

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

MODELAGEM DE TRÁFEGO EM REDES PLC (*POWERLINE COMMUNICATIONS*) UTILIZANDO CADEIAS DE MARKOV

CHRISTIANE BORGES SANTOS

Orientador: Prof. Dr. Flávio Henrique Teles Vieira

GOIÂNIA, 2009



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

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

1. Identificação do material bibliográfico: **Dissertação** **Tese**

2. Identificação da Tese ou Dissertação

Autor(a):	Christiane Borges Santos		
CPF:		E-mail:	cbs@posgrad.ufg.br
Seu e-mail pode ser disponibilizado na página? <input checked="" type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Não			
Vínculo Empregatício do autor			
Agência de fomento:		Sigla:	
País:		UF:	
		CNPJ:	
Título:	Modelagem de Tráfego em Redes PLC (Powerline Communications) Utilizando Cadeias de Markov		
Palavras-chave:	PLC, VoIP, Cadeias de Markov, Homeplug		
Título em outra língua:	Traffic Modeling in PLC Network (Powerline Communications) Using Markov Chains		
Palavras-chave em outra língua:	PLC, VoIP, Markov Chains, Homeplug		
Área de concentração:	Engenharia da Computação		
Data defesa: (dd/mm/aa)	24/11/2009		
Programa de Pós-Graduação:	Mestrado em Engenharia Elétrica e de Computação		
Orientador(a):	Prof. Dr. Flávio Henrique Teles Vieira		
CPF:		E-mail:	flavio@eee.ufg.br

3. Informações de acesso ao documento:

Liberação para disponibilização?¹ total parcial

Em caso de disponibilização parcial, assinale as permissões:
 Capítulos. Especifique:

Outras restrições: _____Gostaria que não fosse divulgado os anexos.

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

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

Assinatura do(a) autor(a)

Data: / /2009

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

CHRISTIANE BORGES SANTOS

MODELAGEM DE TRÁFEGO EM REDES PLC (*POWERLINE COMMUNICATIONS*) UTILIZANDO CADEIAS DE MARKOV

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. Flávio Henrique Teles Vieira

GOIÂNIA, 2009

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

S237m Santos, Christiane Borges.
Modelagem de tráfego em redes PLC (Powerline Communications) utilizando cadeias de Markov [manuscrito] / Christiane Borges Santos. – 2009.
xv, 139 f. : il., figs, tabs.

Orientador: Prof. Dr. Flávio Henrique Teles Vieira.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Goiás,
Escola de Engenharia Elétrica e de Computação, 2009.
Bibliografia.

Inclui lista de figuras, tabelas e publicações relacionadas a este trabalho.

1. Redes PLC (Powerline Communication) 2. Homeplug 3. VoIP (Voice over Internet Protocol) 4. Modelagem de Tráfego 5. MMFM (Markov Modulated Fluid Models). I. Título.

CDU: 004.7

MODELAGEM DE TRÁFEGO EM REDES PLC (POWERLINE COMMUNICATIONS) UTILIZANDO CADEIAS DE MARKOV

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.

Prof. Dr. Leonardo da Cunha Brito

(Coordenador do Curso)

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Flávio Henrique Teles Vieira – EEEEC (UFG)

(Orientador)

Prof. Dr. João Batista José Pereira – TELECOM (IFG)

Prof. Dr. Rodrigo Pinto Lemos – EEEEC (UFG)

Prof. Dr. Sérgio Granato de Araújo – EEEEC (UFG)

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR:

Christiane Borges Santos

TÍTULO DO MESTRADO:

Modelagem de Tráfego em Redes PLC (*Powerline Communications*) Utilizando Cadeias de Markov

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 do mesmo.

Christiane Borges Santos

cbs@posgrad.ufg.br

“Electricity is the world - power, the most powerful and terrible of nature’s hidden forces. Yet, when man has learned how to harness its fiery energies, electricity becomes the most docile and useful of his servants... It propels our trains, lights our houses and streets, warms us, cooks for us, and performs a thousand and one other tasks at the turn of a button or at the thrust of a switch”.

**Joseph H. Adams, Harper’s Electricity Book
for Boys, Harper & Brothers Publishers, 1907**

Dedico este trabalho à minha avó Waldir, meu avô Everton (*in memoriam*) e a minha mãe Cleonice, que sempre me apoiaram, me ensinaram a ter coragem, e não mediram esforços para me propiciar a melhor formação possível.

Christiane Borges Santos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus pelos momentos de inspiração e sabedoria concedidas ao longo de toda a minha vida. Agradecimentos especiais ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás (IFG), que me proporcionou um crescimento profissional e pessoal, de qualidade e caráter, sem mencionar nas valiosas amizades adquiridas.

Agradeço aos meus familiares e amigos que sempre estiveram presentes para comemorar conquistas e apoiar nos momentos difíceis, e os colegas do Mestrado, que sempre estiveram dispostos a ajudar.

Agradeço aos diretores do Portal Teleco e da FITec, que contribuíram para meu conhecimento sobre a tecnologia e sempre estiveram dispostos a me auxiliar no decorrer do trabalho. Agradeço a empresa *Eletrosystem* pela disponibilidade dos equipamentos para os testes.

Agradeço também ao professor Fábio da Silva Marques por contribuir sempre para meu crescimento pessoal, aos professores João Batista José Pereira e Sérgio Granato de Araújo, e em especial ao meu orientador Prof. Flávio Henrique Teles Vieira, pela disponibilidade e confiança, e cuja orientação foi fundamental para a concretização desta conquista.

RESUMO

Este trabalho é motivado por um crescente interesse na aplicabilidade das linhas de energia como meio alternativo de propagação de sinais de comunicação, e apresenta uma análise do tráfego VoIP (Voice over IP) e da transferência de dados utilizando a rede BPL/PLC (Broadband PowerLine/PowerLine Communication). São descritas as principais características da tecnologia BPL/PLC e do padrão Homeplug. Como o meio físico de transmissão utilizado pela tecnologia BPL/PLC para transferência de dados é hostil, visto que não foi desenvolvido para esta finalidade, a modelagem de tráfego pode ser útil para o planejamento e dimensionamento dessas redes. É proposto um modelo baseado no MMFM (Markov Modulated Fluid Models) para caracterizar o tráfego de dados e de VoIP em redes PLC. Simulações e comparações foram realizadas com outros modelos como Poisson e o MMPP (Markov Modulated Poisson Process). Os resultados foram obtidos através de experiências realizadas em redes PLC de baixa tensão (ambiente indoor), utilizando uma largura de faixa entre 4,3MHz a 20,9MHz.

PALAVRAS-CHAVE: PLC, VoIP, Cadeias de Markov, Homeplug.

ABSTRACT

This work is motivated by a growing interest in the power lines' applicability as an alternative means of propagation for communication signals, and presents an analysis of VoIP's (Voice over IP) traffic and data transfer using BPL / PLC (PowerLine Broadband / PowerLine Communication) network. We describe the main characteristics of the BPL / PLC and HomePlug standard. As the physical transmission technology used by the BPL / PLC for data transfer is hostile, and it was not developed for this purpose, traffic modeling can be useful for planning and design these networks. A model is proposed based on MMFM (Markov Modulated Fluid Models) to characterize the traffic data and VoIP into PLC networks. Simulations and comparisons were made with other models such as Poisson and MMPP (Markov Modulated Poisson Process). The results were obtained by experiments in low-voltage PLC networks (indoor environment), using a 4,3MHz to 20,9MHz bandwidth

KEYWORDS: PLC, VoIP, Markov Chains, Homeplug

ÍNDICE

RESUMO	IX
ABSTRACT	X
LISTA DE FIGURAS	XIII
LISTA DE TABELAS	XV
LISTA DE ABREVIATURAS	XVI
LISTA DE PUBLICAÇÕES RELACIONADAS A ESTE TRABALHO	XX
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 2 - CARACTERÍSTICAS DA TECNOLOGIA PLC/BPL	5
2.1 REDES DOMICILIARES ATRAVÉS DA FIAÇÃO ELÉTRICA	9
2.1.1 <i>Ambiente Power Line Indoor Communication</i>	12
2.1.2 <i>Ambiente Power Line Outdoor Communication</i>	12
2.2 PADRÃO HOMEPLUG	13
2.3 SEGURANÇA E GERÊNCIA EM SISTEMAS PLC	16
CAPÍTULO 3 - CAMADA FÍSICA DE REDES PLC	18
3.1 FAIXAS DE FREQUÊNCIA	27
3.2 RELAÇÃO SINAL-RUÍDO (SNR)	29
3.3 COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA (EMC)	32
3.4 MODULAÇÃO DO SINAL NO CANAL PLC	35
3.4.1 <i>Gaussian Minimum Shift Keying (GMSK)</i>	35
3.4.2 <i>Espalhamento Espectral (Spread Spectrum)</i>	35
3.4.3 <i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)</i>	36
3.5 UTILIZAÇÃO DO OFDM E FORMATO DOS QUADROS EM REDES PLC (PADRÃO HOMEPLUG)	38
CAPÍTULO 4 - ESPECIFICAÇÃO DE CLASSES E REQUISITOS DE SERVIÇOS EM TELECOMUNICAÇÕES	42
4.1 QUALIDADE DE SERVIÇO (QoS)	43
4.1.1 Classes de serviços	47
4.1.2 Protocolo de Acesso ao meio CSMA/CA	49
4.2 VOIP	50

4.2.1	<i>Avaliação Subjetiva da Qualidade de Voz</i>	56
4.2.2	<i>Mean Opinion Score (MOS)</i>	59
CAPÍTULO 5 - MODELAGEM DE TRÁFEGO DE REDES BASEADA EM CADEIAS DE MARKOV		61
5.1	CADEIAS DE MARKOV	61
5.2	MODELO ON/OFF	63
5.3	POISSON	65
5.3	MMPP (<i>Markov Modulated Poisson Process</i>)	66
5.4	MMFM (<i>Markov Modulated Fluid Models</i>)	67
5.4.1	MMFM com Ajuste Exponencial para a Função de Autocorrelação	68
CAPÍTULO 6 - ANÁLISE DA TRANSMISSÃO DE DADOS E DE VOIP EM REDES PLC		71
6.1	CENÁRIO DE TESTES – TRANSMISSÃO DE DADOS	74
6.2	CENÁRIO DE TESTES – TRANSMISSÃO VOIP	77
6.3	MODELAGEM DE TRÁFEGO EM REDES PLC	81
6.3.1	Modelagem da Transmissão de Dados	82
6.3.2	Modelagem do Tráfego VoIP	95
CAPÍTULO 7 - CONCLUSÕES		109
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		111

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 – REDE DE ACESSO PARA SERVIÇOS DE TELECOMUNICAÇÕES.....	1
FIGURA 1.2 – APLICAÇÕES DA TECNOLOGIA PLC [9].....	3
FIGURA 2.1 – REDE PLC/BLP E USUÁRIO FINAL [22].....	8
FIGURA 2.2 – DISPOSITIVOS DA REDE PLC	10
FIGURA 2.3 – TIPOS DE ACOPLADORES PLC: CAPACITIVOS E INDUTIVOS [10].....	10
FIGURA 2.4 – TOPOLOGIA TÍPICA DE UMA REDE PLC [10].....	12
FIGURA 2.5 – ESQUEMA DE UMA CIDADE UTILIZANDO PLC/BLP [23]	13
FIGURA 2.6 – ADAPTADOR <i>HOMEPLUG</i> [25].....	14
FIGURA 2.7 – INTERFACES PADRÃO <i>HOMEPLUG</i> [18].....	15
FIGURA 3.1 – SISTEMA TÍPICO DE FORNECIMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA E DADOS [28].....	18
FIGURA 3.2 – REDE PLC BAIXA TENSÃO E OBSTÁCULOS DO MEIO DE TRANSMISSÃO [29].....	19
FIGURA 3.3 – CIRCUITOS EM TENSÃO PRIMÁRIA E SECUNDÁRIA DE DISTRIBUIÇÃO [31].....	20
FIGURA 3.4 – PRINCIPAIS OBSTÁCULOS PARA A TRANSMISSÃO DE DADOS VIA PLC [32].....	22
FIGURA 3.5 – EXEMPLO DE REDES AÉREAS ENCONTRADAS NO BRASIL [9]	23
FIGURA 3.6 – TOPOLOGIA DE UMA REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA [5].....	26
FIGURA 3.7 – FAIXAS DE FREQUÊNCIA UTILIZADAS NA REDE PLC [2].....	27
FIGURA 3.8 – PARÂMETROS TEMPORAIS DO RUÍDO IMPULSIVO [36].....	31
FIGURA 3.9 – ESPALHAMENTO ESPECTRAL.....	36
FIGURA 3.10 – DISTRIBUIÇÃO DE 3 SUBPORTADORAS UTILIZANDO A TÉCNICA OFDM [28].....	37
FIGURA 3.11 – MODULAÇÃO OFDM	37
FIGURA 3.12 – FORMATO DO QUADRO FÍSICO (PPDU) NO PADRÃO <i>HOMEPLUG</i> [18].....	40
FIGURA 3.13 – CAMPO DE CONTROLE DE QUADRO NO PADRÃO <i>HOMEPLUG</i> [18].....	41
FIGURA 3.14 – QUADRO DA CAMADA MAC [18].....	41
FIGURA 4.1 – TRANSMISSÃO DE UM QUADRO COM SUA RESPECTIVA RESPOSTA [11].....	50
FIGURA 4.2 – DISTRIBUIÇÃO EXPONENCIAL [3].....	51
FIGURA 4.3 – COMPORTAMENTO TÍPICO DE UMA FONTE DE VOZ [49].....	53
FIGURA 4.4 – PROTOCOLOS E PADRÕES UTILIZADOS EM COMUNICAÇÕES VOIP [48].....	54
FIGURA 5.1 – NÍVEIS DE CONVERSACÃO E DE GERAÇÃO DE PACOTES POR UM CODIFICADOR DE VOZ.....	63
FIGURA 5.2 – MODELO DE FONTE DE VOZ ON-OFF (COM 02 ESTADOS) [59].....	64
FIGURA 5.3 – MODELO MMPP MOSTRANDO SUPERPOSIÇÃO DE <i>N</i> FONTES DE VOZ [57].....	67
FIGURA 5.4 – PROCESSO DE NASCIMENTO E MORTE.....	68
FIGURA 6.1 – CIRCUITO DO FILTRO PASSA-ALTA.....	72
FIGURA 6.2 – TOPOLOGIA UTILIZADA NOS TESTES DE TRANSMISSÃO DE DADOS.....	74
FIGURA 6.3 – REDE ELÉTRICA COM SINAL PLC TRANSMITINDO (OSCIOSCÓPIO).....	75
FIGURA 6.4 – REDE ELÉTRICA COM SINAL PLC TRANSMITINDO (ANALISADOR DE ESPECTRO).....	75
FIGURA 6.5 – TAXA DE BITS PARA UM SINAL PLC	75
FIGURA 6.6 – SOFTWARE X-LITE.....	77
FIGURA 6.7 – ARQUIVO <i>SIP.CONF</i>	78
FIGURA 6.8 – ARQUIVO <i>EXTENSIONS.CONF</i>	78
FIGURA 6.9 – TOPOLOGIA DOS TESTES PLC – VOIP.....	79
FIGURA 6.10 – SINAL DE VOZ SEM INTERFERÊNCIAS NO ANALISADOR DE ESPECTROS.....	79
FIGURA 6.11 – TAXA DE BITS PARA UMA COMUNICAÇÃO VOIP.....	80
FIGURA 6.12 – EXPONENCIAL <i>CURVE FITTING</i> (TRANSFERÊNCIA DE DADOS)	82
FIGURA 6.13 – <i>TRACE</i> DE TRANSFERÊNCIA DE DADOS (REAL).....	82
FIGURA 6.14 – <i>TRACE</i> DE TRANSFERÊNCIA DE DADOS SINTÉTICO (MMFM).....	83
FIGURA 6.15 – <i>TRACE</i> DE TRANSFERÊNCIA DE DADOS SINTÉTICO (MMPP).....	83
FIGURA 6.16 – <i>TRACE</i> DE TRANSFERÊNCIA DE DADOS SINTÉTICO (POISSON).....	83
FIGURA 6.17 – HISTOGRAMA (DADOS REAIS).....	84
FIGURA 6.18 – HISTOGRAMA (MMFM)	84
FIGURA 6.19 – HISTOGRAMA (MMPP).....	84
FIGURA 6.20 – HISTOGRAMA (POISSON)	84
FIGURA 6.21 – FUNÇÃO DE AUTOCORRELAÇÃO	86
FIGURA 6.22 – DISTRIBUIÇÃO DE PROBABILIDADE (PDF).....	87
FIGURA 6.23 – OCUPAÇÃO MÉDIA DO BUFFER PARA TRANSMISSÃO DE DADOS	87

FIGURA 6.24 - PROBABILIDADE DE PERDA DE BYTES VERSUS TAMANHO DO BUFFER	88
FIGURA 6.25 – <i>TRACE</i> DE TRANSFERÊNCIA DE DADOS SINTÉTICO (MMFM – 2 ESTADOS)	89
FIGURA 6.26 – HISTOGRAMA (MMFM – 2 ESTADOS)	89
FIGURA 6.27 – DISTRIBUIÇÃO DE PROBABILIDADE (PDF) PARA MODELO MMFM COM 2 ESTADOS	90
FIGURA 6.28 – <i>TRACE</i> DE TRANSFERÊNCIA DE DADOS SINTÉTICO (MMFM – 10 ESTADOS)	91
FIGURA 6.29 – HISTOGRAMA (MMFM – 10 ESTADOS)	91
FIGURA 6.30 – DISTRIBUIÇÃO DE PROBABILIDADE (PDF) PARA MODELO MMFM COM 10 ESTADOS	92
FIGURA 6.31 – <i>TRACE</i> DE TRANSFERÊNCIA DE DADOS SINTÉTICO (MMFM – 50 ESTADOS)	93
FIGURA 6.32 – HISTOGRAMA (MMFM – 50 ESTADOS)	93
FIGURA 6.33 – DISTRIBUIÇÃO DE PROBABILIDADE (PDF) PARA MODELO MMFM COM 50 ESTADOS	94
FIGURA 6.34 – EXPONENCIAL <i>CURVE FITTING</i> (VOIP)	95
FIGURA 6.35 – <i>TRACE</i> DE VOIP (DADOS REAIS)	96
FIGURA 6.36 – <i>TRACE</i> DE VOIP SINTÉTICO (MMFM)	96
FIGURA 6.37 – <i>TRACE</i> DE VOIP SINTÉTICO (MMPP)	96
FIGURA 6.38 – <i>TRACE</i> DE VOIP SINTÉTICO (POISSON)	96
FIGURA 6.39 – HISTOGRAMA VOIP (REAL)	97
FIGURA 6.40 – HISTOGRAMA (MMFM)	97
FIGURA 6.41 – HISTOGRAMA (MMPP)	97
FIGURA 6.42 – HISTOGRAMA (POISSON)	98
FIGURA 6.43 – FUNÇÃO DE AUTOCORRELAÇÃO	99
FIGURA 6.44 – DISTRIBUIÇÃO DE PROBABILIDADE (PDF)	100
FIGURA 6.45 – OCUPAÇÃO MÉDIA DO <i>BUFFER</i> PARA TRANSMISSÃO VOIP	100
FIGURA 6.46 – PROBABILIDADE DE PERDA DE BYTES VERSUS TAMANHO DO BUFFER	101
FIGURA 6.47 - HISTOGRAMA DO INTERVALO ENTRE PACOTES VOIP	101
FIGURA 6.48 – <i>TRACE</i> DE VOIP SINTÉTICO (MMFM – 2 ESTADOS)	102
FIGURA 6.49 – HISTOGRAMA (MMFM – 2 ESTADOS)	102
FIGURA 6.50 – DISTRIBUIÇÃO DE PROBABILIDADE (PDF) PARA MODELO MMFM COM 2 ESTADOS	103
FIGURA 6.51 – <i>TRACE</i> DE VOIP SINTÉTICO (MMFM – 3 ESTADOS)	104
FIGURA 6.52 – HISTOGRAMA (MMFM – 3 ESTADOS)	104
FIGURA 6.53 – DISTRIBUIÇÃO DE PROBABILIDADE (PDF) PARA MODELO MMFM COM 3 ESTADOS	105
FIGURA 6.54 – <i>TRACE</i> DE VOIP SINTÉTICO (MMFM – 10 ESTADOS)	106
FIGURA 6.55 – HISTOGRAMA (MMFM – 10 ESTADOS)	106
FIGURA 6.56 – DISTRIBUIÇÃO DE PROBABILIDADE (PDF) PARA MODELO MMFM COM 10 ESTADOS	107

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 – TAXA DE TRANSMISSÃO DO PADRÃO <i>HOMEPLUG</i> 1.0 [24]	15
TABELA 3.1 – VALORES DE ATENUAÇÃO DEPENDENTE DA FREQUÊNCIA	18
TABELA 3.2 – VALORES APROXIMADOS DE ATENUAÇÃO	19
TABELA 3.3 – CARACTERÍSTICAS TÍPICAS DOS SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL	20
TABELA 3.4 – APLICAÇÕES E RESPECTIVAS FAIXAS DE FREQUÊNCIA	27
TABELA 3.5 – FAIXAS DE FREQUÊNCIA NÃO AUTORIZADAS PARA USO POR SISTEMAS BPL	28
TABELA 3.6 – FAIXAS DE FREQUÊNCIA AUTORIZADAS PARA USO DE SISTEMAS BPL	28
TABELA 3.7 – FAIXA DE FREQUÊNCIAS EXCLUÍDAS PARA A COMUNICAÇÃO BPL EM RMT	29
TABELA 4.1 – REQUERIMENTOS DAS APLICAÇÕES TRADICIONAIS [43]	46
TABELA 4.2 – REQUISITOS DE SERVIÇOS PARA <i>FIBER-TO-HOME</i> [28]	48
TABELA 4.3 – PRINCIPAIS CODECS DE VOZ	53
TABELA 4.4 – COMPARAÇÃO ENTRE H.323 E SIP	55
TABELA 4.5 – PARÂMETROS DE REFERÊNCIA E TOLERÂNCIA AO ATRASO	56
TABELA 4.6 – ESCALA DE QUALIDADE DE AUDIÇÃO	57
TABELA 4.7 – ESCALA DE ESFORÇO DE AUDIÇÃO	58
TABELA 4.8 – ESCALA DE PREFERÊNCIA DE SONORIDADE	58
TABELA 4.9 – ESCALA DE TESTE DE DEGRADAÇÃO	58
TABELA 4.10 – ESCALA DE TESTE DE COMPARAÇÃO	59
TABELA 4.11 – ESCALA DE VALORES DO MOS [45]	59
TABELA 4.12 – VALORES MÉDIOS MOS DE CADA VOCODERS [45]	60
TABELA 6.1 – RESULTADOS OBTIDOS COM A TRANSMISSÃO DE DADOS ATRAVÉS DA REDE PLC	76
TABELA 6.2 – ANÁLISE ESTATÍSTICA DAS TAXAS DE TRANSMISSÃO (SINAL PLC COM INTERFERÊNCIAS) [2][66]	76
TABELA 6.3 – <i>JITTER</i> NA COMUNICAÇÃO VOIP	80
TABELA 6.4 – PERDA DE PACOTES NA COMUNICAÇÃO VOIP	80
TABELA 6.5 – COMPARAÇÃO DE PARÂMETROS ESTATÍSTICOS PARA TRANSFERÊNCIA DE DADOS	85
TABELA 6.6 – COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO PARA TRANSFERÊNCIA DE DADOS	86
TABELA 6.7 – COMPARAÇÃO DE PARÂMETROS ESTATÍSTICOS PARA TRANSFERÊNCIA DE DADOS	88
TABELA 6.8 – COMPARAÇÃO DE PARÂMETROS ESTATÍSTICOS (TRANSFERÊNCIA DE DADOS) PARA MODELO MMFM COM 2 ESTADOS	90
TABELA 6.9 – COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO (TRANSFERÊNCIA DE DADOS) PARA MODELO MMFM COM 2 ESTADOS	90
TABELA 6.10 – COMPARAÇÃO DE PARÂMETROS ESTATÍSTICOS (TRANSFERÊNCIA DE DADOS) PARA MODELO MMFM COM 10 ESTADOS	92
TABELA 6.11 – COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO (TRANSFERÊNCIA DE DADOS) PARA MODELO MMFM COM 10 ESTADOS	92
TABELA 6.12 – COMPARAÇÃO DE PARÂMETROS ESTATÍSTICOS (TRANSFERÊNCIA DE DADOS) PARA MODELO MMFM COM 50 ESTADOS	94
TABELA 6.13 – COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO (TRANSFERÊNCIA DE DADOS) PARA MODELO MMFM COM 10 ESTADOS	94
TABELA 6.14 – COMPARAÇÃO DE PARÂMETROS ESTATÍSTICOS (VOIP)	98
TABELA 6.15 – COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO (VOIP)	99
TABELA 6.16 – COMPARAÇÃO DE PARÂMETROS ESTATÍSTICOS (VOIP) PARA MODELO MMFM COM 2 ESTADOS	102
TABELA 6.17 – COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO (VOIP) PARA MODELO MMFM COM 2 ESTADOS	103
TABELA 6.18 – COMPARAÇÃO DE PARÂMETROS ESTATÍSTICOS (VOIP) PARA MODELO MMFM COM 3 ESTADOS	105
TABELA 6.19 – COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO (VOIP) PARA MODELO MMFM COM 3 ESTADOS	105
TABELA 6.20 – COMPARAÇÃO DE PARÂMETROS ESTATÍSTICOS (VOIP) PARA MODELO MMFM COM 10 ESTADOS	107
TABELA 6.21 – COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO (VOIP) PARA MODELO MMFM COM 10 ESTADOS	107

LISTA DE ABREVIATURAS

ABRICEM	-	<i>Associação Brasileira de Compatibilidade Eletromagnética</i>
ACR	-	<i>Absolute Category Rating (Taxa de Categoria Absoluta)</i>
AES	-	<i>Advanced Encryption Standard (Padrão Avançado de Encriptação)</i>
AGC	-	<i>Automatic Gain Control (Controle Automático de Ganho)</i>
AM	-	<i>Amplitude Modulation (Modulação por Amplitude)</i>
ANATEL	-	<i>Agencia 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>
ARQ	-	<i>Automatic Repeat reQuest (Repetição Automática de Pedidos)</i>
AT	-	<i>Alta Tensão</i>
AWGN	-	<i>Additive White Gaussian Noise (Ruído Gaussiano Branco Aditivo)</i>
BC	-	<i>Backoff Counter (Contador Backoff)</i>
BER	-	<i>Bit Error Rate (Taxa de Erro de Bit)</i>
BLP	-	<i>Broadband Powerline Communication (Banda Larga sobre Linha Elétrica)</i>
BPC	-	<i>Bits per Carrier (Bits por Portadora)</i>
BPS	-	<i>Bits per Second (Bits por Segundo)</i>
BT	-	<i>Baixa tensão</i>
CA	-	<i>Corrente Alternada</i>
CAP	-	<i>Channel Access Priorities (Prioridade de Acesso do Canal)</i>
CB	-	<i>Citizen Band (Faixa do Cidadão)</i>
CBR	-	<i>Constant Bit Rate (Taxa de Bit Constante)</i>
CCO	-	<i>Central Coordinator (Coordenador Central)</i>
CCR	-	<i>Comparison Category Rating (Comparação de Taxas de Categorias)</i>
CD	-	<i>Compact Disc (Disco Compacto)</i>
CE	-	<i>Comunidade Européia</i>
CELENEC	-	<i>Comitê Europeu de Normalização Eletrotécnica</i>
CEM	-	<i>Compatibilidade Eletromagnética</i>
CIFS	-	<i>Contention Distributed Interframe Space (Espaço Entre-Quadro de Contenção Distribuída)</i>
CISPR	-	<i>Comitê Internacional Especial para as Perturbações Radioelétricas</i>
CMOS	-	<i>Comparative Mean Opinion Score (Média Comparativa de Pontuação de Opinião)</i>
CODEC	-	<i>COder/DECoder (Codificador/Decodificador)</i>
COS	-	<i>Class of Service (Classes de Serviço)</i>
CPE	-	<i>Customer Premise Equipment (Equipamento do Usuário Final)</i>
CRC	-	<i>Cyclic Redundancy Check (Verificação de Redundância Cíclica)</i>

CSMA	-	<i>Carrier Sense Multiple Access (Detecção de Portadora em Redes de Acesso Múltiplo)</i>
CSMA/CA	-	<i>Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance (Detecção de Portadora em Redes de Acesso Múltiplo com Prevenção de Colisão)</i>
CW	-	<i>Contention Window (Janela de Contenção)</i>
DC	-	<i>Deferral Counter (Contador Diferenciado)</i>
DCR	-	<i>Degradation Category Rating (Taxa de Categoria de Degradação)</i>
DES	-	<i>Data Encryption Standard (Encriptação de Dados Padrão)</i>
DIFFSERV	-	<i>Differentiated Services (Serviços Diferenciados)</i>
DLC	-	<i>Digital Line Communication (Comunicação de Linha Digital)</i>
DS-SS	-	<i>Direct Sequence – Spread Spectrum (Seqüência Direta – Espalhamento Espectral)</i>
DTMF	-	<i>Dual Tone Multiple Frequency (Múltiplas Frequências de Duplo Tom)</i>
EFG	-	<i>End of-Frame Gap (Espaço de Fim de Quadro)</i>
EMC	-	<i>Eletromagnetic Compatibility (Compatibilidade Eletromagnética)</i>
ETSI	-	<i>European Telecommunications Standards Institute (Instituto de Padronização de Telecomunicações Europeu)</i>
FC	-	<i>Frequência de Corte</i>
FCC	-	<i>Federal Communication Commission (Comissão Federal de Comunicação)</i>
FCS	-	<i>Frame Check Sequence (Seqüência de Verificação de Quadro)</i>
FEC	-	<i>Forward Error Correction (Correção Antecipada de Erros)</i>
FFT	-	<i>Fast Fourier Transform (Transformada Rápida de Fourier)</i>
FH-SS	-	<i>Frequency Hopping – Spread Spectrum (Espalhamento por Saltos em Frequência)</i>
FITEC	-	<i>Fundação para Inovações Tecnológicas</i>
FM	-	<i>Frequency Modulation (Modulação por Frequência)</i>
FSK	-	<i>Frequency Shift Keying (Modulação por Chaveamento de Fases)</i>
FTP	-	<i>File Transfer Protocol (Protocolo de Transferência de Arquivos)</i>
GCOI	-	<i>Grupos Coordenadores para Operação Interligada</i>
GMSK	-	<i>Gaussian Minimum Shift Keying (Chaveamento por Deslocamento Mínimo Gaussiano)</i>
GNU	-	<i>GNU is Not Unix (Acrônimo) (GNU não é UNIX)</i>
GPL	-	<i>General Public License (Licença Pública Geral)</i>
HDTV	-	<i>High-Definition Television (Televisão de Alta Definição)</i>
HE	-	<i>Head End (Equipamento Master)</i>
HF	-	<i>High Frequencies (Altas Frequências)</i>
HP	-	<i>HomePlug</i>
IE	-	<i>Intermediary Equipment (Equipamento Intermediário)</i>
IEEE	-	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers (Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos)</i>
IEM	-	<i>Interferência Eletromagnética</i>
IETF	-	<i>Internet Engineering Task Force (Força Tarefa de Engenharia da</i>

	-	<i>Internet)</i>
IFG	-	<i>Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás</i>
IFFT	-	<i>Inverse Fast Fourier Transform (Transformada Inversa de Fourier)</i>
INTSERV	-	<i>Integrated Services (Serviços Integrados)</i>
IP	-	<i>Internet Protocol (Protocolo de Internet)</i>
ISO/OSI	-	<i>International Organization for Standardization/Open Systems Interconnection (Organização Internacional para Padronização / Interconexão de Sistemas Abertos)</i>
ITU	-	<i>International Telecommunication Union (União Internacional de Telecomunicações)</i>
LAN	-	<i>Local Area Network (Rede Local)</i>
LGT	-	<i>Lei Geral de Telecomunicações</i>
MAC	-	<i>Media Access Control (Controle do Meio de Acesso)</i>
MCM	-	<i>Multi-Carrier Modulation (Modulação Multi-Portadora)</i>
MF	-	<i>Medium Frequencies (Frequências Médias)</i>
MIB	-	<i>Management Information Base (Base de Informações de Gerenciamento)</i>
MMFM	-	<i>Markov Modulated Fluid Models (Modelo Markoviano Fluido)</i>
MMPP	-	<i>Markov Modulated Poisson Process (Modelo de Poisson Modulado por uma Cadeia de Markov)</i>
MOS	-	<i>Mean Opinion Score (Média de Pontuação de Opinião)</i>
MPLS	-	<i>Multiprotocol Label Switching (Comutação de Rótulos Multiprotocolo)</i>
MSK	-	<i>Minimum Shift Keying (Chaveamento Mínimo de Fases)</i>
MT	-	<i>Média Tensão</i>
NMS	-	<i>Network Management System (Sistema de Gerenciamento de Rede)</i>
NOC	-	<i>Network Operational Center (Centro Operacional de Rede)</i>
OFDM	-	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing (Multiplexação por Divisão de Frequência Ortogonal)</i>
OPERA	-	<i>Open PLC European Research Alliance (Aliança de Pesquisa Européia sobre PLC)</i>
OPLAT	-	<i>Onda Portadora em Linhas de Alta Tensão</i>
PCM	-	<i>Pulse Code Modulation (Modulação por Código de Pulso)</i>
PCS	-	<i>Physical Carrier Sense (Sensível a Portadora Física)</i>
PDF	-	<i>Probability Density Function (Função Densidade de Probabilidade)</i>
pdf	-	<i>Probability Distribution Function (Função Distribuição de Probabilidade)</i>
PESQ	-	<i>Perceptual Evaluation of Speech Quality (Avaliação Perceptual de Qualidade de Fala)</i>
PLC	-	<i>Power Line Communication (Comunicação em Linhas de Energia Elétrica)</i>
PLTF	-	<i>PowerLine Telecommunications Forum (Fórum de Telecomunicações em Linhas de Energia Elétrica)</i>
PPDU	-	<i>Physical Protocol Data Unit (Unidade de Dados do Protocolo Físicos)</i>

PPS	-	<i>Packets per Second (Pacotes por Segundo)</i>
PR	-	<i>Priority Resolution (Prioridade de Resolução)</i>
PRS	-	<i>Priority Resolution Signal (Sinal de Prioridade de Resolução)</i>
PSQM	-	<i>Perceptual Speech Quality Measurement (Medida de Qualidade de Fala Perceptual)</i>
PSTN	-	<i>Public Switched Telephone Network (Rede de Telefonia Pública Comutada)</i>
RF	-	<i>Rádio Frequência</i>
RIFS	-	<i>Response InterFrame Space (Resposta de Espaço Entre-Quadros)</i>
RMT	-	<i>Rede de Distribuição de Média Tensão</i>
RTCP	-	<i>Real-time Transport Control Protocol (Protocolo de Controle de Transporte em Tempo Real)</i>
RTP	-	<i>Real-time Transport Protocol (Protocolo de Transporte em Tempo Real)</i>
RX	-	<i>Receptor</i>
SIP	-	<i>Session Initiation Protocol (Protocolo de Iniciação de Sessão)</i>
SNMP	-	<i>Simple Network Management Protocol (Protocolo Simples de Gerência de Rede)</i>
SNR	-	<i>Signal-to-Noise Ratio (Relação Sinal-Ruído)</i>
SP	-	<i>Service Providers (Provedor de Serviço)</i>
SS	-	<i>Spread Spectrum (Espalhamento Espectral)</i>
TCC	-	<i>Turbo Convolutional Code (Código Convolutacional Turbo)</i>
TCP	-	<i>Transmission Control Protocol (Protocolo de Controle de Transmissão)</i>
TDMA	-	<i>Time Division Multiple Access (Acesso Múltiplo por Divisão no Tempo)</i>
TE	-	<i>Transformer Equipment (Equipamento Transformador)</i>
TI	-	<i>Tecnologia da Informação</i>
TM	-	<i>Tone Maps (Mapa de Tons)</i>
TMI	-	<i>Tone Maps Index (Índice do Mapa de Tons)</i>
TX	-	<i>Transmissor</i>
UCG	-	<i>Universidade Católica de Goiás</i>
UDP	-	<i>User Datagram Protocol (Protocolo de Datagrama de Usuário)</i>
USB	-	<i>Universal Serial Bus (Barramento Serial Universal)</i>
UTC	-	<i>Utilities Telecommunications Council (Conselho de Utilitários de Telecomunicação)</i>
VAD	-	<i>Voice Activity Detection (Ativação do Detector de silêncio)</i>
VBR	-	<i>Variable Bit Rate (Taxa de Bits Variáveis)</i>
VHF	-	<i>Very High Frequency (Frequências muito Altas)</i>
VLAN	-	<i>Virtual Local Area Networks (Redes Locais Virtuais)</i>
VOIP	-	<i>Voice Over Internet Protocol (Voz sobre Protocolo de Internet)</i>
xDSL	-	<i>x Digital Subscriber Line (Linha de Subscrição Digital x)</i>

LISTA DE PUBLICAÇÕES RELACIONADAS A ESTE TRABALHO

1. SANTOS, C. B.; MARQUES, F. 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).
2. SANTOS, C. B.; MARQUES, F. S.; ARAUJO, S. G.; PEREIRA, J. B. J.; FERNANDES, D. C.; VERDE, E. L. “**Análise de Transmissão e Desempenho em Redes PLC em Baixa Tensão**”. V Congresso de Pesquisa, Ensino e Extensão – CONPEEX. Universidade Federal de Goiás – Goiânia, 2008 (Apresentação Oral).
3. SANTOS, C. B.; MARQUES, F. S.; FERNANDES, D. C.; ARAUJO, S. G.; PEREIRA, J. B. J.; FLEURY, C. A. “**Análise de Transmissão e Desempenho em Redes PLC em Baixa Tensão**”. *7th International Information and Telecommunication Technologies Symposium* - Foz do Iguaçu, 2008 (*Full-Paper*, Apresentação Oral). ISBN: 9788589264099
4. SANTOS, C. B.; VIEIRA, F. H. T.; MARQUES, F. S.; FERNANDES, D. C.; ARAUJO, S. G.; PEREIRA, J. B. J.; ROCHA, F. G. C. “**Modelagem de Tráfego em Redes PLC Utilizando Cadeias de Markov**”. *8th International Information and Telecommunication Technologies Symposium* - Florianópolis, 2009 (Submetido).
5. SANTOS, C. B.; VIEIRA, F. H. T.; MARQUES, F. S.; ARAUJO, S. G.; PEREIRA, J. B. J.; ROCHA, F. G.; FERNANDES, D. C. “**Traffic Modeling and Analysis of PLC Networks using Markov Chains**”. IEEE Latin America Symposium on Circuits and Systems – Foz do Iguaçu, 2010 (*Full-Paper*, Apresentação Oral).
6. SANTOS, C. B.; VIEIRA, F. H. T.; MARQUES, F. S.; ARAUJO, S. G.; ROCHA, F. G.; FERNANDES, D. C. “**Modelagem de Tráfego e Análise de Redes PLC (Powerline Communication) Utilizando Cadeias de Markov**”. Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos – Gramado, 2010 (Submetido).

7. SANTOS, C. B.; VIEIRA, F. H. T.; MARQUES, F. S.; ARAUJO, S. G.; ROCHA, F. G.; PEREIRA, J. B. J. “**Modeling Network Traffic Flows in PLC Networks Through a Markov Modulated Fluid Model**”. IEEE International Symposium on Power Line Communications and its Applications – Rio de Janeiro, 2010 (Submetido).

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

O projeto de redes robustas e confiáveis ou de serviços de rede está se tornando cada vez mais difícil, sendo necessário desenvolver uma compreensão detalhada das características do tráfego da rede.

O desenvolvimento de novas tecnologias que conseguem atingir altas taxas de transmissão de dados e melhoram o desempenho das redes propiciou o aparecimento de diversos padrões de redes com fio, sem fio e sem novos fios, assim como padrões com redes mistas e padrões proprietários. Nos últimos anos, um grande esforço tem sido realizado para permitir a utilização da rede elétrica para a transmissão de dados em banda larga. Este esforço inclui o desenvolvimento de equipamentos para a rede de acesso, tanto em baixa quanto em média tensão, além de equipamentos utilizados pelo usuário final, baseado no conceito de “aproveitamento da rede elétrica” e capilaridade que o sistema utilizando a rede elétrica pode atingir [1][2][3].

A tecnologia PLC/BPL (*Power Line Communication/Broadband over Powerline Communications*) é uma tecnologia que utiliza a rede elétrica para a transmissão de dados em banda larga, porém, alguns pesquisadores usam nomenclaturas como DLC (*Digital Line Communication*), que seria o PLC direcionado para aplicações domésticas ou em rede locais simples, como mostra a Figura 1.1.

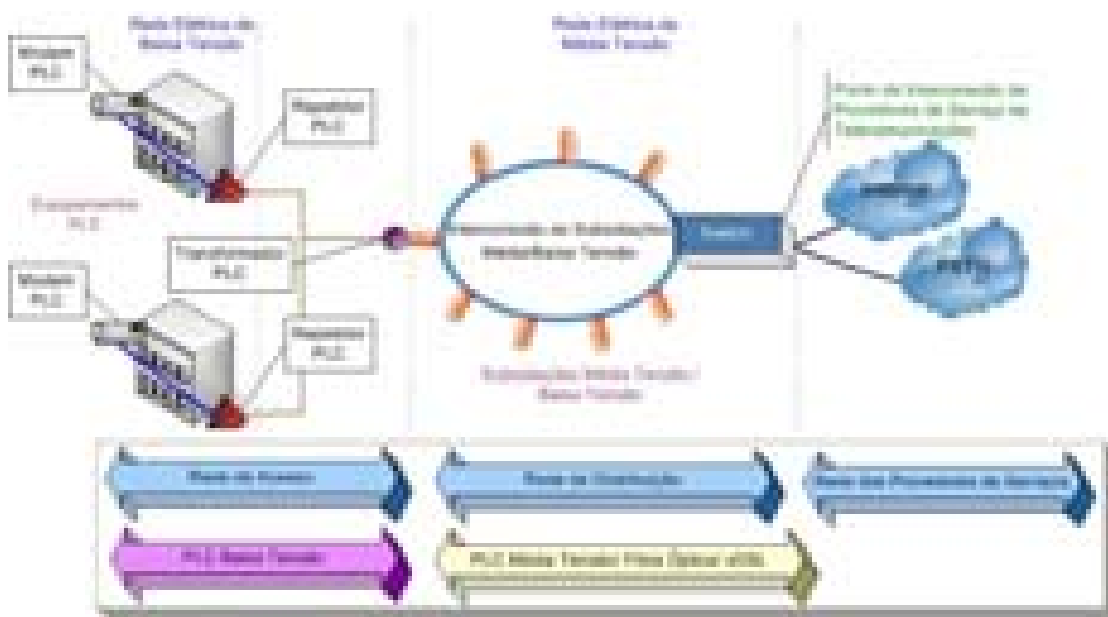


Figura 1.1 – Rede de acesso para serviços de Telecomunicações

Esta tecnologia tem se mostrado bastante competitiva no mercado de acesso em banda larga, e conta com a vantagem de ter uma infra-estrutura bastante abrangente e com pouco custo associado relativamente, além da capacidade teórica dos canais PLC ultrapassar a taxa de 500Mbps [3][6][7].

Segundo dados da ANEEL, o mercado de distribuição de energia elétrica é atendido por 64 concessionárias, estatais ou privadas, que abrangem todo o País, que atendem cerca de 60 milhões de unidades consumidoras, das quais 85% são consumidores residenciais, em mais de 98% dos municípios brasileiros. O Estado de Goiás, por exemplo, possui 1.852.699 unidades consumidoras de energia elétrica. A concessionária de energia que atende a esses consumidores possui mais de 2 milhões de clientes distribuídos em 237 municípios, beneficiando, aproximadamente, 4 milhões de habitantes (cerca de 90 % da população total do Estado). As adversidades do meio elétrico são as principais barreiras para a transmissão de dados nesse tipo de canal [1][2][4][5].

Pode-se afirmar que a tecnologia PLC possibilita desenvolver soluções que podem ser inseridas em diferentes aplicações, gerando, como consequência, inovações tecnológicas. A utilização da rede PLC tem como principais vantagens [6][8]:

- Infra-estrutura de cabeamento já pronta e existente em cerca de 96% dos ambientes residenciais, prediais, governo, comerciais e industriais;
- Alta taxa de transmissão de dados;
- Desenvolvimento de novas técnicas de transmissão digital de dados;
- Solução *last meters* (transformação da rede elétrica de distribuição predial ou residencial em uma rede local de dados);
- Facilidade de uso e na implementação do sistema PLC, cada tomada é um ponto de acesso de uso simples e descomplicado;
- Solução de acesso *last miles* para as operadoras de telefonia, promovendo a competição no seguimento de prestação de serviço e inclusão digital.

Através de mecanismos de gerência, planejamento e operação dos sistemas de geração, distribuição e transmissão de energia elétrica, utilizando uma abordagem coordenada e colaborativa, é possível que a tecnologia PLC/BPL venha a se tornar uma solução das chamadas tecnologias de última milha (*Last-Mile Technology*). Além disso, a tecnologia PLC/BPL permite que uma série de serviços possam ser oferecidos por concessionárias de energia elétrica, entidades públicas e empresas de telecomunicações [2][8][9] como mostra a Figura 1.2.

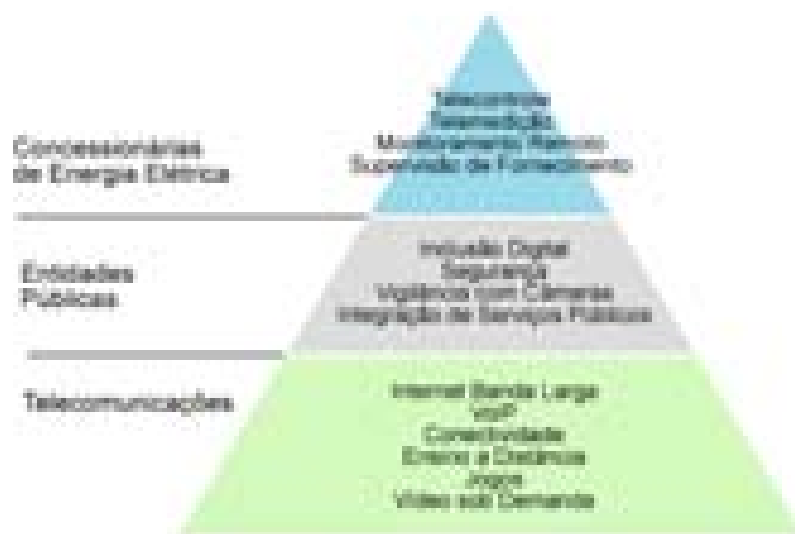


Figura 1.2 – Aplicações da Tecnologia PLC [9]

A idéia chave para a utilização da tecnologia PLC como solução à complicada equação da ampliação de serviços em regiões de difícil retorno econômico ou difícil acesso é aquela sintetizada na expressão “compartilhamento de infra-estrutura”. Esta idéia se baseia em se utilizar ao máximo o potencial do que já foi investido para alcançar uma maior abrangência de atendimento. A reutilização dos postes é exemplo disso, o que se propõe agora é a utilização de fios e até mesmo tomadas de energia elétrica [10].

Este trabalho é motivado por um crescente interesse na aplicabilidade das linhas de energia como meio alternativo de propagação de sinais de comunicação, tanto em ambientes *indoor* quanto em ambientes *outdoor*. Como o meio físico utilizado pela tecnologia PLC é bastante hostil para a transmissão de dados, visto que não foi desenvolvido para este fim, a modelagem de tráfego pode ser útil para o planejamento e dimensionamento dessas redes. Dados coletados e avaliados fornecem a base para os modelos analíticos, onde os dados então representam o comportamento do tráfego da rede.

O objetivo deste trabalho é apresentar uma análise de aplicações VoIP (*Voice over IP*) e transferência de dados utilizando a rede PLC (*Powerline Communication*) como meio de transmissão, e propor uma modelagem de tráfego utilizando Cadeias de *Markov*, baseado no MMFM (*Markov Modulated Fluid Models*), para caracterizar a rede PLC.

O Capítulo 2 apresenta um histórico da tecnologia BPL/PLC, descreve o padrão *Homeplug* e algumas características de segurança e gerência em sistemas PLC.

O Capítulo 3 descreve as características das linhas de transmissão de energia elétrica, bem como faixas de frequência de operação, relação sinal/ruído (SNR), compatibilidade

eletromagnética, e como ocorre a modulação do canal PLC, e sinalização e processamento de sinais no padrão *Homeplug*.

O Capítulo 4 apresenta as especificações de classes e requisitos de serviços em telecomunicações. Descreve a tecnologia VoIP e alguns testes que podem analisar sua qualidade.

O Capítulo 5 descreve a modelagem de tráfego de redes baseada em cadeias de *Markov*, mostrando características dos modelos de Poisson, MMPP (*Markov Modulated Poisson Process*), e MMFM (*Markov Modulated Fluid Models*), que é o modelo proposto neste trabalho para a modelagem do tráfego em redes PLC devido aos resultados obtidos.

No Capítulo 6, são apresentados os resultados encontrados para transmissão de dados e VoIP através da rede PLC e a modelagem do fluxo de dados envolvidos, fazendo uma comparação dos fluxos de tráfego reais com os tráfegos sintéticos gerados a partir dos modelos de Poisson, MMPP e MMFM.

O Capítulo 7 analisa os resultados e apresenta as conclusões do trabalho.

CAPÍTULO 2 - CARACTERÍSTICAS DA TECNOLOGIA PLC/BPL

O PLC/BLP trabalha na camada 2 do modelo ISO/OSI (enlace) ou em conjunto com outros dispositivos de camada 2, podendo ser agregado a uma rede TCP/IP (camada 3) já existente. A largura de banda disponível é compartilhada entre os usuários do sistema; se houver uma grande quantidade de clientes compartilhando o mesmo alimentador, haverá uma diminuição na taxa de transmissão. A tecnologia PLC utiliza parte da faixa de frequência alocada para radiodifusão (ondas curtas – 5,9MHz a 26,1MHz) e parte da faixa de radiocomunicações em VHF utilizada para serviços públicos (polícia, bombeiros, defesa civil) [2][3][9].

A tecnologia PLC não pode ser considerada uma nova tecnologia, pois desde o início do século XX as redes elétricas têm sido utilizadas internamente pelas empresas de energia elétrica para suportar serviços de telecomunicações. A princípio a tecnologia PLC não havia sido considerada uma forma de comunicação viável devido a sua baixa taxa de transmissão, baixa funcionalidade e alto custo de desenvolvimento [3][9][10][11].

Desde a década de 1920 os Sistemas *PowerLine Carrier* (Onda Portadora em Linhas de Alta Tensão - OPLAT), de acoplamento capacitivo, vêm sendo utilizados pelas empresas de energia elétrica, em telemetria, controle remoto e comunicação de voz. São comunicações de faixa estreita, que operam em baixa frequência (de 3kHz a 148,5kHz), com modulação analógica e taxa de transmissão de dados que não passa de 9,6kbps. Diversas empresas resolveram abandonar os sistemas *PowerLine Carrier* devido ao avanço das fibras ópticas e barateamento de outros sistemas de telecomunicações, e pela falta de demanda, fabricantes deixaram de produzir estes equipamentos [3][12][13].

A primeira técnica que possibilitou a utilização da rede de distribuição de energia elétrica para a transmissão de alguns sinais de controle foi desenvolvida no início da década de 1950, conhecida como *Ripple Control* [2]. Esse método era caracterizado pela utilização de baixas frequências (entre 100Hz e 900Hz), possibilitando comunicação a taxas bem baixas e necessitando de alta potência para transmissão. A comunicação era unidirecional, sendo utilizado ainda para tarefas simples como acionamento da iluminação pública e o controle de carga e tarifação, Também na década de 1970, dados de controle eram transmitidos pela rede elétrica em faixa estreita [2][14][15].

Em 1978 surge o X-10, um protocolo de comando remoto designado para comunicações entre transmissores e receptores X-10 através da fiação elétrica. Os primeiros produtos com esta tecnologia começaram a circular em 1979 com objetivo de que consumidores pudessem controlar luzes e aparelhos remotamente sem ter que colocar cabos adicionais nas residências e edifícios [3][13].

Novos sistemas com taxas ainda modestas foram desenvolvidos até a década de 1980. Avanços nas técnicas de processamento de sinais para a modulação digital e codificação de canais em modems permitiram taxas em torno de 14,4kbps. Ainda nos anos 80, têm-se as primeiras investigações no sentido de analisar as características da rede elétrica e suas reais capacidades como canal para comunicações, conduzidas por algumas empresas de energia na Europa e nos Estados Unidos. As faixas entre 5kHz e 500kHz eram as mais consideradas, predominando dois fatores nestes estudos: a relação sinal/ruído e a atenuação do sinal na rede. Na Europa, estabeleceu-se o padrão CELENEC (Comitê Europeu de Normalização Eletrotécnica), que opera numa faixa de frequência de até 500kHz, permitindo taxas de transmissão de dados de até 144kbps para distâncias inferiores a 500m, limitando a potência média dos sinais transmitidos em 5mW [8][12].

Apenas na década de 1990 foram obtidos sistemas capazes de fornecer comunicação de forma bidirecional através da rede de distribuição, sendo marcados pela utilização de frequências mais elevadas e menores níveis de potência transmitida. Em 1991, Dr. Paul Brown da *Norweb Communications* iniciou testes com comunicação digital de alta velocidade utilizando linhas de energia. Entre 1995 e 1997 foi demonstrada a possibilidade de se resolver problemas de ruído e interferência, permitindo a viabilidade da transmissão de dados de alta velocidade. Em outubro de 1997, a *Nortel* e *Norweb* fizeram o primeiro teste de acesso à *Internet* em uma escola de *Manchester*, lançando a idéia de *Digital Powerline*. Na Europa, em 1997, foi criado o PLC Fórum e em 1998 a UTC (*Utilities Telecommunications Council*) lançou nos Estados Unidos o *PowerLine Telecommunications Forum (PLTF)* [2][12].

Companhias de telefonia rural muitas vezes utilizam a tecnologia PLC para garantir o serviço de voz a clientes extremamente remotos, que têm acesso ao serviço de energia elétrica, mas não possuem acesso ao serviço de telefonia convencional devido ao alto custo para fornecer esse tipo de serviço com cabeamento de cobre [16].

O meio físico PLC é bastante hostil para os dados, visto que não foi concebido para este fim, pois há uma série de propriedades das redes de energia que influenciam negativamente as comunicações em alta velocidade (perdas no cabo, propagação em múltiplos caminhos e o ruído, por exemplo). Uma forma de reduzir o impacto das características do

meio de transmissão na comunicação é a aplicação de métodos eficientes de modulação, como o OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), além de mecanismos de correção de erro como o FEC (*Forward Error Correction*) e o ARQ (*Automatic Repeat reQuest*) [6][18].

Com o setor de telecomunicações passando por um crescimento explosivo (celular e *Internet*), no Brasil várias empresas de telecomunicações estavam sendo privatizadas, e muitas empresas elétricas começaram a pensar em se tornar provedores de serviços de telecomunicações na década de 90. Nesta época, no Brasil, o acompanhamento do desenvolvimento dessa tecnologia era feito pelo subcomitê das Comunicações do GCOI (Grupos Coordenadores para Operação Interligada) e a APTEL, que foi criada em abril de 1999 [8][9].

A faixa típica de frequências utilizada pela rede PLC/BLP está entre 1,7MHz e 30MHz, com espalhamento de harmônicos até frequências mais altas. A capacidade teórica de transmissão dos canais PLC ultrapassa 500Mbps. Analisando-se apenas os canais PLC em ambiente prediais, estimativas recentes apontam capacidades de canais PLC de até 600Mbps e já existem equipamentos sendo comercializados que operam em 200Mbps [6][19]

Os equipamentos que podem ser encontrados em uma rede PLC são [2][8][18]:

- Unidades de terminação de cliente (*Customer Premise Equipment - CPE*) ou modems dos usuários;
- Repetidores ou Equipamentos Intermediários (de Baixa ou Média Tensão);
- Equipamentos de Concentração;
- Equipamentos de Transformador (de Baixa ou Média Tensão);
- Equipamento de Subestação (*High End*);
- Equipamento de Acesso (Unidades de Acoplamento).

O sinal PLC é transmitido sobre os fios de cobre (ou alumínio) das redes de distribuição de baixa e média tensão. A transmissão de sinais de comunicação sobre as linhas de corrente alternada se torna difícil devido às características topológicas das linhas de distribuição de energia elétrica, existência de ruídos e interferências não previsíveis, problemas de segurança de dados por causa do compartilhamento de circuitos entre diversos consumidores e irradiação das frequências transmitidas em linhas abertas, sem nenhum tipo de blindagem [8][9].

Como mostra a Figura 2.1, o sinal PLC/BPL é gerado na central e encaminhado ao injetor, que se encarrega de enviá-lo a rede elétrica. Os repetidores têm a função de fazer com que os transformadores não filtrem as altas frequências, amplificando e retransmitindo o sinal

PLC. Ao chegar à rede domiciliar, o extrator deixa o sinal pronto para ser utilizado na casa e pode ser encaminhado por meio de fibra óptica, *wireless* ou mesmo pela própria fiação elétrica até o modem BPL, que converte o sinal através de uma porta *Ethernet* ou USB. Para conectar equipamentos PLC à rede elétrica a conexão deve ser feita com equipamentos padronizados, que oferecem isolamento entre os sinais de telecomunicações e a energia elétrica, para manter a integridade do sistema e do usuário [8][12].

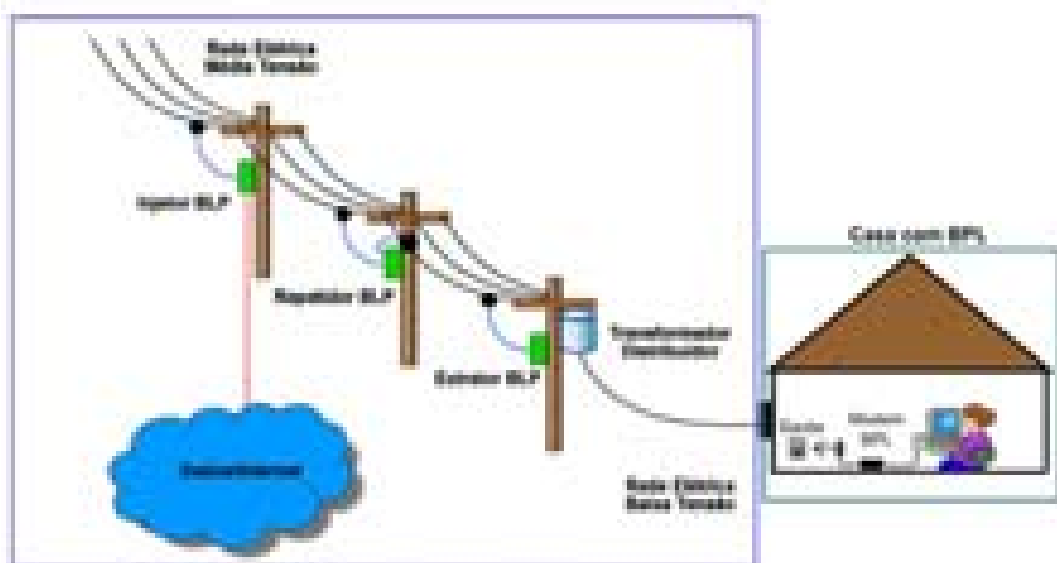


Figura 2.1 – Rede PLC/BLP e usuário final [22]

Alguns equipamentos eletrodomésticos podem causar interferências na rede PLC/BLP, como motores e *dimmers*² de luz, além de secadores de cabelos, enceradeiras, furadeiras elétricas, e em menor possibilidade os chuveiros elétricos. Aspiradores de pó e barbeadores geram ruídos impulsivos de alta frequência, da ordem de dezenas de quilohertz. *Dimmers*, luzes fluorescentes e halogênicos criam ruídos impulsivos síncronos, relacionados ao ciclo de potência de 50Hz e 60Hz [20][21]. Fontes de energia criam harmônicas relacionadas com a comutação de frequência. Receptores de rádio frequência (RF) de outras faixas podem afetar a qualidade do canal de comunicação da linha de energia, interferindo na recepção dos sinais de dados. Os equipamentos PLC não podem ser ligados através de *no-breaks*, estabilizadores ou filtros de linha, pois estes bloqueiam sinais de alta frequência [3][11][20][22].

² *Dimmers* consistem em graduadores que controlam a tensão de dispositivos elétricos. Esses dispositivos geram ruído ao conectar a lâmpada à rede elétrica a cada ciclo CA (Corrente Alternada). O ruído gerado é na forma de um impulso com o dobro da frequência da rede CA [20].

2.1 REDES DOMICILIARES ATRAVÉS DA FIAÇÃO ELÉTRICA

Em redes *wireless* utilizam-se pontos de acesso (*access points*) e placas de rede com antenas para que haja comunicação, e em tecnologias xDSL (*Digital Subscriber Line*) utilizam-se os modems xDSL. De forma análoga, em redes PLC é necessário utilizar alguns dispositivos específicos para que a rede elétrica possa ser usada para trafegar dados.

Como pode ser visto na Figura 2.2, a configuração básica de uma rede PLC é constituída por um equipamento denominado Master PLC, que pode ser entendido como o *Head End* da rede, instalado próximo ao transformador de baixa tensão onde é realizado o acoplamento em paralelo com as três fases e o neutro (baixa tensão) da rede de energia elétrica. O Master tem a função de gerenciar e distribuir/concentrar a transmissão das informações aos repetidores, instalados nos assinantes e podem gerenciar até 63 equipamentos escravos, conhecidos como *slave nodes*, e que podem ser CPEs (*Customer Premises Equipment*) ou repetidores [10].

Os Repetidores regeneram e re-injetam o sinal PLC proveniente dos Equipamentos de Transformador para a rede elétrica de distribuição doméstica. É instalado normalmente junto aos medidores de cada prédio ou em algum local intermediário, como por exemplo, postes sem transformador, na rede de distribuição de baixa tensão. 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. Um equipamento PLC CPE faz a interface com a rede PLC permitindo que o computador do usuário se conecte com a rede através de interfaces padrão do mercado (Ethernet ou USB) [2][3][10].

Cada repetidor gerenciado por um Master possui a capacidade de gerenciamento de 63 equipamentos “escravos”, formando assim uma topologia de comunicação em árvore com aproximadamente 4000 usuários por transformador. A distância média para inserção de repetidores pela rede PLC é de 1500m, de acordo com especificações do fabricante.

O Modem PLC ou CPE é conectado à tomada de energia da rede de distribuição, por onde, além de ser alimentado, recebe o sinal PLC através de uma tomada simples. Neste modem existe um filtro passa-alta para os sinais de dados e um filtro passa-baixa para os sinais elétricos. Normalmente possuem interfaces de comunicação RJ45 para a rede Ethernet, USB (*Universal Serial Bus*) e interface RJ11, que permite a integração das redes PLC com serviços de telecomunicações [10].



Figura 2.2 – Dispositivos da Rede PLC

Para se introduzir e adaptar os sinais de dados dos equipamentos PLC para as redes de Baixa e Média Tensão são necessários acopladores, como pode ser visto na Figura 2.3. Esses acopladores podem ser capacitivos (injetam os sinais de dados através de contato direto com as linhas de energia elétrica) ou indutivos (injetam os sinais na rede elétrica por indução). 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 [10].



Figura 2.3 – Tipos de Acopladores PLC: Capacitivos e Indutivos [10]

A Figura 2.4 apresenta uma topologia típica da rede PLC, com quatro níveis de rede: a rede interna do usuário final, a rede de acesso, a rede de distribuição e a rede de transporte, com a interconexão com a *Internet*.

1. Rede Interna do Usuário Final: constituída pela rede de distribuição elétrica nas instalações do usuário, e modems para conexão dos equipamentos que serão interligados ao serviço de banda larga [2][10].
2. Rede de Acesso PLC: se inicia junto ao medidor de energia elétrica do usuário com introdução do equipamento Repetidor ou Equipamento Intermediário (IE), que recebe os sinais PLC gerados nos diversos modems existentes na rede, desvia do medidor e os reinjeta na rede de baixa tensão. A rede de acesso termina no *Transformer Equipment*, um equipamento repetidor de baixa tensão / média tensão [2].
3. Rede PLC de Distribuição: promove a interconexão do sinal PLC com a rede de transporte do Operador de Telecomunicações, através de equipamentos *Master*, seguindo até alcançar um ponto de acesso à rede *Internet* [10].
4. Rede de Transporte: responsável pelo transporte do sinal PLC e serviços que podem ser oferecidos, como por exemplo, levar acesso de *Internet* ao assinante.

A infra-estrutura de distribuição de energia elétrica de média tensão pode ser utilizada como rede de distribuição PLC, com formação em anel, barramento ou células.

No caso da formação em barramento, um Master, que faz a conexão com o *backbone* de dados, se comunica com outros Masters, que fazem a conexão com suas respectivas redes em baixa tensão. Os repetidores são colocados entre estes elementos quando é necessário reforçar o sinal e ampliar geograficamente a rede. Esta mesma distribuição é utilizada para a formação de uma rede em anel. A diferença é que os repetidores e Masters são distribuídos de tal modo ao longo da rede que eles se fecham formando um anel PLC. Estas duas formações podem ser parte de uma solução maior, na qual cada um desses anéis ou barramento possui o seu próprio acesso ao *backbone* de dados, formando células PLC interligadas por este *backbone* [13].

Uma rede PLC é considerada isolada de outra não somente quando não existe uma conexão física entre elas, mas também quando o sinal de uma rede não é percebido pela outra, seja devido à atenuação do sinal ou ao uso de portadoras distintas [9][13].

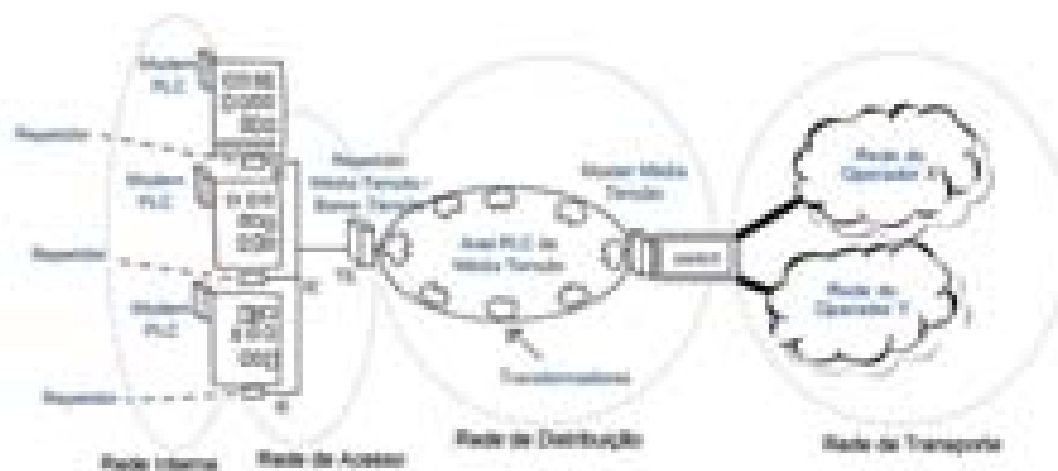


Figura 2.4 – Topologia típica de uma rede PLC [10]

2.1.1 Ambiente *Power Line Indoor Communication*

É aquele tipo de ambiente dentro de lugares fechados, como exemplo, residências, salas comerciais, laboratórios, etc. Nestes ambientes a maioria das fontes de interferência é geralmente causada por equipamentos de iluminação, pequenos motores e outros equipamentos elétricos de pequeno porte. A relação sinal ruído média para esse tipo de ambiente é de 35,8dB (o sinal é aproximadamente 3802 vezes maior que o ruído), com desvio padrão médio de 4,0dB [6].

2.1.2 Ambiente *Power Line Outdoor Communication*

É aquele tipo de ambiente em lugares aberto. É neste tipo de ambiente que o sinal PLC trafega sobre o sistema de transmissão e distribuição. O desempenho neste caso é mais afetado por descargas atmosféricas, chaveamentos, influência de banco de capacitores, transformadores, grandes motores, entre outros. A velocidade assimétrica de um modem é, geralmente, de 256kbps a 2,7Mbps. No repetidor situado no medidor, a velocidade é de até 45Mbps e pode ser conectada a até 256 modems PLC. Nas estações de média tensão, a velocidade pode chegar a até 135 Mbps [6].

As características do meio elétrico como canal de transmissão foram modeladas em diferentes artigos. *Langfeld* apresenta quatro possíveis modelos de canal, onde se varia a topologia e o nível de ruído. Mostra suas respectivas funções de transferência e parâmetros característicos [19]. *Cañete et al.* descrevem o meio e propõem a adoção de um modelo para o canal que é função das características físicas da rede. Assim, o modelo é aplicável a qualquer

cenário, desde que se conheçam o tamanho do ambiente, a quantidade de circuitos e o tipo de cabos [19].

A Figura 2.5 apresenta o esquema de uma cidade utilizando a rede elétrica para transmissão de dados, com linhas prioritárias para serviços de utilidade pública, como bombeiros, hospitais e postos policiais, entre outros.

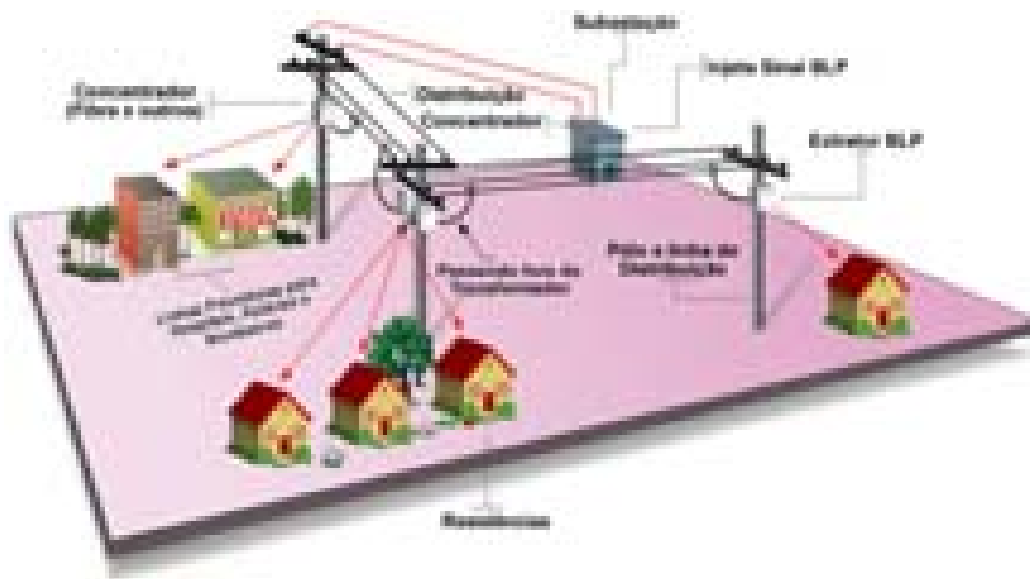


Figura 2.5 – Esquema de uma cidade utilizando PLC/BLP [23]

2.2 PADRÃO HOMEPLUG

O padrão *HomePlug* foi desenvolvido pela *HomePlug Powerline Alliance*, definindo seu método de acesso ao meio e especificações da camada física para redes de baixa tensão. . A principal preocupação ao se criar o *HomePlug* foi a robustez da transmissão de dados para compensar as adversidades do canal. Inicialmente, havia duas tecnologias competindo para a escolha do padrão: a *Passport*, criada pela *Intelogis*, e a denominada *PowerPacket*, desenvolvida pela *Intellon*, sendo a última a escolhida como base para o padrão *HomePlug*. A tecnologia *PowerPacket* utiliza multiplexação por divisão ortogonal de frequência (OFDM) com correção antecipada de erros, similar à tecnologia encontrada na DSL [19][24].

Segundo *Pavlidou et al.* em [19], o meio elétrico tende a ser pior que o meio sem fio em termos de atenuação e ruído. Portanto, diferentes trabalhos e pesquisas foram feitos para aprimorar técnicas de modulação, de codificação e de processamento de sinais para obter altas taxas de transferência.

Atualmente, o principal concorrente do *HomePlug* é o padrão IEEE 802.11 (redes sem fio) devido ao seu sucesso comercial. Desta forma, há diversos testes de desempenho comparativos entre os dois padrões em cenários domiciliares [7].

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 2.6), que por sua vez é conectado a uma tomada elétrica. Para possibilitar essa conexão, faz-se necessário que as tomadas onde os adaptadores são ligados pertençam a mesma fase do quadro de distribuição de energia [16].



Figura 2.6 – Adaptador *HomePlug* [25]

O padrão *Homeplug* 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 um padrão bastante difundido em casas e pequenos escritórios [16].

O *HomePlug* define o método de acesso ao meio (MAC) e especificações de camada física (PHY) utilizando as técnicas de códigos corretores de erro (FEC), intercalamento (*interleaving*), protocolos de recuperação de erros por retransmissão (ARQ), esquemas de modulação OFDM e protocolos tolerantes a falhas, para garantir robustez na transmissão de dados [24].

A tecnologia *HomePlug* define duas interfaces: uma do lado elétrico chamada P1, localizada entre o transformador e a linha CA; e a outra do lado de dados, chamada M1 (definida como uma interface lógica e especificada pela IEEE 802.3), entre *HomePlug* MAC e a camada que está usando o serviço, como mostra a Figura 2.7 [18][24].

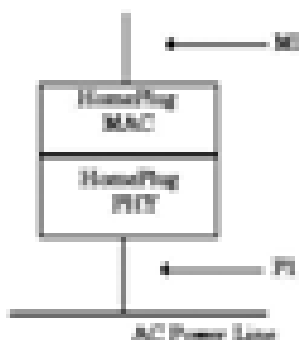


Figura 2.7 – Interfaces Padrão HomePlug [18]

O controle de acesso ao meio (M1), é definido como interface de serviço, que fornece gerência e transporte de dados. Esta interface é especificada por serviços primários que fornecem o fluxo de dados e a troca de estados dos eventos para a continuação no modelo MAC. A interface P1 é definida em termos das formas de onda e características elétricas [24].

O padrão *HomePlug* possibilita que os computadores ligados através dele compartilhem os recursos de rede, como impressoras, ou até mesmo a conexão com a *Internet*, que pode ser feita através de um outro tipo de tecnologia, como ADSL ou Cabo. A Tabela 2.1 apresenta a taxa de transmissão nas principais camadas do padrão *HomePlug* 1.0 [18][24]:

Tabela 2.1 – Taxa de transmissão do padrão *HomePlug* 1.0 [24]

Camada	Vazão (Mbps)
Física	13,78
Enlace	8,2
Transporte	6,2

As taxas de transmissão no padrão *HomePlug* podem chegar a 200Mbps (*HomePlug AV*), sendo comparáveis às taxas de transmissão obtidas no padrão de redes *wireless* IEEE 802.11 [24].

- *HomePlug 1.0* — Velocidade teórica: 14Mbps;
- *HomePlug 1.0 Turbo* — Velocidade Teórica: 85Mbps;
- *HomePlug AV* — Velocidade Teórica: 200Mbps.

Dependendo do fabricante, os equipamentos podem ter alcance em cerca de 150 metros a 300 metros. A meta do *HomePlug AV* é permitir a distribuição de diversas transmissões de áudio e vídeo em alta definição (HDTV). Esse novo padrão foi desenvolvido pela *Panasonic*, *Intellon*, *DS2*, *Sharp* e *Conexant*. No *HomePlug AV*, a camada física opera

entre as frequências de 2MHz à 28MHz e utiliza uma taxa de canal de 200Mbps para prover uma taxa útil de dados de 150Mbps para comunicações mais robustas em canais ruidosos, como o meio elétrico [24].

2.3 SEGURANÇA E GERÊNCIA EM SISTEMAS PLC

Uma rede PLC pode variar em tamanho, complexidade e ser constituída de diferentes dispositivos, inclusive ligando redes distintas. Alguns equipamentos PLC são capazes de utilizar o protocolo SNMP (*Simple Network Management Protocol*) para ser possível um gerenciamento centralizado, utilizando MIBs (*Management Information Base*) proprietárias que permitem maior controle sobre os ativos da rede [2].

Para a comunicação através da rede PLC que utilize topologia em forma de barramento, é necessária uma análise da segurança da rede devido ao risco inerente à solução. O risco pode ser identificado não somente em relação à confidencialidade dos dados transmitidos, mas também às tentativas de acessos indevidos e de fraudes aos serviços que solicitam autorizações [8][26].

Como em uma rede PLC o meio de transmissão é compartilhado entre todas as residências atendidas pelo transformador, pode ser possível escutar transmissões alheias. É possível a utilização de diversos mecanismos de segurança, como a criptografia, a autenticação e as redes locais virtuais (VLANs) em redes PLC. Os equipamentos permitem a criação de redes separadas em um mesmo circuito elétrico com duas chaves de cifragem diferentes, configuráveis através de um programa fornecido geralmente com o equipamento [26][27].

A criptografia na rede PLC acontece na camada de enlace, garantindo confidencialidade ao enlace estabelecido pelo usuário. A autenticação ocorre no momento em que um equipamento tenta de associar a rede e auxilia o controle de acesso à rede e a utilização de seus recursos [26].

Não só os dispositivos *HomePlug*, mas grande parte dos dispositivos PLC operam com o algoritmo de criptografia DES³ (*Data Encryption Standard*) de 56 bits, e sistema de detecção de intrusão, para que nenhum acesso seja feito sem o conhecimento da administração da rede. Equipamentos mais novos, que operam no padrão *Homeplug AV* utilizam criptografia AES (*Advanced Encryption Standard*) de 128 bits, que é baseado no

³ O Algoritmo DES foi criado pela IBM e implantado pelos EUA em 1977 para criptografia padrão de informações não-confidenciais, e é considerado por muitos autores como sendo uma criptografia não muito segura, apesar de rápida. Foi quebrado por "força bruta" em 1997 em um desafio lançado na Internet.

DES, e suportam mudanças de chaves de criptografia dinâmicas. Essa mudança permite que uma estação participe em múltiplas redes Homeplug AV. Alguns equipamentos PLC *outdoor* utilizam também o algoritmo de criptografia RC4 [26][27].

Redes lógicas são formadas por estações que compartilham uma mesma chave de criptografia de rede. As estações armazenam uma chave padrão utilizada para obtenção de novas chaves e as chaves de criptografia de rede, pois uma estação pode fazer parte de mais de uma rede lógica. Somente os quadros de gerenciamento da subcamada MAC são enviados sem criptografia para poderem ser recebidos por todas as estações [13][26].

Para garantir a confidencialidade, a integridade, a disponibilidade e o controle de acessos não autorizados os seguintes itens de segurança devem ser verificados:

- a) Controle de acesso;
- b) Vulnerabilidade
- c) Controles de criptografia;
- d) Proteção contra *softwares* maliciosos;
- e) Controle de acesso à rede;
- f) Controle de acesso ao sistema operacional.

CAPÍTULO 3 - CAMADA FÍSICA DE REDES PLC

O sistema de fornecimento de energia elétrica possui três níveis de tensão distintos: nível de alta tensão (maior que 69kV), de média tensão (1kV a 69kV), e de baixa tensão (menor que 1kV), como é mostrado na Figura 3.1. Na comunicação de dados utilizando portadoras com frequências elevadas, os transformadores são obstáculos “naturais” para a transferência de dados [1][3].

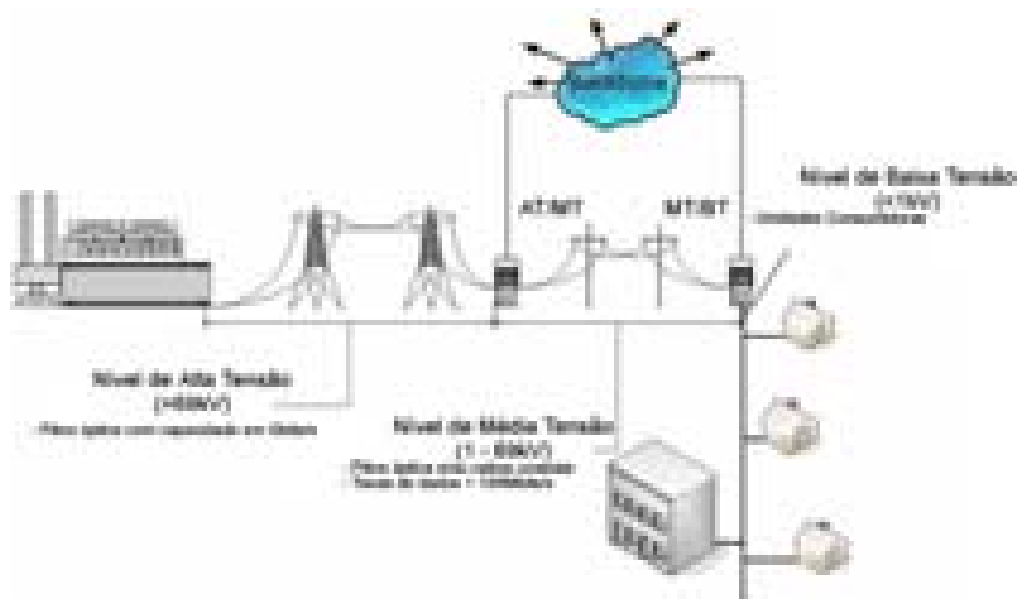


Figura 3.1 – Sistema típico de fornecimento de energia elétrica e dados [28].

O nível de alta tensão (AT) interliga centros de geração aos centros de consumo, e geralmente percorrem grandes distâncias. Para a frequência CA de 50Hz ou 60Hz, o comprimento de onda correspondente às linhas aéreas é de 6000km ou 5000km, respectivamente. Esse nível de tensão é marcado principalmente pelas perdas por efeito *Joule*, descargas oriundas do efeito corona, que introduz componentes de alta frequência na rede, e por capacitâncias e indutâncias parasitas. As atenuações sofridas de acordo com a frequência podem ser vistas na Tabela 3.1 [3][12].

Tabela 3.1 – Valores de atenuação dependente da frequência

Atenuação por 100km	$f(\text{kHz})$
6,12dB	200
9,25dB	300
12,39dB	400

O nível de média tensão (MT) interliga subestações a centros de distribuição de consumo. São redes construídas através de linhas aéreas (com valores nominais de tensão

típicos entre 10kV e 20kV), ou cabos (geralmente subterrâneos). As linhas aéreas normalmente fornecem energia elétrica para áreas rurais, pequenas cidades ou companhias industriais, e tem comprimento típico entre 5km e 25km [12].

O nível de baixa tensão (BT) é o nível que efetivamente chega à maioria das unidades consumidoras. Possui o ambiente mais hostil para a transmissão de sinais, devido à natureza dinâmica de cargas inseridas e removidas da rede, às emissões provenientes dos equipamentos e às perturbações. Neste nível de tensão, os raios de fornecimento típico a partir de um transformador de baixa tensão são de 100m a 500m. A Tabela 3.3 apresenta alguns valores aproximados de atenuação de acordo com a frequência [12].

Tabela 3.2 – Valores aproximados de atenuação

Atenuação por 1km	$f(\text{MHz})$
21,2dB	2
35dB	5
46,9dB	10

A Figura 3.2 apresenta uma rede PLC de baixa tensão e os possíveis obstáculos enfrentados pela utilização da rede elétrica como meio de transmissão.

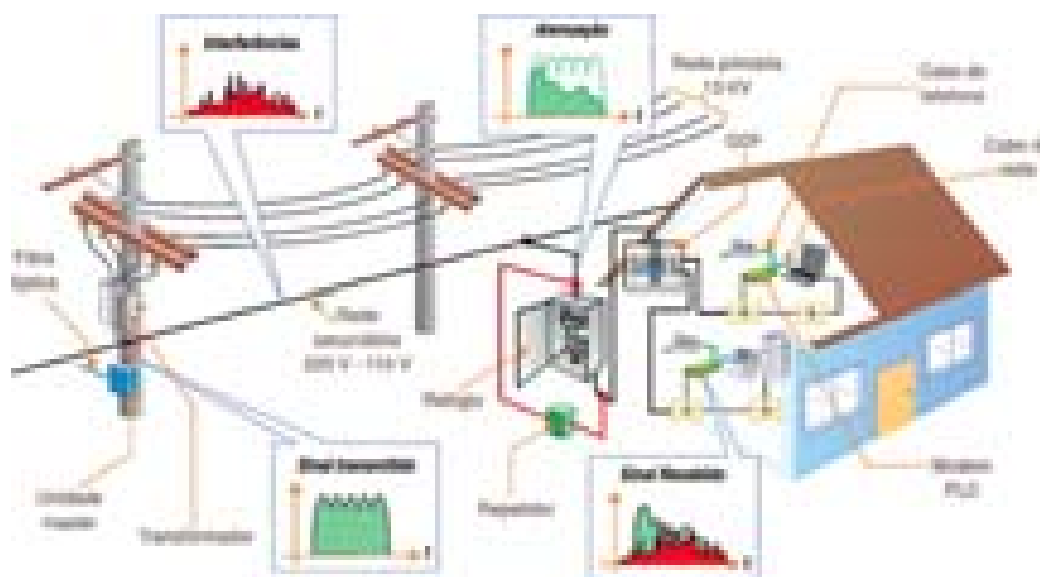


Figura 3.2 – Rede PLC baixa tensão e obstáculos do meio de transmissão [29]

A solução de comunicação da tecnologia PLC em média tensão em conjunto com a tecnologia de baixa tensão resulta em um custo efetivo baixo por não precisar de instalação de novos cabos. Na rede de baixa tensão, para suportar a transmissão de dados sobre o sistema de transmissão de energia, um controlador de portadoras PLC ou *PLC Controller* é instalado, normalmente no transformador de baixa tensão. O controlador PLC acopla o envio de dados

ou *upstream* para a rede de telecomunicações, utilizando qualquer uma das tecnologias tradicionais (conexão direta via fibra óptica, cabos par de cobre ou wireless), ou usando alguma tecnologia proprietária (como por exemplo, a solução *Powerline* de Média Tensão da empresa ABB) [3][30].

Todos os sistemas de energia elétrica apresentam uma característica em comum: operam em vários níveis de tensão, separados por transformadores, sendo cada nível adaptado para interligar diferentes distâncias dentro da área total de abrangência. Começando pelo nível de maior tensão, podemos distinguir os seguintes níveis:

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

A Tabela 3.3 apresenta alguns valores típicos dos sistemas de energia elétrica, de acordo com a distância, tensão e topologia [7].

Tabela 3.3 – Características típicas dos sistemas de energia elétrica no Brasil

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

A Figura 3.3 apresenta a partir de uma subestação de distribuição, a topologia do nível de distribuição, destacando a interação entre as redes de tensão primária e secundária [7].

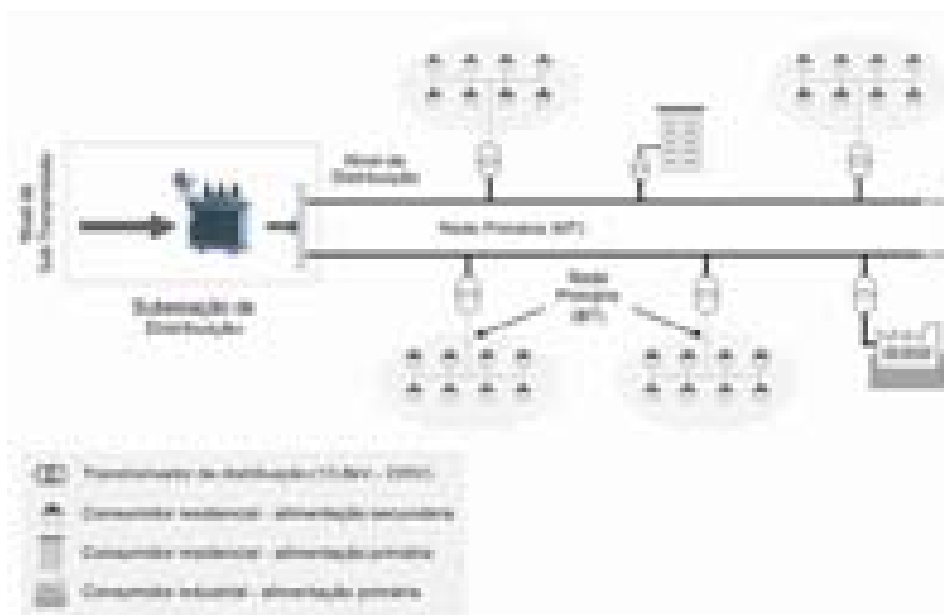


Figura 3.3 – Circuitos em tensão primária e secundária de distribuição [31]

Algumas restrições são comuns ao PLC tanto aplicado em redes de baixa quanto em média tensão, como por exemplo:

- Relação Sinal-Ruído;
- Interferências;
- Segmentação de alimentadores;
- Segurança no Trabalho.

As interferências e ruídos ocorrem nas redes de alta tensão devido à ocorrência de descargas atmosféricas, efeito corona, interrupção na operação de circuitos ou transitórios produzidos por manobras em uma subestação [31].

Nas redes de média tensão estes distúrbios são causados especialmente por chaveamentos em bancos de capacitores empregados para controle da tensão e correção do fator de potência.

Já nas redes de baixa tensão, sejam elas externas (linhas aéreas) ou internas (redes embutidas residenciais), os equipamentos industriais, comerciais ou residenciais são os principais agentes causadores de ruídos e interferências.

A expressão *horrible channel* já foi usada para caracterizar os canais PLC devido a pesquisas que mostram que os canais PLC apresentam características similares aos canais de comunicação sem fio, sendo as seguintes características apresentadas como as principais responsáveis por essa caracterização dada aos canais PLC [6]:

- Variações entre as diferentes redes elétricas;
- Diferentes condições físicas e características topológicas das redes elétricas;
- Atenuações proporcionais à distância e à frequência;
- Casamentos de impedância no transmissor e receptor;
- Ocorrências de ruídos impulsivos com alta potência;
- Variações de impedâncias vistas pelo transmissor e pelo receptor;
- Interferências eletromagnéticas geradas por outros serviços que operam em mesma faixa de frequência;
- Variações periódicas das respostas impulsivas dos canais PLC.

A rede elétrica, na maioria das vezes, não é blindada, como a rede coaxial, e nem trançada, como a rede telefônica. Isso faz com que ela fique muito mais suscetível às interferências e aos ruídos oriundos de equipamentos nela conectados, e às perturbações

erráticas (tempestades elétricas na atmosfera, fontes de tensão repentinas e inesperadas, entre outras).

A Figura 3.4 apresenta alguns dos principais obstáculos enfrentados na transmissão de dados via rede elétrica: ruído, atenuação e distorção.



Figura 3.4 – Principais obstáculos para a transmissão de dados via PLC [32]

Algumas técnicas de processamento de sinais foram implementadas nos *chipsets* DS2 e da *Intellon* e melhorias são investigadas para implementação em futuros *chipsets* para minimizar tais efeitos nocivos à transmissão de dados através de canais, dentre elas [6]:

- Técnicas mono-portadoras, multi-portadoras e de espalhamento espectral;
- Técnicas de codificação de canais;
- Técnicas de equalização;
- Técnicas de estimação de canais;
- Técnicas de acesso ao meio e de cancelamento de ruídos impulsivos;
- Técnicas de gerenciamento de espectro de frequência.

Os cabos utilizados para distribuição de energia elétrica empregam dielétricos que apresentam elevadas perdas em altas frequências, o que limita a distância de propagação ao longo dos cabos. Os cabos de distribuição aéreos, utilizados em grande parte da rede elétrica brasileira, como mostra a Figura 3.5, não são eletricamente simétricos (balanceados), o que facilita a irradiação de sinais de alta frequência e causa interferência nas radiocomunicações, ao mesmo tempo em que também recebem interferências [1][3][5][21].



Figura 3.5 – Exemplo de redes aéreas encontradas no Brasil [9]

A topologia utilizada no cabeamento da rede elétrica residencial é uma combinação de barramento, estrela e árvore, o que favorece o problema das reflexões de sinais devido ao descasamento de impedâncias. Além disso, o uso de dois fios, uma fase e um neutro, compartilhados entre todos os dispositivos conectados à rede dificulta o emprego de transmissões em modo *full-duplex*⁴. Adicionalmente, a distribuição das fases dentro de uma residência deve ser considerada, pois não segue um padrão definido. Em residências bifásicas, por exemplo, os cômodos podem estar conectados a diferentes fases dificultando a transmissão dos sinais. Essa dificuldade é devido à grande atenuação entre as fases do transformador de média para baixa tensão [2][3].

No Brasil, as investigações dos canais PLC como meio de transmissão de dados em faixa larga e faixa estreita seguem duas principais linhas [6]:

- 1) A análise de sistemas PLC desenvolvidos na Europa e nos Estados Unidos, em que seu uso não é condicionado a nenhum tipo de pesquisa e/ou desenvolvimento que possibilite melhorias. Esses sistemas têm sido implementados em testes de campos para que as empresas do setor de energia tenham uma idéia da potencialidade real da tecnologia PLC. Um exemplo disto é o Projeto OPERA 2 (*Open PLC European Research Alliance 2*), um Consórcio Europeu para desenvolvimento, padronização e integração da Tecnologia PLC em toda a Comunidade Européia, tornando-o um padrão internacional, tendo em vista sua exploração e aproveitamento em conjunto com os parceiros nos

⁴ O modo *full-duplex* permite que cada nó da rede envie e receba dados simultaneamente.

diversos nichos do mercado, No entanto, é de se esperar que, os sistemas PLC desenvolvidos nos EUA e Europa apresentem desempenhos bastante diferentes quando implementados no Brasil, visto que a rede elétrica nesses países são em sua maioria subterrânea, enquanto no Brasil prevalece o cabeamento aéreo [2][6][33].

- 2) A análise dos sistemas PLC com relação ao desempenho de algoritmos no nível da camada física em universidades, com a realização de trabalhos práticos, que muitas vezes se limitam à montagem de soluções já encontradas no mercado [6].

A propagação do sinal através da linha de transmissão de energia elétrica provoca uma atenuação e um atraso no sinal que aumentam com a distância (comprimento da linha) e a frequência. A atenuação depende da impedância característica (Z_L) e da constante de propagação (γ) das linhas de transmissão, que são funções por unidade de comprimento da resistência primária R' , condutância G' , indutância L' , e capacitância C' , dependem da frequência, e podem ser calculados por [3][6]:

$$Z_L = \sqrt{\frac{R'(f) + j2\pi.L'(f)}{G'(f) + j2\pi.C'(f)}} \quad (01)$$

$$\gamma(f) = \sqrt{(R'(f) + j2\pi.L'(f)).(G'(f) + j2\pi.C'(f))} \quad (02)$$

$$\gamma(f) = \alpha(f) + j\beta(f) \quad (03)$$

onde $\alpha(f)$ representa a parte real e $\beta(f)$ representa a parte imaginária da constante de propagação.

Ao se analisar uma linha de transmissão em termos da frequência e da distância, considerando apenas a propagação da onda da fonte até o destino, verifica-se que a função de transferência de uma linha com comprimento l pode ser calculada como sendo [3]:

$$H(f) = e^{-\gamma(f) \cdot l} = e^{-\alpha(f) \cdot l} \cdot e^{-j\beta(f) \cdot l} \quad (04)$$

Em diferentes investigações e medições, concluiu-se que para altas frequências, como para a banda de frequência PLC (1MHz a 30MHz) a impedância característica Z_L e a constante de propagação γ podem ser aproximadas por [3]:

$$Z_L(f) = \sqrt{\frac{L'}{C'}} \quad (05)$$

$$\gamma(f) = \underbrace{\frac{1}{2} \cdot \frac{R'(f)}{Z_L} + \frac{1}{2} G'(f) Z_L}_{\text{Parte Real} \rightarrow \text{Re}\{\gamma\}} + \underbrace{2j\pi f \sqrt{L'C'}}_{\text{Parte Imaginária} \rightarrow \text{Im}\{\gamma\}} \quad (06)$$

onde $R'(f)$ é dado por:

$$R'(f) = \sqrt{\frac{\pi\mu_0}{\kappa r^2}} \quad (07)$$

onde μ_0 representa a constante de permeabilidade, κ a constante de condutividade e r é o raio do cabo.

Considerando os parâmetros do cabo (Z_L , r , entre outros) como constantes k_1 , k_2 e k_3 , a parte real e a parte imaginária da constante de propagação podem ser expressas por [3]:

$$\alpha(f) = \text{Re}\{\gamma\} = k_1 \cdot \sqrt{f} + k_2 \cdot f \quad (08)$$

$$\beta(f) = \text{Im}\{\gamma\} = k_3 \cdot f \quad (09)$$

Os resultados obtidos a partir de diversas medições da perda de propagação foram comparados com os valores obtidos a partir da equação 08, e uma aproximação foi feita a fim de obter uma equação que represente o comportamento real (ou próximo do real) da perda de propagação no domínio da frequência. A fórmula aproximada desta perda é dada por [3]:

$$\alpha(f) = \alpha_0 + a_1 \cdot f^k \quad (10)$$

onde a_0 , a_1 (parâmetros de atenuação) e k (expoente do fator de atenuação – valores típicos estão entre 0.5 e 1) são constantes [3][57].

Se a perda de propagação representa a perda do meio por unidade de comprimento, então a atenuação ao longo de um meio é uma função do seu comprimento l . Selecionando adequadamente os parâmetros de atenuação a_0 , a_1 e k , a atenuação da rede elétrica, que representa a amplitude da função de transferência do canal, pode ser definida por [3]:

$$A(f, l) = e^{-\alpha(f) \cdot l} = e^{-(a_0 + a_1 \cdot f^k) \cdot l} \quad (11)$$

onde $A(f, l)$ representa a atenuação média do sinal.

A topologia das redes de distribuição de energia elétrica difere consideravelmente das redes de comunicações tradicionais. Numerosas reflexões do sinal são recebidas, e ocorrem

principalmente devido à junção de cabos de diferentes impedâncias. Desta forma a função de transferência do canal torna-se [3]:

$$H(f) = \sum_{i=1}^N g_i \cdot A(f, l_i) \cdot e^{-j2\pi f \tau_i} \quad (12)$$

onde g_i é um fator de ponderação que representa o produto da reflexão e fatores de transmissão ao longo do caminho e a variável τ_i representa o atraso introduzido pelo caminho i , calculado dividindo o comprimento do caminho l_i pela velocidade de fase v_i .

A equação 11 representa um modelo de canal PLC abrangendo três características: atenuação, flutuações de impedância e efeitos de multiplicasoras. Esta equação é composta principalmente de um fator de ponderação, termo de atenuação e um termo de atraso de propagação do sinal [3]:

$$H(f) = \sum_{i=1}^N \underbrace{g_i}_{\text{Termo de Ponderação}} \cdot \underbrace{e^{-(a_0+a_1 \cdot f^k) \cdot l_i}}_{\text{Termo de Atenuação}} \cdot \underbrace{e^{-j2\pi f \tau_i}}_{\text{Termo de Atraso}} \quad (13)$$

onde N é o número de multiplicasoras no canal.

A Figura 3.6 apresenta uma topologia típica de uma rede de distribuição de energia elétrica, utilizando um circuito simples com apenas uma ramificação com 12m, que está a 30m do transmissor (TX) e a 170m do receptor (RX). Para esta rede típica observa-se um cabo direto de distribuição de energia com uma impedância característica (Z_L) com cerca de 450 no receptor e transmissor, e uma impedância característica (Z_L) de aproximadamente 700 na ramificação (próximo ao usuário) [3][6][34].

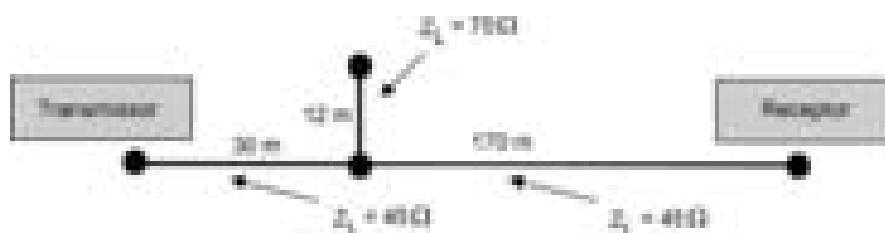


Figura 3.6 – Topologia de uma rede de distribuição de energia elétrica [5]

A atenuação dos condutores de uma rede de baixa tensão depende da topologia da rede, das cargas conectadas a ela, da distância entre o transmissor e o receptor e da frequência utilizada no enlace. As junções dos cabos, os transformadores, os medidores de energia, a entrada e saída de cargas e as topologias das redes provocam grandes variações de carga nas

redes e formam múltiplos pontos de reflexão, tornando o ambiente dinâmico e repleto de ecos. Além disso, os transformadores e medidores de energia são elementos de bloqueio para sinais de alta frequência, que necessitam de elementos *by-pass* para a propagação de sinais [8][9].

3.1 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 em um sistema abrangendo transmissão em média e baixa tensão. 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 3.7 ilustra as faixas de frequência utilizadas pelo sistema PLC, a faixa de frequência utilizada vai de 4,49MHz a 20,7MHz [2][19].

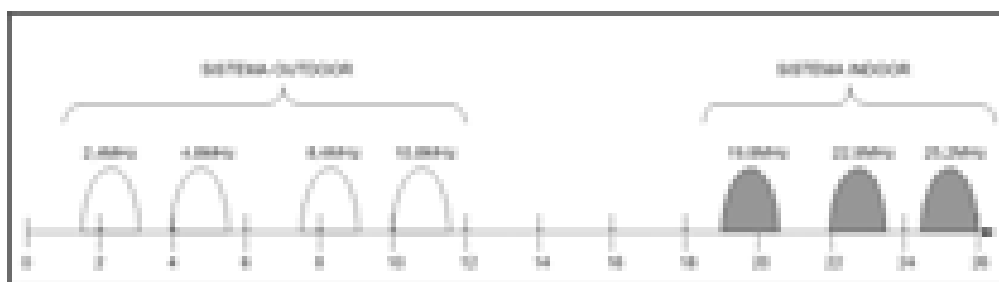


Figura 3.7 – Faixas de Frequência utilizadas na Rede PLC [2]

Como ainda não existe um padrão reconhecido mundialmente, os produtos oferecidos pelos diversos fabricantes não são compatíveis entre si e, conseqüentemente, o sinal transmitido por um equipamento de uma tecnologia é interpretado como ruído por equipamento de outra tecnologia, degradando a relação sinal/ruído do enlace, inviabilizando a comunicação e desempenho da rede [2].

A Tabela 3.4 apresenta algumas das principais aplicações de comunicação e suas respectivas frequências de operação [3].

Tabela 3.4 – Aplicações e respectivas faixas de frequência

Aplicação	Faixa de Frequência
Rádio AM (<i>Amplitude Modulation</i>)	535kHz a 1,7MHz
Rádio de Ondas Curtas	5,9MHz a 26,1MHz
Rádio CB (<i>Citizen Band</i>)	26,96MHz a 27,41MHz
Televisão	54MHz a 88MHz (para canais 2 até 6)
Rádio FM (<i>Frequency Modulation</i>)	88MHz a 108MHz
Televisão	174MHz a 220MHz (para canais 7 até 13)

A atual regulamentação em estudo pela ETSI/CENELEC indica as seguintes faixas de frequências:

- De 1MHz a 10/13MHz para o segmento de Acesso;
- De 10/13MHz a 30MHz para o segmento *In-home*.

As normas da FCC emitidas durante o ano de 2004 incluem uma lista de faixas de frequência que os sistemas BPL não podem utilizar, devido a potenciais interferências que podem causar em outros sistemas de rádio licenciados, como mostra a Tabela 3.5 [3].

Tabela 3.5 – Faixas de frequência não autorizadas para uso por sistemas BPL

Faixas de Frequência Excluídas (em MHz)
2,850 – 3,025
3,400 – 3,500
4,650 – 4,700
5,450 – 5,680
6,525 – 6,685
8,815 – 8,965
10,005 – 10,100
11,275 – 11,400
13,260 – 13,360
17,900 – 17,970
21,924 – 22,000
74,8 – 75,2

Invertendo a lista de faixas de frequência excluídas, pode-se obter a lista de faixas de frequência de transmissão autorizadas pela FCC para operação de sistemas BPL, como mostra a Tabela 3.6 [3].

Tabela 3.6 – Faixas de frequência autorizadas para uso de sistemas BPL

Faixas de Frequência Autorizadas (em MHz)
1,705 a 2,850
3,025 a 3,400
3,500 a 4,650
4,700 a 5,450
5,680 a 6,525
6,685 a 8,815
8,965 a 10,005
10,100 a 11,275
11,400 a 13,260
13,360 a 17,900
17,970 a 21,924
22,000 a 74,800
75,200 a 80,000

Em 13 de abril de 2009, a ANATEL publicou a Resolução 527, que aprova o Regulamento sobre Condições de Uso de Radiofrequências por Sistemas de Banda Larga por

meio de Redes de Energia Elétrica (BPL), e que estabelece alguns critérios e parâmetros técnicos que permitem a utilização dessa tecnologia, de forma harmônica com aplicações de radiocomunicação que utilizam radiofrequência na faixa entre 1.705kHz e 50MHz, que cobre parte das MF (*Medium Frequencies*), todo HF (*High Frequencies*) e parte do VHF (*Very High Frequencies*) [1][35].

De acordo com a Resolução 527, a operação do sistema BPL em RMT (Rede de distribuição de Média Tensão) não poderá provocar radiações indesejadas nas faixas de exclusão listadas na Tabela 3.7, que abrangem faixas de radiofrequências atribuídas ao Serviço Móvel Aeronáutico e Radioamador [35].

Tabela 3.7 – Faixa de Frequências excluídas para a comunicação BPL em RMT

Faixas de Frequência Excluídas (em MHz)
2,754 – 3,025
3,400 – 3,500
4,453 – 4,700
5,420 – 5,680
6,525 – 6,876
6,991 – 7,300
8,815 – 8,965
10,005 – 10,123
11,275 – 11,400
13,260 – 13,360
13,927 – 14,443
17,900 – 17,970
21,000 – 21,450
21,924 – 22,000
28,000 – 29,700

Na faixa de radiofrequências de 2,1735MHz a 2,1905MHz, e dentro das zonas de proteção de estações terrestres, na faixa de radiofrequências de 1,705MHz a 30MHz, fica vedada a operação de quaisquer sistemas BPL [35].

Em 25 de agosto de 2009 foi a vez de a ANEEL aprovar sua Resolução Normativa 375, que visa regulamentar a utilização das instalações de distribuição de energia elétrica como meio de transporte para a comunicação digital ou analógica de sinais [1].

3.2 RELAÇÃO SINAL-RUÍDO (SNR)

O ruído é uma designação para sinais indesejáveis que aparecem no meio de transmissão, distorcendo os sinais de informações. As fontes emissoras desses ruídos são inúmeras, entre as quais são enumeradas algumas: aparelhos eletrodomésticos providos de motor com escovas (secador de cabelo, liquidificador); aparelhos industriais (furadeira

elétrica, serra, solda elétrica), entre outros, cada qual com suas características próprias, e que podem atuar de modos diferentes em sinais PLC. Em sistemas de transmissão digital, o desempenho da rede é medido através da probabilidade de ocorrerem erros de bit (BER – *Bit Error Rate*) [3][14].

A atenuação nas linhas de energia atinge valores elevados (mais de 100 dB) e há restrição na distância entre o transmissor e o receptor. Várias investigações e medições demonstraram que os ruídos nos sistemas PLC não são do tipo AWGN (Ruído Gaussiano Branco Aditivo), podendo ser classificados em cinco categorias: ruído de fundo colorido, ruído de banda estreita, ruído impulsivo periódico e assíncrono, ruído impulsivo periódico síncrono e ruído impulsivo assíncrono [3][17].

- 1) Ruído de fundo colorido – é causado pelo somatório de várias fontes de ruídos de baixa potência. Tem como característica uma DEP (Densidade Espectral de Potência) que, apesar de, na média, não atingir valores consideráveis, diminui com a frequência, além de variar no tempo em cerca de minutos ou até de horas.
- 2) Ruído de banda estreita – é ocasionado pelo fato de a faixa de frequência utilizada pelos sistemas de comunicação PLC (1MHz a 30MHz) ser a mesma faixa de frequência utilizada pelas bandas de rádio de ondas curtas, entre outras. A rede PLC está susceptível ao ingresso de todas estas rádios como interferência, principalmente nas redes aéreas de média e baixa tensão.
- 3) Ruído impulsivo periódico e assíncrono com a frequência de 60Hz – possui uma taxa de repetição entre 60kHz e 240kHz, e são causados principalmente por fontes chaveadas.
- 4) Ruído impulsivo periódico síncrono com a frequência de 60 (50)Hz – apresenta impulsos de curta duração (alguns μ s) e possui uma DEP que cai com o aumento da frequência. É ocasionado por fontes de alimentação, principalmente devido à ponte retificadora de diodos.
- 5) Ruído impulsivo assíncrono – é ocasionado por chaveamentos na rede elétrica. Estes impulsos duram desde alguns microssegundos até poucos milissegundos e possuem DEPs com componentes de frequência que podem atingir 50dB acima do ruído de fundo.

As três primeiras categorias são usualmente classificadas como ruído de fundo, pois normalmente permanecem estacionários por períodos de segundos ou até mesmo de horas e,

os dois últimos, como ruído impulsivo, possuindo uma DEP que varia muito em instantes de microssegundos a milissegundos [3][17].

O impulso síncrono é provocado principalmente por *dimmers*. O impulso não síncrono ou tonal é provocado por fontes de alimentação chaveadas (*Switching Power Supplies*), como computadores, com sinal rico em harmônicos, sendo a frequência fundamental destes dispositivos entre 10kHz e 1MHz. O impulso de alta frequência é gerado por equipamentos que utilizam motor universal, que geram impulsos na faixa de muitos *kilohertz*. O impulso de apenas uma ocorrência ocorre no simples ato de ligar e desligar aparelhos eletro-eletrônicos. Existem ainda ruídos causados por fontes externas de ondas de rádio, como por exemplo, babás eletrônicas e rádios FM [14][17].

O ruído impulsivo é o que mais afeta o canal PLC, tendo como características a curta duração, a ocorrência randômica e uma elevada densidade espectral de potência, podendo ser formulado como:

$$i_k = b_k g_k \quad (14)$$

onde b_k é um processo Poissoniano que caracteriza a chegada do ruído, e g_k é um processo Gaussiano com média zero e variância σ^2 . Este modelo pode ser fisicamente interpretado como “cada símbolo transmitido tem uma probabilidade b_k de ser afetado por um ruído impulsivo de amplitude randômica g_k ” [3][36].

Alguns autores caracterizam o ruído impulsivo por meio de parâmetros, os quais são extraídos de observações de seu comportamento no domínio do tempo (amplitude máxima, duração e tempo entre ocorrência dos ruídos impulsivos), como mostra a Figura 3.8 [36].

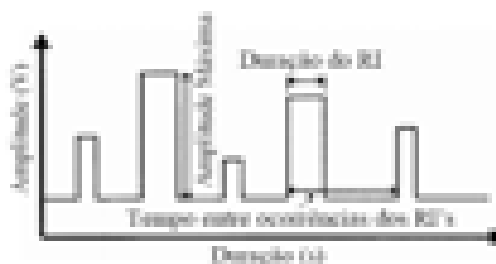


Figura 3.8 – Parâmetros Temporais do Ruído Impulsivo [36]

Para se determinar a capacidade teórica de transmissão de dados via rede elétrica, utiliza-se a fórmula de *Shannon* [6], que relaciona a capacidade do canal com a largura de banda e a relação sinal-ruído (SNR) do canal. De acordo com o Teorema Fundamental de *Shannon*, se a taxa de transmissão (R [bits/s]) da informação a ser enviada pelo canal é menor que a capacidade do canal (C [bits/s]), então a comunicação através do canal pode ser

estabelecida com uma probabilidade de erro tão baixa quanto se deseje, através do uso de um código adequado para correção de erros.

Conforme já citado, o sinal PLC é um sinal multiportadora, e considerando esse fato, a capacidade teórica de um meio não mais dependerá da relação sinal/ruído de um único canal, e sim, das várias relações sinal/ruído de cada canal.

Para o canal sem a presença de ruído (caso ideal), cuja limitação é apenas a largura de banda do canal, tem-se o Teorema de *Nyquist*, que diz que com certa largura de banda B para o sinal, a taxa de amostragem mínima do sinal deve ser de $2B$. Em um canal com ruído, para certo nível de ruído, quanto maior a taxa de dados, maior a taxa de erro. Pela Lei de *Shannon*, tem-se [6][37][38]:

$$C_{m\acute{a}x} [bps] = B[Hz] \log_2(1 + SNR) \quad (15)$$

onde SNR indica a relação entre a potência do sinal e a potência do ruído na entrada do receptor, medida em dB (decibel). No caso da SNR, mede-se a intensidade do ruído presente na saída do equipamento, sem sinal na entrada, e depois a intensidade do maior sinal que pode ser aplicado sem distorção. A Lei de *Shannon* só leva em consideração o ruído branco.

3.3 COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA (EMC)

Quando se trata de redes PLC, outro fator que se deve considerar é a compatibilidade eletromagnética (CEM) ou EMC⁵ (*Electromagnetic Compatibility*), que visa garantir o funcionamento correto de um equipamento, aparelho ou dispositivo, já que o meio utilizado para a transmissão de dados é a rede elétrica. A CEM é um assunto ainda praticamente desconhecido no Brasil, mas que ganhou estatura jurídica e legal pelo mercado europeu, que adotou a Diretiva CEM 89/336/EEC e a marca ou selo CE (Comunidade Européia). Os Estados Unidos exigem conformidade dos produtos importados com as normas da FCC (*Federal Communication Commission*) [8][39].

Não existem normas próprias de CEM no Brasil, o que existe são diversas comissões criadas pela ABRICEM (Associação Brasileira de Compatibilidade Eletromagnética) a fim de

⁵ Aptidão de um dispositivo, de um aparelho ou de um sistema de funcionar em seu ambiente eletromagnético de modo satisfatório e sem produzir ele próprias perturbações eletromagnéticas que possam criar problemas graves no funcionamento dos aparelhos ou dos sistemas situados em seu ambiente [8].

estabelecer requisitos técnicos e normas para Interferência Eletromagnética⁶ (IEM). As normas brasileiras publicadas inicialmente foram versões traduzidas e adaptadas das normas europeias do Comitê Internacional Especial para as Perturbações Radioelétricas (CISPR). Em novembro de 2000 a Anatel publicou a Resolução 237 relativa à certificação de equipamentos de telecomunicação, considerando-se os aspectos de Emissão, Imunidade e Resistibilidade. Para a homologação em CEM pela Anatel, foram considerados como requisitos de emissão [8]:

- Emissão de perturbações radiadas a partir de 30MHz (CISPR 22);
- Emissão de perturbações radiadas a partir da rede.

Têm-se como requisitos de imunidade:

- Descarga eletrostática – ESD (IEC 61000-4-2);
- Perturbações de RF radiadas (IEC 61000-4-3);
- Transientes rápidos (IEC 61000-4-4);
- Surto (IEC 61000-4-5);
- Perturbações de RF conduzida (IEC 61000-4-6);
- Variações e interrupções de CA (IEC 61000-4-11).

A normalização da CEM deve considerar os seguintes aspectos:

- Elemento que gera a perturbação (fonte);
- Elemento submetido a perturbação (vítima).

Os equipamentos de Tecnologia da Informação (TI), de acordo com os níveis de interferência eletromagnéticas são classificados em Classes A e B. Os equipamentos de Classe A são utilizados em aplicações industriais, e os de Classe B são equipamentos utilizados geralmente em áreas residenciais e comerciais. Assim, equipamentos PLC quando utilizados para aplicações internas em residências são classificados como Classe B. Os limites para Classe B são mais rígidos do que os para Classe A, devido a pouca distância existente entre equipamentos em operação simultânea em ambientes residenciais e comerciais [31].

Os regulamentos da CEM são classificados em dois conjuntos: regulamentos do campo condutor elétrico e regulamentos do campo de radiação elétrica.

⁶ Processo onde a energia eletromagnética perturbadora é transmitida de um dispositivo, equipamento ou sistema para um outro, via caminhos Irrradiados e/ou Conduzidos. No uso comum, as interferências eletromagnéticas se referem aos sinais de rádio frequências [8].

Quando modems de linhas elétricas usam o circuito elétrico como um meio de comunicação, onde diretamente são conectados com a maioria dos aparelhos elétricos e eletrônicos, os sinais de comunicação podem vazar em todos os outros aparelhos conectados via rede elétrica, mas, no entanto, normalmente os sinais de comunicação não prejudicam a operação da maioria dos aparelhos elétricos [8].

Por outro lado, o sinal de comunicação é normalmente um sinal de alta frequência e pode interferir na operação de sistemas de comunicação, como rádio, televisão, dispositivos digitais e outros. Esses tipos de sistemas são equipados com filtros CEM na sua conexão de circuito elétrico para atenuar qualquer componente de um sinal de alta frequência vindo de um sinal elétrico de 110/220V, que oferecem uma perda ao redor de 100dB no intervalo de variação de frequência de poucos kHz até poucos GHz [8].

Em relação ao campo elétrico radiado, este pode gerar problemas sérios para os sistemas de comunicação na mesma faixa de frequência. Esses sistemas são concebidos para detectar pequenos níveis de sinais recebidos. Por causa da relativa longa distância das linhas elétricas comparadas com o comprimento da onda transmitida por sinais de comunicação, redes elétricas se tornam boas antenas [8].

As estações do sistema BPL são tratadas como equipamentos de radiação restrita e operam em caráter secundário. A faixa da frequência permitida para operação de um sistema de comunicação com rede elétrica é entre 10kHz a 30MHz, de acordo com o *United States of America Federal Communications*. De acordo com a ANATEL, em resolução nº 527 de 8 de abril de 2009, as distribuidoras de energia elétrica poderão utilizar o espectro de 1,705MHz a 50 MHz para oferecer banda larga pela rede elétrica (PLC/BPL), sem interferir em nenhuma das 15 faixas de frequência da Aeronáutica [8][35].

A CEM dos sistemas PLC com serviços de radiocomunicação trata-se de um problema bidirecional [31]:

1. Campos eletromagnéticos gerados por rádios transmissores induzem tensões ou correntes nas redes de energia elétrica, tanto de média quanto de baixa tensão, interferindo na comunicação PLC;
2. Sinais PLC irradiam campos eletromagnéticos que poderão vir a interferir nos rádios receptores, conduzindo sinais que poderão interferir no funcionamento de outros sistemas alimentados pela mesma rede.

Na Europa, o CENELEC, através do padrão EM 50065-1, regulamentou a CEM para um intervalo de baixa frequência, ou seja, as faixas das frequências e os níveis dos sinais são

especificados em um intervalo de frequência de 3kHz a 148,5kHz (EN 50065-1). Nos Estados Unidos, a norma FCC Parte 15 especifica o nível do sinal no intervalo da frequência de 10kHz a 450kHz [8].

3.4 MODULAÇÃO DO SINAL NO CANAL PLC

Existem diferentes técnicas ou opções de modulação para acoplar o sinal ao canal de comunicação. Há uma extensa variedade e cada qual com suas vantagens. As três mais difundidas são: GMSK, Espalhamento Espectral e OFDM. Em sistemas PLC, a técnica de modulação mais utilizada é a MCM (*Multicarrier Modulation* – Modulação Multiportadoras). Contudo, a técnica de modulação multiportadoras mais eficiente é a Multiplexação por Divisão de Frequência Ortogonal (OFDM), que é usada para a transmissão de dados em canais PLC, redes sem fio e radiodifusão [3][8][12].

O canal PLC tem a característica de ser seletivo à frequência, devido à característica multipercurso das redes de transmissão de energia, e por isso, é necessário que se aplique uma técnica de modulação eficiente. Por permitir a transmissão de dados através de várias sub-portadoras independentes, a técnica de modulação OFDM tem sido uma boa alternativa para a transmissão de dados sobre o canal PLC [3][12].

3.4.1 *Gaussian Minimum Shift Keying (GMSK)*

A modulação GMSK é bastante robusta contra interferências de faixa estreita. O GMSK é um tipo especial de modulação de faixa estreita que transmite os dados por meio de variação da fase da portadora, resultando um sinal de envelope constante, permitindo o uso de amplificadores menos complexos, sem produzir distúrbios harmônicos. A modulação GMSK reduz a complexidade dos sistemas tornando seu custo muito baixo em relação a outras modulações existentes com desempenhos semelhantes. Seu desenvolvimento é baseado na modulação MSK (*Minimum Shift Keying*), que é uma técnica de FSK (*Frequency Shift Keying*) com índice de modulação (m) igual a 0,5 [2][6].

3.4.2 *Espalhamento Espectral (Spread Spectrum)*

O Espalhamento Espectral ou *Spread Spectrum* (SS) inicialmente era utilizado para desenvolvimento de sistemas de comunicação militares. Seu nome deriva do fato de que a largura de banda utilizada para a transmissão do sinal é muito maior do que a largura de banda mínima necessária se fosse utilizado somente uma portadora de frequência única.

O espalhamento espectral, como mostra a Figura 3.9, distribui a potência do sinal ao longo de uma faixa de frequências muito ampla, fazendo com que a densidade espectral seja baixa. A transmissão de altas taxas de bits requer muita largura de banda. Este tipo de modulação é ideal para transmitir taxas de dados mais baixas nos cabos de energia elétrica [2][3][6].

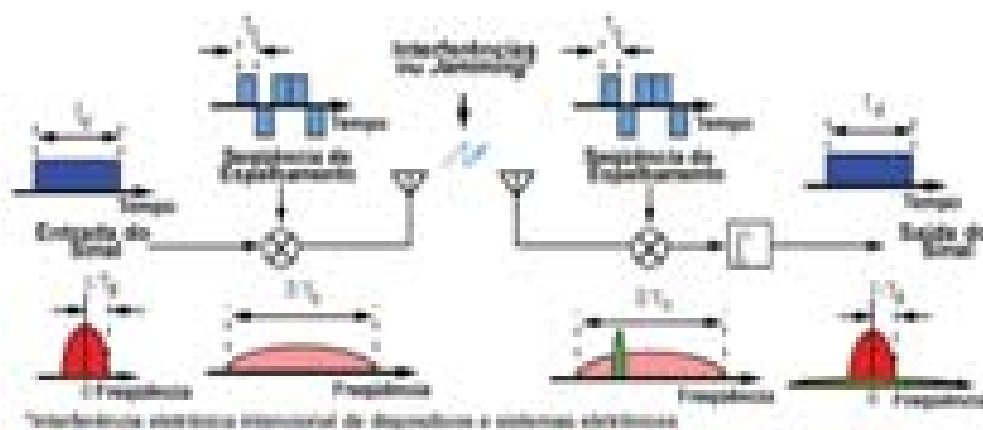


Figura 3.9 – Espalhamento Espectral

Os sistemas *spread spectrum* podem ser [3][6]:

- FH-SS (*Frequency Hopping – Spread Spectrum*): a faixa total do canal de transmissão é dividida em diversos sub-canais de faixa estreita. O sistema comuta rapidamente entre eles segundo uma seqüência pseudo-aleatória conhecida pelo transmissor e pelo receptor.
- DS-SS (*Direct Sequence – Spread Spectrum*): um canal de faixa larga (maior que 1MHz) é utilizado para que todos transmitam a uma taxa alta de símbolos segundo uma seqüência que segue um código pseudo-aleatório pré-definido. Este código é uma seqüência binária gerada a uma freqüência muito maior que o dado a ser transmitido, espalhando o sinal no domínio da freqüência. Ao ser recebido o sinal é filtrado segundo a mesma seqüência.

3.4.3 *Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)*

No canal PLC, a modulação OFDM é a que melhor se comporta, e vem sendo utilizada por todas as empresas que desenvolvem *chips* PLC de banda larga por causa de sua capacidade de se adaptar a qualquer tipo de atenuação de canal e usufruir máximo possível deste canal [3][16][36].

Na modulação OFDM são utilizadas várias portadoras, uma ao lado da outra, ortogonais entre si, com taxa de transmissão em cada portadora podendo variar de acordo com a SNR do canal, através da técnica de carga de bits (*bit loading*). A modulação OFDM utiliza uma IFFT (*Inverse Fast Fourier Transform*) para modular o sinal e uma FFT (*Fast Fourier Transform*) para demodulá-lo [3] [36].

Antes da transmissão, a informação é dividida em um grande número de subcanais com baixa taxa de transmissão de *bits*, usados para modular as portadoras ortogonais individuais, de maneira que a duração do símbolo correspondente se torne maior do que o atraso de propagação dos canais de transmissão. As subportadoras são posicionadas de forma que os zeros de cada uma coincida com os das outras, como mostra a Figura 3.10 [28].

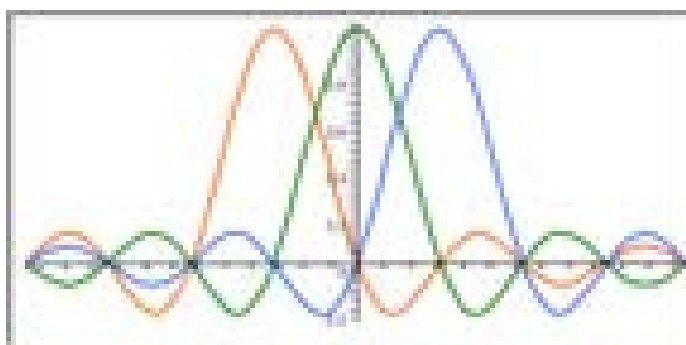


Figura 3.10 – Distribuição de 3 subportadoras utilizando a técnica OFDM [28]

A modulação OFDM, como mostra a Figura 3.11, utiliza um grande número de portadoras de faixa estreita, distribuídas bem próximas ou lado a lado, sendo possível suprimir as portadoras interferentes ou variar o número de bits de acordo com a relação Sinal/Ruído [3][6][8].

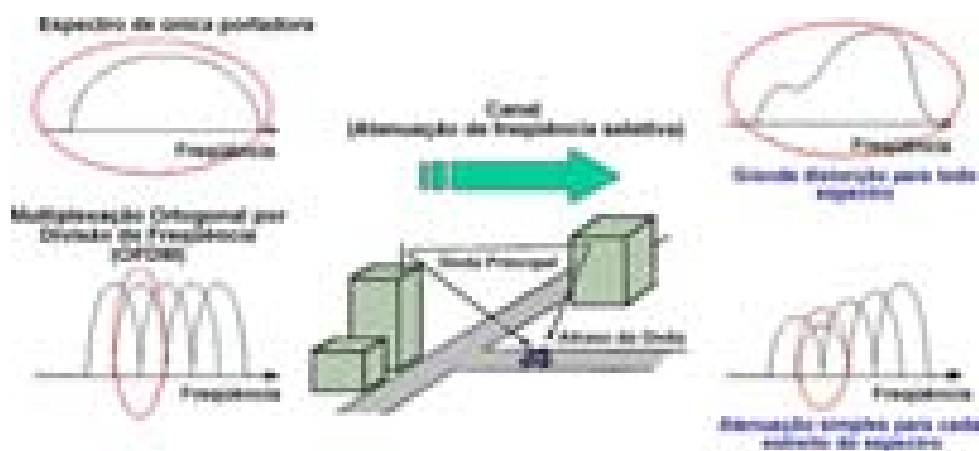


Figura 3.11 – Modulação OFDM

A multiplexação por divisão de frequência ortogonal consiste em um grande número de portadoras estreitas distribuídas, lado a lado. As portadoras devem ser matematicamente ortogonais (linearmente independentes) no domínio do tempo. Esta modulação se adapta às características de variação do canal, com portadoras interferidas eliminadas, e havendo a correspondente diminuição na taxa de transmissão [3][5][8]

O grande diferencial do uso da modulação OFDM na tecnologia PLC está na forma como é controlada essa modulação. As frequências são monitoradas em tempo real, com o sistema alternando o carregamento dos sinais de acordo com a presença ou não de ruídos. Conforme o ruído se propaga pelas diversas frequências, os sinais são carregados e transmitidos (modulados) em várias frequências simultâneas, com níveis de carregamento diferentes, aproveitando melhores condições possíveis do enlace, garantindo altas taxas de transmissão, bom desempenho e confiabilidade, com o sistema podendo facilmente se adaptar às mudanças das condições de transmissão da rede elétrica, utilizando ainda filtros para a proteção de serviços especialmente sensíveis a esses tipos de interferências [2][3].

A modulação OFDM vem sendo utilizada para a televisão digital da Europa, Japão e Austrália, para serviços de áudio em *broadcast* na Europa e em transmissões de redes sem fio (*wireless*).

Como desvantagens da modulação OFDM, podem-se citar [8]:

- Necessidade de um amplificador de potência altamente linear, para evitar as interferências nas faixas de frequências mais elevadas devido aos harmônicos das portadoras, gerados na faixa não-linear do amplificador de potência;
- Dificuldade de sincronismo da portadora;
- A modulação é eficiente somente se o bloco de informação for muito maior que o prefixo cíclico a ser enviado;
- Há perda da ortogonalidade quando a resposta de frequência varia enquanto o símbolo OFDM está sendo transmitido naquele canal.

3.5 UTILIZAÇÃO DO OFDM E FORMATO DOS QUADROS EM REDES PLC (PADRÃO HOMEPLUG)

O padrão *HomePlug* 1.0 também utiliza a modulação OFDM, onde divide a faixa de 0 a 25MHz em 128 subportadoras igualmente espaçadas, das quais são utilizadas apenas 84. Para evitar interferência com as frequências de rádio-amadores, 8 subportadoras podem ser

desabilitadas, restando então 76 subportadoras. Cada símbolo OFDM é composto por 256 amostras do sinal. Para evitar interferências inter-simbólicas, as últimas 172 amostras das 256 obtidas durante o intervalo utilizado pela transformada inversa de Fourier são usadas como prefixo cíclico. Essas 172 amostras são repetidas e anexadas ao final das 256 originais formando um símbolo OFDM de 428 amostras. Cada símbolo OFDM tem duração de 8,4 μ s, sendo 5,12 μ s correspondentes ao símbolo OFDM propriamente dito e 3,28 μ s ao prefixo cíclico [24][26][38].

Para dar suporte à qualidade de serviço, o padrão *HomePlug* utiliza sinais de resolução de prioridade (*Priority Resolution Signal* - PRS) antes da transmissão dos quadros físicos. Os PRSs determinam que fluxos que terão prioridade de acesso ao meio. Para resolver a prioridade são transmitidos 2 sinais OFDM (PRS0 e PRS1). Cada sinal é composto por 6 símbolos OFDM especiais com 30,72 μ s de duração mais um intervalo de processamento de 5,12 μ s compondo um intervalo de 35,84 μ s [24][38].

Um quadro físico do *HomePlug* (*Physical Protocol Data Unit* - PPDU), como mostra a Figura 3.12, é composto pelos dados recebidos da subcamada MAC cercados por delimitadores, um de início e outro de final de quadro. Os delimitadores são formados por um preâmbulo (7,5 símbolos especiais OFDM sem prefixo cíclico) e um campo de controle de quadro. O preâmbulo é utilizado para controle automático de ganho (*Automatic Gain Control* - AGC), sincronização, referência de fase para a decodificação do campo de controle de quadro, detecção física de portadora (*Physical Carrier Sense* - PCS) e ajuda na determinação do tamanho do intervalo de tempo usado pela subcamada MAC [18][24].

O quadro físico longo é formado por um delimitador de início de quadro, pelo campo de dados, por um intervalo de tempo EFG (*Endof-Frame Gap*) e pelo delimitador de final de quadro. O EFG é um atraso de 1,5 μ s para processamento do quadro recebido. O quadro físico longo é usado para o envio de dados e o quadro curto é usado para o envio das confirmações de recepção [18].

Tanto o preâmbulo quanto os sinais de resolução de prioridade são utilizados durante a fase de detecção física de portadora (PCS), usada pelas estações para reconhecimento de uma transmissão corrente. Caso o transmissor deseje uma resposta, o receptor espera por um RIFS (*Response InterFrame Space*), que é um intervalo de tempo entre o final da recepção do quadro e a transmissão da resposta. Por ser o menor dos espaços entre quadros (26,0 μ s), o envio das respostas tem prioridade em relação ao envio de dados [18].

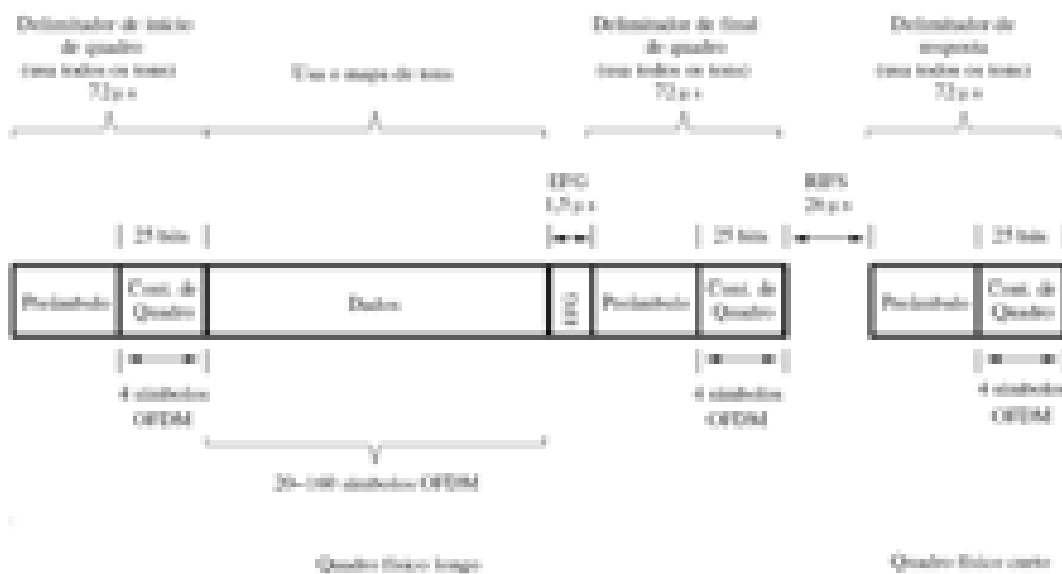


Figura 3.12 – Formato do quadro físico (PPDU) no padrão HomePlug [18]

A estimação do canal define quais as subportadoras são utilizadas, qual a modulação e qual a taxa do código corretor de erro são empregadas, o que definem o mapa de tons (*Tone Maps* - TM) utilizado no campo de dados do quadro transmitido e são enviadas para o conhecimento das outras estações através do índice do mapa de tons (*Tone Maps Index* - TMI). O *HomePlug* 1.0 utiliza uma função de controle de estimação do canal para esse fim. Essa função é definida por um protocolo de gerenciamento definido pelo padrão. Em intervalos de 5 minutos em média, cada estação requisita informações a respeito da situação do canal. Os mapas de tons não são utilizados em delimitadores, preâmbulos ou símbolos de resolução de prioridade, pois esses utilizam um mapa conhecido a priori por todos os nós da rede [18][24].

O comprimento do quadro transmitido é outra informação definida no delimitador de início de quadro no campo de controle. Essa informação é utilizada pela camada física para indicar por quanto tempo devem ser utilizadas a modulação e a codificação corrente antes de começar uma nova busca por outro preâmbulo [18].

A carga útil do quadro *HomePlug* consiste de um número de blocos de 20 ou 40 símbolos OFDM, codificados a partir de códigos de erro convolucionais e *Reed-Solomon* concatenados.

Conforme a Figura 3.13, todos os delimitadores consistem de preâmbulo, mais 1 bit para controle de contenção, seguido por 3 bits do tipo de delimitador, de 13 bits do campo variável e mais 8 bits para verificação do controle de quadro e detecção de erros (*Frame*

Check Sequence - FCS). O FCS do campo de controle é um CRC (*Cyclic Redundancy Check*) de 8 bits dos outros 17 bits do campo de controle de quadro [18].

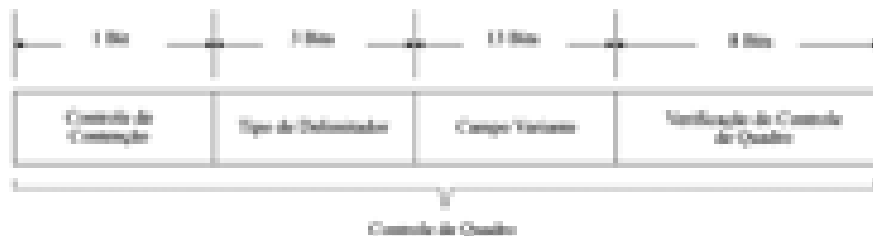


Figura 3.13 – Campo de controle de quadro no padrão HomePlug [18].

O formato do quadro da camada MAC do *HomePlug* é idêntico ao *Ethernet* e, portanto, encapsula dados de 46 a 1500 octetos vindos da camada superior, como mostra a Figura 3.14 [18].



Figura 3.14 – Quadro da camada MAC [18]

O padrão *HomePlug* AV utiliza a modulação OFDM *windowed* e TCC (*Turbo Convolutional Code*) para alcançar um desempenho por volta de 0,5dB da Capacidade de *Shannon* [18]. A camada MAC do padrão *HomePlug* AV suporta tanto TDMA (*Time Division Multiple Access*), quanto CSMA (*Carrier Sense Multiple Access*) baseado em acesso com sincronização de ciclo de linha AC. O acesso TDMA provê garantia de QoS (Qualidade de Serviço), incluindo garantia de reserva de banda, alta confiabilidade e controle de latência e variação de atraso (*jitter*). O acesso CSMA provê quatro níveis de prioridade. Um gerenciador central, denominado CCo (*Central Coordinator*) controla as atividades da rede, alocando tempo para uso do CSMA e planejando o uso do TDMA [24].

CAPÍTULO 4 - ESPECIFICAÇÃO DE CLASSES E REQUISITOS DE SERVIÇOS EM TELECOMUNICAÇÕES

Poucas áreas, como Redes de Computadores e Telecomunicações apresentaram tanto desenvolvimento em um período tão curto de tempo. A relação de distância entre pessoas no mundo está a cada dia mais imperceptível, principalmente em se tratando de comunicação.

No Brasil, os serviços de telecomunicações tiveram um forte incentivo com o processo de privatização e regulamentação, ocorrido a partir da Emenda Constitucional nº 8 de 15 de agosto de 1995. Esta emenda abriu a possibilidade de exploração dos serviços telefônicos, telegráficos, de transmissão de dados e demais serviços públicos de telecomunicações por meio de concessão, permissão ou autorização concedida pela União a empresas privadas, nos termos da lei, conhecida como Lei Geral de Telecomunicações (LGT) ou Lei nº 9.472/97 [10].

As redes PLC surgem como mais uma opção de conectividade em banda larga, além dos sistemas wireless, de satélite e cabos coaxiais das operadoras de TV por assinatura, principalmente devido à grande demanda por serviços de telecomunicações. A tecnologia PLC transforma a rede elétrica de prédios e residências em uma verdadeira LAN (*Local Area Network*), convertendo cada tomada de energia também em pontos de dados e voz. Com a tecnologia PLC o usuário poderá ligar ou desligar fogões, televisores, iluminação, ar condicionado e outros eletrodomésticos, através da *Internet*. A grande vantagem é que a tecnologia PLC possui uma capilaridade muito superior à das atuais operadoras de telecomunicações [3][13]. Pode-se utilizar tanto a rede PLC pura quanto híbrida, integrando PLC com outras tecnologias de acesso, por exemplo, redes sem fio ou *Ethernet*.

A tecnologia PLC pode ser uma possível solução sem novos fios onde fica inviável a utilização de outras tecnologias de transmissão de dados. Por exemplo, em edifícios antigos, tombados como Patrimônio Histórico da Humanidade, as paredes são muito espessas, o que prejudica a utilização de redes sem fio. Fica também inviável a utilização de cabeamento estruturado, pois não se podem modificar as estruturas desses edifícios. Para esse cenário, a tecnologia PLC seria uma solução ideal.

Sabe-se que a evolução dos sistemas de telecomunicações passa pela análise de parâmetros como: desempenho, custo, facilidade de uso e adequação para a aplicação que se deseja trabalhar [40]. Neste capítulo serão tratados vários aspectos de requisitos de serviços de telecomunicações os quais podem ser providos por uma rede PLC.

4.1 QUALIDADE DE SERVIÇO (QoS)

O termo largura de banda está relacionado a largura de faixa do espectro de frequência ocupada pelo sinal eletromagnético, em torno de uma frequência central (portadora). Este termo está diretamente relacionado, através da fórmula de *Shannon*, à taxa de dados que o enlace da rede pode transferir. A largura de faixa fornecida às aplicações tem impacto direto no desempenho da rede. Aplicações sensíveis a retardo se beneficiam com menores retardos providos por maiores faixas [37][41].

Estimar a largura de banda em uma rede de computadores é necessário para aplicações multimídia, para mecanismos de provisão de QoS e para protocolos de controle e reserva de recurso. Métodos largamente usados em redes sem fio ou redes cabeadas tradicionais não são aplicáveis em redes PLC [38]. Um dos fatores que contribuem para essa dificuldade na estimação da largura de banda em redes PLC é a frequente mudança na estrutura e na topologia dessas redes, através da adição ou remoção de equipamentos, usuários ou cabos de energia que causam reflexões e mudança nas características e topologia da rede [6].

O termo “Qualidade de Serviço” (QoS) é, atualmente, um tópico difícil de se definir em redes de computadores, pois em geral, há diferentes interpretações para este conceito [42]. Por exemplo, na visão da ISO (*International Organization for Standardization*), QoS é definida como o efeito coletivo do desempenho de um serviço, o qual determina o grau de satisfação de um usuário do serviço.

Em um sistema multimídia distribuído a qualidade de serviço pode ser definida como a representação do conjunto de características qualitativas e quantitativas de um sistema multimídia distribuído, necessário para alcançar a funcionalidade de uma aplicação. Em redes de computadores, QoS é utilizado para definir o desempenho de uma rede relativa às necessidades das aplicações, como também o conjunto de tecnologias que possibilita às redes oferecer garantias de desempenho. Em um ambiente compartilhado de rede, QoS necessariamente está relacionada à reserva de recursos. QoS pode ser interpretada como um método para oferecer alguma forma de tratamento preferencial para determinada quantidade de tráfego da rede [42].

No âmbito do IETF (*Internet Engineering Task Force*), há basicamente cinco abordagens para o oferecimento de QoS na *Internet*: A Arquitetura de Serviços Integrados (*IntServ*), que utiliza o protocolo RSVP para reserva de recursos, A Arquitetura de Serviços Diferenciados (*DiffServ*), MPLS (*Multiprotocol Label Switching* - Comutação de Rótulos Multiprotocolo), Roteamento com QoS e Engenharia de Tráfego [42][43].

A junção dos termos *qualidade* e *serviço* pode dar margem a várias interpretações e definições diferentes. No entanto, existe um certo consenso, que aparece em praticamente todas as definições de QoS, que é a capacidade de diferenciar entre tráfego e tipos de serviços, para que o usuário possa tratar uma ou mais classes de tráfego diferente das demais. O modo como isso pode ser obtido e os mecanismos utilizados variam, dando origem a duas expressões freqüentemente utilizadas: Classes de Serviço (CoS) diferenciados e a mais genérica e ambígua Qualidade de Serviço (QoS) [42].

Algumas pessoas podem argumentar que os dois termos, QoS e CoS, são sinônimos, mas existem diferenças sutis. QoS tem uma conotação ampla e abrangente. CoS significa que serviços podem ser categorizados em classes, onde têm um tratamento diferenciado dos demais. O principal conceito relacionado à CoS é a diferenciação. QoS algumas vezes é utilizado em um sentido mais específico, para designar serviços que oferecem garantias estritas com relação a determinados parâmetros (como largura de banda e atraso) a seus usuários. Podemos, então, classificar QoS de acordo com o nível de garantia oferecido [42][43]:

- *QoS baseado em reserva de recursos, ou rígido*, que oferece garantias para cada fluxo individualmente (esse é o tipo de QoS apresentado acima);
- *QoS baseada em priorização, ou flexível*, onde as garantias são para grupos, ou agregações de fluxos. Nesse caso, cada fluxo individual não possui garantias. CoS utiliza esse conceito, que é mais fácil de implementar, por isso mais provável de ser disponibilizado em uma rede como a *Internet* em um futuro próximo.

Outro componente importante para a determinação do modelo de QoS a ser fornecido aos usuários diz respeito ao tipo de tráfego que as aplicações geram e qual o comportamento esperado da rede para que elas funcionem corretamente. Com relação ao tipo de tráfego as aplicações podem ser classificadas em [42]:

- *Aplicações de tempo real (não elásticas)*: Podem ser definidas como aquelas com características rígidas de reprodução (*playback*), ou seja, um fluxo de dados é empacotado na fonte e transportado através da rede ao seu destino, onde é desempacotado e reproduzido pela aplicação receptora. Essa classificação pode ainda ser quebrada em três categorias:
 - *Aplicações tolerantes*: São aquelas que mesmo diante de variações no atraso causadas pela rede, ainda assim produzem um sinal de qualidade quando reproduzidas;

- *Aplicações intolerantes*: Variações no atraso produzem sinais de qualidade inaceitável;
- *Aplicações elásticas (não tempo real, ou adaptáveis)*: Para esse tipo de aplicação, a recepção correta dos dados é mais importante do que a sua apresentação em uma taxa constante. Exemplos de aplicações elásticas são correio eletrônico, transferência de arquivos, consultas interativas a informações e aplicações cliente/servidor tradicionais.

Em transmissão de dados a partir da rede elétrica, os parâmetros de desempenho analisados deverão garantir a qualidade dos serviços prestados. Os parâmetros mínimos recomendáveis são [16], [43]:

- Vazão;
- Taxa de perdas de pacotes;
- Teste de latência;
- Jitter (variação do atraso);
- Verificação da priorização do tráfego de serviços *real time*;
- Análise de priorização de tráfego.

Serviços de voz, vídeo, e áudio não toleram variação do atraso. Para transmissão de arquivos multimídia é importante que os serviços providos pela rede considerem os requisitos dos conteúdos multimídia, que dependem da largura de banda disponível e qualidade de áudio e vídeo que serão transmitidos. Por exemplo, um áudio com qualidade de voz requer 64Kbps, com qualidade de CD (*Compact Disc*) requer 1,4Mbps, e com qualidade HDTV não comprimido requer 200Mbps [42][44].

Em transmissões de voz, normalmente com uma largura de banda de cerca de 64Kbps, o sinal de voz é digitalizado e compactado na sua origem antes de ser transmitido, sendo o sinal reproduzido no destino a uma taxa constante. O atraso máximo tolerável pode ser de até 100 a 200 milissegundos, sendo aceitável uma perda de 1% a 2% dos pacotes. Não atendendo essas condições, as falhas ficam perceptíveis ao ouvido humano, e a conversa não fica inteligível [43][45].

A Tabela 4.1 mostra a relação entre serviços típicos de rede e as características que uma transmissão de dados de diversos tipos pode apresentar [43].

Tabela 4.1 – Requerimentos das aplicações tradicionais [43].

Requisitos de QoS	Voz	FTP	E-mail	Imagens	Vídeo Interativo
<i>Exigência de Largura de Banda</i>	Baixa a Média	Baixa	Baixa	Alta	Alta
<i>Sensibilidade ao descarte aleatório de pacotes</i>	Média	Alta	Alta	Média	Média
<i>Sensibilidade ao atraso</i>	Alta	Baixa	Baixa	Baixa	Alta
<i>Sensibilidade ao jitter⁷</i>	Alta	Baixa	Baixa	Baixa	Alta

O conceito de banda efetiva provê um modo de caracterizar os requisitos de recursos de uma conexão, e tem como limite inferior a taxa média e limite superior a taxa de pico do fluxo de tráfego. Pode-se dizer que a banda efetiva representa a taxa de serviço que é efetivamente necessária para servir um fluxo de tráfego respeitando uma determinada probabilidade de perda, ou seja, ela corresponde à capacidade que pode ser usada para atender parâmetros de QoS exigidos por um fluxo. Além disso, se vários fluxos de tráfego forem simultaneamente servidos a taxas equivalentes às suas bandas efetivas, então as demandas de QoS não serão violadas [41].

Cada conexão necessita de uma certa banda efetiva dos canais pelos quais os dados são enviados de modo a garantir a qualidade de serviço (QoS) desejada. Esta banda efetiva é função dos parâmetros da conexão, do tamanho do *buffer*, da largura de banda total do canal e da mistura de tráfegos no enlace. Por questões de simplicidade, assume-se muitas vezes que a banda efetiva independe da mistura de tráfegos.

Existe uma relação direta entre taxa de transmissão de dados e largura de banda: quanto maior a taxa de um sinal, maior a sua largura de banda efetiva. Quanto maior a largura de banda de um sistema de transmissão, maior a taxa de dados que pode ser transmitida neste sistema [46].

A especificação de uma taxa de transmissão adequada depende, principalmente, de 2 fatores:

- Qualidade do sinal, considerando problemas existentes no meio físico (atenuação, distorção de retardo e ruído) e a capacidade do canal (taxa máxima com que se pode transmitir dados através de um canal, sob certas condições);
- Características do meio de transmissão.

⁷ *Jitter* é uma variação do atraso entre os pacotes sucessivos de dados. Em comunicações VoIP, causa o efeito de “fala pausada”.

Para um método específico de comunicação, a largura de banda necessária é proporcional à taxa de bits. Com isso, uma taxa de bits mais elevada necessita de uma largura de banda maior para um método fixo. Se a largura de banda dobra, então a taxa de bits também é dobrada.

4.1.1 Classes de serviços

É comum definir como banda larga conexões que atingem taxas de transmissão de 250kbps ou mais. O serviço de banda larga pode ser dividido em 4 classes de serviços, de acordo com características comuns [28][37]:

1. Classe A – Essa classe inclui serviços que requerem redes com conexões (comutadas por circuito) com largura de banda fixa e sincronização de envio e recebimento. Exemplo desses serviços são VoIP (*Voice over Internet Protocol*) e sinais de vídeo codificados com taxa de bits constante (CBR). Esses serviços requerem um atraso pequeno e previsível;
2. Classe B – Essa classe inclui serviços que requerem conexões comutadas por circuito com largura de banda variável com sincronização de envio e recebimento. Tem como exemplos de serviços sinais de vídeo com taxa de bits variáveis (vídeos comprimidos);
3. Classe C – Essa classe inclui serviços que requerem conexões comutadas por circuito com largura de banda variável sem sincronismo de envio e recebimento. A tecnologia *Frame Relay* é um exemplo bem conhecido que se encaixa nessa classe;
4. Classe D – Essa classe inclui serviços que requerem redes não orientadas a conexão com taxa de bits variável e sem sincronismo de envio e recebimento.

A empresa Européia *DONG Energy* possui em andamento o projeto *Fiber-to-Home*, em que serviços de banda larga podem ser oferecidos por diferentes SPs (*Service Providers*), com requisitos de QoS para cada tipo de aplicação, como mostra a Tabela 4.2. Esses parâmetros foram utilizados pela empresa para comparação com resultados obtidos em redes que utilizam equipamentos PLC para transmissão de dados [28].

A fim de verificar se a solução *HomePlug* utilizada nos testes realizados atende teoricamente aos requisitos de QoS, os resultados dos experimentos devem ser comparados com os valores listados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Requisitos de Serviços para *Fiber-to-Home* [28]

SERVIÇOS DE BANDA LARGA PARÂMETROS DE QOS	Vídeo sob Demanda	Vídeo-Conferência	VOIP	Internet
Protocolo	UDP			TCP
Taxa de Transmissão	5[Mbps]	128[kbps]	18[kbps]	Variável
Delay Máximo	5[s]	200[ms]	100[ms] a 200[ms]	Variável
Jitter Máximo	N/A	30[ms]	30[ms]	Variável
Perda Máxima de Pacotes	2%	1%	1 a 2%	Variável

A eficiência espectral de um canal de comunicação é dada pela razão entre a taxa de transmissão de saída pela largura de banda utilizada [28].

$$\eta = \frac{R}{B} \quad (16)$$

Onde R é a taxa de bits e B é a frequência disponível para modulação (largura de banda). A máxima eficiência espectral é limitada pelo ruído do canal por uma determinada BER, sendo calculada pela fórmula da capacidade do canal (equação de *Shannon*) [28]:

$$\eta_{\max} = \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad (17)$$

onde S é o nível de sinal e N é o nível de ruído dentro do canal.

Assume-se que o melhor desempenho possível do canal é alcançado com a máxima eficiência espectral (lembrando que, como a modulação OFDM é aplicada, somente metade da largura de banda disponível é usada para modulação de dados) [28]. A taxa máxima teórica do equipamento *HomePlug* utilizado é de 56,106Mbps, e opera com frequência de 4,3MHz a 20,9MHz. Calculando a frequência disponível para modulação (B), tem-se:

$$B = \frac{f_2 - f_1}{2} = \frac{20,9 \cdot 10^6 - 4,3 \cdot 10^6}{2} = 8,3 \cdot 10^6 [Hz] \quad (18)$$

Utilizando a frequência calculada pela equação 17 na equação 15, tem-se:

$$\eta_{\max} = \left(\frac{56 \cdot 10^6}{8,3 \cdot 10^6} \right) \approx 6,75 [(bits/s) / Hz] \quad (19)$$

Inserindo o η_{\max} calculado na equação 18, tem-se a SNR necessária para o desempenho máximo, SNR_{\max} :

$$\begin{aligned}
 e^{\eta_{\max}} &= 1 + SNR_{\max} \\
 \Rightarrow SNR_{\max} &= 8,53 \cdot 10^2
 \end{aligned}
 \tag{20}$$

Calculando em dB, tem-se:

$$\begin{aligned}
 SNR_{\max,dB} &= 20 \cdot \log_{10}(SNR_{\max}) \\
 \Rightarrow SNR_{\max,dB} &\approx 58,6dB
 \end{aligned}
 \tag{21}$$

Com isso, tem-se que para atingir o desempenho máximo com os equipamentos *HomePlug* utilizados, o canal de comunicação que possui no máximo 100m de comprimento, deve ter uma SNR em torno de 58,6dB, confirmando a influência do ruído em sistemas BPL/PLC e seu desempenho.

4.1.2 Protocolo de Acesso ao meio CSMA/CA

Em redes PLC, a largura de banda varia com o tempo devido a alguns fatores, como a adoção do protocolo de camada de enlace CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance* - Acesso Múltiplo por Detecção da Portadora com Prevenção de Colisão), e a incapacidade de garantir a detecção de colisão na fiação elétrica em função principalmente da atenuação e do ruído. O CSMA/CA faz com que a utilização do canal de transmissão seja compartilhada, semelhante à transmissão de dados em redes sem fio, e com a freqüente mudança na estrutura e na topologia das redes PLC através da adição ou remoção de equipamentos, usuários ou cabos de energia que causam reflexões e mudança nas características da rede [18] [36].

Para suportar qualidade de serviço, o padrão CSMA/CA utiliza quatro níveis de prioridade de acesso ao meio (CAP - *Channel Access Priorities*), atribuídos em função do tipo de tráfego e associados às classes CA0 a CA3, sendo a classe CA3 a de maior prioridade, de acordo com a norma IEEE 802.1D. A classe padrão é a CA1. A classe CA3 é usada para as prioridades 6 e 7, em que se tem controle da rede e tráfego extremamente sensível ao tempo, como a voz, VoIP. A CA2 está associada às prioridades 4 e 5 (tráfego sensível ao tempo, como áudio e vídeo) e a CA0 está associada a tráfego de redes locais e tráfego de fundo [36].

Para evitar colisões, uma estação que deseja transmitir um quadro de dados deve inicialmente escutar o meio. Para determinar se o meio está ocupado ou não, as estações usam detecção física (através do reconhecimento de preâmbulos e transmissões de sinais de prioridade) e detecção virtual (através de informações do quadro escutado para conhecer a duração da transmissão e assim estabelecer um vetor de alocação) de portadora. Se qualquer

uma das portadoras indicarem que o meio está ocupado, o MAC informa isto às camadas superiores [18].

Caso o meio permaneça livre por um determinado intervalo de tempo CIFS (*Contention Distributed Interframe Space*), cujo valor é $35,84\mu\text{s}$, a estação entra na fase de determinação de prioridade. Dois intervalos de tempo são utilizados para determinação de prioridade (*Priority Resolution - PR*), a fim de permitir que apenas as estações com fluxos de maior prioridade disputem o meio no período de contenção, como mostra a Figura 4.1, e cada um dos intervalos de tempo (PR0 e PR1) tem a mesma duração do intervalo CIFS, $35,84\mu\text{s}$ [18][19].

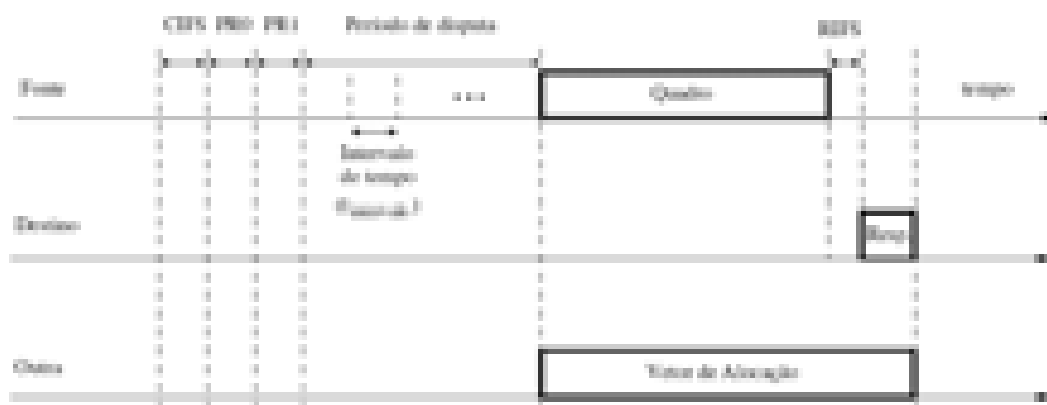


Figura 4.1 – Transmissão de um quadro com sua respectiva resposta [11]

No período de disputa do meio físico, a estação escolhe um número aleatório uniformemente distribuído entre zero e o tamanho da janela de contenção (*Contention Window - CW*) e cria um contador de *backoff* (*Backoff Counter - BC*). O contador de adiamentos (*Deferral Counter - DC*) é um mecanismo criado para evitar colisões através do aumento do número de vezes que a função de *backoff* é chamada para o quadro a ser transmitido. A função de *backoff* pode ser chamada mesmo que não haja uma colisão [19].

4.2 VOIP

Com o atual cenário de desenvolvimento de novas tecnologias e as redes “*triple play*”, a integração de tecnologias como PLC e VoIP (*Voice over Powerline*) pode resultar em benefícios aos provedores de serviços e usuários finais, devido a capilaridade da tecnologia PLC ser superior à das atuais operadoras de telecomunicações. Têm-se como benefícios dessa integração de tecnologias: redução de despesas, integração de sistemas (redes convergentes) e possibilidade de uma infra-estrutura acessível às comunidades de zonas menos povoadas,

além de inclusão social/digital [3]. Muitas operadoras de telecomunicações, principalmente na Europa, estão utilizando esta integração de tecnologias para oferecer aos consumidores a possibilidade de utilização de um equipamento e não têm vínculos com o lugar aonde a linha telefônica chega à residência [47].

Essencialmente, na tecnologia VoIP a voz humana é digitalizada, codificada e enviada na forma de fluxo de pacotes através de uma rede IP. Dispositivos ou programas denominados codecs (*coder/decoder*) realizam a codificação e decodificação de um fluxo de dados de voz. Sua maior vantagem é a possibilidade de redução de custos com ligações interurbanas e internacionais. Um dos problemas a serem enfrentados na implementação da tecnologia VoIP é a realização do correto dimensionamento de recursos na rede da operadora. Já é conhecido que o tráfego gerado por sistemas VoIP não possui as mesmas características apresentadas pelo sistema de telefonia convencional.

No serviço de telefonia clássica, certa taxa de transmissão (por exemplo, 64kbps) é alocada para uma conexão de voz em toda a sua duração. As conexões de voz são caracterizadas por dois parâmetros: o tempo entre-chegadas de chamadas e o tempo de duração. A geração de novas chamadas é considerada como um processo de chegada Poisson. Assim, o tempo entre chegadas das chamadas, bem como o tempo de duração podem ser representados por variáveis aleatórias que são distribuídas de forma exponencial negativa, como é mostrado na Figura 4.2. A Função Distribuição de Probabilidade (pdf) para o tempo entre-chegadas é expressa como sendo [3]:

$$A(t) = 1 - e^{-\lambda t}, t \geq 0 \quad (22)$$

onde λ é a taxa de chegada de chamadas e e o número de Euler. $A(t)$ representa a probabilidade de que não houve chegadas no intervalo $(0, t)$.

A função densidade de probabilidade (PDF) para o tempo entre-chegadas é:

$$a(t) = \lambda e^{-\lambda t}, t \geq 0 \quad (23)$$

A média para a distribuição exponencial é calculada como $1/\lambda$, representando o tempo médio entre chegadas de chamadas.

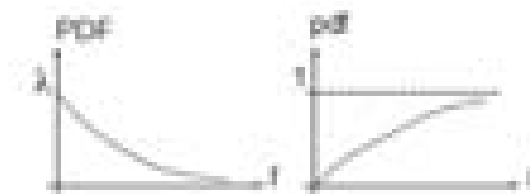


Figura 4.2 – Distribuição Exponencial [3]

Uma das principais limitações dos sistemas tradicionais de telefonia talvez seja a inadequação para a transmissão de dados e sua arquitetura tecnológica fechada, com inteligência e funcionalidades reunidas nas centrais telefônicas. Apesar de padronização estabelecida, transparência na interoperabilidade entre grande parte de seus elementos de rede, capilaridade, estabilidade e aceitação, não há como ignorar que a rede pública e a tecnologia de comutação de circuitos, não estão aptas e nem foram originalmente desenhados para transportar dados de forma eficaz e dinâmica.

Em sistemas tradicionais, a digitalização de sinais de voz utiliza uma banda de 4kHz. Para que o sinal seja recuperado adequadamente, segundo o Princípio de *Nyquist*, a taxa de amostragem necessária é de 8kHz. Cada canal de voz necessita de uma banda de 64kbps (8.000 amostras x 8 bits) [48]. Esta forma de digitalização do sinal de Voz atende a recomendação ITU-T G.711 (PCM – *Pulse Code Modulation*).

Em uma rede PSTN (Rede Telefônica Pública Comutada), a latência típica de uma ligação não deve ultrapassar 150 milissegundos – nível aceitável para o ouvido humano. Com o objetivo de viabilizar a voz sobre IP, existem protocolos de sinalização e controle de chamadas. Os padrões mais relevantes são o H.323 (ITU – *International Telecommunication Union*) e o SIP (*Session Initiation Protocol*) do IETF. Nos dois casos os dados multimídia são transmitidos utilizando o conjunto de protocolos RTP/RTCP (*Real-time Transport Protocol/Real-time Transport Control Protocol*) [48].

A escolha do codificador de voz (Codec) é essencial para o sucesso da aplicação VoIP. Codecs modernos executam funções sobre o fluxo de dados de voz como: compressão, supressão de silêncio e cancelamento de eco, fazendo com que o fluxo na saída do codec seja normalmente do tipo VBR (*Variable Bit Rate*). O fluxo na saída de um codec de voz se apresenta sob forma de conjuntos de pacotes de tamanho fixo, emitidos a uma taxa constante (serviço tipo ON/OFF) [48][45].

Como pode ser visto na Tabela 4.3, têm-se algumas das principais características dos Codecs mais utilizados para tráfego de voz.

Tabela 4.3 – Principais Codecs de Voz

Recomendação ITU-T	Algoritmo	Taxa de Transmissão (kbps)	Atraso típico fim-a-fim (ms)	Qualidade de Voz
G.711	PCM	48; 56; 64	<< 1	Excelente
G.722	Sub-banda ADPCM	48; 56; 64	<< 2	Boa
G.723.1	ACELP MP-MLQ	5,3 6,3	67-97	Razoável Boa
G.726	ADPCM	16; 24; 32; 40	60	Boa (40kbps), Razoável (24kbps)
G.727	AEDPCM	16; 24; 32; 40	60	Boa (40kbps), Razoável (24kbps)
G.728	LD-CELP	16	<< 2	Boa
G.729	CS-ACELP	8	25-35	Boa

Como mostra a Figura 4.3, a fonte de voz estará em um período ativo (ON) nos momentos de fala. Durante estes períodos, a fonte de voz gera pacotes de tamanho fixo em intervalos regulares de comprimento T (tempo de empacotamento). Uma vez emitido um conjunto de pacotes de tamanho fixo, haverá um período de inatividade até que seja emitido o próximo conjunto de pacotes (período de OFF do serviço). O período inativo poderia também ser modelado por uma distribuição que seria a mistura do silêncio devido a pausas e do silêncio devido a escuta.

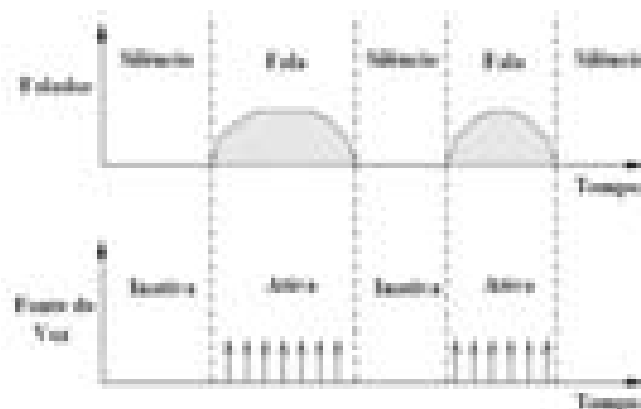


Figura 4.3 – Comportamento típico de uma fonte de voz [49]

A Figura 4.4 apresenta alguns protocolos e padrões utilizados em comunicações VoIP. O padrão dominante para transmitir serviços multimídia em redes IP é a Recomendação H.323 do ITU-T, que sugere para o encapsulamento do serviço de voz, a utilização da pilha de protocolos IP/UDP/RTP. O protocolo RTP (RFC 1889) é um mecanismo genérico para suportar a integração de voz, vídeo e dados, agindo como uma interface melhorada entre as aplicações de tempo real e os protocolos das camadas já existentes. O cabeçalho do RTP

Tabela 4.4 – Comparação entre H.323 e SIP

H.323	SIP
Protocolo complexo	Protocolo comparativamente simples
Representação binária para as mensagens	Representação textual
Requer total compatibilidade com versões anteriores	Não requer total compatibilidade com versões anteriores
Pouco modular	Muito modular
Pouco escalável	Altamente escalável
Sinalização complexa	Sinalização simples
Primeiro a ser lançado no mercado	Orientado pelo IETF
Centenas de elementos	Somente 37 cabeçalhos
A detecção de <i>loop</i> é difícil	A detecção de <i>loop</i> é comparativamente fácil

Algumas das normas utilizadas para qualidade de voz são [48]:

- ETSI (*European Telecommunication Standards Institute*) → Série TR 101 329
- ITU → P.861 (PSQM+ – *Perceptual Speech Quality Measurement*)
- ITU → P.862 (PESQ – *Perceptual Evaluation of Speech Quality*)

Para protocolos [48]:

- ETSI → Série TS 101 804

Para aferir a qualidade de voz obtida, é necessário definir os níveis de qualidade de voz e os correspondentes valores limites dos parâmetros de desempenho de rede. As seguintes métricas podem ser consideradas para medir a qualidade de voz [50]:

- Vazão: taxa de transmissão efetiva em bits por segundo (bps);
- Atraso por pacote: tempo que um pacote leva da origem até o destino;
- Variação no atraso: é a variação do atraso por pacote entre dois pacotes subjacentes. Por meio dessa métrica, consegue-se analisar quão constante é o roteamento de pacotes processado por salto (hop);
- Taxa de perda de pacotes: quantidade de pacotes que foram descartados por fluxo numa transmissão de dados (Voz).

A Tabela 4.5 define os níveis de qualidade de voz com base apenas nos parâmetros de desempenho no nível de rede e sua tolerância ao atraso. Além destes, outros componentes, como computadores dos usuários finais, influenciam na qualidade de voz percebida.

Tabela 4.5 –Parâmetros de referência e tolerância ao atraso

Atraso da Voz Fim a Fim (ms)	Variação do Atraso (ms)	Média das Perdas de Pacotes (%)	Tolerância
Até 150	0	1 a 2	Aceitável, com boa interatividade
150 – 400	75 a 125	3 a 15	Aceitável, mas o usuário já percebe alguma perda de interatividade
Acima de 400	225	25	Inaceitável. Perda da interatividade

Para que se obtenha uma boa qualidade em chamadas telefônicas a latência deve possuir um valor abaixo de 150ms. Para que isso ocorra devem ser tomadas algumas providências para que diminua o tempo de empacotamento, transmissão e transporte dos dados. Em tecnologia VoIP, os parâmetros geralmente analisados são [3][45][48][50]:

- Avaliação do protocolo de VoIP e levantamento de limitações da implementação;
- Testes de verificação do protocolo utilizado;
- Tamanho de pacotes das amostras de voz;
- Medida objetiva da qualidade de voz;
- Medida objetiva da qualidade de voz por sentido da chamada;
- Levantamento dos benefícios da utilização ou não de VAD (*Voice Activity Detection* - Supressão de silêncio);
- Indicação e verificação do CODEC a ser utilizado;
- Avaliação do eco proporcionado pelo sistema à chamada de voz;
- Atraso da voz na rede;
- Verificação da transmissão de fax, modem e dígitos DTMF (*Dual Tone Multiple Frequency*) pela rede;
- Levantamento dos parâmetros de configuração de voz e análise crítica.

As empresas que implementam soluções *PowerLine* criaram produtos que suportam soluções VoIP baseadas em SIP. Uma dessas empresas é a *Ilevo*, adquirida pela *Schneider Electric*.

4.2.1 Avaliação Subjetiva da Qualidade de Voz

Alguns fatores devem ser considerados em um teste subjetivo de qualidade de fluxo de voz, de acordo com o tipo de aplicação desejada. Entre os fatores mais importantes, merecem

destaque: a variação do nível de entrada do sinal a ser codificado; a ocorrência de erros no canal de operação do codec; a possível ocorrência de múltiplas transcódificações; a diversidade de locutores; a presença de ruído ambiente em níveis variáveis; e o atraso introduzido pela codificação [51][52].

Testes subjetivos podem ser divididos em três grupos: entrevista (através de uma série de questões feitas diretamente aos usuários do sistema sob avaliação), conversacionais (testes bidirecionais que envolvem duas pessoas que tenham sido especificamente treinadas, uma falando e a outra ouvindo) e audição (unidirecionais, visam medir a capacidade de um sistema de transmitir adequadamente uma informação) [51][52].

Os testes de audição são os testes subjetivos mais importantes, pois se baseiam na avaliação da qualidade da voz a partir da audição de sentenças simples, processadas pelo sistema sob avaliação e por sistemas (condições) de referência, sem treinamento prévio dos participantes, que recebem apenas instruções quanto à escala de avaliação a ser utilizada. Existem diversos tipos de testes de audição para medir a qualidade da voz, sendo os mais utilizados: Testes de Qualidade Absoluta (*Absolute Category Rating – ACR*), Testes de Degradação (*Degradation Category Rating – DCR*) e Testes de Comparação (*Comparison Category Rating – CCR*) [51][52].

Os testes de qualidade absoluta (ACR) baseiam-se na avaliação absoluta da qualidade do material processado, sem que o avaliador disponha de material para comparação. Utiliza três escalas de opinião [51][52]:

1. Qualidade de Audição (*Listening-Quality*): um sistema de pontuação define a qualidade de pequenos grupos de sentenças descorrelacionadas, cada uma submetida ao processo sob teste, de acordo com a Tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Escala de Qualidade de Audição

Qualidade de Voz	Pontos
Excelente	5
Boa	4
Razoável	3
Pobre	2
Ruim	1

2. Esforço de Audição (*Listening-Effort*): escala muito importante, principalmente em casos em que há altos níveis de degradação, onde há um maior interesse na inteligibilidade do sinal do que na qualidade, como mostra a Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Escala de Esforço de Audição

Esforço requerido para a compreensão do significado das sentenças	Pontos
Relaxamento completo possível, nenhum esforço requerido	5
Atenção necessária, pouco esforço requerido	4
Esforço moderado requerido	3
Considerável esforço requerido	2
Nenhum significado é reconhecido, qualquer que seja o esforço	1

3. Preferência de Sonoridade (*Loudness-Preference*): define o grau de sonoridade (volume) percebido pelos ouvintes, de acordo com a Tabela 4.8.

Tabela 4.8 – Escala de Preferência de Sonoridade

Preferência de Sonoridade	Pontos
Muito mais alto que o ideal	5
Mais alto que o ideal	4
Ideal	3
Mais baixo que o ideal	2
Muito mais baixo que o ideal	1

Os testes de degradação (DCR) avaliam a degradação do material processado em relação ao material original, o que o torna mais sensível à distinção de qualidade, em comparação com os testes do tipo ACR, de acordo com a Tabela 4.9 [51][52].

Tabela 4.9 – Escala de Teste de Degradação

Degradação	Pontos
A degradação é inaudível	5
A degradação é perceptível, mas não é incômoda	4
A degradação incomoda um pouco	3
A degradação incomoda	2
A degradação incomoda muito	1

Comparado com o teste DCR, os Testes de Comparação (CCR) se distingue apenas pela ordem em que as amostras são apresentadas aos ouvintes, escolhida aleatoriamente. Neste tipo de teste, os ouvintes têm de responder a duas perguntas: qual dos sinais é melhor e quanto ele é melhor, segundo a escala da Tabela 4.10. A vantagem do método CCR está na possibilidade de se poder avaliar não apenas processamentos de voz em que a qualidade é

degradada, como também os casos em que a qualidade é melhorada, contudo, apenas desempenhos relativos podem ser obtidos [51][52].

Tabela 4.10 – Escala de Teste de Comparação

Comparação entre os sinais	Pontos
Muito Melhor	3
Melhor	2
Ligeiramente melhor	1
Aproximadamente Pior	0
Ligeiramente Pior	-1
Pior	-2
Muito pior	-3

O método mais utilizado para avaliação da qualidade da voz tem sido a escala Qualidade de Audição, do Teste ACR, que tem sido aplicado a conexões telefônicas digitais e analógicas de dispositivos de telecomunicações. A média aritmética dos pontos atribuídos é o chamado MOS [51][52].

4.2.2 Mean Opinion Score (MOS)

Em VoIP, o *Mean Opinion Score* (MOS) caracteriza-se pela sua avaliação subjetiva de qualidade de diferentes *vocoders*, ou seja, os resultados são sempre comparados com uma referência bem estabelecida. Muitos fatores contribuem para a pontuação MOS da qualidade de voz, requerendo otimização individual para se obter a melhor pontuação possível.

O método recomendado para testes do tipo “apenas ouvir” é o ACR: *Absolute Category Rating*. As recomendações P.800 (1996) e P.830 (1996) do ITU-T fornecem as orientações para avaliação dos *codecs* de voz [45].

Existem várias escalas para avaliação da voz, entretanto a escala apresentada na Tabela 4.11 é a mais utilizada pela ITU-T.

Tabela 4.11 – Escala de valores do MOS [45].

Pontuação (MOS)	Entendimento da Voz	Distorção
5	Excelente	Imperceptível
4	Boa	Apenas perceptível, sem incomodar
3	Regular	Perceptível, leve perturbação
2	Pobre	Perturbando, mas audível
1	Ruim	Perturbando muito, inaudível

Como pode ser visto na Tabela 4.12, cada codec apresenta um valor MOS e o respectivo atraso aceitável. Nota-se que o codec G.711 é o que apresenta um valor de MOS mais próximo do valor máximo. Esse codec tem como vantagem sua taxa de transmissão, que reduz o atraso fim a fim dos pacotes de voz, mas como desvantagem possui um uso maior de largura de banda [50].

Tabela 4.12 – Valores médios MOS de cada vocoders [45].

CODEC	Taxa de bits (<i>kbps</i>)	MOS	Atraso (<i>ms</i>)
G.711 PCM	64,0	4,3	0,125
G.726 ADPCM	16-40	2,0-4,3	0,125
G.723.1	5,3; 6,3	3,7; 3,8	70
G.728 LD-CELP	16,0	4,1	2
G.729 CS-ACELP	8,0	4,0	20
G.729A CS-ACELP	8,0	3,4	20

Valores para avaliação MOS considerados satisfatórios em ligações VoIP variam entre 3,5 e 4,2. No entanto, pelo fato dos testes MOS serem completamente subjetivos, existem fatores que nem sempre podem ser controlados e como consequência, o MOS deve ser aplicado a um grande número de avaliadores para representar valores consistentes, tornando o processo dispendioso e de implementação complexa.

CAPÍTULO 5 - MODELAGEM DE TRÁFEGO DE REDES BASEADA EM CADEIAS DE MARKOV

O meio físico utilizado pela tecnologia PLC é bastante hostil para a transmissão de dados, visto que não foi concebido para este fim. Há uma série de propriedades das redes de energia que influenciam negativamente nas comunicações em alta velocidade como perdas no cabo, propagação em múltiplos percursos e ruído. Uma das ferramentas utilizadas para se entender o comportamento de uma rede de comunicações é a modelagem do tráfego. A modelagem de tráfego pode ser utilizada para planejamento e dimensionamento de redes, análise de desempenho, perda de pacotes e congestionamento da rede. Os dados coletados da rede fornecem a base para os modelos analíticos, onde se podem obter conclusões a respeito do comportamento do tráfego da rede.

Em telecomunicações, modelos estatísticos têm sido utilizados já desde o trabalho de A. K. Erlang nos anos de 1910. Como as chamadas telefônicas se comportam aproximadamente como um processo de Poisson, Erlang propôs um modelo de fila relativamente simples para a caracterização do tráfego telefônico [53].

O tráfego de rede consiste de chegadas de entidades (bytes, pacotes, células, etc.) que formam um fluxo caracterizado por uma seqüência de observações: ..., $X_{(t_{n-1})}$, $X_{(t_n)}$, $X_{(t_{n+1})}$,... nos instantes de tempo ..., t_{n-1} , t_n , t_{n+1} ,... as quais descrevem, por exemplo, o número de pacotes ou de bytes que chegam a um servidor da rede durante um período específico [54][55].

5.1 CADEIAS DE MARKOV

As Cadeias de *Markov* são Processos Estocásticos de tempo discreto, ou seja, assumem valores aleatórios ao longo do tempo. Uma cadeia de *Markov* representa vários estados possíveis para uma determinada situação e as transições, entre um estado e outro, que ocorrem segundo uma determinada probabilidade. Processos de *Markov* apresentam um tipo de dependência entre as amostras de um processo estocástico, em que o valor da variável aleatória no instante seguinte depende apenas do valor atual do processo estocástico. Processos estocásticos com esta dependência são muito importantes como ferramentas para avaliação de desempenho de redes, já que simplificam bastante o tratamento analítico [55].

É fundamental no estudo de processos de *Markov* a noção de estado. Propriedades em comum entre indivíduos (ou objetos) caracterizam o que designamos por estados. Os processos de *Markov* sempre envolvem a variável “tempo”, seja considerada na forma discreta, onde o tempo varia em saltos (intervalos regulares), ou na forma contínua, podendo assumir valores reais [56].

Um processo é dito Processo de *Markov* se possui as seguintes propriedades [56]:

- Propriedade Markoviana: Para definir a probabilidade de a cadeia estar em um dado estado no presente basta olhar onde ela estava no instante imediatamente anterior;
- Processo Homogêneo [58]: a partir da regra da cadeia, segue que as estatísticas de um processo de Markov de qualquer ordem podem ser determinadas em termos das densidades condicionais $f(x_n | x_{n-1})$ e da densidade de primeira ordem $f(x_n)$. Se o processo x_n é estacionário, então as funções $f(x_n)$ e $f(x_n | x_{n-1})$ são invariantes para um deslocamento da origem. Neste caso, as estatísticas de x_n são completamente determinadas em termos da densidade de segunda ordem:

$$f(x_1, x_2) = f(x_2 | x_1)f(x_1) \quad (24)$$

Um processo de Markov x_n é chamado de homogêneo se a densidade condicional $f(x_n | x_{n-1})$ é invariante para um deslocamento da origem, mas a densidade de primeira ordem $f(x_n)$ pode depender de n . Em geral, um processo homogêneo é não estacionário. No entanto, em muitos casos, ele tende a um processo estacionário como $n \rightarrow \infty$.

Existem duas categorias de processos de *Markov* [56]:

1. Processos de Markov de Tempo Discreto: processos em que o índice t assume apenas valores inteiros não negativos ($t = 0, 1, 2, \dots$) – Cadeia de Markov de Parâmetro Contínuo;
2. Processos de Markov de Tempo Contínuo: processos nos quais a variável tempo é contínua ($t \in [0, \infty)$) – Processo de Markov de Parâmetro Contínuo.

Em ambas as categorias, os estados são caracterizados por números inteiros não negativos definidos a partir dos valores que a variável aleatória X pode assumir. Os processos de *Markov* de tempo contínuo são aplicados em diversas áreas, dentre as quais se podem

destacar sistemas de filas de espera (processo conhecido como nascimento e morte) e confiabilidade de sistemas físicos em geral [56].

O parâmetro n e o espaço de estados E (coleção de estados possíveis) são discretos. A probabilidade (p_{ij}) do próximo estado observado ($X_{n+1}=j$) depende somente do estado atual ($X_n=i$). Este tipo de Processo Estocástico é denominado de *memoryless process* (processo sem memória), uma vez que o passado é “esquecido” (desprezado).

As probabilidades condicionais $P\{X(t_{k+1}) = x_{k+1} | X(t_k) = x_k\}$ são denominadas Probabilidades de Transição, e representam a probabilidade do estado $X(t_{k+1})$ ser x_{k+1} no instante t_{k+1} , dado que o estado $X(t_k)$ é x_k no instante t_k .

Uma transição de um estado para outro no instante seguinte, ou a possível volta para um mesmo estado é interpretada como sinalização de uma chegada de pacotes, de modo que os tempos entre chegadas são exponencialmente distribuídos e os parâmetros de taxa de chegada seriam dependentes dos estados onde a cadeia estava antes da mudança [55].

5.2 MODELO ON/OFF

Para tráfego de voz, um dos modelos de tráfego mais simples é o modelo ON/OFF, em que o estado OFF representa o estado quando não existe atividade de voz, enquanto o estado ON representa a fonte quando existe um fluxo de dados relativo à conversação, como pode ser visto na Figura 5.1 [56].

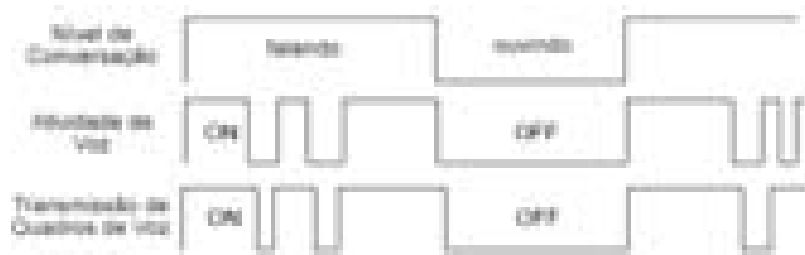


Figura 5.1 – Níveis de conversação e de geração de pacotes por um codificador de voz

O ON/OFF vem sendo utilizado na modelagem da voz principalmente por duas razões [54]:

- Experimentos atuais com uma única fonte de voz têm mostrado que a distribuição do silêncio e os períodos ativos podem ser representados por distribuições exponenciais;

- O modelo de fonte única pode ser expandido para um processo de nascimento e morte multi-estado para representar a voz multiplexada.

A duração dos períodos ativos (T_{ON}) e dos períodos inativos (T_{OFF}) segue uma distribuição exponencial negativa e é representada através dos parâmetros α (taxa de voz ativa) e β (taxa de voz inativa) sendo que estas são independentes entre si. A fonte de tráfego de voz mostrada na Figura 5.2 é definida como modelo ON-OFF Markoviano e é composta por três parâmetros de distribuição [59]:

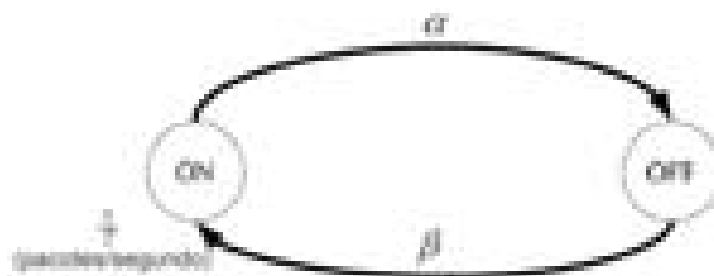


Figura 5.2 – Modelo de Fonte de Voz ON-OFF (com 02 estados) [59]

- A duração média do período ativo (ON) é $T_{ON} = \frac{1}{\alpha}$. No período ativo, o parâmetro α segue uma distribuição exponencial negativa;
- A duração média do período inativo (OFF) é $T_{OFF} = \frac{1}{\beta}$. No período inativo, o parâmetro β segue uma distribuição exponencial negativa;
- A taxa de chegada dos pacotes de voz é constante e durante o período ativo é expressa por $\lambda = \frac{1}{T}$.

A taxa média de chegada dos pacotes voz (T_{ON}), medida em pacotes por segundo, depende da taxa de voz ativa (α), da taxa de voz inativa (β) e da taxa de chegada dos pacotes de voz que resulta em:

$$\lambda_{MÉDIO} = \frac{T_{ON}}{(T_{ON} + T_{OFF}) \cdot T} \quad \text{ou} \quad \lambda_{MÉDIO} = \frac{\beta}{(\beta + \alpha)} \cdot \lambda \quad (25)$$

Em média, o tempo de duração de uma ligação telefônica é de aproximadamente 3 minutos. Em cada pacote de voz gerado, além do cabeçalho RTP, é inserido o cabeçalho do protocolo UDP. O tamanho médio de cada pacote IP e o ciclo de transmissão entre pacotes dependem do CODEC usado para efetuar o encapsulamento e a transmissão dos quadros de voz [59].

O processo ON/OFF também pode ser usado para simular processos com comportamento explosivo, como o tráfego de redes, onde os dados são transferidos dentro de uma sucessão de períodos ON separados por períodos de inatividade OFF [54].

A fim de modelar os tempos T_{ON} e T_{OFF} de uma conversação VoIP real, o tráfego medido é classificada em quatro estados finitos: *Talkspurt* (fala), *Long burst* (longa rajada), *Short silence* (breve silêncio) e *Long silence* (longo silêncio) com base na duração de T_{ON} e T_{OFF} [60].

Um *talkspurt* é o período de tempo entendido pelo ouvinte como tendo uma seqüência de sons de voz não interrompida por uma pausa [61]. Os silêncios são produzidos porque existem pausas entre as sentenças e as palavras, sem fala na outra direção. Outro motivo é o fato que comunicação humana é de duas vias (*half-duplex*), isto é uma pessoa fica em silêncio enquanto a outra fala. Tem sido calculado que as rajadas de voz têm um comprimento médio de 0,4 segundos a 1,2 segundos. Os intervalos de silêncio têm um comprimento médio que varia entre 0,6 segundos a 1,8 segundos. Estes estudos demonstram que, a voz tem um fator de atividade média que fica entre 35% e 42%, dependendo de fatores sociais e da idiosincrasia. As características anteriormente mencionadas permitem economizar banda passante ao deixar de transmitir células durante os períodos de silêncio. Isto é conhecido como supressão de silêncio, sendo que os períodos de silêncio devem poder ser restaurados pelo receptor [62].

5.3 POISSON

O modelo clássico de tráfego de Poisson foi proposto na década de 20 para análise de sistemas de telefonia e depois foi adaptado para a análise de fila em redes de pacotes. Um processo de Poisson nada mais é do que uma regra matemática que atribui probabilidades ao número de ocorrências de um evento [55].

Seja x o valor de algum evento aleatório em um intervalo de tempo. A probabilidade de ocorrência de x é [55]:

$$f(x) = \frac{e^{-\lambda} \lambda^x}{x!}, x = 0,1,2,\dots \quad (26)$$

onde λ é a taxa ou intensidade de chegada (média de ocorrência de x) e e o número de Euler.

A probabilidade que aconteçam k ocorrências em n intervalos de tempo é dada por [55]:

$$P(X_n = k) = \binom{n}{k} p^k (1-p)^{n-k} \quad (27)$$

para $k = 0, \dots, n$, de tal forma que o tempo entre chegadas tem uma distribuição geométrica com parâmetro p

$$P(Z_n = j) = p(1-p)^j \quad (28)$$

para $j = 0, 1, \dots$.

O modelo de Poisson tem como principais características [64]:

$$\text{Média : } E[X(t)] = \lambda t \quad (29)$$

$$\text{Variância : } \text{Var}[X(t)] = \lambda t \quad (30)$$

Desta forma, o número esperado de eventos em um intervalo unitário (0, 1), ou qualquer outro intervalo de comprimento unitário, é apenas λ ; por isso recebe o nome taxa ou intensidade de chegada [55].

Em um processo de Poisson, os intervalos entre eventos sucessivos (tempo entre - chegadas) são variáveis aleatórias independentes e exponencialmente distribuídas. Desta forma, costuma-se também identificar o processo de Poisson como um processo de renovação com intervalos distribuídos exponencialmente [55].

As duas hipóteses principais que caracterizam o modelo de Poisson são:

1. O número de fontes é infinito;
2. O padrão de chegada de tráfego é aleatório.

Em modelagem de tráfego, geralmente se assume que as chegadas de pacotes sejam processos Poissonianos. A função de autocorrelação associada a modelos de tráfego baseados em processos de Poisson é típica de processos estocásticos independentes, ou seja, tal processo não captura (modela) dependências temporais de longo prazo entre amostras sucessivas do sinal de tráfego. Quando tais dependências existem, elas evidenciam que o processo estocástico ou determinístico, em análise, possui dependência de longo prazo e, neste caso, o modelo de Poisson pode não ser adequado para sua modelagem [55].

5.3 MMPP (*Markov Modulated Poisson Process*)

O modelo MMPP (Modelo de Poisson Modulado por uma Cadeia de *Markov*) tem sido usado para modelagem de tráfego de voz e dados [53].

Os primeiros métodos de identificação de um MMPP de ordem N eram baseados no domínio da frequência. Posteriormente, foram apresentados métodos de estimação dos

parâmetros, baseados no domínio do tempo, através da utilização de técnicas de otimização. Um processo MMPP de ordem N consiste de uma cadeia de *Markov* de N estados, onde cada estado i ($i = 1, 2, 3, \dots, N$) representa um processo de Poisson com taxa de chegada λ_i . Um processo MMPP é um processo de Poisson cuja taxa é alterada (modulada) de acordo com uma cadeia de *Markov* [53].

No modelo MMPP, as chegadas ocorrem segundo uma distribuição de Poisson com uma taxa que varia de acordo com um estado k da cadeia de *Markov* de tempo contínuo, em que o futuro do processo é completamente definido no estado presente.

A soma de processos de Poisson resulta em um novo processo de Poisson cuja taxa média corresponde à soma das taxas médias dos processos originais. Em um modelo MMPP, o estado i representa uma transmissão de dados em intervalos exponencialmente distribuídos com a média do intervalo entre chegadas sendo [53][56]:

$$\frac{1}{\lambda_i} \quad (31)$$

onde λ_i é a taxa de chegada do estado i .

A Figura 5.3 apresenta a aplicação do modelo MMPP para modelagem de VoIP, em um sistema com N fontes de voz [57].

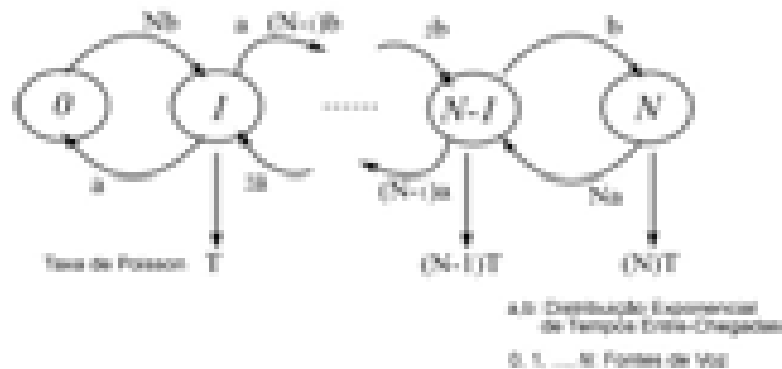


Figura 5.3 – Modelo MMPP mostrando superposição de N fontes de voz [57]

5.4 MMFM (*Markov Modulated Fluid Models*)

Modelos de fluidos caracterizam o tráfego como um fluxo contínuo, com uma determinada taxa de fluxo (por exemplo, bits por segundo). Um modelo fluido que é tipicamente usado para modelar tráfego é o Modelo Markoviano Fluido (MMFM).

A característica básica de um modelo MMFM é caracterizar o tráfego em uma rede como um fluxo contínuo de entrada, com finita taxa de fluxo. Em outras palavras, a taxa de tráfego de entrada é representada como um fluxo com taxa finita [57].

No modelo MMFM, o estado corrente da cadeia subjacente determina a taxa de fluxo (tráfego). No estado S_k o tráfego flui a uma taxa constante λ_k . O estado $\bar{\lambda}_k(t)$ do processo da Fig. 5.2 representa o nível quantizado de taxa de bit de N fontes. O espaço de estado do modelo MMFM é o conjunto dos níveis quantizados até um nível máximo [57][63].

Para se entender o modelo MMFM, precisaremos apresentar o conceito de processo de nascimento e morte. Em cadeias de *Markov*, tem-se como processo de “*birth and death*” (nascimento e morte), uma classe especial de processos Markovianos em que são permitidas somente transições aos estados vizinhos. Um processo simples de nascimento e morte que tem autocovariância exponencial, é representado pelo diagrama de transição de estados, como mostra a Figura 5.4.



Figura 5.4 – Processo de Nascimento e Morte

Essa cadeia de *Markov* possui $M+1$ estados, variando de zero a M . Cada estado deste modelo representa o número de fontes ativas. As transições entre os níveis ocorrem com taxas de transição exponencial, que dependem do nível atual. A etapa de quantização, o número de estados, e as taxas de transição poderão ser sintonizadas para se ajustar à média, variância e à função de autocovariância dos dados reais. Um Modelo Markoviano de nascimento-morte irá descrever com precisão fontes agregadas de taxa de bits, como tráfego telefônico [57][63].

5.4.1 MMFM com Ajuste Exponencial para a Função de Autocorrelação

Neste trabalho, é proposto a utilização do algoritmo descrito em [63] para ajustar a função de autocorrelação do modelo MMFM aos dados de tráfego. No artigo mencionado, os autores modelam a função de autocorrelação do processo de vídeo com uma função exponencial.

No modelo MMFM, a taxa de transição exponencial $r_{i,j}$ do estado iA para o estado jA (processo de nascimento e morte) é dado por [63]:

$$\begin{aligned}
r_{i,i+1} &= (M - i)\alpha & i < M \\
r_{i,i-1} &= i\beta & i > 0 \\
r_{i,i} &= 0 \\
r_{i,j} &= 0 & |i - j| > 1
\end{aligned} \tag{32}$$

onde α e β representam as taxas de nascimento e morte, dadas por [58]:

$$\alpha_i = \lambda_{i(i+1)} \tag{33}$$

$$\beta_i = \lambda_{i(i-1)} \tag{34}$$

A probabilidade de estado estacionário de taxa de fonte agregada é dada por [63]:

$$P\{(\bar{\lambda}_N) = kA\} = \binom{M}{k} p^k (1-p)^{M-k}, \tag{35}$$

$$p = \frac{\alpha}{\alpha + \beta} \tag{36}$$

onde N é o número de fontes agregadas, M é a quantidade de estados, k é o estado considerado, A é o tamanho do passo de quantização e p o processo de nascimento e morte.

Em um estado estacionário, tem-se uma distribuição discreta de probabilidade (distribuição binomial) com média $E(\bar{\lambda}_N)$, variância $\bar{C}_N(0)$ e autocovariância exponencial $\bar{C}_N(\tau)$ [63].

A média $E(\bar{\lambda}_N)$ é dada por:

$$E(\bar{\lambda}_N) = MAp \tag{37}$$

A variância $\bar{C}_N(0)$ é dada por:

$$\bar{C}_N(0) = MA^2 p(1-p) \tag{38}$$

Para a autocovariância exponencial, tem-se:

$$\bar{C}_N(\tau) = \bar{C}_N(0)e^{-(\alpha+\beta)\tau} \tag{39}$$

onde τ é a variação de tempo.

Os parâmetros (M , A , α e β), são obtidos através das equações de (37) a (39), e são utilizados para o ajuste do modelo MMFM. Primeiramente, tem-se o calculo da função de autocorrelação do processo de tráfego real. A partir dos resultados, é aplicado o procedimento

de ajuste (*curve fitting*⁸) de uma função exponencial para os dados da função de autocorrelação, a fim de se encontrar os parâmetros a e β do modelo e assim gerar tráfego sintético de acordo como modelo MMFM. O procedimento de *curve fitting* é aplicado na modelagem de dados para se obter a curva do modelo que melhor se adapta a curva dos dados reais, com um intervalo de confiança de 95%. O valor de a encontrado através do ajuste é inserido no algoritmo que irá calcular as probabilidades de transições de estados correspondentes aos nascimentos de uma Cadeia de *Markov* do tipo “*birth and death*”, gerando amostras segundo o modelo MMFM, como pode ser visto no seguinte trecho do algoritmo:

```
function [state,R] = MMFM(pkts, a, N, M, npoints)
  % Modela as probabilidades do tráfego através de uma distribuição binomial
  beta=a/(1+(N*(N*m)^2)/(M*N*v));
  alfa=a-beta;
  A=(N*v)/(N*m)+(N*m)/M;
```

onde *pkts* é a série de tráfego a ser modelada, a é proveniente da modelagem da função de autocovariância, N o número de fontes agregadas e *npoints* o tamanho da série sintética gerada. A cadeia de Markov possui $M+1$ estados, variando de zero a M , m é a média da série, v é a variância da série e R é a matriz de transições de estados.

⁸ Curve Fitting Toolbox - Aplicativo MATLAB de ajuste de curvas. Este *Toolbox* permite modelar, simular e analisar sofisticados métodos de ajuste de curvas de forma prática e flexível.

CAPÍTULO 6 - ANÁLISE DA TRANSMISSÃO DE DADOS E DE VOIP EM REDES PLC

Neste capítulo serão descritos os testes realizados com os equipamentos PLC para verificar o desempenho de transmissões de dados e VoIP utilizando a rede elétrica de baixa tensão como sistema de transmissão. Além disso, será avaliado o desempenho de modelos Markovianos em descrever o tráfego de dados e de VoIP em redes PLC.

A avaliação experimental dos testes tem como objetivo à análise do comportamento dos modems PLC escolhidos operando em um ambiente *indoor*, observando a influência dos seguintes parâmetros:

- Taxas de Transmissão;
- *Jitter* (Variação do atraso);
- Perda de Pacotes;
- Disponibilidade;
- Ruído no canal;
- Interferência eletromagnética gerada por outros dispositivos conectados à rede.

Os testes se dividiram em cinco fases distintas:

- Estudo sobre a forma de realização dos testes;
- Montagem e configuração dos diversos cenários com equipamentos e instrumentos necessários;
- Realização dos testes e coleta dos traces de dados e VoIP;
- Modelagem de tráfego em redes PLC utilizando Cadeias de Markov;
- Análise dos resultados obtidos.

Foram feitos estudos e medições nos Laboratório de Telecomunicações do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás (IFG) e Universidade Católica de Goiás (UCG), na cidade de Goiânia, cuja tensão nominal é de 220Vca. Com relação à taxa de transmissão, almejou-se medir a taxa média de transmissão no canal; para tanto, foi utilizado um *software* para monitoramento de redes chamado *Network Probe* (versão 2.7) [64], que fornece em tempo real a taxa de transmissão da rede e o *software Wireshark* [65] para a coleta dos traces de VoIP.

Foram utilizados dois terminais PLC já disponíveis comercialmente, modelo *PlugFácil Powerline Ethernet Bridge*, do fabricante *ASOKA*TM, que opera com frequência de

4,3MHz a 20,9MHz e tem distância entre os dispositivos limitada em 100m. Este adaptador *HomePlug* utiliza modulação OFDM e é certificado pelos padrões IEEE 802.3, IEEE 802.3U e *HomePlug* 1.0.1. A taxa de linha efetiva é de 56Mbps, sendo que a taxa de dados de vazão efetiva é acima de 16Mbps [25].

Para os testes VoIP, os seguintes dispositivos foram conectados à rede como fontes interferentes:

- Um secador de cabelos profissional da marca *TANY Blue* 2000, potência de 1.400W, frequência entre 50-60Hz e tensão de alimentação de 220Vca;
- Um carregador de celular da marca *Nokia*, modelo ACP-12E, entrada de 100-240Vca, frequência entre 50-60Hz, corrente de 125mA, saída de 5,7Vcc e corrente de 800mA;
- Um liquidificador da marca *Walita Quick Clean*, modelo RI1730, com potência de 400W, frequência de 60Hz e tensão de alimentação de 220Vca.

O ato de ligar ou desligar estes dispositivos ou ainda simplesmente conectá-los ou desconectá-los da tomada pode provocar mudanças significativas nas características do meio de transmissão.

O osciloscópio utilizado é da marca *Tektronix*, modelo THS720P (portátil), sendo utilizado como parâmetro nos testes 0,2V/div e 5ms/div no canal 1, e o analisador de espectro é da marca *Minipa*, modelo MSA810, com parâmetros definidos em frequência central de 12Mhz, 2Mhz/div e atenuação de -30dBm. Ambos os equipamentos foram alimentados com energia elétrica vinda de outro circuito próximo.

Para conectar os aparelhos à rede a ser analisada, foi utilizado um divisor de tensão, conectado diretamente ao circuito, que entregava aproximadamente 11,76Vrms ao analisador de espectro e ao osciloscópio. Nos testes com o osciloscópio, foi utilizado um filtro passa-alta (Figura 6.1), responsável por filtrar (eliminar) as baixas frequências não utilizadas pelo PLC, incluindo os 60Hz da rede de 220VAC.

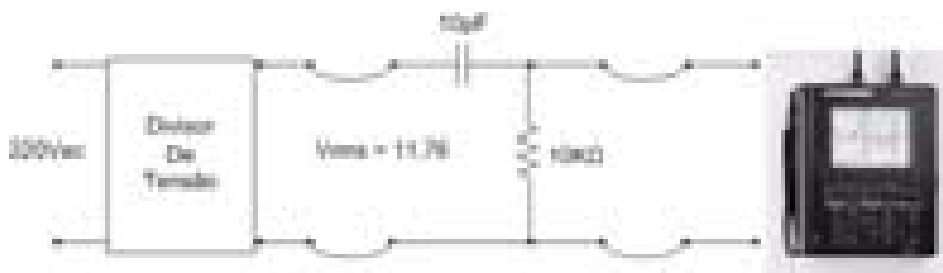


Figura 6.1 – Circuito do Filtro Passa-Alta

A Frequência de Corte (FC) de um filtro Resistor - Capacitor (Filtro RC) é dada por:

$$FC = 1 / 2\pi RC \quad (40)$$

onde R é o valor do resistor e C o valor do capacitor.

Para os testes, foram utilizados um resistor de 10KO e um capacitor de 10pF, que resulta em uma frequência de corte de 1,59MHz. Nesta frequência, o filtro causa uma atenuação de 3dB no sinal capturado. Na frequência da rede (60Hz), a atenuação é máxima, o que não permite a passagem da frequência da rede para a entrada do equipamento. Como o equipamento *HomePlug* opera na faixa de frequência acima de 4MHz, este filtro não causa atenuação no sinal PLC coletado [2][66].

A avaliação da qualidade da transmissão foi feita a partir dos valores obtidos nas medições, com a análise da perda de desempenho, e decaimento da taxa de transmissão em função do tipo de equipamento causador de interferência ligado à linha.

Como parâmetros de análise foram calculados a média, a variância, desvio-padrão e valor de pico/média das taxas de transmissão, dados respectivamente por:

$$Média = \bar{x} = \frac{\sum x}{n} \quad (41)$$

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

$$Variância = \sigma^2 = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1} \quad (42)$$

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

$$Desvio _ Padrão = \sigma = \sqrt{\sigma^2} \quad (43)$$

onde σ^2 é a variância calculada.

O índice pico/média expressa quantas vezes o valor máximo da série foi maior que a média da série, e é dado por:

$$Pico / Média = \frac{x_{máx}}{\bar{x}} \quad (44)$$

O Coeficiente de Correlação mede o grau da correlação e a direção dessa correlação (positiva ou negativa) entre duas variáveis. O coeficiente de correlação possui valores variando entre -1 e 1, e quanto mais próximo destes extremos, maior será a correlação entre as amostras. Se a correlação é negativa, a relação entre as amostras é inversamente proporcional, caso seja positiva ela será diretamente proporcional.

Para n pares de observações das variáveis x e y (amostras de tráfego), o coeficiente de correlação amostral é dado por:

$$r = \frac{\sum_{i=0}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=0}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=0}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (45)$$

O Coeficiente de Correlação pode assumir os seguintes intervalos de valores:

- Menor ou igual a |0,3|: a correlação é fraca;
- Maior que |0,7|: a correlação é forte;
- Entre |0,3| e |0,7|: a correlação é moderada.

A utilização do buffer λ é definida como sendo a razão entre o tempo total de serviço fornecido aos pacotes pelo tempo total de uso do buffer [67]:

- Valor de λ próximo de 1: indica que o buffer está constantemente sendo usado e conseqüentemente há uma maior probabilidade de descarte de dados;
- Valor abaixo de 0,4: significa que o buffer está sendo subutilizado;
- Valor entre 0,6 e 0,7: considerado ideal em redes reais.

A utilização do buffer depende da capacidade do servidor, ou seja, da taxa em que os dados são transmitidos [67].

6.1 CENÁRIO DE TESTES – TRANSMISSÃO DE DADOS

A topologia dos testes de transmissão de dados pode ser vista na Figura 6.2.



Figura 6.2 – Topologia utilizada nos testes de transmissão de dados

Para a análise do sinal PLC, foi realizada a transferência de arquivos de aproximadamente 2,5GB cada, via servidor FTP (*File Transfer Protocol*), de um *notebook* para outro, durante 1 hora e meia, atualizando as taxas de transmissão a cada 5 segundos. Os quadros transmitidos possuem tamanho fixo de 512 *bytes*.

As figuras a seguir, estão organizadas da seguinte forma: a Figura 6.3 demonstra a captura do osciloscópio digital, a Figura 6.4 apresenta a captura realizada no analisador de espectro e a Figura 6.5 mostra o gráfico das taxas de transmissão.

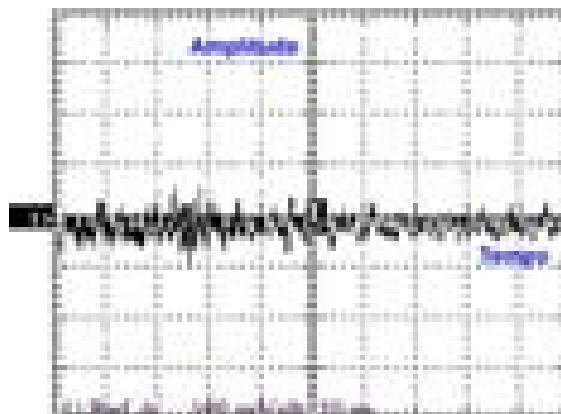


Figura 6.3 – Rede Elétrica com Sinal PLC Transmitindo (Osciloscópio)

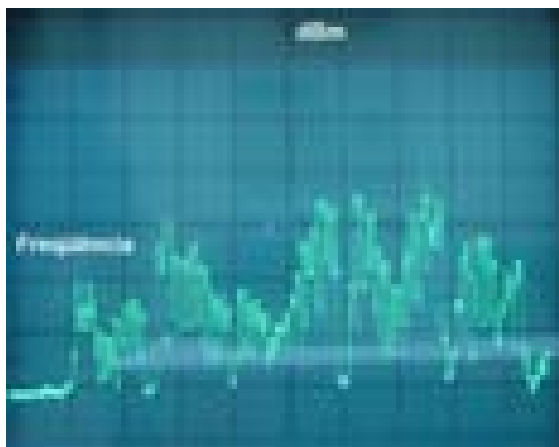


Figura 6.4 – Rede Elétrica com Sinal PLC Transmitindo (Analisador de Espectro)

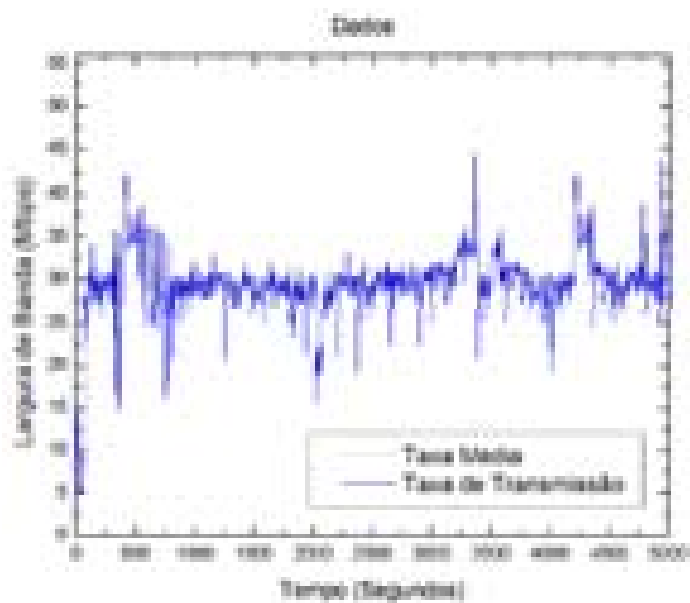


Figura 6.5 – Taxa de bits para um sinal PLC

Como mostra a Figura 6.5, em geral, as taxas de transmissão se mantiveram aproximadamente constantes, oscilando em torno da média de 29,5Mbps, sendo que o valor máximo encontrado foi de 44,45Mbps. Ressalta-se que não houve perda de pacotes.

A Tabela 6.1 apresenta os resultados obtidos a partir da transferência de dados utilizando a rede PLC como meio de transmissão. A variância para a taxa de transmissão encontrada foi de aproximadamente 18,4 e o desvio padrão foi aproximadamente 4,3.

Tabela 6.1 – Resultados obtidos com a transmissão de dados através da rede PLC

Parâmetros Analisados	Dados sem Interferência
Variância	18,36441
Média (Mbps)	29,50488
Desvio Padrão	4,28323
Valor Máximo (Mbps)	44.4500
Valor Mínimo (Mbps)	4,77442
Pico/Média	1,506531

De acordo com [2] e [66], pode-se observar que, quando há eletrodomésticos conectados a rede PLC, o equipamento *HomePlug* utilizado para os testes sofre interferências, que implicam em oscilações nas taxas de transmissões de dados. A Tabela 6.2 apresenta uma comparação estatística entre as médias das taxas de transmissão encontradas nos experimentos realizados e a relação com a presença ou não de ruídos na rede PLC.

Tabela 6.2 – Análise estatística das taxas de transmissão (sinal PLC com interferências) [2][66]

	Média (Mbps)	Variância	Desvio Padrão
<i>Sinal PLC Puro</i>	29,50488	18,36441	4,28323
<i>Liquidificador</i>	1,99	1,66	1,29
<i>Secador de Cabelo</i>	3,49	6,42	2,53
<i>Furadeira</i>	16,42	73,28	8,56
<i>Carregador de Celular</i>	18,78	23,16	4,81

O desvio-padrão mede o grau de dispersão dos dados numéricos em torno de um valor médio de taxa de transferência. A furadeira foi o equipamento com maior desvio-padrão da taxa de transmissão encontrado. O liquidificador, apesar de ter provocado as piores taxas de transmissão, se obteve um menor desvio-padrão, com taxas de transmissão mais constantes.

6.2 CENÁRIO DE TESTES – TRANSMISSÃO VOIP

Para a transmissão de voz (VoIP) em redes PLC foram utilizados softwares de código livre (GPL/GNU – *GNU General Public License*): *Asterisk* (central PABX), e *X-Lite* (cliente *softphone*).

O *Asterisk* é um software livre, *open source*, que substitui qualquer outro PABX usado em uma empresa e possui funções como: redirecionamento de chamadas, música em espera, conferência, correio de voz, entre outros, que podem ser habilitadas com configurações relativamente simples [68].

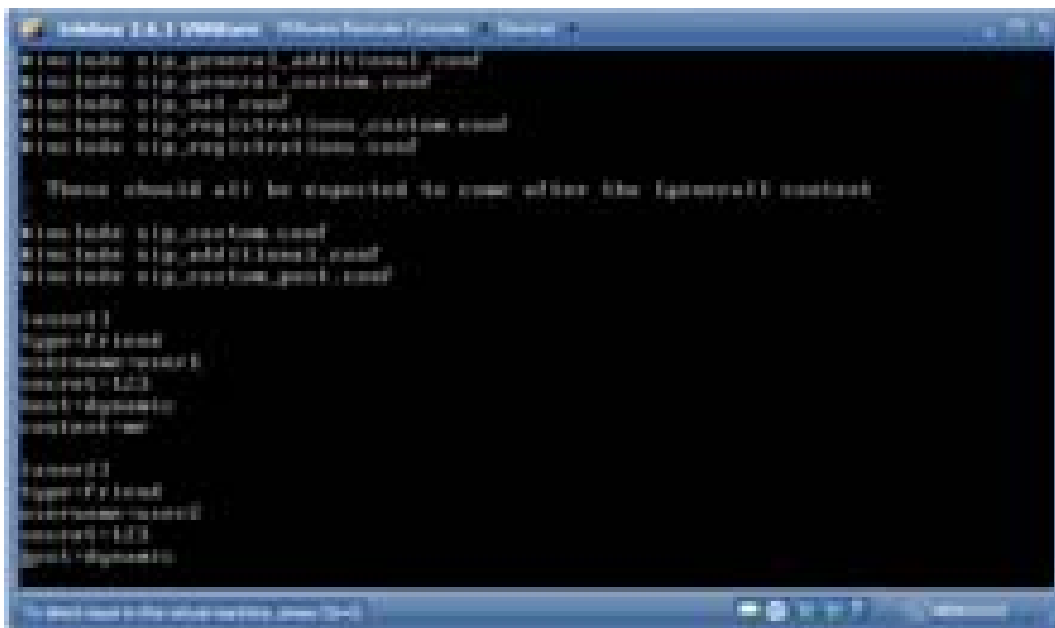
O software *X-Lite*, que pode ser visto na Figura 6.6, é um *softphone* que utiliza protocolo SIP para sinalização e CODEC G-711 para codificação da voz, disponível para plataforma *Windows*, *Linux*, e *Macintosh*. Atualmente possui a versão 3.0 (estável) e a versão 4.0 (beta).



Figura 6.6 – Software X-lite

Para os testes, foi utilizado uma máquina virtual baseada na distribuição *Linux CentOS*, o *trixbox® CE*, um projeto *open source* da *Fonality*. O *trixbox® CE* integra *Asterisk*, *Linux*, *MySQL*, *FreePBX*, *HUDlite*, além de aplicações adicionais. Para a configuração dos ramais é necessária a simples edição dos arquivos *sip.conf* e *extensions.conf* [68].

No arquivo *sip.conf*, como demonstrado na Figura 6.7, são configuradas as contas dos usuários. Para os testes, as configurações padrões foram mantidas, adicionando-se somente as contas dos usuários (*user*).



```

include = sip_general_additional.conf
include = sip_general_options.conf
include = sip_nat.conf
include = sip_registrar_options.conf
include = sip_registrar.conf

; These should all be deprecated to avoid clutter the ignore.conf

include = sip_options.conf
include = sip_additional.conf
include = sip_options.conf

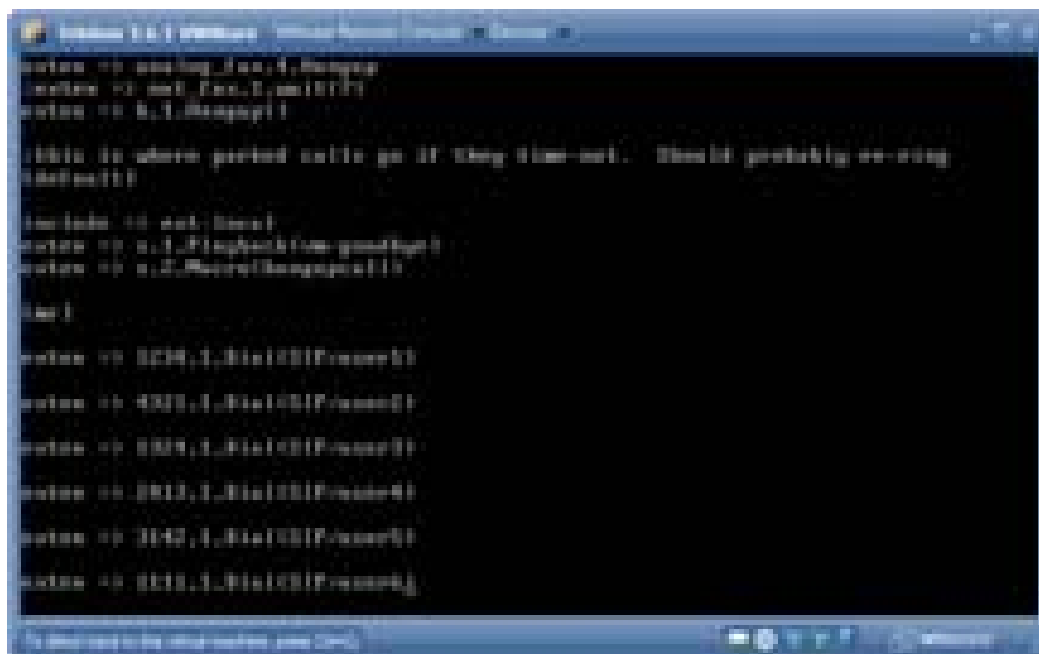
[general]
support_level
contrib_modules
support_level
support_level

[general]
support_level
contrib_modules
support_level
support_level

```

Figura 6.7 – Arquivo *sip.conf*

No arquivo *extensions.conf*, como pode ser visto na Figura 6.8, configura-se o redirecionamento das chamadas, tanto para recebimento quanto para discagem, com a relação ramal/usuário.



```

include = ext_additional.conf
include = ext_additional.conf
include = ext_additional.conf

; This is where you put all the go if they don't work. Should probably be doing
; this

include = ext_additional.conf
include = ext_additional.conf
include = ext_additional.conf

[ext]

exten = 1000,1,Dial(SIP/1000)
exten = 1001,1,Dial(SIP/1001)
exten = 1002,1,Dial(SIP/1002)
exten = 1003,1,Dial(SIP/1003)
exten = 1004,1,Dial(SIP/1004)
exten = 1005,1,Dial(SIP/1005)

```

Figura 6.8 – Arquivo *extensions.conf*

A topologia dos testes de VoIP utilizando a rede PLC como meio de transmissão pode ser vista na Figura 6.9. A distância entre os adaptadores foi de 30 metros.

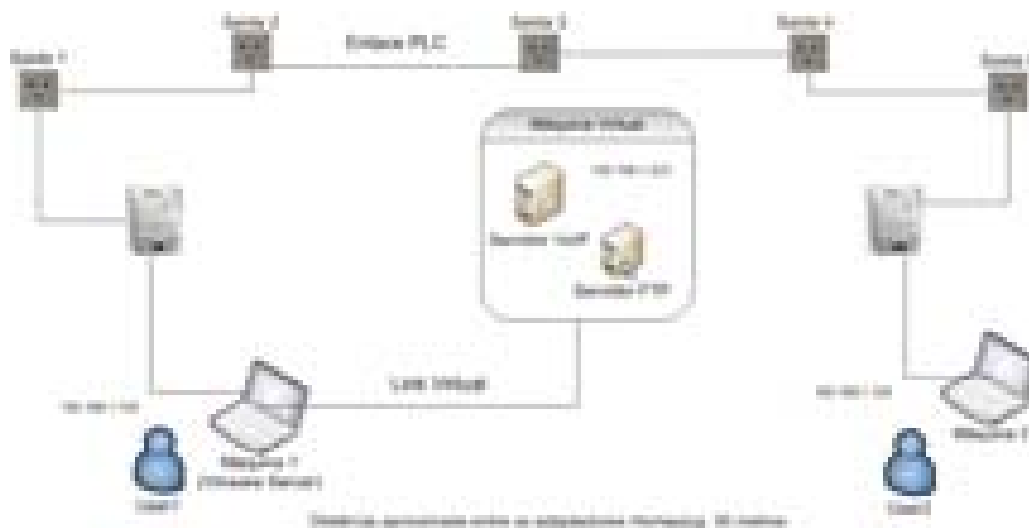


Figura 6.9 – Topologia dos Testes PLC – VoIP

Para a análise da comunicação VoIP utilizando a rede PLC como meio de transmissão, foram realizadas conversações em torno de 10 minutos, através do *softphone*, onde os usuários estavam a distância aproximada de 30m. A coleta dos *traces* foi feita utilizando o *software Wireshark*. O Codec utilizado foi o G-711, e os quadros transmitidos possuem tamanho fixo de 214 *bytes*.

Os parâmetros analisados foram:

- Taxa de Transmissão
- *Jitter*
- Perda de Pacotes

A Figura 6.10 mostra o sinal de voz sem interferências no Analisador de Espectros.

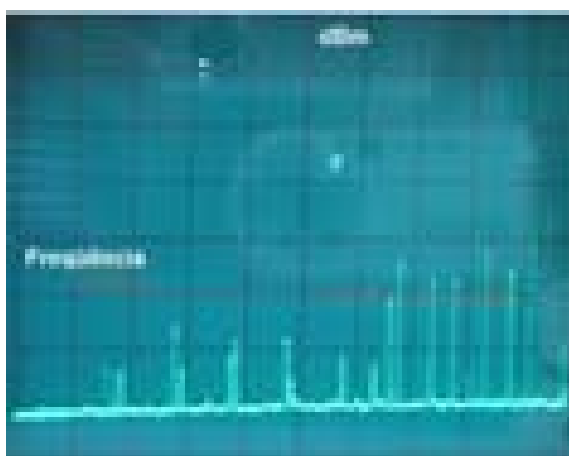


Figura 6.10 – Sinal de voz sem interferências no Analisador de Espectros

Como pode ser observado na Figura 6.11, a taxa de transmissão para a comunicação VoIP variou em torno de 80,25kbps.

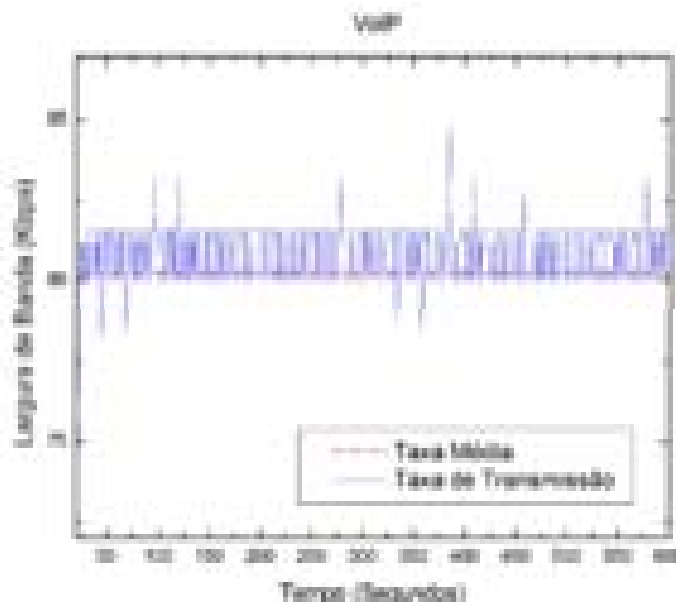


Figura 6.11 – Taxa de bits para uma comunicação VoIP

A Tabela 6.3 apresenta dados relativos ao *jitter* da comunicação VoIP utilizando a rede elétrica como meio de transmissão. O valor de *jitter* (7,6ms) encontrado nos testes para a comunicação VoIP sem interferência está dentro do aceitável para comunicações VoIP, em que o *jitter* máximo aceitável é de até 30ms [3][45]. Outro dado relevante dos testes sem interferência é que a perda de pacotes neste cenário foi nula (a perda tolerável está entre 1% e 2%), como pode ser observado na Tabela 6.4.

Tabela 6.3 – *Jitter* na comunicação VoIP

<i>Jitter</i>	VoIP	VoIP + Dados	Secador	Liquidificador	Carregador
<i>Variância</i>	4,5105	0,2470	0,6674	0,4055	19,1093
<i>Média (ms)</i>	4,4965	0,4433	3,8266	3,551	15,0116
<i>Desvio Padrão</i>	2,1238	0,4970	0,8170	0,6368	4,3714
<i>Valor Máximo (ms)</i>	7,6000	5,0800	8,1900	6,5700	34,7200

Como pode ser visto na Tabela 6.4, quando há eletrodomésticos conectados na rede PLC, existem perdas, ainda que aceitáveis, na comunicação VoIP, com exceção do carregador de celular, que apresentou 6,2% de perda de pacotes.

Tabela 6.4 – Perda de Pacotes na comunicação VoIP

	VoIP	VoIP + Dados	Secador	Liquidificador	Carregador
<i>Perda de Pacotes</i>	0%	0,01%	0,04%	0,3%	6,2%

6.3 MODELAGEM DE TRÁFEGO EM REDES PLC

Para a modelagem do tráfego de dados e VoIP com a rede PLC como meio de transmissão, foram utilizadas Cadeias de Markov Fluída (MMFM), através do ajuste da função de autocorrelação do modelo para os dados reais (bits por unidade de tempo). Como a função de autocorrelação tende a uma exponencial, utilizou-se o *curve fitting* (MatLab®) para encontrar o parâmetro dessa exponencial. Os *traces* de dados e VoIP possuem, para fins de análise, 1000 amostras. Considerou-se também nas simulações, os modelos de Poisson e MMPP.

Os parâmetros estatísticos considerados foram:

- Média;
- Variância;
- Desvio padrão;
- Valor Máximo;
- Pico/Média.

O Modelo Markoviano Fluido (MMFM) inicia-se com a modelagem da função de autocovariância através do ajuste de uma função exponencial para a função de autocorrelação do processo real. O parâmetro (a) da função exponencial encontrado a partir do *curve fitting* é utilizado para calcular as intensidades (taxas) de nascimentos (a) e mortes (β) de uma cadeia de Markov do tipo “*birth and death*”, através do algoritmo disponível em [48], e então uma série sintética é gerada. A taxa de bits $\lambda(t)$ é dada em pacotes por segundo (pps) e o número de fontes agregadas é igual a 1.

A criação do *trace* MMPP a partir dos dados reais é feita com a utilização do algoritmo disponível em [68]. Esse algoritmo é dividido em 5 partes:

- Parte 1: Determina taxas e número de estados do MMPP usando o algoritmo LAMBDA;
- Parte 2: Atribua a cada amostra a cada amostra um estado;
- Parte 3: Forma a matriz probabilidade de transição de estados e matriz geradora infinitesimal (Q-matriz) a partir da matriz de transição de estados;
- Parte 4: Gera a amostra MMPP a partir da Q-Matrix;
- Parte 5: Conhecidos os estados e os tempos, gera os pacotes MMPP.

6.3.1 Modelagem da Transmissão de Dados

Para a modelagem da transmissão de dados, foram coletados *traces* de tráfego da transmissão de arquivos de aproximadamente 2,5GB cada, via servidor FTP, em uma rede PLC. Este arquivo foi importado no *MatLab*[®] para que fossem feitas toda as análises necessárias. O arquivo analisado possui 1000 amostras representando pacotes por segundo (pps).

A Figura 6.12 apresenta a curva exponencial encontrada para a função de autocorrelação das amostras reais de tráfego e a curva exponencial calculada através do algoritmo de *curve fitting* que é utilizado no MMFM, e se aproxima de uma função hiper-exponencial⁹.

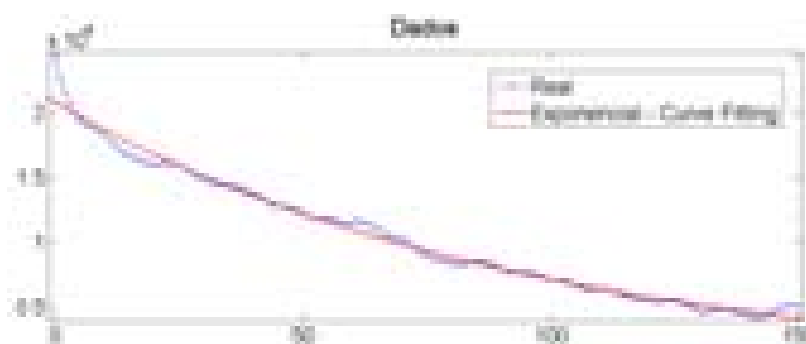


Figura 6.12 – Exponencial *curve fitting* (transferência de dados)

As Figuras 6.13, 6.14, 6.15 e 6.16 apresentam os *traces* reais e os sintéticos (MMFM, MMPP e Poisson), respectivamente, gerados a partir dos dados reais de uma transferência de dados em uma rede PLC. O modelo MMFM gerado apresenta 100 estados.

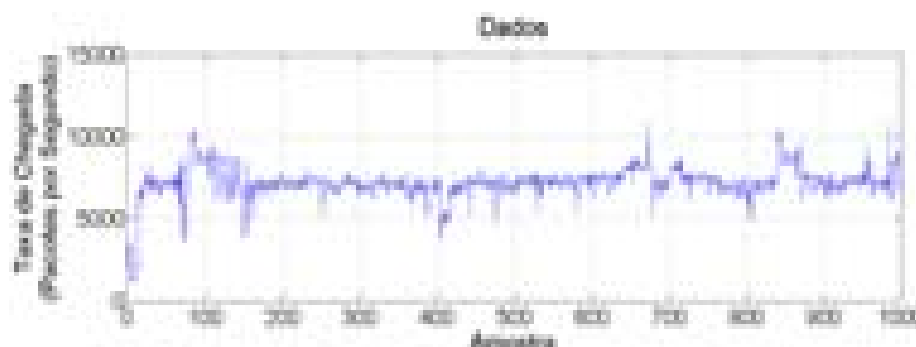


Figura 6.13 – *Trace* de transferência de dados (Real)

⁹ A distribuição exponencial é a distribuição de tempo mais importante dentro da teoria de teletráfego. A combinação de n distribuições exponenciais em paralelo é chamada de distribuição hiper-exponencial, onde a probabilidade de escolha da i -ésima distribuição é dada por p_i . Sua função de distribuição aumenta mais lentamente de 0 a 1 do que a distribuição exponencial [70].

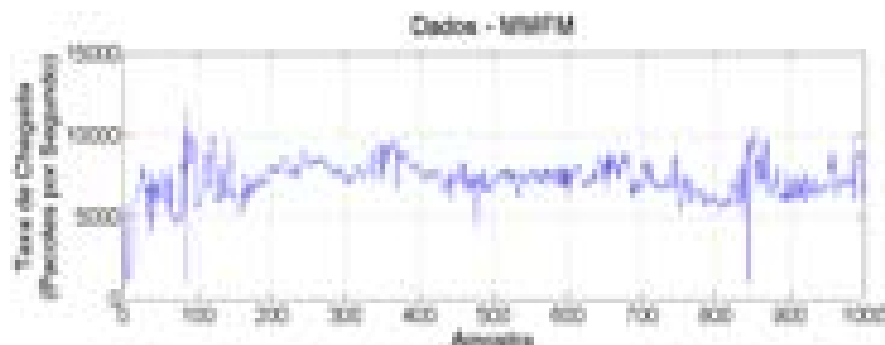


Figura 6.14 – *Trace* de transferência de dados sintético (MMFM)

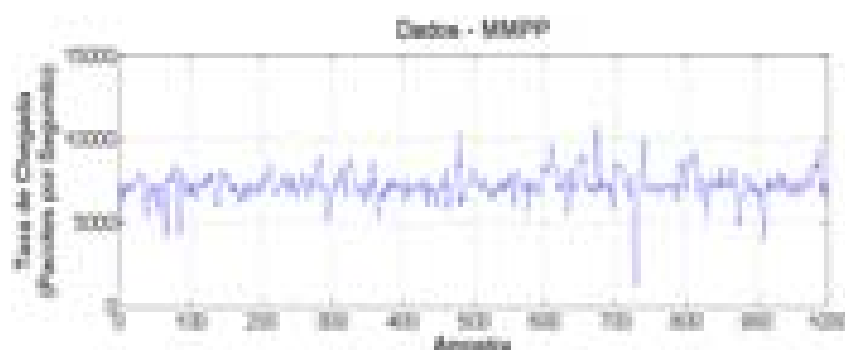


Figura 6.15 – *Trace* de transferência de dados sintético (MMPP)

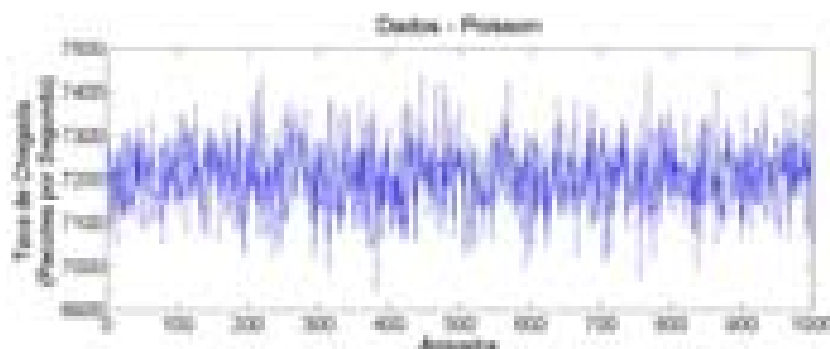


Figura 6.16 – *Trace* de transferência de dados sintético (Poisson)

O histograma representa a distribuição da amostra através de um número n de retângulos igualmente espaçados. Quanto maior for o número n , maior será a precisão do histograma, desde que haja um número suficiente de amostras de dados para a convergência assintótica do histograma para a densidade de probabilidade. A Figura 6.17 apresenta o histograma da serie real, e as Figuras 6.18, 6.19 e 6.20 apresentam as séries sintéticas (MMFM, MMPP e Poisson, respectivamente), geradas a partir do *trace* de dados real.

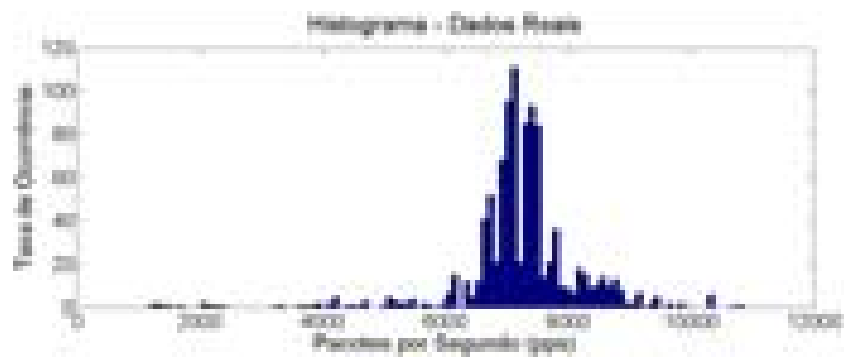


Figura 6.17 – Histograma (Dados Reais)

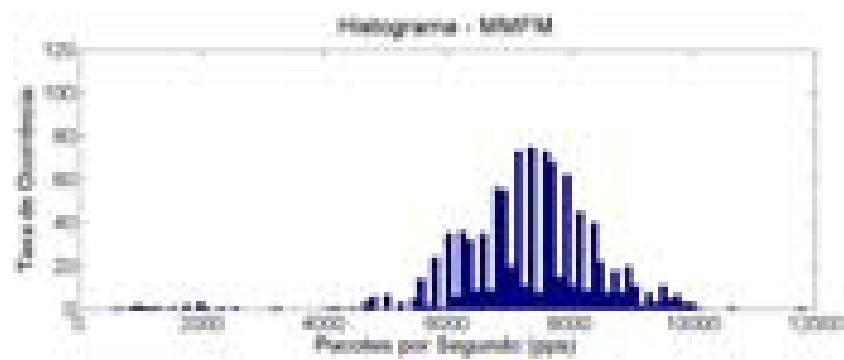


Figura 6.18 – Histograma (MMFM)

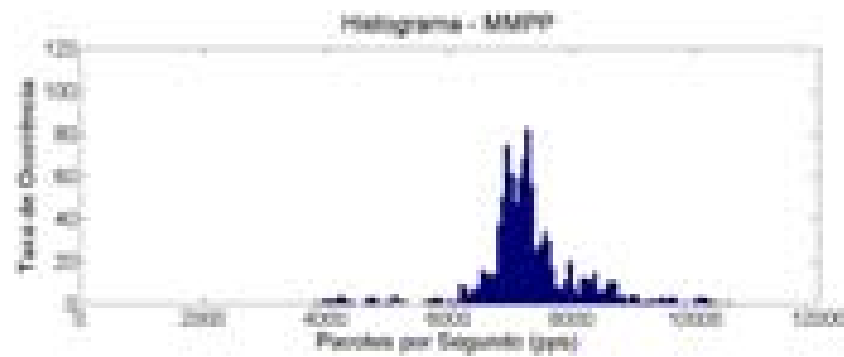


Figura 6.19 – Histograma (MMPP)

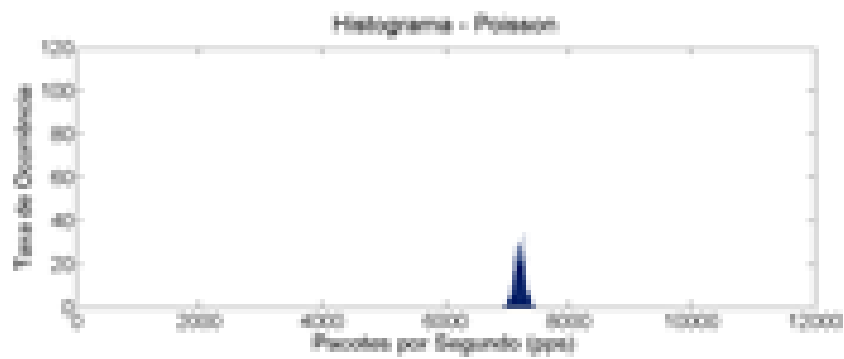


Figura 6.20 – Histograma (Poisson)

O histograma dos dados reais (Figura 6.17) apresenta pelo menos 4 picos (blocos) de taxas de ocorrência para valores entre 4000 e 10000 pacotes por segundo, e pequenas ilhas isoladas, principalmente para valores entre 1000 e 6000 pacotes por segundo. No histograma da série MMFM (Figura 6.18), tem-se uma distribuição de taxas de ocorrência próxima a uma de distribuição Normal, onde existe uma frequência de ocorrência mais alta no centro, frequências decrescentes para os valores entre 4000 e 10000 pacotes por segundo, e algumas ilhas isoladas para valores entre 1000 e 6000 pacotes por segundo e entre 9000 e 11000 pacotes por segundo. O histograma da série MMPP (Figura 6.19) apresenta alguns picos de taxas de ocorrência para valores entre 4000 e 10000 pacotes por segundo. O histograma da série de Poisson (Figura 6.20) apresenta diversos picos de taxas de ocorrência, oscilando entre 7000 e 7400 pacotes por segundo.

A Tabela 6.5 apresenta uma comparação entre as estatísticas do *trace* real e das séries geradas relacionadas ao tráfego de dados na rede PLC. Como podem ser observados, os parâmetros estatísticos calculados para o modelo MMFM estão mais próximos dos parâmetros calculados para o *trace* real da transferência de dados, bem como os parâmetros estatísticos encontrados para o modelo MMPP. O modelo de Poisson apresentou um desempenho inferior para modelar esse tipo de tráfego, visto que obteve valores para estes parâmetros estatísticos mais distantes dos valores do *trace* real.

Tabela 6.5 – Comparação de parâmetros estatísticos para transferência de dados

Estatísticas	Dados Reais	MMPP	MMFM	Poisson
Variância	1,07E+06	7,31E+05	1,57E+06	6,36E+03
Média (pps)	7,20E+03	7,29E+03	7,30E+03	7,21E+03
Desvio Padrão	1,04E+03	8,55E+02	1,25E+03	7,98E+01
Valor Máximo (pps)	1,09E+04	1,06E+04	1,18E+04	7,44E+03
Valor Mínimo (pps)	1,17E+03	3,81E+03	5,82E+02	6,95E+03
Pico/Média	1,506	1,449	1,62	1,03

A Tabela 6.6 apresenta o coeficiente de correlação das amostras sintéticas com as amostras dos *traces* reais (transferência de dados). Como pode ser observado, a correlação entre os dados reais e a série MMFM é moderada (dentro do intervalo entre $|0,3|$ e $|0,7|$), enquanto para as outras séries é considerada fraca (dentro do intervalo menor ou igual a $|0,3|$).

Tabela 6.6 – Coeficiente de correlação para transferência de dados

Série	Coeficiente de Correlação com a Série Real
MMFM	0,6863
MMPP	-0,2173
Poisson	0,0211

A Figura 6.21 apresenta o gráfico da função de autocorrelação para os dados reais e para os modelos considerados. Pode-se notar que a função de autocorrelação do MMFM tem um decaimento semelhante ao decaimento da função de autocorrelação do processo real.

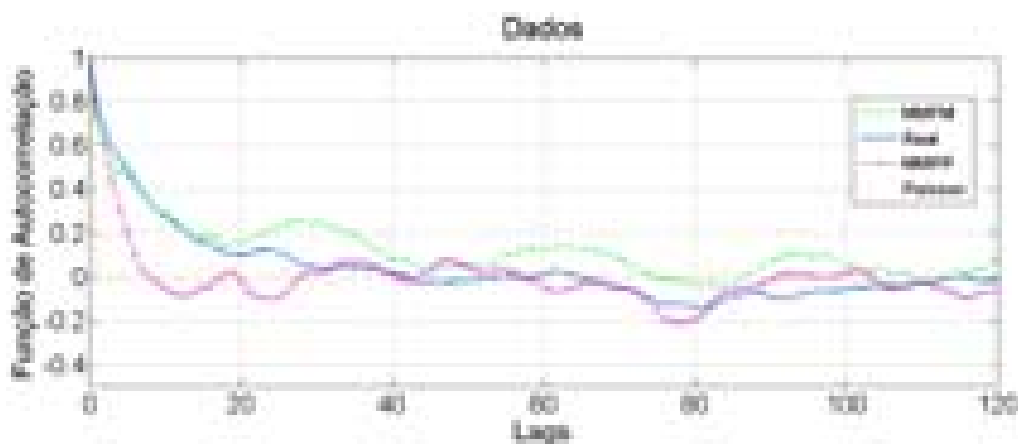


Figura 6.21 – Função de Autocorrelação

A função de distribuição de probabilidade (pdf - *probability density function*) é utilizada para representar as probabilidades com as quais a variável aleatória poderá assumir determinados valores. A Figura 6.22 apresenta a distribuição de probabilidade para o *trace* real e para os *traces* sintéticos gerados. Pode se observar que o modelo MMFM modelou razoavelmente bem a função de densidade de probabilidade dos dados reais (tráfego de dados). Das distribuições de probabilidade obtidas, a relativa ao modelo de Poisson se mostrou ser a menos apropriada.

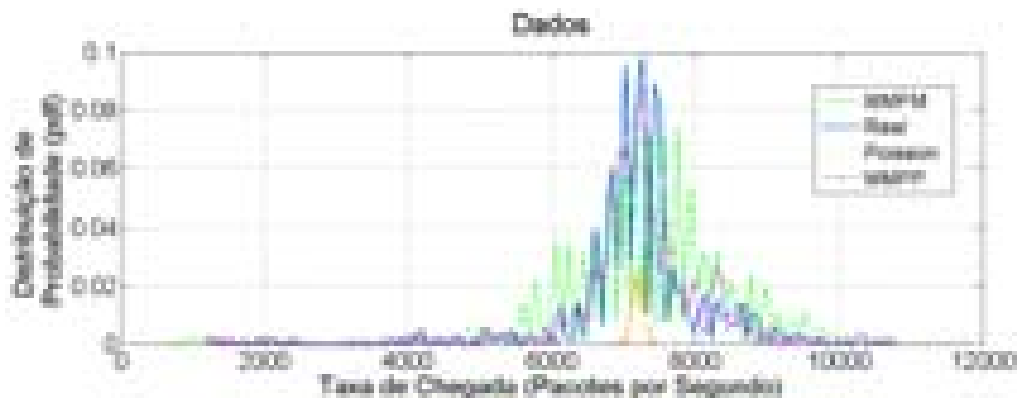


Figura 6.22 – Distribuição de Probabilidade (pdf)

Com relação a análise do comportamento de fila do tráfego real em comparação com o tráfego sintético dado pelos modelos Markovianos, considerou-se dois diferentes fatores: a ocupação média em bits do *buffer* em relação a utilização do *buffer* e a taxa de perda de bits em relação ao tamanho do *buffer*.

A Figura 6.23 mostra a ocupação média de bits para um *buffer* finito de tamanho de 51,2kbytes (409600 bits) versus a utilização do mesmo.



Figura 6.23 – Ocupação média do buffer para transmissão de Dados

Para filas com tamanho médio maiores, o valor de λ encontrado tanto para os traces de dados reais quanto para os traces sintéticos gerados está próximo de 1, o que indica que o *buffer* está constantemente sendo usado e conseqüentemente há uma maior probabilidade de descarte de dados.

A Figura 6.24 apresenta a probabilidade de perda de *bytes* versus o tamanho do *buffer* para a transferência de dados. O tamanho do *buffer* variou de 1 byte a um tamanho máximo de 51,2Kbytes (409600 bits). O modelo proposto (MMFM) apresentou uma perda entre 6% a

2,8% de *bytes*. O tráfego real apresentou entre 4% a 1,2% de perda de *bytes*. O Modelo MMPP foi o que apresentou a menor perda de *bytes*.

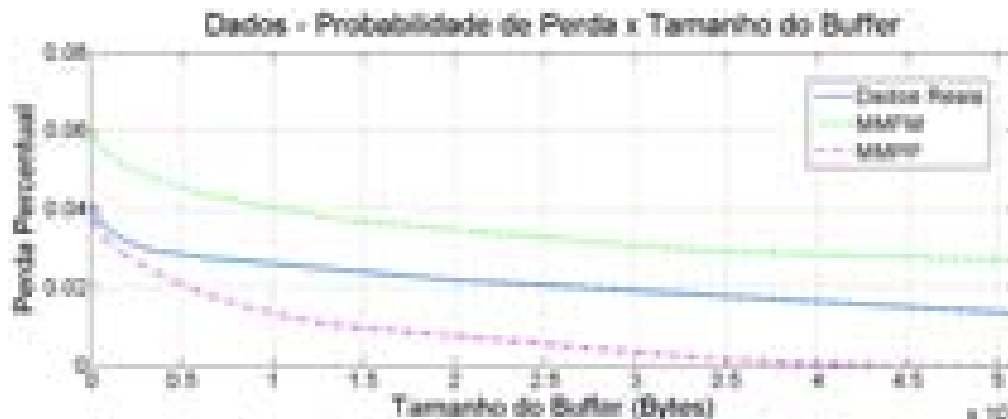


Figura 6.24 - Probabilidade de perda de bytes versus tamanho do buffer

Para fins de análise, a Tabela 6.7 apresenta uma comparação entre as estatísticas de um segundo *trace* real (com 1500 amostras) e das séries geradas relacionadas ao tráfego de dados na rede PLC. Como podem ser observados, os parâmetros estatísticos calculados para o modelo MMFM também continuam próximos dos parâmetros calculados para o *trace* real da transferência de dados, bem como os parâmetros estatísticos encontrados para o modelo MMPP. O modelo de Poisson apresentou um desempenho inferior para modelar esse tipo de tráfego, visto que obteve valores para estes parâmetros estatísticos mais distantes dos valores do *trace* real. Os gráficos encontrados anteriormente são semelhantes para este segundo *trace*.

Tabela 6.7 – Comparação de parâmetros estatísticos para transferência de dados

Estatísticas	Dados Reais	MMPP	MMFM	Poisson
Variância	2,731E+06	2,681E+06	2,945E+06	6,477E+03
Média (pps)	6,288E+03	5,849E+03	5,550E+03	6,553E+03
Desvio Padrão	1,653E+03	1,637E+03	1,716E+03	8,048E+01
Valor Máximo (pps)	1,085E+04	9,685E+03	1,022E+04	6,553E+03
Valor Mínimo (pps)	2,632E+03	2,731E+03	0,0	6,058E+03
Pico/Média	1,726	1,656	1,841	1,000

Para fins de análise, foi implementado o modelo MMFM utilizando 2, 10 e 50 estados, para avaliar o desempenho na modelagem de tráfego de dados em redes PLC.

A Figura 6.25 representa o *trace* sintético MMFM com 2 estados, gerados a partir da transferência de dados em redes PLC.

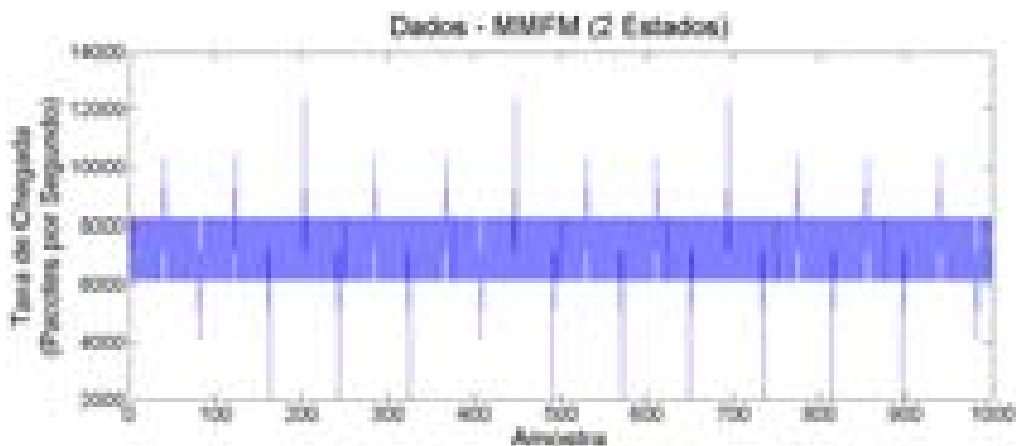


Figura 6.25 – Trace de transferência de dados sintético (MMFM – 2 Estados)

A Figura 6.26 apresenta o histograma da série sintética MMFM gerada com 2 estados, a partir do *trace* de transferência de dados real. Como pode ser observado na Figura 6.26, como o modelo apresenta apenas 2 estados, as taxas de ocorrência se concentram em 2 picos, em torno de 6000 e 8000 pacotes por segundo.

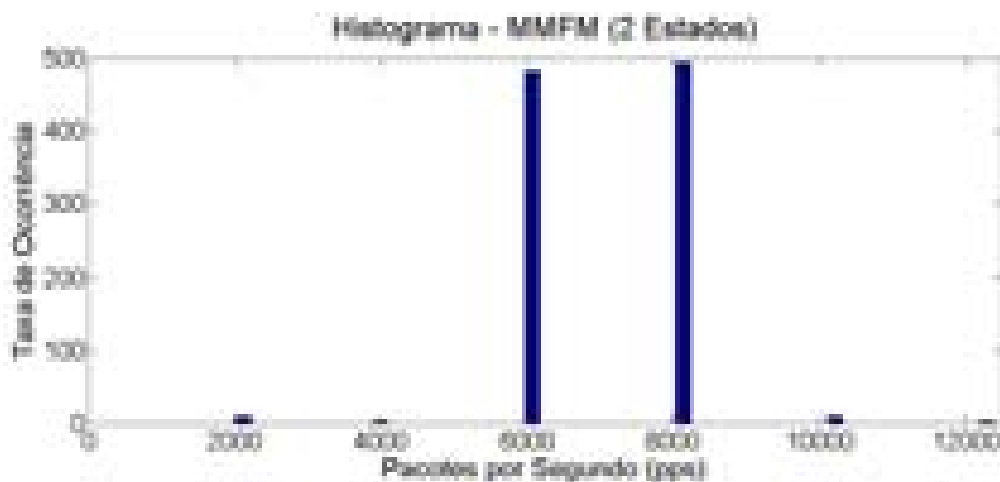


Figura 6.26 – Histograma (MMFM – 2 Estados)

A Tabela 6.8 apresenta uma comparação entre as estatísticas do *trace* real e as séries geradas, relacionadas à transferência de dados através da rede PLC. Como pode ser observado, para poucos estados o modelo MMFM não manteve as estatísticas próximas ao do *trace* de dados reais.

Tabela 6.8 – Comparação de Parâmetros Estatísticos (transferência de dados) para Modelo MMFM com 2 Estados

Estatísticas	Dados Reais	MMPP	MMFM	Poisson
Variância	1,07E+06	7,31E+05	1,4886E+006	6,477E+03
Média (pps)	7,20E+03	7,29E+03	7,2042E+003	6,553E+03
Desvio Padrão	1,04E+03	8,55E+02	1,2201E+003	8,048E+01
Valor Máximo (pps)	1,09E+04	1,06E+04	1,2387E+004	6,553E+03
Valor Mínimo (pps)	1,17E+03	3,81E+03	2,0213E+003	6,058E+03
Pico/Média	1,506	1,449	1,7194	1,000

A Tabela 6.9 apresenta o coeficiente de correlação das amostras com os *trace* real (transferência de dados). Como pode ser observado, a correlação entre os dados reais e as séries sintéticas geradas (MMFM, MMPP e Poisson) é considerada fraca (dentro do intervalo menor ou igual a $|0,3|$).

Tabela 6.9 – Coeficiente de Correlação (transferência de dados) para Modelo MMFM com 2 Estados

Série	Coeficiente de Correlação com a Série Real
MMFM	-0,0148
MMPP	-0,2173
Poisson	0,0211

A Figura 6.28 apresenta a distribuição de probabilidade, comparando o *trace* real da transferência de dados com o *trace* sintético do modelo MMFM com 2 estados.

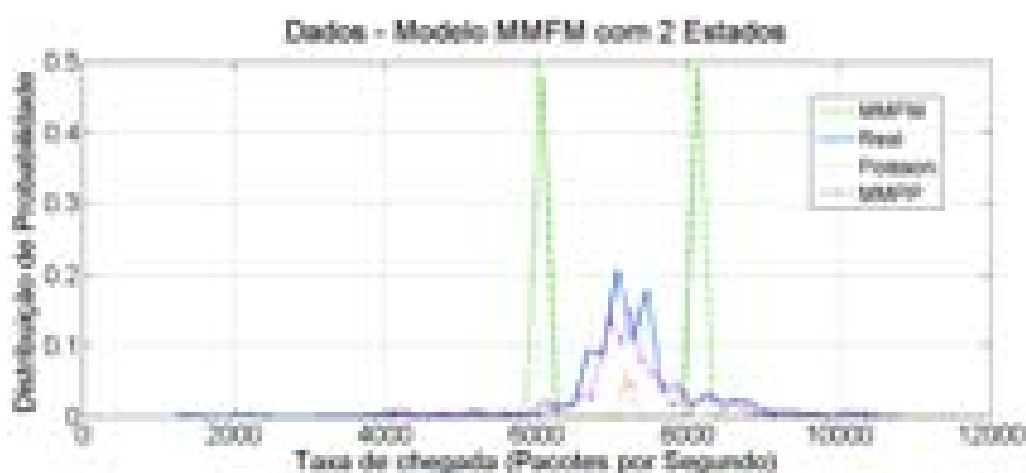


Figura 6.27 – Distribuição de Probabilidade (pdf) para Modelo MMFM com 2 Estados

Nota-se que o processo gerado pelo modelo MMFM utilizando 2 estados não modelou de forma satisfatória, apresentando uma distribuição de probabilidade bem distante da distribuição de probabilidade para os dados reais.

A Figura 6.28 representa o *trace* sintético MMFM com 10 estados, gerados a partir da transferência de dados em redes PLC.

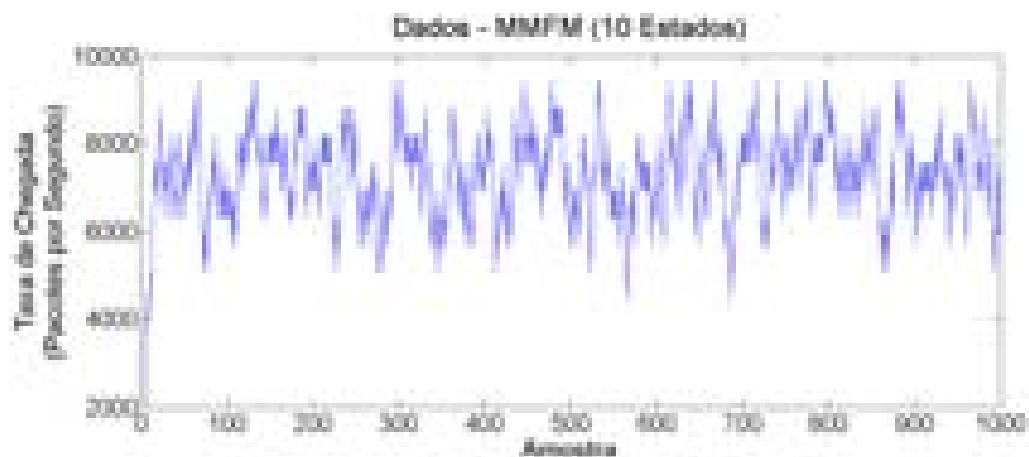


Figura 6.28 – *Trace* de transferência de dados sintético (MMFM – 10 Estados)

A Figura 6.29 apresenta o histograma da série sintética MMFM gerada com 10 estados, a partir do *trace* de transferência de dados real.

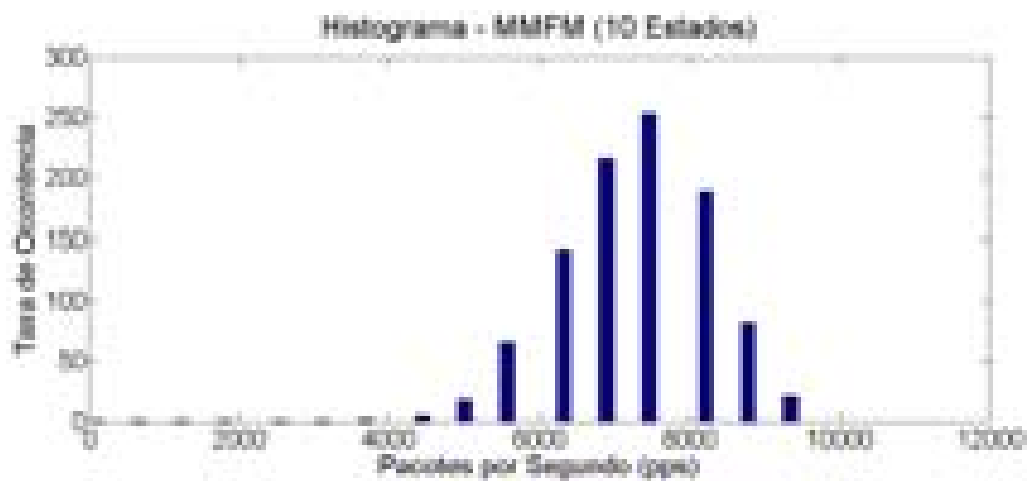


Figura 6.29 – Histograma (MMFM – 10 Estados)

Como pode ser observado na Figura 6.29, o histograma do modelo MMFM com 10 estados apresenta uma maior variabilidade de taxas de ocorrência, com o gráfico se aproximando de uma distribuição normal.

A Tabela 6.10 apresenta uma comparação entre as estatísticas do *trace* real e as séries geradas, relacionadas à transferência de dados através da rede PLC.

Tabela 6.10 – Comparação de Parâmetros Estatísticos (transferência de dados) para Modelo MMFM com 10 Estados

Estatísticas	Dados Reais	MMPP	MMFM	Poisson
Variância	1,07E+06	7,31E+05	1,5303E+006	6,477E+03
Média (pps)	7,20E+03	7,29E+03	7,1466E+003	6,553E+03
Desvio Padrão	1,04E+03	8,55E+02	1,2370E+003	8,048E+01
Valor Máximo (pps)	1,09E+04	1,06E+04	9,4415E+003	6,553E+03
Valor Mínimo (pps)	1,17E+03	3,81E+03	0	6,058E+03
Pico/Média	1,506	1,449	1,3211	1,000

A Tabela 6.11 apresenta o coeficiente de correlação das amostras com os *trace* real (transferência de dados). Como pode ser observado, a correlação entre os dados reais e para as séries sintéticas geradas MMFM é considerada moderada (dentro do intervalo entre $|0,3|$ e $|0,7|$).

Tabela 6.11 – Coeficiente de Correlação (transferência de dados) para Modelo MMFM com 10 Estados

Série	Coefficiente de Correlação com a Série Real
MMFM	0,3423
MMPP	-0,2173
Poisson	0,0211

A Figura 6.30 apresenta a distribuição de probabilidade, comparando o *trace* real da transferência de dados com o *trace* sintético do modelo MMFM com 10 estados.

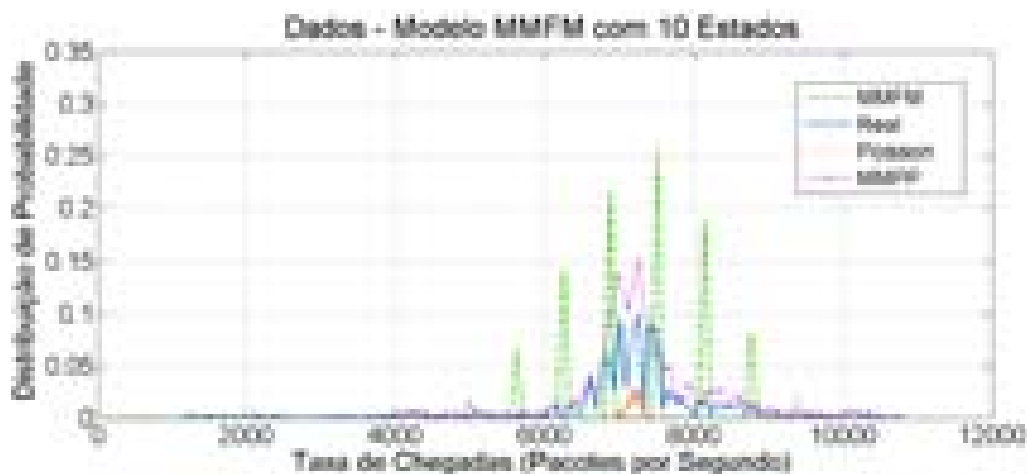


Figura 6.30 – Distribuição de Probabilidade (pdf) para Modelo MMFM com 10 Estados

Nota-se que o processo gerado pelo modelo MMFM utilizando 10 estados apresentou uma melhor distribuição de probabilidade em comparação com o modelo MMFM com 2 estados.

A Figura 6.31 representa o *trace* sintético MMFM com 50 estados, gerados a partir da transferência de dados em redes PLC.

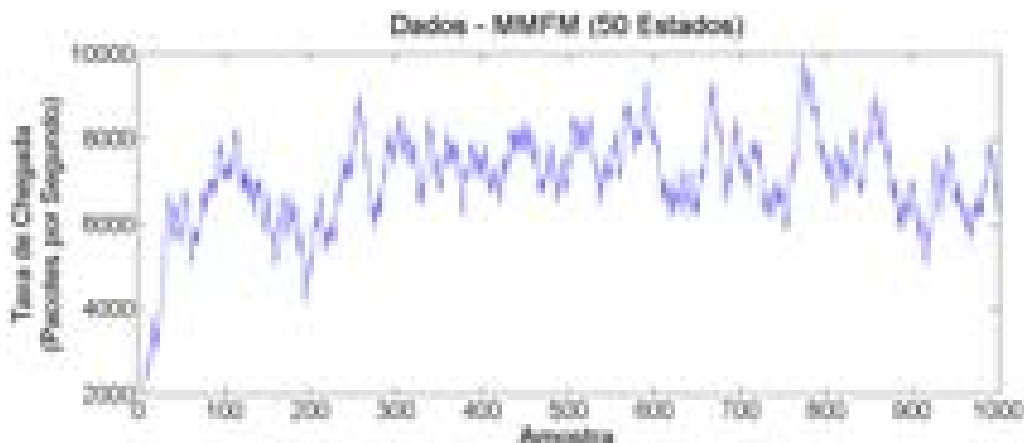


Figura 6.31 – *Trace* de transferência de dados sintético (MMFM – 50 Estados)

A Figura 6.32 apresenta o histograma da série sintética MMFM gerada com 50 estados, a partir do *trace* de transferência de dados real.

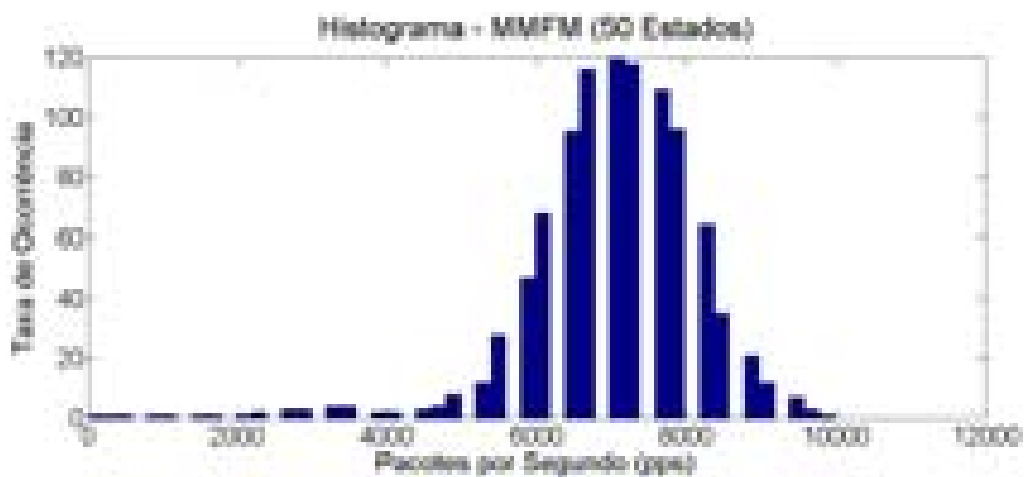


Figura 6.32 – Histograma (MMFM – 50 Estados)

Como pode ser observado na Figura 6.32, o histograma do modelo MMFM com 10 estados apresenta uma maior variabilidade de taxas de ocorrência, com o gráfico se aproximando de uma distribuição normal.

A Tabela 6.12 apresenta uma comparação entre as estatísticas do *trace* real e as séries geradas, relacionadas à transferência de dados através da rede PLC.

Tabela 6.12 – Comparação de Parâmetros Estatísticos (transferência de dados) para Modelo MMFM com 50 Estados

Estatísticas	Dados Reais	MMPP	MMFM	Poisson
Variância	1,07E+06	7,31E+05	1,3943E+006	6,477E+03
Média (pps)	7,20E+03	7,29E+03	7,0107E+003	6,553E+03
Desvio Padrão	1,04E+03	8,55E+02	1,1808E+003	8,048E+01
Valor Máximo (pps)	1,09E+04	1,06E+04	9,9700E+003	6,553E+03
Valor Mínimo (pps)	1,17E+03	3,81E+03	0	6,058E+03
Pico/Média	1,506	1,449	1,4221	1,000

A Tabela 6.13 apresenta o coeficiente de correlação das amostras com os *trace* real (transferência de dados). Como pode ser observado, a correlação entre os dados reais e para as séries sintéticas geradas MMFM é considerada moderada (dentro do intervalo entre $|0,3|$ e $|0,7|$).

Tabela 6.13 – Coeficiente de Correlação (transferência de dados) para Modelo MMFM com 10 Estados

Série	Coeficiente de Correlação com a Série Real
MMFM	0,4172
MMPP	-0,2173
Poisson	0,0211

A Figura 6.33 apresenta a distribuição de probabilidade, comparando o *trace* real da transferência de dados com o *trace* sintético do modelo MMFM com 50 estados.

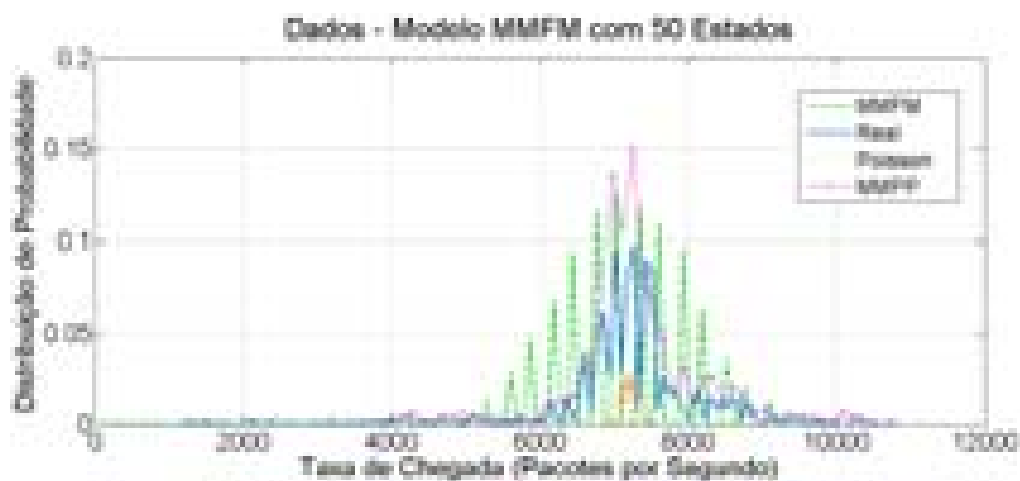


Figura 6.33 – Distribuição de Probabilidade (pdf) para Modelo MMFM com 50 Estados

Nota-se que à medida que se aumenta o número de estados, o modelo MMFM vai apresentando uma melhoria na modelagem dos dados, ficando próxima da curva do trace de dados reais, visto que o trace real apresenta maior variabilidade nos valores das taxas de transferência.

6.3.2 Modelagem do Tráfego VoIP

Para a modelagem do tráfego VoIP, foram coletados *traces* de uma conversação VoIP em uma rede PLC. Este arquivo foi importado no *MatLab*[®] para que fossem feitas toda as análises necessárias. O arquivo analisado possui 1000 amostras, representados em pacotes por segundo (pps), em um total de 6280 pacotes, capturados em aproximadamente 124 segundos de conversação (2 minutos e 4 segundos). O comportamento da chamada dos usuários *user1* e *user2* é considerado com base na taxa média dos dados, que é definida por [60]:

$$\text{Taxa Média dos Dados} = \frac{\text{Número de pacotes de voz considerados}}{\text{Duração da Chamada}} \quad (46)$$

$$\text{Taxa Média dos Dados} = \frac{6280}{124} = 49,85 \text{ (pacotes / segundo)}$$

A Figura 6.34 apresenta a curva exponencial encontrada para a função de autocorrelação das amostras reais da comunicação VoIP e a curva exponencial calculada através do algoritmo de *curve fitting* que é utilizado no MMFM.



Figura 6.34 – Exponencial *curve fitting* (VoIP)

As Figuras 6.35, 6.36, 6.37 e 6.38 representam os *traces* reais e os sintéticos (MMFM, MMPP e Poisson, respectivamente) gerados a partir de uma comunicação VoIP em redes PLC. O modelo MMFM gerado apresenta 100 estados.

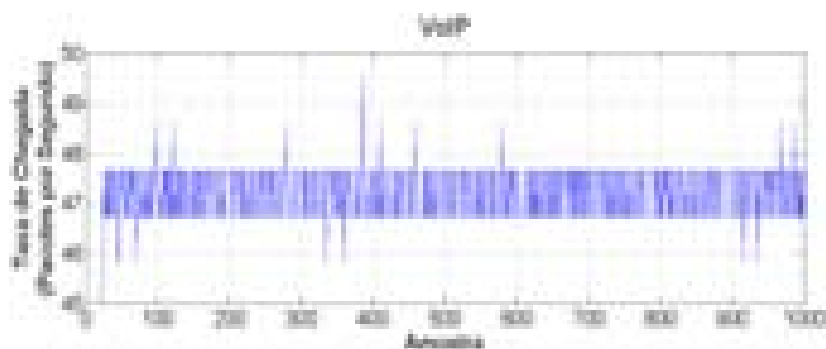


Figura 6.35– Trace de VoIP (dados reais)

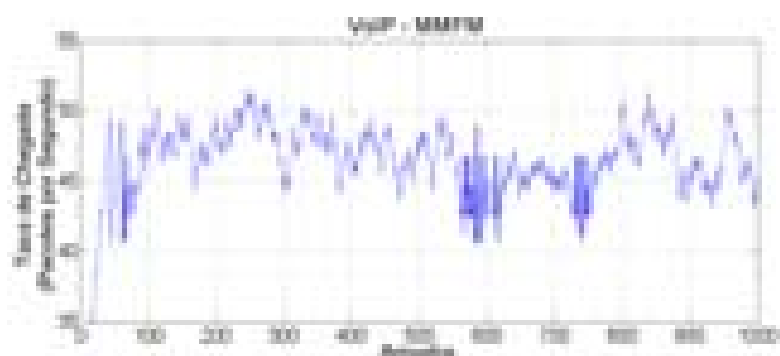


Figura 6.36 – Trace de VoIP sintético (MMFM)

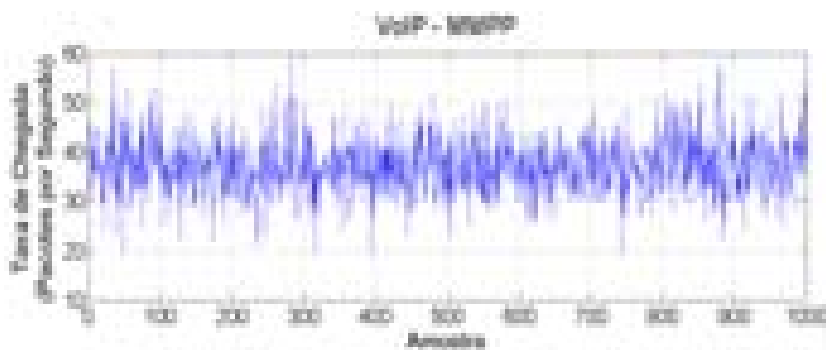


Figura 6.37 – Trace de VoIP sintético (MMPP)

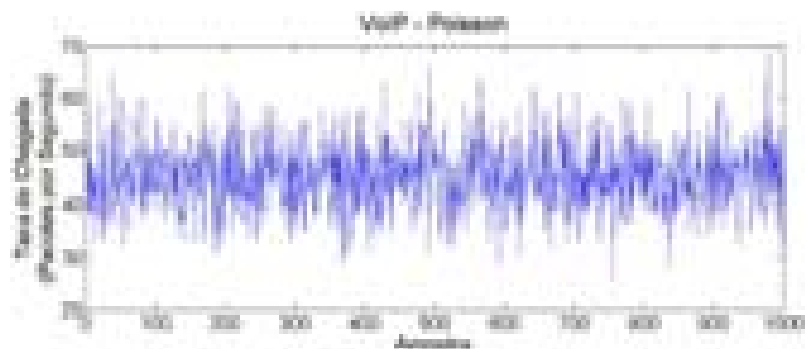


Figura 6.38 – Trace de VoIP sintético (Poisson)

A Figura 6.39 apresenta o histograma da série real, e as Figuras 6.40, 6.41 e 6.42 apresentam as séries sintéticas (MMFM, MMPP e Poisson, respectivamente), geradas a partir do *trace* VoIP real.

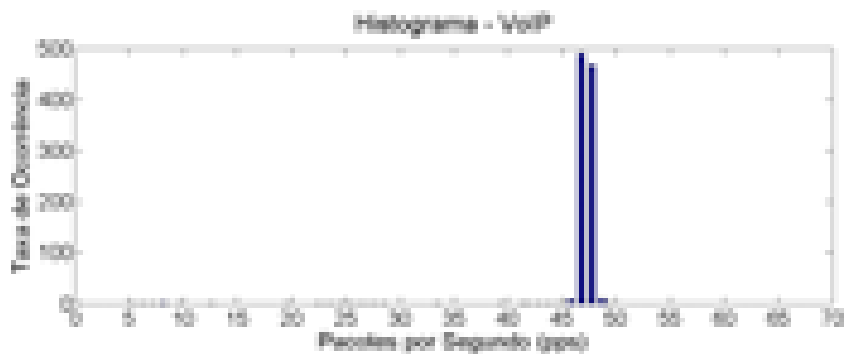


Figura 6.39 – Histograma VoIP (real)

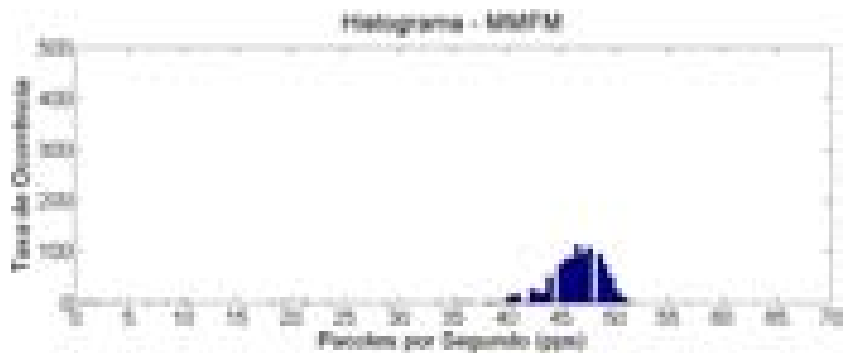


Figura 6.40 – Histograma (MMFM)

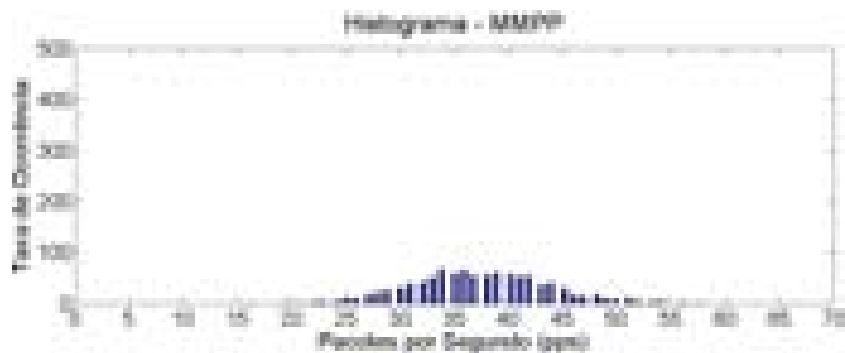


Figura 6.41 – Histograma (MMPP)

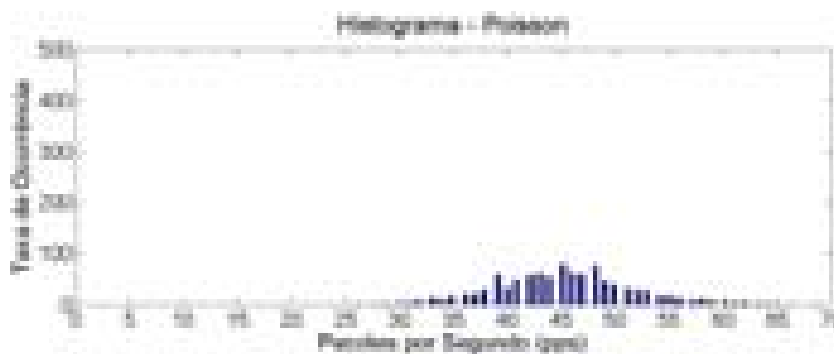


Figura 6.42 – Histograma (Poisson)

Como pode ser observado na Figura 6.39, pelo fato da comunicação VoIP permanecer com taxas constantes e pouca variação de valores (taxas entre 40 e 50 pacotes por segundo), o histograma apresenta 2 picos de valores de pacotes por segundo, onde se concentram a maioria das taxas encontradas, e algumas ilhas isoladas, com valores com pouca ocorrência. O histograma da série MMFM (Figura 6.40) apresentou um pico central e decaimentos nos dois lados do histograma, mas as taxas de ocorrência se concentrando entre os valores de 40 a 50 pacotes por segundo. Os histogramas para as séries MMPP (Figura 6.41) e Poisson (Figura 6.42) apresentaram as maiores oscilações nas taxas de ocorrência, com a presença de diversas ilhas de valores entre 15 a 55 pacotes por segundo (MMPP) e entre 25 e 70 pacotes por segundo.

A Tabela 6.14 apresenta uma comparação entre as estatísticas do *trace* real e as séries geradas, relacionadas à comunicação VoIP através da rede PLC. Como pode ser observado, os parâmetros estatísticos calculados para o modelo MMFM estão mais próximos dos parâmetros calculados para o *trace* real da comunicação VoIP. Os modelos MMPP e Poisson apresentaram desempenho inferior para modelar esse tipo de tráfego, visto que obtiveram valores para estes parâmetros estatísticos mais distantes dos valores do *trace* real.

Tabela 6.14 – Comparação de Parâmetros Estatísticos (VoIP)

Estatísticas	Dados Reais	MMPP	MMFM	Poisson
Variância	0.2526	36,9628	26,6979	41,1815
Média (pps)	47.1905	37,3580	45,9587	45,3060
Desvio Padrão	0.5026	6,0797	5,1670	6,4173
Valor Máximo (pps)	49,5327	60,0000	51,4484	69,0000
Valor Mínimo (pps)	45.7944	19,0000	0	26,0000
Pico/Média	1,050	1,6061	1,1194	1,5230

A Tabela 6.15 apresenta o coeficiente de correlação das amostras com os *trace* real (comunicação VoIP). Como pode ser observado, a correlação entre os dados reais e a série MMFM é forte (dentro do intervalo maior que $|0,7|$), enquanto para as outras séries é considerada fraca (dentro do intervalo menor ou igual a $|0,3|$).

Tabela 6.15 – Coeficiente de Correlação (VoIP)

Série	Coeficiente de Correlação com a Série Real
MMFM	0,8931
MMPP	0,0379
Poisson	0,0117

A Figura 6.43 apresenta o gráfico da função de autocorrelação para a comunicação VoIP.

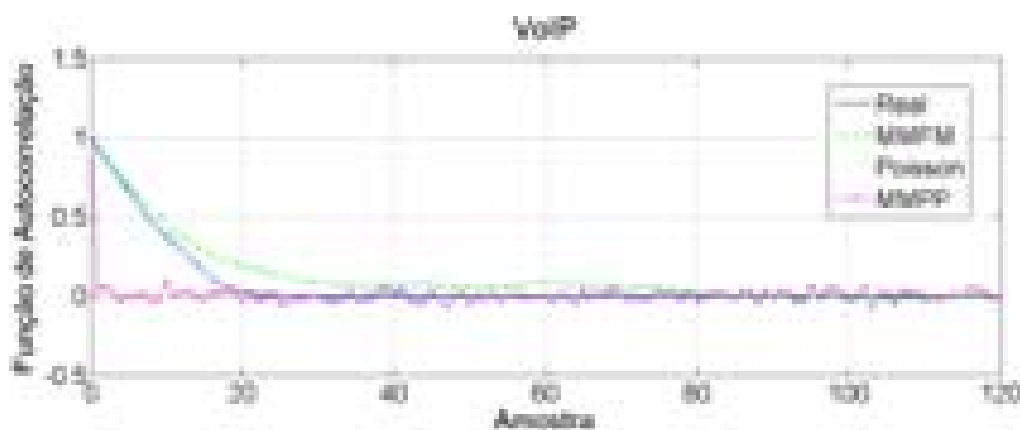


Figura 6.43 – Função de Autocorrelação

A Figura 6.44 apresenta a distribuição de probabilidade, comparando o *trace* real com o *trace* sintético gerado, para a comunicação VoIP. Nota-se que os processos gerados pelos três modelos utilizados apresentaram dificuldade na obtenção de uma distribuição de probabilidade semelhante a dos dados reais.

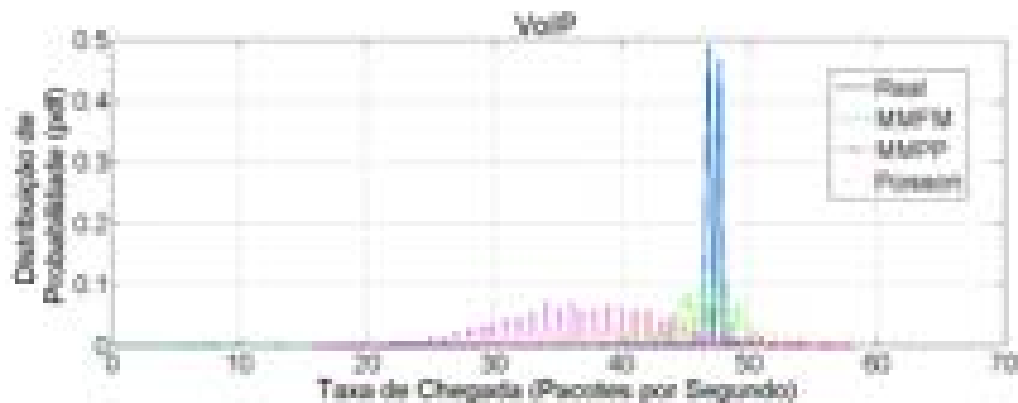


Figura 6.44 – Distribuição de Probabilidade (pdf)

A Figura 6.45 mostra a ocupação média de bits para um *buffer* finito de tamanho de 6,42Kbytes (51360 bits) versus a utilização do mesmo.



Figura 6.45 – Ocupação média do *buffer* para Transmissão VoIP

Para filas com tamanho médio maiores, o valor de λ encontrado tanto para os traces de dados VoIP reais quanto para os traces sintéticos gerados está próximo de 1, o que indica que o *buffer* está constantemente sendo usado e conseqüentemente há uma maior probabilidade de descarte de dados.

A Figura 6.46 apresenta a probabilidade de perda de *bytes* versus tamanho do *buffer* para a comunicação VoIP. O tamanho do *buffer* variou de 1 byte a um tamanho máximo de 6,42Kbytes (51360 *bits*). O modelo proposto (MMFM) apresentou uma perda máxima de 2,5% de *bytes* em *buffers* menores. O tráfego real apresentou uma perda máxima de 1% de *bytes*. O Modelo MMPP foi o que apresentou a maior perda de *bytes*, em torno de 5% para *buffers* menores.



Figura 6.46 – Probabilidade de perda de bytes versus tamanho do buffer

A fim de obter uma visão real sobre o comportamento dos pacotes na transmissão VoIP, a Figura 6.47 apresenta o tempo médio entre chegada de pacotes subsequentes, chamado de tempo entre-chegadas de pacotes, obtido através do software *NetBook* [71], uma ferramenta gratuita desenvolvida no Centro de Informática da Universidade Federal de Pernambuco, com o objetivo de suportar análise de desempenho em redes de computadores.

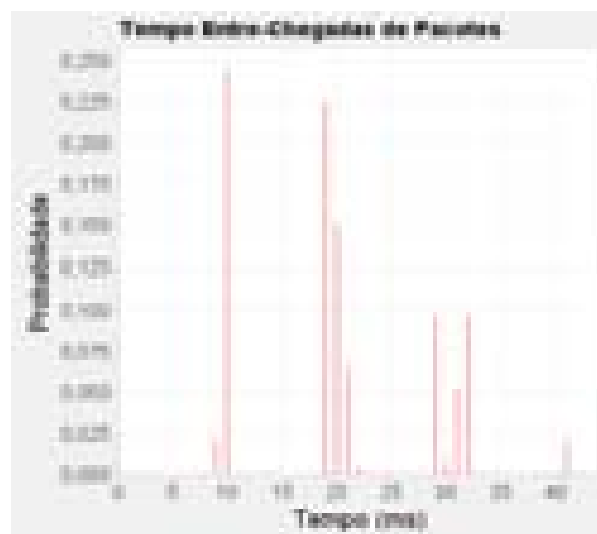


Figura 6.47 - Histograma do intervalo entre pacotes VoIP

Para fins de análise, foi implementado o modelo MMFM utilizando 2, 3 e 10 estados, para avaliar o desempenho na modelagem de tráfego VoIP em redes PLC.

A Figura 6.48 representa o *trace* sintético MMFM com 2 estados, gerados a partir de uma comunicação VoIP em redes PLC.

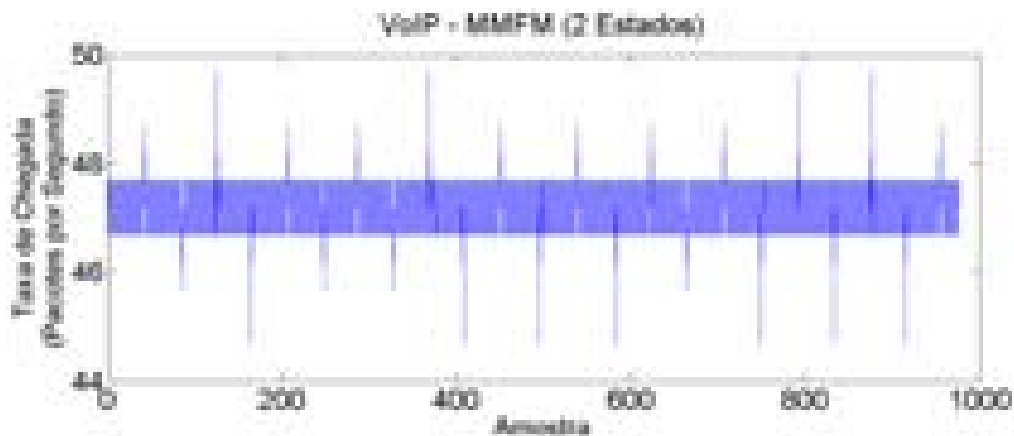


Figura 6.48 – *Trace* de VoIP sintético (MMFM – 2 Estados)

A Figura 6.49 apresenta o histograma da série sintética MMFM gerada com 2 estados, gerado a partir do *trace* VoIP real.

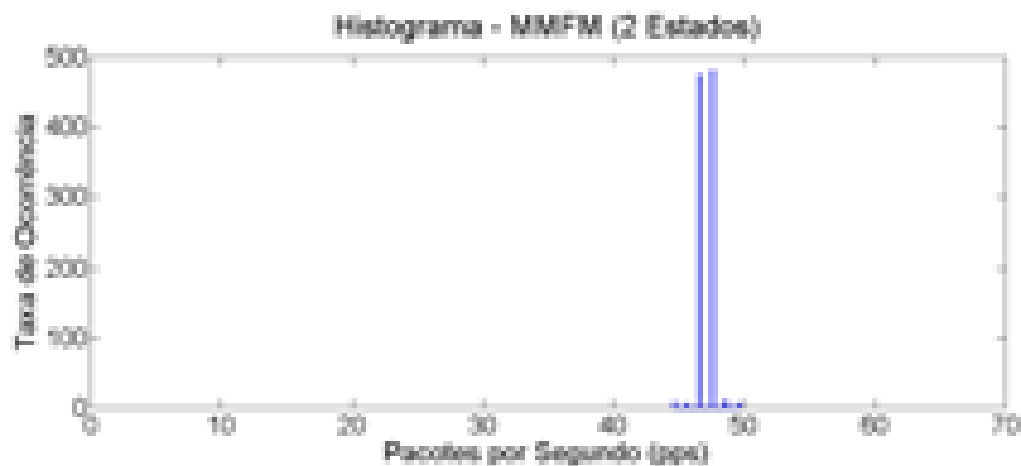


Figura 6.49 – Histograma (MMFM – 2 Estados)

Como pode ser observado na Figura 6.50, o histograma apresenta 2 picos de valores de pacotes por segundo (entre 45 e 50 pacotes por segundo), onde se concentram a maioria das taxas encontradas.

A Tabela 6.16 apresenta uma comparação entre as estatísticas do *trace* real e as séries geradas, relacionadas à comunicação VoIP através da rede PLC. Como pode ser observado, os parâmetros estatísticos calculados para o modelo MMFM com 2 estados se aproximaram mais dos parâmetros calculados para o *trace* real da comunicação VoIP. Os modelos MMPP e Poisson apresentaram desempenho inferior para modelar esse tipo de tráfego, visto que obtiveram valores para estes parâmetros estatísticos mais distantes dos valores do *trace* real.

Tabela 6.16 – Comparação de Parâmetros Estatísticos (VoIP) para Modelo MMFM com 2 Estados

Estatísticas	Dados Reais	MMPP	MMFM	Poisson
Variância	0.2526	36,9628	0.3461	41,1815
Média (pps)	47.1905	37,3580	47.1926	45,3060
Desvio Padrão	0.5026	6,0797	0.5883	6,4173
Valor Máximo (pps)	49,5327	60,0000	49.7034	69,0000
Valor Mínimo (pps)	45.7944	19,0000	44.6776	26,0000
Pico/Média	1,050	1,6061	1.0532	1,5230

A Tabela 6.17 apresenta o coeficiente de correlação das amostras com os *trace* real (comunicação VoIP). Como pode ser observado, a correlação entre os dados reais e para as séries sintéticas geradas (MMFM, MMPP e Poisson) é considerada fraca (dentro do intervalo menor ou igual a $|0,3|$).

Tabela 6.17 – Coeficiente de Correlação (VoIP) para Modelo MMFM com 2 Estados

Série	Coeficiente de Correlação com a Série Real
MMFM	0.0334
MMPP	0,0379
Poisson	0,0117

A Figura 6.50 apresenta a distribuição de probabilidade, comparando o *trace* real da comunicação VoIP com o *trace* sintético do modelo MMFM com 2 estados. Nota-se que o processo gerado pelo modelo MMFM utilizando 2 estados apresentou uma melhor distribuição de probabilidade, ficando próxima a dos dados reais, em comparação com os outros *traces* gerados (MMPP e Poisson).



Figura 6.50 – Distribuição de Probabilidade (pdf) para Modelo MMFM com 2 Estados

A Figura 6.51 representa o *trace* sintético MMFM com 3 estados, gerados a partir de uma comunicação VoIP em redes PLC.

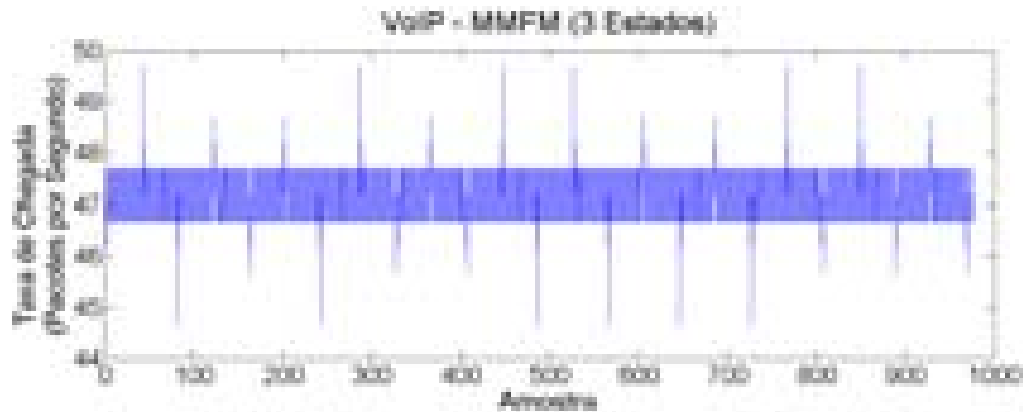


Figura 6.51 – *Trace* de VoIP sintético (MMFM – 3 Estados)

A Figura 6.52 apresenta o histograma da série sintética MMFM gerada com 3 estados, gerado a partir do *trace* VoIP real.

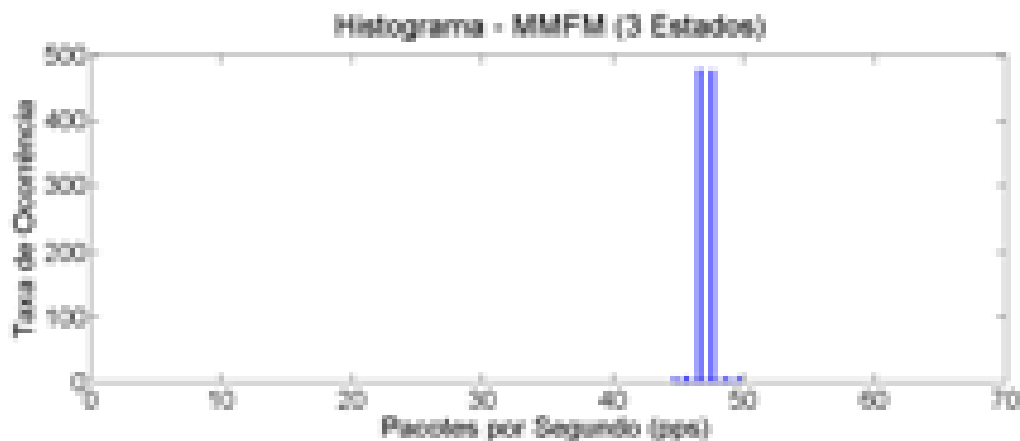


Figura 6.52 – Histograma (MMFM – 3 Estados)

Como pode ser observado na Figura 6.52, o histograma também apresenta 2 picos de valores de pacotes por segundo (entre 45 e 50 pacotes por segundo), onde se concentram a maioria das taxas encontradas.

A Tabela 6.18 apresenta uma comparação entre as estatísticas do *trace* real e as séries geradas, relacionadas à comunicação VoIP através da rede PLC. Como pode ser observado, os parâmetros estatísticos calculados para o modelo MMFM com 3 estados também se aproximaram mais dos parâmetros calculados para o *trace* real da comunicação VoIP. Os modelos MMPP e Poisson apresentaram desempenho inferior para modelar esse tipo de

tráfego, visto que obtiveram valores para estes parâmetros estatísticos mais distantes dos valores da *trace* real.

Tabela 6.18 – Comparação de Parâmetros Estatísticos (VoIP) para Modelo MMFM com 3 Estados

Estatísticas	Dados Reais	MMPP	MMFM	Poisson
Variância	0.2526	36,9628	0.3544	41,1815
Média (pps)	47.1905	37,3580	47.1885	45,3060
Desvio Padrão	0.5026	6,0797	0.5953	6,4173
Valor Máximo (pps)	49,5327	60,0000	49.7034	69,0000
Valor Mínimo (pps)	45.7944	19,0000	44.6776	26,0000
Pico/Média	1,050	1,6061	1,053	1,5230

A Tabela 6.19 apresenta o coeficiente de correlação das amostras com os *trace* real (comunicação VoIP). Como pode ser observado, a correlação entre os dados reais e para as séries sintéticas geradas (MMFM, MMPP e Poisson) é considerada fraca (dentro do intervalo menor ou igual a $|0,3|$).

Tabela 6.19 – Coeficiente de Correlação (VoIP) para Modelo MMFM com 3 Estados

Série	Coeficiente de Correlação com a Série Real
MMFM	-0.0291
MMPP	0,0379
Poisson	0,0117

A Figura 6.53 apresenta a distribuição de probabilidade, comparando o *trace* real da comunicação VoIP com o *trace* sintético do modelo MMFM com 3 estados.



Figura 6.53 – Distribuição de Probabilidade (pdf) para Modelo MMFM com 3 Estados

Nota-se que o processo gerado pelo modelo MMFM utilizando 3 estados continua apresentando uma melhor distribuição de probabilidade, ficando próxima a dos dados reais, em comparação com os outros traces gerados (MMPP e Poisson).

A Figura 6.54 representa o *trace* sintético MMFM com 10 estados, gerados a partir de uma comunicação VoIP em redes PLC.

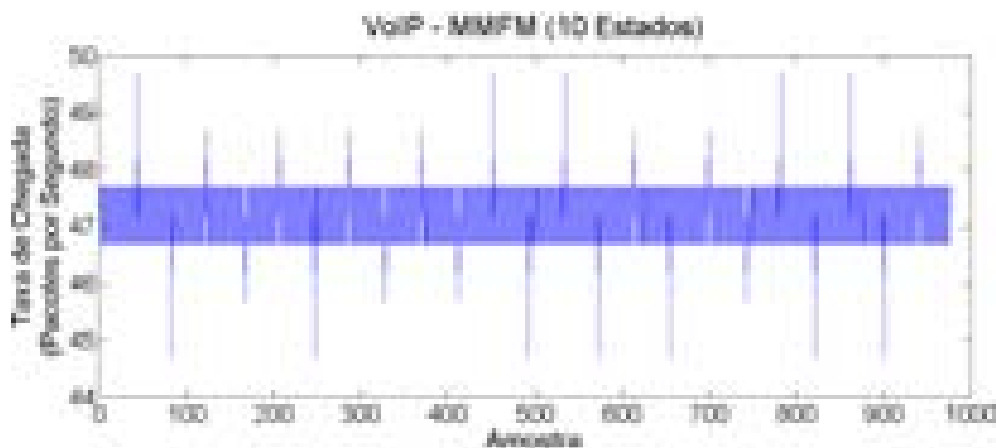


Figura 6.54 – *Trace* de VoIP sintético (MMFM – 10 Estados)

A Figura 6.55 apresenta o histograma da série sintética MMFM gerada com 10 estados, gerado a partir do *trace* VoIP real.

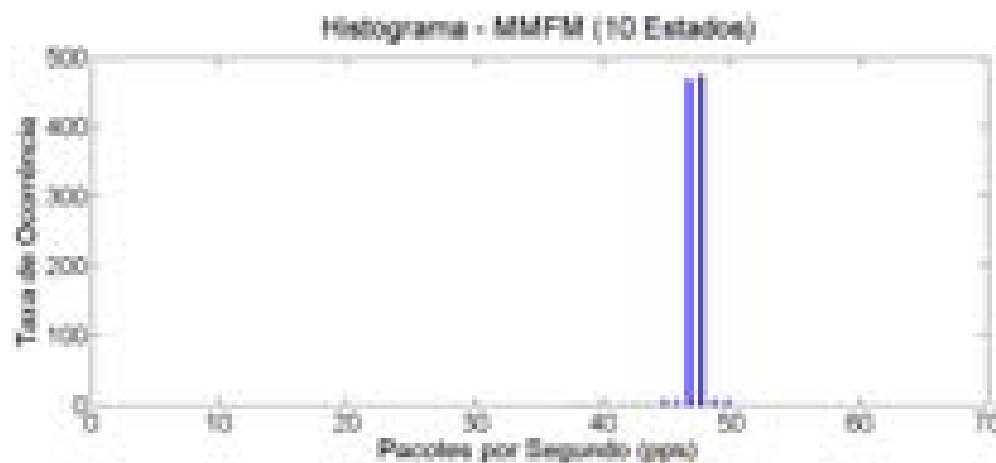


Figura 6.55 – Histograma (MMFM – 10 Estados)

Como pode ser observado na Figura 6.55, o histograma apresenta 2 picos de valores de pacotes por segundo (entre 45 e 50 pacotes por segundo), onde se concentram a maioria das taxas encontradas e algumas ocorrências menores que 45 pacotes por segundo.

A Tabela 6.20 apresenta uma comparação entre as estatísticas do *trace* real e as séries geradas, relacionadas à comunicação VoIP através da rede PLC. Como pode ser observado, os parâmetros estatísticos calculados para o modelo MMFM com 10 estados se aproximaram

mais dos parâmetros calculados para o trace real da comunicação VoIP. Os modelos MMPP e Poisson apresentaram desempenho inferior para modelar esse tipo de tráfego, visto que obtiveram valores para estes parâmetros estatísticos mais distantes dos valores do *trace* real.

Tabela 6.20 – Comparação de Parâmetros Estatísticos (VoIP) para Modelo MMFM com 10 Estados

Estatísticas	Dados Reais	MMPP	MMFM	Poisson
Variância	0.2526	36,9628	0.6935	41,1815
Média (pps)	47.1905	37,3580	47.1370	45,3060
Desvio Padrão	0.5026	6,0797	0.8328	6,4173
Valor Máximo (pps)	49,5327	60,0000	49.7034	69,0000
Valor Mínimo (pps)	45.7944	19,0000	37.6414	26,0000
Pico/Média	1,050	1,6061	1.0544	1,5230

A Tabela 6.21 apresenta o coeficiente de correlação das amostras com os *trace* real (comunicação VoIP). Como pode ser observado, a correlação entre os dados reais e para as séries sintéticas geradas (MMFM, MMPP e Poisson) é considerada fraca (dentro do intervalo menor ou igual a $|0,3|$).

Tabela 6.21 – Coeficiente de Correlação (VoIP) para Modelo MMFM com 10 Estados

Série	Coeficiente de Correlação com a Série Real
MMFM	0.0417
MMPP	0,0379
Poisson	0,0117

A Figura 6.56 apresenta a distribuição de probabilidade, comparando o *trace* real da comunicação VoIP com o *trace* sintético do modelo MMFM com 10 estados.

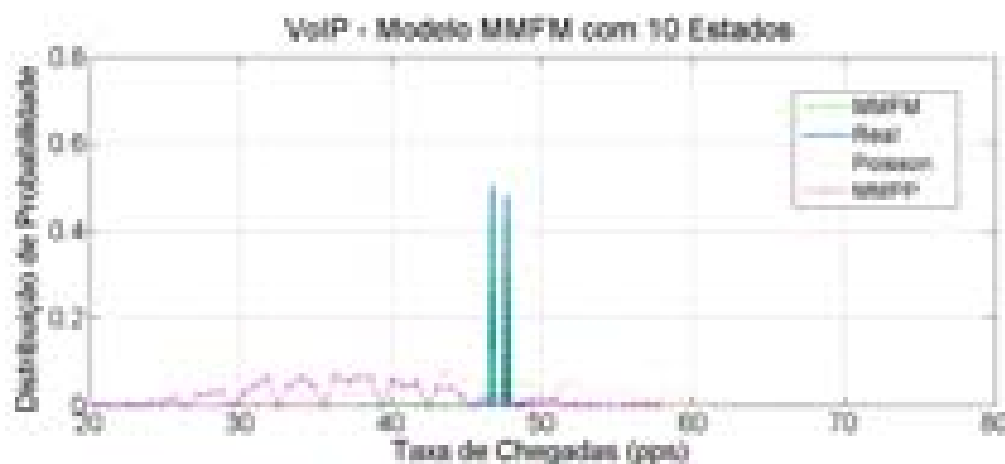


Figura 6.56 – Distribuição de Probabilidade (pdf) para Modelo MMFM com 10 Estados

Nota-se que o processo gerado pelo modelo MMFM utilizando 10 estados apresentou uma distribuição de probabilidade ficando próxima a dos dados reais, em comparação com os outros traces gerados (MMPP e Poisson), mas não tão eficiente quanto para o modelo MMFM com menos estados.

Como pode ser visto, em relação à variação de estados no modelo MMFM, especificamente para esta série de dados que possui pouca variabilidade nas taxas de transmissão, a análise feita com 2 estados foi a que mais se aproximou das características da série real do tráfego VoIP, o que pode ser percebido pelas estatísticas e gráficos gerados a fim de comparação.

CAPÍTULO 7 - CONCLUSÕES

A tecnologia PLC vem sendo desenvolvida há algum tempo e pode vir a ser a solução de problemas de comunicação na última milha e nos últimos metros, devido à capilaridade da rede de energia elétrica. Esta tecnologia se insere num contexto atual de prestação de serviços, aproveita tendências atuais de convergência para redes IP e busca gerar competitividade no fornecimento de Rede de Acesso. Já a telefonia VoIP está atingindo os níveis de qualidade da telefonia tradicional comutada e poderá ser um dos tipos de tráfego mais comuns em redes PLC.

Um dos grandes problemas para a utilização em larga escala da tecnologia PLC ainda é a falta de manutenção de algumas redes de energia elétrica e a utilização clandestina da energia elétrica pública, com perigosas conexões piratas que afetarão o funcionamento da tecnologia PLC no Brasil.

Os testes realizados neste trabalho demonstraram que os aparelhos com motores de escovas são bastante prejudiciais para a comunicação PLC, pelo fato de gerarem ruídos na faixa de operação do equipamento, o que foi constatado com as formas de onda capturadas com o Analisador de Espectro e com o Osciloscópio Digital.

Os testes realizados também demonstram que a taxa do sinal PLC foi bastante influenciada pela presença de ruídos, o que torna necessário, muitas vezes, o uso de algumas técnicas para diminuir os níveis de interferência de alguns tipos de eletrodomésticos. Dependendo dos requisitos da aplicação utilizada (voz ou vídeo, por exemplo), apresentados nas tabelas 4.1 e 4.2, o uso da tecnologia PLC pode não ser a mais adequada.

Com a presença de ruídos na comunicação VoIP, o carregador de celular teve uma perda de 6,2% dos pacotes transmitidos, mas o atraso ficou dentro do aceitável (em média, 15,0116ms). Para os outros eletrodomésticos inseridos em uma rede PLC, a perda de pacotes ficou dentro do aceitável.

Através da comparação dos tráfegos reais com os tráfegos gerados, pode-se perceber que a porcentagem de perda de *bytes* foi baixa para transferência de dados e para comunicação VoIP. Essa perda de *bytes*, mesmo pequena, pode prejudicar a transferência de dados, no caso da comunicação VoIP, essa perda está dentro do aceitável.

A modelagem do tráfego de redes permite um melhor planejamento, dimensionamento e análise de desempenho de redes. Geralmente, na modelagem, tráfego de pacotes e conexões

de chegadas são assumidos como processos de Poisson. Os resultados mostraram que se considerar o tráfego como sendo Poissoniano pode não ser uma aproximação adequada e modelos Markovianos mais complexos são necessários.

Modelos de fluidos caracterizam o tráfego como um fluxo contínuo, com uma taxa de fluxo (por exemplo, bits por segundo). A partir de análise realizada, pode-se concluir que o modelo proposto MMFM se mostrou eficiente em descrever o tráfego em redes PLC, em comparação a outros modelos Markovianos. Os resultados obtidos com o modelo MMFM foram satisfatórios tanto para os dados de tráfego reais de VoIP como para dados em redes PLC. Especificamente para dados, à medida que se aumenta o número de estados no modelo MMFM, a modelagem se ajusta melhor aos dados reais. Para o tráfego VoIP, um modelo MMFM com uma menor quantidade de estados (2 estados por exemplo) se ajusta melhor aos dados reais.

A partir dos dados coletados, observou-se que as características da comunicação VoIP e do tráfego de dados são diferentes. Tanto é que o modelo MMFM apresentou melhor desempenho de modelagem para série real de comunicação VoIP. O algoritmo aplicado para gerar o modelo MMPP modelou relativamente bem o tráfego de dados reais. Com relação à comunicação VoIP, o modelo MMPP não modelou muito bem, tendo como característica uma média deslocada da média do modelo de Poisson, que também foi gerado a partir do *trace* de comunicação VoIP real.

Como trabalho futuro, pode ser realizado um estudo específico sobre a relação entre a taxa de transmissão do sistema PLC e os valores das relações sinal/ruído. Com relação a modelagem proposta, dados podem ser gerados segundo esta modelagem e inseridos em redes PLC para análise de desempenho do sistema e para avaliar na prática o desempenho do modelo em ‘imitar’ os dados de VoIP reais. Outra sugestão seria utilizar a modelagem como metodologia de dimensionamento de redes PLC.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. Resolução Normativa Nº 375, de 25 de Agosto de 2009 – *Utilização das instalações de distribuição de energia elétrica como meio de transporte para a comunicação digital ou analógica de sinais*. (www.aneel.gov.br). Acesso em agosto de 2009.
- [2] MARQUES, Fábio da Silva. Contribuições para regulamentação da tecnologia PLC NO Brasil com base em testes de Campo. Universidade Federal de Goiás: Escola de Engenharia Elétrica, 2008. 122p. (Dissertação – Mestrado em Engenharia Elétrica e de Computação)
- [3] H. Hrasnica, A. Haidine, and R. Lehnert, “*Broadband Powerline Communications: Network Design*”. John Wiley & Sons: West Sussex, England, 2005.
- [4] IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (<http://www.ibge.gov.br>). Acesso em junho de 2009.
- [5] CELG Distribuição. Mercado de Energia Elétrica em Goiás. (<http://celgd.celg.com.br>). Acesso em junho de 2009.
- [6] RIBEIRO, Moisés Vidal. *Técnicas de Processamento de Sinais Aplicadas à Transmissão de Dados Via Rede Elétrica e ao Monitoramento da Qualidade de Energia*. Campinas: Faculdade de Engenharia Elétrica e da Computação, 2005. 362p. (Tese – Doutorado em Engenharia Elétrica).
- [7] VIDAL, Alexandre de Moura. *Estudo do Estado da Arte e Análise de Desempenho de Sistema de Comunicação PLC de Banda Larga*. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2005. 119p (Dissertação – Mestrado em Engenharia Elétrica).
- [8] MARTINS, F. Dias. *Proposta de arquitetura e modelo de negócios em sistema PLC*. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006. 211p. (Dissertação – Mestrado em Engenharia Elétrica).
- [9] ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. Apresentações. Workshop sobre Power Line Communications (PLC), 2007. (<http://www.aneel.gov.br>)

- [10] TEIXEIRA, Edson R. D. PLC. In: *Tutoriais Banda Larga e VOIP* – TELECO, 2005. (<http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialplc>). Acesso em junho de 2009.
- [11] LIMA, Milton X. *Redes PLC* (Através da Rede Elétrica). In: *Projetos de Rede*, 2007. (<http://projetoderedes.com.br/tutoriais>). Acesso em junho de 2009.
- [12] D. Klaus, “*Powerline Communications*”. Germany: Prentice Hall PTR, 2001, xii, 338p.
- [13] G. Held, “*Understanding Broadband over Power Line*”. Boca Raton, Florida: Auerbach Publications, Taylor & Francis Group, 2006.
- [14] Pedro B. Velloso, Daniel de O. Cunha, Aurelio A. Junior, Marcelo G. Rubinstein e Otto C. M. Bandeira Duarte. *Redes Domiciliares: Aplicações, Tecnologias, Desafios e Tendências*. (<http://www.larces.uece.br/>). Acesso em junho de 2009.
- [15] TELLI, Lucas de Araujo; TELLI, Diego de Araújo. *PLC: Power Line Communication*. In: IX Escola de Informática Norte, 2007. (www.prodepa.gov.br/ein2007/). Acesso em junho de 2009.
- [16] R. Horak, “*Telecommunications and Data Communications Handbook*”. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2007.
- [17] ZIMMERMANN, M.; DOSTERT, K. *Analysis and Modeling of Impulsive Noise in Broad-Band Powerline Communications*. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, v. 44, n. 1, p. 249-258, Feb. 2002.
- [18] CAMPISTA, Miguel Elias Mitre. *Aumentando a Eficiência do Método de Acesso Múltiplo em Redes Domiciliares*. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005. 113p. (Dissertação – Mestrado em Ciências em Engenharia Elétrica).
- [19] CAMPISTA, Miguel Elias M.; VELLOSO, Pedro B.; COSTA, Luís Henrique M. K.; DUARTE, Otto Carlos M. B. *Uma Análise da Capacidade de Transmissão na Rede de Energia Elétrica Domiciliar*. In: XXI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações, 2004, Belém.

- [20] Fabrício B. Soares de Carvalho, Marcelo S. de Alencar. *Aplicação de Transmissão de Dados por meio de Linhas de Distribuição para a Televisão Digital*. Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos – SBSE, Universidade Federal de Campina Grande, 2006
- [21] Flávio Archangelo. In: *PLC/BPL: Uma Tecnologia Poluidora*. TELECO, 2009. (<http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialplcbpl/>). Acesso em junho de 2009.
- [22] MONQUEIRO, Júlio César Bessa. *Entendendo a Internet sob rede elétrica*. In: *Artigos Guia do Hardware*, 2007. (<http://www.guiadohardware.net>). Acesso em junho de 2009.
- [23] MORIMOTO, Carlos E. *Power over Ethernet (PoE)*. In: *Artigos Guia do Hardware*, 2007. (<http://www.guiadohardware.net>). Acesso em junho de 2009.
- [24] HomePlug Powerline Alliance. *White Papers*. (www.homeplug.org). Acesso em junho de 2009.
- [25] Plug Fácil. (<http://www.plugfacil.com/inicio.php>). Acesso em junho de 2009.
- [26] Richard Newman, Larry Yonge, Sherman Gavette and Ross Anderson. *HomePlug AV Security Mechanisms*. In *Proceedings of IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications (ISPLC)*, Pisa, Italy, 2007.
- [27] M. K. Lee, R. E. Newman, H. A. Latchman, S. Katar, L. Yonge. *Homeplug 1.0 Powerline Communications LANs - Protocol Description and Performance Results*. *International Journal of Communication Systems* 16, 2000.
- [28] MOHAMAD, Ali Farek. *PLC - the Access Technology for Realizing AMM and Broadband Services: Physical properties, abilities and limitations, infrastructure topologies, reliability, latest technologies and technical evaluation*. Center for Communication, Optics, and Material. The Technical University of Denmark, 2006.
- [29] PLC-J – *High Speed Power Line Communication Promoters' Alliance of Japan*. (<http://www.plc-j.org/>) Acesso em outubro de 2009.
- [30] The ABB Group – *Power and Productivity for a Better World*. Soluções em Redes PLC Média Tensão. (<http://www.abb.com/>) Acessado em setembro de 2009.

- [31] TROMPOWSKY, José Felipe Manoel Von. *Estudo da Interferência Eletromagnética Gerada por Redes PLC (Power Line Communication) no Interior de Edificações*. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2005. 98p. (Dissertação – Mestrado em Engenharia Elétrica)
- [32] Carlos Augusto Duque. PLC, 2003. (<http://www.mestradoeletrica.ufjf.br/professores/duque/PLC>). Acesso em junho de 2009.
- [33] Consórcio OPERA - *Open PLC European Research Alliance* (<http://www.ist-opera.org>). Acesso em junho de 2009.
- [34] ZIMMERMANN, M.; DOSTERT, K. *A Multipath Model for the Powerline Channel*. IEEE Transactions on Communications, vol. 50, n. 4, April, 2002.
- [35] ANATEL – Agência Nacional de Telecomunicações. Resolução N° 527, de 8 de Abril de 2009 – Regulamento sobre Condições de Uso de Radiofrequências por Sistemas de Banda Larga por meio de Redes de Energia Elétrica. (<http://www.anatel.gov.br>). Acesso em junho de 2009.
- [36] HODGSON, Eduardo A. *Proposta de um Simulador de Ruído Impulsivo Assíncrono no Canal PLC*. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2005. 83p. (Dissertação – Mestrado em Engenharia Elétrica).
- [37] Rennan J. M. Silva, Adolfo F. O. Colares, Elisangela S. Aguiar, Antonio J. G. Abelem. *Estimação de Largura de Banda em Redes PLC*. In: XXVI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações – SBrT, 2008, Rio de Janeiro.
- [38] 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
- [39] MARQUES, C. A. Gomes. *Técnica de Detecção de Distúrbios para o Monitoramento da Qualidade da Energia*. Juiz de Fora: Universidade Federal de Juiz de Fora, 2007. 103p. (Dissertação – Mestrado em Engenharia Elétrica).

- [40] André M. Zenun; Diego L. Kreutz; Rafael R. Righi. *Uma Arquitetura para a Integração e Avaliação da Tecnologia Voz sobre IP em Enlaces PLC*. In: IV Escola Regional de Redes de Computadores. Passo Fundo – RS, 2006.
- [41] VIEIRA, F. H. Teles. *Contribuições ao Cálculo de Banda e de Probabilidade de Perda para Tráfego Multifractal de Redes*. Campinas: Unicamp, 2006. 256p. (Tese – Doutorado em Engenharia Elétrica).
- [42] KAMIENSKI, C. A., SADOK, D., *Qualidade de Serviço na Internet*, minicurso, 18º SBRC (Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores), Belo Horizonte/MG. Maio, 2000.
- [43] BOAVA, Adão. *Estratégia de Projeto de VPNs MPLS com Qualidade de Serviço*. Campinas: Instituto de Computação, Junho de 2004. 154p. (Dissertação – Mestrado em Ciência da Computação).
- [44] Miguel Raton. *Parâmetros básicos de áudio: Relação Sinal/Ruído e Faixa Dinâmica*. (<http://www.music-center.com.br>). Acesso em junho de 2009.
- [45] HERSENT, Oliver; GUIDE, David; PETIT, Jean-Pierre. *Telefonia IP: Comunicação Multimídia Baseada em Pacotes*. Makron Books, 2002.
- [46] TANENBAUM, Andrew S., *Redes de Computadores*. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro: Editora Campus. 4ª. Edição, 2003.
- [47] *Powerline Networking*. (<http://www.powerlinenetworking.co.uk/>). Acesso em novembro de 2009.
- [48] MAGRO, Julio Cesar. *Estudo da Qualidade de Voz em Redes IP*. Campinas: Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, 2005. 156p. (Dissertação – Mestrado em Engenharia Elétrica).
- [49] Michel Abdalla; Otto Duarte. *Caracterização e Modelagem de Tráfego Agregado em Redes ATM*. Technical Report GTA-94-17, September 1994.
- [50] SOUZA, Fabiano N. M. A.; BUENO, M. C. P. *Monitoração de Desempenho de Voz sobre IP (VOIP)*. In: *Tutoriais Banda Larga e VOIP – TELECO*, 2006. (<http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialmondesvoip/>). Acesso em junho de 2009.

- [51] MARINHO, Leandro Andrada Roda. *Metodologias de Avaliação da Qualidade de Fluxos de Voz*. IX Semana de Engenharia – V Seminário Fluminense de Engenharia. Apresentação – Sessão Técnica. Universidade Federal Fluminense (UFF), 2007.
- [52] BARBEDO, Jayme Garcia Arnal. *Avaliação Objetiva de Qualidade de CODECS de Voz na Faixa de Telefonia*. Campinas: Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, 2001. 135p. (Dissertação – Mestrado em Engenharia Elétrica e da Computação).
- [53] RIBEIRO, Alexandre. *Caracterização da Matriz Estocástica em Tráfego Multimídia MMPP*. Universidade Federal de Goiás: Escola de Engenharia Elétrica, 2000. 64p. (Dissertação – Mestrado em Engenharia Elétrica e de Computação).
- [54] SILVA, Jorge L. de Castro. *ProCon – Prognóstico de Congestionamento de Tráfego de Redes usando Wavelets*. Universidade Federal de Pernambuco: Centro de Informática, 2004. 169p. (Tese – Doutorado em Ciência da Computação).
- [55] JÚNIOR, José M. P. de Menezes. *Redes Neurais Dinâmicas para Predição e Modelagem Não-Linear de Séries Temporais*. Universidade Federal do Ceará: Departamento de Engenharia de Teleinformática, 2006. 132p. (Dissertação – Mestrado em Engenharia de Teleinformática).
- [56] Soshant Bali. *An Algorithm for Fitting MMPP to IP Traffic Traces*. (<http://www.ittc.ku.edu/~sbali/MMPP/>). Acessado em maio de 2009.
- [57] Balakrishnan Chandrasekaran. *Survey of Network Traffic Models*. (http://www.cse.wustl.edu/~jain/cse567-06/ftp/traffic_models3/index.html) Acesso em setembro de 2009.
- [58] PAPOULIS, A. *Probability, Random Variables, and Stochastic Processes*. 3.ed. New York: McGraw-Hill, 1991.
- [59] CAMPOS, Carlos Fielde de. *Análise de Atraso dos Pacotes de Voz em Redes IP Utilizando a Técnica de Multiplexagem de Quadros de Voz*. Campinas: Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, 2008. 89p. (Dissertação – Mestrado em Engenharia Elétrica e da Computação).

- [60] PRAGTONG, Padungkrit; AHMED, Kazi M.; ERKE Tapio J. *Analysis and Modeling of Voice over IP Traffic in the Real Network*. The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers, Vol. E89–D, DECEMBER 2006.
- [61] ZUCHOWSKI, Edmundo Filho. *Uma Abordagem para Análise de Desempenho de Fluxos VoIP em Redes de Serviços Diferenciados*. Curitiba: Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, 2005. 149p. (Dissertação – Mestrado em Ciências).
- [62] B. Maglaris et al., *Performance Models of Statistical Multiplexing in Packet Video Communications*. IEEE Trans. Commun., Vol. 36, July 1988.
- [63] *Network Probe*. Network Monitor. (<http://www.objectplanet.com/probe/>). Acesso em abril de 2009.
- [64] *Wireshark*. Network Protocol Analyzer. (<http://www.wireshark.org/>). Acesso em março de 2009.
- [65] C. B. Santos; F. S. Marques; D. C. Fernandes; S. G. Araújo; J. B. J. Pereira; C. A. Fleury. *Análise de Transmissão e Desempenho em Redes PLC em Baixa Tensão*. 7th International Information and Telecommunication Technologies Symposium - Foz do Iguaçu, 2008 (Full-Paper, - ISBN: 9788589264099)
- [66] Flávio Henrique Teles Vieira, Lee Luan Ling. *Modelagem de Tráfego de Redes Utilizando Cascata Multifractal Generalizada*. RITA, Volume XV, Número 2. 2008.
- [67] Asterisk. The Open Source Telephony Project. (<http://www.asterisk.org>). Acesso em abril de 2009.
- [68] Soshant Bali. *An Algorithm for Fitting MMPP to IP Traffic Traces*. (<http://www.ittc.ku.edu/~sbali/MMPP/>). Acessado em maio de 2009.
- [69] IVERSEN, V. B. *Teletraffic Engineering Handbook*. 2001
- [70] NetBook. Ferramenta para análise de desempenho de redes de computadores. (<http://www.cin.ufpe.br/~autosim/netbook/>). Acesso em dezembro de 2009.