

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

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 inteligentes) 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 Freqüência 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> (<i>Modo de Transferência Síncrona</i>)
TCM	- <i>Trellis Coded Modulation</i> (Modulação Codificada em T)
TDMA	- <i>Time Division Multiple Access</i> (<i>Acesso Múltiplo por Divisão de Tempo</i>)
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> (<i>Rede de Longa Distância</i>)
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.

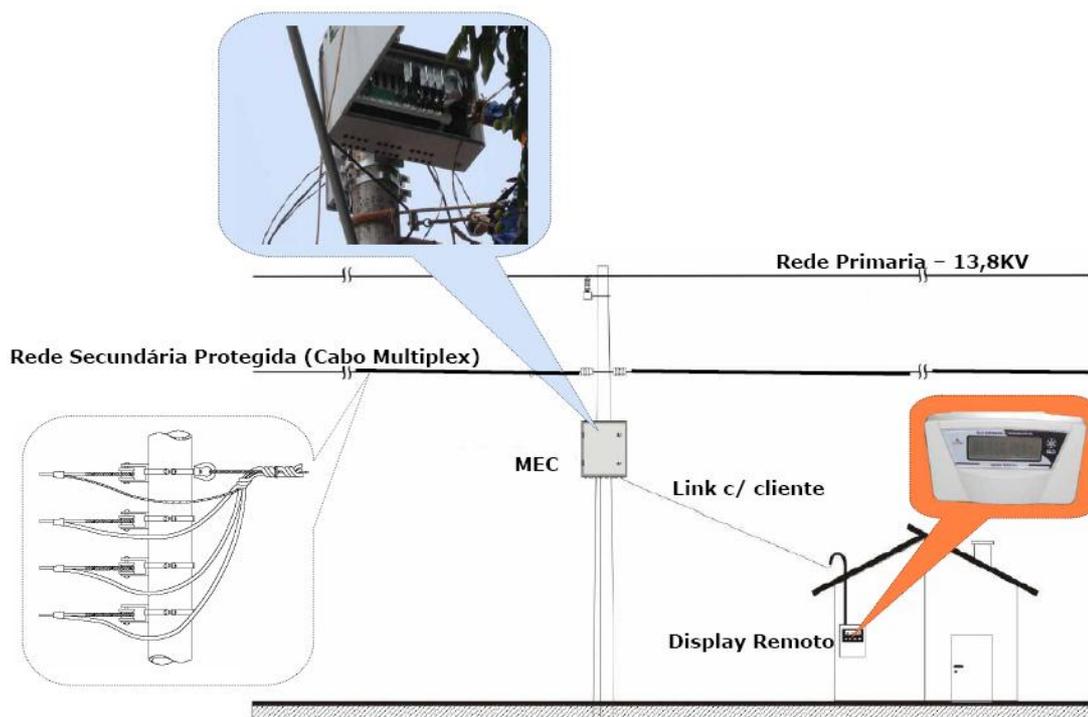


Figura 2.2 – Medição Externa Centralizada [3]

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*.

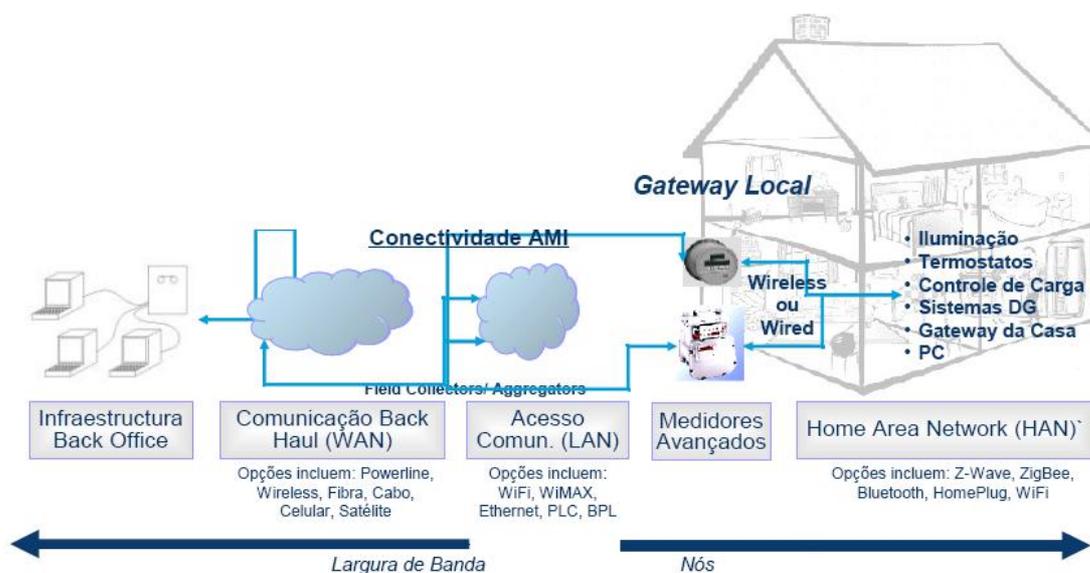


Figura 2.3 – Smart Grid [8]

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 134dB μ V (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 nas 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.

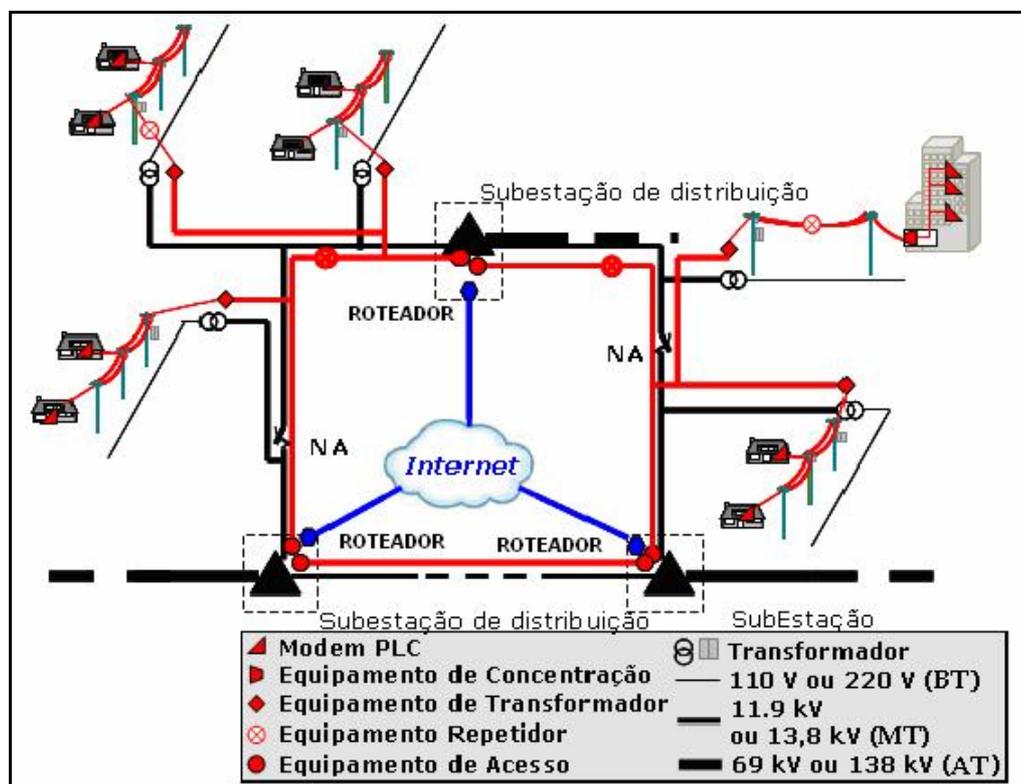


Figura 3.1 - Equipamentos de uma Rede PLC [15]

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.

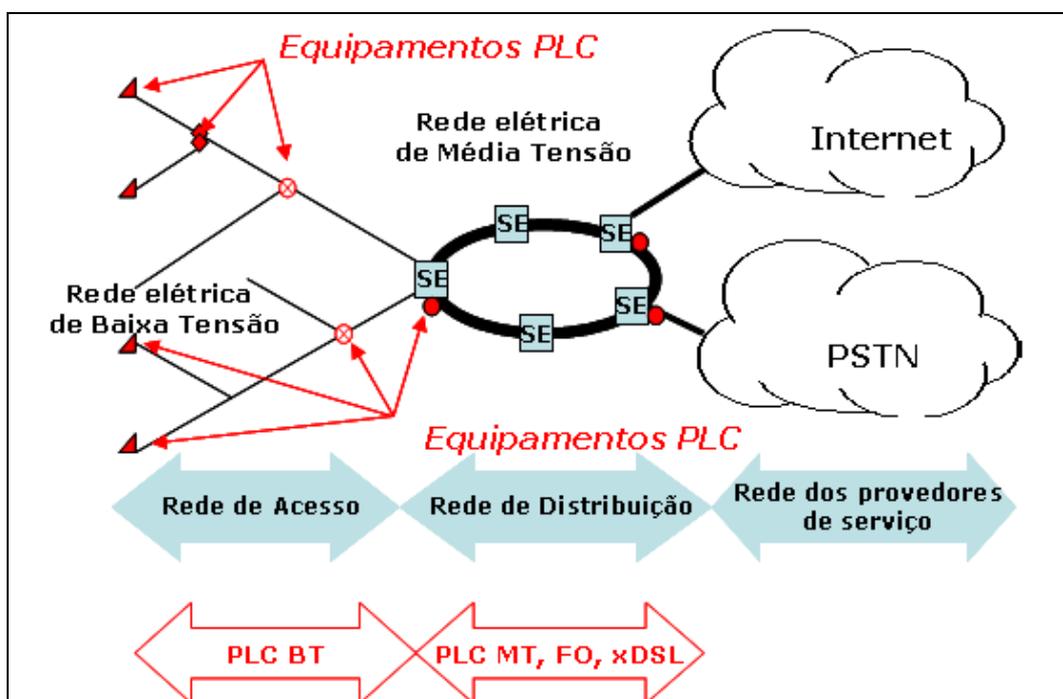


Figura 3.6 - Exemplo de uma Topologia de Rede PLC [15]

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].

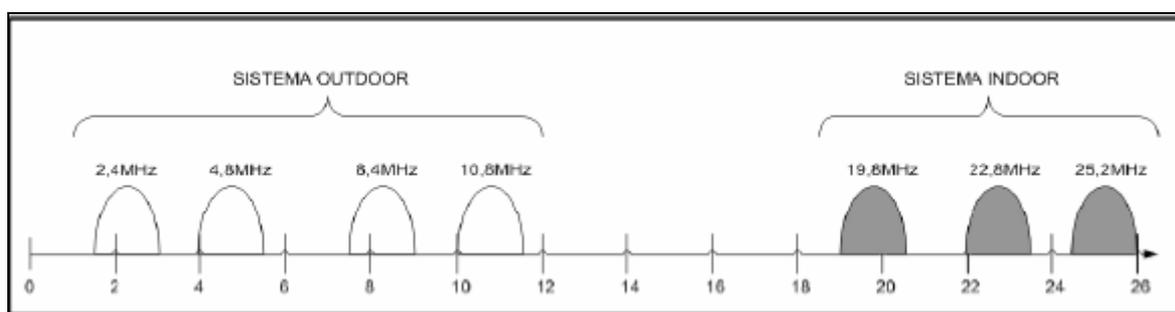


Figura 3.8 – Faixas de Frequência na Rede PLC [24]

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].

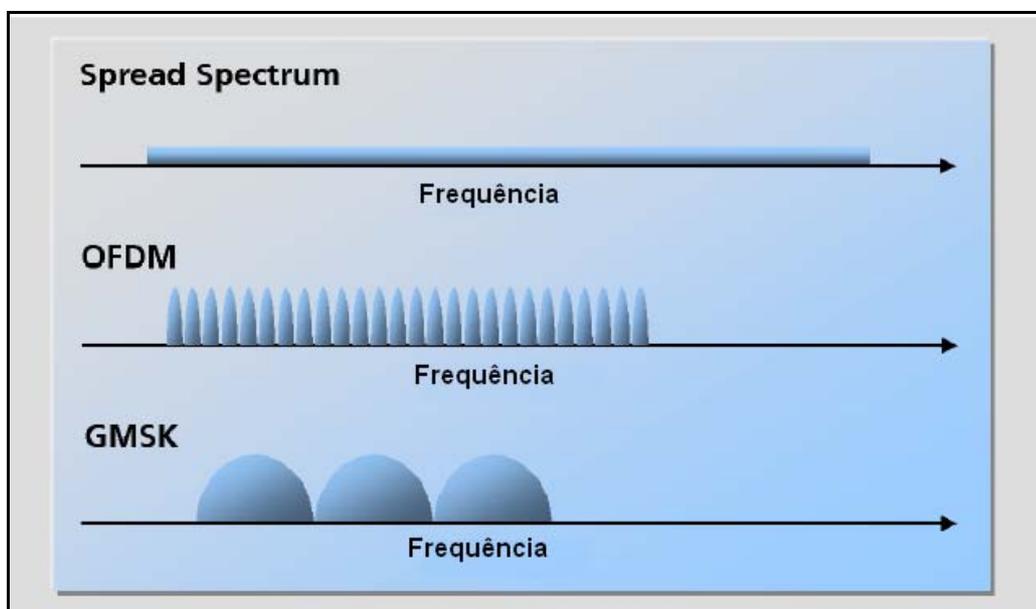


Figura 3.9 – Técnicas de Modulação Utilizadas no PLC [19]

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 Dostert [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].

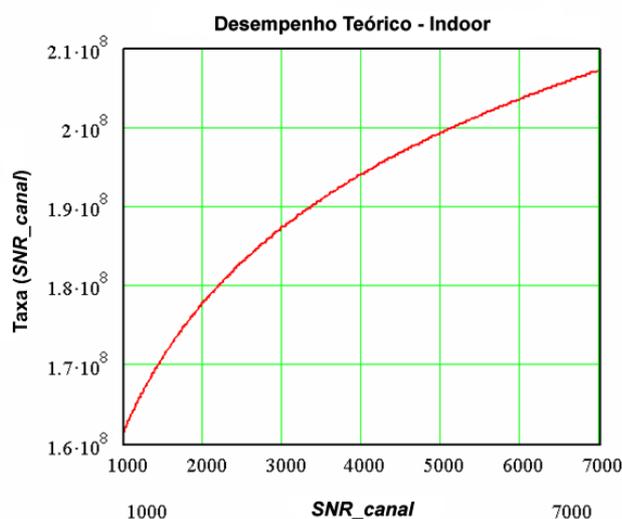


Figura 4.1 - Desempenho Teórico *Indoor*: Taxa de bits versus Relação Sinal-Ruído do Canal

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:

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

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:

$$Taxa_{out}(SNR_{canal_out}) = B_{out} \cdot \log_2(SNR_{total_out}(SNR_{canal_out})) \quad (\text{Eq. 9})$$

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*.

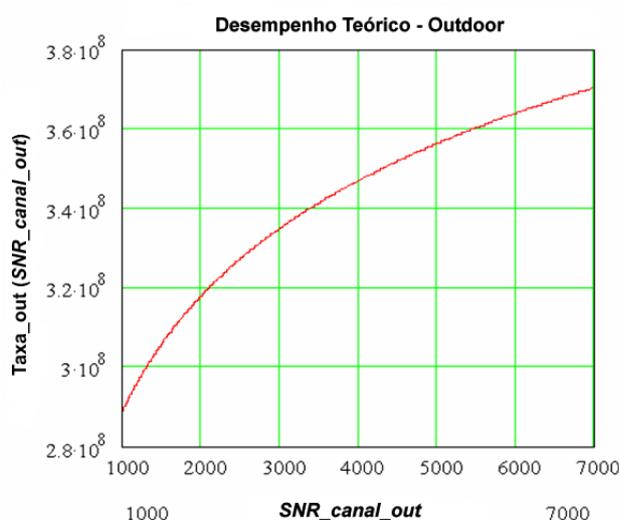


Figura 4.2 - Desempenho Teórico *Outdoor*: Taxa de bits versus Relação Sinal-Ruído do Canal