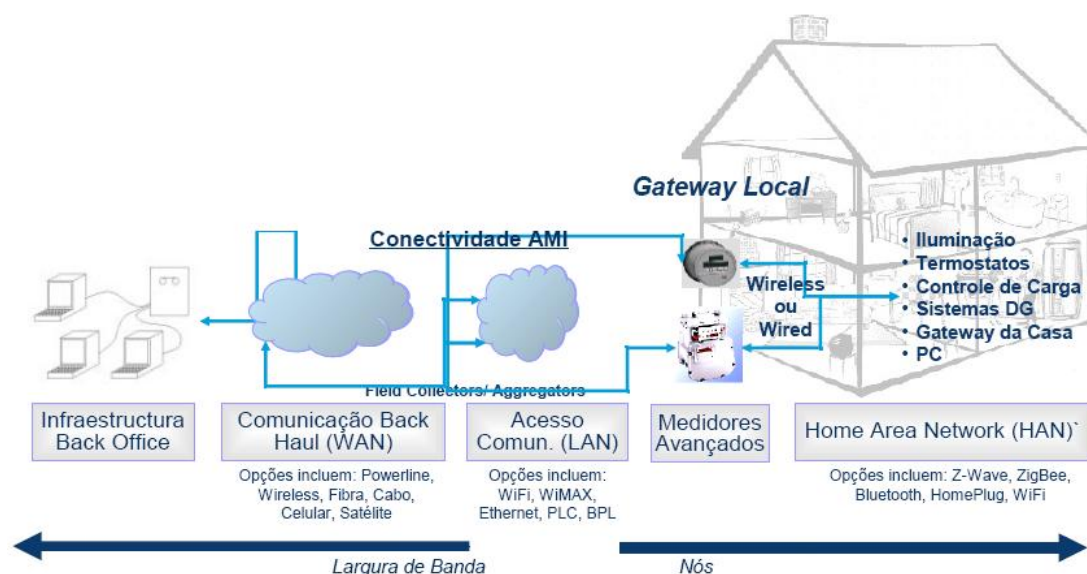


Figura 2.3 – Smart Grid [8]

2.4 Implantações

A introdução do *Smart Grid* está em pesquisa e é realidade em algumas partes do mundo, principalmente nos Estados Unidos, que é o país com maior número de concessionárias envolvidas em pesquisas e testes, funcionando a comunicação através de PLC com o objetivo de se ter uma rede elétrica inteligente, em desenvolvimento e necessitando de alguns ajustes, sendo um sistema vulnerável a ataques terroristas, hackers, desastres naturais, falhas mecânicas e riscos de blecaute.

Os Estados Unidos vêm sendo pioneiros nos testes em redes inteligentes, com 36 projetos em desenvolvimento com a finalidade de aumentar a demanda de geração distribuída, se preocupando com o impacto ambiental, além de outros benefícios esperados como: criação de novos empregos, redução do risco de blecautes, redução dos tempos de restabelecimento, aumento da segurança, benefícios ambientais e também outros, como aumento da eficiência do capital investido e redução da demanda de ponta.

Como exemplos de projetos em desenvolvimento nos Estados Unidos, temos a SDG&E Transmission and Distribution System, em San Diego, na Califórnia, com 1.900.000 consumidores, e também a Texas Utility, com um sistema trabalhando com medição automática e monitoração automática da rede utilizando fibras ópticas e PLC [2].

Há também vários projetos em desenvolvimento na Europa como a ENEL na Itália, que utiliza um sistema com PLC na rede de distribuição e planeja substituir todos os medidores em 7 anos, contando com uma parceria comercial com a IBM para transferência

tecnológica para outras empresas. E também o EON Nordic na Finlândia, que utiliza um sistema de PLC com GPRS (GSM) e planeja a substituição de todos os medidores em 6 anos, além de vários outros projetos em desenvolvimento avançado, como o projeto OFGEM, no Reino Unido, a Electricite de France, na França, a Endesa, na Espanha, entre vários outros, ambos com as mesmas preocupações e finalidades, com pesquisas em redes extremamente avançadas com base em rede elétrica inteligente [2] [3].

No Brasil, também há várias pesquisas em desenvolvimento, como em São Paulo, Goiás, Minas Gerais, Paraná, Rio Grande do Sul e Maranhão, principalmente nas cidades de São Paulo, Goiânia, Belo Horizonte, Curitiba e Porto Alegre.

As principais concessionárias brasileiras estão envolvidas são a Eletropaulo em parceria com a FITec e Concert no projeto da Companhia de Desenvolvimento Habitacional e Urbano (CDHU), um protótipo de medição remota individual de energia, água e gás em Conjunto Habitacional através de comunicação em PLC; a CEMIG e a FITec, no projeto Intelligrid que já é um padrão de tecnologia que visa a integração de processos, sistemas e serviços de telecomunicações e a CELG com o projeto OPERA que visa ser uma alternativa ao acesso em faixa larga utilizando-se PLC e a Companhia Vale do Rio Doce com projetos de controle e automação.

Todas as concessionárias brasileiras envolvidas em sistemas de *Smart Grid* (CELG, CEMIG e Eletropaulo) buscam as mesmas finalidades, como telecontrole, telemedicação, monitoração remota, corte/religação remoto e supervisão de fornecimento, com o intuito de prover serviços mais avançados aos consumidores, além de melhorias internas como controle da energia distribuída e redução dos custos de operação.

Os benefícios de uma rede inteligente não somente atingirão as concessionárias, mas também outras camadas como entidades públicas e empresas de telecomunicações, em que todos os benefícios terão como alvo final os usuários, mesmo sendo intermediados por organizações diferentes.

As entidades públicas serão beneficiadas com avanços tecnológicos nos serviços prestados, como é o caso do programa de inclusão digital em faixa larga com o uso em potencial da tecnologia PLC, e também melhorias em serviços como segurança, vigilância através de câmeras e integração dos serviços públicos. Todos esses benefícios tornarão o sistema mais rápido e seguro. Os beneficiados serão também as operadoras de telecomunicações, que poderão prover acesso à Internet faixa larga em uma infra-estrutura já instalada, além de melhorias em serviços já realizados como VoIP e vídeo em demanda, que necessitam de um sistema mais veloz e seguro [2] [4] [7].

Com a evolução do *Smart Grid* e sua implantação, várias outras utilidades e serviços extras estarão direta e indiretamente sendo beneficiados com a utilização do PLC, que é a comunicação de dados sobre a parte física do sistema de energia elétrica. Ainda, o funcionamento simultâneo acarretará outros benefícios como, por exemplo, acesso à faixa larga, que é de grande utilidade, pois toda a parte física já está instalada, não sendo necessárias alterações na infra-estrutura, tornando-se assim uma ótima opção para acesso de última milha.

Essa questão do acesso à faixa larga sob PLC é uma opção muito viável quanto ao custo reduzido e à melhoria no desempenho, além de ser uma alternativa à realização dos projetos de inclusão social, que tem como objetivo levar acesso em faixa larga às escolas públicas e interligar sistemas públicos.

Outra vantagem do uso de PLC é a utilização dessa comunicação para serviços nas residências dos consumidores, tornando a parte final de uma rede interna denominada Home Area Network (HAN) possível de realizar certas funções adicionais, como medição interna de cada aparelho ou saída de linha, monitoramento da energia utilizada e controle até mesmo dos aparelhos, tendo como opções de comunicação interna tecnologias já existentes como Bluetooth, HomePlug, WiFi, ZigBee, entre outros.

Com essa utilização em *Smart Grid*, esse sistema se tornaria híbrido, utilizando-se de duas ou mais tecnologias para comunicação de dados, o que já está bastante difundido atualmente. O uso da tecnologia sem fio para comunicação de ponta vem sendo uma ótima saída para utilização da *Smart Grid* por questões principalmente de custos. Essas tecnologias utilizam topologia ponto a ponto com baixo consumo de energia e suportam aplicações de telemetria, telecomandos e acesso à rede de dados e Internet. [3] [7] [8]

Todo o sistema de *Smart Grid* no Brasil e no mundo ainda está no começo, com alguns projetos bem avançados, mas que encontram desafios a percorrer, que vão desde tecnologias a serem abordadas até a preocupação com impacto ambiental e regulamentação.

Há preocupações e dúvidas relacionadas às interferências que podem ser causadas na comunicação de dados por cabos de energia em aparelhos e máquinas elétricas. Adicionalmente existe o desafio de gerenciar as comunicações em tempo real, e como pré-estabelecer soluções para determinados tipos de problemas que poderão vir a ocorrer, como no caso de queda ou má qualidade de energia, ou então em como tornar esse sistema seguro uma vez que serão transmitidos dados.

Com relação a impactos ambientais causados pelo sistema, que é atualmente uma preocupação de caráter mundial, há a preocupação de como desenvolver e regulamentar

todo sistema considerando a faixa de frequência, potência, ruído, serviços e outras características. Essas situações ainda dificultam a implementação e utilização de um sistema de *Smart Grid*, mas um avanço já foi dado, pois já existem alguns padrões estabelecidos de implantação e utilização de uma rede inteligente, tais como Grid 2030, GridWise, GridWorks e principalmente a Intelligrid, que é o padrão mais conhecido e difundido[9][10].

Neste capítulo, foi abordado a tecnologia *Smart Grid*, que possibilitará o uso inteligente das redes elétricas. No próximo capítulo, será apresentada a tecnologia PLC, mostrando seu histórico, equipamentos, funcionalidades e topologia geral de uma rede que utiliza esta tecnologia.

CAPÍTULO 3 - TECNOLOGIA PLC

3.1. Introdução

A tecnologia PLC pode ser compreendida como um sistema de telecomunicações que opera com rádio frequências e que faz uso de uma das redes mais utilizadas em todo o mundo, a rede de energia elétrica, como meio físico para transmissão de sinais de telecomunicações, de forma controlada e inteligente, seja voz ou dados. Uma de suas grandes vantagens é a utilização da infra-estrutura das redes de energia elétrica já disponível[11][12].

Esta tecnologia é bastante usada pelas concessionárias de energia elétrica, desde o início do século XX, para o tráfego de sinais de telecomunicações de uso operacional, como sinais de voz, de telemedição, de teleproteção, de alarmes e de telecomandos e é chamada no Brasil de Ondas Portadoras em Linhas de Alta Tensão (OPLAT)[13][14].

Essa tecnologia nunca foi considerada um meio de comunicação viável devido à baixa velocidade, baixa funcionalidade e alto custo de desenvolvimento. As redes de distribuição de energia elétrica foram inicialmente projetadas para transmitir energia elétrica de forma eficiente; portanto, elas não estão necessariamente adaptadas para a transmissão de sinais de telecomunicações e são caracterizadas por ser um meio extremamente hostil como canal de comunicações [15] [16].

Esse tipo de comunicação é caracterizado pela largura de banda estreita e geralmente trabalha com frequências variando de 3KHz até 148,5KHz. Algumas poucas aplicações em residências e em sistemas de segurança e automação predial utilizam de sistemas PLC de banda estreita e baixa velocidade [15][16].

3.2. Histórico

Em 1838, registrou-se a primeira medição remota do fornecimento de energia elétrica e, em 1897, a primeira patente em sinalização através de cabos de energia no Reino Unido foi concedida. Uma das primeiras e mais bem conhecidas aplicações para o uso dos cabos de energia elétrica para transmissão de dados foi o controle das lâmpadas de iluminação pública das ruas de Londres através de distorções momentâneas na forma de onda da tensão, possibilitando a comutação entre ligadas e desligadas[15][16].

Esta técnica era conhecida como *ripple control*. Em 1840, construiu-se uma babá eletrônica arcaica utilizando a modulação *Amplitude Modulation* (AM) e transmissão por rede elétrica.

Em 1905, aplicações baseadas na transmissão de informações foram patenteadas nos E.U.A e, em 1913, iniciou-se a produção de repetidores para medidores eletromecânicos que faziam uso da rede elétrica. Por volta de 1920, o sistema *Carrier Transmission over Powerline* (CTP) [16] entrou em operação nas redes Alta Tensão (AT), na faixa entre 15kHz e 500kHz, para a operação destas redes por meio de comandos de voz de forma bidirecional.

Após 1940, uma nova versão do sistema CTP surgiu para medição e controle remoto do sistema de potência no nível de AT. Inicialmente, a nova versão do sistema CTP oferecia taxas de até 50bps (bits por segundo) e, mais tarde, a taxa de transmissão aumentou para 100bps e 200bps. O sistema CTP foi concebido e até hoje é usado para a operação do sistema de potência. O sistema CTP pode alcançar distâncias de até 900km com uma potência de transmissão igual a 10 W.

No início da década de 30 do século XX, o sistema *Ripple Carrier Signaling* (RCS) entrou em operação para gerenciamento e controle da operação do sistema de potência nas redes de Média Tensão (MT) e Baixa Tensão (BT). O sistema RCS é unidirecional. A faixa de frequência usada pelo sistema RCS era entre 125 Hz e 3 kHz com portadora modulada em amplitude com a técnica *Amplitude Shift Keying* (ASK) [16][17].

As frequências próximas à frequência de potência (50Hz ou 60Hz) permitem que o sinal, que transmite a informação, atravesse os transformadores abaixadores existentes entre as redes de MT e BT. Esta funcionalidade permite que a transmissão de dados entre as redes BT e MT ocorra sem a necessidade do uso de dispositivos chamados de *bypass* (dispositivo usado para transferir os dados entre as redes de BT e MT sem a influência do transformador).

As taxas de transmissão oferecidas pelo sistema RCS estão na faixa entre 20 bps e 120 bps. Gerenciamento da carga e reconfiguração automática da rede de distribuição na MT foram as primeiras aplicações do sistema RCS. Além disso, o sistema RCS foi empregado para o controle da rede de iluminação pública.

Alguns avanços foram observados entre as décadas de 50 e 70 do século XX; no entanto, os resultados obtidos não eram promissores, na medida em que não representavam melhorias que justificassem maior atenção, interesse e pesquisa no uso das redes AT, MT e BT para a transmissão de dados.

Os primeiros estudos no sentido de analisar as características da rede elétrica e as reais capacidades da mesma como canal para comunicações foram realizados por empresas de energia elétrica na Europa e nos Estados Unidos na década de 1980. Os estudos foram concentrados nas faixas entre 5 – 500KHz e os dois fatores que tiveram maior predominância nestes estudos foram a relação sinal/ruído e a atenuação do sinal na rede [16][17].

A partir da década de 80 do século XX, avanços na área de comunicação de dados resultaram no desenvolvimento de novas técnicas de modulação, processamento digital de sinais e controle de erros que permitiram o desenvolvimento de novos sistemas de comunicação de dados via rede elétrica que minimizam os efeitos devidos às imperfeições dos cabos de energia de AT, MT e BT.

Pode-se afirmar que a grande diferença entre os sistemas PLC antigos e aqueles desenvolvidos após a década de 80 é a capacidade de transmissão com potência bastante inferior àquela demandada pelos sistemas CTP e RCS. Por exemplo, em 1991, o padrão CENELEC EN 50065 foi introduzido na Europa para a transmissão de dados em redes de MT e BT [16][17].

Este padrão europeu faz uso da faixa de frequência de 3 kHz até 148,5 kHz para aplicações banda estreita das concessionárias de energia elétrica (redes de MT e BT) e dos usuários que necessitam usar as redes de BT para aplicações de automação predial, por exemplo. De acordo com este padrão, a distância entre o transmissor (Tx) e o receptor (Rx) é de no máximo 500m, posto que a mesma garante a recepção confiável do sinal transmitido pelo dispositivo Tx para o dispositivo Rx.

A potência do sinal transmitido, de acordo com este padrão, é de 5 mW (miliwatts) ou 134dBμV (decibel micro volt), o que corresponde a uma potência 2.000 vezes menor do que aquela demandada pelo sistema CTP. Enquanto a Europa, inicialmente, restringiu o uso dos cabos de energia para a transmissão de dados, os E.U.A. e o Japão foram menos restritivos e permitiram o uso das redes de BT e MT para aplicações banda estreita nas frequências que se estendem de 3 kHz até 500 kHz [16][17].

O novo desafio à época era o desenvolvimento de sistemas capazes de fornecer comunicação de forma bidirecional e também a utilização de frequências mais elevadas e menores níveis de potência para transmissão. Foi quando o Dr. Paul Brown, da empresa de energia elétrica *Norweb Communications*, no início da década de 90, em Manchester, na Inglaterra, começava seus testes com a tecnologia PLC para a comunicação digital de alta velocidade.

Paul Brown concluiu que seria possível utilizar a estrutura de rede elétrica existente, possibilitando o envio de dois ou mais sinais simultâneos, variando a frequência, sem que houvesse sobreposição espectral desses [18] [19].

Com a desregulamentação do mercado de telecomunicações a partir do final da década de 90, ocorreu o provimento de meios de acesso para os usuários residenciais, comerciais e industriais na última milha (*last mile applications*) e nos últimos metros (*last meters applications*).

As redes elétricas passaram a serem vistas não apenas como um meio de transmissão de energia, mas também como uma solução factível e promissora para acesso às redes de telecomunicações pelos usuários, uma vez que as redes elétricas apresentam uma capilaridade infinitamente superior àquela oferecida pelas infra-estruturas de telecomunicações.

O resultado imediato disso foi o aparecimento de novos modems e sistemas PLC com protocolos proprietários para atender às incipientes demandas por transmissão de dados. Pode-se afirmar que ao longo da década de 90 do século XX, algumas empresas propuseram o uso da faixa entre 1 MHz e 30 MHz para a transmissão em banda larga de dados, enquanto a faixa de frequência de 9 kHz até 500 kHz era e ainda é usada para aplicações banda estreita [19].

Mas foi apenas entre 1995 e 1997 que o Dr. Paul Brown conseguiu comprovar a viabilidade da transmissão de dados em alta velocidade através das redes de energia elétrica, ao descobrir que era possível resolver os problemas de ruído e de interferências no sistema. No final de 1997, foi anunciado que os problemas de ruído e de interferências estavam solucionados e foi feito o primeiro teste de acesso à Internet utilizando-se de comunicação PLC numa escola de Manchester [19].

Por outro lado, o aparecimento de diferentes soluções PLC proprietárias sem função de interoperabilidade era e, ainda é, um problema a ser resolvido. Esforços neste sentido foram iniciados ainda na década de 90. O resultado disso foi a constituição do HomePlug Alliance [19] em 2000 por treze empresas, com a finalidade de propor uma padronização para aplicações PLC em ambientes prediais e residenciais.

O primeiro padrão introduzido pela HomePlug Alliance é chamado de HomePlug 1.0 [19]. O padrão HomePlug 1.0 permite a transmissão de dados com taxas de pico até 14 Mbps (mega bits por segundo) para aplicações *indoor* (internas), ou seja, aplicações nas redes de BT presentes em ambientes residenciais e prediais. A taxa de pico oferecida pelo padrão *HomePlug 1.0* é raramente atingida. Usualmente, a taxa obtida com este padrão é

inferior a 6 Mbps [19]. Em 2005, uma nova versão do padrão HomePlug, denominada de padrão HomePlug AV, foi lançada [19]. O HomePlug AV oferece taxas de pico de 200 Mbps na camada PHY (*Physical Layer*) e de 100 Mbps na camada MAC (*Medium Access Control layer*) [19].

Em janeiro de 2004, o projeto *Open PLC European Research Alliance* (OPERA) [19] foi iniciado com o objetivo de facilitar e popularizar o conhecimento e o uso da tecnologia PLC para acessos banda estreita e banda larga na última milha e nos últimos metros. O projeto OPERA será detalhado no Capítulo 5.

Em 2005, a primeira versão do padrão ES 59013 do CENELEC alocou a faixa de frequência entre 1,6 e 12,7 MHz para os sistemas de acesso às redes de telecomunicações nas redes de BT existentes entre o transformador abaixador MT/BT e os usuários finais (acesso *outdoor* ou externo) e a faixa de frequência entre 14,35 MHz e 30 MHz para aplicações *indoor* (internas) através das redes de BT [19].

Além disso, em 2005, o IEEE [19] iniciou o estudo e o desenvolvimento de um novo padrão para as camadas PHY e MAC para aplicações banda larga e banda estreita. O objetivo principal do IEEE é introduzir um padrão que possa ser mundialmente aceito e utilizado pelas empresas fabricantes e fornecedoras de dispositivos e sistemas PLC, ou seja, nos mesmos moldes do que já é feito com os padrões IEEE utilizados nas tecnologias WiFi e WiMAX, por exemplo.

Neste projeto, os esforços do IEEE estão sendo orientados para o desenvolvimento de um padrão que permita a transmissão de dados com taxas acima de 100 Mbps na faixa de frequência entre 1 MHz e 100 MHz. Além disso, o padrão levará em consideração a especificação de dispositivos para acesso quando a distância entre o transmissor e o receptor é de até 1.500m (acesso na última milha e externo) e de até 100m (acesso nos últimos metros e interno).

Atualmente, enquanto a Europa está realizando estudos técnicos para viabilizar as aplicações PLC em banda larga [19], relatórios da *Federal Communications Commission* (FCC) [19] dos E.U.A. já definem uma nova regulamentação do uso da tecnologia PLC em banda larga e sua coexistência com outros tipos de tecnologias operando na mesma banda de frequência.

Em 2008, no Brasil, a ANATEL disponibilizou para consulta pública uma Proposta de Regulamento sobre Condições de Uso do Sistema de Acesso em Banda Larga utilizando Rede de Energia Elétrica, como pode ser visto no Anexo 01.

A tecnologia *Power Line Communication* (PLC) é também conhecida como *BroadBand Over Power line* (BPL), *Digital Power Line* (DPL) e *Power Line Transmission* (PLT).

3.3. Rede PLC

Uma rede PLC é composta basicamente de dois equipamentos, o “Master PLC”, que pode ser entendido como o *Headend* da rede, e o “Modem PLC”, que é o equipamento do usuário final, o *Customer Premises Equipment* (CPE). Porém, essa rede PLC pode ser composta, em alguns casos, por vários outros tipos de equipamentos, dependendo da necessidade. Os equipamentos que podem ser encontrados em uma rede PLC são:

- Modems dos usuários (CPE);
- Repetidores ou Equipamentos Intermediários (de Baixa ou Alta Tensão);
- Equipamentos de Concentração;
- Equipamentos de Transformador (de Baixa ou Alta Tensão);
- Equipamento de Subestação (*High End*);
- Equipamentos de Acesso (Unidades de Acoplamento) [15][19].

A Figura 3.1 ilustra a distribuição dos equipamentos em uma rede PLC.

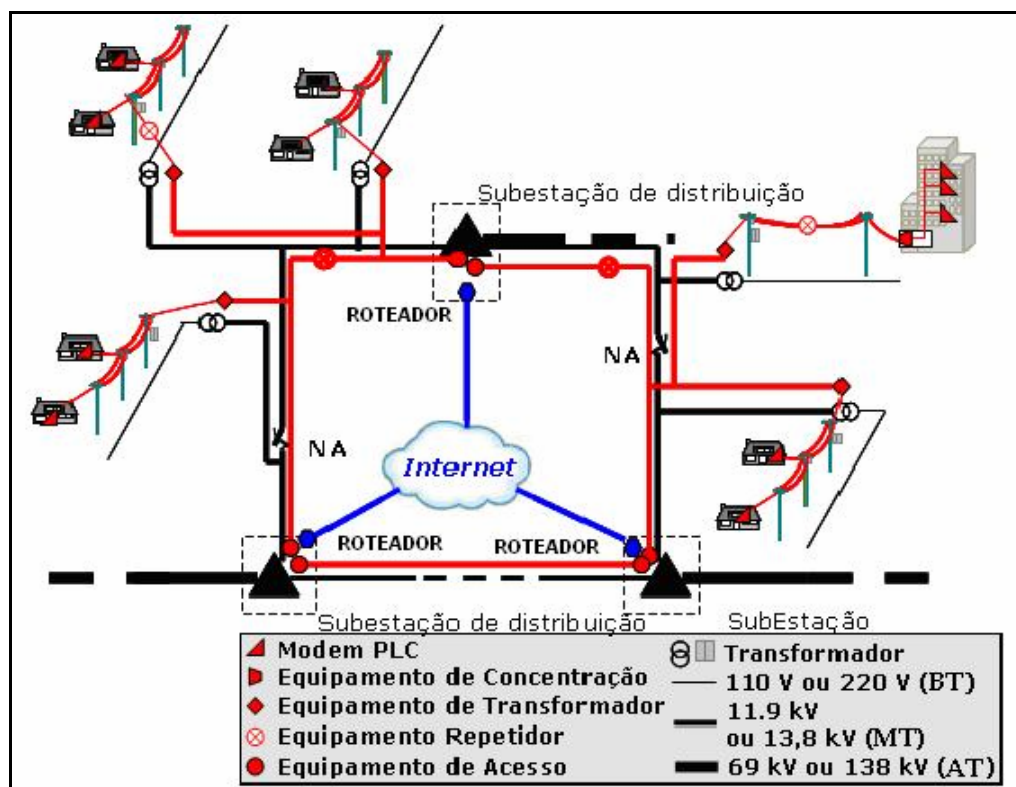


Figura 3.1 - Equipamentos de uma Rede PLC [15]

3.3.1. Equipamentos que compõem a rede PLC

O Master PLC geralmente é instalado num ponto próximo ao transformador de energia elétrica, e a partir dele o sinal é injetado nos cabos de energia elétrica. Desse modo o sinal PLC fica disponível em toda a rede elétrica ligada ao circuito desse transformador, fazendo com que qualquer tomada de energia se transforme num ponto da rede PLC. O Master PLC também pode ter a função de gerenciar e distribuir/concentrar a transmissão das informações aos Modems PLC da rede.

Na outra ponta do sistema é conectado, a uma tomada elétrica, o Modem PLC para receber o sinal transmitido pelo Master PLC, e esse modem é o responsável pela decodificação dos sinais elétricos em sinais de informação.

Quando a distância entre o Master PLC e os Modems PLC ultrapassa certo limite – ainda não há um padrão ou norma regulamentada para essa distância, dependendo então das especificações técnicas do fabricante do equipamento – surge a necessidade de se instalar equipamentos Repetidores PLC entre eles [15] [19].

a) Modem PLC

O Modem PLC é um equipamento que realiza a interface entre os equipamentos dos usuários e a rede elétrica de distribuição, para que a informação possa ser transportada sobre a rede elétrica, e é responsável pela codificação e decodificação dos sinais elétricos em sinais de informação[20].

O modem recebe alimentação e os sinais de informação pela rede elétrica de distribuição doméstica. Ele permite também separar as aplicações de voz e dados, quando existentes, para os respectivos telefones ou computadores.



Figura 3.2 – Exemplos de Modems PLC [20]

b) Repetidores ou Equipamentos Intermediários

Os repetidores regeneram e re-injetam o sinal PLC proveniente dos Equipamentos de Transformador para a rede elétrica de distribuição doméstica. São instalados normalmente junto aos medidores de cada prédio ou em algum local intermediário, por exemplo, postes sem transformador, na rede de distribuição de baixa tensão.

Também podem ser utilizados como um nó intermediário para aumentar a cobertura ou a largura de banda em segmentos críticos da rede, por exemplo, onde há uma elevada atenuação do sinal entre o equipamento PLC do Transformador e o Modem PLC. Há também Repetidores de Média Tensão que funcionam de maneira semelhante.

Porém, em alguns casos, dependendo da topologia da rede elétrica, pode não ser necessária a utilização de repetidores, principalmente onde o equipamento PLC do transformador consegue uma conexão de elevada qualidade com o Modem PLC.



Figura 3.3 - Exemplo de Repetidor PLC [20]

c) Equipamento de Concentração

Em alguns casos, principalmente em condomínios ou prédios, pode ser necessário o uso de um Equipamento de Concentração que otimize a largura de banda para um conjunto de usuários próximos. Em prédios, este equipamento é geralmente instalado junto aos medidores.

Algumas vezes o Equipamento de Concentração pode ser utilizado também como um nó intermediário para expandir a cobertura ou aumentar a largura de banda em segmentos críticos da rede.

d) Equipamento de Transformador (Master/Gateway)

O Equipamento de Transformador, geralmente chamado de Master PLC, é o dispositivo PLC instalado junto aos transformadores MT/BT. Sua função é extrair o sinal proveniente da rede de distribuição PLC (média tensão, fibra óptica, rede a cabo etc.) e injetá-lo sobre a rede de acesso (baixa tensão). O item 3.3.2 descreve as redes de acesso, de distribuição e de serviços do sistema PLC.

Possibilita o fluxo de dados *downstream* para o Modem PLC ou para os Repetidores numa configuração ponto multiponto *full-duplex*.

Os Equipamentos de Transformador são dotados de uma configuração modular flexível com:

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

Opcionalmente os Equipamentos de Transformador podem incluir:

- Placas *Wireless Fidelity* (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 a transmissão do sinal;
- Placas de Fast Ethernet ou de Gigabit Ethernet para interconexão destes equipamentos através de interfaces RJ-45 ou Gigabit Ethernet, o que permite o uso de fibra óptica ou outras tecnologias para a rede de distribuição (xDSL, por exemplo).



Figura 3.4 - Exemplo de Master PLC [20]

e) Equipamento de Subestação (*High End*)

O Equipamento de Subestação é o dispositivo PLC instalado junto à subestação e tem a função de, por um lado, permitir a interconexão com os provedores de serviços, Internet ou *Public Switched Telephonic Network* (PSTN), por exemplo, e por outro lado, injetar o sinal na rede de Média Tensão.

As funções do equipamento de subestação podem ser desempenhadas, dependendo da configuração, pelo mesmo Equipamento de Transformador.

f) Equipamento de Acesso (Unidades de Acoplamento)

As Unidades de Acoplamento são os Equipamentos de Acesso necessários para injetar e adaptar o sinal de informação do equipamento PLC para a rede de distribuição (MT ou BT).

Há dois tipos de Unidades de Acoplamento:

- Acoplamento Capacitivo, que injeta o sinal por contato direto com a rede de distribuição;
- Acoplamento Indutivo, que injeta o sinal por indução.

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. A Figura 3.5 mostra um exemplo de um acoplador capacitivo e um acoplador indutivo.

O acoplador capacitivo possui terminais para a conexão direta com a rede elétrica, enquanto que o acoplador indutivo “abraça” o cabo, injetando o sinal PLC na rede elétrica sem haver contato físico, ou seja, apenas por indução [20][21].



Figura 3.5 - Exemplos de Acopladores PLC [21]

3.3.2. Topologia da Rede PLC

A topologia geral de uma rede onde se utiliza a tecnologia PLC pode ser dividida basicamente em 3 segmentos que são: Rede de Acesso PLC, Rede de Distribuição PLC e Rede de Serviços.

a) Rede de Acesso PLC

A Rede de Acesso PLC é composta pela rede elétrica de baixa tensão, que realiza a função do segmento de acesso (última milha) da rede de telecomunicações. A rede de acesso tem a função de interconectar os Modems PLC com o Equipamento PLC de Transformador. A tomada elétrica convencional torna-se então um ponto de conexão a serviços de telecomunicações.

Os Equipamentos PLC de Transformador localizam-se junto aos Transformadores de MT/BT. A rede de acesso PLC pode ainda envolver repetidores, em função da distância entre os equipamentos PLC. O Modem PLC pode ser conectado a uma rede local (LAN) existente na residência do usuário, possibilitando diversos usuários se conectar e dividir uma

conexão em alta velocidade, opção que é especialmente útil para *Small Offices Home Offices* (SOHOs)

Também pode-se utilizar a rede elétrica interna da edificação pra estabelecer uma rede local levando o sinal PLC a todos os cômodos da casa ou escritório que possuem rede elétrica instalada.

b) Rede de Distribuição PLC

É a parte da rede de acesso que pode ter uma abrangência, inclusive metropolitana, que interliga a rede de acesso de última milha aos provedores, ou a algum *backbone*. Observe que devido a sua capilaridade potencial, recebe uma denominação especial: rede de distribuição. A rede de distribuição interconecta os equipamentos PLC instalados nas subestações de MT/BT. Esta interconexão admite uma variedade de soluções, que podem ser combinadas. Desta forma, a rede de distribuição pode se basear:

- No sistema de distribuição de média tensão, conectando diferentes subestações MT/BT por meio de equipamentos PLC de média tensão;
- Em um sistema de transmissão por fibras ópticas conectando diferentes subestações MT/BT;
- Em qualquer tecnologia como xDSL, por exemplo.

Normalmente as subestações são conectadas por uma configuração em anel com rotas de proteção em caso de falha. O desenvolvimento de PLC de média tensão é de elevada importância, na medida em que impacta positivamente a economia e a rapidez de implantação, permitindo as prestadoras e concessionárias de serviços servir-se de suas redes de distribuição para conectar diferentes subestações de baixa tensão.

c) Rede de Serviços

Em algum ponto da rede de distribuição é necessário interconectá-la aos provedores de serviço de Internet ou telefônicos. Outros serviços de valor adicionado, como *video streaming* e serviços multimídia, podem exigir uma interconexão ou serem providos diretamente pelo operador de PLC. Deve-se observar que, embora a interconexão com a PSTN possa requerer equipamentos de comutação adicionais, normalmente de custos elevados, o serviço de voz pode tecnicamente ser provido internamente à mesma rede de distribuição sem custos extras para o provedor de PLC [21].

Na Figura 3.6, é mostrada a topologia de uma rede PLC, ilustrando a Rede de Acesso, a Rede de Distribuição e a Rede dos Provedores de Serviços.

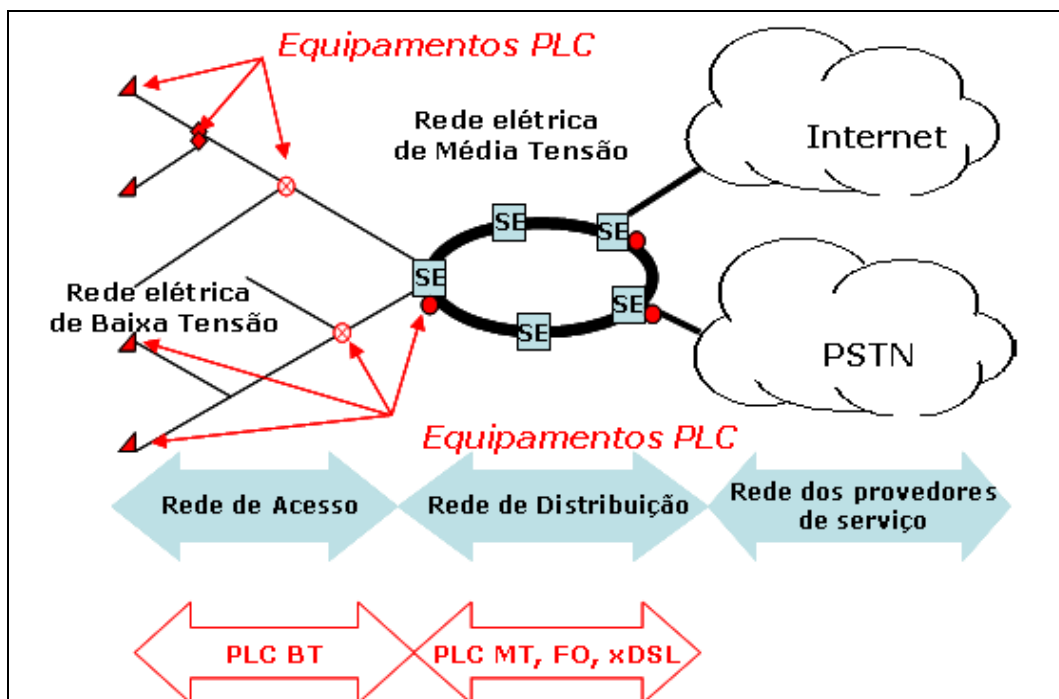


Figura 3.6 - Exemplo de uma Topologia de Rede PLC [15]

3.3.3. Padrão HomePlug

O padrão HomePlug dispensa a necessidade de se colocar na rede o equipamento denominado Master. Neste padrão, dois ou mais computadores são ligados em rede simplesmente conectando-se a eles um adaptador HomePlug (Figura 3.7) que, por sua vez, é conectado a uma tomada elétrica.

Para possibilitar essa conexão, é necessário que as tomadas onde os adaptadores são ligados pertençam ao mesmo circuito do quadro de distribuição de energia [22].



Figura 3.7 - Adaptador HomePlug [22]

Esse tipo de rede foi introduzido no mercado consumidor dos Estados Unidos em maio de 2002 e, aproveitando-se da grande disponibilidade de tomadas existentes na maioria das edificações, tornou-se o padrão mais difundido em casas e pequenos escritórios [23].

O padrão HomePlug possibilita que os computadores ligados através dele compartilhem os recursos de rede, como uma impressora, por exemplo, ou até mesmo a conexão com a Internet, que pode ser feita através de um outro tipo de tecnologia, como ADSL ou Cabo. As taxas de transmissão nesse padrão podem chegar a 14Mbps, sendo comparáveis às taxas de transmissão obtidas no padrão de redes *wireless* 802.11b. Seu alcance é de cerca de 300 metros [23][24].

3.3.4. PLC em Média Tensão

O desenvolvimento de equipamentos para Média Tensão ampliou o número de opções de uso do PLC e estimulou a entrada de novas empresas elétricas no segmento.

A Rede PLC de Distribuição interconecta os Repetidores de Baixa Tensão / Média Tensão, instalados junto aos transformadores de distribuição de energia elétrica, e promove a interconexão do sinal PLC com a rede de transporte do operador de telecomunicações, daí seguindo até alcançar um ponto de acesso à rede Internet. Esta interligação é efetuada através de equipamento denominado Master de Média Tensão.

Uma rede PLC pode ser constituída de apenas quatro tipos de equipamento, localizados em quatro níveis. O Modem PLC, o Repetidor de Baixa Tensão, o Repetidor Baixa Tensão / Média Tensão e o Master de Média Tensão. Dependendo do comprimento e da topologia da rede, o Repetidor de Baixa Tensão poderá ser suprimido, restando assim três

níveis. Caso a interligação com a rede de transporte se dê através da linha de baixa tensão, poderemos ter apenas os Modems PLC e o Master de Baixa Tensão [22].

A principal diferença entre o PLC de Baixa Tensão o PLC de Média Tensão está nos acopladores utilizados para a introdução e adaptação dos sinais de dados. Os acopladores do tipo indutivo são mais utilizados em Média Tensão, enquanto que os acopladores capacitivos têm maior aplicação na injeção do sinal PLC em Baixa Tensão.

3.4. Especificações Técnicas

As especificações técnicas utilizadas em redes PLC incluem as faixas de frequência, técnicas de modulação e correção de erros, e são divididas em *indoor* e *outdoor*. Estas técnicas são detalhadas a seguir.

3.4.1. Faixas de frequência

As faixas de frequência utilizadas na rede PLC são divididas em *indoor* e *outdoor*. A transmissão *indoor* é realizada entre os “repetidores” e os “modems” e está compreendida entre 18MHz e 26MHz. A transmissão *outdoor* é realizada entre os “masters” e os “modems” ou entre os “masters” e os “Repetidores” e está compreendida entre 1,6MHz e 12MHz. A Figura 3.8 ilustra as faixas de frequência utilizadas pelo sistema [24].

No HomePlug, a faixa de frequência utilizada vai de 4,3MHz a 20,9MHz [22][25].

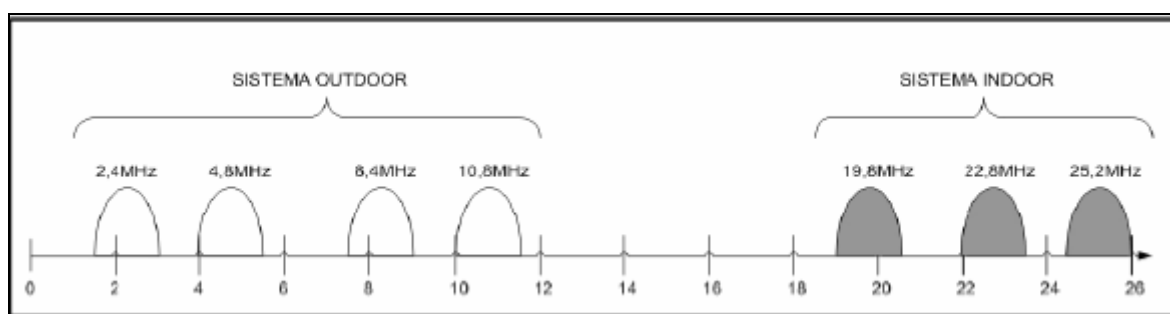


Figura 3.8 – Faixas de Frequência na Rede PLC [24]

3.4.2. Técnicas de modulação

Há várias técnicas de modulação que podem ser utilizadas no sistema PLC. Todas elas visam compensar os distúrbios e restrições que um meio de comunicação como a rede

elétrica impõe sobre a comunicação de dados, e fazer com que a comunicação seja rápida e eficiente.

A técnica *Direct Sequence Spread Spectrum* (DSSS) consiste em diluir a potência do sinal em uma faixa muito larga. Possui baixa densidade espectral e normalmente é utilizada para transmitir taxas mais baixas, por necessitar de uma grande faixa de frequência. É muito utilizada em aplicações militares [19].

A técnica *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) consiste em se ter várias portadoras estreitas lado a lado. Desta forma, as portadoras que sofrem interferência são eliminadas, conseqüentemente gerando uma diminuição na taxa de transmissão. Necessita de um amplificador de potência altamente linear, para reduzir a geração de harmônicos das portadoras, que agem como interferências para as outras portadoras de frequência mais alta [19].

A técnica *Gaussian Minimum Shift Keying* (GMSK) transmite os dados na fase da portadora, exigindo amplificadores menos complexos. É considerado um OFDM de faixa larga. Seu espectro tem formato do tipo Gaussiano, como pode ser visto na Figura 3.9, que também ilustra as outras técnicas mencionadas [19].

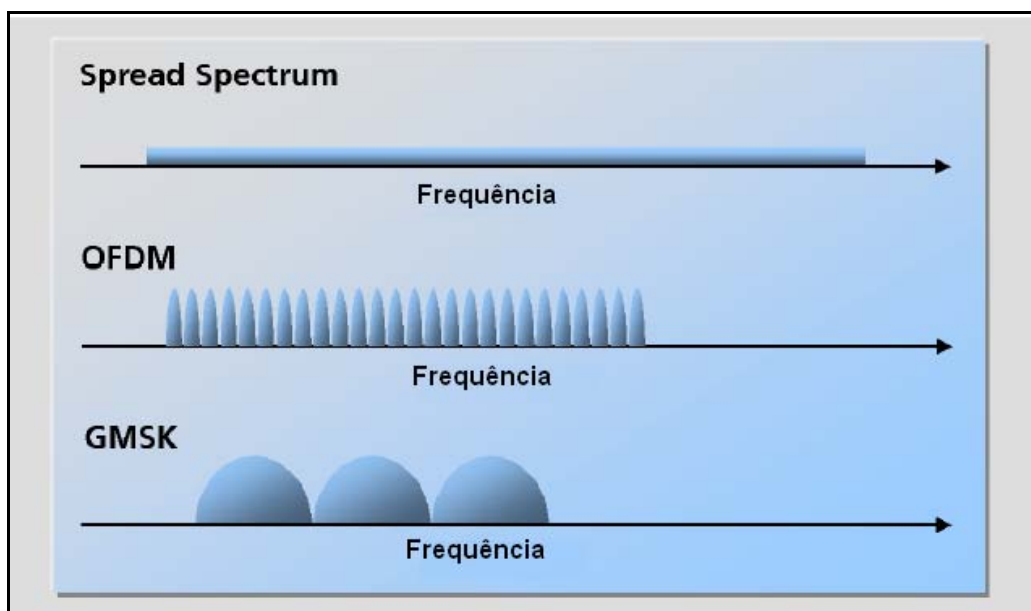


Figura 3.9 – Técnicas de Modulação Utilizadas no PLC [19]

3.4.3. Correção de erros

O sistema PLC utiliza uma codificação para correção de erro que permite que os erros sejam corrigidos do lado da recepção. Isto é conseguido duplicando-se os dados transmitidos, ou seja, para cada bit de dados são transmitidos dois bits. O sistema monitora a qualidade do meio de comunicação, desligando o *Forward Error Correction* (FEC) quando este não é necessário, a fim de melhorar o desempenho da rede.

3.5. Restrições de Operação e Dificuldades de Implementação

Existem vários fatores que podem prejudicar o funcionamento adequado dos sistemas PLC no Brasil e dificultar a sua implantação em larga escala. Entre eles, a relação sinal/ruído, a interferência, a segmentação de alimentadores e a questão da segurança no trabalho.

As características da rede elétrica do Brasil são bem diferentes das redes da Europa e dos Estados Unidos, onde os produtos atualmente ofertados ao mercado brasileiro são desenvolvidos. Esses equipamentos trabalham em uma faixa de frequência que foi escolhida baseando-se em testes realizados nestas redes.

Porém, algumas características das redes elétricas brasileiras, como a utilização de cabos nus em redes de distribuição, inexistência de filtros de ruído na maioria dos eletrodomésticos comercializados e características das redes internas residenciais, podem fazer com que estas apresentem ruído e atenuação que não sejam capazes de serem tratados pelos atuais equipamentos [19].

Portanto, as companhias energéticas que pretendam explorar a tecnologia PLC deverão investir na melhoria e caracterização de suas redes.

A questão da interferência deve ser tratada de três ângulos diferentes:

- A interferência provocada pela rede PLC em outros serviços licenciados na mesma faixa de frequência, que se relaciona com o nível de potência que será determinado pelo organismo de regulação. Ainda não existe um valor definido, mas este deverá ser determinado considerando-se as características de ruído das linhas de distribuição e a potência máxima sem haver interferência;
- A interferência causada pelos serviços licenciados no sistema PLC em operação provoca uma grande preocupação devido à diminuição do espectro

disponível, que resultam em taxas de transmissão tão baixas que inviabilizam a aplicação da tecnologia. Na mesma faixa utilizada pelos equipamentos PLC atualmente, estão os serviços licenciados “móvel marítimo, móvel aeronáutico, radioamador, radiolocalização e radiodifusão” [19]. Como o sinal PLC é compartilhado entre os assinantes que estão conectados na mesma rede, ou seja, no mesmo alimentador, se houver uma grande quantidade de clientes compartilhando o mesmo alimentador, haverá uma diminuição na taxa de transmissão. Para contornar este problema, pode-se dividir os clientes em grupos, segmentando o alimentador. O que também pode ser feito é desenvolver formas de se transmitir taxas mais altas com um consumo de banda menor, como é feito hoje nas tecnologias ADSL e *Cable Modem* [19].

- Outra grande preocupação é com relação à segurança dos trabalhadores, visto que os equipamentos PLC permitem a passagem de sinais através de transformadores e disjuntores e representam um grande potencial de perigo para as pessoas que trabalham nas linhas de distribuição [19].

3.6 Arquitetura *IntelliGrid*

As tecnologias básicas que são necessárias à criação de um sistema de energia elétrica mais eficiente, confiável e flexível já estão disponíveis ou já podem ser vislumbradas. O desafio atual é, portanto, descobrir como integrá-las para tornar esta infraestrutura capaz de atender às demandas futuras de geração, transmissão, distribuição e comercialização da energia elétrica.

Estas demandas estas que requerem uma infra-estrutura de comunicações integrada à infra-estrutura de energia, propiciando a formação de uma rede inteligente, capaz de oferecer a flexibilidade e as funcionalidades exigidas por uma sociedade cada vez mais digitalizada.

O Consórcio *IntelliGrid* foi criado pelo *Electric Power Research Institute* (EPRI) para colaborar na consolidação do caminho que conduzirá às redes de energia elétrica do futuro. O EPRI é uma instituição americana, com abrangência internacional, sem fins lucrativos, voltada à pesquisa ambiental e energética de interesse público, criada em 1973 e formada por especialistas oriundos das empresas de energia, fabricantes de equipamentos, do setor público e de instituições de ensino e pesquisa [19][24].

Para os membros do Consórcio *IntelliGrid*, uma nova rede de distribuição de energia elétrica emergirá ao se integrar os avanços em comunicação, informática e eletrônica – a Rede *IntelliGrid*. Sua missão é, portanto, possibilitar o desenvolvimento, integração e aplicação de tecnologias que promoverão a transformação da infra-estrutura de energia elétrica, para que seja capaz de prover, de maneira eficiente e barata, serviços e produtos com segurança, qualidade e confiabilidade.

O Consórcio *IntelliGrid* financia quatro projetos que, juntos, formam os pilares desta nova concepção dos sistemas de energia elétrica[10][12][22][24]:

- A Arquitetura *IntelliGrid* é um projeto que pretende ter escala mundial e abranger todo o setor de energia elétrica, e tem por objetivo propiciar a visão sistêmica necessária para a integração das infra-estruturas de energia e de comunicação de forma que estas possam oferecer novos serviços e caminhar juntas à medida que as indústrias de energia e comunicações avancem.
- O FSM é um projeto que pretende criar um sistema que oferecerá ferramentas que permitirão o reconhecimento de e a resposta a distúrbios e mudanças de carga na rede elétrica em tempo real, o que propiciará aos operadores uma clara e acurada visão da rede, permitindo que as operações sejam otimizadas e que ações sejam antecipadas. Serão desenvolvidos dois sistemas, uma para transmissão e outro para distribuição. O Consórcio *Intelligrid* está finalizando os requisitos do FSM e planeja para o próximo ano, junto com operadoras e fabricantes, o desenvolvimento e teste de protótipos.
- Portal do Consumidor – O Portal do Consumidor é um projeto-chave na visão do Consórcio *IntelliGrid* pois não só fornecerá uma interface para os serviços relacionados à energia elétrica (medição, detecção de falhas, tarifação), como permitirá a expansão/otimização de serviços que demandam a integração dos diversos agentes, sejam eles geradores, distribuidores, negociadores ou consumidores, desde os industriais, até os comerciais e residenciais. O Consórcio *Intelligrid* vem trabalhando para definir as funcionalidades necessárias e criar um modelo de referência para ser utilizado no desenvolvimento do portal.
- Padrão de Comunicações para *Distributed Energy Resources* (DERs) em sistemas *Advanced Distribution Automation* (ADA) – Com este projeto, o Consórcio *Intelligrid* está focado em apenas uma parte da tecnologia

necessária para se criar um sistema ADA – modelamento de objetos para DERs – fazendo parte de um grupo de trabalho internacional que é patrocinado pelos maiores agentes do mercado global de energia elétrica. Sistemas que incorporarem a tecnologia ADA se transformarão em sistemas multifuncionais, que se beneficiarão plenamente das novas funcionalidades oferecidas pela eletrônica de potência, tecnologia da informação e simulação de sistemas.

O Consórcio *IntelliGrid* está também trabalhando na identificação de oportunidades em que soluções baseadas na Arquitetura *IntelliGrid* poderão ser colocadas em uso em aplicações em campo. Além disso, um grande esforço vem sendo feito para transferir os resultados desta arquitetura para as operadoras de energia elétrica através de seminários in loco e de suporte à especificações aderentes à Arquitetura *IntelliGrid* para a aquisição de equipamentos [13][19][24].

3.6.1 Necessidade para a Arquitetura *IntelliGrid*

A sociedade atual tem experimentado uma nova era tecnológica impulsionada pelas tecnologias digitais. Em nenhum outro tempo da História o mundo esteve tão interconectado como nos dias atuais. Televisão, rádio, áudio, vídeo, telefonia, computação e naturalmente a Internet fazem parte desse emaranhado de informações digitais.

Como membros da “Sociedade Digital”, os consumidores de energia (residenciais, comerciais e industriais) estão cercados por esse oceano, onde as informações estão instantaneamente acessíveis, fáceis de se encontrar, ricas em variedade e conteúdo e sempre disponíveis. A expectativa dos consumidores é que mudanças similares sejam aplicadas na indústria de energia.

Confiabilidade, disponibilidade, fluxo constante de informações, poder de escolha e diversidade de preços são requisitos prementes do setor elétrico para atender às expectativas dessa sociedade digital. Desde o século 19, a indústria de energia elétrica tem experimentado contínuas mudanças e avanços tecnológicos revolucionando o modo de geração, distribuição e consumo de energia elétrica.

Entretanto, a falta de investimentos na infra-estrutura crítica do sistema elétrico nos últimos anos, o crescimento exponencial do consumo de energia elétrica e a demanda por uma maior confiabilidade e flexibilidade na sua distribuição têm levado o sistema de energia ao seu limite. Somadas a isso, tecnologias baseadas em sistemas microprocessados têm

alterado radicalmente a natureza das cargas elétricas, resultando em uma demanda que é incompatível com o sistema de potência criado para atender às demandas da economia analógica [10][24].

Sem uma visão unificada, tais questões continuarão sendo endereçadas individualmente pelas concessionárias, órgãos governamentais e outros organismos relacionados, resultando em atividades de desenvolvimento isoladas e não convergentes, de forma que o sistema de energia do futuro não alcance a ubiquidade e universalidade almejadas. Assim, um esforço coordenado e focado para modernizar o sistema elétrico, desde a geração, transmissão, distribuição até o consumo final, faz-se necessário para o atendimento efetivo à essa nova demanda [10][24].

Neste contexto, a Arquitetura *IntelliGrid* surge como uma importante iniciativa que visa a integração plena dos sistemas de energia e comunicação como forma de possibilitar um sistema de energia inteligente, flexível, auto-recuperável e que atenda às necessidades atuais dos consumidores finais.

3.6.2 Objetivos da Arquitetura *IntelliGrid*

O principal objetivo da Arquitetura *IntelliGrid* é desenvolver ferramentas e métodos necessários para o processo de transformação e integração da infra-estrutura do sistema de energia, por meio da integração dos sistemas elétrico e de comunicação, a fim de garantir qualidade, segurança, confiabilidade e disponibilidade dos produtos e serviços das concessionárias de energia.

Existe uma demanda particular na indústria de energia por uma infra-estrutura organizada (padronização e tecnologia) que permita uma interoperabilidade de baixo custo entre os produtos e serviços de diferentes fabricantes. Nesse sentido, também é objetivo da Arquitetura *IntelliGrid* promover a integração dos diversos sistemas para que operem de maneira cooperada e sincronizada.

Os benefícios específicos da Arquitetura *IntelliGrid* são:

- Permitir aplicações avançadas que requerem uma infra-estrutura ubíqua;
- Aumento da confiabilidade, disponibilidade e segurança do sistema elétrico;
- Predição e auto-recuperação de situações emergências;
- Redução dos custos de operação e manutenção através da integração das “ilhas de automação”;
- Padronização de componentes e aumento da competitividade.

3.6.3 Estrutura da Arquitetura *IntelliGrid*

A arquitetura de um sistema corresponde a uma visão geral da organização fundamental deste sistema, sendo expressa através da identificação dos componentes que o constituem, da descrição do inter-relacionamento entre eles e entre o ambiente que o cerca e da definição dos princípios que sustentarão o seu desenvolvimento e sua evolução. A Arquitetura *IntelliGrid*, por se tratar de um modelo de referência, não é impositiva nem determina como cada sistema deve ser construído. Ao contrário, deve ser vista como uma estrutura sobre a qual um sistema deve ser construído, estrutura esta formada a partir de cinco princípios [10][11][25]:

- Necessidades do negócio capturadas a partir da identificação das funções necessárias à operação do sistema de energia elétrica;
- Visão estratégica baseada em conceitos de informação distribuída – modelamento abstrato, segurança da informação, gerenciamento da rede e do sistema, gerenciamento de dados e integração de sistemas e interoperabilidade entre eles;
- Estratégia para a definição de serviços comuns, modelos de informação e interfaces baseada na escolha de técnicas independentes de uma tecnologia específica e/ou proprietária;
- Adoção de padrões e das melhores práticas reconhecidas como tais pela indústria;
- Metodologias de trabalho e apresentação de resultados voltados a facilitar o entendimento e a utilização da arquitetura, agrupando as recomendações de acordo com cada sistema, aplicação e usuário.

A partir desta concepção, a Arquitetura *IntelliGrid* define o modelo de um sistema de energia baseado nos seguintes elementos[14][24][25]:

- Domínio – define um conjunto de funções da indústria de energia elétrica que apresentam características operacionais e funcionais comuns de acordo com a área de influência desta funções;
- Função – é uma operação realizada por um agente do sistema de energia elétrica que interfere de alguma forma na indústria e/ou no negócio de energia elétrica;

- Requisito – requisito-chave para a formação de uma infra-estrutura computacional distribuída conforme as características próprias do ambiente ao qual ele se destina, podendo ser referente à topologia de comunicação, qualidade de serviço, segurança do sistema ou gerenciamento de dados;
- Ambiente – define um ambiente de comunicação no qual a troca de informações entre as funções de um sistema de energia apresentam requisitos comuns;
- Recomendação – é a recomendação de um padrão, tecnologia de informação ou melhor prática para ser adotada em um dado ambiente para que esteja de acordo com a Arquitetura *IntelliGrid*;
- Caso de uso – é o detalhamento de uma dada função. Cada passo do processo descrito nesta função é relacionado a um ambiente específico.

Para se utilizar a Arquitetura *IntelliGrid* na execução de um determinado projeto é necessário:

- Identificar o domínio e as funções que são escopo deste projeto;
- Analisar os casos de uso de cada função, e, se necessário, detalhar, modificar, incluir ou excluir novos passos;
- Relacionar cada passo a um ambiente;
- Analisar as recomendações de cada ambiente e decidir a sua adoção pelo projeto;
- Executar o projeto de acordo com as recomendações adotadas.

Para se utilizar a Arquitetura *IntelliGrid* na execução de um determinado projeto é necessário:

Neste capítulo, foram mostrados os padrões e especificações técnicas dos equipamentos PLC, restrições de operação e dificuldades encontradas na implementação da tecnologia PLC. No próximo capítulo, será apresentado o estudo de caso em ambientes *Indoor* e *Outdoor*.

CAPÍTULO 4 – TESTES DE CAMPO

4.1 Introdução

No Capítulo 3, foi possível conhecer e entender um pouco mais sobre a tecnologia PLC, suas características, seus padrões e especificações, e finalmente as restrições de operação que prejudicam, de certa forma, a utilização dessa tecnologia.

A tecnologia *Power Line Communication* (PLC) tem demandado discussões no sentido de se avaliar o potencial de interferência nos serviços atualmente em operação e que utilizam radiofrequências na faixa de 1,705 MHz a 30 MHz.

Neste sentido, verificou-se a necessidade de se realizar medições envolvendo fabricantes, empresas proprietárias de redes de energia elétrica e usuários dessa faixa de radiofrequências[26][31][36].

Com o propósito de avaliar este potencial de interferência, a ANATEL coordenou medições e testes em conjunto com fabricantes, empresas proprietárias de redes de energia elétrica e usuários na cidade de Goiânia, abrangendo os seguintes aspectos [27][32][39]:

- Interferência produzida por equipamentos conectados à rede primária: apenas dois transceptores PLC conectados à rede primária (13,8 kV);
- Interferência produzida por equipamentos conectados à rede secundária: apenas dois transceptores PLC conectados à rede secundária (110/220 Vca);
- Interferência agregada: interferência causada pela operação de vários equipamentos PLC conectados à rede de energia elétrica – Interferência do sistema em operação;
- Interferência produzida por equipamentos de diferentes tecnologias conectados a redes elétricas.

Nesses casos, deve haver tráfego de dados, possibilitando assim uma simulação da operação real do sistema. Adicionalmente foi analisada a interferência em ambiente indoor e outdoor, urbano e rural.

Os resultados destes testes e medições servem de base para elaborar regulamentação que permita a coexistência destes sistemas com os sistemas de radiocomunicações e serviços licenciados como: móvel marítimo, móvel aeronáutico, radioamador,

radiolocalização e radiodifusão, operando na faixa de radiofrequências de 1,705 MHz a 30 MHz[28].

4.2 Estudo Teórico

As redes elétricas diferem consideravelmente em termos de estrutura, topologia e propriedades físicas dos convencionais meios de transmissão guiados, tais como fio telefônico, par trançado e cabo coaxial. Dentre as diferenças, pode-se citar o compartilhamento do mesmo meio físico de comunicação por vários usuários e a presença de várias fontes de ruído [29][56][57]. Além disso, os canais PLC podem ser vistos como um misto entre um canal de telefonia fixa e um canal de comunicação sem fio, uma vez que os mesmos apresentam desvanecimentos seletivos em frequência causados pela propagação em múltiplos percursos e severas atenuações em função do comprimento do canal, além do ruído impulsivo de natureza não gaussiana com potência suficiente para corromper rajadas de bits [30][56].

Os canais PLC estão dispostos em dois ambientes possíveis: os *last miles* ou *outdoor*, que compreendem a rede elétrica externa de média e alta tensão e os ambientes *last meters* ou *indoor* que compreendem a rede elétrica de Baixa Tensão e apresentam características mais favoráveis do que os canais *outdoor* pelo fato de não estarem sujeitos a fatores externos como a interferência por ondas curtas de rádio [31][56].

O estudo do canal PLC pode ser baseado em dois métodos: o *button up*, que descreve o canal segundo matrizes de admitância e impedância, necessitando de um conhecimento apurado da rede, e o *top down*, que descreve o canal segundo uma função de transferência que corresponde a resposta em frequência do canal, possibilitando uma representação simples e independente da topologia da rede elétrica. Dentre os modelos de canais PLC que são descritos através de uma função de transferência, o modelo proposto por Zimmerman e Dosdert [36][37][58] para ambientes *last miles* pode ser empregado para ambientes *last meters* sem perda de generalidade. Tal modelo é o mais atual e utilizado por levar em consideração diversos parâmetros, tais como fatores de transmissão e reflexão de ondas, atenuação em função do comprimento do canal e os multipercursos e seus respectivos atrasos. A Eq. 1 mostra a função de transferência complexa de um típico canal PLC:

$$H(f) = \sum_{i=0}^n G(i) e^{(-a_0 + a_1 f^k d(i))} e^{-j2\pi\tau(i)} \quad (\text{Eq.1})$$

Em que i representa o número de percursos, a_0 e a_1 são os parâmetros de atenuação, k é o expoente do fator de atenuação, $d(i)$ é o comprimento do canal no i -ésimo percurso e $\tau(i)$ é o atraso devido ao multipercurso, o qual depende da velocidade da luz c_0 e da constante dielétrica do cabo ϵ_r , como mostra a equação 2.

$$\tau(i) = \frac{d(i) \sqrt{\epsilon_r}}{c_0} \quad (\text{Eq.2})$$

A função $G(i)$ é um fator de ponderação obtido pelo produto dos fatores de transmissão e reflexão nos vários percursos. O módulo de $G(i)$ no percurso i tem um limitante superior dado por [31][56][57]:

$$|G(i)| \leq 1. \quad (\text{Eq.3})$$

Procurou-se determinar a capacidade teórica de transmissão a partir da fórmula de Shannon [37][53], que relaciona a capacidade do canal com a largura de faixa e a relação sinal/ruído (SNR) do canal. O sinal PLC é um sinal multiportadora, em que a capacidade teórica de um meio de transmissão não mais dependerá da relação sinal/ruído de um único canal, e sim, das várias relações sinal/ruído de cada canal. Desta forma, a análise foi realizada levando-se em conta os diferentes cenários onde se realizaram os testes. O primeiro cenário de testes foi o ambiente *Indoor* com o padrão HomePlug, e o segundo, o ambiente *Outdoor*, com o padrão DS2 [39].

– Ambiente Indoor

Para o ambiente Indoor foi analisado o padrão HomePlug, versão 1.0, em que a faixa de frequência utilizada varia entre 20,7 MHz (frequência máxima – $f_{\max}$) a 4,48 MHz (frequência mínima – $f_{\min}$). Assim, obtém-se uma largura de faixa B de 16,22 MHz, em que B é dado por:

$$B = f_{\max} - f_{\min} \quad (\text{Eq.4})$$

Neste padrão, utiliza-se aproximadamente 80 portadoras ($N_p=80$) para a transmissão de dados, cada portadora com o seu respectivo canal. Portanto, a relação sinal/ruído total para o ambiente *Indoor* ($SNR_{total}(\cdot)$) em função da relação sinal/ruído do canal (SNR_{canal}) é dada por[24][36]:

$$SNR_{total}(SNR_{canal}) = \left[\prod_{n=1}^{N_p} \left(1 + \frac{SNR_{canal}}{\gamma} \right) \right]^{\frac{1}{N_p}} - 1 \cdot \gamma \quad (\text{Eq. 5})$$

onde $\gamma=1$. A taxa de transmissão ($Taxa(\cdot)$) em função da SNR_{total} pode ser calculada como se segue[24][36]:

$$Taxa(SNR_{canal}) = B \cdot \log(SNR_{total}(SNR_{canal}), 2) \quad (\text{Eq. 6})$$

A Figura 4.1 apresenta o cálculo estimativo do desempenho do sistema *Indoor* (Taxa de bits versus SNR_{canal}), considerando a relação sinal/ruído média do canal e seu desvio padrão. A relação sinal/ruído média para esse tipo de ambiente é de 35,8 dB, isto é, o sinal é aproximadamente 3.580 vezes maior que o ruído, com desvio padrão médio de 4,0 dB [39][41].

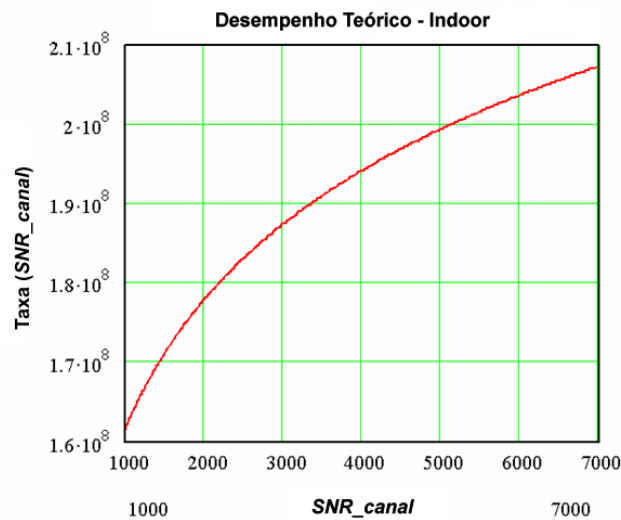


Figura 4.1 - Desempenho Teórico *Indoor*: Taxa de bits versus Relação Sinal-Ruído do Canal

Os limites do eixo das abscissas levou em conta a média e o desvio padrão da SNR_{canal} .

– *Ambiente Outdoor*

Para o ambiente *Outdoor* foi analisado o padrão do *chipset* DS2. Esse padrão trabalha na faixa de frequência de 1 MHz a 30 MHz . Portanto, B_{out} é 29 MHz:

$$B_{out} = f_{\max_{out}} - f_{\min_{out}} \quad (\text{Eq. 7})$$

Este padrão utiliza, aproximadamente, 1.280 portadoras ($N_{pout}=1.280$), cada portadora com o seu respectivo canal. Portanto, a relação sinal/ruído total para o ambiente *Outdoor* ($SNR_{total_out}(\cdot)$) em função da relação sinal/ruído do canal (SNR_{canal_out}) é dada por:

$$SNR_{total_out}(SNR_{canal_out}) = \left[\prod_{n=1}^{N_p} \left(1 + \frac{SNR_{canal_out}}{\gamma} \right) \right]^{\frac{1}{N_{pout}}} - 1 \gamma \quad (\text{Eq. 8})$$

onde γ também é assumido como a unidade ($\gamma=1$). A taxa de transmissão $Taxa_out$, em função da SNR_{total_out} , pode ser calculada como se segue:

$$Taxa_{out}(SNR_{canal_out}) = B_{out} \log(SNR_{total_out}(SNR_{canal_out}) 2) \quad (\text{Eq. 9})$$

A Figura 4.2 apresenta o cálculo estimativo do desempenho do sistema *Outdoor* (Taxa de *bits* versus SNR_{canal}), considerando a relação sinal/ruído média do canal e seu desvio padrão. Como não é de conhecimento os valores de medição da relação sinal/ruído para ambientes *Outdoor*, adotaram-se os mesmos valores no caso *Indoor*.

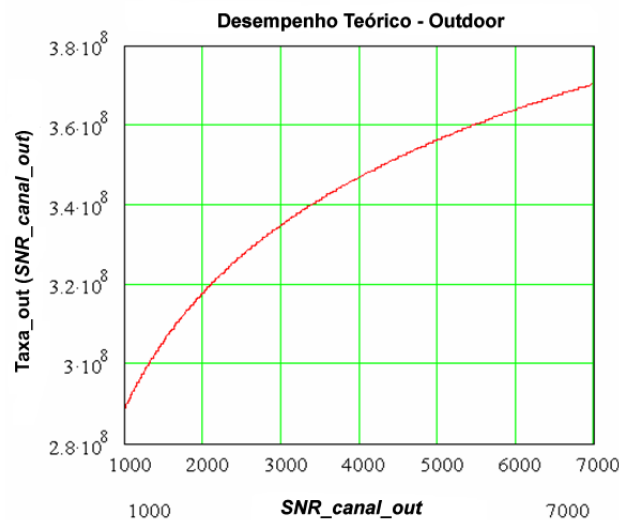


Figura 4.2 - Desempenho Teórico *Outdoor*: Taxa de bits versus Relação Sinal-Ruído do Canal

Novamente, os limites do eixo das abscissas levou em conta a média e o desvio padrão da SNR_{canal_out} . Esses valores máximos teóricos são muito influenciados pelos valores de portadoras que os equipamentos utilizam na modulação OFDM, observando os limites máximos dos produtos, N_p (Eq. 5) e N_{pout} (Eq. 8).

No caso do equipamento para ambiente *Indoor*, um equipamento do padrão HomePlug foi analisado. No caso do equipamento *Outdoor*, um equipamento que opera com o *chip* do padrão DS2 foi analisado. Pode-se observar por meio das figuras 4.1 e 4.2, considerando SNR de 38 dB, que a taxa máxima teórica estimada é de $2,1 \times 10^8$ (210 Mbps) para um ambiente *Indoor* e é de $3,7 \times 10^8$ (370 Mbps) para um ambiente *Outdoor*. Os valores apresentados pelos fabricantes, são de 14Mbps e 200Mbps, para ambiente *Indoor* e *Outdoor*, respectivamente, os quais correspondem a SNR de X e Y, conforme a formulação apresentada[24].

4.3 Ambiente Indoor

Serão descritos os testes práticos realizados nos Laboratórios do Centro Federal de Educação Tecnológica de Goiás e Universidade Católica de Goiás com o objetivo de observar as características do sinal PLC na prática, medir a máxima taxa de transmissão possível (para o equipamento escolhido para o teste), verificar as restrições de operação que podem ser encontradas em um ambiente com tráfego PLC e posteriormente analisar os resultados obtidos nos testes, comprovando, assim, a eficiência da transmissão de dados utilizando-se a tecnologia PLC.

Os testes se dividiram em quatro fases distintas:

- Estudos sobre a forma de realização dos testes;
- Montagem do cenário com equipamentos e instrumentos;
- Realização dos testes e coleta dos dados;
- Análise dos resultados.

Para a montagem da rede foi utilizado um par *PlugFacil Powerline Ethernet Bridge*, que opera com frequência de 4,3 a 20,9MHz, utiliza modulação OFDM. É certificado pelos padrões IEEE 802.3, IEEE 802.3U e HomePlug 1.0.1. A taxa de linha efetiva é 56Mbps, sendo que a taxa de dados de vazão efetiva é acima de 16Mbps[33].

Foram realizados testes de desempenho, analisando a taxa de transmissão máxima encontrada nessa rede PLC. Também foram realizados testes de introdução de ruído no

sistema, inserindo no circuito alguns eletroeletrônicos como fontes de ruído, analisando a taxa de transmissão e comparando o espectro da rede elétrica com o espectro de cada fonte de ruído. Foram utilizados então uma furadeira, um liquidificador, um secador de cabelo e um carregador de celular. Foram feitas análises do sinal PLC no domínio do tempo (osciloscópio digital), da frequência (analisador de espectro digital) e da taxa de transmissão (Network Probe)[34].

4.4 Equipamentos Utilizados

Para a realização do teste foram utilizados os seguintes equipamentos e instrumentos:

- Dois notebooks. O notebook 1 (servidor) tem como especificações: processador Intel Core 2 Duo 2Ghz, com 2GB de Memória RAM e sistema operacional Windows Vista, onde foram instalados o servidor FTP FileZilla e o software para monitoramento Network Probe, versão 2.7. O notebook 2 (cliente) tem como especificações: processador Dual Core 1,73Ghz, com 2 GB de Memória RAM, placa de rede Gigabit Ethernet e sistema operacional Windows XP, onde também foi instalado o software Network Probe. Foi necessária a configuração de endereços IPs para que os computadores fizessem parte da mesma rede.
- Dois equipamentos PLC HomePlug do fabricante *AsokaTM*, modelo PlugFacil Powerline Ethernet Bridge, que possui porta Ethernet. Possuem taxa de transmissão máxima de 56Mbps. Ambos vieram acompanhados de seus respectivos cabos Ethernet para conexão com a placa de rede do computador. Estes dois equipamentos, juntamente com a rede elétrica do local escolhido para o experimento, formaram a rede PLC em que trafegaram os dados entre os dois *notebooks* citados [26][27][36].
- Uma analisador de espectro modelo Minipa MSA810, com parâmetros dos testes definidos como frequência central de 12Mhz, 2Mhz/div e atenuação de -30dBm.
- Um osciloscópio digital portátil, modelo Tektronik THS720P, e os parâmetros utilizados nos testes foram 0,2 V/div e 5ms/div no canal 1.

- Uma furadeira Makita HP 1500, 1010W/220V, fabricante Makita, utilizada como fonte de interferência durante o teste.
- Um liquidificador do fabricante Walita modelo RI1730, 220 V, 60 Hz, 400 W, utilizado como fonte de interferência durante o teste.
- Um carregador de celular Nokia modelo ACP-12E. Entrada: 100 – 240 Vca, 12,5W, 50 – 60Hz, 125 mA automático. Saída: 5,7Vcc, 800 mA. Utilizado como fonte de interferência.
- Um secador de cabelos TANY Blue 2000, 1400W/220 Vca, 60Hz, utilizado como fonte de interferência no teste.

Para realizar a leitura do espectro da rede elétrica com o analisador de espectro, foi desenvolvido um cabo de interligação com um Filtro Passa-Alta, com a função de realizar o acoplamento da rede elétrica à entrada do instrumento. A entrada do instrumento foi desenvolvida para receber pequenos sinais oriundos de antenas (no máximo $\frac{1}{4}$ W), por essa razão não seria possível interligar diretamente a rede elétrica ao instrumento, pois a tensão da rede danificaria a entrada de sinais.

A Frequência de Corte (F_c) de um filtro Resistor – Capacitor (filtro RC) é dada por:

$$F_c = 1 / (2.\pi.RC) \quad (\text{Eq. 10})$$

Onde **R** é o valor do resistor e **C** o valor do capacitor. Foi utilizado um resistor de 10 K Ω e um capacitor de 10 pF. Sendo assim, a frequência de corte é igual a 1,59 MHz. Nesta frequência, o filtro causa uma atenuação de 3dB no sinal captado. Na frequência da rede (60 Hz), a atenuação é máxima, não permitindo a passagem da frequência da rede para a entrada do instrumento. Como a faixa de frequência de operação do equipamento HomePlug está acima dos 4MHz, o filtro não causa atenuação do sinal PLC coletado [27] [28][37].

Na Figura 4.3, podemos ver o circuito do Filtro Passa-Alta responsável por filtrar as baixas frequências não utilizadas pelo PLC, incluindo os 60 Hz da rede de 220 Vca. Na entrada do filtro, o terra foi interligado ao neutro. Isto foi feito para evitar que uma inversão entre a fase e o neutro no momento da conexão à rede elétrica levasse o potencial da fase para a malha do conector da entrada de sinais do analisador de espectro, podendo causar danos ao equipamento ou acidentes com o operador.

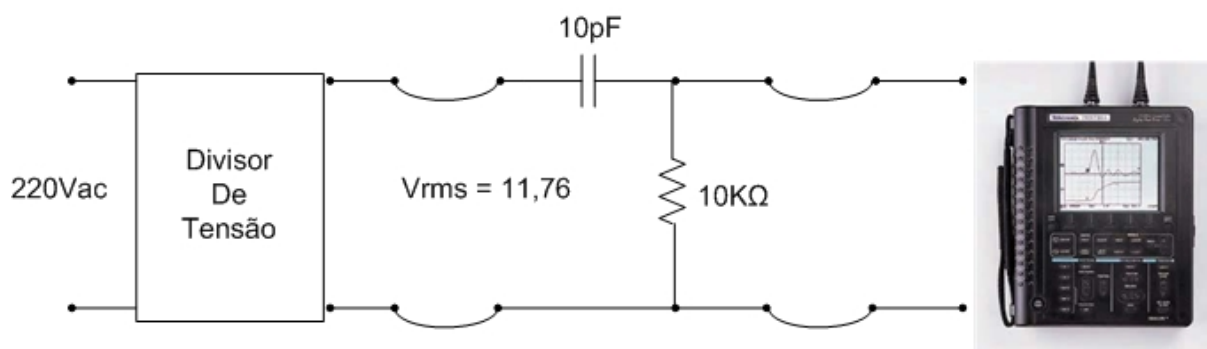


Figura 4.3 – Circuito do Filtro Passa-Alta

Na entrada de sinais do analisador de espectro, foi colocado um atenuador de 20 dB, com o objetivo de garantir a integridade do instrumento durante o experimento.

4.5 Cenário do Ensaio

Foram feitos estudos e medições nos Laboratórios de Telecomunicações do Centro Federal de Educação Tecnológica de Goiás - CEFET-GO, localizado na rua 74 número 46, Setor Central, Goiânia, Goiás e no Laboratório de Eletricidade do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Católica de Goiás - UCG, que se encontra na Área 4, Bloco G, sala 110, localizado à Praça Universitária, Setor Universitário, Goiânia, Goiás, cuja tensão nominal é de 220Vca. Com relação à taxa de transmissão, almejava-se medir a taxa média de transmissão no canal, variância e desvio padrão; para tanto, foi utilizado um software para monitoramento de redes chamado Network Probe (versão 2.7), que fornece em tempo real a taxa de transmissão da rede.

4.5.1 Local do ensaio

O Laboratório de Redes do CEFET-GO contém 8 bancadas nas quais foi montada a rede PLC para o testes. Cada bancada possui uma régua de tomadas com seis tomadas 220 Vca monofásicas, tripolares aterradas. A Figura 4.4 mostra a banca de testes do Laboratório de Redes do CEFET-GO.



Figura 4.4 – Bancada de testes do CEFET-GO

4.5.2 Topologia da rede

A rede PLC utilizada para o teste foi a régua de tomadas da bancada onde foram montados os equipamentos. A rede foi composta pelos dois *notebooks* conectados à rede elétrica através dos equipamentos PLC HomePlug. Porém, além dos Modems PLC, estavam conectados à rede elétrica o Analisador de Espectro, para alimentação do mesmo, e o cabo do Filtro Passa-Alta, que estava conectado ao instrumento para a visualização do espectro. Durante o teste também foram ligados à rede elétrica alguns aparelhos, com o objetivo de introduzir interferência eletromagnética na rede. O PLC HomePlug ETH foi ligado na tomada da extremidade direita da bancada e o PLC HomePlug USB foi ligado na tomada da extremidade esquerda da bancada. Nas tomadas centrais foram ligados o cabo para leitura do espectro e as eventuais fontes interferentes. Na Figura 4.5, pode ser visto o diagrama da topologia da rede PLC montada para o teste.

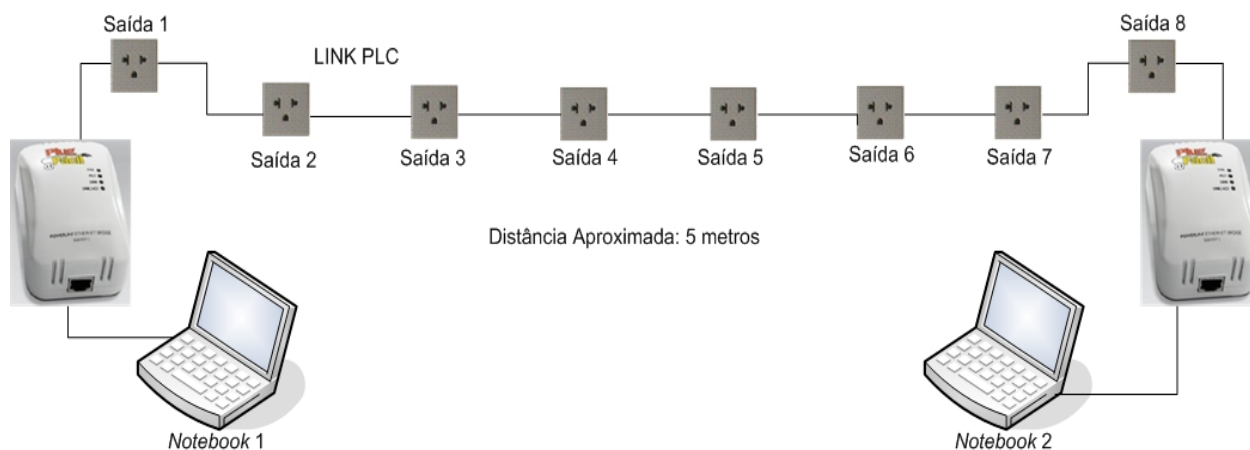


Figura 4.5. Equipamentos utilizados para os testes *Indoor* (topologia *Indoor*)

Na Figura 4.6, os equipamentos ligados na bancada do Laboratório de Eletricidade do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Católica de Goiás.



Figura 4.6 – Bancada de testes do Laboratório de Eletricidade da UCG

4.5.3 Configurações realizadas nos equipamentos

Para que os *notebooks* se comunicassem através da rede PLC, foi necessário realizar algumas configurações: o *notebook 01* que ficou conectado ao HomePlug ETH01, a única configuração realizada foi a mudança do endereço IP da interface de rede Ethernet existente no micro para 192.168.10.3. No *notebook 02* que ficou conectado ao HomePlug

ETH02, foi necessário instalar o *driver* do adaptador de rede USB, que é fornecido no CD de instalação do HomePlug. Depois de instalado o adaptador de rede USB, foi configurado o endereço IP deste adaptador para 192.168.10.2. Foi instalado também o software para medição da taxa de transmissão, que também é fornecido no CD do fabricante do equipamento PLC HomePlug. Os equipamentos PLC HomePlug não precisaram de nenhuma configuração.

Após a configuração dos *notebooks*, estes foram interligados através da rede PLC. Foram realizados testes da rede com o comando PING, sendo que não foram registradas perdas de pacotes e o tempo de resposta foi de aproximadamente 1ms para cada pacote. Com isso, a rede estava pronta para a realização das medições.

4.6 Procedimentos Realizados e Apresentação dos Resultados

Em um ambiente, seja ele industrial, comercial ou residencial, a diversidade dos dispositivos conectados à rede de energia elétrica pode alterar as características da mesma. Equipamentos que possuem chaveamento mecânico (motor de escovas) ou eletrônico são fontes típicas de ruído [29][35].

Com a finalidade de obter-se os dados necessários ao estudo de caso apresentado neste capítulo, foram realizadas diversas medições da taxa de transmissão em uma rede PLC composta por dois computadores, cuja descrição segue abaixo.

A taxa de transmissão pode ser definida como a capacidade total de um canal em processar e transmitir dados durante um determinado período de tempo. O termo "canal" representa o meio de transmissão fim-a-fim entre dois pontos no qual existem conectados equipamentos de aplicações específicas [30][38]. Neste caso, o canal é a rede de energia elétrica.

Inicialmente, os dois *notebooks* foram conectados através da rede elétrica utilizando os adaptadores PLC do tipo HomePlug, conforme foi mostrado na Figura 4.5. O próximo passo foi configurar uma rede entre os mesmos, possibilitando assim a transferência de arquivos entre as duas máquinas. Também foi instalado em um dos computadores o software de monitoramento fornecido pelo fabricante do equipamento HomePlug. Além disso, o analisador de espectro e o osciloscópio digital foram conectados à rede através do Filtro Passa-Alta desenvolvido especificamente para o procedimento descrito neste capítulo.

A primeira etapa do experimento consistiu na captura do gráfico do espectro da rede elétrica, sem a presença do sinal PLC, na faixa de frequência de operação do equipamento PLC utilizado. De acordo com a folha de dados do equipamento, ele trabalha na faixa entre 4,3MHz a 20,9MHz [27][34]. Antes da captura, o analisador de espectro foi ajustado com frequência central de 12MHz, escala de 2MHz/div e atenuação de -30dBm. O osciloscópio foi ajustado com 0,2V/div e 5ms/div no canal 1. Estes equipamentos foram alimentados com energia elétrica vinda de outro circuito próximo.

Na Figura 4.7, pode-se ver o resultado da medição diretamente na rede elétrica com tensão de 220Vca eficazes.

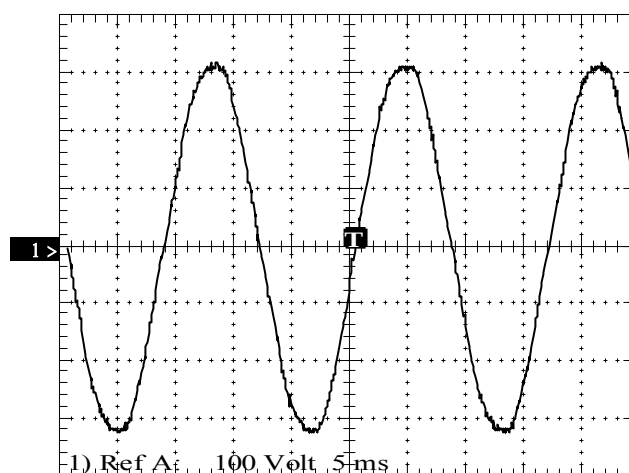


Figura 4.7 – Tensão da rede elétrica

Na segunda etapa do experimento foi realizada captura da tensão de saída do divisor de tensão de 11,76Vca sem o Filtro Passa-Alta. Para esta etapa também foram capturadas as telas do osciloscópio e do analisador de espectro que podem ser vistas abaixo, na Figura 4.8.

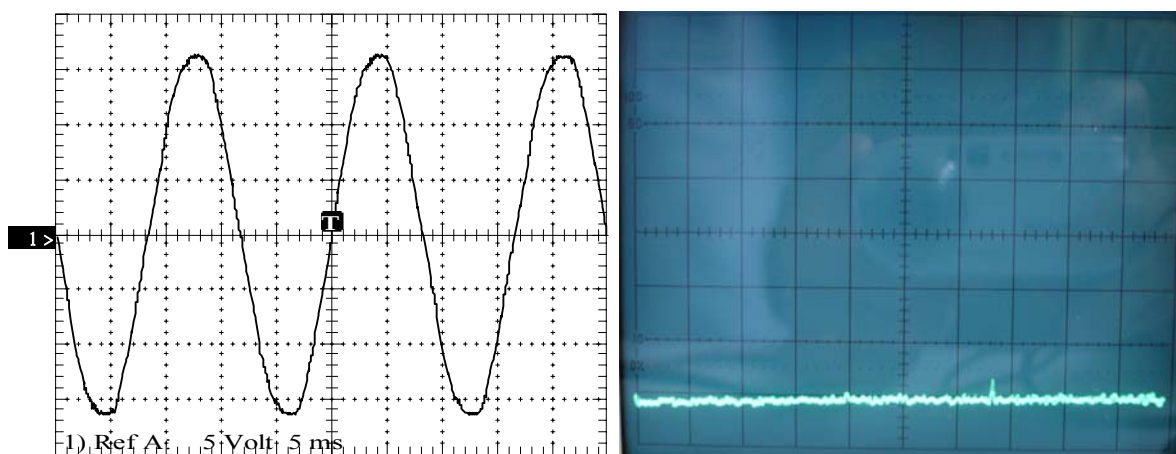


Figura 4.8 – Tensão de Saída do Divisor de Tensão (sem Filtro Passa-alta)

Para a análise do sinal PLC foi transmitido durante 6 minutos um arquivo de aproximadamente 1,5GB, mantido no servidor. As taxas de transmissão foram atualizadas de 5 em 5 segundos, analisando a rede PLC pura e com as interferências conectadas na rede elétrica. O primeiro gráfico demonstra a captura do osciloscópio digital, seguido do analisador de espectro e taxas de transmissão. A figura 4.9 apresenta a rede PLC pura, transmitindo sem a adição de fontes de interferência. A taxa de transmissão ficou, em média, 33,42Mbps, sem muita colisão e perda de pacotes, como mostra a Figura 4.10. A variância encontrada foi de aproximadamente 20,32 e o desvio padrão calculado foi 4,5Mbps.

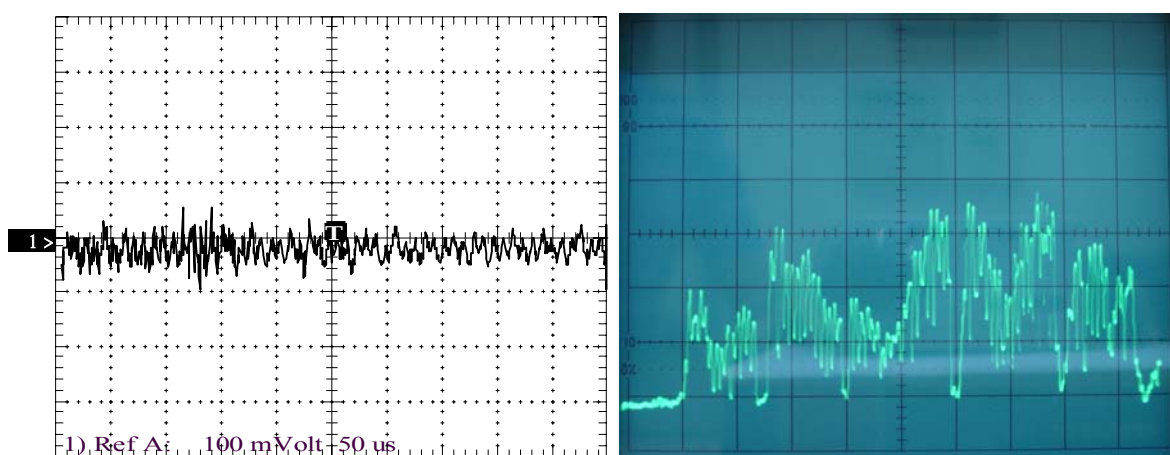


Figura 4.9 – Rede elétrica com PLC transmitindo, sem interferências

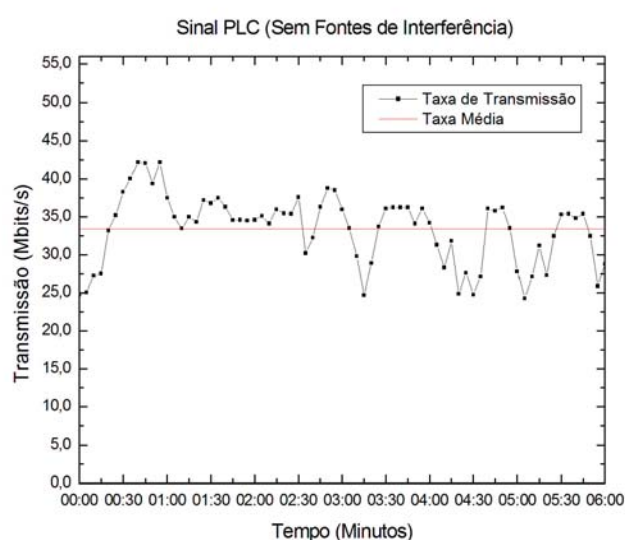


Figura 4.10 – Taxas de Transmissão Sinal PLC Puro

Através da análise do espectro, foi possível observar a presença das portadoras da modulação OFDM a partir da frequência de 4,3 MHz até a frequência de 20,9MHz, o que está de acordo com o padrão HomePlug.

Concluída a captura das formas de onda com e sem a presença do sinal PLC, foi iniciada a terceira etapa do experimento, que consistiu na introdução de fontes de ruído à rede PLC.

Antes da medição da taxa de transmissão da rede com as interferências, foi medido o espectro da rede elétrica para cada fonte interferente. Para obter-se uma leitura fiel da influência das fontes de ruído no espectro da rede elétrica, foram desligados os equipamentos PLC. A primeira fonte de interferência inserida na rede de energia foi o liquidificador. Para que o motor não trabalhasse em vazio, o copo do liquidificador foi enchido com água. A Figura 4.11 mostra o espectro da rede elétrica com a interferência gerada pelo liquidificador.

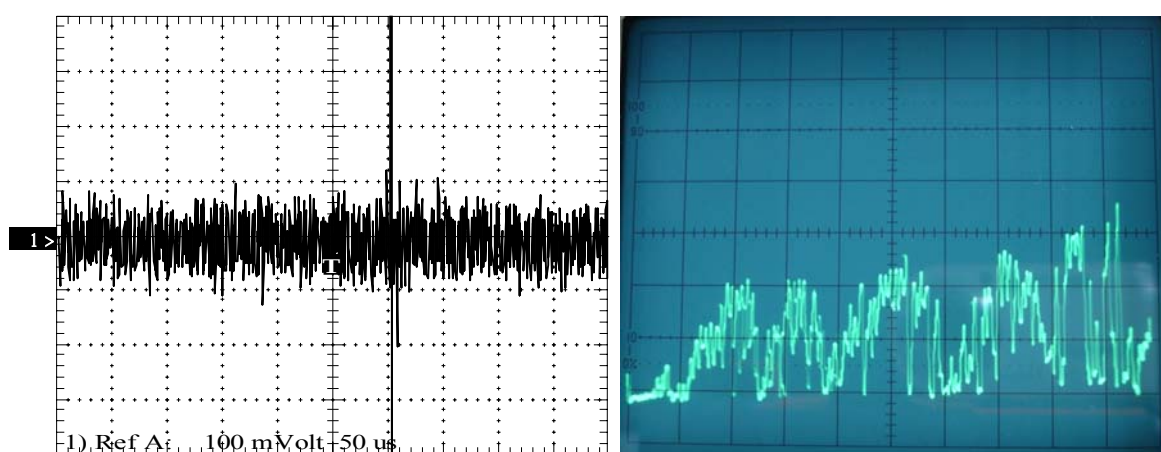


Figura 4.11 – Espectro da rede elétrica com ruído (liquidificador)

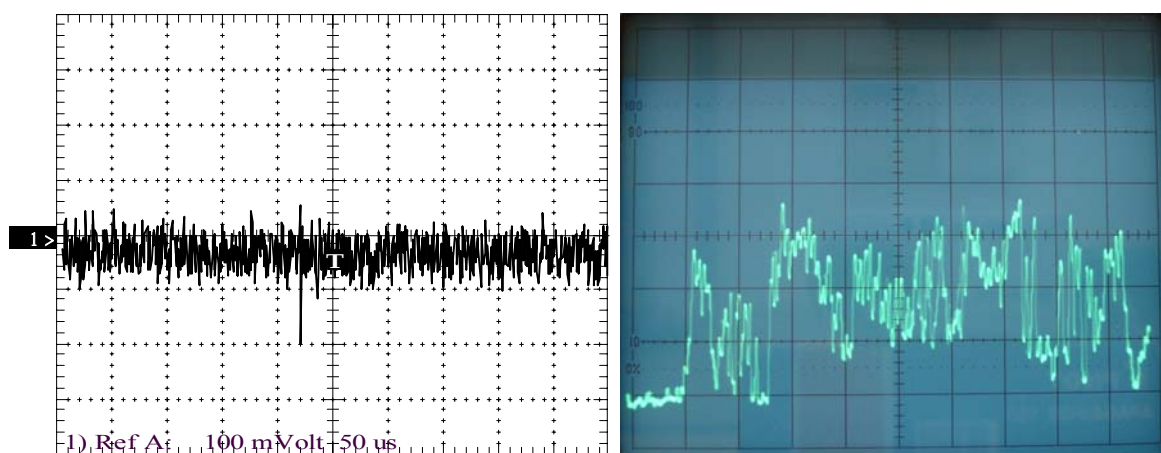


Figura 4.12 – Espectro da rede elétrica com ruído (secador de cabelo)

A segunda fonte de interferência utilizada foi o secador de cabelo, que gerou o espectro mostrado na Figura 4.12. Já a Figura 4.13 mostra a imagem obtida tendo como fonte de ruído uma furadeira.

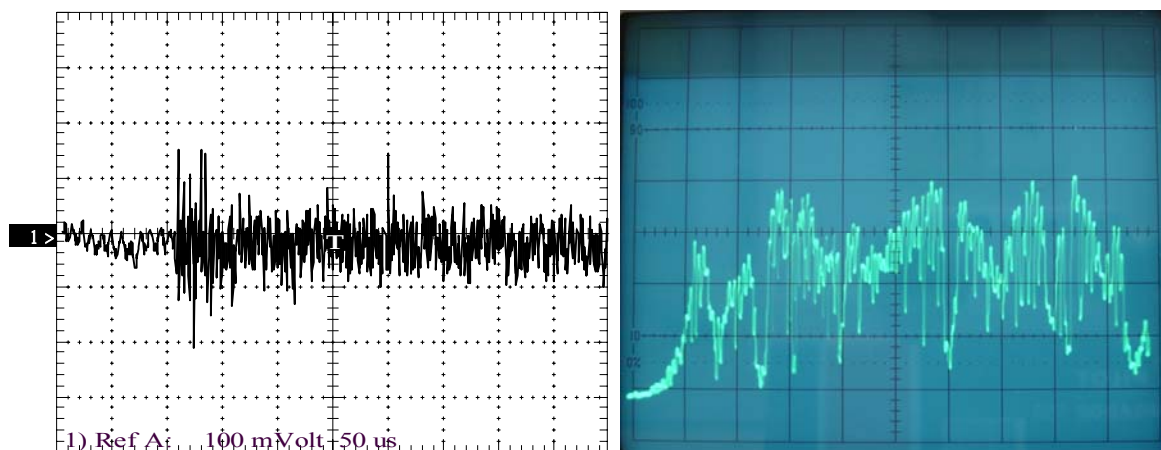


Figura 4.13 – Espectro da rede elétrica com ruído (furadeira)

A próxima fonte de ruído empregada foi o carregador de celular, que foi conectado ao seu respectivo aparelho celular (descarregado) e à rede elétrica, obtendo o espectro mostrado na Figura 4.14.

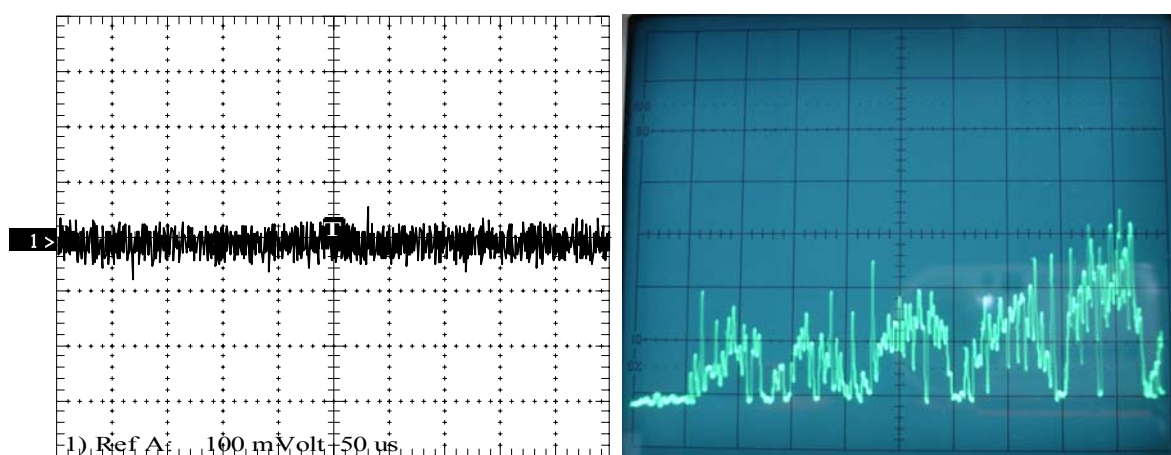


Figura 4.14 – Espectro de rede elétrica com ruído (carregador de celular)

Após a leitura do espectro, foi dado início a leitura da taxa de transmissão da rede PLC montada para o teste. Para isso, foi utilizado o software fornecido com o equipamento PLC, que já havia sido instalado no *notebook*, como foi descrito anteriormente. Inicialmente, foi medida a taxa de transmissão sem as fontes de ruído, e depois foram realizadas as mesmas medições para cada fonte de ruído isoladamente, na seguinte ordem: furadeira, carregador de celular, secador de cabelo e liquidificador. Para finalizar as medições, foram

realizadas medições com três fontes de ruído simultaneamente. Foram escolhidos a furadeira, o liquidificador e o secador de cabelo por terem apresentado as menores taxas de transmissão médias, obtendo o espectro mostrado na Figura 4.15.

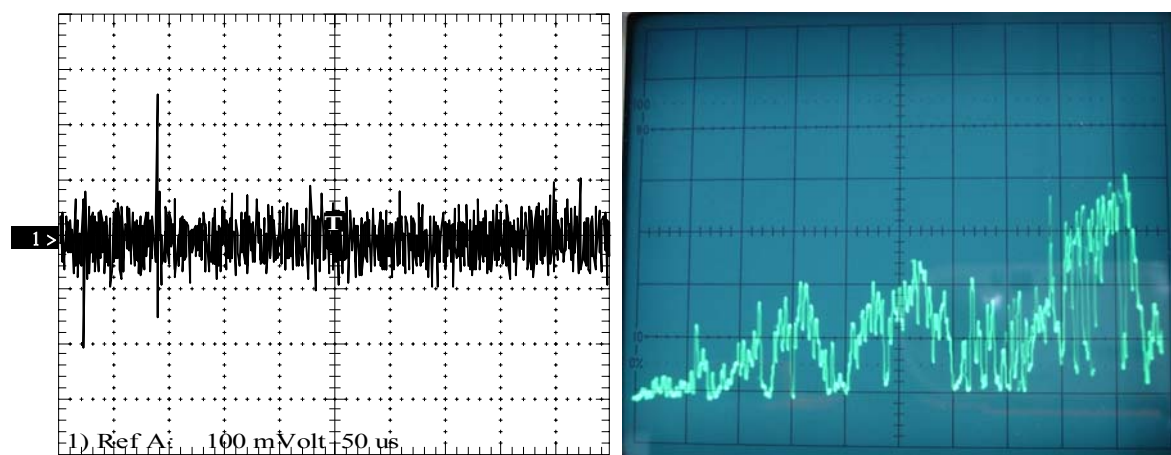


Figura 4.15 – Espectro de rede elétrica com ruído (liquidificador+ secador+furadeira)

Os resultados demonstram que o sinal PLC puro (original) foi realmente afetado, em todos os casos, pela inserção de outros equipamentos na rede. O equipamento que mais interferiu isoladamente no espectro de frequências foi o liquidificador, seguido do secador e da furadeira, sendo o carregador de celular o equipamento que menos influenciou o sinal PLC. O gráfico pode ser visto na Figura 4.16.

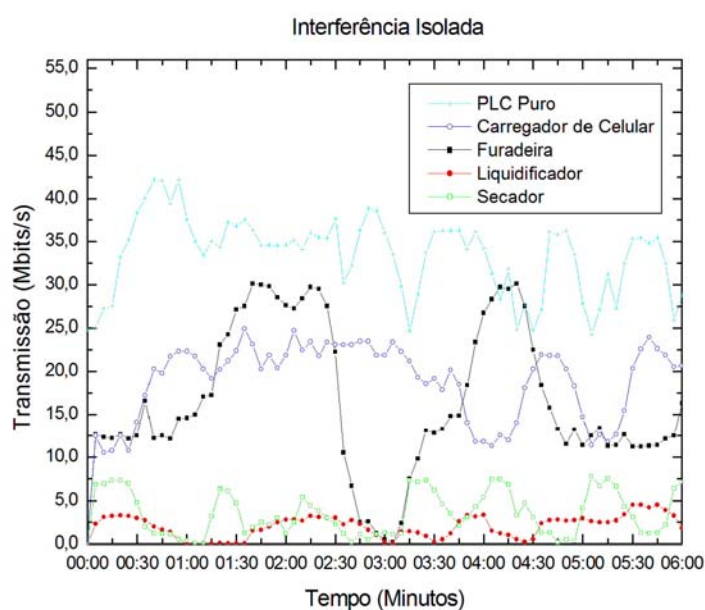


Figura 4.16 – Gráfico de desempenho da rede PLC

4.7 Análise dos Resultados

Foram feitas duas análises. Uma, quantitativa, com a obtenção dos gráficos de desempenho, e outra, qualitativa, utilizando o osciloscópio e o analisador de espectro. Na análise qualitativa, a intenção foi comparar o desempenho do sinal PLC com e sem interferência. Como parâmetros de análise foram calculados a média, a variância e o desvio padrão das taxas de transmissão, dados por:

$$Média = \bar{x} = \frac{\sum x}{n} \quad (\text{Eq. 11})$$

onde n é o número de elementos da amostra e x é o valor observado.

$$Variância = \sigma^2 = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1} \quad (\text{Eq. 12})$$

onde x_i é o valor observado e $\bar{x}$ é a média amostral calculada.

$$Desvio \text{ _ } Padrão = \sigma = \sqrt{\sigma^2} \quad (\text{Eq. 13})$$

onde σ^2 é a variância calculada.

Primeiramente, analisando o espectro da rede sem o sinal PLC, observa-se na Figura 4.9 que o espectro não é completamente limpo; existem interferências de fontes desconhecidas, que podem ou não estar na mesma rede elétrica em que foi realizado o teste. Mesmo assim, a taxa de transmissão média obtida com esta situação foi de 33,42Mbps, o que corresponde a cerca de 59% da taxa máxima de transmissão do equipamento PLC, como pode ser observado na Figura 4.10. A variância encontrada foi de aproximadamente 20,32 e o desvio padrão calculado foi 4,5Mbps.

Já na análise do espectro do sinal PLC, pode-se verificar a presença de portadoras a partir da frequência de 4MHz até a frequência de 20MHz, comprovando as informações obtidas na folha de dados do equipamento. Mesmo com o ruído observado no espectro da rede sem o PLC, o nível das portadoras do PLC está acima do nível do ruído medido anteriormente, o que viabiliza a comunicação.

Com a introdução de harmônicos gerados pela furadeira, a taxa de transmissão média da rede PLC caiu para 16,42Mbps, apenas 29% da taxa máxima, e apresentou grandes variações entre as medições, como pode ser visto na Figura 4.17. Houve uma queda brusca do tráfego, com a taxa de transmissão chegando a 0,02Mbps, sem, contudo, perder a conexão, e também alguns picos, chegando ao máximo de 30,1Mbps. A taxa média de transmissão ficou em torno de 16,4Mbps, com variância de 73,28 e desvio padrão de

8,56Mbps. O alto valor da variância é devido à grande variação nos valores das taxas de transmissão.

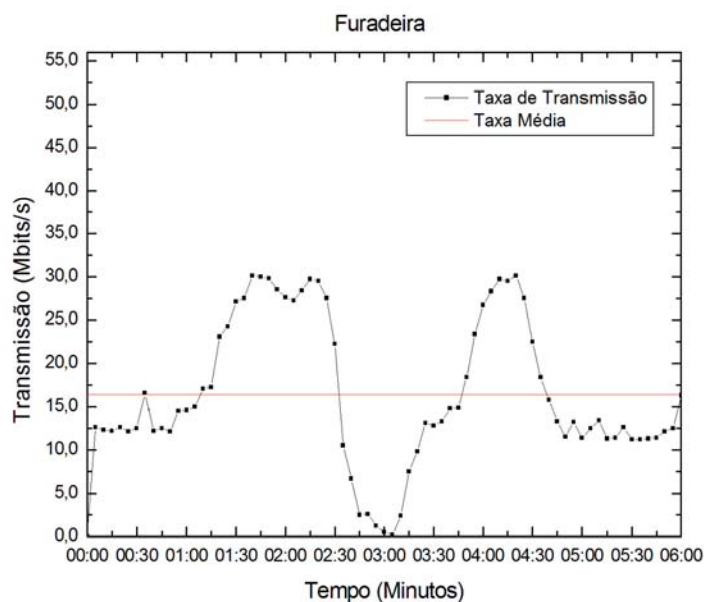


Figura 4.17 - Taxa de bits para sinal PLC com influência de uma furadeira

Com o carregador de celular a taxa de transmissão ficou, em média, 18,78Mbps, ou 33% da taxa máxima, com pouca colisão e perda de pacotes, como pode ser observado na Figura 4.18, sendo este o equipamento que menos interferiu na rede PLC de maneira isolada. Em determinados momentos, houve algumas quedas na transmissão, e em outros momentos, a taxa permaneceu constante. A variância encontrada ficou em torno de 23,16, com desvio padrão de 4,81Mbps.

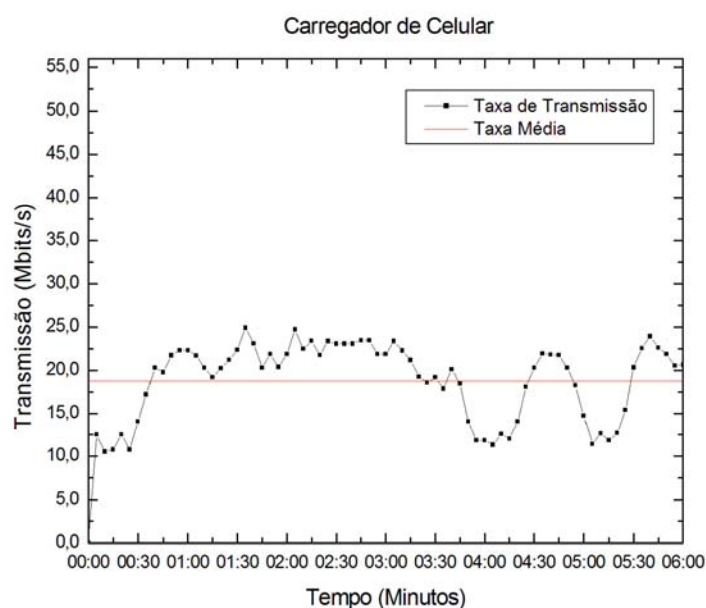


Figura 4.18 - Taxa de bits para sinal PLC com influência de um carregador de celular

Os resultados demonstraram que o sinal PLC puro (original) foi realmente afetado, em todos os casos, pela inserção de outros equipamentos na rede. O equipamento que teve a segunda maior interferência isoladamente no espectro de frequências foi o secador de cabelos, como mostra a Figura 4.19. A taxa de transmissão ficou, em média 2,49Mbps, ou 0,4% da taxa máxima, a variância calculada foi de 6,42 e o desvio padrão encontrado, de aproximadamente 2,53Mbps. Apesar de taxas bem abaixo das disponibilizadas pelo fabricante e oscilando bastante no decorrer da transmissão, também não houve perda da conexão, que chegou a ter taxas bem próximas de 0Mbits/s em alguns instantes.

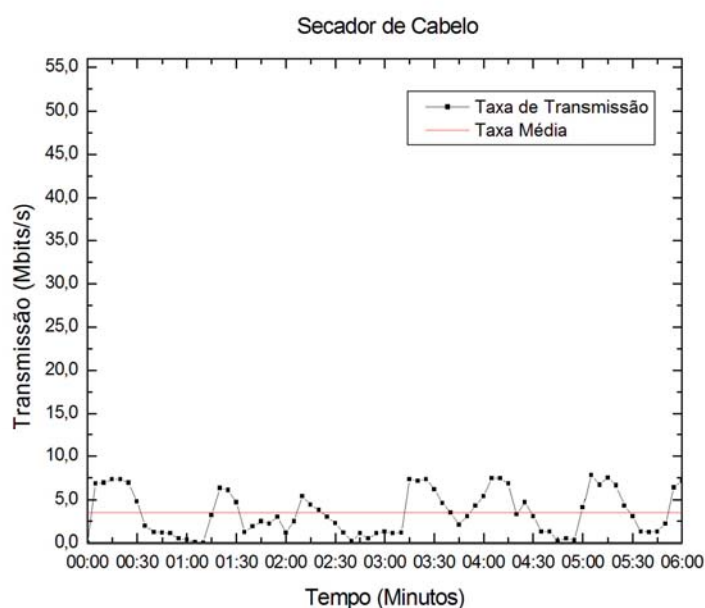


Figura 4.19 - Taxa de bits para sinal PLC com influência de secador de cabelo

O espectro da rede com a presença do liquidificador mostra que os harmônicos gerados por ele provocaram a maior interferência e variação medidas. A taxa de transmissão ficou, em média, 1,99Mbps, ou 0,3% da taxa máxima, como pode ser observado na Figura 4.20. Entre 1 minuto e 1 minuto e meio de transmissão, houve uma queda brusca das taxas de transmissão, que ficaram abaixo de 0,5Mbps, sem, contudo, haver rompimento da conexão. A taxa, apesar de baixa, se manteve constante, sem muitas oscilações bruscas. A variância ficou em torno de 1,66, com desvio padrão de 1,29Mbps.

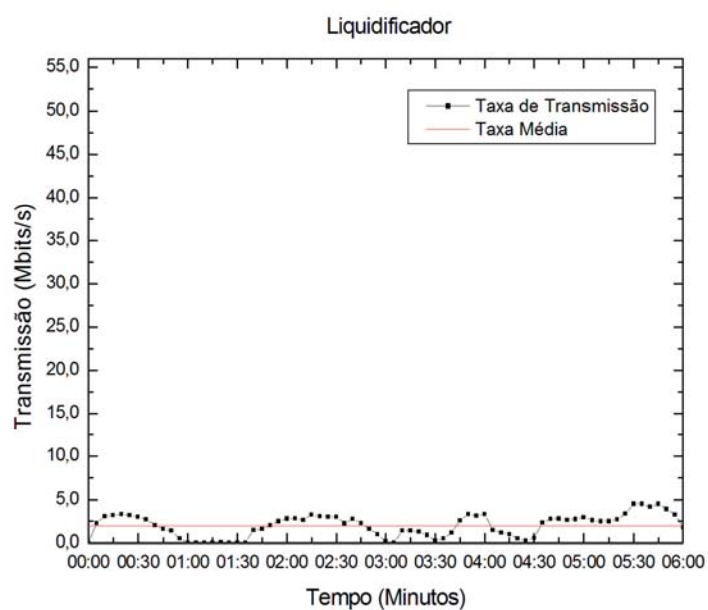


Figura 4.20. Taxa de bits para sinal PLC com influência de um liquidificador

Os equipamentos que mais interferiram na rede isoladamente (liquidificador, secador e furadeira) foram ligados simultaneamente, somando-se os efeitos de interferência, conforme esperado, como mostra a Figura 4.21.

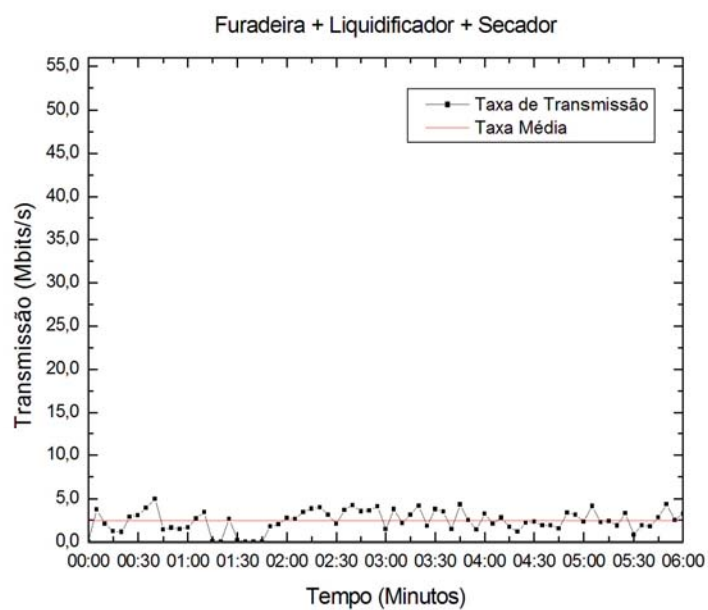


Figura 4.21. Taxa de bits para sinal PLC com influência (liquidificador+ secador+furadeira)

Isso demonstra uma queda sensível da taxa de bits quando todos os equipamentos são utilizados na rede de teste, sendo o sinal PLC puro sensivelmente prejudicado, como mostra a Figura 4.21. Com todos os equipamentos conectados à rede, as taxas de transmissão se mantiveram constantes, com taxa média de transmissão de 2,44Mbps. No entanto, por volta de 1 minuto e meio de transmissão, houve uma queda na conexão, e o sistema ficou sem transmissão por aproximadamente 15 segundos. A variância das taxas de transmissão foi de 1,51 e o desvio padrão calculado foi de 1,23.

Pode-se observar, a partir dos resultados mostrados anteriormente, que algumas aplicações não irão trabalhar de maneira satisfatória utilizando o equipamento Home-Plug usado para os testes. Nota-se a necessidade do uso de mecanismos que mitiguem a baixa na taxa de transmissão em função de interferências na rede elétrica.

A Tabela 4.1 apresenta uma comparação estatística entre as médias das taxas de transmissão encontradas e a relação com a presença ou não de ruídos na rede PLC.

Tabela 4.1 - Análise estatística das taxas de transmissão

<i>Tipos de Interferências</i>	<i>Média (Mbps)</i>	<i>Variância</i>	<i>Desvio Padrão(Mbps)</i>
Sinal PLC Puro	33,42	20,32	4,51
Liquidificador	1,99	1,66	1,29
Secador de Cabelo	2,49	6,42	2,53
Furadeira	16,42	73,28	8,56
Carregador de Celular	18,78	23,16	4,81
Liquidificador + Secador de Cabelo + Furadeira	2,44	1,51	1,23

Os testes realizados neste trabalho demonstraram que os aparelhos com motores de escovas são bastante prejudiciais para a comunicação PLC, pelo fato de gerarem interferências eletromagnéticas na faixa de operação do equipamento, o que foi constatado nas formas de onda capturadas com o analisador de espectro e com o osciloscópio digital.

A furadeira, com uma variância em torno de 73,28 e desvio padrão de 8,56Mbps, foi o equipamento que manteve a maior variação, com uma taxa de transmissão média de 16,42Mbps.

Na pior situação, o liquidificador, com uma variância em torno de 1,66 e desvio padrão de 1,29Mbps, foi o equipamento que manteve constante a menor taxa de transmissão média de 1,99Mbps.

Com a presença da furadeira, do secador de cabelo e do liquidificador, a rede se

manteve funcionando com uma variância em torno de 1,51, desvio padrão de 1,23Mbps e uma taxa de transmissão média de 2,44Mbps.

As medições realizadas demonstram que a taxa do sinal PLC foi bastante influenciada pela presença de ruídos, o que torna necessário, muitas vezes, o uso de algumas técnicas para diminuir os níveis de interferência de alguns tipos de eletrodomésticos. Os equipamentos transceptores PLC devem possuir filtros *notch*, pois estes dispositivos possibilitam a mitigação de interferência, através da supressão de um conjunto de portadoras do sistema PLC[43][51][49].

Serviços de voz, vídeo e áudio não toleram variação do atraso. O tráfego gerado por aplicações de áudio é, por natureza, contínuo. Para transmissão de arquivos multimídia, é importante que os serviços providos pela rede considerem os requisitos dos conteúdos multimídia, que dependem da largura de faixa disponível e qualidade de áudio e vídeo que serão transmitidos. Por exemplo, um áudio com qualidade de fone requer 64Kbps, com qualidade de CD requer 1,4Mbps, e com qualidade HDTV não comprimido requer 200Mbps [52].

A Tabela 4.2 mostra a relação entre serviços típicos de rede e as características que uma transmissão de dados pode apresentar.

Tabela 4.2 - Requerimentos das aplicações tradicionais[52]

<i>Aplicações típicas</i>	<i>Largura de faixa</i>	<i>Latência</i>	<i>Jitter</i>	<i>Perda de pacote</i>
Email	Baixa	Crítica	Sensível	Crítica
FTP	Altas rajadas	Crítica	Sensível	Crítica
Telnet	Baixas rajadas	Moderada	Sensível	Crítica
Mídia streaming	Média a moderada	Sensível	Sensível	Sensível
Videoconferência	Alta	Crítica	Crítica	Sensível
VOIP	Crítica	Crítica	Crítica	Sensível

Em transmissões de voz, normalmente com uma largura de faixa de cerca de 64Kbits, o sinal de voz é digitalizado e compactado na sua origem antes de ser transmitido, caracterizando-se como tráfego em rajada, sendo o sinal reproduzido no destino a uma taxa constante. O atraso máximo tolerável pode ser de 100 a 200 milissegundos, sendo aceitável uma perda de 1% a 2% dos pacotes. Não atendendo a essas condições, as falhas ficam perceptíveis ao ouvido humano e a conversa não fica inteligível [52].

A tecnologia PLC vem sendo desenvolvida há algum tempo e pode vir a ser a solução de problemas de comunicação na última milha e nos últimos metros, devido à capilaridade da rede de energia elétrica, pois pode suportar aplicações sensíveis ao atraso como VoIP e Videoconferência.

4.8 Ambiente Outdoor

No ambiente *outdoor*, a escolha para o local dos testes levou em consideração os seguintes requisitos:

Para o caso de interferência agregada, o local pode ser uma região urbanizada, onde haja Unidades Concentradoras (*Head End*), Repetidoras e Unidades de Terminação de Cliente *Customer Premise Equipment* (CPE), em operação, transmitindo dados.

Para os casos de interferência produzida por equipamentos conectados às redes primária e secundária, deve-se haver espaço livre suficiente entre a rede de energia elétrica e os equipamentos de medição. Neste caso, a localização da rede foi uma região não urbanizada, Campus Samambaia da Universidade Federal de Goiás (UFG), de acordo com a Figura 4.22:

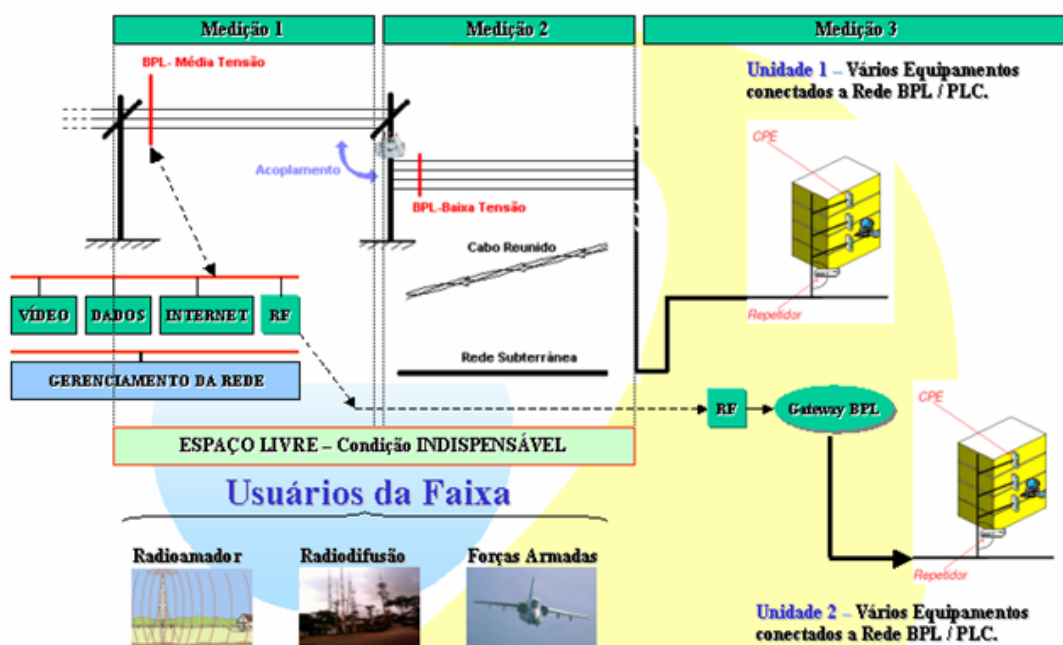


Figura 4.22 – Arquitetura da rede PLC [40]

4.8.1 Escolha das posições dos equipamentos PLC e equipamentos de medição

Após escolher o local adequado, o próximo passo foi escolher a melhor posição para instalar os equipamentos PLC. Por exemplo, se for feita conexão de apenas um sistema mestre-escravo, deve-se instalar duas tomadas de energia por meio de extensões em postes separados por uma distância de 200m, o que corresponde a $2*\lambda$, ou seja, $\lambda = 100\text{m}$ ($f = 3\text{ MHz}$). Isso porque os postes são separados por uma distância padrão de 40m. Assim, seria trabalhoso colocar uma extensão a uma distância correspondente a dois postes e meio, ou seja, $2,5*40 = 100\text{m}$. Portanto, a distância de separação escolhida foi de 5 postes, ou seja, $5*40 = 200\text{m}$, conforme os dados a seguir na Figura 4.23:

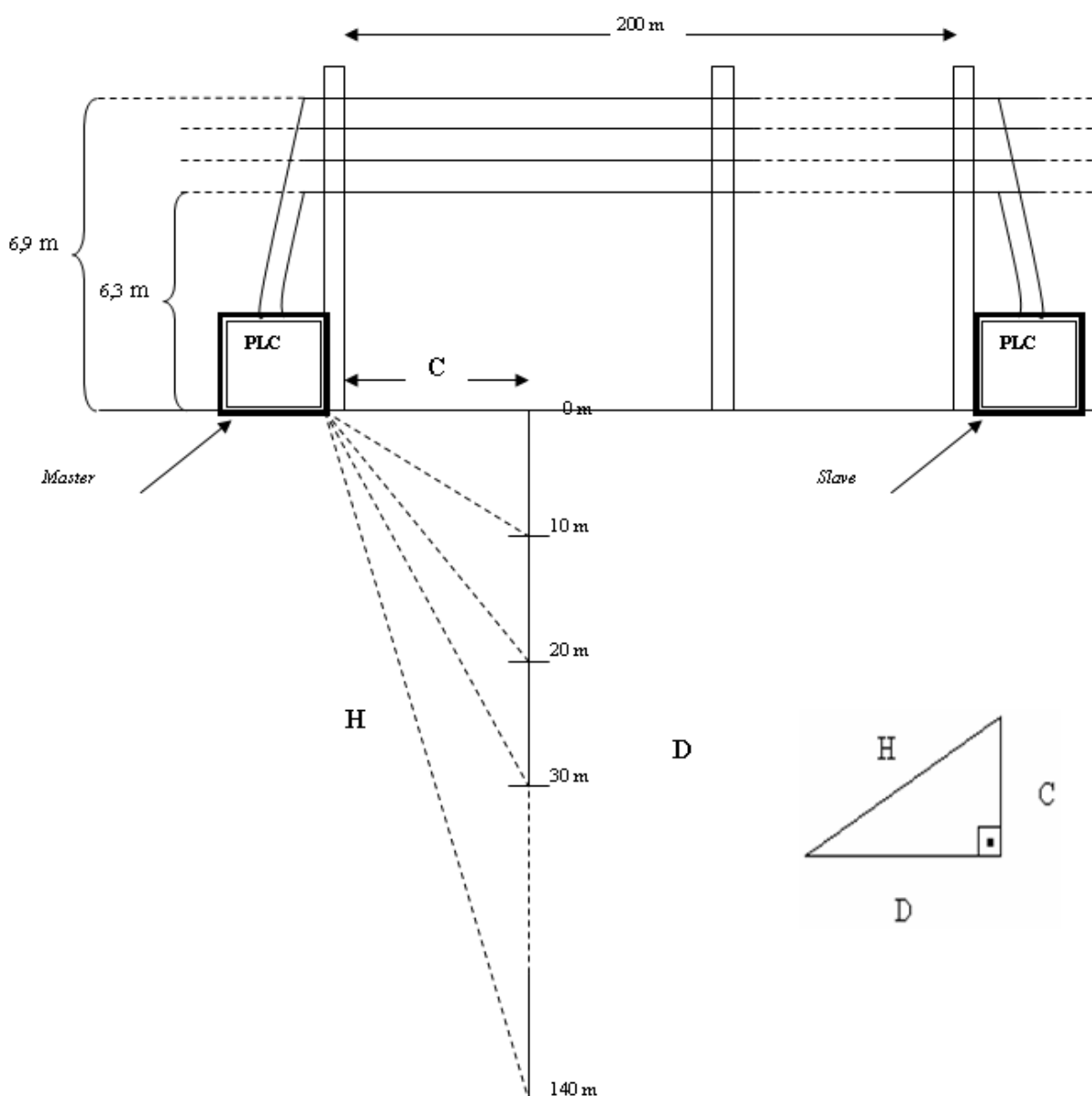


Figura 4.23 - Topologia das medições

Tomando como referência a frequência de 7,5 MHz, que corresponde a $\lambda = 40\text{m}$, e considerando que os sinais mais intensos estariam na região de $\lambda/2$, ou seja 20m, esta distância foi utilizada como referência para as medições.

A posição dos equipamentos de medição variou de acordo com a faixa de operação de cada equipamento e partiu da projeção do cabo no solo, como mostra a Figura 4.24:



Figura 4.24 – Medições no Campus UFG

Todos esses cenários de medição se situam na cidade de Goiânia-Goiás, Brasil, cuja tensão é de 220 Vca. A Figura 4.25 mostra o espectro com a presença do PLC:

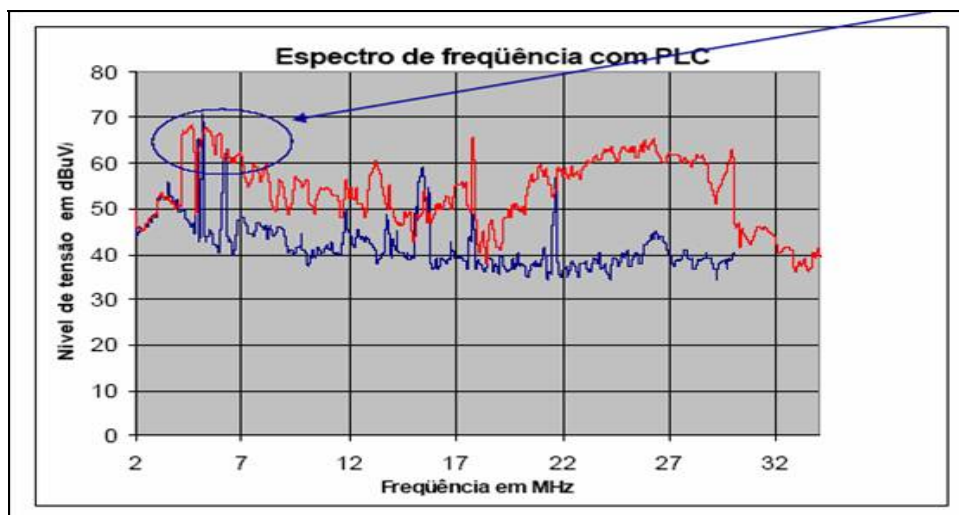


Figura 4.25 – Espectro com PLC

Foram utilizados terminais master e modem PLC já disponíveis comercialmente (segunda geração), de marca Corinex AV 200Mbps, padrão DS2 com a presença de Filtros

Notch, possibilitando a mitigação de interferências, através da supressão de um conjunto de portadoras do sistema PLC, de acordo com a Figura 4.26:

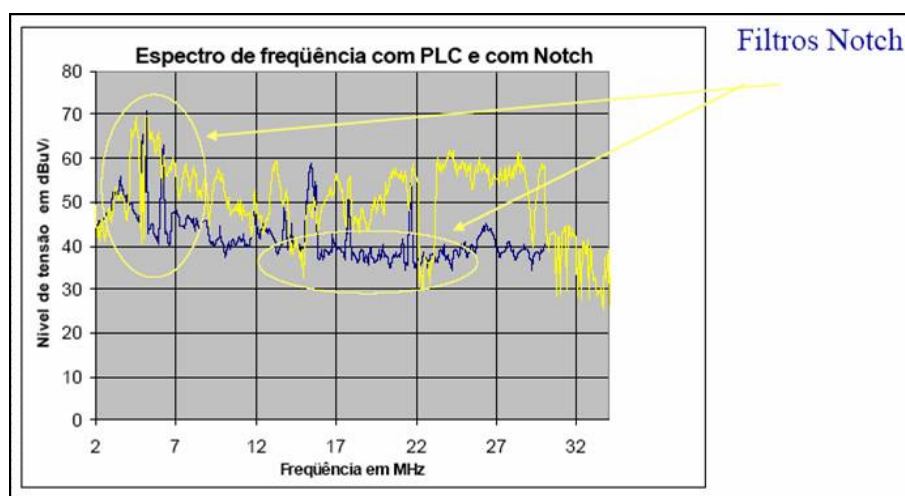


Figura 4.26 – Espectro com PLC e filtros Notch

O ambiente escolhido para a realização das medidas foi o ambiente externo do Campus Samambaia da Universidade Federal de Goiás (UFG), adotando a topologia mostrada na Figura 4.27.

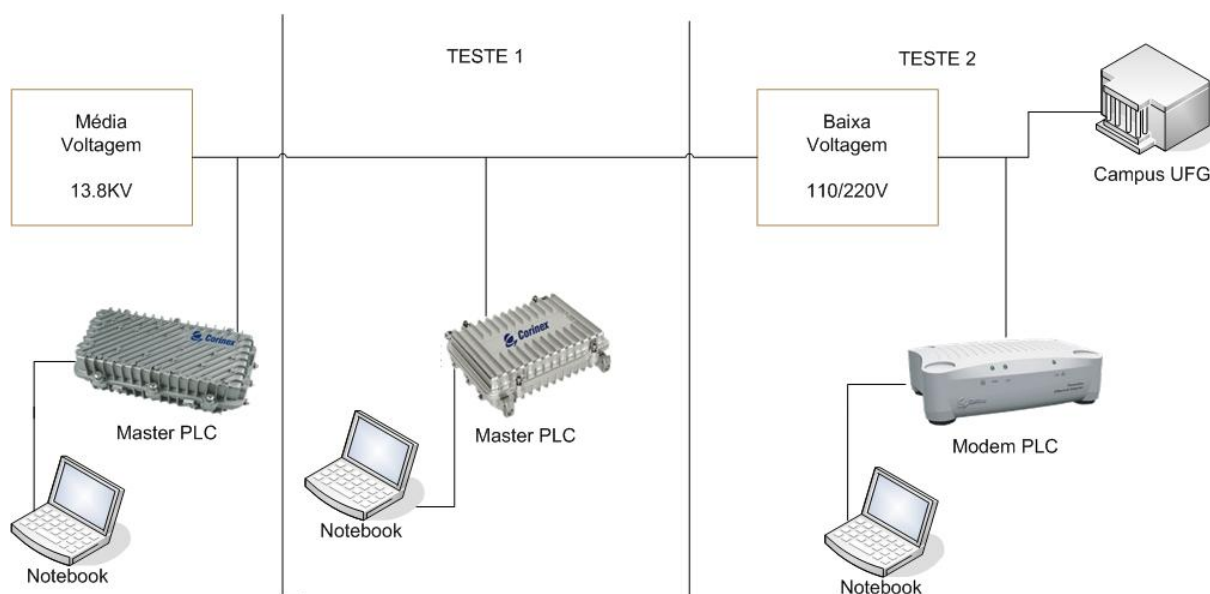


Figura 4.27 - Topologia dos testes *Outdoor*

Foram feitas medições utilizando-se os mesmos equipamentos usados no ambiente *outdoor*. Devido à dificuldade de se ligar o equipamento diretamente na linha, a análise quantitativa foi realizada somente com o sinal PLC original. Os testes iniciais mostraram que a taxa de *download* máxima para este cenário foi de, aproximadamente, 3 Mbits/s [40].

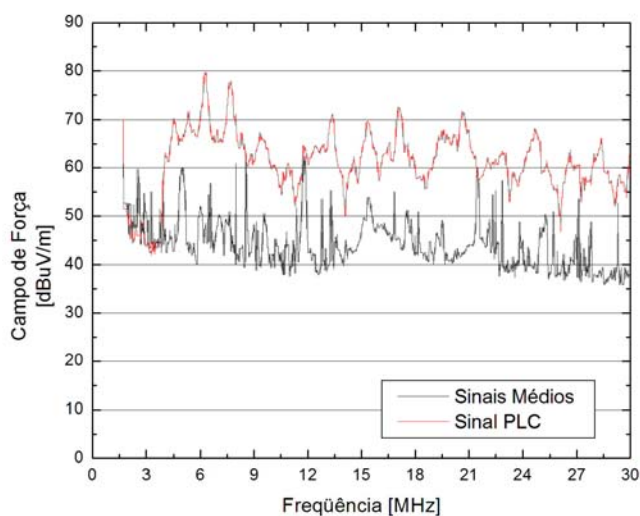


Figura 4.28 - Faixa de frequência de 1-30 MHz com presença de sinal PLC

A interferência sob investigação foi gerada através do uso de um rádio militar de potência variada na frequência de 7,5 MHz, com forte influência no sinal da rede. Quando o mesmo foi ativado com potência de 1 W, a uma distância de 15 metros da rede, o sinal PLC foi praticamente anulado. A Figura 4.28 ilustra o sinal PLC em ambiente *Outdoor*.

Observando-se o *download* em uma transferência de dados de um *notebook* para outro, utilizando a rede PLC, pôde-se verificar que a taxa de transmissão ficou em torno de 1 Mbps. Estes valores foram obtidos através de teste em redes de Média Tensão (13,8KV) e Baixa Tensão (110/220Vca).

4.9 Conclusões sobre o Acesso em Faixa Larga Utilizando Redes de Energia Elétrica no Brasil

As condições de uso da faixa de radiofrequências de 1,705 MHz a 30 MHz, por sistema de acesso em faixa larga utilizando redes de energia elétrica (PLC) no Brasil, para transmissão de sinais de telecomunicações, sistemas digitais de radiocomunicação dos serviços fixo e móvel, de acordo com os testes de campos realizados, devem possuir as seguintes características [42] [49][50]:

a) Incorporar técnicas adaptativas de mitigação de interferências, para reduzir a potência do sinal não intencional, por meio de telecomando, e remanejar as frequências de operação, com vistas a bloquear a operação em um local específico, onde ocorrer o uso do

mesmo espectro de radiofrequências por sistemas licenciados. Essas técnicas podem incluir filtros adaptativos, o completo bloqueio de frequências ou de faixas de frequências.

b) Para frequências abaixo de 30 MHz, durante a utilização de filtros para evitar interferência em uma faixa de radiofrequências específica, devem ser capazes de atenuar emissões dentro desta faixa a um nível de pelo menos 20dB abaixo dos valores especificados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Limite de emissão radiada [49]

Faixa de Frequência (MHz)	Emissão limite radiada (dBμV/m)	Medida em metros (m)
1-1,705	15	30
1,705-10	100	30
10-13,553	30	30
13,553-13,567	100	30
13,567-26,96	30	30
26,96-27,28	100	30
27,28-30	30	30

c) Para frequências acima de 30 MHz, durante a utilização de filtros para evitar interferência em uma faixa de radiofrequências específica, devem ser capazes de atenuar emissões dentro desta faixa a um nível de pelo menos 10dB abaixo dos valores especificados na Tabela 4.3 [42] [49]:

d) Deve-se manter as configurações de mitigação de interferência, mesmo quando houver falta de energia na rede ou quando o equipamento tiver de ser desligado e religado por algum motivo e mecanismo que possibilite, remotamente de uma central de controle, o desligamento da unidade causadora de interferência prejudicial, caso outra técnica de mitigação não resolva o problema.

e) Para proteger as estações terrestres da Aeronáutica e receptores em aeronaves, a operação de sistema de acesso em faixa larga utilizando redes de energia elétrica não poderá ocorrer em distâncias inferiores a 2.800m das coordenadas geográficas dos aeroportos no país[42] [49].

Neste capítulo, foram analisadas a influência da interferência eletromagnética. No próximo capítulo, será apresentado aspectos de regulamentação da tecnologia PLC no mundo com base de testes de campo.

CAPÍTULO 5 - ASPECTOS REGULATÓRIOS

5. 1 Introdução

O que pode ser feito para dar mais um impulso nessa nova tecnologia é a padronização dos produtos utilizados; dessa forma, haveria interoperabilidade entre os fabricantes, não sujeitando os usuários a ficarem presos a um só fabricante.

Este trabalho contribui para a regulamentação da tecnologia PLC no Brasil, através de testes de campo realizados tanto em ambientes *indoor* quanto *outdoor*, foi possível verificar o desempenho real dos equipamentos, taxa de transmissão e interferências.

Já foram criados alguns fóruns de debate para solucionar esse problema, como o PLCforum, com maioria de entidades européias, o PLC Utilities Alliance e também o HomePlug PowerLine Alliance visando estabelecer uma padronização dos equipamentos PLC de rede interna [42][46].

5. 2 Regulamentação Brasileira para o PLC

Seguindo a tendência utilizada pela ANATEL na definição das atuais normas vigentes em nosso país - notadamente as Resoluções 237 e 238, que estabelecem os requisitos de Compatibilidade Eletromagnética e Segurança Elétrica para equipamentos terminais e de estrutura de telecomunicações, que adotam de forma criteriosa os padrões europeus, baseados nas normas CISPR 22 e CISPR 24 -, acredita-se que seja um caminho natural a adoção das atualizações que estão sendo acrescentadas na referida norma no âmbito do já citado Draft (CISPR/I/44/CD), onde o tratamento aos equipamentos PLC é definido [47] [48].

Por ser a FCC Part 15 a única regulamentação já existente e que cobre de forma genérica sistemas de telecomunicações com fio, talvez a consideração do uso da mesma para o tratamento das redes seja um caminho interessante [49].

5.3 Regulamentação de Testes de Desenvolvimento de Sistemas PLC em Empresas de Energia Elétrica

As empresas precisam solicitar à Anatel uma Autorização para fins Científicos Experimentais, por um período de até 2 anos, com o objetivo de regularizar estes testes. Para se fazer tais testes, a Anatel não solicita qualquer certificação de equipamento a ser instalado. A Anatel solicitou que as empresas permanecessem em contato com o pessoal que

trabalha na sua área de rádiofrequência, no sentido de se fazer um estudo amplo e conjunto sobre as interferências do sistema Power Line.

A certificação dos equipamentos de sistemas PLC das empresas fornecedoras que pretendem atuar no mercado nacional. Anatel não exige certificação em testes de funcionamento, porém, reconhece que a operação comercial vai exigir uma certificação, de acordo com as normas vigentes no setor. O grupo de trabalho de PLC, juntamente com a Anatel, deverá promover algumas apresentações dos fabricantes de equipamentos *Power Line* interessados em desenvolver a tecnologia no Brasil, com o objetivo de se promover o desenvolvimento e operacionalização da tecnologia citada, além de melhorar o inter-relacionamento entre as entidades, definindo-se então a metodologia para se obter as certificações dos equipamentos que serão utilizados dentro do território nacional.

A Resolução 365, de 10 de maio de 2004, apresenta o Regulamento sobre equipamentos de radiocomunicação de radiação restrita [42][43]:

Capítulo II – Das Condições Gerais:

Art. 3º As estações de radiocomunicação, correspondentes a equipamentos de radiação restrita caracterizados por este Regulamento, estão isentas de licenciamento para instalação e funcionamento.

Parágrafo único. Quando o funcionamento das estações de radiocomunicações caracterizar exploração de serviço de telecomunicações, o prestador do serviço está sujeito ao disposto no Regulamento dos Serviços de Telecomunicações, aprovado pela Resolução no 73, de 25 de novembro de 1998, da Anatel ou outro que venha substituí-lo.

Art. 4º As estações de radiocomunicação correspondentes a equipamentos de radiação restrita operam em caráter secundário, isto é, não têm direito a proteção contra interferências prejudiciais provenientes de qualquer outra estação de radiocomunicação nem podem causar interferência em qualquer sistema operando em caráter primário.

Parágrafo único. Os equipamentos de radiação restrita, que vierem a causar interferência prejudicial em qualquer sistema operando em caráter primário, devem cessar seu funcionamento imediatamente até a remoção da causa da interferência.

Art. 5º Os equipamentos de radiação restrita operando de acordo com o estabelecido neste Regulamento devem possuir certificação emitida ou aceita pela Anatel, de acordo com as normas vigentes.

Art. 6º Os equipamentos de radiação restrita devem conter, em lugar facilmente visível, uma etiqueta de difícil remoção, contendo a seguinte declaração: “Este equipamento opera em caráter secundário, isto é, não tem direito a proteção contra interferência prejudicial, mesmo de estações do mesmo tipo, e não pode causar interferência a sistemas operando em caráter primário.”

5.4 Ações de Regulamentação no Mundo

Ao considerar a questão de regulamentação da tecnologia PLC fora do Brasil, sobretudo aquela que envolve a normalização dos componentes dos sistemas quanto aos aspectos de Compatibilidade Eletromagnética (EMC), uma separação deve ser feita ao considerar “equipamentos” e “redes” durante a aplicação das diretivas e normas apresentadas a seguir.

5.4.1 Situação – Europa

Todo fornecedor de equipamentos necessita comprovar que seus produtos cumprem com as Diretivas vigentes[47][48]. Usualmente, esta certificação é garantida pela marca ou selo “CE”; principais diretivas vigentes em toda a Comunidade Européia, adotadas integralmente como norma pelos mais de quinze países-membros:

- R&TTE Directive (EC/1999/5) – “Radio Equipment & Telecommunications “Terminal Equipment”
- EMC Directive (EC/1989/336)
- Electrical Safe Directive (EC/1973/23)

Sobre padrões ou “*standards*”, não existe atualmente alguma definição “harmonizada” no âmbito europeu que defina limites de emissão para equipamentos PLC. Desta maneira, a obtenção do selo CE para equipamentos PLC não é ainda um processo padrão, como aqueles existentes para os demais equipamentos e sistemas cobertos por esta certificação. A única referência que pode ser utilizada na Europa é a famosa norma EN55022; contudo, qual das versões da mesma seria aplicável, ainda não está 100% claro:

- Release 1994 – Estabelece limites e procedimentos de medição para a interface de alimentação apenas;
- Release 1998 – Estabelece distintos limites e procedimentos de medição para as interfaces de alimentação e de telecomunicações.

O caminho para o esclarecimento da correta aplicabilidade da norma EN55022 para os equipamentos PLC está sendo tratado de forma bastante ativa pelo comitê responsável, o IEC CISPR SC I WG 3. No âmbito deste grupo, o mais recente Draft (CISPR/I/44/CD), com o intuito de atualizar a referida norma, apresenta limites e procedimentos de medição

específicos para equipamentos que utilizem a mesma interface para alimentação e telecomunicações, definida neste documento como “Multi Purpose Port”. O trabalho de desenvolvimento desta atualização a ser incorporada à EN55022 está ocorrendo com bastante sucesso e aceitação por parte dos comitês nacionais dos países-membros da comunidade européia. Com relação aos aspectos de segurança e imunidade a interferências eletromagnéticas externas, o cenário atual na Europa não prevê nenhum tratamento específico para equipamentos PLC, sendo aplicável em sua totalidade as atuais normas:

- EN60950 – Segurança
- EN55024 – Imunidade

O grupo de trabalho ETSI/CENELEC ficou com a responsabilidade de promover a discussão do tema [55]:

- Oito *Drafts* já criados e atualmente em circulação entre os comitês nacionais dos países-membros da comunidade européia.
- Data esperada para o Release final: segundo semestre de 2008.

Contudo, atualmente este grupo de trabalho já apresenta a seguinte indicação: a União Européia aconselha ativamente a flexibilidade com os níveis de emissões, facilitando a implantação de faixa larga.

5.4.2 Situação – Estados Unidos

O FCC Part 15: única regulamentação mundial que determina limites para radiação não-intencional proveniente de sistemas de telecomunicações com fio [49][54][59].

Situação estável e bastante experimentada, estabelecendo um limite de $30\mu\text{V/m}$ a uma distância de 30m e um fator de correção de 40dB/década para outras distâncias.

Utilizada por vários anos na totalidade do contingente de sistemas instalados nos Estados Unidos e Canadá. Esta experiência e utilização seriam suficientes para garantir a aplicabilidade da mesma como modelo na definição de uma regulamentação para redes PLC.

5.5 Projeto OPERA

O Projeto Open PLC European Research Alliance (OPERA), é um Consórcio Europeu para desenvolvimento, padronização e integração da Tecnologia *Power Line Communications* (PLC), faixa larga, em toda a Comunidade Européia, tornando-se um padrão internacional, com o desenvolvimento de sua segunda fase prevista para o período de 2006 – 2008, tendo em vista sua exploração e aproveitamento em conjunto com os parceiros nos diversos nichos do mercado como mostra a figura 5.1 [45]:

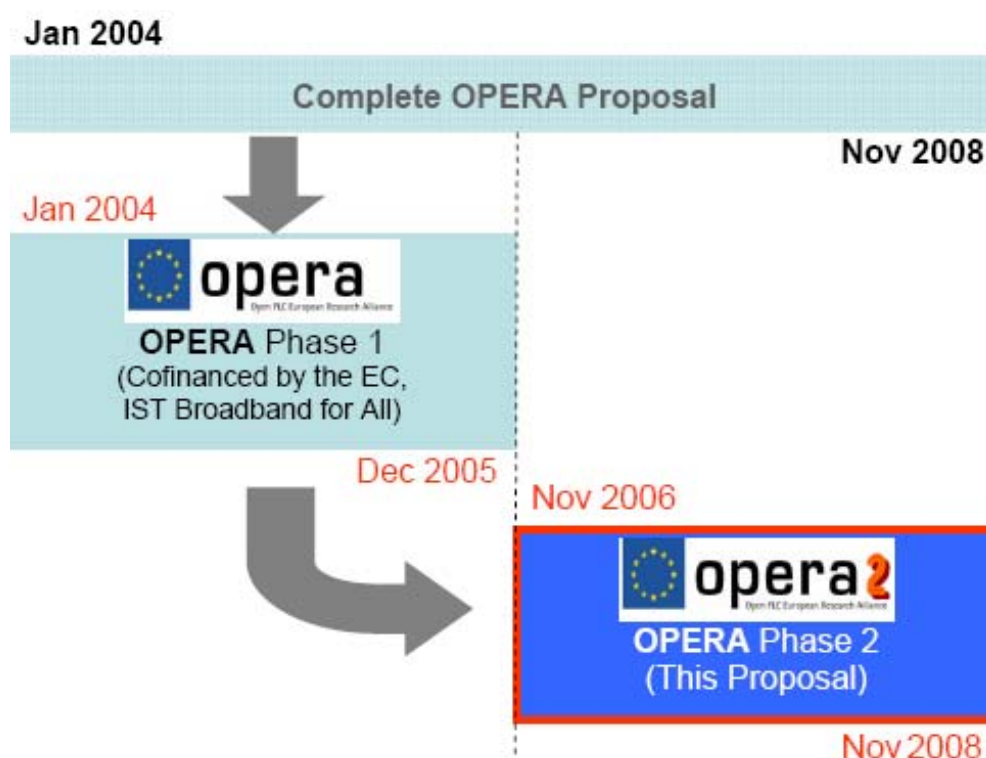


Figura 5.1- Projeto OPERA[45]

Tem como objetivo geral:

- a) aperfeiçoar e expandir a tecnologia PLC (*Power Line Communications*) como uma alternativa de acesso *broadband* (faixa larga) de baixo custo para toda a comunidade européia;
- b) propiciar a aplicação da tecnologia PLC em massa de baixo custo de investimento e mínimos requisitos de manutenção;
- c) criar uma infra-estrutura de faixa larga em ambiente positivo, e favorável a investimentos;
- d) promover serviços, aplicações e conteúdos nas áreas:

- Empresas públicas e privadas;
- Órgãos governamentais;
- Ensino a distância;
- Tele-medicina;
- Comércio eletrônico

Desenvolvimento de sistemas PLC banda larga para aplicações em Baixa Tensão e Média Tensão, considerando distância, facilidade de operação e gerência de rede dentre outros, conforme Figura 5.2:

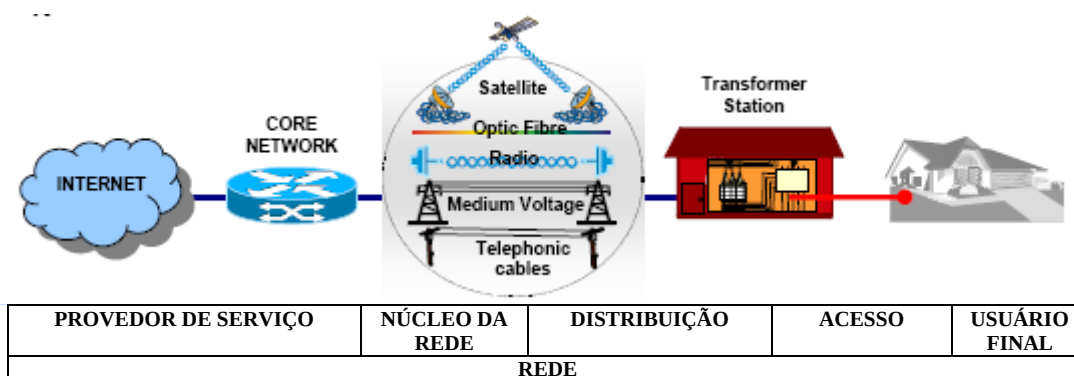


Figura 5.2 – Rede PLC de Baixa Tensão [45]

O Consórcio é formado por 26 entidades de diversos países da Comunidade Européia (Espanha, Suíça, França, Alemanha, Áustria, Portugal, Inglaterra, Suécia, Itália, Eslovênia) e do Brasil, tendo como único representante oficial a CELG[44], que em parceria com a Associação de Empresas Proprietárias de Infra-Estrutura e Sistemas Privados de Telecomunicações (APTEL) e seus associados, disseminará a tecnologia PLC entre:

- Distribuidoras de energia;
- Operadoras de telecomunicações;
- Desenvolvedores de tecnologias;
- Fabricantes;
- Empresas de consultoria;
- Universidades.

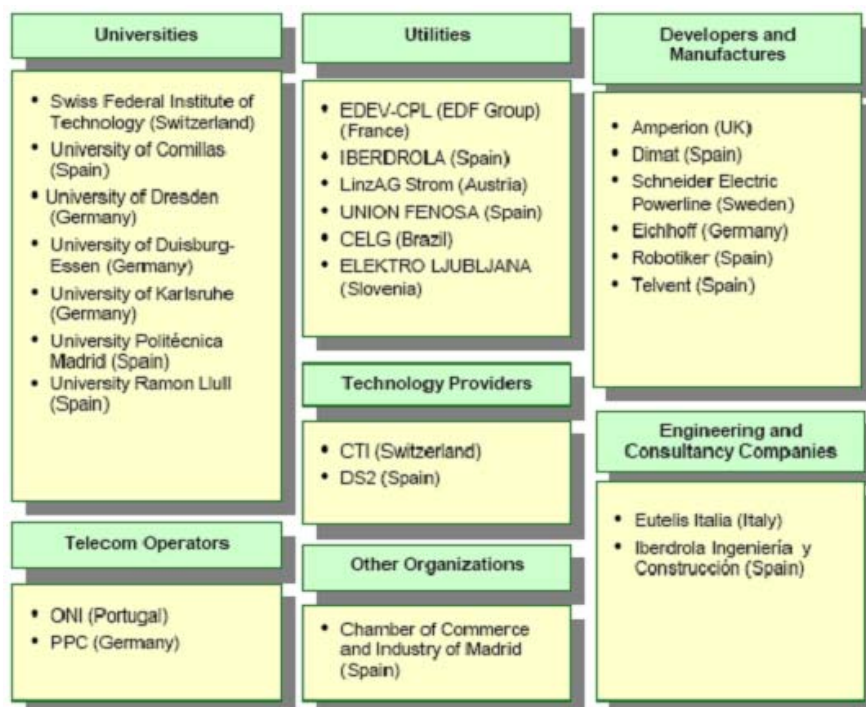


Figura 5.3 - Participantes do Projeto OPERA[45]

O projeto é dividido em nove Grupos de Trabalho:

- Grupo de Trabalho 1 – Acoplamento e Compatibilidade Eletromagnética dos Equipamentos e Modelagem do Canal PLC;
- Grupo de Trabalho 2 – Integração e Teste de Campo do PLC;
 - Especificação, Teste de Campo e critérios de evolução;
 - Desenvolvimento e Teste de Campo;
 - Avaliação de Desempenho dos Testes de Campo;
 - Relatórios e Conclusões.
- Grupo de Trabalho 3 – Melhorias dos Sistemas PLC e Equipamentos dos Usuários;
- Grupo de Trabalho 4 – Serviços sobre Rede PLC:
 - Definição de testes para os serviços sobre a Plataforma de Rede PLC e criação de relatórios técnicos.
 - Conclusão de desempenho da provisão de diferentes serviços sobre a Rede PLC.
- Grupo de Trabalho 5 – Padronização;
- Grupo de Trabalho 6 – PLC e Desenvolvimento de Negócios:
 - Pesquisa do Mercado Mundial.
- Grupo de Trabalho 7 – Disseminação.

➤ Disseminação, Página na Internet e Organização de Eventos no Brasil e América Latina.

- Grupo de Trabalho 8 – Direito de Propriedade Intelectual
- Grupo de Trabalho 9 – Gerenciamento.

Este grupo de 26 parceiros que reúne as principais partes interessadas em PLC faz a partilha de conhecimentos e tarefas deste projeto, desenvolvendo e aprimorando a tecnologia PLC. O grupo é liderado pela Companhia Energética de Madri - Iberdrola S.A., que assumiu a coordenação deste projeto a fim de melhorar a eficiência e cumprir as várias metas e objetivos estipuladas no trabalho: o Comitê Diretivo e o Comitê Técnico formando assim uma estrutura hierárquica na organização do projeto OPERA 2.

O objetivo do projeto OPERA 2 realizado em Madri (Espanha), Linz (Austria) e Lisboa (Portugal), através dos grupos de trabalho, é o de desenvolver diferentes implementações em diversos estágios europeus com alguns requisitos mínimos, e entre eles estão o de fornecer acesso à rede a pelo menos 80 clientes, implementar de 6 a 8 estações transformador com mais de uma célula PLC e interconectar pelo menos uma célula PLC utilizando tecnologias emergentes [45].

5.5.1 Grupo de Trabalho 2 (Work package 2)

O Grupo de Trabalho 2 (WP2), realizado através do projeto OPERA 2, foi efetuado nas cidades de Madri, Linz e Lisboa com o objetivo de atender pelo menos a 25 clientes, dando acesso à banda larga e serviços de VoIP, utilizando-se de transformador PLC em diferentes topologias e realizando ensaios e testes usando os últimos resultados do projeto OPERA fase 1 [45].

Para a realização das atividades do WP2, foi estabelecido um roteiro de progresso das atividades, no qual foram consideradas:

- Atividade 2.1:

Atividade de teste de campo, especificação e validação de critérios: foi feito um planejamento e caracterização em detalhe dos três testes de campo, sendo realizada uma descrição destes testes considerando seu desempenho.

- Atividade 2.2:

Arquitetura de rede integrada: foi realizada uma definição da arquitetura da rede utilizada.

- Atividade 2.3:

Implantação do Campo de Teste: planejamento, preparação, instalação e ajustes nos campos de testes utilizados, instalação dos clientes e configuração dos serviços de testes.

- Atividade 2.4:

Desempenho nos campos de testes: acompanhamento dos canais PLC, caracterização dos elementos PLC, desempenho da camada física e de aplicação e verificação do “*stress limit*”.

Em todas as atividades e testes envolvidos, foram apresentados os resultados finais em suas devidas documentações.

5.5.2 Campo de Teste: Iberdrola

O campo de teste da Companhia Energética de Madri - Iberdrola, localiza-se em uma área urbana onde foram instalados dois transformadores PLC em um *backbone* via fibra óptica com velocidade de 100Mbps e com distâncias do transformador ao cliente consideradas médias (maior distância é de 220m com 2 repetidores), como mostra a figura 5.4.

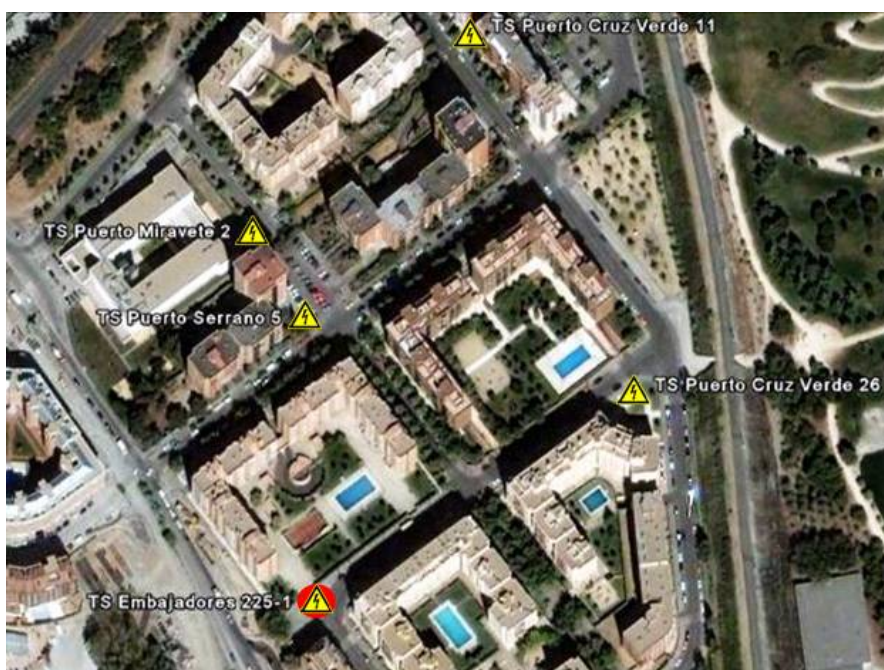


Figura 5.4 – Campo de Teste – Iberdrola [45]

O equipamento utilizado foi do fabricante CTI, como mostra a Figura 5.5, com 2 transformadores (modelos TS EMB225 e TS PS5) e 11 repetidores (sendo 9 repetidores finais e 2 de transição) instalados e conectados a 28 clientes finais [45].



Figura 5.5 – Equipamentos – Iberdrola [45]

A arquitetura de rede foi implementada como mostra a Figura 5.6, com frequência de 13MHz a 33MHz no link entre transformadores e entre repetidores e clientes finais, e de 2 MHz a 12MHz entre transformadores e repetidores e entre repetidores. Foram instalados repetidores em cabines na rua quando foi necessária uma repetição do sinal por consequência da distância.

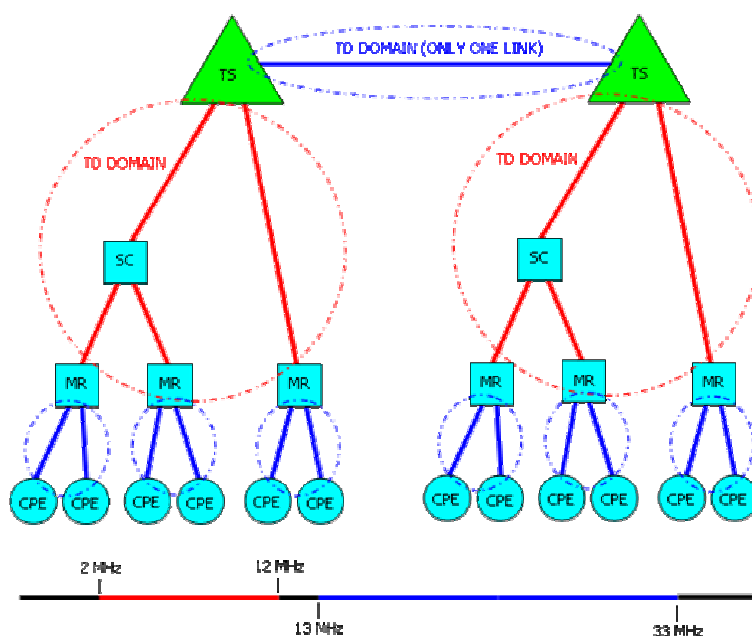


Figura 5.6 – Arquitetura de Rede – Iberdrola [45]

A localização dos transformadores TS EMB225 e TS PS5 é mostrada na Figura 5.7 abaixo.



Figura 5.7 – Localização – Iberdrola [45]

A arquitetura de rede realizada com o transformador TS EMB225 apresentada na figura 5.8 abaixo mostra a implementação dos repetidores finais e a conexão com os clientes, além das faixas de frequências estipuladas para cada tipo de comunicação.

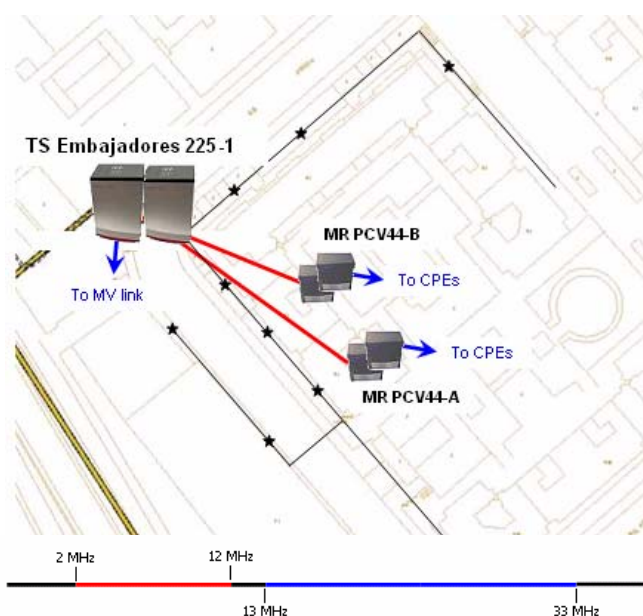


Figura 5.8 – Localização dos Equipamentos – Iberdrola [45]

A implementação do transformador TS PS5 conforme a Figura 5.9 mostra como são utilizados repetidores em cabines nas ruas em casos em que a distância é considerável e também foi apresentada a comunicação com os clientes finais.

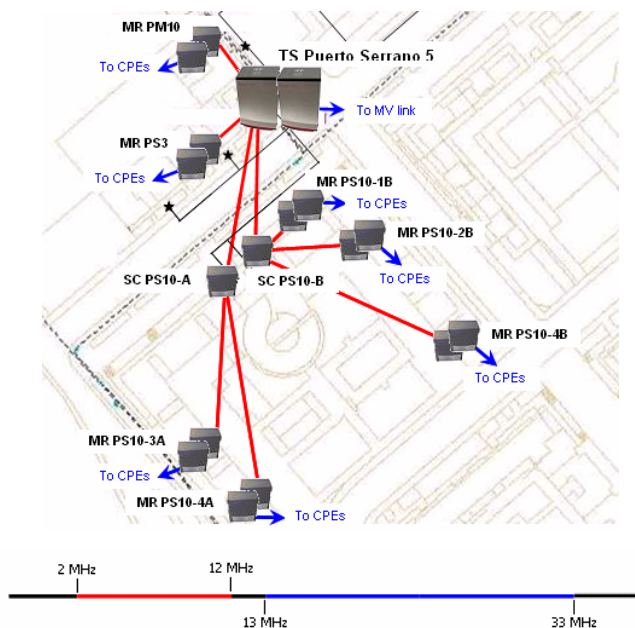


Figura 5.9 – Localização dos Equipamentos II – Iberdrola [45]

Os resultados apresentados foram satisfatórios, chegando a 106Mbps de link de transformador a transformador, entre 46Mbps a 63Mbps de repetidor a transformador e até 118Mbps de repetidor a cliente. É mostrado na figura 5.10 o desempenho da célula do transformador TS EMB225 e do link entre transformadores [45].

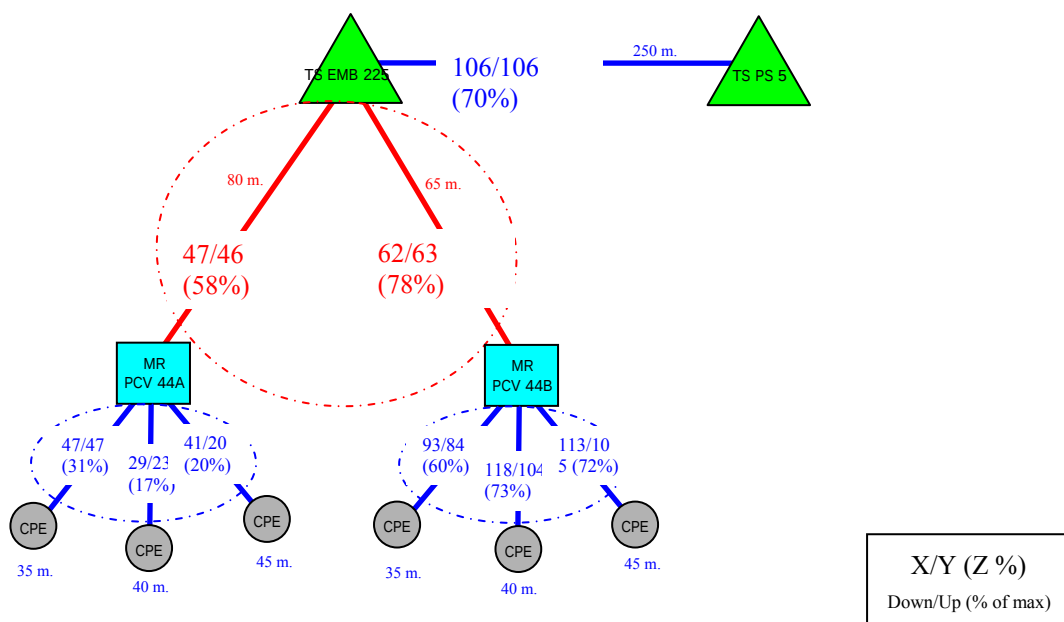


Figura 5.10 – Resultados – Iberdrola [45]

5.5.3 Campo de Teste: Linz

O teste de campo foi realizado mais precisamente em Altenberg, que é uma aldeia numa zona rural próximo à cidade Linz (Áustria), como mostra a figura 5.11. Este local foi escolhido principalmente por ser tão diferente dos outros dois, que são em área urbana, considerando os clientes reduzidos e distâncias elevadas, tornando-se assim um desafio [45].



Figura 5.11 – Campo de Teste – Linz [45]

Foram instalados no local dois transformadores sem nenhum link de comunicação entre eles, utilizando-se dois backbones via fibra óptica de 100Mbps e alcançando a 25% dos clientes em potencial com a tecnologia PLC.

Os equipamentos utilizados foram 2 masters (head end) e 21 repetidores do fabricante Ilevó, atendendo a 36 equipamentos de instalação à clientes, como mostra a Figura 5.12 [45].



Figura 5.12 – Equipamento – Linz [45]

Algumas questões não atenderam ao pleno sucesso do projeto: uma delas foi o tamanho dos equipamentos, que foram considerados grandes, não se adaptando as parâmetros da tecnologia atualmente esperada; outra questão foi a empresa Linz Strom ser inexperiente quanto ao sistema de instalação, para uma arquitetura sendo considerada nova para ela, observando-se inclusive a necessidade de instalação de fusíveis nos equipamentos; e uma terceira questão foi que, por razões inesperadas, o *backbone* falhou por 4 dias durante os testes.

Quanto à arquitetura de rede utilizada, todos os masters e todos os repetidores para ligações a longas distâncias foram injetados em modo de configuração 1, que mostrou bom desempenho, sendo considerado melhor ainda em cabos empacotados aéreos; já em cobertura de pequenas áreas (em casas), foi utilizado o sinal em modo de configuração 2; e para repetidores em edifícios teve uma melhor desempenho o modo de configuração 5. Essa arquitetura teve grande parte do cabeamento subterrâneo, sendo constatado um bom desempenho em cabos empacotados aéreos e implantadas distâncias de transformador ao cliente de até 722m com 4 repetidores e alcançando taxas de até 1,6Mbps fim a fim [45].

A topologia da rede elétrica de baixa tensão utiliza a topologia de rede em árvore, como ilustrado na figura 5.13.

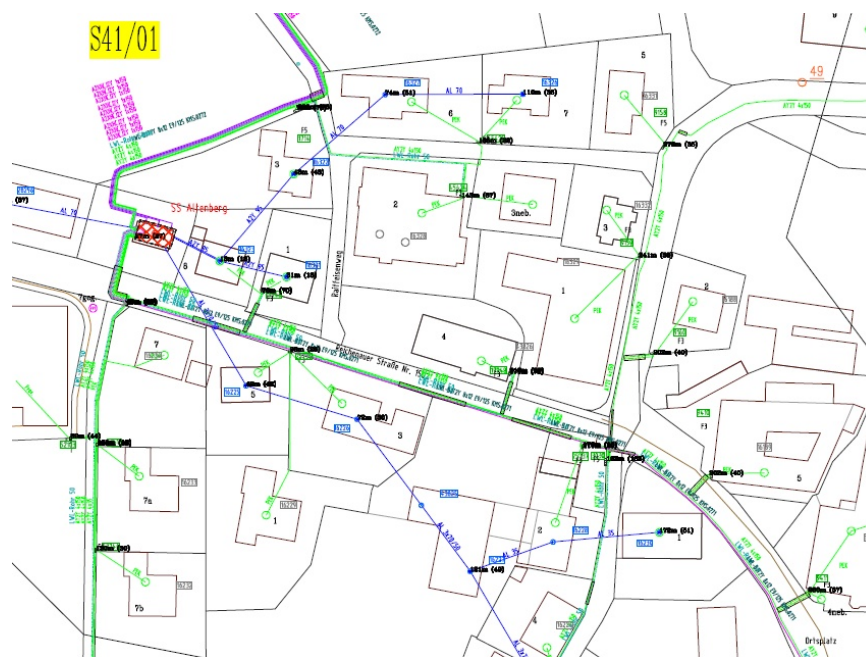


Figura 5.13 – Topologia – Linz [45]



Figura 5.16 – Localização – ONI [45]

A topologia foi feita diretamente com cabos do transformador para os blocos de edifícios com apartamentos em prédios de até 8 andares, em um único estágio, como mostra a Figura 5.17.

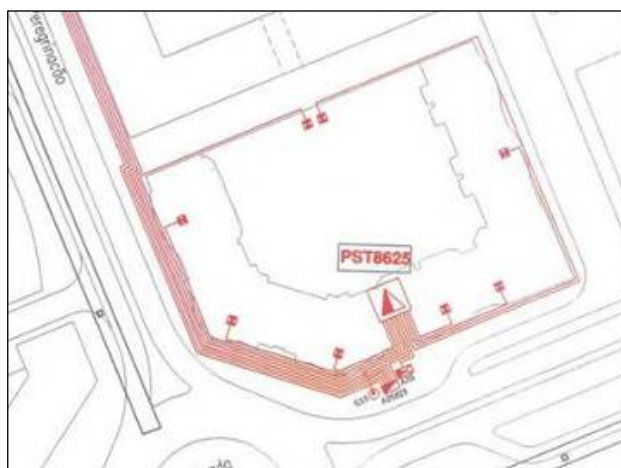


Figura 5.17 – Localização II – ONI [45]

A topologia foi construída com 2 links de comunicação entre transformadores, 24 links entre master e repetidores e 25 links entre repetidores e clientes, com 5MHz de largura de banda para comunicação entre transformadores e entre master e repetidor, com um

máximo de 42Mbps de *throughput*. Várias ligações ficaram entre 90% e 97% da capacidade máxima, sendo que a ligação mais longa, com 425m teve 67% de aproveitamento da capacidade, e apenas um cliente teve baixo desempenho, ficando entre 5Mbps e 9Mbps, localizado no 7º andar, oferecendo aos clientes acesso à banda larga e VoIP [22].

A figura 5.18 apresenta o desempenho para o transformador TS8625 utilizado, onde foram instalados equipamentos master a uma distância de 425 metros alcançando um velocidade de 28Mbps.

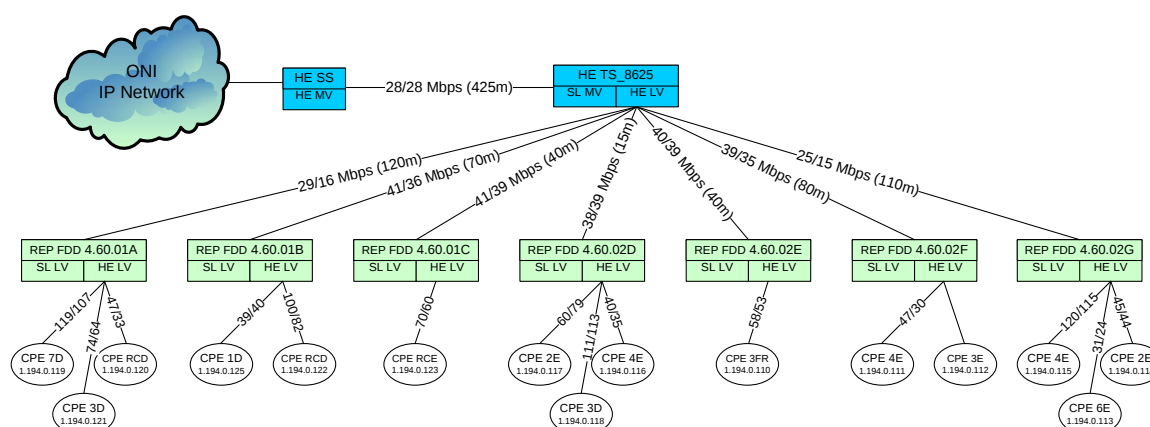


Figura 5.18 – Desempenho – ONI [45]

O material mostrado na Figura 5.19 utilizado, no teste de campo, é do fabricante Ilevio, um tipo de hardware modular horizontal, sendo necessário o uso de filtros externos; e os acopladores entre transformadores são indutivos e entre transformador e repetidor podem ser indutivo ou capacitivo. Algumas questões foram levantadas no projeto, como a dificuldade de se aplicar dois longos links usando uma ligação, além da necessidade de se instalar um repetidor no meio do edifício para superar baixo desempenho [45].



Figura 5.19 – Equipamentos – Oni [19]

5.5.5 Monitoramento do Canal PLC

Foi efetuada nos testes de campo realizados uma série de testes para uma melhor avaliação da tecnologia utilizando a seguinte abordagem: monitoramento do canal PLC, elementos de caracterização PLC, desempenho da camada física, desempenho da camada de aplicação e limite de stress [45].

O monitoramento foi realizado com o objetivo de se medir a variação do canal através do tempo, sendo feitas várias medições com a ferramenta SNRViewer com acompanhamento num período de 24 horas. Os resultados obtidos foram a relação sinal-ruído (SNR), bits por quadro (BPC) e resposta de frequência do canal (CFR), realizados nos três testes de campo (Iberdrola, Linz e ONI) [45].

Com a análise dos resultados foram observadas algumas questões importantes, como:

- SNR e CFR geralmente diminuem com frequência;
- Distância significa acentuado decréscimo;
- Link entre transformador mostra bom desempenho, estabilidade e baixo ruído;
- Link entre transformador e repetidores deve utilizar frequências entre 2 MHz e 12-15MHz;
- Links em edifícios são muito imprevisíveis e assimétricos. Ruído e frequências ressonantes são os principais obstáculos;
- Variância do tempo do CFR é menor que o esperado. É o ruído que muda constantemente com o tempo;
- Geralmente a SNR gravada da camada física do projeto OPERA demonstrou desempenho satisfatório na maioria das situações, mas há margem para melhorias [45].

5.5.6 Conclusões

Os testes de campo realizados tiveram sucesso em seus objetivos, sendo realizados em três diferentes ambientes ao mesmo tempo, com características tão diferentes e em tão pouco tempo, além de serem implantados com topologias não idênticas, com fabricantes diferentes e com excelentes resultados.

Entre outros fatores importantes analisados nos testes, está o modo de utilização e frequência, que é considerado de extrema importância no planejamento da topologia, tido como um objeto de análises mais aprofundadas. Outro fator analisado, especifica a não

inclusão de melhorias na camada MAC; no entanto, em outros aspectos se mostrou necessárias análises mais aprofundadas, ao mesmo tempo em que o WP2 continuou em análise e acompanhamento até o final do projeto [45].

No próximo capítulo, serão apresentadas as conclusões dos testes de campos realizados no Brasil em ambientes *Indoor* e *Outdoor*.

CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES

No estudo proposto neste trabalho, foram realizados testes de campo em ambientes internos e externos, com o objetivo de analisar o desempenho da rede PLC quando é submetida a interferências eletromagnéticas oriundas de aparelhos ligados à mesma rede elétrica. Nestes testes, foi observado que a rede PLC é mais vulnerável às interferências geradas por motores de escovas conectados à mesma rede elétrica em que estão ligados os equipamentos de comunicação.

Na análise do espectro da rede sem o sinal PLC no ambiente interno, observou-se que o espectro não é completamente limpo, existindo interferências de fontes desconhecidas, que podem ou não estar na mesma rede elétrica em que foi realizado o teste. Mesmo assim, a taxa de transmissão média obtida com esta situação foi de 33,42 Mbps, o que corresponde a cerca de 59% da taxa máxima de transmissão do equipamento PLC.

No ambiente externo, devido à dificuldade de se ligar o equipamento diretamente na linha, a análise quantitativa foi realizada somente com o sinal PLC original. Os testes iniciais mostraram que a taxa de *download* máxima para este cenário foi de, aproximadamente, 3 Mbps.

A tecnologia *Smart Grid* foi analisada, abordando suas principais características e funcionalidades. Também foi detalhada a tecnologia PLC, apresentando as características da rede, os equipamentos utilizados, seus padrões e especificações técnicas, além de se mostrar as restrições e dificuldades de implementação e funcionamento da tecnologia.

Através do desenvolvimento teórico, conseguiu-se demonstrar que é possível atingir a taxa que os fabricantes de equipamentos padrão HomePlug anunciam. Mostrou-se que a taxa do sinal PLC foi bastante influenciada pela presença de ruídos, tornando-se muitas vezes necessário o uso de algumas técnicas para diminuir a interferência: Modulação OFDM e Filtros *notch*. Os equipamentos transceptores PLC devem possuir filtros *notch*, pois este dispositivo possibilita a mitigação de interferência, através da supressão de um conjunto de portadoras do sistema PLC.

Os resultados mostram ainda que o sistema PLC, apesar de ter apresentado queda de desempenho com a presença de ruídos na rede elétrica, se manteve operante durante todo o teste, o que é positivo para a implementação comercial da tecnologia. Porém, o aperfeiçoamento desta se faz necessário a fim de diminuir a sensibilidade da rede elétrica às

interferências, porque em um ambiente residencial, ou até mesmo industrial, dificilmente é encontrada uma situação ideal para o funcionamento durante todo o tempo.

O PLC é a tecnologia que possui maior potencial para atingir a última milha, pois a rede elétrica possui a maior capilaridade dentre as redes mencionadas. Outra vantagem do PLC é a mobilidade encontrada na implementação de redes locais, uma vez que cada tomada elétrica pode ser também um ponto de rede, aproveitando-se assim o cabeamento elétrico para o tráfego de dados.

O estudo realizado mostra que a tecnologia tem potencial para ser utilizada e comercializada em larga escala. Porém, o seu sucesso vai depender de outros fatores, como o custo dos equipamentos, o tempo necessário para a criação de um padrão internacional, e até mesmo a evolução das demais tecnologias de última milha.

6.1 Sugestões de Trabalhos Futuros

Para trabalhos futuros, sugere-se a realização de uma análise de desempenho da rede PLC, sob interferências geradas por motores de escovas conectados à mesma rede elétrica, para aplicações de tempo real como Voz sobre IP ou vídeo sob demanda, culminando com a realização de um estudo para a implantação de Qualidade de Serviço (QoS) nas redes PLC.

Outra sugestão é a realização de testes de desempenho em um ambiente industrial, o qual apresenta uma maior diversidade de fontes de interferência, configurando-se como uma condição hostil à comunicação PLC com medições em distâncias maiores se o ambiente e os equipamentos permitirem.

Por fim, sugere-se a realização de testes de segurança da informação em uma rede de acesso PLC com Master, Modems e Repetidores e em rede HomePlug nas camadas físicas e de enlace, uma vez que a rede fica exposta a ataques. Estes trabalhos devem demonstrar soluções de proteção para este tipo de rede.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] News Bulletin, PLC Utilities Alliance. Disponível em: <http://www.pua-plc.com>. Acesso em 26 junho 2008.
- [2] Hrasnica, H., Haidine, A., and R. Lehnert, “Broadband Powerline Communications: Network Design”. John Wiley & Sons: West Sussex, England, 2005.
- [3] BOCCUZZI, C. V., “Smart Grid”: O Projeto Eletropaulo. Disponível em: <http://www.tec.abinee.org.br/arquivos/s1702.pdf>. Acesso em: 11 julho 2008.
- [4] LEITE, L. H. M., Utilização de Tecnologia PLC para Suporte à Aplicações SmartGrid. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/9%20-%20Fitec%20-%20Leonardo.pdf>. Acesso em: 11 julho 2008.
- [5] SmartGrid. Disponível em: <http://www.smartgridnews.com/>. Acesso em: 03 novembro 2008.
- [6] Global Environment Fund, Center for Smart Energy. The Emerging Smart Grid: Investment and Entrepreneurial Potential in the Electric Power Grid of the Future. Disponível em: http://www.globalenvironmentfund.com/GEF%20white%20paper_Electric%20Power%20Grid.pdf. Acesso em: 12 julho 2008.
- [7] VIEIRA, J. G., A CELG no Projeto OPERA 2 e suas Perspectivas de Aplicação da Tecnologia PLC. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/CELG%20-%20Vieira.pdf>. Acesso em: 12 julho 2008.
- [8] MANO, R., Smart Grid – Aplicações nos Estados Unidos. Disponível em: <http://www.tec.abinee.org.br/arquivos/s1703.pdf>. Acesso em: 17 julho 2008.
- [9] Electric Power Research Institute. IntelliGrid Program. Disponível em: <http://www.epri.com/IntelliGrid/default.asp>. Acesso em: 17 julho 2008.
- [10] Xantus Consulting Internacional. Disponível em: http://xantus-consulting.com/projects/intelligrid_architecture.htm. Acesso em: 17 agosto 2008.
- [11] U.S. Department of Energy. Office of Electric Transmission and Distribution, “Grid 2030” A National Vision for Electricity’s Second 100 Years. Disponível em: http://www.oenergy.gov/DocumentsandMedia/Elec_Vision_2-9-4.pdf. Acesso em: 18 agosto 2008.
- [12] U.S. Department of Energy. Office of Electric Transmission and Distribution, “National Electric Delivery Technologies Roadmap”. Disponível em: http://www.oenergy.gov/DocumentsandMedia/ER_2-9-4.pdf. Acesso em: 18 agosto 2008.

- [13] U.S. Department of Energy. Office of Electricity Delivery and Energy Reliability. Disponível em: <http://www.electricdistribution.ctc.com/index.htm>. Acesso em: 18 agosto 2008.
- [14] U.S. Department of Energy. Office of Electricity Delivery and Energy Reliability. Disponível em: <http://www.oe.energy.gov/randd/gridworks.htm>. Acesso em: 18 abril 2008.
- [15] TEIXEIRA, E. R., Duffles. Tutorial PLC. Disponível em: <http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialplc/Default.asp>. Acesso em 20 abril 2008.
- [16] VARGAS, Alessandra Antunes. Estudo sobre Comunicações de Dados via Rede Elétrica para Aplicações de Automação Residencial/Predial. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004.
- [17] SILVA, A. R. B., Provimento de Inclusão Digital Utilizando Power Line Communications. Salvador: Universidade Federal da Bahia, 2005.
- [18] ZIMMERMANN, M. M. R., Avaliação tecnológica do “PLC in Home”. Blumenau: URB, 2004.
- [19] Grupo de Trabalho Powerline. Power Line Communications-PLC ou Broadband Over Powerlines-BPL White Paper. APTEL, 2003.
- [20] EBA Powerline Communications L.L.C. EBA PLC Products. Disponível em: <http://www.ebapl.com>. Acesso em 15 agosto 2008.
- [21] DIMAT. Guia de Produtos. Disponível em: <http://www.zivbrasil.com.br/catalogos/DIMAT.pdf>. Acesso em 15 agosto 2008.
- [22] Corinex. Corinex Powerline Wall Mount. Disponível em: http://neptun.corinex.com/web/docx.nsf/w/eng-corinex_powerline_ethernet_wall_mount. Acesso em 15 setembro 2008.
- [23] LIN, Yu-Ju, LATCHMAN, Haniph A. et.al. A Comparative Performance Study of Wireless and Power Line Networks. IEEE Communications.
- [24] MARQUES, F. S.; TEIXEIRA, E. A.; SOUZA, E. M. ; JOHNSON, T. M. ; ARAÚJO, S. G. ; RIBEIRO, M. V. . Modeling and Performance Analysis of PLC Channels with External Interference in Outdoor and Indoor Environments. In: IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications, 2008, Ilha de Jeju, Coréia do Sul. IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications, 2008.
- [25] CAMPISTA, M.E.M, Uma Análise da Capacidade de Transmissão na Rede de Energia Elétrica Domiciliar. Belém: Simpósio Brasileiro de Telecomunicações, 2004.
- [26] NETO, V.V., Análise de Desempenho de Sistema PLC Frente a Distúrbios Ligados à Qualidade de Energia. VII Seminário de Tecnologia PLC. CPqD, 2006.

- [27] Datasheet Asoka Pluglink PL9720-USB. Disponível em: <http://www.asokausa.com/cms/asokausa/pdf/Datasheet-PL9720-USB.pdf>. Acesso em 10 setembro 2008.
- [28] Divisor de Frequência. Disponível em: http://www.geocities.com/siliconvalley/program/3430/som_3.htm. Acesso em 05 setembro 2008.
- [29] CARVALHO, F. B. S. de. Avaliação da Qualidade da Transmissão para o Canal de Interatividade da TV Digital utilizando Power Line Communications. Campinas: XXII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações, 2005.
- [30] PINHEIRO, J. M.S.. Desempenho em Sistemas Estruturados. Disponível em: http://www.projetoederedes.com.br/artigos/artigora_desempenho_sistemas_estruturados.php. Acesso em 20 setembro 2008.
- [31] Haidine, A., Hrasnica, H., Lehnert, R.; “*MAC Protocols for Powerline Communications: ALOHA, Polling and their Derivates*”. John Wiley & Sons, England, 2004.
- [32] Held, G., “Understanding Broadband over Power Line”. Auerbach Publications, Taylor & Francis Group: Boca Raton, FL, 2006.
- [33] Gebhardt, M., Weinmann, F. and Dostert, K. “Physical and regulatory constraints for communication over the power supply grid,” IEEE Communications Magazine, vol. 41, no. 5, pp. 84–90, May 2003.
- [34] Asoka USA Corporation. (<http://www.asokausa.com>). Acesso em 05 setembro 2008.
- [35] Sanderson, W. “Broadband communications over a rural power distribution circuit,” in Proc. IEEE Southeastcon, 2000, pp. 497–504.
- [36] DOSTERT, K., Power Line Communications. NY. Prentice Hall, 2001.
- [37] RIBEIRO, M. V., “Power Line Communications: A Promising Communication System’s Paradigm for Last Miles and Last Meters Applications,” ITS2006 is the International Telecommunications Symposium 2006, Book Chapter September 2006.
- [38] T. Zahariadis and K. Pramataris, “Broadband consumer electronics networking and automation,” Int. J. of Commun. Syst., no. 17, pp. 27–53, 2004.
- [39] A. M. Vidal. “Estudo do Estado da Arte e Análise de Desempenho de Sistema de Comunicação PLC de Banda Larga”, Dissertação, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC, dezembro 2005.
- [40] MARQUES, F. S.; REGE, E. L. ;TEIXEIRA, E. A.; SOUZA, E. M. ; JOHNSON, T. M. ; RIBEIRO, M. V. . Regulation Issues about Broadband PLC: A Brazilian

- Experience and Perspective. In: International Symposium on Power Line Communications and Its Applications, 2007, Pisa. International Symposium on Power Line Communications and Its Applications, 2007. p. 523-527.
- [41] E. Liu, Y. Gao, G. Samdani, O. Mukhtar, and T. Korhonen, "Broadband powerline channel and capacity analysis," in Proc. International Symposium on Power-line Communication and its Applications, 2005, pp. 7–11.
 - [42] ANATEL, (<http://www.anatel.gov.br>). Acesso em setembro 2008.
 - [43] ANEEL. Apresentações. Workshop sobre *Power Line Communications* (PLC), 2007. (<http://www.aneel.gov.br>). Acesso em 30 setembro 2008.
 - [44] CELG.Companhia Energética de Goiás.(<http://www.celg.com.br>). Acesso em 20 abril 2008.
 - [45] Consórcio OPERA - *Open PLC European Research Alliance* (<http://ist-opera.org>). Acesso em 20 abril 2008.
 - [46] LIMA, Milton X. *Redes PLC* (Através da Rede Elétrica). In: Projetos de Rede, 2007. (<http://projetoderedes.com.br/tutoriais>).Acesso em 22 setembro 2008.
 - [47] ITU. *International Telecommunication Union* (<http://www.itu.int/>) Acesso em 20 abril 2008.
 - [48] CENELEC. European Committee for Electrotechnical Standardization (<http://www.cenelec.eu/>).Acesso em 20 setembro 2008.
 - [49] FCC. Federal Communications Commission (<http://www.fcc.gov/>).Acesso em 20 setembro 2008.
 - [50] MOURA, Alexandre Vidal. Estudo do Estado da Arte e Análise de Desempenho de Sistema de Comunicação PLC de Banda Larga. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2005.
 - [51] RIBEIRO, M.V.; LAMPE, Lutz; DOSTERT, Klaus; HRASNICA, Halid. EURASIP Journal on Applied Signal Processing - Advanced Signal Processing and Computational Intelligence Techniques for Power Line Communications, 2007.
 - [52] LEE, M. K., Newman, R. E., Latchmand, H. A., Katar, S., Younge, L.; HomePlug 1.0 Powerline Communication LANs -Protocol - Description and Performance Results, Janeiro 2000.
 - [53] RIBEIRO, M.V., Power Line Communications: A Promising Communication System's Paradigm for Last Miles and Last Meters Applications, Telecommunications: Advances and Trends in Transmission, Networking and Applications, Org. Charles C. Cavalcante, Ricardo F. Colares e Paulo César Barbosa, Fundação Edson Queiroz , p. 133-156, 2006.

- [54] “IEEE p1901 draft standard for broadband over power line networks: Medium access control and physical layer specifications,” <http://grouper.ieee.org/groups/1901/>. Acesso em 20 setembro de 2008.
- [55] Telkonet, <http://www.telkonet.com>. Acesso em 21 de setembro de 2008.
- [56] RIBEIRO, M.V., “Técnicas de Processamento de Sinais Aplicadas a Transmissão de Dados via Rede Elétrica e Monitoramento da Qualidade de Energia”, Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, 2005.
- [57] SILVA, J., et. al., “Técnica OFDM Aplicada a Power Line Communications, Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica, 2003.
- [58] ZIMMEMANN, M. e Dosdert, K., “A Multi-Path Signal Propagation Model for the Power Line Channel in the High Frequency Range, Proceedings of the 3rd. International Symposium on Power Line, p. 45-51, 1999.
- [59] PINTO, E. e Albuquerque, C., “A Técnica de Transmissão OFDM”, Revista Científica Periódica - Telecomunicações, v. 5, n.1, Junho 2002.

ANEXO 01 – CONSULTA PÚBLICA ANATEL Nº 38

CONSULTA PÚBLICA Nº 38, DE 25 DE AGOSTO DE 2008

Proposta de Regulamento sobre Condições de Uso do Sistema de Acesso em Banda Larga utilizando Rede de Energia Elétrica.

O CONSELHO DIRETOR DA AGÊNCIA NACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES, no uso das atribuições que lhe foram conferidas pelo art. 22 da Lei nº 9.472, de 16 de julho de 1997, e art. 35 do Regulamento da Agência Nacional de Telecomunicações, aprovado pelo Decreto nº 2.338, de 7 de outubro de 1997, e considerando o constante dos autos do processo nº 53500.017793/2008, deliberou em sua Reunião nº 491, realizada em 21 de agosto de 2008, submeter a comentários e sugestões do público em geral, nos termos do art. 42, da Lei nº 9.472, de 1997, a Proposta de Regulamento sobre Sistema de Acesso em Banda Larga utilizando Rede de Energia Elétrica.

Na elaboração da proposta levou-se em consideração:

- 1) os termos do artigo 157 da Lei nº 9.472, de 1997, segundo o qual fica estabelecido ser o espectro de radiofrequências um recurso limitado, constituindo-se em bem público, administrado pela Agência;
- 2) a necessidade de se estabelecer regras que permitam a convivência harmônica entre sistemas que compartilham faixas de radiofrequências;
- 3) os estudos realizados no âmbito da Anatel, referentes a radiações indesejadas causadas por Sistemas de Acesso em Banda Larga utilizando Redes de Energia Elétrica (BPL) na faixa de radiofrequências de 1,705 MHz a 50 MHz;
- 4) a necessidade de acompanhar a evolução tecnológica, permitindo que novas tecnologias sejam utilizadas em benefício da sociedade;
- 5) o dever do Poder Público de estimular a expansão do uso de redes e serviços de telecomunicações;
- 6) o interesse do setor elétrico em utilizar a infra-estrutura já instalada para prover serviços de telecomunicações.
- 7) o potencial dos sistemas BPL para promover a inclusão digital e o aumento da inteligência das redes de energia elétrica.

Como resultado da presente Consulta Pública, a Anatel pretende:

I – publicar o Regulamento sobre Sistema de Acesso em Banda Larga utilizando Rede de Energia Elétrica.

II – estabelecer que atualizações quanto ao centro das zonas de proteção e exclusão de estações terrestres definidas no Anexo II e III deste Regulamento, quando solicitadas pelas Forças Armadas e/ou Órgãos de Segurança, serão realizadas por ato da Superintendência competente para tratar da administração do uso do espectro de radiofrequências, e disponibilizadas na página da Anatel na Internet.

O texto completo da proposta em epígrafe estará disponível na Biblioteca da Anatel, no endereço abaixo e na página da Anatel na Internet, a partir das 14h da data da publicação desta Consulta Pública no Diário Oficial da União.

As manifestações fundamentadas e devidamente identificadas devem ser encaminhadas exclusivamente conforme indicado a seguir, preferencialmente, por meio do formulário eletrônico do Sistema Interativo de Acompanhamento de Consulta Pública, disponível na página da Anatel na Internet no endereço <http://www.anatel.gov.br>, relativo a esta Consulta Pública, até às 24h do dia 29 de setembro de 2008, fazendo-se acompanhar de textos alternativos e substitutivos, quando envolverem sugestões de inclusão ou alteração, parcial ou total, de qualquer dispositivo.

Serão também consideradas as manifestações encaminhadas por carta, fax ou correspondência eletrônica, recebidas até às 18h do dia 25 de setembro de 2008, para:

AGÊNCIA NACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES

SUPERINTENDÊNCIA DE RADIOFREQUÊNCIA E FISCALIZAÇÃO

CONSULTA PÚBLICA Nº 38, DE 25 DE AGOSTO DE 2008

"Proposta de Regulamento sobre Sistema de Acesso em Banda Larga utilizando Rede de Energia Elétrica".

Setor de Autarquias Sul - SAUS – Quadra 6, Bloco F, Térreo – Biblioteca

70070-940 – Brasília – DF

Fax: (61) 2312-2002

e-mail: biblioteca@anatel.gov.br

As manifestações recebidas merecerão exame pela Anatel e permanecerão à disposição do público na Biblioteca da Agência.

RONALDO MOTA SARDENBERG

Presidente do Conselho

ANEXO À CONSULTA PÚBLICA No , DE 25 DE AGOSTO DE 2008

REGULAMENTO SOBRE CONDIÇÕES DE USO DO SISTEMA DE ACESSO EM BANDA LARGA UTILIZANDO REDES DE ENERGIA ELÉTRICA.

CAPÍTULO I

DAS DISPOSIÇÕES GERAIS

Art. 1º Este Regulamento tem por objetivo estabelecer as condições de uso do sistema de “acesso em banda larga utilizando redes de energia elétrica” (BPL) relativamente às radiações indesejadas causadas por estes sistemas.

Art. 2º

A comunicação a ser estabelecida pelo sistema BPL, confinada nas redes de energia elétrica, somente poderá ocorrer na faixa de 1,705 MHz a 50 MHz.

Art. 3º

As estações do sistema BPL serão tratadas como equipamentos de radiação restrita e operam em caráter secundário.

Parágrafo único. Quando o funcionamento dessas estações estiver associado à exploração do serviço de telecomunicações de interesse coletivo, será necessária a correspondente autorização do serviço, bem como o licenciamento das estações que se destinem à:

- a) interligação às redes das prestadoras de serviços de telecomunicações; ou
- b) interligação a outras estações da própria rede por meio de equipamentos que não sejam de radiação restrita;

CAPÍTULO II

DAS DEFINIÇÕES

Art. 4º

Para os efeitos deste Regulamento, considera-se:

I – estação costeira: estação terrestre do Serviço Móvel Marítimo.

II – faixas de exclusão: faixas de radiofrequências em que os sistemas BPL não poderão emitir sinais.

III – linha de baixa tensão (BT): Linha de transmissão de energia elétrica de tensão nominal igual ou inferior a 1kV, situada entre os transformadores da rede de distribuição de energia elétrica e as instalações do usuário BPL, podendo ser aérea ou subterrânea.

IV – linha de média tensão (MT): Linha de transmissão de energia elétrica de 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.

V- radiação indesejada: fluxo de energia indesejado liberado sob a forma de ondas de rádio, por uma fonte qualquer.

VI – zona de exclusão: Área geográfica na qual o uso de sistemas BPL é vedado.

VII – zonas de proteção: Área geográfica na qual o uso de sistemas BPL é restrito para determinadas faixas de radiofrequências.

CAPÍTULO III

DOS REQUISITOS GERAIS

Art. 5º

As radiações indesejadas causadas por sistemas BPL, operando na rede de Baixa Tensão, devem estar limitadas aos valores descritos na Tabela I.

Tabela I

Limites de radiações indesejadas causadas por sistemas BPL de BT

Faixa de frequências (MHz)	Intensidade de campo (microvolt por metro)	Distância da Medida (metro)
1,705-30	30	30
30-50	100	3

Art. 6º

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

Tabela II

Limites de radiações indesejadas causadas por sistemas BPL de MT

Faixa de frequências (MHz)	Intensidade de campo (microvolt por metro)	Distância da Medida (metro)
1,705-30	30	30
30-50	90	10

Art. 7º

Os sistemas BPL devem possuir as seguintes características técnicas:

I - incorporar técnicas de mitigação de interferências que possibilitem reduzir remotamente a potência do sinal e remanejar as frequências de operação dos sistemas BPL. Essas técnicas devem incluir filtros ou permitir o completo bloqueio de radiações indesejadas em frequências ou de faixas de frequências, em conformidade com este regulamento.

II – para frequências abaixo de 30 MHz, quando da utilização de filtros para evitar interferência em uma faixa de radiofrequências específica, os filtros devem ser capazes de atenuar as radiações indesejadas dentro desta faixa a um nível de pelo menos 20 dB abaixo dos limites especificados neste Regulamento.

III – para frequências acima de 30 MHz, quando da utilização de filtros para evitar interferência em uma faixa de radiofrequências específica, os filtros devem ser capazes de atenuar as radiações indesejadas dentro desta faixa a um nível de pelo menos 10 dB abaixo dos limites especificados neste Regulamento.

IV – manter as configurações de mitigação de interferência, mesmo quando houver falta de energia na rede ou quando o equipamento for desligado e religado, de forma consecutiva ou esporádica.

V – 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 resolva o problema.

CAPÍTULO IV

DOS REQUISITOS ESPECÍFICOS

Art. 8º

Antes do início da operação do sistema BPL, deverá ser realizada prospecção do espectro radioelétrico com vistas a identificar a existência de usuários em caráter primário na faixa de radiofrequência de operação do BPL, na área geográfica de interesse.

Parágrafo único. Na hipótese prevista no *caput*, a operadora se comprometerá a notificar os usuários e, em caso de notificação de interferências causadas pelo sistema BPL, aplicar técnicas adicionais de mitigação de interferências, conforme o art. 14 deste Regulamento.

Art. 9º

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

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

Tabela III

Faixas de Exclusão

Faixa de frequências (MHz)
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

Art. 10.

São consideradas zonas de proteção as áreas geográficas a seguir caracterizadas:

I – 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.

II – 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.

§ 1º Dentro das zonas de proteção de estações costeiras, na faixa de radiofrequências de 2,1735-2,1905 MHz, fica vedada a operação de quaisquer sistemas BPL.

§ 2º Dentro das zonas de proteção de estações costeiras, nas faixas de radiofrequências listadas na Tabela IV, atribuídas ao Serviço Móvel Marítimo, os limites de radiação indesejada causada pelos sistemas BPL devem estar atenuados a um nível de pelo menos 10 dB abaixo dos limites especificados nos art. 5º e 6º deste Regulamento.

§ 3º 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.

Tabela IV

Faixas de Radiofrequências relativas à zona de proteção de estações costeiras.

Faixa de frequências (MHz)
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

Art. 11.

São consideradas zonas de exclusão de estações terrestres as áreas circunscritas ao círculo de raio de 1 km com centro nas coordenadas geográficas das estações terrestres listadas no Anexo III.

Parágrafo único. Fica vedada a operação de quaisquer sistemas BPL dentro das zonas geográficas descritas no *caput*.

Art 12.

As Forças Armadas e/ou os Órgãos de Segurança, quando no cumprimento de suas missões constitucionais, poderão notificar à Anatel a região geográfica e as faixas de radiofrequências que serão utilizadas.

§ 1º 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.

§ 2º O não cumprimento do estabelecido no *caput* implicará, 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.

CAPÍTULO V

DO CONTROLE DO USO DE RADIOFREQUÊNCIAS

Art. 13.

Adicionalmente às obrigações provenientes da autorização do serviço de telecomunicação pertinente, a prestadora do serviço de telecomunicações, que fizer uso de sistema BPL, deve prestar à Anatel, em até 30 dias antes de início de operação, informações necessárias para a criação e manutenção de uma base de dados pública, disponível a quaisquer interessados, atualizando-as na entrada de operação do serviço e sempre que houver alterações, e especialmente:

I – a identificação da prestadora do serviço de telecomunicações;

II – o fabricante do equipamento BPL e os dados da estação certificada em utilização;

III – a latitude e longitude de todas as estações, exceto as estações terminais do usuário;

IV – o endereço completo, incluindo o CEP, da localidade atendida;

V – a faixa de radiofrequências de operação do sistema BPL;

VI – a data prevista para o início da operação;

VII – a data de entrada em operação; e

VIII – o contato do operador do sistema em cada localidade, incluindo telefone e correio eletrônico.

Art. 14.

Em caso de interferências causadas por pelo sistema BPL, o operador do sistema deverá implementar imediatamente os ajustes necessários e suficientes para mitigar a interferência de acordo com a regulamentação aplicável.

CAPÍTULO VI**DAS DISPOSIÇÕES TRANSITÓRIAS E FINAIS****Art. 15.**

Os equipamentos que compõem o sistema BPL devem:

I- possuir certificação expedida ou aceita pela Anatel, de acordo com a regulamentação vigente.

II- atender às normas cabíveis, referentes ao sistema elétrico, expedidas pela ANEEL.

Art. 16.

Os sistemas existentes até a data de publicação deste Regulamento, em desacordo com o aqui estabelecido, podem continuar em operação até 31 de dezembro de 2009, após o que deverão cessar sua operação.

Art 17.

A Agência definirá procedimentos específicos que permitam aos interessados prover o cadastramento previsto no art. 13 deste Regulamento.

Anexo I**2 Centro das Zonas de Proteção de Estações Costeiras**

CIDADE	UF	Coordenadas Geográficas	
		LATITUDE	LONGITUDE
Arraial do Cabo	RJ	22S5655	42W0140
Belém	PA	01S2341	48W2927
Belém	PA	01S2752	48W3016
Belém	PA	01S2346	48W2644
Brasília	DF	15S4707	47W5130
Brasília	DF	15S5947	47W5356
Cabo Frio	RJ	22S4258	42W0017
Duque de Caxias	RJ	22S4813	43W1727
Ladário	MS	19S0014	57W5357
Manaus	AM	03S0818	60W0130
Manaus	AM	03S0827	60W0122
Natal	RN	05S4730	35W1313
Natal	RN	05S4732	35W1152
Niterói	RJ	22S5305	43W0758
Parnamirim	RN	05S5155	35W1618
Rio de Janeiro	RJ	22S4645	43W0916
Rio de Janeiro	RJ	22S5226	43W0806
Rio de Janeiro	RJ	22S5357	43W1037
Rio de Janeiro	RJ	22S4937	43W1106
Rio de Janeiro	RJ	22S5451	43W1701
Rio Grande	RS	32S0150	52W0454
Rio Grande	RS	32S0824	52W0616
Rio Grande	RS	32S0202	52W0420
Rio Grande	RS	32S0823	52W0625
Salvador	BA	12S4830	38W2947
Salvador	BA	12S5827	38W3055
São Gonçalo	RJ	22S5045	43W0608
São Pedro da Aldeia	RJ	22S4927	42W0532

Anexo II**3 Centro das Zonas de Proteção de Estações Terrestres**

CIDADE	UF	Coordenadas Geográficas	
		LATITUDE	LONGITUDE
Rio de Janeiro	RJ	225403S	431128W
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

Anexo III**4 Centro das Zonas de Exclusão de Estações Terrestres**

CIDADE	UF	Coordenadas Geográficas	
		LATITUDE	LONGITUDE
Brasília	DF	154243,10S	474980,92W
Brasília	DF	154253,63S	474930,46W
Brasília	DF	154236,23S	474856,93W
Brasília	DF	154243,58S	474846,61W

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)