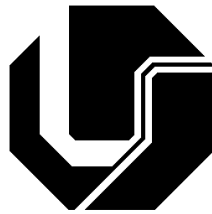


**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**



**ANÁLISE, MEDIDAS E AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE
UMA REDE PLC EM AMBIENTE INDOOR DE CASAS
POPULARES**

HAROLDO BENEDITO TADEU ZATTAR

UBERLÂNDIA
OUTUBRO DE 2011

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**ANÁLISE, MEDIDAS E AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE
UMA REDE PLC EM AMBIENTE INDOOR DE CASAS
POPULARES**

Tese apresentada por Haroldo Benedito Tadeu Zattar à
Universidade Federal de Uberlândia para obtenção do título
de Doutor em Engenharia Elétrica aprovada em 04/11/2011
pela Banca examinadora:

Professor Doutor Gilberto Arantes Carrijo, UFU - Orientador

Professor Doutor Antônio Cláudio P. Veiga, UFU

Professor Doutor Kleiber David Rodrigues, UFU

Professor Doutor Moisés Vidal Ribeiro, UFJF

Professor Doutor Alexandre Coutinho Mateus, UNIR

**ANÁLISE, MEDIDAS E AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE
UMA REDE PLC EM AMBIENTE INDOOR DE CASAS
POPULARES**

HAROLDO BENEDITO TADEU ZATTAR

Tese apresentada por Haroldo Benedito Tadeu Zattar à
Universidade Federal de Uberlândia como parte dos
requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia
Elétrica.

Prof. Dr. Gilberto A. Carrijo

Orientador

Prof. Dr. Alexandre Cardoso

Coordenador do Curso de Pós-Graduação

DEDICATÓRIA

A meu querido pai, Odir Zattar e com todo carinho a minha amada mãe Maria Do Carmo Borges Zattar, à minha amada esposa Silvana Conceição de Figueiredo Kiesqui Zattar e ao meu filho, Artur Kiesqui Zattar, “rei Artur”, pela compreensão, muita paciência e amor que demonstraram em todos os momentos.

Um dia, deste dia só restarão recordações vagas e distantes, mas sei que a cada vitória que esta carreira me proporcionar, estarás por trás dela, como estiveste em cada momento de minha vida.

*Qualquer conhecimento que não seja passível de refutação não é considerado como ciência.
Karl Popper*

AGRADECIMENTOS

A conclusão desta dissertação só foi possível devido à colaboração e apoio de várias pessoas e instituições. Agradeço imensamente:

À Deus e São Benedito pela vida e por mais esta oportunidade.

Ao meu orientador, professor Dr. Gilberto Arantes Carrijo, pela orientação madura e segura, durante todo o curso de Doutorado e a Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia (UFU).

Ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Mato Grosso pelo desprendimento e pela iniciativa em apoiar seu corpo docente na capacitação com vistas a uma melhor contribuição ao ensino universitário no país.

A todos os colegas docentes do Departamento de Engenharia Elétrica em especial professores Fernando Nogueira, Alcides Teixeira, Hamilton Carvalho, Bismarck Castilho e Arnulfo Vasconcelos, pelos incentivos visando a ampliação dos conhecimentos.

A secretária da FAET, Vera e a Elizete do Departamento de Engenharia Elétrica, aos bolsistas do laboratório pela boa vontade e presteza com que sempre me atenderam.

Ao meu pai e minha mãe, que mesmo do céu continuaram presentes nos meus ensinamentos me transmitindo muita energia positiva, indispensáveis para a conclusão deste trabalho, e para guiar todos os meus passos.

A minha esposa Silvana Kiesqui Zattar e ao meu filho Artur Kiesqui Zattar por apoiarem, me compreenderem em todos os momentos nas dificuldades e na necessidade da dedicação integral dispensada a este trabalho.

Aos meus irmãos Carlos Eduardo Zattar, Andréa Maria Zattar e Janaina Maria Zattar, pela força e motivação que me forneceram durante todo o tempo.

Aos amigos e irmãos da loja Cidade Verde número 15 que também me deram muita força e apoio e agradeço imensamente todas as orações positivas do amigo Nelson.

RESUMO

ANÁLISE, MEDIDAS E AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE UMA REDE PLC EM AMBIENTE INDOOR DE CASAS POPULARES

A presente tese tem por objetivo analisar, medir e avaliar o desempenho de uma rede PLC (*Power Line Communications*) em ambientes *indoor* de casas populares. No que tange a análise do canal PLC de casas populares é avaliado a função de transferência do canal PLC em função de diversos aspectos que ocasionam a atenuação do sinal. Com relação à transmissão de dados via rede elétrica são apresentados neste trabalho, os resultados das medidas do sinal de ruído dos principais eletrodomésticos encontrados nas casas populares e do efeito causado pelo ruído destes eletrodomésticos no desempenho da rede PLC de uma casa popular. As medições realizadas mostram que as casas populares nas condições analisadas estão aptas a receber o sinal via rede PLC.

Palavras-chave: *Power Line Communication*, transmissão de dados via rede elétrica, rede PLC *indoor*, rede em banda larga, PLC.

ABSTRACT

ANALYSIS, MEASUREMENT AND EVALUATION OF PLC NETWORK APPLIED FOR POPULAR HOUSES

This thesis is aimed to show the analysis, measurement and evaluation performance of the indoor power line communication (PLC) network operating at popular houses. For the PLC channel the analysis was made of the attenuation considering the parameters condition of the transmitter, receiver and load. Considering the transfer of data through power line, this work shows the results of noise signal from household appliance and the effects caused by the appliances in the PLC network. The measurements show that popular houses are able to receive signal by PLC system.

Keywords: Power Line Communication, PLC indoor, Bandwidth, PLC.

ANÁLISE, MEDIDAS E AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE UMA REDE PLC EM AMBIENTE INDOOR DE CASAS POPULARES

SUMÁRIO

Capítulo 1	INTRODUÇÃO	
Capítulo 2	TECNOLOGIA POWER LINE COMMUNICATION (PLC)	
2.1	INTRODUÇÃO	09
2.2	TECNOLOGIA PLC	10
2.3	TIPOS DE REDE PARA TRANSMISSÃO DE DADOS	12
2.3.1	Redes Elétricas de Alta Tensão	12
2.3.2	Redes Elétricas de Média Tensão	13
2.3.3	Redes Elétricas de Baixa Tensão	14
2.4	PROBLEMAS ENVOLVIDOS COM A TECNOLOGIA PLC	15
2.4.1	Atenuação de Sinal	16
2.5	REGULAMENTAÇÕES, CONCESSIONÁRIAS E INDUSTRIAS	18
2.6	EQUIPAMENTOS PLC	19
2.7	A REDE DE ACESSO PLC	21
2.7.1	A Rede de Distribuição PLC	22
2.7.2	Interconexão às Redes de Provedores de Serviços (Internet, PSTN)	23
2.8	CONCLUSÕES	24
Capítulo 3	CANAL DE TRANSMISSÃO	
3.1	INTRODUÇÃO	25
3.2	O CANAL DE TRANSMISSÃO	26

3.3	A TRANSMISSÃO DE SINAIS	29
3.3.1	Faixas de Frequência dos Sistemas de Comunicação	30
3.3.2	Principais Fontes de Problemas num Canal de Transmissão	32
3.4	ESTUDO DO RUÍDO	34
3.5	CONCEITOS DE LINHA DE TRANSMISSÃO	39
3.6	CONCLUSÕES	45
Capítulo 4	CANAL PLC	
4.1	INTRODUÇÃO	47
4.2	CANAL PLC	48
4.3	PROPAGAÇÃO DO SINAL EM MÚLTIPLOS PERCURSOS	52
4.3.1	Modelo Baseado no Domínio do Tempo: Modelo de Múltiplos Caminhos	59
4.3.2	Modelo no Domínio da Frequência	60
4.3.3	Elementos da Rede	60
4.4	MODELOS DE REFERÊNCIA DO CANAL	65
4.4.1	Modelo de Referência do Canal – Rede PLC <i>Indoor</i>	65
4.4.2	Função de Transferência do Canal pelo Método das Matrizes	71
4.4.2.1	Método da Matriz ABCD	71
4.4.2.2	Função de Transferência da Linha de Transmissão com Extensões (<i>Bridge Tap</i>)	78
4.4.2.3	Análise da Rede PLC pelo Método das Matrizes	81
4.5	CONCLUSÕES	110
Capítulo 5	AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE UMA REDE PLC EM AMBIENTE INDOOR DE CASAS POPULARES	
5.1	INTRODUÇÃO	112
5.2	AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DA REDE PLC INDOOR EM FUNÇÃO DOS ALGORITMOS TCP/IP	114
5.3	MEDIÇÕES DE FONTES DE RUÍDO ENCONTRADOS EM CASAS	117

POPULARES	
5.4 EQUIPAMENTOS PLC	139
5.4.1 Características do Adaptador PLC	139
5.4.2 Configuração da Rede PLC	140
5.5 Avaliação de Desempenho	143
5.5.1 Análise de Desempenho da Rede PLC na Melhor Condição Possível	143
5.5.2 Desempenho da Rede PLC sem a Presença de Filtros	150
5.5.3 Avaliação da Rede PLC em Função do Aumento do Tamanho da Janela TCP	160
5.5.4 Avaliação da Rede PLC em Função da Distância entre 2 Pontos	162
5.6 MEDIÇÕES DE SINAIS PLC	162
5.6.1 Medidas do Sinal PLC com e sem a Utilização de Filtro	163
5.6.2 Medida da Qualidade da Energia Elétrica da Casa Popular	190
5.7 CONCLUSÕES	216
Capítulo 6 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS	218
Capítulo 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	223

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Rede PLC indoor	01
Figura 1.2	Modelo de instalação de uma rede PLC indoor	03
Figura 1.3	Instalação de equipamentos numa rede PLC indoor	04
Figura 2.1	Funcionamento de acesso à Internet via rede elétrica	11
Figura 2.2	Equipamentos PLC	19
Figura 2.3	Diagrama da rede de acesso de baixa tensão	21
Figura 2.4	Rede PLC indoor	22
Figura 2.5	Rede de distribuição	23
Figura 3.1	Interligação para a rede de acesso PLC	26
Figura 3.2	Canal PLC	27
Figura 3.3	Sistema de comunicação	29
Figura 3.4	Espectro de frequência para transmissão de sinais	30
Figura 3.5	Procedimento para medição das tensões na rede PLC	34
Figura 3.6	Equipamentos para medição do sinal num canal PLC	36
Figura 3.7	Configuração de uma rede PLC na presença de ruído	37
Figura 3.8	Circuito equivalente da linha de transmissão: (a) no domínio do tempo, (b) domínio da frequência	42
Figura 4.1	Propagação do sinal sobre uma linha de transmissão	48
Figura 4.2	Estrutura básica de um modelo de canal PLC	57
Figura 4.3	Análise da atenuação no canal PLC em função da variação de a_1	62
Figura 4.4	Análise da atenuação no canal PLC em função da variação de a_0	63
Figura 4.5	Análise da atenuação no canal PLC em função da variação de K	63
Figura 4.6	Análise da atenuação no canal PLC em função da variação do comprimento do canal (d_i)	64
Figura 4.7	Função de transferência do canal PLC	66
Figura 4.8	Resposta impulsiva do canal PLC	67
Figura 4.9	Resposta de fase do canal PLC	68
Figura 4.10	Comportamento do retardo de grupo no canal PLC	69
Figura 4.11	Curva de atenuação baseado na análise da constante de propagação do sinal no canal PLC	71
Figura 4.12	Modelo de rede PLC com 2 portas	72

Figura 4.13	Modelo da linha de transmissão	72
Figura 4.14	Exemplo de diagrama de posicionamento do tipo <i>bridge tap</i>	78
Figura 4.15	Linha de transmissão com uma extensão (<i>bridge tap</i>)	79
Figura 4.16	Circuito equivalente da linha de transmissão com extensão	79
Figura 4.17	Rede PLC com ramificações	84
Figura 4.18	Configuração da rede PLC com uma ramificação	85
Figura 4.19	Resposta em frequência do Canal PLC genérico	87
Figura 4.20	Espectro de fase do canal PLC genérico	88
Figura 4.21	Atraso de grupo do canal PLC genérico	89
Figura 4.22	Resposta impulsiva do canal PLC genérico	90
Figura 4.23	Resposta em frequência do Canal PLC para uma casa popular	94
Figura 4.24	Espectro de fase do canal PLC para uma casa popular	95
Figura 4.25	Atraso de grupo do canal PLC de uma casa popular	96
Figura 4.26	Resposta impulsiva do canal PLC para uma casa popular	97
Figura 4.27	Resultado da função de transferência da rede PLC com uma ramificação e em função da variação da distância desta ramificação: (a) canal genérico, (b) canal de uma casa popular	98
Figura 4.28	Função de transferência do canal PLC em função da distância da linha entre o transmissor e o receptor e com uma ramificação: (a) canal genérico, (b) canal de uma casa popular	100
Figura 4.29	Função de transferência da rede PLC com diferentes números de ramificações: (a) canal genérico, (b) canal de uma casa popular	102
Figura 4.30	Função de transferência da rede PLC com uma ramificação e diferentes valores da impedância da carga: (a) canal genérico, (b) canal de uma casa popular	104
Figura 4.31	Função de transferência da rede PLC com uma ramificação e diferentes valores de indutância e capacitância distribuída: (a) canal genérico, (b) canal de uma casa popular	105
Figura 4.32	Função de transferência da rede PLC com uma ramificação e diferentes valores de indutância e capacitância da carga: (a) canal genérico, (b) canal de uma casa popular	107
Figura 4.33	Função de transferência da rede PLC com uma ramificação e diferentes valores de a_1 : (a) canal genérico, (b) canal de uma casa	109

	popular	
Figura 4.34	Função de transferência da rede PLC com uma ramificação e diferentes valores de k: (a) canal genérico, (b) canal de uma casa popular	110
Figura 5.1	Configuração da rede PLC	114
Figura 5.2	Desempenho dos algoritmos Congestion Avoidance TCP em função do aumento da taxa de erro numa fonte de tráfego CBR	115
Figura 5.3	Desempenho dos algoritmos Congestion Avoidance TCP em função do aumento da taxa de erro numa fonte de tráfego VBR	116
Figura 5.4	Comparação da CWND x tempo entre as implementações TCP: Fonte de tráfego CBR	116
Figura 5.5	Comparação da CWND x tempo entre as implementações TCP: Fonte de tráfego VBR	117
Figura 5.6	Mecanismo para medição do espectro do sinal	118
Figura 5.7	Mecanismo para medição do sinal no domínio do tempo	118
Figura 5.8	Acoplador capacitivo	118
Figura 5.9	Configuração para as medidas de ruído	119
Figura 5.10 (a)	Espectro do sinal na rede elétrica com a utilização de filtro PLC e sem a presença de ruído	120
Figura 5.10 (b)	Espectro do sinal e curva de persistência na rede elétrica com a utilização de filtro PLC e sem a presença de ruído	120
Figura 5.11 (a)	Ruído provocado pelo dimmer ligado medido com o osciloscópio	121
Figura 5.11 (b)	Ruído provocado pelo dimmer ligado medido com o analisador de espectro	122
Figura 5.11 (c)	Ruído provocado pelo dimmer ligado medido com o analisador de sinais vetoriais	122
Figura 5.12 (a)	Ruído provocado pelo secador de cabelo ligado medido com o osciloscópio	123
Figura 5.12 (b)	Ruído provocado pelo secador de cabelo ligado medido com o analisador de espectro	123
Figura 5.12 (c)	Ruído provocado pelo secador de cabelo ligado medido com o	124

	analisador de sinais vetoriais	
Figura 5.13 (a)	Ruído provocado pelo liquidificador ligado medido com o osciloscópio	125
Figura 5.13 (b)	Ruído provocado pelo liquidificador ligado medido com o analisador de espectro	125
Figura 5.13 (b)	Ruído provocado pelo liquidificador ligado medido com o analisador de sinais vetoriais	126
Figura 5.14	Comparação do sinal de ruído entre o secador de cabelos e o liquidificador	126
Figura 5.15(a)	Ruído provocado pela fonte de alimentação chaveada ligada medido com o osciloscópio	127
Figura 5.15(b)	Ruído provocado pela fonte de alimentação chaveada ligada medido com o analisador de espectro	128
Figura 5.15(c)	Ruído provocado pela fonte de alimentação chaveada ligada medido com o analisador de sinais vetoriais	128
Figura 5.16(a)	Ruído provocado pela lâmpada fluorescente compacta ligado medido com o osciloscópio	129
Figura 5.16(b)	Ruído provocado pela lâmpada fluorescente compacta ligado medido com o analisador de espectro	130
Figura 5.16(c)	Ruído provocado pela lâmpada fluorescente compacta ligado medido com o analisador de sinais vetoriais	130
Figura 5.17 (a)	Ruído provocado pela televisão e ventilador ligados medido com o osciloscópio	131
Figura 5.17 (b)	Ruído provocado pela televisão e ventilador ligados medido com o analisador de espectro	132
Figura 5.17 (c)	Ruído provocado pela televisão e ventilador ligados medido com o analisador de sinais vetoriais	132
Figura 5.18 (a)	Ruído provocado pela batedeira ligado medido com o osciloscópio	133
Figura 5.18 (b)	Ruído provocado pela batedeira ligado medido com o analisador de espectro	134
Figura 5.18 (c)	Ruído provocado pela batedeira ligado medido com o analisador de sinais vetoriais	134
Figura 5.19	Comparação do sinal de ruído entre a batedeira e o liquidificador	135

Figura 5.20 (a)	Ruído provocado pelo barbeador elétrico ligado medido com o osciloscópio	136
Figura 5.20 (b)	Ruído provocado pelo barbeador elétrico ligado medido com o analisador de espectro	136
Figura 5.20 (c)	Ruído provocado pelo barbeador elétrico ligado medido com o analisador de sinais vetoriais	137
Figura 5.21	Configuração de uma rede local PLC: (a) com filtro, (b) sem filtro isolador da rede PLC	140
Figura 5.22	Configuração da rede PLC com aplicação de ruído e com filtro PLC	140
Figura 5.23(a)	Instalação elétrica da casa popular	141
Figura 5.23(b)	Instalação elétrica da casa popular:diagrama unifilar e quadro de carga	142
Figura 5.24	Casa popular	142
Figura 5.25	Vazão na rede PLC sem a presença de ruído e com filtro: casa popular	143
Figura 5.26	Vazão na rede PLC sem a presença de ruído e com filtro: casa de classe média	144
Figura 5.27	Vazão na rede PLC sem a presença de ruídos e com filtro: período vespertino	145
Figura 5.28	Influência do barbeador na transmissão de dados pela rede PLC com filtro	145
Figura 5.29	Influência da batedeira na transmissão de dados pela rede PLC com filtro	145
Figura 5.30	Influência do dimmer na transmissão de dados pela rede PLC com filtro	146
Figura 5.31	Influência da fonte chaveada na transmissão de dados pela rede PLC com filtro	146
Figura 5.32	Influência da lâmpada fluorescente compacta na transmissão de dados pela rede PLC com filtro	146
Figura 5.33	Influência do liquidificador na transmissão de dados pela rede PLC com filtro	147
Figura 5.34	Influência do secador de cabelos na transmissão de dados pela rede PLC com filtro	147
Figura 5.35	Influência do ventilador e televisão na transmissão de dados pela rede PLC com filtro	147

Figura 5.36	Resultado comparativo da eficiência da rede PLC com filtro considerando a presença de ruídos dos eletrodomésticos	148
Figura 5.37	Gráfico comparativo do desempenho de todos os eletrodomésticos	148
Figura 5.38	Vazão na rede PLC sem a presença de filtros numa casa popular	150
Figura 5.39	Vazão na rede PLC sem a presença de filtros numa casa de classe média	151
Figura 5.40	Influência do barbeador na transmissão de dados pela rede PLC sem filtro	151
Figura 5.41	Influência da batedeira na transmissão de dados pela rede PLC sem filtro	152
Figura 5.42	Influência do dimmer na transmissão de dados pela rede PLC sem filtro	152
Figura 5.43	Influência da fonte chaveada na transmissão de dados pela rede PLC sem filtro	152
Figura 5.44	Influência da lâmpada fluorescente compacta na transmissão de dados pela rede PLC sem filtro	153
Figura 5.45	Influência do liquidificador na transmissão de dados pela rede PLC sem filtro	153
Figura 5.46	Influência do secador de cabelos na transmissão de dados pela rede PLC sem filtro	153
Figura 5.47	Influência do ventilador e televisão na transmissão de dados pela rede PLC sem filtro	154
Figura 5.48	Resultado comparativo da eficiência da rede PLC sem filtro considerando a presença de ruídos dos eletrodomésticos	154
Figura 5.49	Gráfico comparativo do desempenho de todos os eletrodomésticos numa rede PLC sem filtro	155
Figura 5.50	Comparação do desempenho da rede PLC entre as 3 casas populares com filtro	156
Figura 5.51	Comparação do desempenho da rede PLC entre as 3 casas populares sem filtro	167
Figura 5.52	Comparação da eficiência da rede PLC nos 3 períodos do dia	158
Figura 5.53	Comparação da eficiência da rede PLC para os 3 dias de medição no	159

	período noturno com filtro	
Figura 5.54	Comparação da eficiência da rede PLC para os 3 dias de medição no período noturno sem o uso de filtro	160
Figura 5.55	Vazão em função do aumento da janela de congestionamento TCP	161
Figura 5.56	Vazão na rede PLC em função da distância	162
Figura 5.57	Equipamentos utilizados para medição do sinal PLC	163
Figura 5.58	Medida do sinal PLC sem transmissão de dados sem a presença de ruídos: (a) com filtro, (b) sem filtro	164
Figura 5.59	Avaliação de desempenho e medida do sinal PLC com transmissão de dados e sem a presença de ruídos: (a) com filtro, (b) sem filtro	166
Figura 5.60	Avaliação de desempenho e medida do sinal PLC com transmissão de dados e com a presença de ruídos do secador de cabelos: (a) com filtro, (b) sem filtro	169
Figura 5.61	Avaliação de desempenho e medida do sinal PLC com transmissão de dados e com a presença de ruídos da lâmpada fluorescente compacta: (a) com filtro, (b) sem filtro	171
Figura 5.62	Avaliação de desempenho e medida do sinal PLC com transmissão de dados e com a presença de ruídos do dimmer: (a) com filtro, (b) sem filtro	172
Figura 5.63	Avaliação de desempenho e medida do sinal PLC com transmissão de dados e com a presença de ruídos da fonte chaveada: (a) com filtro, (b) sem filtro	175
Figura 5.64	Avaliação de desempenho e medida do sinal PLC com transmissão de dados e com a presença de ruídos do barbeador: (a) com filtro, (b) sem filtro	177
Figura 5.65	Avaliação de desempenho e medida do sinal PLC com transmissão de dados e com a presença de ruídos do liquidificador: (a) com filtro, (b) sem filtro	178
Figura 5.66	Avaliação de desempenho e medida do sinal PLC com transmissão de dados e com a presença de ruídos da bateadeira: (a) com filtro, (b) sem filtro	180
Figura 5.67	Avaliação de desempenho e medida do sinal PLC com transmissão de	182

	dados e com a presença de ruídos da televisão com o ventilador: (a) com filtro, (b) sem filtro	
Figura 5.68 (a)	Medidas com osciloscópio do sinal na rede elétrica sem transmissão de dados, sem a presença de ruídos e com filtro	183
Figura 5.68 (b)	Medidas com osciloscópio do sinal na rede elétrica com transmissão de dados sem a presença de ruídos e com filtro.	183
Figura 5.68 (c)	Medidas com osciloscópio do sinal na rede elétrica com transmissão de dados sem a presença de ruídos e sem filtro.	184
Figura 5.68 (d)	Medidas com osciloscópio do sinal na rede elétrica com transmissão de dados e com presença de ruído do secador de cabelo com filtro.	184
Figura 5.68 (e)	Medidas com osciloscópio do sinal na rede elétrica com transmissão de dados e com presença de ruído da lâmpada fluorescente compacta com filtro.	185
Figura 5.68 (f)	Medidas com osciloscópio do sinal na rede elétrica com transmissão de dados com presença de ruído do dimmer com filtro.	185
Figura 5.68 (g)	Medidas com osciloscópio do sinal na rede elétrica com transmissão de dados e com presença de ruído da fonte chaveada com filtro.	186
Figura 5.68 (h)	Medidas com osciloscópio do sinal na rede elétrica com transmissão de dados com presença de ruído do barbeador com filtro.	186
Figura 5.68 (i)	Medidas com osciloscópio do sinal na rede elétrica com transmissão de dados e com presença de ruído do liquidificador com filtro.	187
Figura 5.68 (j)	Medidas com osciloscópio do sinal na rede elétrica com transmissão de dados e com presença de ruído da batedeira com filtro.	187
Figura 5.68 (k)	Medidas com osciloscópio do sinal na rede elétrica com transmissão de dados e com presença de ruído da TV e ventilador com filtro.	188
Figura 5.69	Medição da tensão da rede elétrica no padrão da casa popular	191
Figura 5.70	Configuração da rede PLC para a medição da qualidade de energia elétrica	192

Figura 5.71	Curva da tensão da rede elétrica sem carga	194
Figura 5.72	Medida da corrente na rede de energia elétrica com os adaptadores PLC com e sem transmissão de dados	195
Figura 5.73	Medida da curva de corrente do barbeador	196
Figura 5.74	Medida da curva de corrente do liquidificador	197
Figura 5.75	Medida da curva de corrente da batedeira	198
Figura 5.76	Medida da curva de corrente da lâmpada fluorescente compacta	199
Figura 5.77	Medida da curva de corrente do dimmer	199
Figura 5.78	Medida da curva de corrente da fonte chaveada	200
Figura 5.79	Medida da curva de corrente do secador de cabelos	201
Figura 5.80	Medida da curva de corrente da televisão em conjunto com o ventilador	202
Figura 5.81	Curva de tensão x corrente	203
Figura 5.82	Medição da rede elétrica sem transmissão de dados e sem ruído na rede PLC	203
Figura 5.83	Medição da energia elétrica com transmissão de dados com filtro e sem ruído na rede PLC	204
Figura 5.84	Medição da energia elétrica com transmissão de dados com filtro e sinal de ruído da lâmpada fluorescente compacta na rede PLC	204
Figura 5.85	Medição da energia elétrica com transmissão de dados com filtro e sinal de ruído do dimmer na rede PLC	205
Figura 5.86	Medição da energia elétrica com transmissão de dados com filtro e sinal de ruído do barbeador na rede PLC	205
Figura 5.87	Medição da energia elétrica com transmissão de dados com filtro e sinal de ruído do secador de cabelos na rede PLC	206
Figura 5.88	Medição da energia elétrica com transmissão de dados com filtro e sinal de ruído da batedeira na rede PLC	206
Figura 5.89	Medição da energia elétrica com transmissão de dados com filtro e sinal de ruído da fonte chaveada na rede PLC	207
Figura 5.90	Medição da energia elétrica com transmissão de dados com filtro e sinal de ruído do liquidificador na rede PLC	207

Figura 5.91	Diagrama espectral dos harmônicos do sinal PLC sem ruído na rede	208
Figura 5.92	Diagrama espectral dos harmônicos do barbeador	209
Figura 5.93	Diagrama espectral dos harmônicos do liquidificador	210
Figura 5.94	Diagrama espectral dos harmônicos da batedeira	211
Figura 5.95	Diagrama espectral dos harmônicos da lâmpada fluorescente compacta	212
Figura 5.96	Diagrama espectral dos harmônicos do dimmer	213
Figura 5.97	Diagrama espectral dos harmônicos da fonte chaveada	213
Figura 5.98	Diagrama espectral dos harmônicos do secador de cabelos	214
Figura 5.99	Diagrama espectral dos harmônicos da televisão em conjunto com o ventilador	215

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	Limites de radiações indesejadas causadas por sistemas BPL de RBT	31
Tabela 3.2	Limites de radiações indesejadas causadas por sistemas BPL de RMT	32
Tabela 4.1	Avaliação da transmissão para as diversas faixas do sinal	61
Tabela 4.2	Relação sinal/ruído para as principais tecnologias de comunicação	61
Tabela 4.3	Atraso de propagação em função do meio de transmissão	61
Tabela 4.4	Parâmetros do modelo de uma rede PLC	65
Tabela 4.5	Configuração das distâncias para situação genérica e para uma casa popular	86
Tabela 5.1	Medida dos sinais de ruídos dos principais eletrodomésticos	137
Tabela 5.2	Medida do sinal PLC sobre a atuação de ruídos dos principais eletrodomésticos	188
Tabela 5.3	Características dos fenômenos de qualidade da energia elétrica	190
Tabela 5.4	Parâmetros das medidas realizadas	216

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ADPSK	<i>Amplitude Differential Phase Shift Keying</i>
ADSL	<i>Asymmetric Digital Subscriber Line</i>
ANATEL	<i>Agência Nacional de Telecomunicações</i>
ANEEL	<i>Agência Nacional de Energia Elétrica</i>
ANSI	<i>American National Standard Institute</i>
AWGN	<i>Additive White Gaussian Noise</i>
BER	<i>Bit Error Rate</i>
BPL	<i>Broadband Power Line</i>
BT	<i>Baixa Tensão</i>
BW	Bandwidth
CBR	<i>Constant Bit Rate</i>
CDMA	<i>Code Division Multiple Access</i>
CELG	<i>Centrais Elétricas de Goiás</i>
CS	<i>Carrier Sense</i>
CSMA	<i>Carrier-Sense Multiple Access</i>
CSMA/CA	<i>Carrier-Sense Multiple Access/ collision avoidance</i>
CSMA/CARP	<i>Carrier Sense Multiple Access With Collision Avoidance and Resolution using Priorities</i>
CSMA/CD	<i>Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection</i>
DAB	<i>Digital Audio Broadcasting</i>
DES	<i>Data Encryption Standard</i>
DFT	<i>Discrete Fourier Transformer</i>

DHT	<i>Distorção Harmonica Total</i>
DPSK	<i>Differential Phase Shift Keying</i>
DVB-T	<i>Digital Video Broadcasting – Terrestrial</i>
EB	<i>Estação Base</i>
EHF	<i>Extremely High Frequency</i>
ELF	<i>Extremely Low Frequency</i>
EMC	<i>Electromagnetic Compatibility</i>
FDM	<i>Frequency Division Multiplex</i>
FDMA	<i>Frequency Division Multiple Access</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
FP	<i>Fator de Potência</i>
FTP	<i>File Transfer Protocol</i>
GD	<i>Group Delay</i>
HDLC	<i>High Level Data Link Control</i>
HDTV	<i>High Definition Television</i>
HF	<i>High Frequency</i>
HFC	<i>Hybrid Fiber Coax</i>
IACS	<i>International Annealed Copper Standard</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IFFT	<i>Inverse Fast Fourier Transform</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
ISDN	<i>Integrated Services Digital Networks</i>
ISI	<i>Inter Symbol Interference</i>
ITU-T	<i>International Telecommunication Union - Telecommunications</i>

LAN	<i>Local Area Network</i>
LF	<i>Low Frequency</i>
LMDS	<i>Local Multipoint Distribution System</i>
LT	<i>Linha de Transmissão</i>
LTI	<i>Linear Time Invariant</i>
MA	<i>Multiple Access</i>
MAC	<i>Medium Access Control</i>
MF	<i>Medium Frequency</i>
MSDU	<i>Mac Service Data Unit</i>
MT	<i>Média Tensão</i>
NEK	<i>Network Encryption Key</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
OPERA	<i>Open PLC European Research Alliance</i>
PAPR	<i>Peak-to-Average Power Ratio</i>
PDF	<i>Power Density Function</i>
PLC	<i>Power Line Communication</i>
PSD	<i>Power Spectral Density</i>
PSK	<i>Phase Shift Keying</i>
PSTNS	<i>Public Switched Telephone Networks</i>
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
RF	<i>Radio Frequênci</i>
RTO	<i>Timeout</i>
RTT	<i>Round Trip Time</i>

SAPS	<i>Service Access Points</i>
SHF	<i>Superhigh Frequency</i>
SMTP	<i>Service Mail Transfer Protocol</i>
SNR	<i>Signal to Noise Ratio</i>
SOHO	<i>Small office/ home office</i>
SSMA	<i>Spread Spectrum Multiple Access</i>
SSTHRESH	<i>Slow Start Threshold</i>
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>
TDM/FDD	<i>Time Division Multiplexing Access – Frequency Division Duplex</i>
TDM/TDD	<i>Time Division Multiple Access – Time Division Duplex</i>
TDMA	<i>Time Division Multiple Access</i>
TELNET	<i>Remote Terminal Protocol of the Internet Architecture</i>
TEM	<i>Transverse Electric Magnetic</i>
UHF	<i>Ultra High Frequency</i>
UPLS	<i>United Power Line Council</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
VBR	<i>Variable Bit Rate</i>
VF	<i>Voice Frequency</i>
VHF	<i>Very High Frequency</i>
VLf	<i>Very Low Frequency</i>
WAN	<i>Wide Area NetWork</i>
WEB	<i>World Wide Web</i>
DSL	<i>Digital Subscriber Line</i>

CAPÍTULO I

ANÁLISE, MEDIDAS E AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE UMA REDE PLC EM AMBIENTE INDOOR DE CASAS POPULARES

INTRODUÇÃO

O explosivo crescimento da demanda por serviços de comunicação multimídia pela Internet, vêm, exigindo soluções com mais eficiência de modo a prover qualidade de serviço (QoS – *Quality of Service*) para todos os usuários em todas as regiões geográficas [1]. Uma das possíveis soluções que nos últimos anos tem se destacado, embora ainda seja alvo de muita pesquisa, é a aplicação da rede elétrica para a realização de tráfego de dados e acesso à Internet. A tecnologia PLC (*Power Line Communication*) suporta o transporte de diversos tipos de tráfego como voz, dados, imagem estática e vídeo. A figura 1.1 ilustra uma rede PLC *indoor* [2].

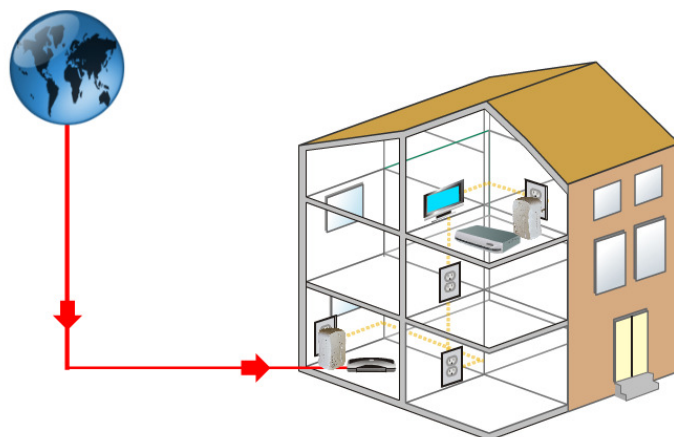


Figura 1.1 – Rede PLC indoor.

A tecnologia PLC pode se destacar no cenário mundial por possuir as seguintes características:

- Alta taxa de transmissão de dados;
- Ampla infra-estrutura elétrica disponível;
- Facilidade de transmissão ao longo de toda a malha de energia elétrica;
- Facilidade de instalação;
- Baixo custo de implantação;
- Flexibilidade para operar em conjunto com outras tecnologias.
- Transmissão de dados, imagens, vídeo e voz.

Em contrapartida a implantação da tecnologia PLC ainda enfrenta diversos obstáculos a serem superados como:

- Redução de custos para os equipamentos e em especial para os adaptadores PLC;
- Máxima potência de transmissão que pode restringir a área geográfica para fornecimento de serviços como acesso a Internet;
- Interferência eletromagnética;

Uma Rede PLC indoor com acesso a Internet pode ser constituída basicamente de um equipamento denominado Master PLC, instalado em um ponto próximo ao transformador de energia elétrica para que o sinal PLC seja injetado nos cabos de energia elétrica. Assim, todos os consumidores que estiverem conectados no circuito elétrico deste transformador estarão recebendo o sinal PLC em todas as tomadas da rede local ou da residência. Outro equipamento é o repetidor que vai interligado em paralelo com o medidor de energia elétrica de cada residência de modo a possibilitar a passagem do sinal PLC para as tomadas da residência. Os adaptadores PLC são conectados diretamente na tomada de energia elétrica de qualquer cômodo de uma residência para receber o sinal transmitido pelo Master PLC e

disponibilizá-lo para conectar na placa de rede do computador ou outro equipamento dependendo do serviço solicitado.

Os adaptadores PLC são completamente protegidos e tem isolamento adequado para evitar choques. O sistema PLC atual é projetado para trafegar nos circuitos de distribuição em baixa tensão, atingindo distâncias de até 300 m. Por último, pode ser utilizado filtros para reduzir a influência do ruído na comunicação entre os adaptadores PLC. A figura 1.2 apresenta um modelo de instalação de uma rede PLC indoor com acesso a serviço de Internet [2].



Figura 1.2 – Modelo de instalação de uma rede PLC indoor.

Numa residência os adaptadores estão aptos para serem conectados aos telefones, computadores, impressoras, televisões digitais, vídeo game, câmeras IP entre outros. A figura 1.3 mostra um exemplo da ligação de equipamentos numa rede PLC indoor.

Num adaptador PLC, a pilha de protocolo é constituída da camada física, camada de enlace, camada de rede, camada de transporte e camada de aplicação. A maioria das aplicações da arquitetura TCP/IP baseia-se no serviço de transporte orientado à conexão fornecido pelo TCP (*Transmission Control Protocol*) e em um serviço de rede não orientado à conexão fornecido pelo IP (*Internet Protocol*).

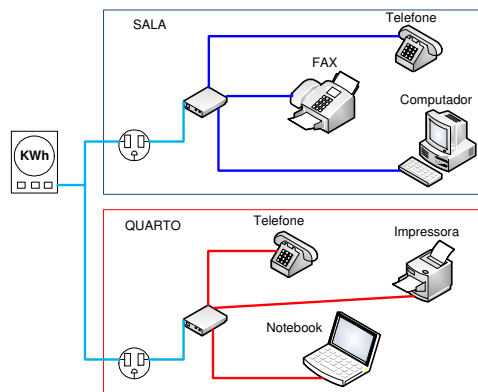


Figura 1.3 – Equipamentos conectados numa rede PLC *indoor*.

O TCP é o principal protocolo da camada de transporte. A maneira como o TCP transmite dados das várias aplicações simultâneas é por intermédio da multiplexação, onde vários segmentos são repassados para a camada de rede (especificadamente à entidade que implemente o protocolo IP). O TCP fornece um serviço *full-duplex*, orientado à conexão destinado ao transporte confiável de diversas aplicações como Web (*World Wide Web*), SMTP (*Service Mail Transfer Protocol*), FTP (*File Transfer Protocol*), TELNET (*Remote Terminal Protocol of the Internet Architecture*) e etc. Este protocolo é responsável pelo transporte, controle de fluxo, verificação de erros e, caso necessário a retransmissão dos dados do transmissor até o receptor.

A rede de energia elétrica é um ambiente bastante hostil para a realização do tráfego de dados devido a diversos fatores que são responsáveis pela queda no desempenho da rede PLC. O cabo de energia é um canal de comunicação variante no tempo e na frequência e apresenta grandes disparidades em função das diferentes topologias de rede, dos tipos de cabos e das cargas que estão conectadas. As diferentes características podem ser encontradas dependendo do caminho de transmissão selecionado ou das aplicações elétricas que são conectadas. O número de elementos presentes na rede e suas características determinam o comportamento

do canal. Os valores de impedância apresentados pelos eletrodomésticos a ela conectados são bastante diversos, com valores absolutos variando de poucos ohms até Kohms.

O fenômeno de propagação multipercurso aparece devido às reflexões que o sinal sofre em cada conexão com carga conectada encontrada ao longo do caminho do transmissor para o receptor. Essas reflexões multipercurso resultam em distorções do sinal no canal de transmissão PLC. Para obter uma comunicação confiável de alta velocidade sobre uma rede PLC, técnicas de processamento do sinal devem ser empregadas para combater a hostilidade desse ambiente de comunicação [3]. A técnica mais apropriada é a utilização de uma modulação multiportadora como a OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplex*) para canais seletivos na frequência e que foi projetada para transmissão de sinais com alta velocidade em redes com grande largura de banda [4,5,6].

A técnica OFDM consiste na transmissão paralela de dados em diversas subportadoras com modulação QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*) ou PSK (*Phase Shift Keying*) e suas variações DPSK (*Differential Phase Shift Keying*) e ADPSK (*Amplitude Differential Phase Shift Keying*)[7,8,9]. A modulação OFDM é uma evolução da FDM, na qual as portadoras são ortogonais entre si, permitindo que elas sejam recuperadas individualmente mesmo ocorrendo superposição em frequência [10,11,12,13]. A superposição reduz a banda de transmissão aumentando o número de canais. Desse modo a modulação OFDM tem como vantagem a possibilidade de aumentar a duração total dos símbolos e reduzir a ISI (*Inter Symbol Interference*) causada pela resposta dispersiva no tempo do canal [14,15,16,17,18]. Esta técnica é bastante robusta aos efeitos da seletividade em frequência e ao desvanecimento seletivo [19,20,21,22,23].

O canal de transmissão representa o caminho a ser utilizado para a transmissão de sinais entre dois equipamentos. O tipo de canal utilizado para a transmissão de sinais numa rede é responsável pelo índice de qualidade e eficiência da rede.

O cabo elétrico utilizado na rede de energia elétrica tem a finalidade de transportar energia elétrica ou sinais. Desse modo, para a rede PLC, o cabo elétrico é o canal de transmissão para a comunicação entre dois ou mais equipamentos. As características e os parâmetros elétricos do cabo utilizado para a transmissão de dados são de vital importância para o cálculo da função de transferência do canal PLC. Desse modo, para entender o comportamento do canal de transmissão, é importante conhecer, baseado na teoria de circuitos, os parâmetros primários e secundários da linha de transmissão. A LT (Linha de Transmissão) possui propriedades que dependem da frequência, do nível de tensão, da quantidade de potência a ser transmitida, do modo de transmissão (aéreo ou subterrâneo) e da distância entre os terminais do transmissor e do receptor. Os parâmetros primários da linha de transmissão longitudinais são a resistência por unidade de comprimento que é responsável pelas perdas ôhmicas na linha e a indutância por unidade de comprimento considerado. Os parâmetros transversais que representam as características que existem entre condutores que constituem a LT são a capacitância por unidade de comprimento e a condutância (ou admitância) do dielétrico por unidade de comprimento, que é responsável pelas perdas no isolamento (dielétrico).

Tendo em vista todos os fatores descritos propõe-se inicialmente neste trabalho a realização de um estudo comparativo de desempenho de várias implementações TCP operando sobre uma rede PLC indoor. Estas implementações incorporam diferentes tipos de mecanismos *Congestion Avoidance*, os quais serão avaliados diante dos problemas que ocorrem numa rede PLC. Em seguida, avalia-se o desempenho da rede PLC indoor em função dos diversos tipos de ruído, e em função da distância entre os dois adaptadores PLC, em residências do tipo casa popular, em bairros das periferias de Cuiabá, situados a aproximadamente 25 Km do centro da cidade.

Um modelo de canal amplamente aceito por pesquisadores da tecnologia PLC ainda não foi apresentado. Isso se decorre porque os modelos baseados em resultados experimentais, obtidos de uma topologia específica, e sobre certas condições, falham quando aplicadas numa situação de comportamento geral do funcionamento da rede PLC.

A modelagem do canal PLC como um ambiente de múltiplos caminhos é desejável para determinar os caminhos da transmissão que contribuem para o comportamento da variação, tipo, frequência, e para calcular os parâmetros que definem as propriedades do meio de comunicação. Desse modo, como resultado, a variação da atenuação do sinal em função da distância, da frequência, dos parâmetros do cabo, do valor de capacitância e indutância, das características de impedância, do número e distância das ramificações são amplamente observados no canal de transmissão.

Este trabalho também almeja realizar medições, simulações da resposta em frequência e avaliação de desempenho da rede PLC indoor com e sem a presença de ruídos que ocorrem em um canal de comunicação PLC. Com as medições e os estudos realizados, pretende-se descobrir os efeitos da utilização da comunicação de alta velocidade na estrutura da rede elétrica existente nas casas populares, no modelo das redes elétricas brasileiras e uma possível relação entre fator de potência, distorção de harmônicos e a vazão da rede PLC.

Esta tese encontra-se dividida em 6 capítulos. A introdução fornece uma visão básica do conteúdo deste trabalho. Em seguida, o Capítulo 2 que tem por objetivo descrever a tecnologia PLC, e apresentar as características técnicas de funcionamento e operação que consiste na utilização das redes de energia elétrica para fins de comunicação. No Capítulo 3 são apresentados os aspectos relacionados à teoria sobre canal de transmissão, e um estudo detalhado referente aos diversos tipos de ruídos que prejudicam a comunicação numa rede PLC. O Capítulo 4 descreve os conceitos de linha de transmissão necessários para o estudo e análise do canal PLC, para em seguida apresentar, por meio de simulações, o comportamento

do canal PLC *indoor* genérico, e em especial, as características simuladas para as dimensões de uma casa popular. O Capítulo 5 apresenta, inicialmente, os resultados obtidos da avaliação de desempenho da rede PLC *indoor* em função dos algoritmos *Congestion Avoidance* TCP/IP. Em sequência, traz as medidas dos principais sinais de ruídos encontrados em casas populares, para, então, mostrar os resultados encontrados da avaliação de desempenho da rede PLC em casas populares com e sem a presença de ruídos, a eficiência da rede PLC em função da distância entre o transmissor e o receptor, e em função do aumento do tamanho da janela de dados do protocolo TCP. Este capítulo também apresenta o resultado das medidas realizadas com equipamentos de medição do sinal PLC sem transmissão e com transmissão de dados, e na presença e ausência de sinais de ruído. Finalmente, o Capítulo 6 apresenta as conclusões, faz algumas observações e traz sugestões para a continuidade desta pesquisa.

CAPÍTULO 2

TECNOLOGIA POWER LINE COMMUNICATION (PLC)

2.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo tem por objetivo descrever a tecnologia PLC e, em seguida, apresentar as características técnicas de funcionamento e operação, que consistem na utilização das redes de energia elétrica para fins de comunicação. Nestes últimos anos, tem ocorrido um crescente interesse na utilização das redes de distribuição de energia elétrica como uma alternativa para o fornecimento de diversos serviços de telecomunicações, notadamente voz e dados com uma alta velocidade de transmissão na chamada última milha pela rede de baixa tensão conectada ao usuário final.

Desse modo, muitas pesquisas para o desenvolvimento de novos produtos e softwares têm sido apresentados com o intuito de superar as características hostis do canal de comunicação PLC. Baseado nas considerações acima, as limitações da utilização da tecnologia PLC para comunicação de dados também são abordados neste capítulo.

A forma acentuada com que o uso da Internet tem crescido nos últimos anos, contando com aplicativos sofisticados e incorporando recursos multimídia, faz com que seja cada vez mais interessante contar com sistemas que, além de proporcionarem altas taxas de transmissão, forneçam conexão permanente ou dedicada aos usuários.

Os sistemas BPL (*BroadBand Power Line*) possibilitam uma opção adicional de prover dados em banda larga para áreas urbanas e rurais [24]. Como mencionado, o princípio de funcionamento desta tecnologia não é novo, entretanto, apenas nos últimos anos, com a evolução da tecnologia dos microprocessadores e o advento dos novos equipamentos de

conectividade, a tecnologia tem sido avaliada e considerada por algumas empresas, e incluída no estudo de viabilidade para possíveis planos futuros de ação social do governo federal.

2.2 TECNOLOGIA PLC

PLC é uma tecnologia de comunicação pela rede de energia elétrica. A idéia do PLC é utilizar a rede de distribuição de energia elétrica como meio de transporte dos sinais de telecomunicações, abrindo um novo mercado competitivo para acesso à Internet em banda larga, conexões de voz, aplicações de vídeo e muitos outros serviços [25].

Como a rede elétrica está presente em praticamente todos os lugares não há necessidade de obras para instalação de cabos adicionais para a prestação de serviços de telecomunicações. Com o PLC a tomada elétrica também servirá para acesso à Internet. O PLC funciona a partir de um equipamento chamado Master PLC, instalado em um ponto próximo ao transformador de energia elétrica, e o sinal PLC é injetado nos fios elétricos. Assim, todos os consumidores que estiverem ligados no circuito elétrico desse transformador estarão recebendo o sinal PLC em todas as tomadas da rede local ou da residência.

Outro equipamento chamado de adaptador PLC é instalado em qualquer tomada elétrica na casa do usuário para receber o sinal transmitido pelo Master PLC e disponibilizá-lo para ligar na placa de rede do computador, no telefone ou no vídeo, dependendo do serviço solicitado.

O sistema PLC atual é projetado para trafegar na rede de distribuição em baixa tensão, atingindo distâncias de até 300 m sem necessidade de repetidores, e com taxa de transmissão padrão alcançando 200 Mbps [26]. Em agosto de 2011 foi lançado no Brasil adaptadores PLC com taxa de transmissão de 1 Gbps. A figura número 2.1 ilustra o princípio básico de funcionamento do acesso à Internet via rede elétrica utilizando a tecnologia PLC [27].

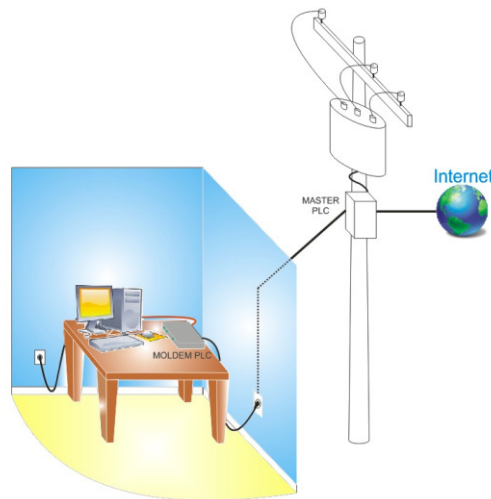


Figura 2.1- Funcionamento de acesso à Internet via rede elétrica.

O serviço de acesso utiliza as redes de média tensão, para levar à Internet e outros serviços de banda larga até o usuário final [27]. Nas residências e escritórios, a rede de baixa tensão fica disponível para a conexão de computadores, impressoras e todos os demais periféricos, além de controladores específicos, para acesso a eletrodomésticos ou gerenciamento de funções de uma residência, escritório ou edifício [28].

O adaptador PLC está disponível com várias conexões: uma no padrão Ethernet (a conexão padrão de rede de computadores), uma no padrão USB (que pode ser utilizada para conectar periféricos e outros equipamentos, como câmeras IP e outra para telefones habilitados para comunicação de voz sobre IP (VoIP) [29].

A Anatel (Agência Nacional de Telecomunicações) por meio da resolução 527, de abril de 2009, apresentou a regulamentação sobre as condições de uso de RF (Rádio Frequência), por sistemas de banda larga, nas redes de energia elétrica [30].

A ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), no dia 25 de agosto de 2009, aprovou a utilização das instalações de distribuição de energia elétrica para a transmissão dos serviços de Internet banda larga [31]. Desse modo daqui alguns anos, além de mais uma

opção positiva para reduzir o preço de um serviço de acesso à Internet banda larga, a rede de distribuição pode fornecer a tão sonhada inclusão digital. Afinal, a rede de energia elétrica chega a lugares em que ainda não existe rede telefônica [32].

A popularização da banda larga, com a aplicação da tecnologia PLC, pode resultar em muitas vantagens desde a velocidade até o custo do serviço [25, 33, 34]. Atualmente, a tecnologia é apoiada por mais de 100 empresas, entre as quais figuram a *Cisco Systems*, *Cogency Semiconductor*, *Conexant Systems*, *Enikia*, *Intellon Corporation*, *Motorola*, *Panasonic*, *RadioShack*, *Sharp Laboratories* e *Texas Instruments*.

Para as concessionárias de energia elétrica as aplicações vão desde o auxílio no combate às perdas até a possibilidade de realizar cortes, re-ligações e medições de consumo remotamente, ficando as informações disponíveis *on line* para os centros de operação da concessionária de energia.

2.3 TIPOS DE REDES PARA A TRANSMISSÃO DE DADOS

A seguir, são apresentados os principais tipos de redes de transmissão de dados utilizando a tecnologia PLC [34, 35,36].

2.3.1 Redes Elétricas de Alta Tensão

Geralmente são redes acima de 69 kV. Estas redes interligam os centros de geração aos centros de consumo, percorrendo grandes distâncias. Este nível de tensão é marcado principalmente pelas perdas por efeito Joule e por capacitâncias e indutâncias parasitas.

As redes de alta tensão foram projetadas para transporte da energia das usinas de geração até as estações consumidoras, localizadas a dezenas ou até centenas de quilômetros de distância.

Alguns fatores importantes podem ser observados com relação ao sistema trifásico: esta configuração permite a geração de tensões de mesma amplitude com defasagem de 120°

entres as ondas senoidais, melhor geometria na construção das torres de transmissão e melhor transmissão de potência.

2.3.2 Redes Elétricas de Média Tensão

As redes elétricas de média tensão estão na faixa de 10 kV até 70 kV, sendo disponibilizada para os consumidores de grande porte com subestações próprias para alimentar sua planta. Pode-se facilmente identificar a distribuição secundária, sendo quatro fios perpendicularmente arranjados na posição vertical, contendo um neutro e três fases.

Essas redes possuem comprimentos de 5 Km até 25 Km, e geralmente estão distribuídas no interior das áreas urbanas e rurais, alimentando indústrias e transformadores abaixadores de distribuição.

As redes de média tensão são responsáveis pela interligação entre as subestações e este nível de tensão pode também ser utilizado no fornecimento de energia elétrica aos consumidores de maior porte como indústrias, hospitais, condomínios, grandes edifícios, etc.

No Brasil, as tensões padronizadas são 13,8 kV (alimentação de transformadores de distribuição e médios clientes) e 25 kV (grandes indústrias).

No cenário brasileiro atual, podem ser encontrados três diferentes tipos de linha de transmissão para média tensão:

- Linha convencional de média tensão: construída com condutores de cobre ou alumínio, puros ou revestidos com material isolante e montados sob travessas de madeira no alto dos postes. A distância entre os condutores pode variar entre 50 cm e 100 cm, dependendo da tensão utilizada.
- Linha compacta de média tensão: também apresenta característica aérea, utiliza separadores capazes de manter uma distância de 10 cm a 20 cm entre os cabos, criando uma

disposição em forma de losango, suspenso por um cabo guia. Os condutores empregados são sempre isolados nesse tipo de construção.

- Linha multiplexada de média tensão: são linhas formadas por três condutores isolados e blindados, que são torcidos juntamente com um cabo guia, o qual é utilizado para a sustentação do sistema. Atualmente, encontra-se bastante difundido devido a menor complexidade quando comparado as linhas convencionais e compactas.

2.3.3 Redes Elétricas de Baixa Tensão

São redes de até 0,5 kV. Este é o nível de tensão derivado do enrolamento secundário do transformador de distribuição e que efetivamente chega à maioria das unidades consumidoras. A natureza dinâmica com que as cargas são inseridas e removidas da rede, as emissões conduzidas provenientes dos equipamentos e as interferências de diferentes naturezas fazem deste ambiente o mais hostil, para a transmissão de sinais, dentre os três níveis de tensão apresentados.

A rede de baixa tensão é responsável por atender os consumidores em suas residências, comércios e pequenas indústrias. Por atingir distâncias de 100 m até 500 m, ficou conhecida como a última milha (*last mile*) e, embora se apresente como a melhor opção para a disseminação das telecomunicações sobre a rede elétrica, este segmento sofre bastante interferência devido aos efeitos causados pelos eletrodomésticos, motores e outros equipamentos que estão constantemente sendo conectados e desconectados da rede elétrica.

Neste segmento da topologia, os valores padrões de tensão podem ser fornecidos em circuitos monofásicos de 127 ou 220 V, ou ainda em circuitos bifásicos e trifásicos de 220 ou 380 V. O fornecimento de circuitos em 440 V se destina apenas as pequenas indústrias que possuem motores e outros equipamentos bastante específicos. A tensão de fornecimento é definida pela concessionária local, considerando aspectos técnicos e econômicos.

No Brasil, são encontrados três diferentes tipos de linhas de transmissão para este tipo de rede:

- Linha convencional de baixa tensão: construída com condutores de cobre ou alumínio, tendo as 3 fases revestidas com material isolante e o neutro nu. O sistema é montado em disposição vertical junto aos postes de distribuição com distância entre os condutores variando de 15 cm a 30 cm.
- Linha multiplexada de baixa tensão: são linhas com construção semelhante às linhas multiplexadas de média tensão, porém, neste caso, os condutores não possuem blindagem.
- Linha subterrânea de baixa tensão: as redes subterrâneas utilizam condutores de cobre isolados não blindados para as fases e nu para o neutro.

As linhas subterrâneas e aéreas de baixa tensão podem ser classificadas em radial, pois a rede secundária parte de apenas um transformador, ou em malha, porque vários transformadores interligados e alimentados por diferentes redes primárias formam uma rede secundária em malha, que se estende por várias quadras. Essa configuração é largamente utilizada em grandes centros urbanos.

2.4 PROBLEMAS ENVOLVIDOS COM A TECNOLOGIA PLC

A tecnologia PLC é uma solução em crescente evolução que se apresenta como mais uma opção tecnológica para os clientes, somando-se aos sistemas conhecidos como ADSL (*Asymmetric Digital Subscriber Line*), rádio, cabo e satélite. Entretanto, há vários motivos técnicos que simplesmente impedem que esta tecnologia funcione de modo satisfatório na prática, mesmo que testes em laboratórios mostrem que ela é bastante viável. Os principais problemas envolvidos são [25, 37, 38, 39, 40]:

- Os fios de cobre absorvem os sinais de alta frequência. Isto restringe que os cabos da rede elétrica sejam usados para transmissões de dados de alta velocidade por uma distância muito longa.
- Os fios de cobre da rede elétrica funcionam como uma antena, fazendo com que os dados transmitidos gerem ruído no espectro eletromagnético, isto é, a transmissão de dados via rede elétrica gera interferência em rádios, televisões e similares. Da mesma forma, os fios elétricos captam sinais de rádios, televisões e similares, corrompendo os dados transmitidos via rede elétrica.
- Interferências de eletrodomésticos como aspiradores de pó, liquidificadores e máquinas de lavar prejudicam a transmissão de dados.
- Junções de cabos e o liga/desliga inerente aos eletrodomésticos fazem com que a carga da rede elétrica varie muito, criando inúmeros pontos de reflexão de sinal na rede, fazendo com que exista muito eco do sinal transmitido, o que acaba por corromper diversos bits transmitidos.

2.4.1 Atenuação de Sinal

É o principal obstáculo para a implantação de transmissões de sinais via rede elétrica. A forte atenuação do sinal em altas frequências prejudica as redes PLC. Os itens, a seguir, explicam as principais fontes de atenuação de sinal em uma rede residencial.

- **Impedância variável**

A rede elétrica de uma residência é montada de forma que todos os eletrodomésticos, lâmpadas e outros dispositivos sejam ligados em paralelo com a alimentação. Assim, a impedância da rede elétrica varia não só de casa para casa, e de tomada para tomada, mas conforme os equipamentos são ligados e desligados. O dispositivo que injeta um sinal de alta frequência na rede, entre uma fase e o neutro, enxergará uma carga em paralelo que pode variar até centenas de ohms.

Quando nenhum equipamento estiver ligado e o único consumidor de sinal for a rede de fornecimento de energia, considerando um disjuntor de 40 A e cargas resistivas em uma tensão de 127 V/60 Hz, a resistência da rede será inferior a 4 Ω . Um chuveiro também é um bom exemplo de carga capaz de mudar totalmente o comportamento da rede. Os quadros de distribuição, fios espalhados, emendas e interruptores também afetam a impedância da rede elétrica.

- **Indutância elevada dos fios**

Os fios que conduzem energia são normalmente longos e espessos, sem nenhum tipo de blindagem, apresentando uma elevada indutância, que para as frequências mais altas acima de 1 MHz, representa uma forte atenuação de sinal. Para um par de fios paralelo, como o usado em extensões, a indutância é de 0.6 mH por metro em média, o que equivale a uma impedância (reatância indutiva) de 4,5 Ω a cada 10 metros. Esta indutância é tal que as transmissões PLC raramente ultrapassam 300 m de distância quando existem cargas em paralelo e, além disso, a indutância dos fios está sempre presente, diferentemente das cargas parasitas e dos ruídos [41].

- **Filtros EMC de eletrodomésticos**

Os televisores por exemplo, possuem filtros passa-baixas contra interferências vindas da alimentação. Estes filtros são basicamente uma sequência de capacitores em paralelo com o circuito de alimentação e bobinas em série. Os capacitores têm normalmente valores menor que 5 μF , mas para uma portadora de 120 kHz um capacitor de apenas 1 μF se comporta como uma carga de 1.3 ohm, que equivale a uma alta carga resistiva de 37 kW.

- **Distorção de sinal**

Mais uma vez o grande vilão são as fontes chaveadas, desta vez por gerarem frequências com harmônicas iguais ou muito próximas à da portadora, modificando o sinal detectado. Como a primeira etapa de uma fonte chaveada é um retificador de onda completa, e

este só absorve energia da rede durante os picos de onda, o sinal de baixa frequência que a portadora carrega acaba sendo modulado pela variação de carga e harmônicas da fonte com um ruído intenso.

- **Instalações trifásicas**

Em pequenas residências a alimentação é feita com apenas uma fase, e desta forma todos os aparelhos da casa são ligados à rede em paralelo. Assim não se torna importante em que pontos da rede (tomada) sejam ligados os dispositivos PLC, estarão sempre ligados ao mesmo par de fios. Já em residências maiores, onde a alimentação é trifásica, a distribuição dos pontos de energia é feita visando à distribuição igualitária das cargas entre as fase.

O resultado é que em uma mesma casa tem-se tomadas ligadas a redes diferentes, visto que só o neutro é comum a todas. Para a situação onde as tomadas utilizam fases diferentes, torna-se quase impraticável a comunicação entre equipamentos utilizando os adaptadores PLC se não utilizar um circuito do tipo *bypass*.

2.5 REGULAMENTAÇÕES, CONCESSIONÁRIAS E INDÚSTRIAS

As principais regulamentações e padronização para a tecnologia PLC são [26, 27, 29, 34]:

- 1- ANATEL;
- 2- ITU-T;
- 3- IEEE;
- 4- ANEEL.

As operadoras de telecomunicações que utilizam o PLC no Brasil são a LIGHT, CELG (Centrais Elétricas de Goiás) e Eletropaulo. As principais indústrias que estão desenvolvendo e comercializando os equipamentos de PLC são: Corinex, Altcom, D-Link, Gigafast, Panasonic, Siemens, Micronet, Linkpro e Comet.

2.6 EQUIPAMENTOS PLC

Há diversos tipos de equipamentos PLC, que podem ser utilizados na oferta de serviços de telecomunicações sobre a rede de distribuição de energia elétrica [34, 35]:

- Adaptadores PLC utilizados nas instalações dos usuários;
- Concentradores (master);
- Repetidores ou equipamentos intermediários (de baixa/média ou alta tensão);

A figura 2.2 ilustra o posicionamento destes tipos de equipamentos em uma rede [42].

➤ Adaptador PLC

O adaptador PLC é um equipamento que realiza a interface entre os equipamentos dos usuários e a rede elétrica de distribuição, transformando o sinal do equipamento terminal de telecomunicações em sinal modulado e transportado sobre a rede elétrica. O adaptador recebe alimentação e os sinais de telecomunicações pela rede elétrica de distribuição doméstica. O adaptador PLC permite também separar as aplicações de voz e dados, para os respectivos telefones ou computadores pessoais.

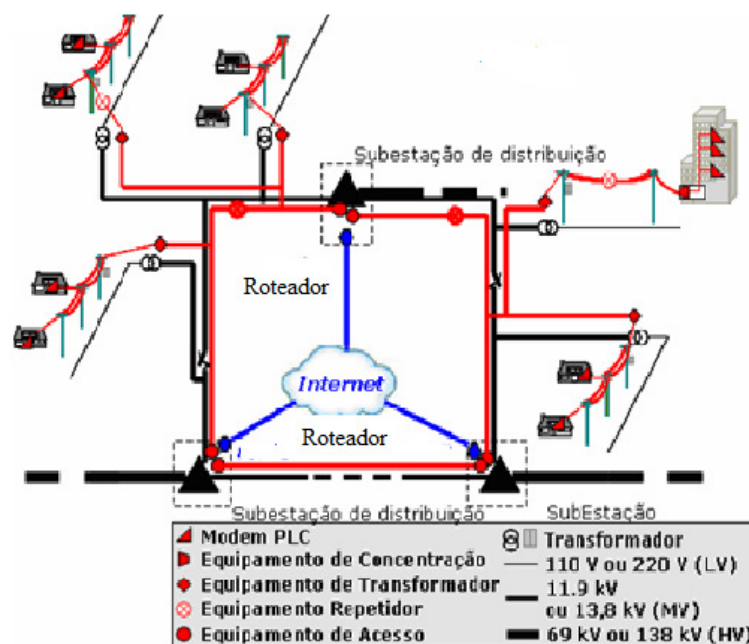


Figura 2.2 – Equipamentos PLC.

➤ Repetidor

O repetidor recupera e re-injeta o sinal PLC proveniente do transformador para a rede elétrica de distribuição doméstica (medidor). É instalado normalmente junto à sala de medidores de cada prédio ou em algum local intermediário (por exemplo, postes sem transformador) na rede de distribuição de baixa tensão. Algumas vezes pode ser utilizado como um nó intermediário para expandir a cobertura ou aumentar a largura de banda em segmentos críticos da rede (por exemplo, devido a uma elevada atenuação entre o equipamento PLC do transformador e o adaptador PLC).

Existem também equipamentos repetidores em média tensão com propósitos semelhantes. Em alguns casos, dependendo da topologia da rede elétrica, o repetidor pode não ser necessário, caso em que o equipamento PLC do transformador consegue uma conexão de elevada qualidade com o adaptador PLC.

➤ Concentrador

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

➤ Equipamento Master/Gateway

O Equipamento master é o dispositivo PLC instalado junto aos transformadores. Sua função é extrair o sinal proveniente da rede de distribuição PLC (média tensão, fibra óptica, rede a cabo ou wireless) e injetá-lo sobre a rede de acesso (baixa tensão), possibilitando o fluxo de dados *downstream* do equipamento transformador até o adaptador PLC ou para os repetidores numa configuração ponto - multiponto do tipo *full-duplex*.

➤ Unidades de Acoplamento

As unidades de acoplamento são os dispositivos acessórios necessários para adaptar o sinal de telecomunicações do equipamento PLC para a caixa de distribuição (MT e BT). Há dois tipos de unidades de acoplamento: acoplamento capacitivo e acoplamento indutivo. A solução de acoplamento é escolhida com base na qualidade do sinal e facilidade de instalação nas condições específicas da rede de distribuição utilizada.

2.7 REDE DE ACESSO PLC

A rede de acesso interconecta os adaptadores PLC com o equipamento PLC transformador [36, 37]. A tomada elétrica convencional torna-se um ponto de conexão a serviços de telecomunicações.

Os Equipamentos PLC transformador localizam-se junto aos transformadores de MT/BT (média tensão/baixa tensão). A figura 2.3 ilustra a rede de acesso de baixa tensão [34]. Na figura 2.3 está indicada a estação base (EB) também chamada de estação Master que faz a interconexão entre a rede de acesso (baixa tensão) e a rede *backbone*. A rede de acesso PLC pode ainda envolver repetidores, em função da distância entre os equipamentos PLC.

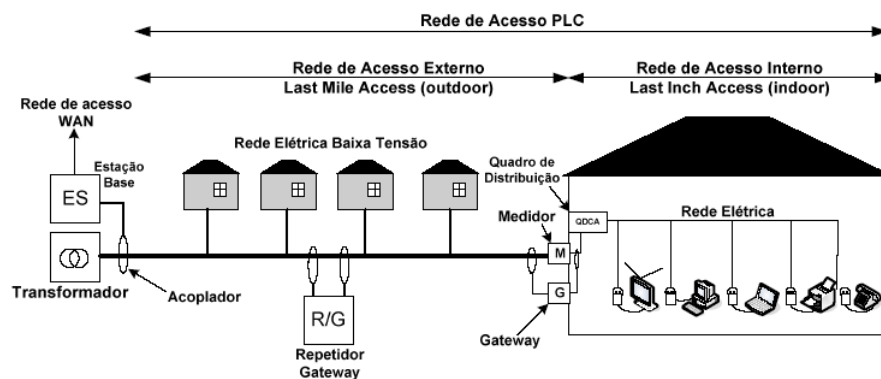


Figura 2.3 - Diagrama da rede de acesso de baixa tensão.

As redes PLC de baixa tensão representam uma alternativa às tecnologias tradicionais empregadas para prover acesso à rede digital de serviços integrados (*Integrated Services*

Digital Networks - ISDN), redes ADSL ou redes HFC (*Hybrid Fiber Coax*) com baixo custo e com alta velocidade.

O adaptador PLC pode também ser utilizado para estabelecer uma rede local levando o sinal PLC a todos os cômodos de uma residência ou de um escritório, possibilitando diversos usuários se conectar e dividir uma conexão em alta velocidade. A figura 2.4 mostra uma típica rede PLC doméstica [43].

Uma rede doméstica é uma rede operada pelo usuário final que usa a instalação elétrica residencial para prover comunicação entre os dispositivos a ela conectados. O assinante PLC é conectado à rede através de um adaptador PLC.

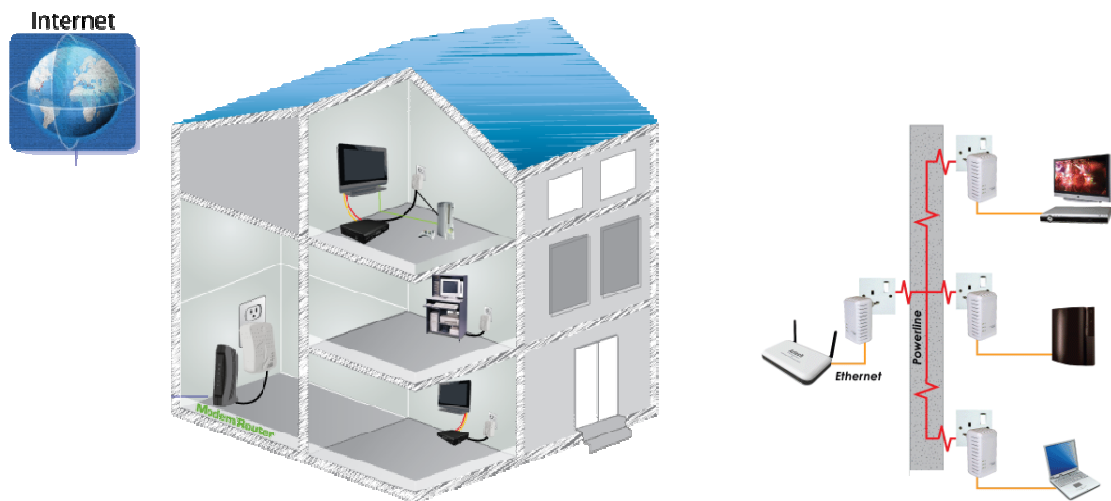


Figura 2.4- Rede PLC indoor.

2.7.1 A Rede de Distribuição PLC

É a parte da rede de acesso que pode ter uma abrangência, inclusive metropolitana, que interliga a rede de acesso de última milha aos provedores, ou ao *backbone*. A rede de distribuição interconecta os equipamentos PLC instalados nas subestações MT/BT [38]. A figura 2.5 ilustra uma rede de distribuição [2].

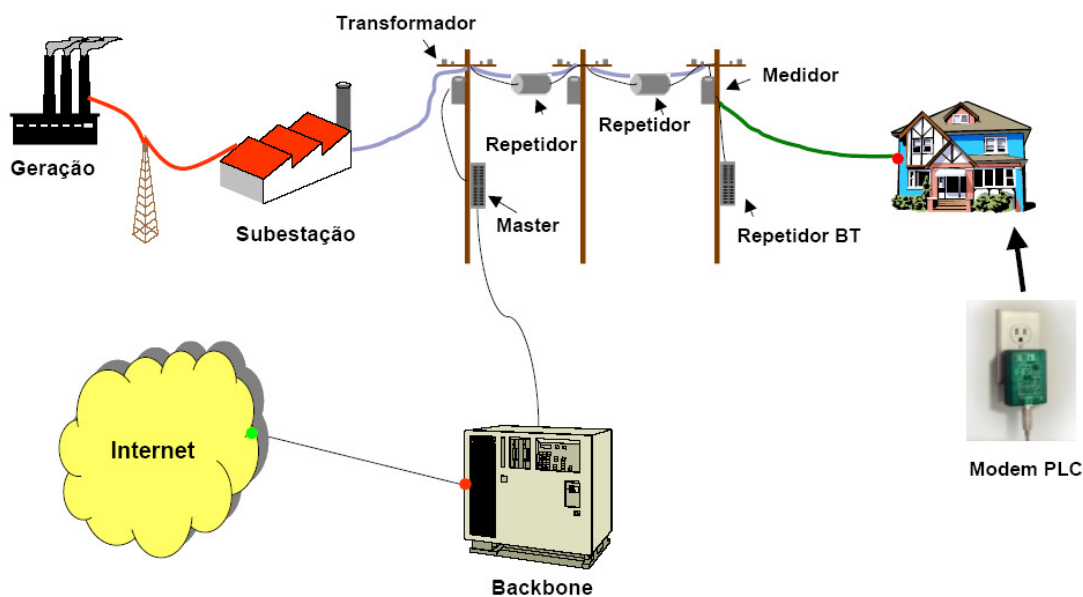


Figura 2.5- Rede de distribuição.

O desenvolvimento da rede PLC de média tensão é de elevada importância, na medida em que impacta positivamente em termos de economia e rapidez de implantação, permitindo as prestadoras e concessionárias de serviços interligarem suas redes de distribuição para conectar diferentes subestações de baixa tensão.

2.7.2 Interconexão às Redes de Provedores de Serviços (Internet, PSTN)

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

2.8 CONCLUSÕES

Este capítulo abordou a tecnologia PLC, iniciando-se com uma breve descrição da rede PLC. Em seguida foram apresentadas as vantagens, aplicações, os tipos de rede e os problemas envolvidos com a implantação dessa tecnologia para comunicação de dados. Além disso, foram citadas as principais regulamentações mundiais, concessionárias de energia brasileira e indústrias que estão trabalhando com a tecnologia PLC. Na sequência foi feito uma abordagem, detalhando os principais equipamentos necessários para a utilização da tecnologia PLC.

CAPÍTULO 3

CANAL DE TRANSMISSÃO

3.1 INTRODUÇÃO

O canal de transmissão representa o caminho a ser utilizado para a comunicação de dados entre dois equipamentos. O tipo de canal utilizado para a transmissão de sinais numa rede é responsável pelo índice de qualidade e eficiência da rede. A eficiência é medida com relação ao tamanho da largura de banda BW (*Bandwidth*). Na tecnologia PLC, o canal de transmissão utilizado é a rede elétrica. Na rede PLC, as principais deficiências encontradas no canal de transmissão são: a atenuação, a distorção, o atraso e os ruídos. Essas deficiências que ocorrem no canal de transmissão resultam num baixo desempenho da rede PLC.

Tendo em vista esses problemas, este capítulo fornece uma fundamentação teórica referente ao canal de transmissão. O capítulo inicia, apresentando a definição e as características básicas de um canal PLC. A seção 3 é dedicada ao estudo detalhado da transmissão de sinais e faixas de frequência dos sistemas de comunicação. Em seguida, são apresentados, de modo sucinto, os principais problemas num canal de transmissão com ênfase na abordagem das principais fontes de ruído que estão presentes nos principais eletrodomésticos de uma residência e que prejudica a transmissão de dados numa rede PLC.

O capítulo é finalizado com a apresentação dos conceitos básicos de uma linha de transmissão, dando sequência ao entendimento dos componentes e características da linha como meio para comunicação de dados não deixando de frisar com relação às perdas na linha.

3.2 O CANAL DE TRANSMISSÃO

O meio físico por onde o sinal é transmitido é denominado de canal de transmissão. Como exemplos de canais de transmissão pode-se citar: a atmosfera, através da qual podemos enviar ondas eletromagnéticas provenientes de sinais de rádio, televisão, o cabo de energia elétrica, o cabo coaxial, a fibra óptica, a água por meio do sonar e telefone submarino e o vácuo nas comunicações via satélite. As conexões físicas da rede podem ser do tipo ponto à ponto ou ponto multiponto e com relação à forma de utilização do meio para comunicação elas podem ser do tipo *simplex*, *half-duplex* ou *full-duplex*. A topologia da rede é um dos fatores que caracteriza a eficiência. As topologias de rede mais utilizadas são: anel, estrela e barramento.

Nas redes PLC de baixa tensão, o tráfego de dados entre a subestação e os pontos de acesso é, geralmente, realizado utilizando a topologia estrela. A rede de acesso conhecida como “*last mile*” é composta de um ou mais cabos interligado aos modems PLC dos usuários. A figura 3.1 exemplifica esta interligação [2].

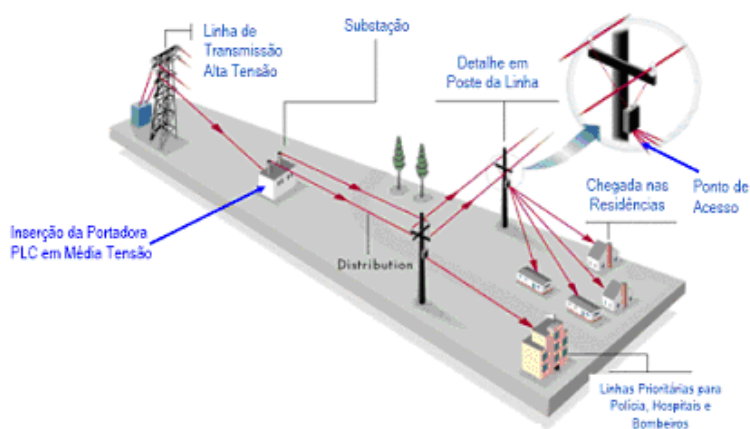


Figura 3.1- Interligação para a rede de acesso PLC.

Uma das características da rede PLC é o compartilhamento de um mesmo meio físico de comunicação por vários usuários e a presença de várias fontes de ruídos. Nesse caso, técnicas

de múltiplo acesso devem ser empregadas como: TDMA (*Time Division Multiple Access*), FDMA (*Frequency Division Multiple Access*) e CDMA (*Code Division Multiple Access*) [40].

Num canal PLC ocorrem desvanecimentos seletivos em frequência, alto índice de atenuações do sinal em função da distância e uma forte atuação de ruídos com nível de potência que são capazes de corromper muitos bits de uma transmissão de dados. O canal PLC para equipamentos comerciais atuais está apto a trabalhar com respostas em frequência na faixa aproximada entre 2 MHz e 35 MHz. Para aplicações do tipo “*last miles*” a banda passante do canal vai de 500 kHz até 10 MHz e nas redes Indoor (*intrabuilding*) a faixa de frequência de transmissão vai de 10 MHz até 35 MHz.

O modelo de um canal PLC básico é descrito na figura 3.2 [43]. Para modelar um canal de comunicação é muito importante conhecer as características do canal para a implantação de um modelo realístico de modo a possibilitar a análise de desempenho da rede PLC.

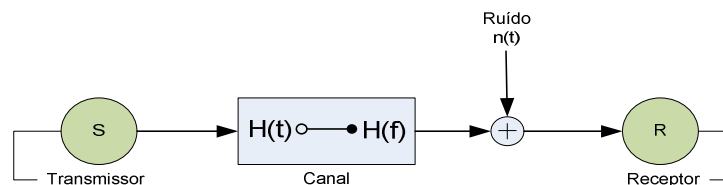


Figura 3.2 - Canal PLC.

Se a função de transferência do sistema é conhecida, a resposta do mesmo pode ser analisada para diferentes formas de excitação (entrada), com a finalidade de compreender a natureza, o comportamento do sistema e a descrição completa das características dinâmicas do sistema. Em especial, a função de transferência é uma ferramenta analítica útil para encontrar a resposta em frequência de um sistema especialmente quando são utilizados os conceitos de impedância e admitância relacionados à tensão e corrente. A implantação do modelo de canal mais citado em trabalhos e artigos é baseada em duas estratégias descritas a seguir [43,44]

1. Estratégia *Bottom up*: esta estratégia é baseada na teoria de linhas de transmissão, cujos parâmetros são utilizados para determinar a função de transferência do canal PLC [45, 46]. Os parâmetros dependem diretamente da impedância das cargas, da topologia da rede e das características dos cabos. Esta estratégia descreve de modo objetivo a relação entre o comportamento da rede e o modelo dos parâmetros que são obtidos por meio de análises da condição da rede. Sendo assim, torna-se mais fácil analisar as mudanças no canal devido a qualquer mudança na rede PLC. O método mais adequado para ser aplicado é descrito pelas matrizes de admitância e de impedância do circuito elétrico [47, 48, 49]. Esse tipo de modelagem requer o conhecimento detalhado dos componentes da rede elétrica para determinar os elementos das matrizes [50, 51, 52, 53, 54, 55].

Esta estratégia é bastante adequada para canais de redes indoor, posto que os mesmos, não apresentam elevado número de parâmetros.

2. Estratégia *Top down*: os métodos baseados nesta estratégia consideram os canais PLC como uma "caixa preta" e descrevem as características do canal em termos de sua função de transferência [43, 56, 57, 58, 59]. As análises dos sinais medidos são realizadas no domínio do tempo ou no domínio da frequência. Esse tipo de modelo é baseado nas influências dos efeitos físicos do canal PLC no sinal transmitido. A modelagem dos canais PLC em termos da função de transferência possibilita uma representação simples e independente da topologia e dos efeitos das cargas na rede elétrica [60]. Este tipo de estratégia torna possível o estabelecimento de modelos bem próximos do real para as topologias de rede bem definidas. Desse modo, o modelo estabelecido para uma dada topologia pode somente ser aplicado às topologias que apresentam bastante semelhança.

A dificuldade da utilização deste método é que ele depende muito da precisão das medidas, do ajuste de dados dos algoritmos utilizados e do número de parâmetros empregados. Esta estratégia é adotada para a modelagem de canais PLC *outdoor*, pois tais

canais são complexos e apresentam elevado número de parâmetros principalmente nas redes com grande número de ramificações ou derivações [61].

3.3 TRANSMISSÃO DE SINAIS

O sucesso na transmissão de dados numa rede depende principalmente das características do meio de transmissão.

Numa rede PLC, as deficiências na transmissão de dados com sinais analógicos ocasionam efeitos aleatórios que denigrem o sinal recebido podendo provocar a perda de muitos bits enviados resultando um baixo desempenho na rede [62, 63, 1]. No sistema de comunicação de dados os principais fatores que devem ser analisados são a taxa de transmissão de dados, a vazão na rede, a relação sinal/ruído, a taxa de BER (*Bit Error Rate*), o atraso, a atenuação do sinal e a largura de banda.

A largura de banda tem relação com a taxa de transmissão de dados, ou seja, quanto maior for o tamanho da largura de banda, maior será a possibilidade para a transmissão de dados no canal. A figura 3.3 apresenta o diagrama de um sistema básico de comunicação.

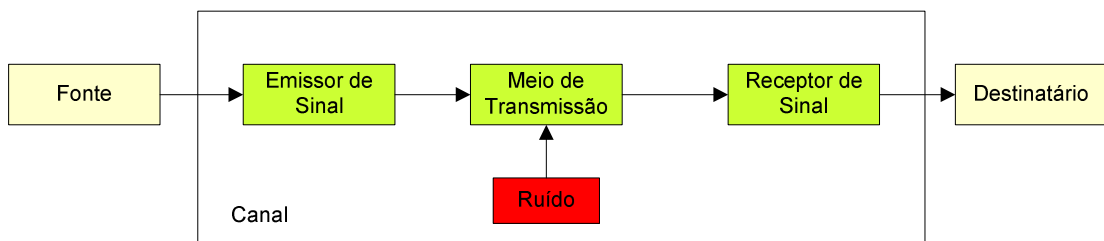


Figura 3.3 – Sistema de comunicação.

Cada tipo de transmissão como rádio, TV, PLC, microondas, possuem uma faixa de frequência específica de atuação na qual seus equipamentos são capazes de transmitir e a frequência designada é a mais propícia para o tipo e uso da transmissão.

3.3.1 Faixas de Frequência dos Sistemas de Comunicação

No espectro eletromagnético de frequências, a denominação de cada faixa como o tipo de transmissão utilizada está ilustrado na figura 3.4.

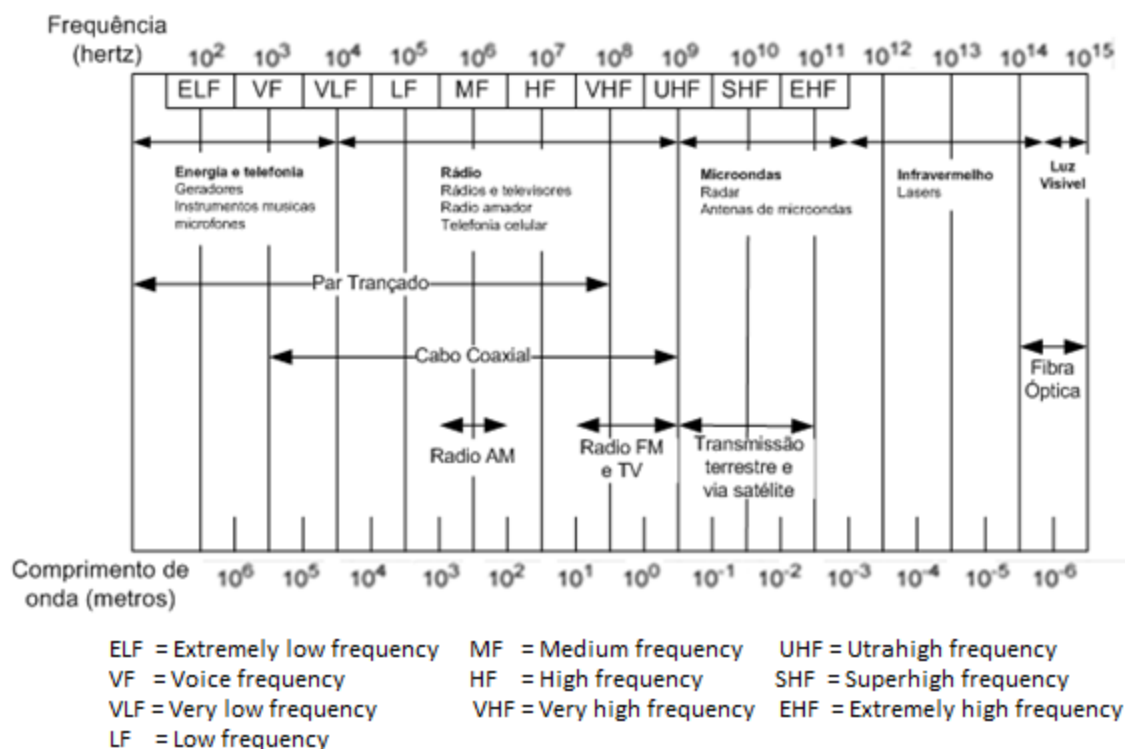


Figura 3.4 – Espectro de frequência para transmissão de sinais.

No Brasil a regulamentação da faixa de frequência é de responsabilidade da Agencia Nacional de Telecomunicações (ANATEL). A Resolução 527 da ANATEL, publicada no dia 13 de abril de 2009 [30], aprova o regulamento sobre condições de uso de radio frequências por sistemas de banda larga por meio de redes de energia elétrica.

Para a transmissão de dados via rede elétrica em banda larga, algumas literaturas definem a comunicação como BPL. Entretanto PLC é a denominação predominante e enquadra todo o tipo de transmissão de sinais pela rede elétrica. Esta regulamentação trata da utilização desta tecnologia com vários requisitos devidamente especificados para evitar que os sistemas BPL causem interferência prejudicial em outros serviços, como o de radioamador e o de radiodifusão que terão prioridade em caso de conflitos. Também os equipamentos que

compõem o sistema BPL devem possuir certificação expedida ou aceita pela ANATEL, de acordo com a regulamentação vigente, e atender às normas cabíveis, referentes ao sistema elétrico, expedidas pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica).

A comunicação a ser estabelecida pelo sistema BPL, confinada nas redes de energia elétrica, somente poderá ocorrer na faixa de radiofrequências de 1,705 MHz a 50 MHz. Os equipamentos que compõem o sistema BPL serão tratados como equipamentos de radiocomunicação de radiação restrita e devem operar em caráter secundário. A ANEEL aprovou a utilização das instalações de distribuição de energia elétrica para a transmissão dos serviços de Internet de banda larga PLC em 2009 [31].

A resolução 375 da ANEEL define a linha de distribuição de Baixa Tensão (BT) como uma linha de energia elétrica com tensão nominal igual ou inferior a 1 kV, situada entre os transformadores da rede de distribuição de energia elétrica e as instalações do usuário BPL, podendo ser aérea ou subterrânea [64].

A linha de distribuição de Média Tensão (MT) deve possuir tensão nominal maior que 1 kV e menor que 69 kV, situada entre as subestações e os transformadores da rede de distribuição de energia elétrica, podendo ser aérea ou subterrânea. As radiações indesejadas causadas por sistemas BPL, operando na rede de distribuição de baixa tensão, devem estar limitadas aos valores descritos na tabela 3.1 [30].

Tabela 3.1 - Limites de radiações indesejadas causadas por sistemas BPL de RBT.

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

As radiações indesejadas causadas por sistemas BPL, operando na rede de distribuição de média tensão, devem estar limitadas aos valores descritos na tabela 3.2 [30].

Tabela 3.2- Limites de radiações indesejadas causadas por sistemas BPL de RMT.

Faixa de frequências (MHz)	Intensidade de campo ($\mu\text{V/m}$)	Distância da medida (m)
1,705 – 30	30	30
30-50	90	10

A resolução 375 também descreve que para frequências abaixo de 30 MHz, quando da utilização de filtros para evitar interferência em uma faixa de radiofrequências específica, os filtros devem ser capazes de atenuar as radiações indesejadas dentro dessa faixa a um nível de, pelo menos, 20 dB abaixo dos limites especificados na regulamentação.

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

3.3.2 Principais Fontes de Problemas num Canal de Transmissão

As principais fontes que provocam deficiência numa transmissão de dados são os ruídos, a atenuação, ecos, desvanecimento e atraso. O estudo dos ruídos é abordado de forma detalhada na seção 3.4. A seguir, são apresentadas as demais fontes que afetam a rede PLC:

- Atenuação

A potência de um sinal cai com a distância, em qualquer meio físico. A atenuação do sinal ocorre principalmente devido a perdas ôhmicas. De modo geral, quanto maior for o valor da frequência transmitida maior será a ocorrência de perdas devido ao efeito pelicular (*skin*).

Uma alta atenuação do sinal é um fator limitador nas transmissões em alta velocidade e está relacionada tanto com a frequência do sinal quanto pela distância que o sinal é enviado da origem ao destino.

De fato, a atenuação sofrida pelo sinal ao longo da linha de transmissão pode variar de acordo com a topologia, conservação, características de transmissão da própria linha e quantidade das conexões. Todos esses fatores são importantes e podem afetar o desempenho de uma rede PLC, limitando consideravelmente a distância que os sinais podem atingir e, conseqüentemente, reduzir a eficiência da rede. Além disso, os transformadores da rede elétrica atenuam bastante os sinais transmitidos em alta frequência.

No caso da rede elétrica, a atenuação também é relacionada com as cargas e descontinuidades de impedância, que podem variar com o tempo e localização. A variação das cargas num canal de transmissão altera a atenuação do sinal da rede PLC.

Os principais causadores das descontinuidades são os interruptores e tomadas que mesmo não estando ligadas a nenhum equipamento, são pontos problemáticos por serem pontos de rede sem terminação. Os equipamentos eletrônicos ao serem ligados também fazem com que a carga total da rede aumente. Por causa do descasamento de impedância ocorre a reflexão do sinal transmitido no canal causando maior atenuação do sinal, uma vez que parte dele será perdida.

É possível destacar os seguintes aspectos que contribuem com o aumento da atenuação do sinal numa rede PLC:

- a) Modems PLC localizados em fases diferentes.
- b) Grandes distâncias entre o transmissor e o receptor.
- c) A variação da impedância nas cargas (espacial, temporal ou espectral).
- d) Transmissão em alta frequência.

O valor em módulo do ganho do sinal transmitido pela rede elétrica considerando uma frequência de entrada f_i , em função de V_i (tensão de entrada em RMS) e V_o (tensão de saída em RMS) é indicada pela equação 3.1.

$$A(f_i)_{dB} = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{V_o}{V_i} \right) \quad (3.1)$$

A atenuação é designada pela característica passa baixa da função de transferência. A figura 3.5 apresenta um diagrama de blocos de como realizar as medidas de tensão de entrada e de saída numa rede PLC.

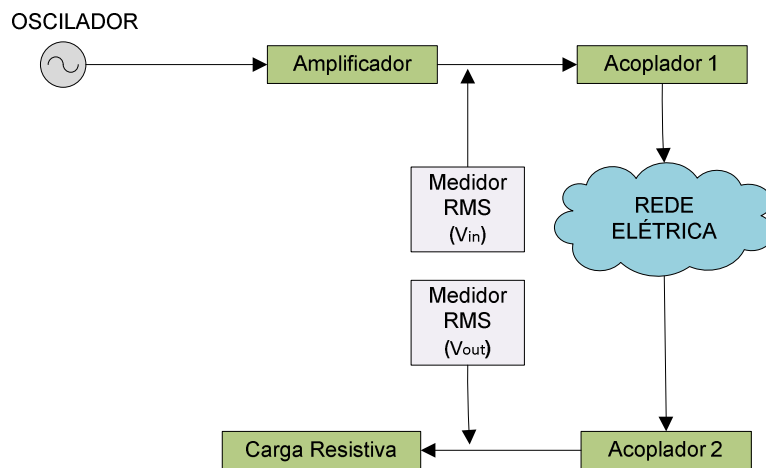


Figura 3.5 – Procedimento para medição das tensões na rede PLC.

3.4 ESTUDO DO RUÍDO

Ruídos são sinais estranhos e não desejados num meio de comunicação distorcendo os sinais de informações. O excesso de ruído pode impedir uma rede de funcionar ou reduzir drasticamente a sua velocidade. O ruído consiste numa alteração de alguma das características do sinal transmitido por efeito de outro sinal exterior ao sistema de transmissão. Estes sinais indesejados são de natureza aleatória, não sendo possível prever o seu valor num instante de tempo futuro [65].

Em muitos casos, o ruído é produzido pelos próprios equipamentos utilizados para implementar os sistemas de transmissão, tais como os amplificadores utilizados nos receptores e repetidores. Estes dispositivos produzem ruído de origem térmica e de origem quântica, o qual passa a ser processado juntamente com o sinal desejado. O ruído pode ser aditivo (soma-se ao sinal) ou multiplicativo (o sinal resultante é o produto do sinal transmitido pelo ruído).

O ruído no canal de transmissão varia fortemente em função da frequência, da carga, o período do dia e localização geográfica do transmissor até o receptor. O nível de potência do ruído varia de acordo com a distância entre a fonte de ruído e o receptor. Na maioria dos casos o ruído medido está abaixo de 40 dBm (W/kHz) [66]. Entretanto, se o receptor estiver muito distante do transmissor e bem próximo da fonte geradora de ruído, ocasionará grande perda de dados durante a transmissão. A medição do ruído pode ser realizada através de medições na rede de energia elétrica utilizando o analisador de espectro ou o osciloscópio [3]. A análise espectral e a medição no domínio do tempo do ruído impulsivo possibilitam realizar o cálculo da densidade espectral de potência (*power spectral density* - PSD) [9].

Utilizando-se de métodos estatísticos, as características do ruído como auto-correlação, Função Densidade de Probabilidade (PDF) e coeficientes de correlação podem ser analisados [66]. Para ruídos de fundo utiliza-se análise estatística com modelo no domínio da frequência. Para o ruído impulsivo, o modelo pode ser realizado no domínio do tempo e da frequência. No domínio da frequência, o modelo do erro impulsivo é realizado baseado apenas em medições.

No domínio do tempo, o modelo pode ser caracterizado por três parâmetros como amplitude do pulso, largura de pulso e intervalo de chegada. A figura 3.6 abaixo exemplifica as formas como podem ser medidos o sinal PLC e o ruído num canal de transmissão.

As principais fontes de ruídos são os motores com escovas, fontes chaveadas e reatores para iluminação. Desse modo no capítulo 5 será realizada a avaliação de desempenho da rede PLC com ruídos fornecidos por eletrodomésticos como televisão, ventilador, liquidificador, fonte chaveada, secador de cabelo, barbeador elétrico, batedeira, dimmer e lâmpada fluorescente compacta.

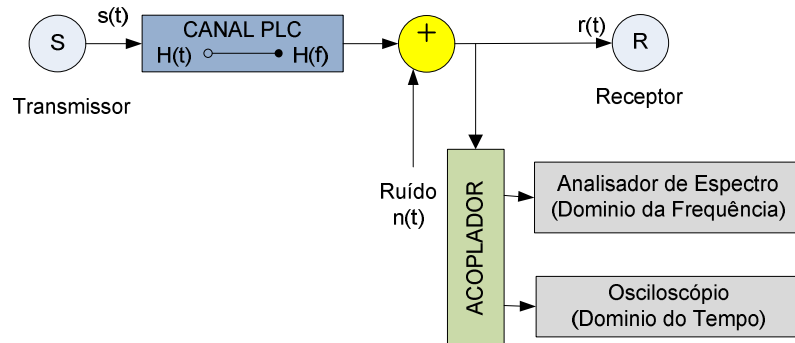


Figura 3.6 – Equipamentos para medição do sinal num canal PLC.

Os dimmers e as luzes fluorescentes criam ruído impulsivo relacionados ao ciclo de potência na faixa de 50 a 60 Hz. Outras fontes de ruído são as ondas de RF principalmente as ondas curtas e radioamadores. Estes equipamentos introduzem componentes de alta frequência na rede caracterizando as emissões conduzidas [67, 68].

Uma das formas de ruído mais utilizadas para modelar um sistema de transmissão é o Ruído Branco Aditivo Gaussiano (AWGN – *Additive White Gaussian Noise*). Ao contrário de outros canais de comunicação, o canal PLC não pode ser representado pela presença de ruído AWGN [25, 69, 70]. Desta forma, uma análise mais apurada das perturbações presentes no ambiente PLC é um pré-requisito inevitável para que sejam levantados modelos caracterizados pela presença de ruído de faixa estreita e diferentes formas de ruído impulsivo.

Em particular, este segundo componente responde pela significativa variação temporal do canal. Existem ao todo, cinco classes de ruído que caracterizam o canal PLC, são eles: ruído colorido de fundo, ruído de faixa estreita, ruído impulsivo periódico, ruído impulsivo

periódico – síncrono com a frequência da rede e ruído impulsivo assíncrono [71]. A figura 3.7 ilustra a configuração de um canal de comunicação PLC na presença de ruído [72, 73, 74].

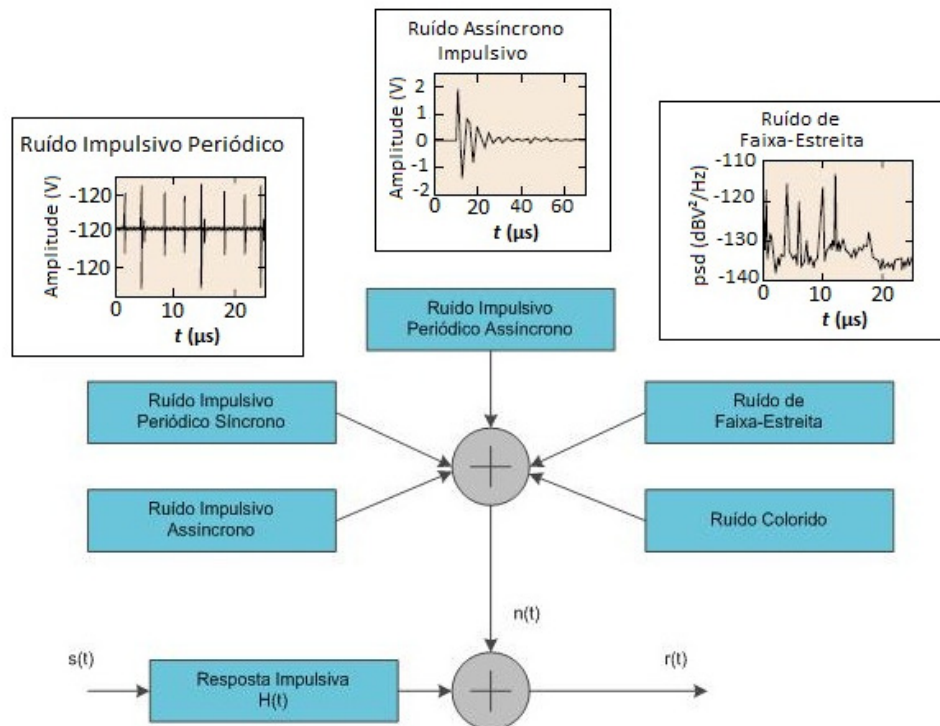


Figura 3.7 – Configuração de uma rede PLC na presença de ruído.

As principais fontes de ruídos presentes nos canais PLC para aplicações *last miles* são [34, 75, 76]:

1-Ruídos coloridos de fundo: tem uma potência espectral relativamente baixa e variante com a frequência. É normalmente formado pela somatória de diferentes fontes de ruídos com baixa potência [77]. A densidade espectral de potência desta componente de ruído é relativamente plana, decrescendo com o aumento da frequência. Embora apresente um comportamento estocástico, o estudo realizado mostra que a PSD do ruído colorido de fundo varia muito lentamente quando analisada a taxas de alguns kbps. Ela permanece muito próxima de um valor médio por um intervalo de vários segundos e até mesmo alguns minutos durante o dia, podendo permanecer neste estado estacionário por até algumas horas durante a noite.

Os principais tipos de ruídos coloridos de fundo são o ruído branco, rosa, azul, violeta, cinza, laranja, verde, preto e vermelho. Os motores universais são exemplos de aplicações que produzem ruído colorido de fundo na frequência acima de 50 kHz. Como exemplo de equipamentos pode-se citar os aspiradores de pó, batedeira, liquidificador, máquinas de costura, computador, lixadeira, furadeira elétrica e máquinas de serrar. Estes equipamentos apresentam uma medição de amplitude de tensão e frequência aleatória e provocam sinais de Radio Frequência (RF). Sua principal característica é a redução da PSD com o aumento da frequência. [69,70, 78]

2-Ruídos em banda estreita: são caracterizados por sinais senoidais modulados em amplitude e causados, principalmente, pela indução nos fios da rede elétrica dos sinais de rádio na faixa de 5 MHz até 22,5 MHz e pela peculiar perturbação gerada pelas harmônicas de maior ordem na frequência de deflexão horizontal dos aparelhos de TV (15,625 kHz PAL-Europa e 15,75 kHz NTSC-EUA). Na rede PLC de baixa e média tensão o ruído é ocasionado também pelas bandas de rádio de ondas curtas. Embora concentrado em faixas estreitas, este tipo de ruído apresenta uma alta PSD [79, 80, 81].

3-Ruídos impulsivos periódicos e assíncronos à frequência fundamental: têm taxa de repetição, na maioria dos casos, entre 50 kHz e 650 kHz, resultando num espectro com linhas discretas e espaçamento espectral de acordo com a taxa de repetição. É originado por transientes na rede. Este tipo de ruído apresenta curtas durações (10 μ s a 100 μ s) podendo alcançar picos de até 2 kV, ocorrendo de forma aleatória. Ocorre principalmente pelas fontes de alimentação chaveadas [66, 70, 78].

4-Ruídos impulsivos periódicos e sincronizados à frequência fundamental: estes impulsos têm uma taxa de repetição entre 50 Hz e 100 Hz e são sincronizados à frequência fundamental. São de curta duração (alguns micro segundos) e têm uma densidade espectral de

potência decrescente com a frequência causada por fontes chaveadas, máquinas fotocopadoras e os dimmers.

Isto ocorre devido à comutação de diodos retificadores e TRIACs operando de forma síncrona com a rede. Estes equipamentos geram forte ruído impulsivo na rede elétrica na faixa de duas vezes a frequência da rede e ocorre a cada $\frac{1}{2}$ ciclo AC [66, 70, 78].

5-Ruídos impulsivos assíncronos: é causado principalmente pelos transitórios característicos de chaveamento na rede elétrica e o seu tempo de duração é da ordem de alguns micro segundos até alguns milisegundos ($10 \mu\text{s} - 0,1 \mu\text{s}$), com tempo de ocorrência aleatória. É altamente variante no tempo e juntamente com o ruído anterior pode causar erros em alguns bits ou numa rajada de transmissão. Desse modo é o pior tipo de ruído numa rede PLC [78, 83].

Os efeitos do ruído no desempenho dos sistemas de transmissão podem ser minimizados através da utilização de filtros de alta ordem. O uso de filtros pode melhorar o SNR principalmente em ambiente SOHO (*Small Office/Home Office*), bloqueando a maior parte de incidência do ruído gerado internamente por toda a rede. Desta maneira, o nível de ruído na rede diminuirá, mas será mais dispendioso [83].

Dada a natureza aleatória do ruído, não é possível eliminá-lo completamente num sistema de transmissão. Desse modo, é necessário utilizar adaptadores PLC com a mais adequada técnica de multiplexação e modulação como é o OFDM. Além disso, o adaptador PLC deve possuir mecanismos sofisticados para detecção e correção de erros [71, 84, 85].

3.5 CONCEITOS DE LINHA DE TRANSMISSÃO

Uma linha de Transmissão (LT) é o elemento de circuito capaz de conduzir energia elétrica do transmissor a um terminal receptor. Em circuitos de telecomunicações, as linhas de baixa tensão têm sido usadas para transmissão de sinais na faixa de frequência das ondas de

rádio. A eficiência da rede depende das características físicas e elétricas (impedância e resistência) da linha de transmissão [86].

As frequências envolvidas podem ser tão baixas quanto 50 Hz ou 60 Hz para linhas de transporte de energia elétrica ou muito altas como dezenas de GHz para circuitos elétricos utilizados na recepção e amplificação de ondas de rádio [87, 88, 89].

Os componentes básicos de uma rede aérea para a transmissão ou distribuição de energia elétrica são: condutores, isoladores, estrutura de suporte, e pára-raios.

Os materiais condutores mais empregados são o cobre e o alumínio. As principais características necessárias para os condutores de uma linha de transmissão são:

- Alta condutibilidade elétrica. A resistência elétrica de um condutor pode ser calculada pela equação 3.2.

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (3.2)$$

- Natureza e pureza do material condutor, que determina a sua resistividade ρ [$\Omega \cdot m$].
- Seção transversal útil.
- Suportar alta temperatura.
- Baixo custo.
- Boa resistência mecânica.
- Baixo peso específico.
- Alta resistência à oxidação e corrosão.

O material condutor cobre possui as seguintes características:

- Baixa resistividade (0,0172 $\Omega mm^2/m$ do Cu recozido).
- Baixa oxidação – oxidação lenta perante elevada umidade em relação a diversos outros Metais e oxidação rápida a temperatura acima de 120 °C.

- Fácil deformação a frio e a quente.
- Alta resistência à corrosão.
- Permite fácil soldagem.
- Elevado peso específico.

Quando se utilizam as redes de distribuição de energia elétrica como meio de propagação de sinais em altas velocidades, para uso de diversos tipos de serviços de telecomunicações, torna-se importante ter em mente que esta rede representa uma estrutura eletromagneticamente aberta, insuficientemente protegida contra recepção e emissão de sinais interferentes em altas frequências [143]. Desse modo, a simples transmissão de um sinal PLC pode ser danosa a sistemas próximos, seja de maneira conduzida através de conexões em comum em uma rede que esteja alimentando diversos sistemas e equipamentos, ou de maneira radiada, interferindo em sistemas baseados em comunicação sem fio que possam estar operando próximo à rede PLC, ou ainda, ao próprio sistema PLC [91, 92].

Os parâmetros primários distribuídos da linha de transmissão podem ser considerados:

a) Longitudinais: em função das características que existem ao longo dos condutores que constituem a respectiva LT, que são:

- Resistência por unidade de comprimento que é responsável pelas perdas ohmicas na linha ($R = \text{ohm/ m}$).
- Indutância por unidade de comprimento considerado ($L = \text{H/m}$)

b) Transversais: são as características que existem entre condutores que constituem a LT, tais como:

- Capacitância por unidade de comprimento considerado ($C = \text{F/m}$).
- Condutância (ou Admitância) do dielétrico por unidade de comprimento que é responsável pelas perdas no isolamento (dielétrico) ($G = \text{mho/km}$ ou $G = \text{S/m}$).

Os parâmetros L, C, R e G são utilizados de modo uniformemente distribuídos ao longo da linha de transmissão. A linha é constituída por várias seções infinitesimais de tamanho Δz como mostrado na figuras 3.8a e 3.8b. A indutância e a resistência embora concentradas num dos condutores, representam na realidade a contribuição total dos dois condutores na seção infinitesimal Δz . Fazendo $\Delta z \rightarrow 0$, ocorre a aproximação da linha real de parâmetros distribuídos.

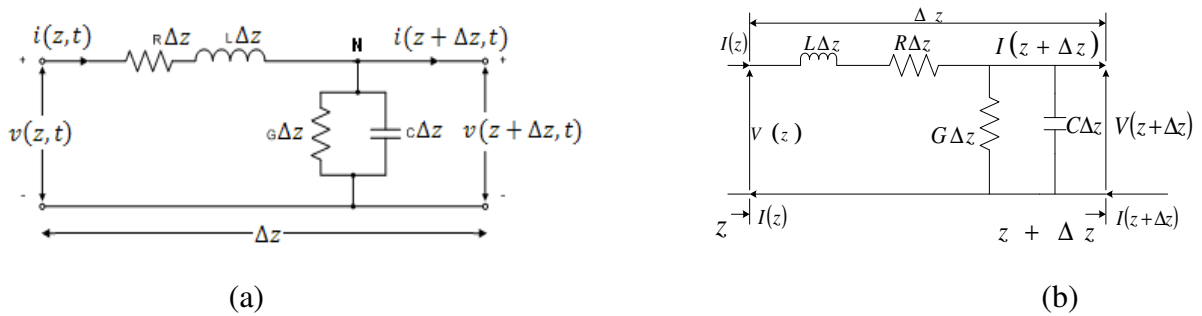


Figura 3.8 - Circuito equivalente da linha de transmissão: (a) no domínio do tempo (b) domínio da frequência.

Baseado no estudo das equações gerais da linha de transmissão [86, 93] a constante de propagação pode ser calculada pela equação 3.3 sendo α é a constante de atenuação [Néper/m] e β constante de fase [rad/m].

$$y = \alpha + j\beta = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} \quad [m^{-1}] \quad (3.3)$$

A impedância característica (Z_0) da linha é calculada mediante a aplicação da equação 3.4.

$$Z_0 = R_0 + jX_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (3.4)$$

Sendo:

a) R = a resistência por unidade de comprimento [Ω/m].

b) C = a capacitância por unidade de comprimento [F/m].

c) L = a indutância por unidade de comprimento [H/m].

d) G = a condutância por unidade de comprimento [S/m].

Com relação às perdas que ocorrem numa linha de transmissão, existem três tipos de perdas:

a) no condutor (cobre);

b) no dielétrico;

c) perdas por radiação ou indução.

- Perdas no condutor

Um tipo de perdas no condutor tem a ver com a potência. Numa linha de transmissão, a resistência do condutor nunca é zero. Sempre que uma corrente estiver passando no condutor haverá dissipação de energia na forma de calor. A perda por calor é conhecida como perda por potência. Outro tipo de perda no condutor é devido ao efeito *skin*.

Quando uma corrente DC passa por um condutor, o movimento dos elétrons na seção de corte é uniforme. No entanto, quando é usada uma corrente AC ocorre a auto-indução que retarda o movimento dos elétrons envolvidos. No centro do condutor o movimento dos elétrons é reduzido.

Conforme a frequência aumenta, a resistência ao movimento dos elétrons no centro do condutor aumenta, a corrente no centro do condutor fica cada vez menor e a maior parte do fluxo de elétrons se concentra na superfície do condutor.

Quando a frequência aplicada é muito alta, o movimento dos elétrons no centro do condutor é muito pequeno. Desse modo a seção de corte efetiva do condutor diminui à medida, em que a frequência aumenta. Já que a resistência é inversamente proporcional à seção de corte, a resistência aumenta com o aumento da frequência. Então as perdas de potência crescem com o aumento da frequência devido ao efeito *skin*.

- Perdas no dielétrico

As perdas no dielétrico resultam do aquecimento do material dielétrico entre os condutores. Parte da potência da fonte (transmissor) é utilizada no aquecimento do dielétrico e o calor produzido é dissipado para o ambiente. Quando não existe diferença de potencial (DDP) entre os condutores, os átomos no dielétrico descrevem órbitas circulares, aplicando-se uma DDP nos condutores a órbita deixa de ser circular e o excesso de carga negativa num condutor repele os elétrons no dielétrico, distorcendo assim as órbitas dos elétrons no dielétrico. A mudança de órbita (caminho) requer mais energia, introduzindo perdas por potência. A estrutura atômica da borracha é mais difícil de distorcer do que a de polietileno, fazendo estes últimos mais atraentes como dielétrico que produzem perda menor.

- *Perdas por radiação e indução*

Estas perdas são similares, no sentido que ambas são causadas por campos eletromagnéticos envolvendo os condutores. As perdas por indução ocorrem quando o campo eletromagnético na volta do condutor incide sobre um objeto metálico, induzindo uma corrente neste objeto. Em consequência disso, há uma dissipação de potência no objeto que caracteriza perdas para a linha de transmissão.

As perdas por radiação ocorrem porque algumas linhas de campo magnético não retornam ao condutor quando o ciclo de tensão se completa. Essas linhas de força se projetam no espaço como radiação, resultando em perda. Essa potência é gerada pelo transmissor, mas não chega até a carga.

As características secundárias de uma linha de transmissão são funções das suas características primárias, que são determinadas pela disposição geométrica dos condutores e pelas propriedades dos materiais utilizados. Os parâmetros secundários são importantes para elaboração de projetos e análise de conexões. Os principais parâmetros são:

- Impedância característica;

- Constante de propagação (atenuação e constante de fase);
- Velocidade de propagação.

3.6 CONCLUSÕES

Este capítulo teve por objetivo a realização de uma abordagem no estudo do canal de transmissão e dos tipos de ruído. Ressalta-se que através do canal de transmissão todas as tecnologias de comunicação buscam alcançar um serviço importante de transmissão de dados confiável e com alta velocidade entre dois equipamentos.

Num canal PLC ocorrem desvanecimentos seletivos, alto índice de atenuações do sinal em função da distância, frequência e uma forte atuação de ruídos. Desse modo é bastante desejável conseguir modelar um canal PLC para reproduzir um ambiente real por meio de simulações.

As principais fontes de problemas num canal de transmissão são atenuação, distorção, ecos, ruídos e atrasos que reduzem a eficiência do sistema de comunicação. Desse modo, o estudo do canal de transmissão é de caráter relevante para dar sequência aos capítulos subseqüentes que tem como objetivo apresentar as equações de linhas de transmissão e o modelo do canal PLC *indoor*.

Com relação à linha de transmissão o capítulo abordou os conceitos básicos baseado no estudo das equações gerais.

Por meio dos cálculos dos parâmetros básicos da LT como os elementos resistência, capacitância, indutância e condutância distribuídas torna-se possível modelar o canal PLC.

Os valores desses elementos dependem das características físicas como o tipo de material usado, o dielétrico, o comprimento da linha e outros. Com o modelo do canal é possível encontrar a função de transferência da rede de energia elétrica que independe da natureza e da magnitude de entrada. Com a função de transferência de um sistema conhecido

a resposta do mesmo pode ser analisada para diferentes formas de excitação (entrada), com a finalidade de compreender a natureza, o comportamento do sistema e a descrição completa das características dinâmicas do sistema.

É em especial, a função de transferência, assunto a ser abordado no capítulo seguinte, e que vem sendo considerada uma ferramenta analítica útil para encontrar resposta em frequência de um sistema quando utilizados na contextualização os conceitos de impedância e admitância, relacionados à tensão e à corrente.

CAPÍTULO 4

CANAL PLC

4.1 INTRODUÇÃO

Um modelo de canal amplamente aceito por pesquisadores da tecnologia PLC ainda não foi apresentado. Isso decorre do fato de que os modelos baseados em resultados experimentais obtidos de uma topologia específica e sobre certas condições, falham quando aplicadas numa situação de comportamento geral de funcionamento da rede PLC.

O canal PLC difere, consideravelmente, do meio físico convencional como par trançado, cabo coaxial e fibra óptica pela topologia, estrutura e propriedades físicas. Isso ocorre porque a rede elétrica é um ambiente muito hostil para a transmissão de dados. As causas mais comuns da redução do desempenho nas redes PLC baseiam-se na variação da impedância, do sinal de ruído devido aos eletrodomésticos conectados nas tomadas e às ramificações nos cabos. Mesmo em redes homogêneas construídas usando um único tipo de cabo, o sinal transmitido sofre reflexões em todos os pontos onde não há casamento de impedância. Isso é causado pelas diferenças do valor da impedância característica, das impedâncias terminais entre os cabos e do mesmo cabo e pelas conexões paralelas do número de cabos no ponto de junção da rede. Como resultado, parte do sinal que chega ao receptor é refletida para a origem [55].

Este capítulo tem por objetivo descrever as características passa baixa dos cabos e do desvanecimento seletivo da frequência. Esta característica é causada pelas perdas do dielétrico no isolamento do cabo o que provoca uma limitação da máxima distância possível entre dois pontos sem a necessidade da utilização de repetidores. Além disso, essa característica também limita a máxima frequência que pode ser utilizada. Desse modo frequências menores que 1

MHz são utilizadas para as redes de acesso (*outdoor*) e a faixa de frequência entre 1 MHz até 30 MHz ou mais são utilizadas para as redes *indoor*.

Outro objetivo deste capítulo é apresentar o estudo realizado sobre a propagação do sinal em múltiplos percursos, o modelo do canal no domínio do tempo e da frequência. Em sequência são desenvolvidos os modelos representativos de canais PLC que, por meio de simulações realizadas no MATLAB, possibilitam realizar avaliações para diferentes topologias, estudar seus impactos no desempenho da rede PLC e investigar a característica do canal PLC para casas populares.

4.2 CANAL PLC

Conforme foi abordado nos capítulos 4 e 5, o modelo básico do canal PLC pode ser representado baseado nos parâmetros primários da linha de transmissão e nas suas equações gerais. A figura 4.1 ilustra o modelo básico de comunicação entre o transmissor e o receptor [69,86].

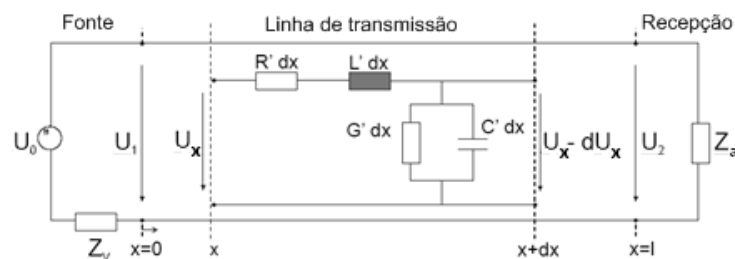


Figura 4.1 - Propagação do sinal sobre uma linha de transmissão.

Analisando o circuito da figura 4.1 e baseando-se no que foi apresentado anteriormente referente à teoria básica de linhas de transmissão, verifica-se pelas equações 4.1 e 4.2 onde foi utilizada a lei das malhas, o procedimento para os cálculos da tensão (U) e corrente (I) no canal de transmissão representado pelos elementos R' , L' , G' e C' .

$$U(x) = U_2 \cosh(yx) + I_2 Z_2 \sinh(yx) \quad (4.1)$$

$$I(x) = I_2 \cosh(yx) + \frac{U_2}{Z_2} \sinh yx \quad (4.2)$$

Os parâmetros que descrevem a linha de transmissão, utilizados para o estudo do canal PLC são a impedância característica (Z_0) e a constante de propagação (γ) conforme as equações 4.3 e 4.4.

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R' + j\omega L'}{G' + j\omega C'}} \quad (4.3)$$

$$\gamma(x) = \sqrt{(R' + j\omega L')(G' + j\omega C')} = \alpha + j\beta \quad (4.4)$$

Considerando apenas o sinal propagando da origem ao destino, a função de transferência de uma linha com comprimento igual a l pode ser definida conforme mostrado na equação 4.5 e é composta da soma de senos e cossenos complexos na qual tem a frequência dependente do deslocamento de fase.

$$H(f) = \frac{U(x=1)}{U(x=0)} = e^{-\gamma \cdot 1} = e^{-\alpha(f) \cdot 1} e^{-j\beta(f) \cdot 1} \quad (4.5)$$

Num cabo de energia, grande parte do campo elétrico está concentrada entre os condutores. Os parâmetros do cabo podem ser estimados pelas dimensões geométricas e pelas propriedades dos materiais. A indutância e a capacitância em unidade por comprimento podem ser expressas pelas equações 4.6 e 4.7.

$$L' = \mu_0 \mu_\gamma \frac{a}{r} \quad (4.6)$$

$$C' = 2\varepsilon_0 \varepsilon_\gamma \frac{a}{r} \quad (4.7)$$

Considerando as frequências na faixa de MHz, a resistência por unidade de comprimento é dominada pelo efeito *Skin* e pode ser expressa de modo aproximado conforme mostrado na equação 4.8.

$$R' = \sqrt{\frac{\pi \mu_0}{kr^2}} f \rightarrow R' \sim \sqrt{f} \quad (4.8)$$

A condutância é afetada fortemente pelo fator de dissipação do material dielétrico que de modo geral é o PVC. O valor da condutância por unidade de comprimento é dada pela equação 4.9.

$$G' = 2\pi f C' \tan \delta \rightarrow G' \sim f \quad (4.9)$$

Utilizando a análise das propriedades do material e da geometria nas equações acima (4.6, 4.7, 4.8 e 4.9) resulta para a faixa de frequência de interesse na rede PLC que $R' \ll \omega L'$ e $G' \ll \omega C'$. Desse modo a impedância característica Z_0 e a constante de propagação γ podem ser determinadas utilizando as equações 4.10 e 4.11.

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L'}{C'}} \quad (4.10)$$

$$\gamma = \underbrace{\frac{1}{2} \frac{R'}{Z_L} + \frac{1}{2} G' Z_L}_{Re(\gamma)=\alpha} + j \underbrace{\omega \sqrt{L' C'}}_{Im(\gamma)=\beta} \quad (4.11)$$

Resumindo as características dos parâmetros dos cabos, nas constantes K_1 e K_2 levam ao resultado dado pela equação 4.12 onde K_1 , K_2 e K_3 representam os parâmetros geométricos e do material.

$$\gamma = \underbrace{k_1\sqrt{f} + k_2f}_{Re(\gamma)=\alpha} + \underbrace{jk_3f}_{Im(\gamma)=\beta} \quad (4.12)$$

A propagação do sinal em redes mais complexas que possuem mais ramificações pode ser dividida em percursos apropriados utilizando o mesmo mecanismo da propagação do sinal de um canal PLC com apenas uma ramificação [55,94,95]. Considerando a perda nos cabos, a resposta em frequência $H(f)$ da linha de transmissão de comprimento igual a d_i pode ser expressa utilizando a constante de propagação (γ) representada na equação 4.7.

Dependendo dos parâmetros primários do cabo (R,G,C,L) e da tensão V_d numa distância igual a l tem-se a função de transferência dada pela equação 4.13.

$$H(f) = e^{-\alpha(f)l} e^{-j\beta(f)l} \quad (4.13)$$

Os parâmetros C e L dos cabos podem ser estimados por meio de dimensões geométricas e pelas propriedades dos materiais. Na frequência de MHz, a resistência por unidade de comprimento é dominada pelo efeito *Skin* e desse modo é proporcional a \sqrt{f} . A condutância por unidade de comprimento G é influenciada principalmente pelo fator de dissipação do material dielétrico (geralmente o PVC) e desse modo é proporcional a frequência. Pelas propriedades dos materiais $R \ll \omega L$ e $G \ll \omega C$ na faixa de frequência de interesse. Portanto, os cabos elétricos podem ser considerados como um meio de transmissão muito ruim considerando a característica de impedância Z_0 . A constante de propagação γ pode ser determinada usando uma expressão simplificada conforme foi vista na equação 4.12.

A parte real da constante de propagação e a constante de atenuação α , aumentam com a elevação da frequência. A relação entre α e f de um cabo específico pode ser proporcional a raiz quadrada de f , proporcional a f ou proporcional a ambas mesmo com a presença de k_1 ou k_2 . A parte real da constante de propagação da perda nos cabos após muitas medidas de respostas de frequência pode ser descrita como apresentado na equação 4.14 [68, 44, 96].

$$\alpha(f) = a_0 + a_1 f^k \quad (4.14)$$

Com a adequada seleção dos parâmetros a_0 , a_1 e k a atenuação do cabo da rede elétrica pode ser calculada conforme a equação 4.15:

$$A(f, d) = e^{-\alpha(f)d} = e^{-(a_0 + a_1 f^k)d} \quad (4.15)$$

4.3 PROPAGAÇÃO DO SINAL EM MÚLTIPLOS PERCURSOS

A rede de distribuição de energia elétrica difere consideravelmente em topologia, estrutura e propriedades físicas se comparada a outros meios convencionais utilizados para a transmissão de sinais de comunicação, tais como o par trançado, o cabo coaxial ou a fibra óptica. Em oposição às redes telefônicas, a rede de acesso de uma linha de transmissão não consiste de uma conexão ponto a ponto entre a subestação e o cliente. Um enlace de acesso típico deste tipo consiste de um cabo de distribuição ou uma série de cabos distribuidores e as ramificações das conexões destes cabos até as residências, todos com impedância característica real Z_0 . Os cabos terminam na caixa de distribuição de entrada das residências, seguido por uma fiação interna, na qual pode ser modelada do ponto de vista da rede de acesso por uma impedância de terminação complexa $Z_{TC}(f)$.

A impedância dos pontos de conexão domésticos é normalmente menor que essa impedância $Z_{TC}(f)$ devido ao número de ramificações dentro das residências. Além das características de impedância da rede, o caminho percorrido pelo sinal também deve ser analisado com atenção. Inúmeras reflexões são causadas pelas conexões internas devido ao não casamento das impedâncias dos seus componentes constituintes. Como consequência, a propagação do sinal não pode ser descrita considerando apenas o caminho direto entre o transmissor e o receptor. Os caminhos adicionais formados por componentes de múltiplas reflexões do sinal devem ser considerados. Como resultado, o canal PLC apresenta um comportamento com múltiplos percursos e desvanecimento seletivo em frequência [69, 60].

A modelagem do canal PLC como um ambiente de múltiplos caminhos é necessário para determinar os caminhos da transmissão que contribuem para o comportamento da variação do sinal no tempo e na frequência e para calcular os parâmetros que definem as propriedades do meio de comunicação que determinam a taxa de dados que podem ser transmitidos no canal. As variações de cargas conectadas nas tomadas elétricas e a presença de ramificações nos cabos elétricos resultam em impedâncias características distintas ao longo do canal PLC causando a propagação do sinal em múltiplos percursos numa rede PLC *indoor*.

Mesmo numa rede homogênea construída usando um único tipo de cabo de um mesmo fabricante, o sinal que trafega pelo canal sofre uma reflexão em todos os pontos onde não existe um casamento de impedância causada pela diferença entre as impedâncias características dos cabos, das tomadas de energia ou mesmo pelas conexões paralelas dos números de cabos conectados ao ponto de junção da rede. Como resultado, parte do sinal que chega ao receptor é refletida na direção da origem. Então para um cabo com impedância característica Z_0 , o coeficiente de reflexão ρ em certas discontinuidades onde a impedância Z_1 é conectada, expressa a amplitude e a taxa da fase do sinal de propagação refletido com relação ao sinal que chega ao receptor. O valor de ρ pode ser calculado aplicando a equação

número 4.16. O coeficiente de transmissão (τ) expressa à propagação do sinal e pode ser calculado usando a equação número 4.17.

$$\rho = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (4.16)$$

$$\tau = 1 + \rho = \frac{2Z_L}{Z_L + Z_0} \quad (4.17)$$

Considerando teoricamente um número infinito de reflexões no canal de transmissão, pode-se deduzir que o sinal recebido é composto de infinitas réplicas distorcidas do sinal transmitido inicialmente que são os componentes de múltiplos caminhos e diferem pela amplitude e fase [97]. Cada componente representa o resultado da propagação do sinal por meio de um caminho particular, desde que a amplitude e a fase dependam do comprimento do caminho e dos coeficientes de reflexão e transmissão inclusos no caminho. De modo mais prático, como a distância do caminho entre o transmissor e o receptor aumenta mais reflexões ocorre, o nível de atenuação aumenta e desse modo o desempenho da rede PLC é reduzida. Como resultado, os efeitos dos múltiplos caminhos podem ser ajustados para um número finito de caminhos significantes.

Desse modo, é possível realizar de modo confiável cálculos analíticos dos efeitos dos múltiplos caminhos numa rede PLC indoor, considerando uma baixa complexidade e sem a existência de laços na rede.

Por esta consideração, a resposta entre qualquer par de dispositivos de comunicação na rede pode ser determinado usando a informação sobre as propriedades de transmissão dos cabos, a topologia da rede e as impedâncias das cargas conectadas nas tomadas de energia

elétrica. Para a transmissão de dados sobre qualquer meio físico é necessário determinar as características do canal com ênfase na resposta de frequência e na influencia dos ruídos.

O modelo apresentado por Zimmermann e Dostert [68] considera duas características predominantes: o multipercurso e as perdas no condutor. No cabo de energia elétrica a propagação dos sinais entre o emissor e o receptor faz-se por vários percursos.

Este modelo leva em conta duas características predominantes: o efeito dos múltiplos percursos e as perdas nos condutores. O cálculo da função de transferência é baseado numa linha de transmissão de alguns metros com os terminais casados e uma derivação em aberto com poucos metros de comprimento do ponto transmissor. O modelo considera apenas o caminho direto e as primeiras reflexões da derivação.

As componentes do sinal dos caminhos devem ser somadas devido à superposição e a função de transferência do ponto transmissor até o receptor pode ser apresentada pela equação 4.18.

$$H(f) = \sum_{i=1}^N g_i A(f, d_i) e^{j2\pi f \tau_i} \quad (4.18)$$

O fator de atenuação $A(f,d)$ é um número complexo e depende de forma exponencialmente decrescente do comprimento do percurso d_i e da frequência f . g_i é um fator complexo

A resposta impulsiva $h(t)$ da equação 4.19 pode ser escrita como a soma de N pulsos Dirac na qual são multiplicados por g_i e sofrem um atraso de transmissão dado por τ_i .

$$h(t) = \sum_{i=1}^N |g_i| e^{j\varphi_i} \delta(t - \tau_i) \quad (4.19)$$

Aplicando a transformada de Fourier na resposta impulsiva de $h(t)$ obtém-se a função de transferência complexa $H(f)$ mais prática e universalmente conhecida dada pela equação 4.20 [98].

$$H(f) = \sum_{i=1}^N g_i \underbrace{e^{-(a_0+a_1 f^k)d_i}}_{\text{Termo de atenuação}} \underbrace{e^{-j2\pi f \frac{d_i}{v_p}}}_{\text{Atraso}} \quad (4.20)$$

Sendo que:

i é o número do caminho entre 1 e N ;

N é o número total de caminhos que de modo geral é de 5 a 50 [69];

a_0 e a_1 são os parâmetros de atenuação;

k é o fator de atenuação que de modo geral vai de 0,2 a 1 [60];

g_i é o fator de ponderação apresentado em forma complexa e representa o produto entre a transmissão e a reflexão do sinal ao longo do caminho i ;

d_i é a distância do caminho i ;

τ_i é o atraso do caminho i .

O termo de atenuação da função de transferência é dado pela equação 4.21. O aumento da atenuação com o aumento da frequência e do comprimento do cabo representa exatamente a característica passa-baixa da função de transferência. Desse modo o comprimento do enlace torna-se um fator preponderante não devendo ultrapassar 300 m. Para enlaces maiores é desejável aplicar repetidores de sinal.

$$e^{-(a_0+a_1 f^k)d_i} \quad (4.21)$$

O termo de atraso do i -ésimo caminho é dado pela equação 4.22.

$$e^{-j2\pi f \frac{d_i}{v_p}} \quad (4.22)$$

A equação 4.20 descreve a função de transferência do modelo básico de um canal PLC. Utilizando este modelo todos os efeitos substanciais da característica de transferência do canal PLC na faixa de frequência de 500 kHz até 30 MHz podem ser modelados utilizando poucos parâmetros.[99]

Quanto maior for o número de caminhos N, mais preciso é a resposta do modelo do canal. Esta equação representa a propagação do sinal sobre a rede PLC pela parcela do atraso e pelas características passa baixa onde a atenuação do sinal cresce consideravelmente com comprimento maiores do canal ou com o aumento da frequência. A figura 4.2 ilustra uma estrutura básica de um modelo de canal considerando vários atrasos de propagação ocasionados pelo modelo aproximado da função de transferência baseado no eco, causado por sucessivas reflexões na propagação dos sinais e pelas discontinuidades da impedância ao longo da linha de transmissão [68,100,101]. Embora a estrutura do termo de atenuação da equação 4.20 seja obtida de efeitos físicos, os parâmetros a_0 , a_1 e k não podem ser facilmente encontrados pelos parâmetros conhecidos dos cabos elétricos. Então estas três constantes são obtidas das medidas realizadas na função de transferência.

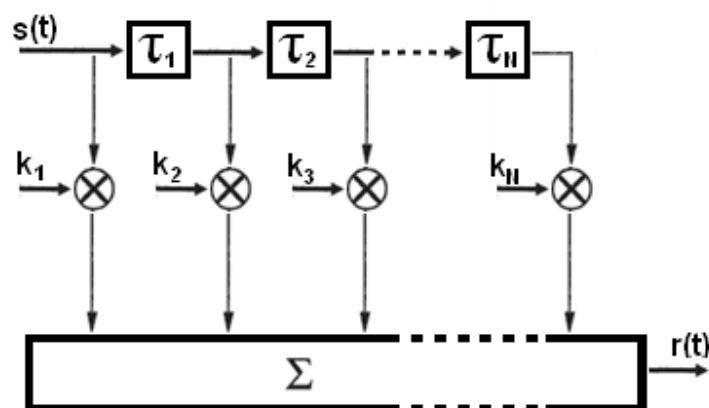


Figura 4.2 - Estrutura básica de um modelo de canal PLC.

Os parâmetros para o modelo de múltiplos caminhos podem ser obtidos de medidas da função de transferência complexa do canal [69, 43, 102, 103]. Os parâmetros de atenuação a_0 (offset da atenuação), a_1 (aumento da atenuação), k (expoente da atenuação) podem ser obtidos pelo valor da magnitude da resposta em frequência. Os parâmetros do caminho d_i e g_i são obtidos mediante a aplicação da resposta impulsiva que fornece informações sobre o tempo de atraso de cada caminho na qual é proporcional a d_i . O fator de peso g_i pode ser obtido da amplitude de cada impulso.

A resposta impulsiva quando $k = 1$ pode ser obtida pela aproximação fornecida pela equação 4.23. Para um determinado caminho i pode-se obter a resposta impulsiva (h_i) continua no tempo de um único impulso.

$$h_i = g_i \frac{e^{-a_0 d_i}}{2 \pi^2} \cdot \frac{a_1 d_i}{\left(\frac{a_1 d_i}{2 \pi}\right)^2 + \left(t - \frac{d_i}{v_p}\right)^2} \quad (4.23)$$

A resposta impulsiva $h(t)$ é o somatório de todos os caminhos, ou seja, é o somatório de todos os impulsos h_i . A equação 4.24 apresenta o modo para calcular um impulso de um determinado canal.

$$\int_{-\infty}^{+\infty} h_i(t) dt = g_i \cdot e^{-a_0 d_i} \quad (4.24)$$

Com a equação 4.24 para o tempo calculado pela relação entre d_i com v_p , o valor absoluto máximo da resposta impulsiva é calculado pela equação 4.25.

$$h_{i,max} = h_i \left(t = \frac{d_i}{v_p} \right) = \frac{2 g_i d_i e^{-a_0 d_i}}{a_1 d_i^2} \quad (4.25)$$

O fator de peso g_i determina a altura do impulso. Desse modo a amplitude do impulso é diretamente proporcional ao valor de g_i . A influência do parâmetro g_i é exclusiva para um determinado caminho enquanto a_0 influencia todos os caminhos ao mesmo tempo.

A função de transferência demonstra duas propriedades fundamentais do canal PLC que são o desvanecimento seletivo na frequência e a atenuação dependente da frequência e da distância. As altas atenuações encontradas nas frequências maiores não podem ser compensadas com o aumento da energia do sinal por razões de compatibilidade eletromagnética.

Baseado nos fundamentos teóricos de PLC e linhas de transmissão existem basicamente duas aproximações principais para modelar a função de transferência de um canal PLC: domínio do tempo e domínio da frequência.

4.3.1 Modelo Determinístico Baseado no Domínio do Tempo: Modelo de Múltiplos Caminhos

Na aproximação no domínio do tempo, o canal PLC é descrito como se fosse predominantemente afetado por efeitos de múltiplos caminhos [104,105].

A função de transferência da equação 7.35 oferece como vantagem a possibilidade de avaliar o canal PLC sem a necessidade de ter um conhecimento detalhado da topologia do enlace da rede que muito raramente está disponível em situações práticas. Entretanto esta metodologia é baseada em parâmetros que podem ser estimados apenas depois de realizar as medidas da função de transferência do canal.

Neste modelo não podem ser incluídos explicitamente os valores das impedâncias na conexão física por falta de conhecimento dos valores, os efeitos ressonantes devido às capacitâncias parasitas, as indutâncias características dos cabos e o método empregado de aterramento.

4.3.2 Modelo no Domínio da Frequência

O modelo do canal PLC no domínio da frequência é baseado na teoria de linhas de transmissão. Se for possível ter conhecimento detalhado do canal da rede PLC, como a topologia, tipos de carga, cabos utilizados entre outros, então é possível realizar uma aproximação determinística e encontrar uma expressão bastante aproximada para a função de transferência do canal PLC. A principal vantagem do modelo no domínio da frequência é que a complexidade computacional é independente do tipo da topologia. De fato, o modelo no domínio da frequência contém uma combinação de todos os sinais refletidos por descontinuidades (múltiplos caminhos) sobre a faixa de frequência medida considerando que o modelo no domínio do tempo pode ser necessário para gerar todos os caminhos individualmente.

A maior desvantagem da aproximação no domínio da frequência baseada na teoria de linhas de transmissão é que tudo sobre o enlace da rede PLC deve ser conhecido antecipadamente: topologia, os tipos de cabos e suas características e as impedâncias dos pontos terminais em cada ramificação.

A falta de conhecimento do valor preciso de cada parâmetro pode prejudicar a precisão do modelo do canal se eles constituem parte do caminho dominante numa dada frequência. De modo geral é quase impossível ter o conhecimento detalhado da rede. O modelo do canal PLC indoor mais adequado é realizado pelo método das matrizes.

4.3.3. Elementos da Rede

De modo a obter um parâmetro de comparação para entender os níveis aceitáveis para a transmissão de um sinal PLC, as tabelas 4.1, 4.2 e 4.3 apresentam os valores de largura de

banda, relação sinal/ruído e atrasos de propagação para as diversas tecnologias de comunicação sem levar em consideração o tipo de modulação empregado [68,106,107].

A tabela 4.1 apresenta a avaliação da transmissão do sinal para as diversas faixas do sinal.

Tabela 4.1 – Avaliação da transmissão para as diversas faixas do sinal.

Faixas do sinal	Avaliação da transmissão
8 dB-13 dB	transmissão regular
14 dB – 22 dB	transmissão boa
23 dB – 28 dB	transmissão muito boa
29 dB – 30 dB	transmissão excelente
31 dB – 35 dB	transmissão rara de ocorrer

Tabela 4.2 – Relação sinal/ruído para as principais tecnologias de comunicação.

Tecnologia	Relação Sinal/Ruído
Celular	18 dB
Telefonia	30 dB
fibra óptica	20 dB
Satélite	40 dB
par trançado	15 dB
PLC	40 dB
Wireless LAN	37 dB
ADSL	30 dB
TV	45 a 55 dB

A tabela 4.3 apresenta o resultado do atraso de propagação para os principais meios de transmissão.

Tabela 4.3 – Atraso de propagação em função do meio de transmissão.

Meio de transmissão	Atraso de propagação
espaço livre	3,3 μ s/Km
par de cobre	5 μ s/Km
cabo coaxial	4 μ s/Km
fibra óptica	5 μ s/Km

Para a situação onde obtém uma margem SNR de 6 dB ou menos, a transmissão do sinal é muito ruim com muita dificuldade de sincronismo e altas perdas de pacotes na transmissão de dados. Utilizando a equação 4.20 foram realizado simulações em MATLAB de modo a

avaliar o efeito de cada parâmetro em função do aumento da frequência. Os valores padrões utilizados foram $k = 1$, $g_i = 1$, $a_0 = 0$, $d_i = 100$ m, $v_p = 1,5 \times 10^8$ m/s e $a_1 = 10^{-9}$ s/m[99].

No primeiro caso foi realizada a análise considerando a_0 , k e d_i com valores fixos. Desse modo a figura 4.3 representa a contribuição de a_1 em função da frequência. Quanto maior for o valor de a_1 , maior é a atenuação do sinal no canal PLC. Pequenas alterações no valor de a_1 influênciam consideravelmente o termo de atenuação da função de transferência.

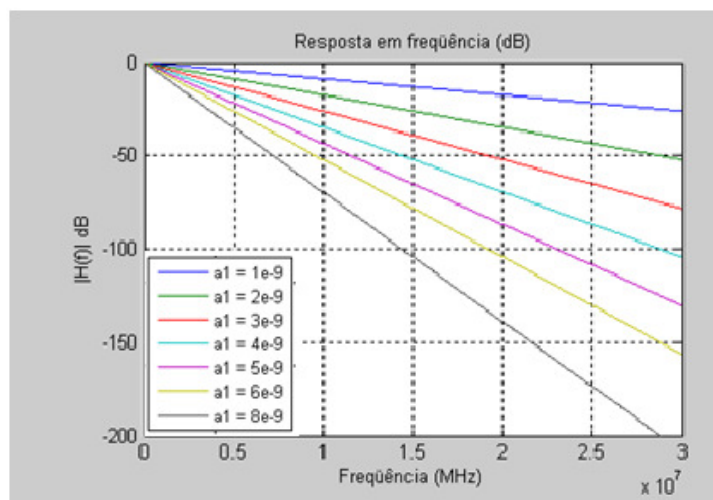


Figura 4.3 - Análise da atenuação no canal PLC em função da variação de a_1 .

Para a frequência de 30 MHz enquanto para $a_1 = 1 \times 10^{-9}$ tem-se o termo de atenuação em torno de -30 dB para $a_1 = 2 \times 10^{-9}$ na mesma frequência, o termo de atenuação fica próximo de -50 dB. Para valores de a_1 superiores a 2×10^{-9} a transmissão de dados pela rede PLC fica inviável. Para a situação onde foram mantidos fixos os valores de a_1 , k e d_i , analisou o comportamento de a_0 em função da frequência. Observou-se que este parâmetro de atenuação não apresenta influência relevante para o termo de atenuação. Além disso, ele somente começa a apresentar alterações na atenuação do sinal para valores muito acima das condições reais conforme pode ser visto pelo gráfico da figura 4.4.

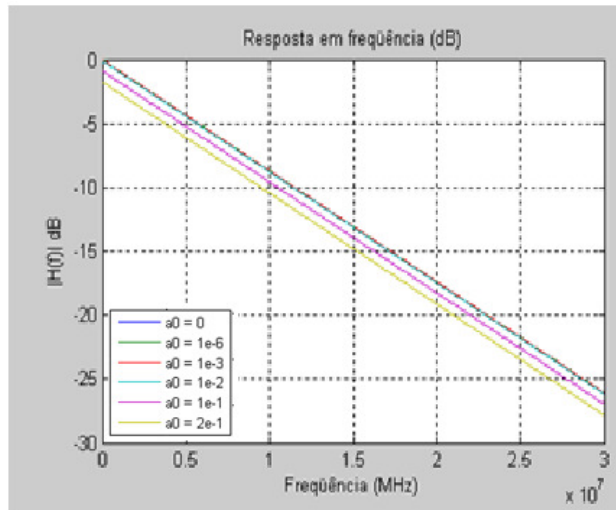


Figura 4.4 - Análise da atenuação no canal PLC em função da variação de a_0 .

Para a situação onde foram mantidos fixos os valores de a_0 , a_1 e d_i e modificou-se o valor de k em função da frequência, observou-se que este fator de atenuação influencia fortemente no comportamento do termo de referência conforme pode ser visto no gráfico da figura 4.5.

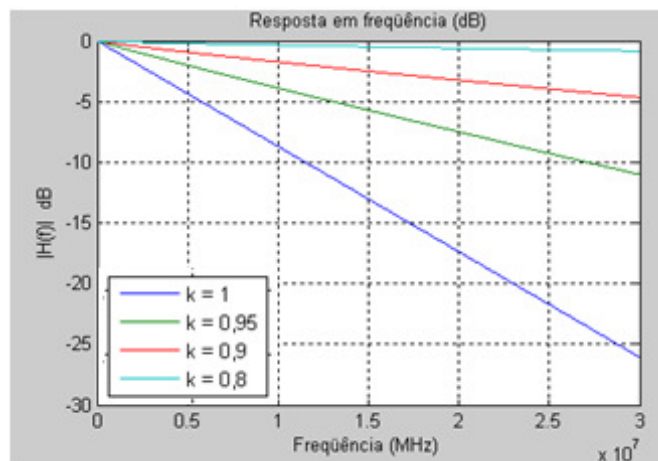


Figura 4.5 - Análise da atenuação no canal PLC em função da variação de k .

Na frequência de 30 MHz, para $k = 1$, a atenuação está próxima de -30 dB. Para $k = 0.95$ a atenuação é de -12 dB e para $k = 0.9$ a atenuação chega a -6 dB. Desse modo conclui-se que quanto menor for o valor de k , menor será o termo de atenuação atuando na função de transferência da equação 4.20 e desse modo melhor será o desempenho da rede PLC.

Com a_0 , a_1 e k mantidos com valores fixos e observando o comportamento do termo de atenuação com diversos valores da distância em função da frequência verificou-se que quanto maior for a distância, maior é a atenuação do sinal.

Desse modo pelo gráfico da figura 4.6 na frequência de 30 MHz se $d_i = 100$ m, o termo de atenuação está próximo de -30 dB na frequência de 30 MHz.

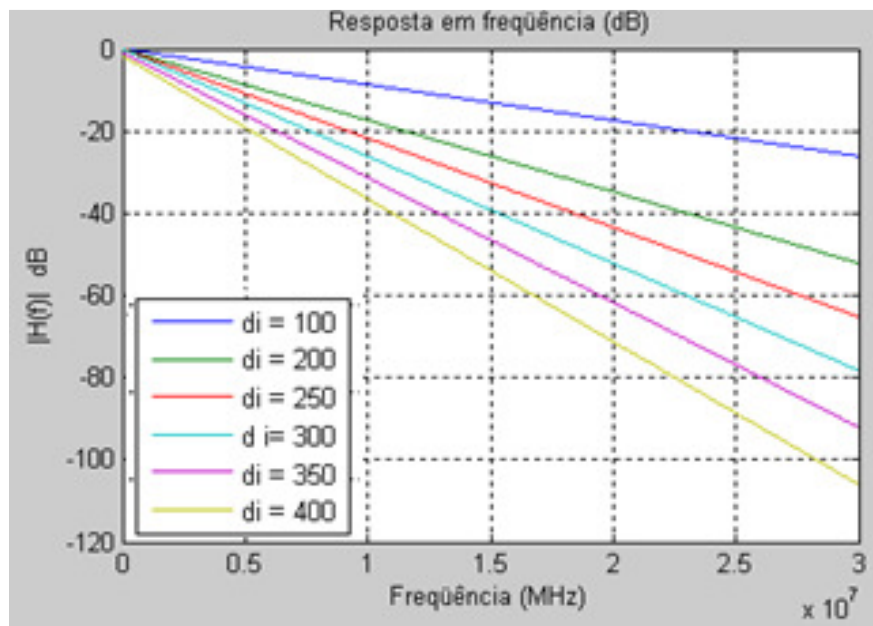


Figura 4.6 - Análise da atenuação no canal PLC em função da variação do comprimento do canal (d_i).

Para $d_i = 400$ m, a atenuação é maior que -100 dB em 30 MHz. Pela resposta deste gráfico e nas condições impostas na simulação, verifica-se que a distância máxima aceitável para a rede PLC é de aproximadamente 250 m até o máximo de 300 m atuando na frequência de 30 MHz.

O termo de atraso é dado pela equação (4.22) na qual a variação da distância em função da frequência responde apenas pela velocidade da propagação do sinal no caminho entre o transmissor e o receptor.

4.4 MODELOS DE REFERÊNCIA DO CANAL

Conforme serão apresentados nas seções seguintes os modelos de referência do canal são baseados na classificação das topologias clássicas para a aplicação de sistemas PLC de banda larga em três tipos principais [98,106]:

- Topologia PLC interna (*indoor*);
- Topologia PLC para acesso à última milha;

Este trabalho tem por finalidade estudar apenas a topologia PLC *In-Home* ou *indoor*.

4.4.1 Modelo de Referência do Canal – Rede PLC Indoor

A rede de energia elétrica difere consideravelmente pelo tipo de topologia, estrutura e propriedades físicas, tais como par trançado, cabo coaxial ou fibra óptica. Desse modo os equipamentos PLC devem possuir tecnologias especiais para enfrentar ambientes hostis [43, 44, 108].

O objetivo desta seção é apresentar os resultados obtidos por meio de simulações da função de transferência do canal PLC *indoor*. A primeira análise apresenta os parâmetros do modelo com 6 caminhos. Como são utilizados poucos caminhos, nenhuma resposta compatível com as medidas reais pode ser esperada. Entretanto, as respostas obtidas por meio de simulação são muito próximas do valor real.

A tabela 4.4 apresenta os parâmetros do modelo de uma rede PLC. Para esta situação $k = 1$, $a_0 = -2.1 \times 10^{-3}$ e $a_1 = 8.1 \times 10^{-10}$ [43, 44].

Tabela 4.4 – Parâmetros do modelo de uma rede PLC.

Caminho (i)	1	2	3	4	5	6
d_i (m)	200	221	242	259	266	530
g_i	0.54	0.275	-0.15	0.08	-0.03	-0.02

A figura 4.7 ilustra a resposta obtida da função de transferência para os parâmetros da tabela 7.5 [67].

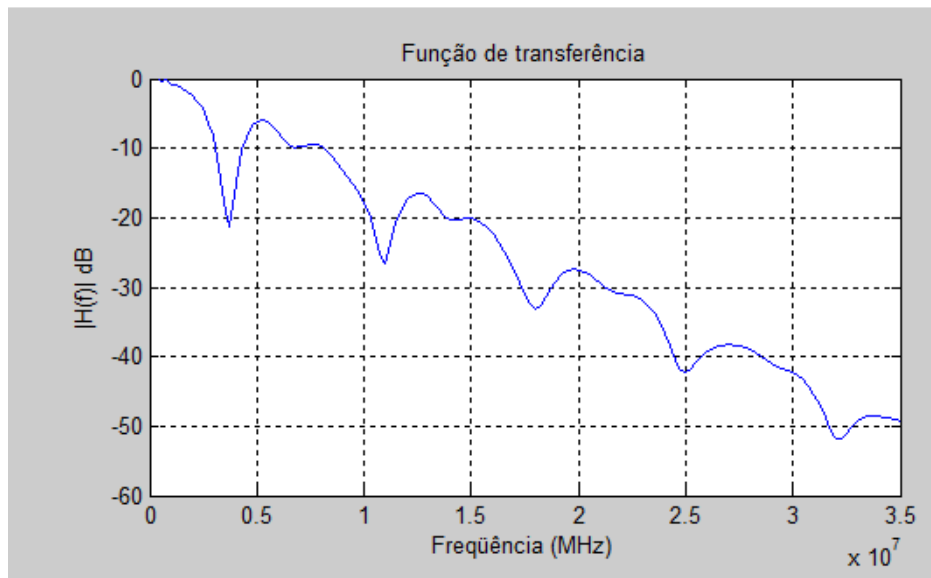


Figura 4.7 – Função de transferência do canal PLC.

O resultado obtido da resposta em frequência está visível no gráfico e demonstra duas importantes propriedades do canal PLC que são o desvanecimento seletivo na frequência e a atenuação dependente da variação da frequência [96]. Na resposta em frequência do canal, aparece o desvanecimento seletivo na frequência, devido ao eco gerado pelas sucessivas reflexões. Além disso, o canal possui uma característica passa baixo. Estes efeitos ocorrem nas redes com muitas ramificações nas frequências superiores a 10 MHz e são mais críticos conforme aumenta o comprimento do canal principalmente nas distâncias superiores a 300 m. A atenuação é provocada pelo material do cabo, dependendo da frequência e do número de ramificações, visto que cada terminal PLC absorve determinada quantidade de potência do sinal que se quer transmitir. A atenuação do sinal de uma instalação elétrica *indoor* excelente é de 0 a 19 dB. Uma instalação elétrica regular a atenuação está em torno de 40 a 60 dB e muito ruim acima de 65 dB. Um alto valor de atenuação não pode ser compensado simplesmente com o aumento da potência do sinal por motivos de compatibilidade

eletromagnética. A resposta em frequência determina a tensão do sinal atenuado que foi transmitido da origem ao destino. Como pode ser visto pela figura 4.7, na frequência de 15 MHz, a atenuação do sinal é de 20 dB e para a frequência de 30 MHz, a atenuação está acima de 40 dB. A resposta impulsiva é apresentada na figura 4.8. A resposta de um sistema (inicialmente em repouso) a um impulso de Dirac unitário é por definição a resposta impulsiva. Conhecendo a resposta impulsiva de um sistema linear pode-se determinar a resposta a qualquer sinal representado por uma série infinita de impulsos de Dirac ponderados e atrasados uns em relação aos outros [53].

Muitos dos modelos disponíveis para a rede PLC são paramétricos e utiliza uma média das respostas de frequência medidas ou uma resposta impulsiva de um canal típico como base para estimar o restante dos parâmetros do modelo do canal. [109,110,111].

O canal representado na simulação apresenta uma ramificação que produz 6 caminhos. A resposta impulsiva descreve o cenário de ecos na rede. Pelo gráfico da figura 4.8 pode ser verificado que o sinal cai depois de aproximadamente $2 \mu\text{s}$ o que representa uma condição satisfatória para um canal PLC. A resposta de fase é um importante parâmetro quando se considera a qualidade do canal para comunicação digital e como característica no canal PLC pode-se dizer que a resposta de fase diminui em função da frequência.

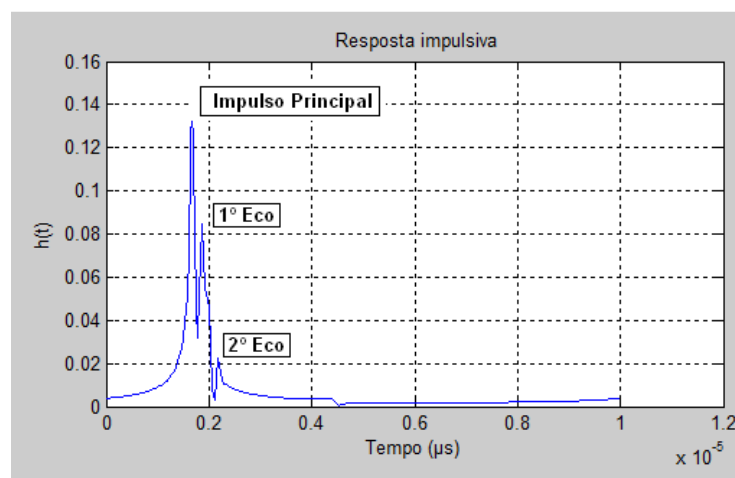


Figura 4.8 – Resposta impulsiva do canal PLC.

A figura 4.9 apresenta o resultado obtido da resposta de fase em função da frequência no canal PLC.

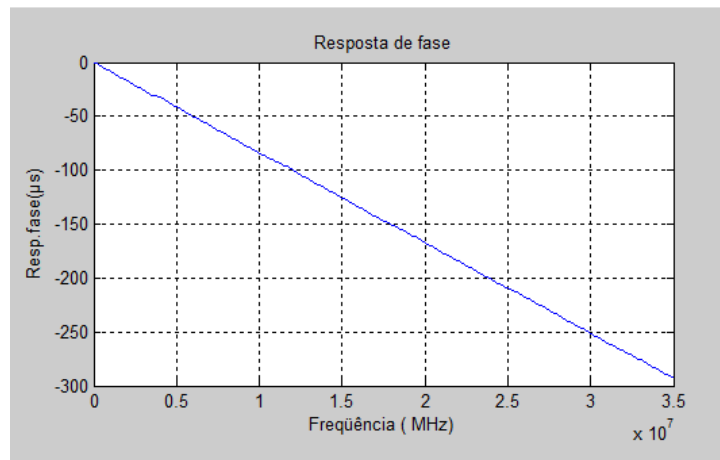


Figura 4.9 – Resposta de fase do canal PLC.

Outra análise muito importante a ser realizada com referência a avaliação do canal PLC é o atraso de grupo (*group delay* – *gd*). O atraso de grupo de um sistema linear invariante no tempo (LTI) é definido como um valor negativo da derivada da resposta de fase com relação à frequência. A não linearidade da fase na resposta de frequência do canal de comunicação causa uma variação no atraso de grupo, na qual prejudica a transmissão de dados. A resposta de fase apresenta uma resposta que diminui em função da frequência. A não linearidade ocorre apenas nas bandas de frequência tendo um grau de declive ou um pico na resposta em frequência.

A função de transferência de um canal de transmissão é dada pela equação 4.26.

$$H(\omega) = H(e^{j\omega}) = A(\omega)e^{j\beta(\omega)} \quad (4.26)$$

A constante de propagação (γ) é calculada utilizando a equação 4.27.

$$\gamma(\omega) = \alpha(\omega) + j\beta(\omega) = \ln \frac{V_2(\omega)}{V_1(\omega)} \quad (4.27)$$

Em que V_2 é a tensão no receptor e V_1 a tensão na saída para o canal de transmissão. Esta é uma definição clássica para um modelo linear. Se um sinal senoidal é entrada de um modelo de canal de transmissão linear então com certeza a saída também apresentará um sinal senoidal com a mesma frequência, mas atenuada e deslocada de fase. Desse modo ao invés de usar a característica de fase é mais aplicável a utilização do atraso de grupo [112,113] conforme equação 4.28.

$$\beta(\omega) = \arg(H(j\omega)) \quad (4.28)$$

Em que $\beta(\omega)$ denota a resposta de fase. Então o atraso de grupo é dado pela equação 4.29.

$$\text{tg } \beta = -\frac{1}{2\pi} \cdot \frac{d\theta(f)}{df} = -\frac{d\beta(\omega)}{d\omega} \quad (4.29)$$

Em que β descreve a fase do sinal. Com a fase linear do canal, o valor de g_d é constante. A resposta impulsiva da figura 4.8 confirma os aspectos de múltiplos caminhos do canal. A figura 4.10 apresenta o comportamento do atraso de grupo em função da frequência num canal de transmissão PLC.

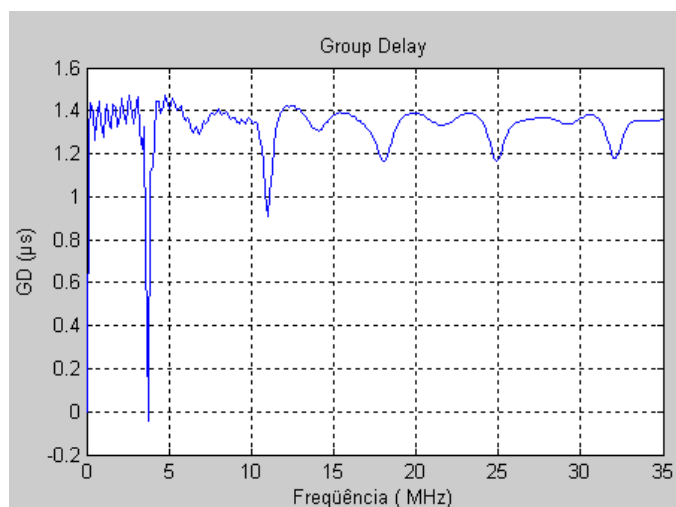


Figura 4.10 – Comportamento do atraso de grupo no canal PLC.

Os fenômenos de reflexão introduzem oscilações nas características de amplitude e no atraso de grupo que causam os sinais de eco. O período de oscilação é determinado pela relação entre o comprimento da linha de transmissão (d_i) e a velocidade de propagação da onda (v).

As oscilações na curva são visualizadas em todo o comprimento da linha de transmissão e o método de acoplamento e os coeficientes de reflexão são verificados no ponto final da linha. As oscilações no domínio da frequência correspondem no domínio do tempo aos ecos no sinal de entrada da rede PLC.

As oscilações que ocorrem na curva são sempre acompanhadas com as oscilações no atraso de grupo. Para o caso em que as reflexões são livres, o atraso de grupo é considerado constante em função da frequência [113,114,115].

Num sistema sem variação do atraso de grupo, os sinais em todas as frequências são transmitidos e atravessam o canal sempre com a mesma quantidade de atraso até alcançar o receptor. Pela observação do gráfico da figura 4.10, pode-se dizer que o atraso de grupo de um canal de transmissão não se altera mesmo com grandes perdas na transmissão numa mesma faixa de frequência. Como pode ser observado na figura 4.10, a curva do atraso de grupo é mostrada pela variação dos bits que estão sendo transmitidos em diferentes frequências atuando sobre diferentes graus de atenuações. Isto é devido às variações das características do canal de transmissão em função da frequência do sinal. Desse modo, pequenos *ripples* aparecem na curva. Se considerar o fato que numa residência existem diversas ramificações e múltiplos caminhos e reflexões que variam no tempo, estas condições contribuem diretamente na curva do atraso de grupo e, desse modo, pode-se entender que existe no canal PLC desvanecimento seletivo na frequência. Concluindo as observações do gráfico do atraso de grupo, pode-se constatar que existe uma correlação fidedigna entre a curva do atraso de grupo com a curva de resposta em frequência da figura 4.7, como pode ser

verificado, facilmente nas frequências de 4 MHz, 11 MHz, 18 MHz e 25 MHz por exemplo. A constante de propagação (γ) é dada pelo cálculo do logaritmo da relação entre a tensão no receptor com a tensão do transmissor. A curva de atenuação vista pela constante de propagação é mostrada na figura 4.11.

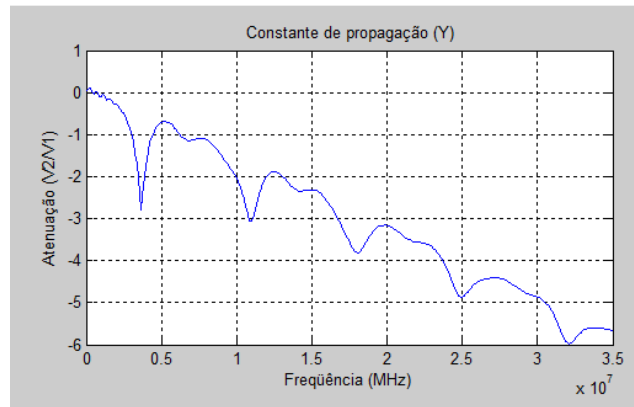


Figura 4.11 – Curva de atenuação baseado na análise da constante de propagação do sinal no canal PLC.

Observando a curva de atenuação e comparando com a curva de atenuação da figura 4.7, pode-se constatar que ambas reproduzem a mesma informação em função da frequência. A atenuação do sinal cresce com o aumento da distância entre o ponto transmissor e o receptor e com o aumento da frequência.

4.4.2 Função de Transferência do Canal Pelo Método das Matrizes

Um cabo de rede padrão consiste de três condutores constituído de fase, neutro e terra. A fase e o neutro são revestidos com isolamento para que então o conjunto dos três cabos sejam também isolados. A comunicação de sinais pela rede elétrica são realizados pelos condutores fase e neutro considerando que ambos os fios possuam a mesma espessura.

4.4.2.1 Método da Matriz ABCD

Nesta seção é apresentado o método da teoria de cadeia de matrizes que permite encontrar a função de transferência do canal PLC de modo a entender a topologia da rede e

estudar os efeitos no sistema de comunicação que ocorrem por desvanecimento seletivo na frequência e atenuação do sinal em função da frequência. Para a modelagem do canal PLC deve-se assumir que a estrutura exata, os tipos de fios e as cargas conectadas no canal sejam perfeitamente conhecidos. A figura 4.12 ilustra o modelo de uma rede PLC para comunicação de dados com 2 portas [116,117].

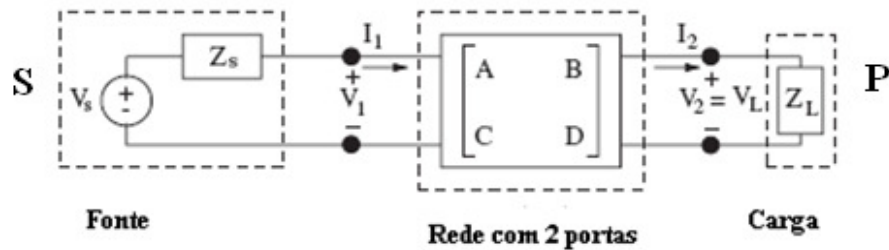


Figura 4.12 – Modelo de rede PLC com 2 portas.

A impedância série por unidade de comprimento (z_s) e a admitância shunt por fase (y_s) pode ser encontrado aplicando $z_s = r + j\omega L$ e $y_s = g + j\omega C$. Para o desenvolvimento da solução matemática, considera-se um pequeno segmento da linha Δx , a uma distância x da extremidade do ponto de recepção da linha conforme pode ser observado na figura 4.13. O comprimento total da linha é l .

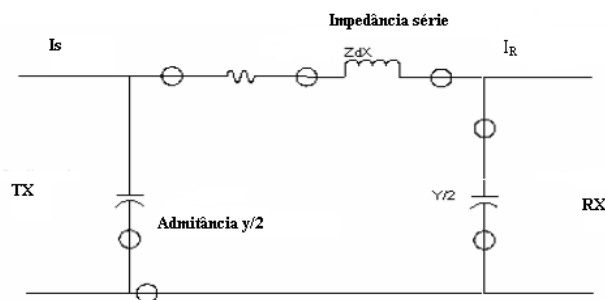


Figura 4.13 – Modelo da linha de transmissão.

Da lei de Kirchoff para tensão:

$$V(x + \Delta x) = V(x) + z\Delta x l(x) \tag{4.30}$$

$$\frac{V(x+\Delta x)-V(x)}{\Delta x} = zl(x) \tag{4.31}$$

Considerando o limite sendo $\Delta x \rightarrow 0$, temos que, $\frac{dV}{dx} = zI(x)$

Tambem, da lei de Kirchoff para corrente:

$$I(x + \Delta x) = I(x) + y\Delta x V(x + \Delta x) \quad (4.32)$$

$$\frac{I(x+\Delta x)-I(x)}{\Delta x} = yV(x) \quad (4.33)$$

Então:

$$\frac{dI(x)}{dx} = zyV(x) \quad (4.34)$$

Finalmente, tem-se que:

$$\frac{d^2V(x)}{dx^2} = zyV(x) \quad (4.35)$$

Considerando $\gamma = zy$, a equação diferencial de segunda ordem resultará:

$$\frac{d^2V(x)}{dx^2} - \gamma^2 V(x) = 0 \quad (4.36)$$

A solução da equação para $V(x)$ é:

$$V(x) = A_1 e^{\gamma x} + A_2 e^{-\gamma x} \quad (4.37)$$

$$\frac{dV(x)}{dx} = yA_1 e^{\gamma x} - yA_2 e^{-\gamma x} = zI(x) \quad (4.38)$$

$$I(x) = \frac{A_1 e^{\gamma x} - yA_2 e^{-\gamma x}}{z/y} = \frac{A_1 e^{\gamma x} - yA_2 e^{-\gamma x}}{z/\sqrt{zy}} \quad (4.39)$$

$$V(x) = \left(\frac{V_R + z_c I_R}{2}\right) e^{\gamma x} + \left(\frac{V_R - z_c I_R}{2}\right) e^{-\gamma x} \quad (4.40)$$

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{zy} = \sqrt{(r + j\omega L)(g + j\omega c)} \quad (4.41)$$

$$I(x) = \frac{1}{z} \frac{dV(x)}{dx} = \frac{\gamma}{z} (A_1 e^{\gamma x} - A_2 e^{-\gamma x}) \quad (4.42)$$

$$I(x) = Z_c (A_1 e^{\gamma x} - A_2 e^{-\gamma x}) \quad (4.43)$$

Em que $Z_c = \sqrt{y/z}$ e

$$\frac{z}{y} = \frac{z}{\sqrt{zy}} = \sqrt{\frac{z}{y}} \quad (4.44)$$

Para encontrar as constantes A_1 e A_2 , considere quando $x = 0$, $V(x) = V_R$ e $I(x) = I_R$. A partir da equação 4.43, pode-se encontrar os valores de A_1 e A_2 .

$$A_1 = \frac{(V_R + Z_C I_R)}{2} \quad (4.45)$$

$$A_2 = \frac{(V_R - Z_C I_R)}{2} \quad (4.46)$$

As expressões gerais para a tensão e corrente ao longo de qualquer linha de transmissão se tornam:

$$V(x) = \left(\frac{V_R + Z_C I_R}{2} \right) e^{yx} + \left(\frac{V_R - Z_C I_R}{2} \right) e^{-yx} \quad (4.47)$$

$$I(x) = \left(\frac{V_R + Z_C I_R}{2 Z_C} \right) e^{yx} - \left(\frac{V_R - Z_C I_R}{2 Z_C} \right) e^{-yx} \quad (4.48)$$

$$V(x) = \frac{(V_R + Z_C I_R)}{2e^{\gamma x}} + \frac{(V_R - Z_C I_R)}{2e^{-\gamma x}} \quad (4.49)$$

$$I(x) = \frac{\left(\frac{V_R}{Z_C} + I_R \right)}{2e^{\gamma x}} - \frac{\left(\frac{V_R}{Z_C} - I_R \right)}{2e^{-\gamma x}} \quad (4.50)$$

As equações para a tensão e corrente podem ser reorganizadas da seguinte forma:

$$V(x) = \frac{(e^{\gamma x} + e^{-\gamma x})}{2} V_R + Z_C \left(\frac{(e^{\gamma x} + e^{-\gamma x})}{2} \right) I_R \quad (4.51)$$

$$I(x) = \frac{1}{Z_C} \cdot \frac{(e^{\gamma x} + e^{-\gamma x})}{2} V_R + \frac{(e^{\gamma x} + e^{-\gamma x})}{2} I_R \quad (4.52)$$

$$\left(\frac{e^{\gamma x} + e^{-\gamma x}}{2} \right) = \cosh(\gamma x) \quad (4.53)$$

$$\left(\frac{e^{\gamma x} - e^{-\gamma x}}{2} \right) = \sinh(\gamma x) \quad (4.54)$$

$$V(x) = \cosh \gamma x V_R + Z_C \sinh \gamma x I_R \quad (4.55)$$

$$I(x) = \frac{1}{Z_C} \sinh \gamma x V_R + \cosh \gamma x I_R \quad (4.56)$$

Considerando a relação entre o ponto final de envio dos dados e o ponto de final de recepção dos dados no canal de transmissão e fazendo $x = 1$, $V(1) = V_s$ e $I(1) = I_s$, o resultado final para o cálculo de $V(x)$ e $I(x)$ é:

$$V(x) = \cosh \gamma 1 V_R + Z_C \sinh \gamma 1 I_R \quad (4.57)$$

$$I(x) = \frac{1}{Z_C} \sinh \gamma 1 V_R + \cosh \gamma 1 I_R \quad (4.58)$$

A representação da cadeia de matrizes conhecida como modelo ABCD para um circuito de 2 portas é muito conveniente para o cálculo da impedância de entrada da rede e da função de transferência em função da relação da tensão na carga sobre a tensão na fonte. Conforme a figura 4.12, a relação entre V_1 , I_1 , V_2 e I_2 (tensão e corrente de entrada e tensão e corrente de saída) pode ser expressa pela equação 4.59.

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (4.59)$$

Sendo A, B, C e D são constantes apropriadamente escolhidas da matriz dos coeficientes complexos e dependentes da frequência. Caso exista um circuito com 2 portas em cascata, a representação ABCD do circuito é o produto das matrizes ABCD de cada circuito individual. Dando sequência ao desenvolvimento da equação 4.59, para isolar a relação de saída do canal, tem-se a equação 4.60.

$$\begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \frac{1}{AD-BC} \begin{bmatrix} D & B \\ C & A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} \quad (4.60)$$

Sendo:

$$A = D = \cosh(\gamma l) \text{ por unidade de comprimento;} \quad (4.61)$$

$$B = Z_c \sinh(\gamma l) \quad [\Omega] \quad (4.62)$$

$$C = \frac{1}{Z_c} \sinh(\gamma l) \quad [S] \quad (4.63)$$

$$S = V_1 + I_1 Z_s \quad [V] \quad (4.64)$$

$$P = V_2 + I_2 Z_L \quad [V] \quad (4.65)$$

l representa o comprimento do cabo, γ a constante de propagação e Z_c a característica de impedância do cabo. A função de transferência em função de P com S é fornecida pela equação 7.84.

$$H(f) = \frac{Z_L}{AZ_L + B + CZ_s Z_L + DZ_s} \quad (4.66)$$

Em que:

Z_L = Impedância do receptor

Z_s = Impedância do transmissor

Verificando novamente a figura 4.12, vale observar que todas as tensões e correntes podem ser apresentadas por fasores. Utilizando o modelo ABCD para um sistema com dua

portas é fácil calcular a função de transferência do circuito (V_L/V_S) conforme apresentado pela equação 4.66.

O calculo da impedância de entrada (Z_{in}) de um circuito com duas portas pode ser realizado conforme mostrado na equação 4.67.

$$Z_{in} = \frac{V_1}{I_1} = \frac{AZ_L + B}{CZ_L + D} \quad (4.67)$$

Dois cabos paralelos (fase e neutro) podem ser modelados como uma linha de transmissão e caracterizados por Z e por γ dos cabos conforme foi demonstrado no capítulo 6.

A matriz do sistema ABCD também designada como matriz de transmissão (T) para a linha com impedância característica, constante de propagação e comprimento do canal pode ser calculada pela equação 4.68.

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma l) & Z_c \sinh(\gamma l) \\ \frac{1}{Z_c} \sinh(\gamma l) & \cosh(\gamma l) \end{bmatrix} \quad (4.68)$$

Após o desenvolvimento realizado, é possível encontrar um modelo equivalente Π exato, para substituir as constantes A,B,C e D da rede de duas portas. Todos os parâmetros com Z_{in} , γ , Z_c e as constantes A,B,C e D são valores complexos.

$$V_S = \left(1 + \frac{Z'Y'}{2}\right) V_R + Z' I_R \quad (4.69)$$

$$I_S = Y' \left(1 + \frac{Z'Y'}{4}\right) V_R + \left(1 + \frac{Z'Y'}{2}\right) I_R \quad (4.70)$$

Os parâmetros do modelo equivalente Π são obtidos pelas equações 4.71 e 4.72.

$$Z = Z_c \cdot \sinh(\gamma l) = Z \frac{\sinh \gamma l}{\gamma l} \quad (4.71)$$

$$\frac{Y}{2} = \frac{1}{Z_C \frac{\tanh(\gamma l)}{2}} = \frac{Y}{2} \frac{(\tanh(\frac{\gamma l}{2}))}{\frac{\gamma l}{2}} \quad (4.72)$$

4.4.2.2 Função de Transferência da Linha de Transmissão com Extensões (*Bridge Tap*)

Um paralelo ou extensão (*Bridge Tap*) é qualquer comprimento de cabo que não está dentro do caminho do canal de transmissão. A existência da extensão da rede não é um fator que impeça a comunicação de dados numa rede PLC, mas sim o seu comprimento que quanto maior mais elevado é a atenuação e a reflexão do sinal. A figura 4.14 mostra um exemplo de diagrama de posicionamento do tipo *Bridge Tap*.

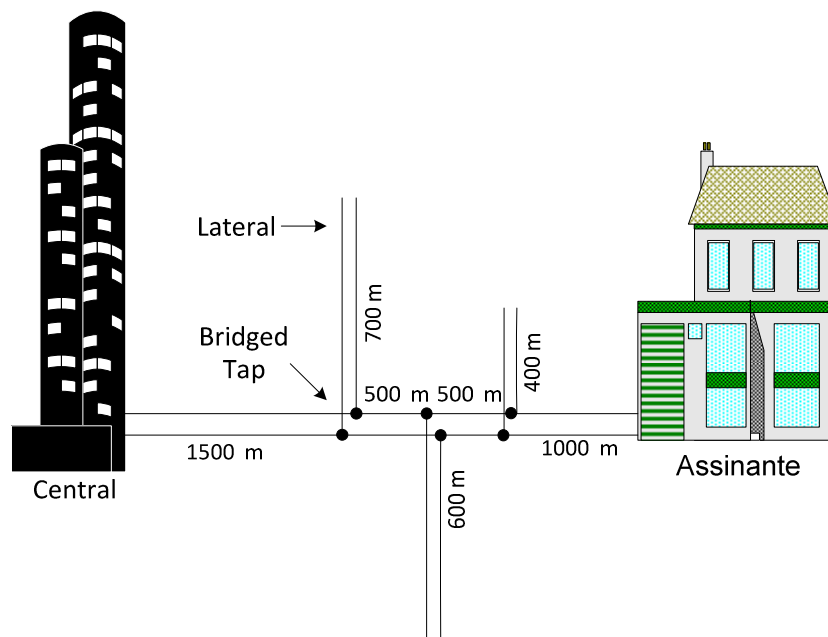


Figura 4.14 - Exemplo de diagrama de posicionamento do tipo *Bridge Tap*.

A função de transferência de um circuito com duas portas como o da figura 4.15 é dada pela equação 4.66 e os parâmetros ABCD da linha de transmissão podem ser calculados utilizando a equação 4.68.

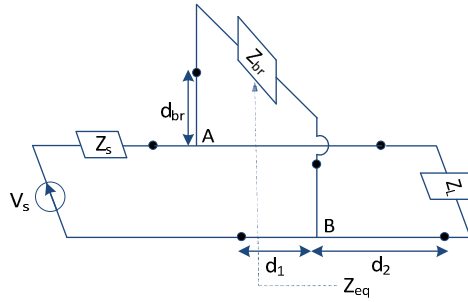


Figura 4.15 – Linha de transmissão com uma extensão (*Bridge Tap*).

Desse modo o cálculo da função de transferência para uma linha de transmissão básica é bastante simples. Considerando a ilustração da figura 4.15 que mostra a linha de transmissão com extensão, se substituir esta extensão com a impedância equivalente (Z_{eq}) na qual pode ser visto pelos terminais A e B, o circuito pode ser simplificado para o modelo da figura 4.16.

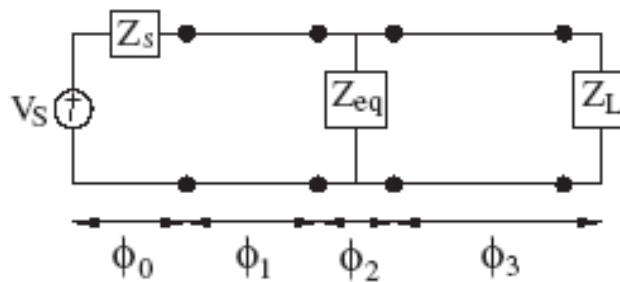


Figura 4.16 – Circuito equivalente da linha de transmissão com extensão.

Pela análise da figura 4.16, a impedância de entrada equivalente pode ser calculada conforme a equação 4.73 quando $l = 0$.

$$Z_{in} = Z_{eq} = Z_c \frac{Z_{br} + Z_c \tanh(\gamma_{br} d_{br})}{Z_c + Z_{br} \tanh(\gamma_{br} d_{br})} \quad (4.73)$$

Em que Z_c e γ_{br} são a impedância característica e a constante de propagação do ramo do circuito. Visualizando a figura 4.16, o circuito pode ser particionado em sub circuitos com quatro cascadeamentos de duas portas. Para cada sub-circuito é possível calcular a matriz

ABCD (Φ_i , $i=0,1,2,3$) utilizando a equação 4.74, enquanto a matriz ABCD para o circuito total (Φ) é dado pela equação 4.78.

$$\Phi_0 = \begin{bmatrix} 1 & Z_s \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.74)$$

$$\Phi_1 = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma_1 d_1) & Z_1 \sinh(\gamma_1 d_1) \\ \frac{1}{Z_1} \sinh(\gamma_1 d_1) & \cosh(\gamma_1 d_1) \end{bmatrix} \quad (4.75)$$

$$\Phi_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{Z_{eq}} & 1 \end{bmatrix} \quad (4.76)$$

$$\Phi_3 = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma_2 d_2) & Z_2 \sinh(\gamma_2 d_2) \\ \frac{1}{Z_2} \sinh(\gamma_2 d_2) & \cosh(\gamma_2 d_2) \end{bmatrix} \quad (4.77)$$

$$\Phi = \prod_{i=0}^3 \Phi_i \quad (4.78)$$

Em que Z_1 , γ_1 , Z_2 e γ_2 são as impedâncias características e as constantes de propagação para o segundo e quarto subcircuitos. De modo geral a função de transferência dos parametros ABCD podem ser calculados pela equação 4.79.

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \Phi_0 \times \Phi_1 \times \Phi_2 \times \Phi_3 = \prod_{i=1}^N \begin{pmatrix} A_i & B_i \\ C_i & D_i \end{pmatrix} \quad (4.79)$$

Utilizando as equações acima dos elementos da matriz ABCD para o circuito da figura 4.16 tem-se:

$$A = \cosh(\gamma_2 d_2) \alpha + \frac{\sinh(\gamma_2 d_2)}{Z_2} \beta \quad (4.80)$$

$$B = Z_2 \cosh(\gamma_2 d_2) \alpha + \cosh(\gamma_2 d_2) \beta \quad (4.81)$$

$$C = \cosh(\gamma_2 d_2) \xi + \frac{\sinh(\gamma_2 d_2)}{Z_2} \vartheta \quad (4.82)$$

$$D = Z_1 \sinh(\gamma_1 d_1) \xi + \cosh(\gamma_2 d_2) \vartheta \quad (4.83)$$

Onde:

$$\alpha = \cosh(\gamma_1 d_1) + \frac{Z_s}{Z_1} \sinh(\gamma_1 d_1) \quad (4.84)$$

$$\beta = Z_1 \sinh(\gamma_1 d_1) + Z_s \cosh(\gamma_1 d_1) \quad (4.85)$$

$$\xi = \frac{Z_1 \cosh(\gamma_1 d_1) + Z_s \sinh(\gamma_1 d_1) + Z_{eq} \sinh(\gamma_1 d_1)}{Z_1 Z_{eq}} \quad (4.86)$$

$$\vartheta = \frac{Z_1 \sinh(\gamma_1 d_1) + Z_s \cosh(\gamma_1 d_1)}{Z_{eq}} + \cosh(\gamma_1 d_1) \quad (4.87)$$

Então pela equação 4.66, a função de transferência do circuito pode ser calculada facilmente para canais com muitas extensões. O cálculo da função de transferência do canal baseado neste método é realizado de forma simples, apesar das fórmulas serem mais complexas.

4.4.2.3 Análise da Rede PLC pelo Método das Matrizes

Para os cabos de energia elétrica, a estrutura do canal é simples quando não apresenta ramificações. Desse modo, a característica típica de frequência de componentes individualizados podem ser parametrizados e estimados. Por isso, é conveniente modelar a atenuação do canal pelo modelo conhecido como duas portas (*Two Port*). [118,46,54]. O objetivo desta seção é desenvolver o modelo da função de transferência para a rede PLC indoor de modo genérico de uma casa popular baseado na teoria da linha de transmissão.

O modelo apresentado é simulado no MATLAB com a finalidade de apresentar o desempenho do canal PLC sobre diferentes configurações de redes indoor em especial na condição de uma casa popular e diferentes condições de carga baseado na teoria de cadeia de matrizes que é usada para encontrar a função de transferência da linha de transmissão. Analisando a equação 4.59, os parâmetros ABCD permitem calcular a impedância de entrada da rede PLC e a função de transferência pela relação entre a tensão da carga e a tensão da fonte.

O cálculo de $H(f)$ é realizado mediante a aplicação da equação 4.66 e o cálculo da impedância de entrada é realizada com a equação 4.67. No caso de uma linha de transmissão com dois condutores, considerando os coeficientes ABCD, a matriz (T) pode ser calculada pela equação 4.68.

Este modelo é implementado para a rede PLC indoor com P seções, N derivações e M nós. O circuito foi particionado em $2 \times P$ sub circuitos em cascata, utilizando o modelo de duas portas. Para cada subcircuito é possível calcular os respectivos coeficientes A_i , B_i , C_i e D_i . O valor de T pode ser obtido da matriz pelas equações 4.88 e 4.89 [108].

$$T = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \quad (4.88)$$

$$T = T_0 \left[\prod_{i=1}^{p-1} T_i \cdot T d_i \right] \cdot T_p \quad (4.89)$$

Sendo T_0 a matriz de transmissão da fonte dada pela equação 4.90.

$$T_0 = \begin{bmatrix} 1 & Z_s \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.90)$$

T_i , é a matriz de transmissão de cada seção i dada pela equação 4.91.

$$T_i = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma_1 L_1) & Z_{Ci} \sinh(\gamma_1 L_1) \\ \frac{1}{Z_{Ci}} \sinh(\gamma_1 L_1) & \cosh(\gamma_1 L_1) \end{bmatrix} \quad (4.91)$$

T_p é a matriz de transmissão da última seção P . T_{di} é a matriz de transmissão equivalente das ramificações conectadas ao nó i . O valor de T_{di} pode ser obtida pela equação 4.92.

$$T_{di} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \sum_{j=1}^N \frac{1}{Z_{deqij}} & 1 \end{bmatrix} \quad (4.92)$$

Em que, N representa o número de derivações do nó i , e Z_{deqij} é definida conforme a equação 4.93.

$$Z_{deqij} = Z_{Cij} \frac{Z_{brij} + Z_{Cij} \tanh(\gamma_{dij} d_{ij})}{Z_{Cij} + Z_{brij} \tanh(\gamma_{dij} d_{ij})} \quad (4.93)$$

Pela equação 4.93, Z_{brij} é a carga no terminal da ramificação j conectada ao nó i e Z_{Cij} é a impedância característica da ramificação j conectada ao nó i . A figura 4.17 ilustra uma rede PLC com ramificações contendo M nós e N derivações. Depois de analisar uma ramificação da rede, é feito a determinação da matriz por meio de um cascadeamento de todas

as ramificações da rede. Utilizando a teoria de microondas denominada de matriz de cadeia distribuída (matriz T), a relação entre os parâmetros da matriz S que geralmente é medida por um analisador de rede e os parâmetros da matriz T pode ser calculada pela equação 4.94 [119,120].

$$T = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{S_{21}} & -\frac{S_{22}}{S_{21}} \\ \frac{S_{11}}{S_{21}} & S_{12} - \frac{S_{11}S_{22}}{S_{21}} \end{bmatrix} \quad (4.94)$$

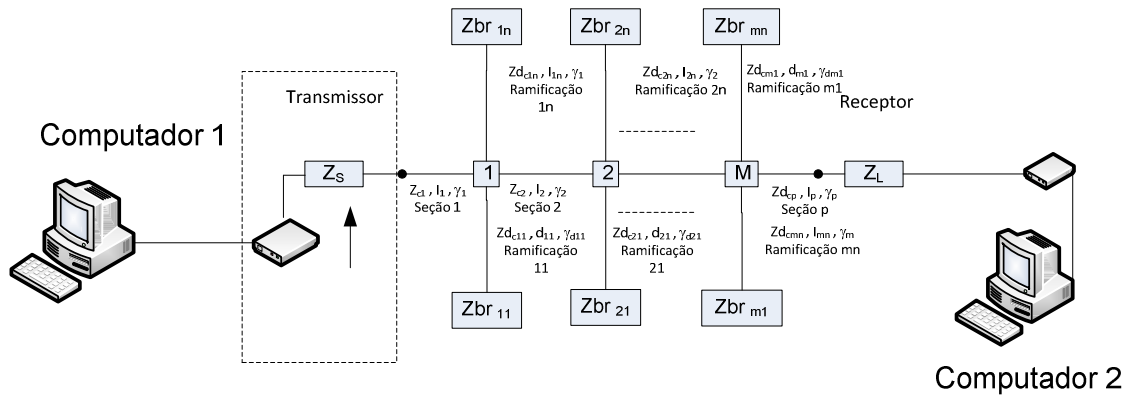


Figura 4.17 – Rede PLC com ramificações.

A matriz S para uma rede completa pode ser obtida utilizando a equação 4.95.

$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{T_{21}}{T_{11}} & T_{22} - \frac{T_{21}T_{12}}{T_{11}} \\ \frac{1}{T_{11}} & -\frac{T_{12}}{T_{11}} \end{bmatrix} \quad (4.95)$$

Finalmente, os parâmetros (T_{11} , T_{12} , T_{21} e T_{22}) permitem calcular a impedância de entrada da rede e a função de transferência dada pelas equações 4.96 e 4.97.

$$H(f) = \frac{Z_L}{T_{11}Z_L + T_{12} + T_{21}Z_S Z_L + T_{22}Z_S} \quad (4.96)$$

$$Z_{in}(f) = \frac{T_{11}Z_L + T_{12}}{T_{21}Z_L + T_{22}} \quad (4.97)$$

Para este estudo, foi considerada uma rede PLC *indoor*, conforme o modelo da configuração da rede apresentado na figura 4.18.

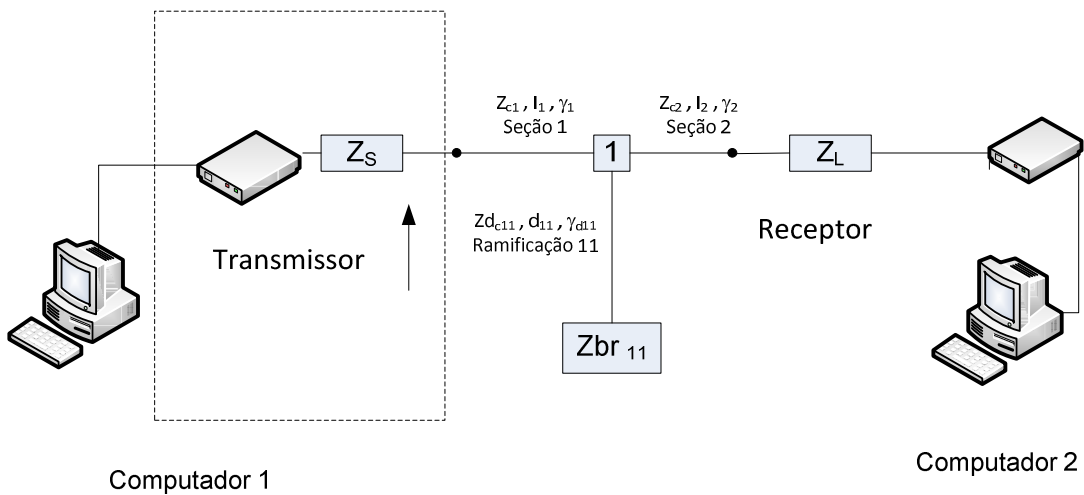


Figura 4.18 - Configuração da rede PLC com uma ramificação.

Para a situação referenciada na figura 4.18 foram consideradas as distâncias baseadas na tabela 4.5 para a realização das primeiras análises referente a uma condição genérica para a condição de uma casa popular.

Para todos os casos simulados, a carga Z_{br11} foi considerada como circuito aberto enquanto que $Z_{c1} = Z_{c2} = Z_{dc11} = 85 \Omega$, $Z_L = Z_S = 50 \Omega$, $L_1 = L_2 = L_{d1} = 5.6486 \times 10^{-7} \text{ H}$, $C_1 = C_2 = C_{d1} = 7.7056 \times 10^{-11} \text{ F}$, $a_0 = 3,11e-4$, $a_1 = 1,76 \times 10^{-8}$, $k = 0,75$ e a faixa de frequência vai de 0 - 30 MHz.

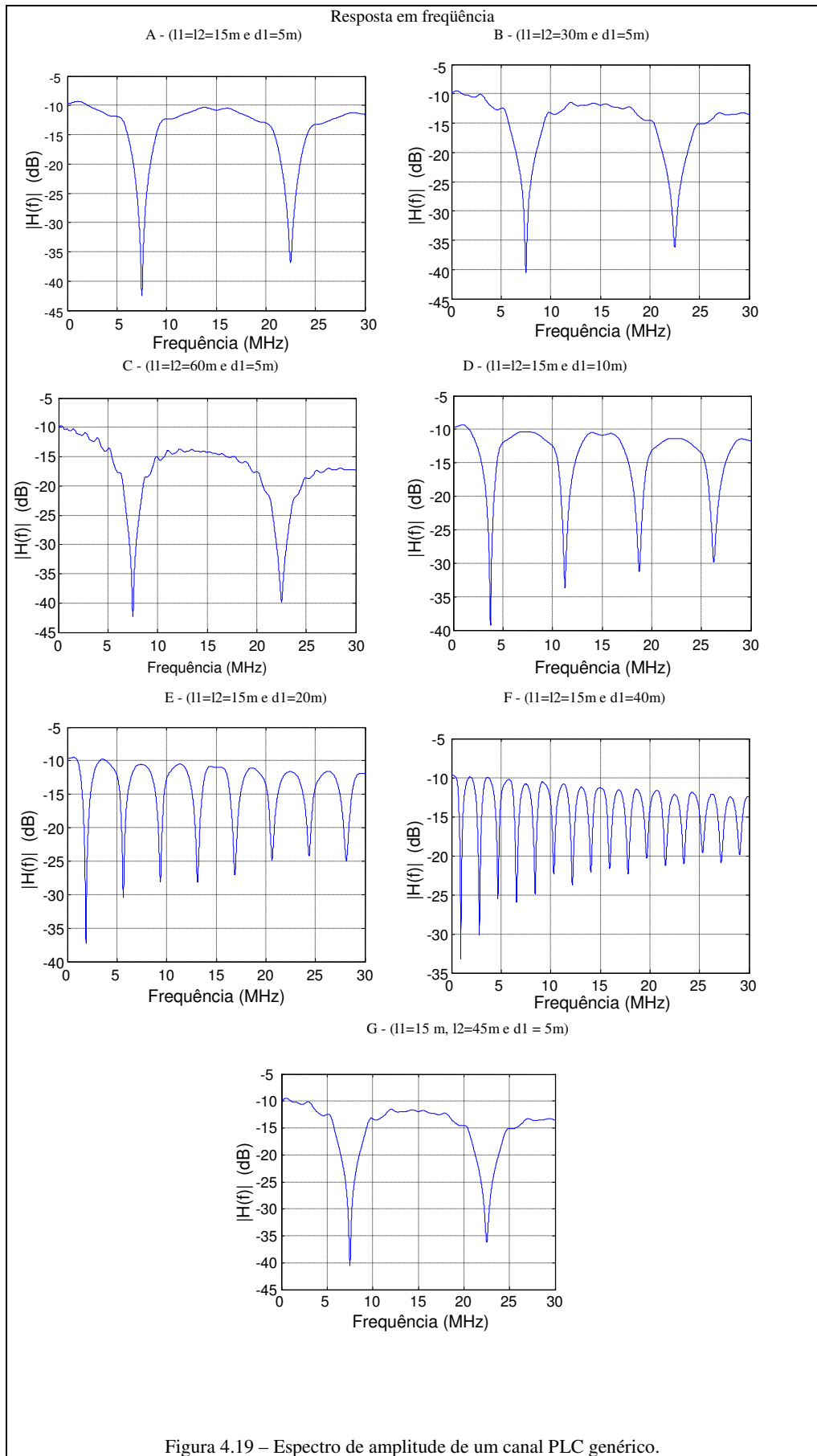
O cálculo da matriz de transmissão num cabo com dois condutores e duas seções, a matriz de transmissão T é calculada pela equação 4.98.

$$T = T_0 T_1 \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{Zd_{eq11}} & 1 \end{bmatrix} T_2 \quad (4.98)$$

Tabela 4.5 - Configuração das distâncias para situação genérica e para uma casa popular.

Condição genérica	Condição casa popular
A- $l_1 = l_2 = 15$ m e $d_1 = 5$ m.	A'- $l_1 = l_2 = 3,0$ m e $d_1 = 5$ m.
B- $l_1 = l_2 = 30$ m e $d_1 = 5$ m.	B'- $l_1 = l_2 = 6,0$ m e $d_1 = 5$ m.
C- $l_1 = l_2 = 60$ m e $d_1 = 5$ m.	C'- $l_1 = l_2 = 9,0$ m e $d_1 = 5$ m.
D- $l_1 = l_2 = 15$ m e $d_1 = 10$ m.	D'- $l_1 = l_2 = 3,0$ m e $d_1 = 1$ m.
E- $l_1 = l_2 = 15$ m e $d_1 = 20$ m.	E'- $l_1 = l_2 = 3,0$ m e $d_1 = 3$ m.
F- $l_1 = l_2 = 15$ m e $d_1 = 40$ m.	F'- $l_1 = l_2 = 3,0$ m e $d_1 = 4$ m.
G- $l_1 = 15$ m, $l_2 = 45$ m e $d_1 = 5$ m.	G'- $l_1 = 3,0$ m, $l_2 = 6,0$ m e $d_1 = 5$ m.

Para a condição A, as figuras 4.19, 4.20, 4.21 e 4.22 apresentam os resultados obtidos para a rede PLC indoor genérica e as figuras 4.23, 4.24, 4.25 e 4.26 mostram os resultados obtidos para a rede PLC indoor de uma casa popular onde as distâncias entre os pontos são bastante curta. A avaliação de ambas as condições são realizadas com relação à resposta em frequência, resposta em fase, o atraso de grupo (gd) e a resposta impulsiva. A resposta em frequência do canal PLC mostra a relação entre a amplitude do sinal de saída com a sua entrada em cada ponto de frequência por onde o sinal é transmitido. Pela verificação da figura 4.19 considerando a distância fixa da ramificação e variando a distância entre o ponto transmissor e receptor pode-se observar que à medida que é aumentada a distância entre o transmissor e o receptor, o patamar superior da curva decresce, aumentando a atenuação no canal PLC.



RESPOSTA DE FASE

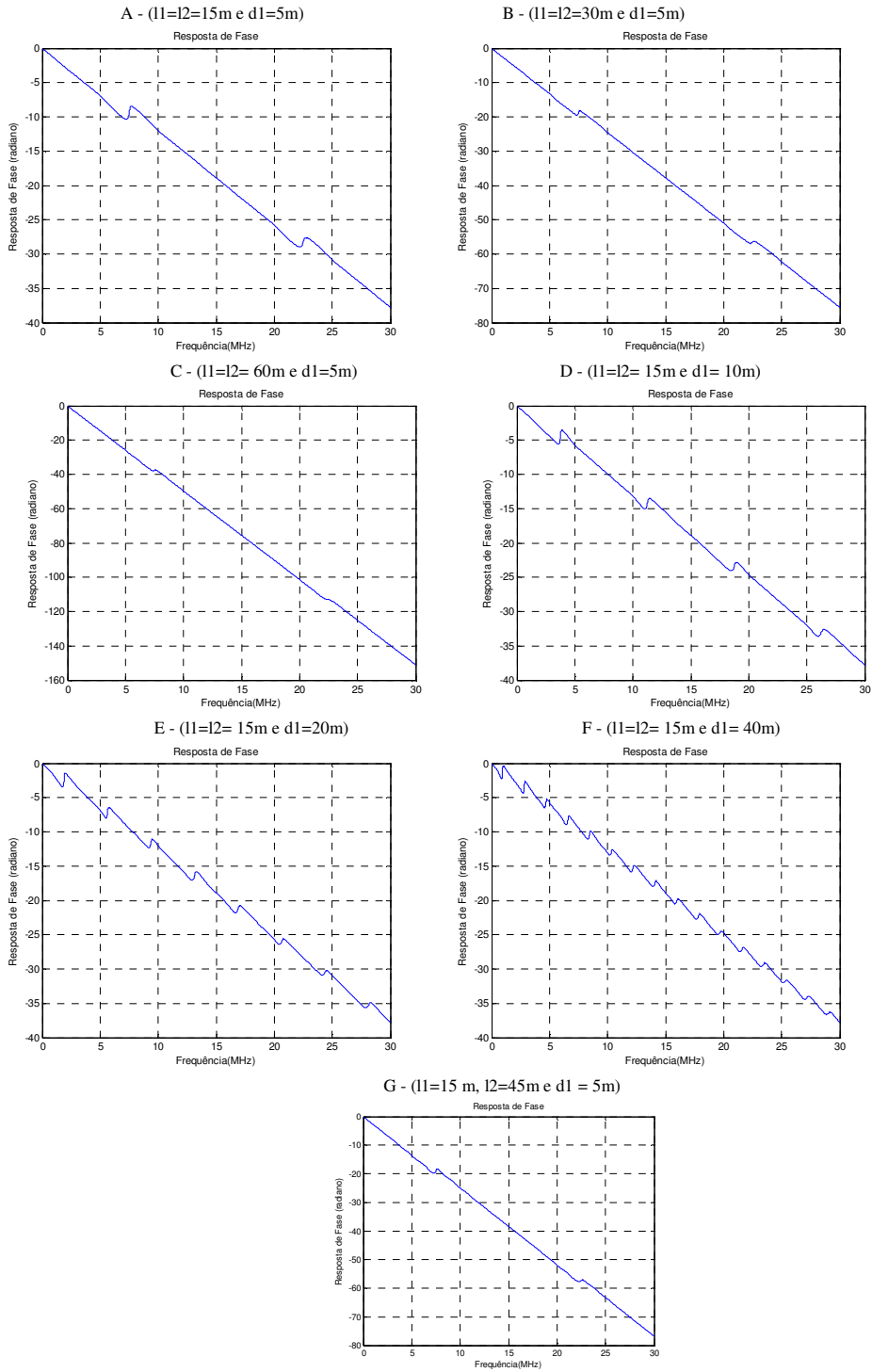


Figura 4.20 – Espectro de fase do canal PLC genérico.

ATRASSO DE GRUPO

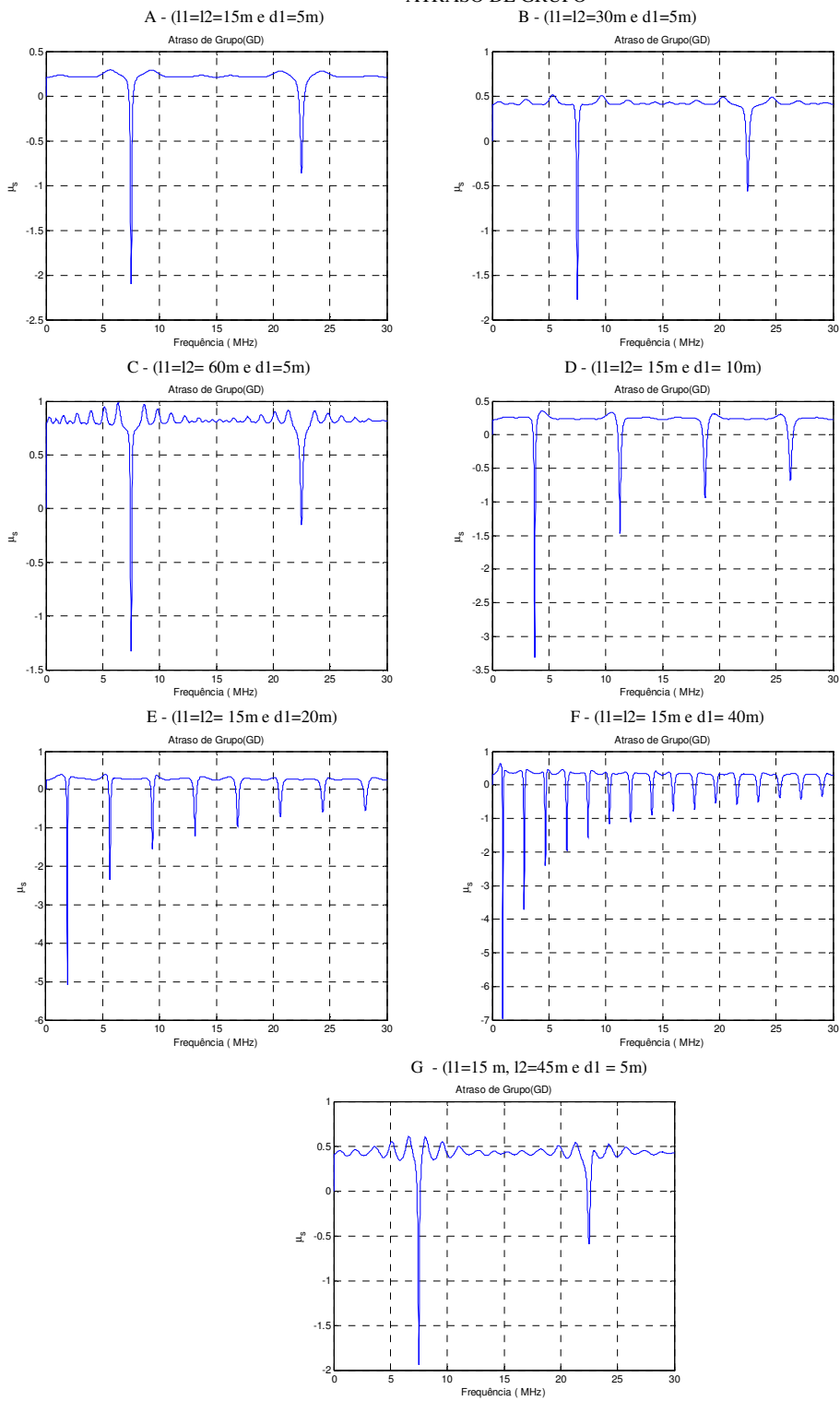
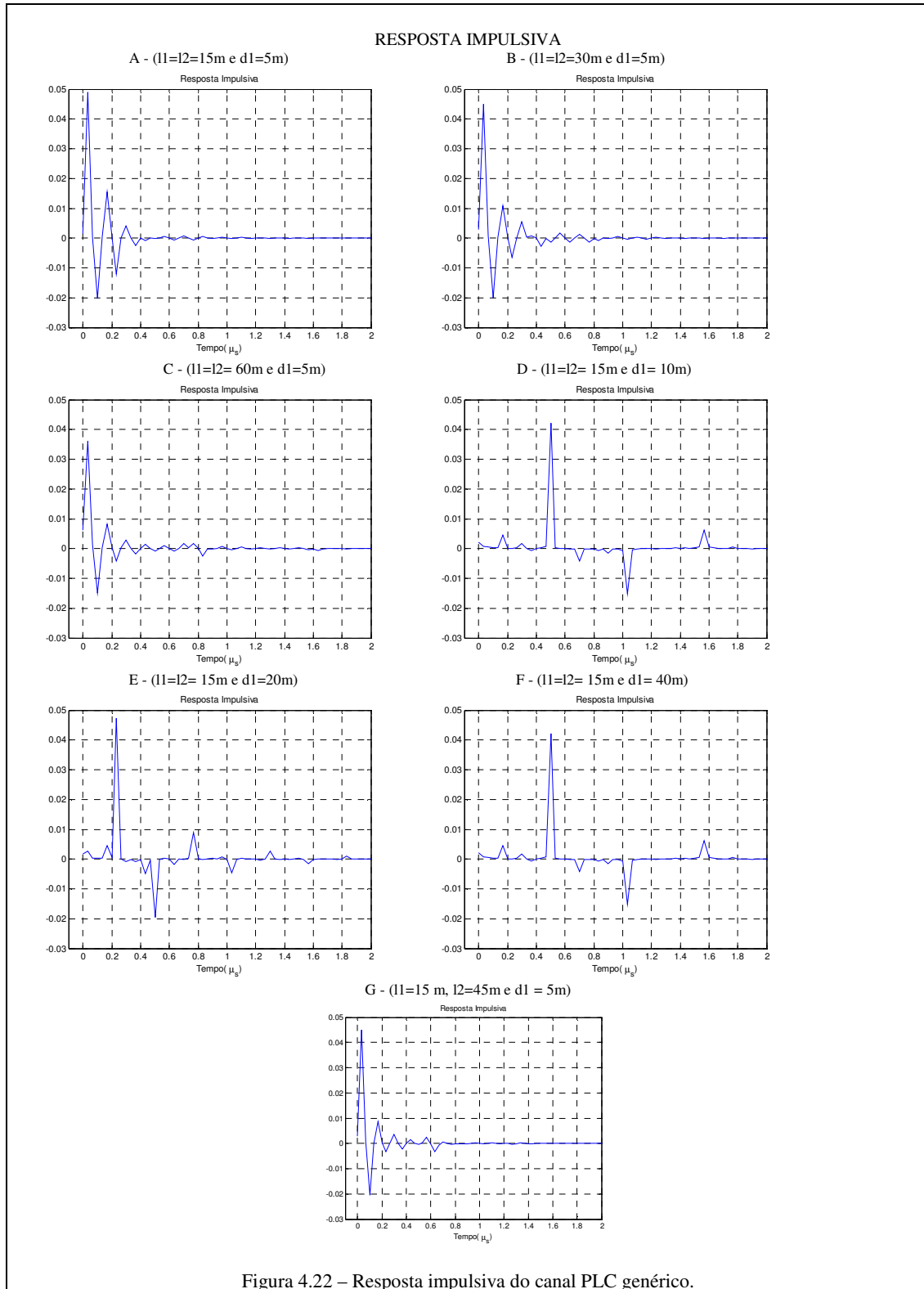


Figura 4.21 – Atrasso de grupo do canal PLC genérico.



Além disso, com o aumento da distância do ponto transmissor até o receptor constata-se que os *notches* se mantêm nas mesmas posições de frequência, mas atingem amplitudes maiores e mais *ripples* ocorrem na curva de resposta em frequência. Para a condição onde manteve fixa a distância do transmissor até o receptor e variou-se o valor da distância do

ponto final da ramificação até o nó da linha de transmissão, verificou-se que à medida que dobrou o valor da distância da ramificação, os números de *notches* dobraram e se deslocaram no eixo da frequência e a linha de base sofreu uma queda discreta na curva de resposta em frequência. Outra consideração a ser apresentada é que não ocorreram *ripples* na curva. Observou-se que a resposta em frequência não sofreu qualquer tipo de alteração na curva quando comparado $l_1 = l_2 = 30$ m e $d_1 = 5$ m com

$l_1 = 15$ m, $l_2 = 45$ m e $d_1 = 5$ m. A mesma conclusão foi obtida após a realização das simulações em MATLAB para a resposta em frequência do canal PLC seguindo as características e área física de uma casa popular conforme pode ser verificada na figura 4.23.

O espectro de fase é a relação entre a fase do sinal medido no receptor em relação ao sinal de referência na entrada, ou seja, é a fase (ângulo) da resposta em frequência do sinal. A resposta em fase é um importante parâmetro quando considera a qualidade do canal para a comunicação digital. Para um canal de transmissão a resposta de fase linear é uma característica muito desejável. A distorção de fase é causada pela diferença de impedância entre o ponto transmissor, ponto receptor, a linha de transmissão e as ramificações. Quando ocorre a não linearidade da fase, a forma de onda do sinal transmitido muda ao se propagar através do canal do ponto transmissor até o receptor. A linearidade da resposta de fase é descrita pelo *group delay* (gd).

A não linearidade provocada pelos picos de distorção ocorre apenas nas mesmas bandas de frequência onde os notches e picos aparecem na curva de resposta em frequência. Num canal PLC onde na resposta em frequência não apareçam notches ou picos a resposta de fase é linear decrescendo com o aumento da frequência.

Pela análise da figura 4.20 quanto maior a distância entre o transmissor e o receptor menor foi a variação da amplitude do pico de distorção de fase durante a transmissão de dados. Quanto maior a distância do ponto da ramificação até o nó da linha de transmissão

(d1), mais picos de distorções de fase ocorrem. É possível ver na figura 4.20 quando $d_1 = 5$ m foi observado apenas duas distorções de fase enquanto quatro distorções ocorreram para $d_1 = 10$ m, oito distorções para $d_1 = 20$ m e dezesseis distorções para $d_1 = 40$ m. Para a situação onde $l_1 = l_2 = 30$ m e $d_1 = 5$ m comparada com $l_1 = 15$ m, $l_2 = 45$ m e $d_1 = 5$ m não foi observado qualquer alteração na curva de resposta de fase. Novamente pode-se dizer que para a casa popular o canal PLC seguiu o mesmo comportamento do canal genérico para a resposta de fase, conforme pode ser verificado na figura 4.20.

A análise do canal PLC pelos gráficos de atraso de grupo é apresentada na figura 4.21. O atraso é o tempo requerido para um sinal passar pelo canal de transmissão. A distorção de fase é medida por meio do atraso de grupo. O atraso de grupo existe quando a curva de resposta de fase não é linear.

Os *ripples* na curva de atraso de grupo são causados pela descontinuidade do casamento de impedância no canal PLC. Nos mesmos pontos de frequência em que ocorre uma severa atenuação do sinal, o atraso de grupo aumenta por causa da não linearidade da transmissão do sinal.

Pela observação da figura 4.21, quando foi mantida fixa a distância do ponto final da ramificação até o ponto do canal de transmissão e aumentando-se à distância entre o ponto transmissor e o receptor, ocorreu à elevação do patamar superior da curva de atraso de grupo ocasionando o aumento do atraso da transmissão do sinal. Outro fato importante é que o aumento da distância entre o transmissor e o receptor provoca mais *ripples* no patamar superior da curva. Os pontos que aparecem as severas quedas na curva do atraso de grupo são exatamente nas mesmas frequências apresentadas na curva de resposta em frequência. Nas frequências onde ocorrem as maiores atenuações do sinal, a curva do atraso de grupo sofre uma queda acentuada. Analisando novamente a figura 4.21 com relação à distância fixa entre o transmissor e o receptor e com o aumento da distância da ramificação, pode-se observar que

a linha no patamar superior do espectro em todas as situações se manteve no mesmo patamar e sem alterações de *ripples*. Entretanto ocorreu o aumento das quedas acentuadas (*notches*) na curva do atraso de grupo exatamente nos mesmos pontos de frequência apresentados nas curvas de resposta em frequência. Para a situação com $l_1 = 15$ m, $l_2 = 45$ m e $d_1 = 5$ m, a curva do atraso de grupo apresentou mais *ripples* e um discreto aumento nas amplitudes dos *notches* quando comparado a situação com $l_1 = l_2 = 30$ m e $d_1 = 5$ m.

Para a simulação realizada para a casa popular, o aumento da distância entre o transmissor até o receptor ocorreu apenas à elevação do patamar superior da curva de atraso de grupo ocasionando o aumento do atraso da transmissão do sinal. Para a situação onde aumentou a distância da ramificação o resultado obtido foi na mesma direção de raciocínio verificado para o canal genérico. A resposta impulsiva do canal claramente mapeia o comprimento, o número, a atenuação e o tempo de atraso das trajetórias do sinal.

Pela análise da figura 4.22 pode-se observar para a distância fixa do ponto final da ramificação até o canal e com o aumento da distância entre o transmissor e o receptor, a amplitude do sinal da resposta impulsiva cai e o tempo para a transmissão completa de um pulso aumenta. Para a situação onde a distância do ponto transmissor até o receptor ficou fixo e variou-se a distância da ramificação, quanto maior é a distância da ramificação, maior o tempo para a transmissão do pulso e maior fica a amplitude dos sinais de eco. Com relação à comparação realizada quando $l_1 = l_2 = 30$ m e $d_1 = 5$ m com $l_1 = 15$ m, $l_2 = 45$ m e $d_1 = 5$ m observou-se o mesmo resultado na curva da resposta impulsiva.

Para o canal da casa popular observou-se que aumentando a distância entre o transmissor e o receptor, a resposta impulsiva obteve o mesmo comportamento para os três valores de distância utilizados entre o transmissor e o receptor. Para a situação onde aumentou apenas a distância da ramificação, o tempo para transmissão do pulso é maior com aumento dos picos dos sinais de eco.

Resposta em frequência

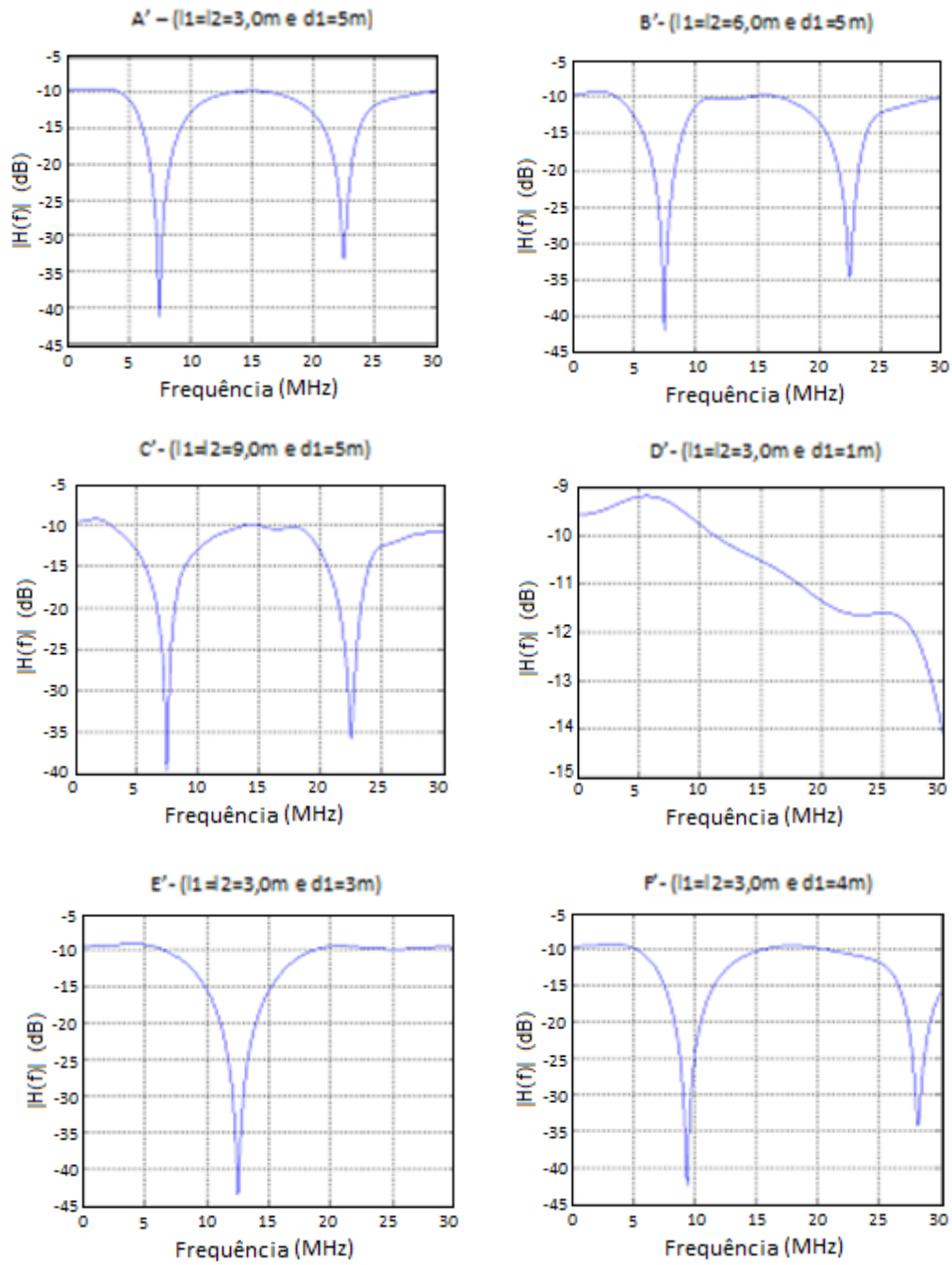


Figura 4.23 – Resposta em frequência do canal PLC para uma casa popular.

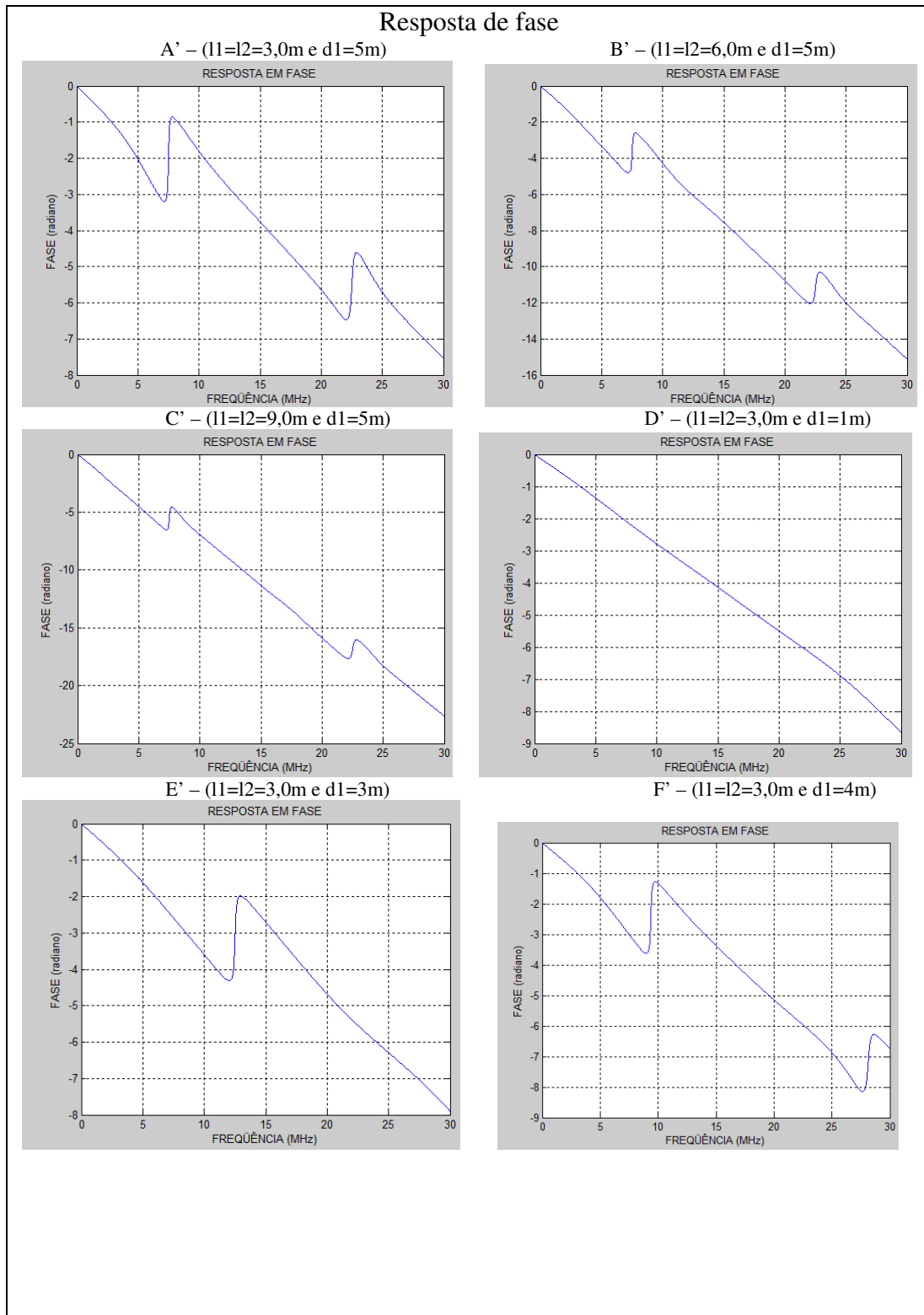


Figura 4.24 – Espectro de fase do canal PLC para uma casa popular.

Atraso de Grupo

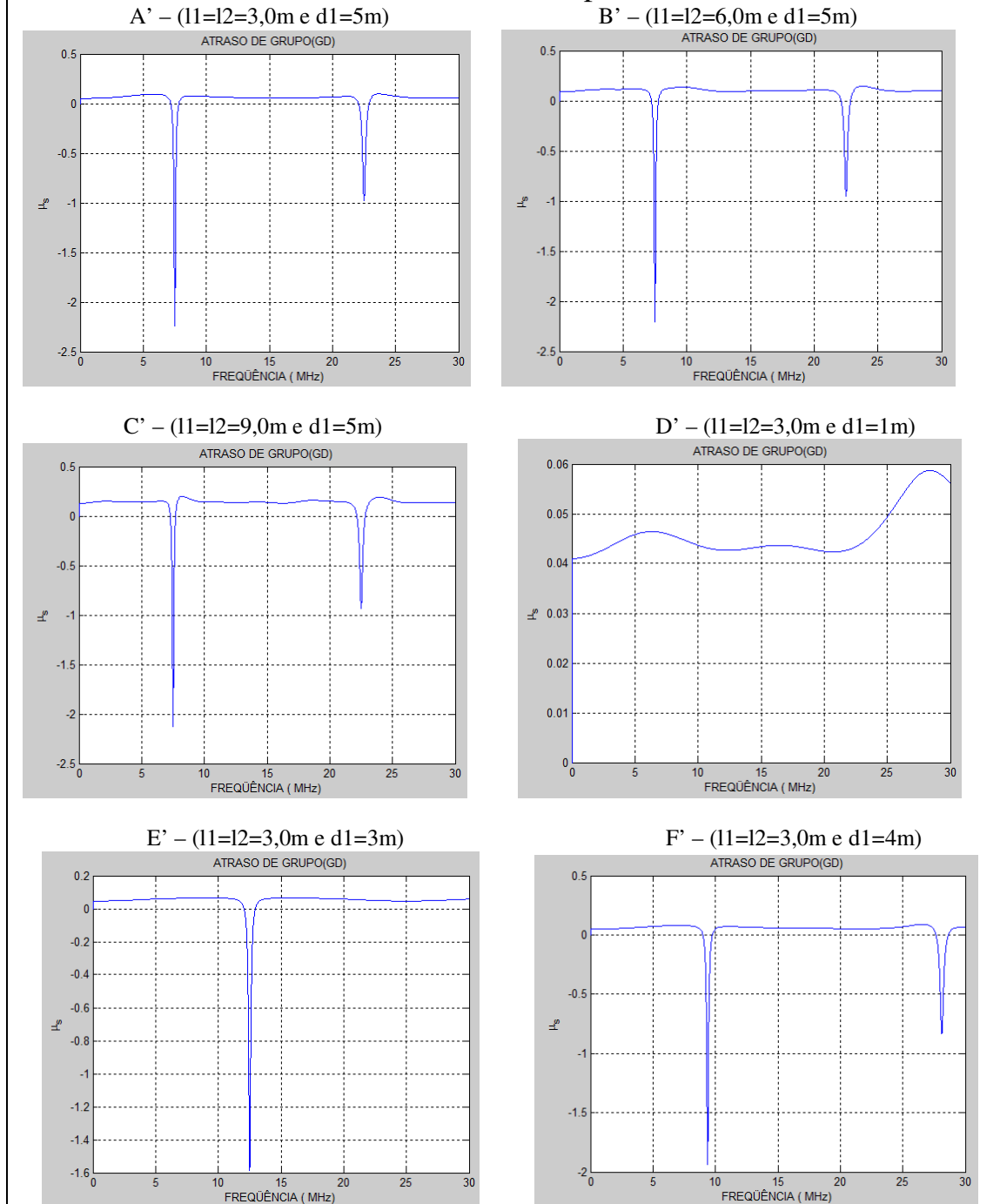


Figura 4.25 – Atraso de grupo do canal PLC de uma casa popular.

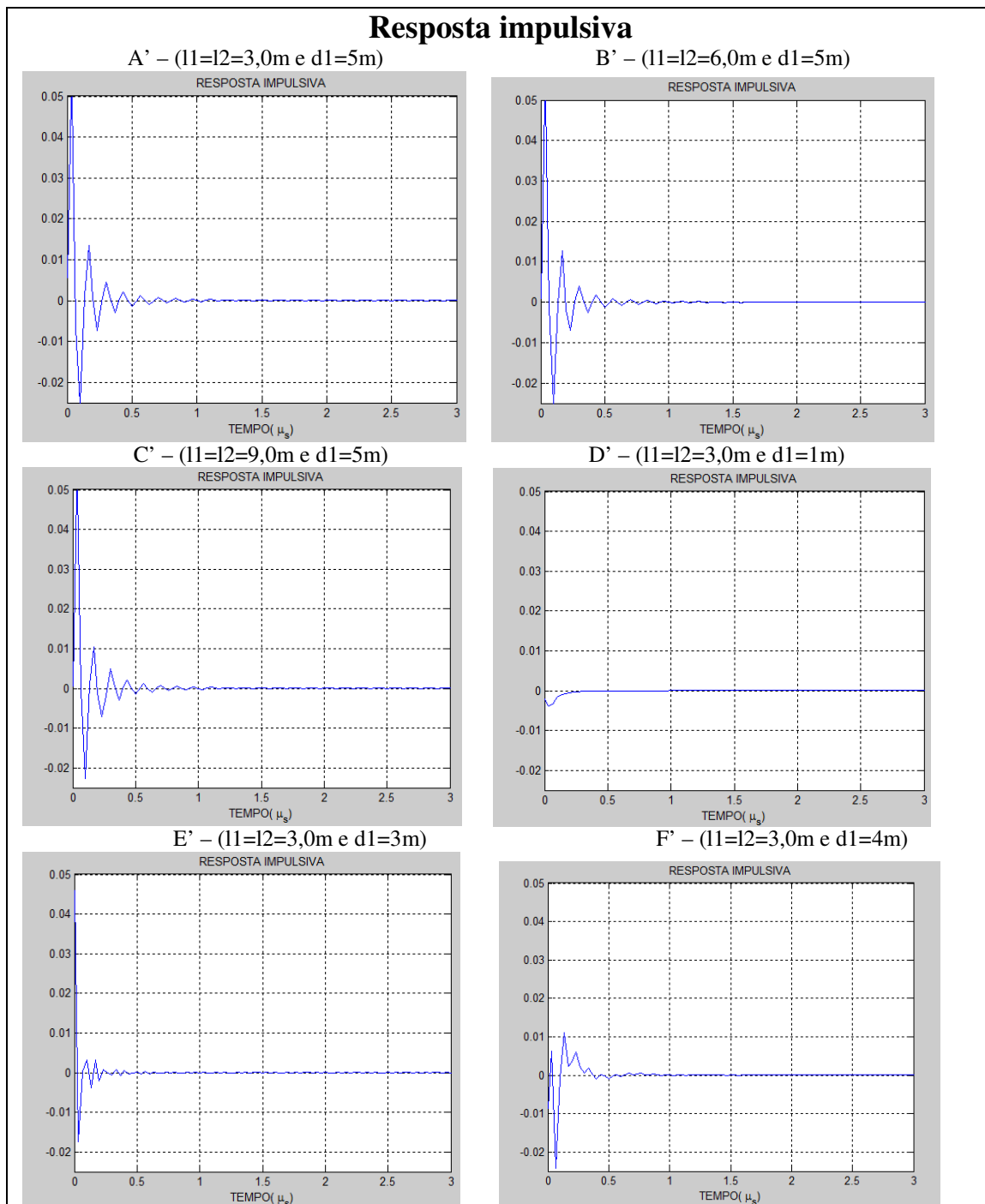


Figura 4.26 – Resposta impulsiva do canal PLC de uma casa popular.

A figura 4.27 (a) ilustra o comportamento do canal PLC em função da variação da distância do ponto final da ramificação até o nó da linha de transmissão de um canal genérico e a figura 4.27 (b) apresenta o resultado da simulação para uma casa popular. Para a análise do canal genérico, a distância entre o transmissor e o receptor foi de 40 m e a distância da

ramificação utilizado na simulação foi: 1 m, 5 m, 10 m, 15 m e 20 m. A carga Z_{br1} é circuito aberto e $Z_{c1} = Z_{c2} = Z_{dc1} = 85 \Omega$. Para o canal da casa popular os parâmetros utilizados foram: distância entre o transmissor e o receptor igual a 6 m e a distância da ramificação utilizado na simulação foi: 1 m, 2 m, 3 m, 4 m e 5 m. A carga Z_{br1} é circuito aberto e $Z_{c1} = Z_{c2} = Z_{dc1} = 85 \Omega$. Analisando o gráfico da figura 4.27 (a), é possível verificar para as distâncias da ramificação de 5 m até 20 m que a atenuação do sinal é aumentada com o crescimento da frequência.

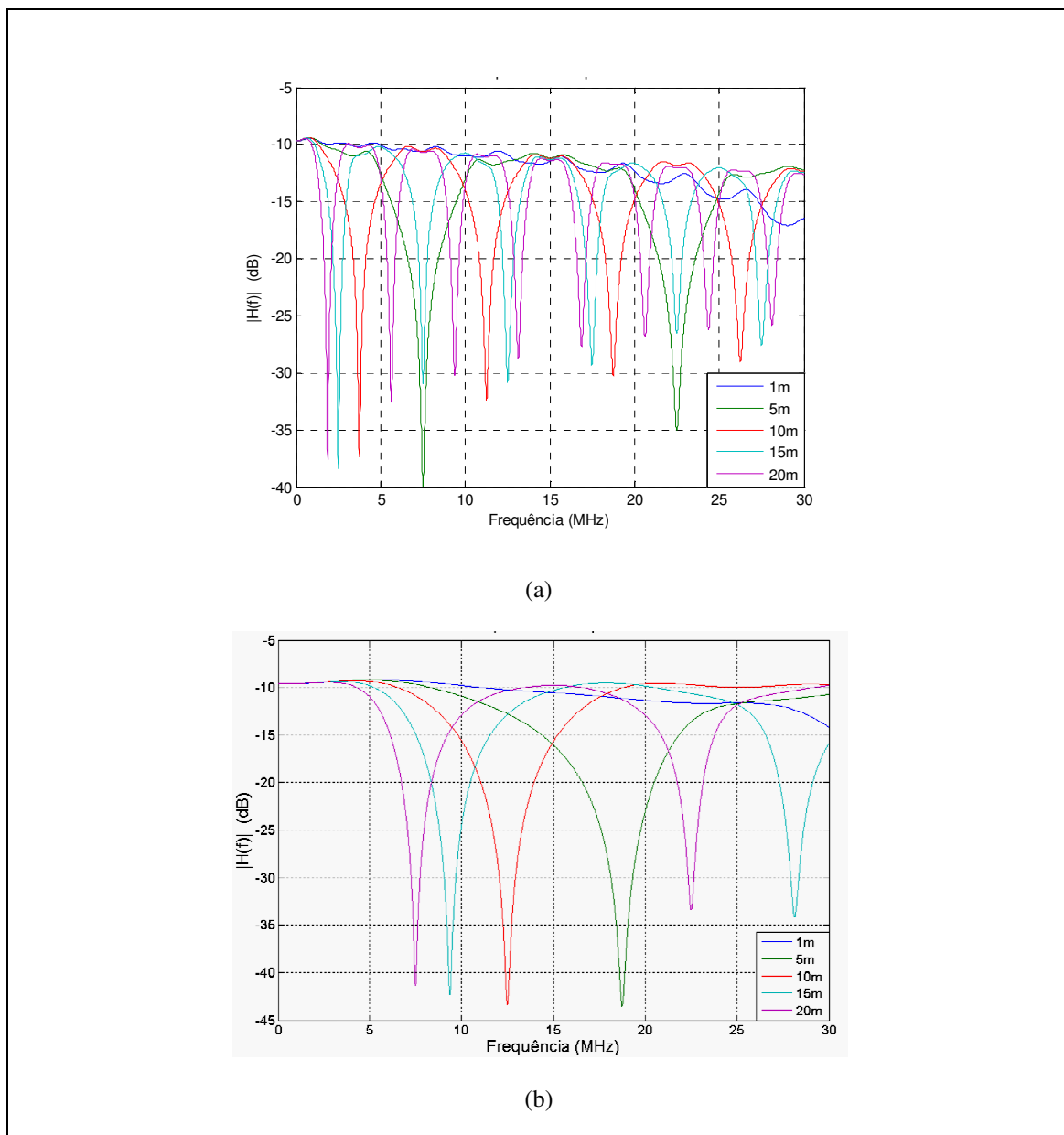
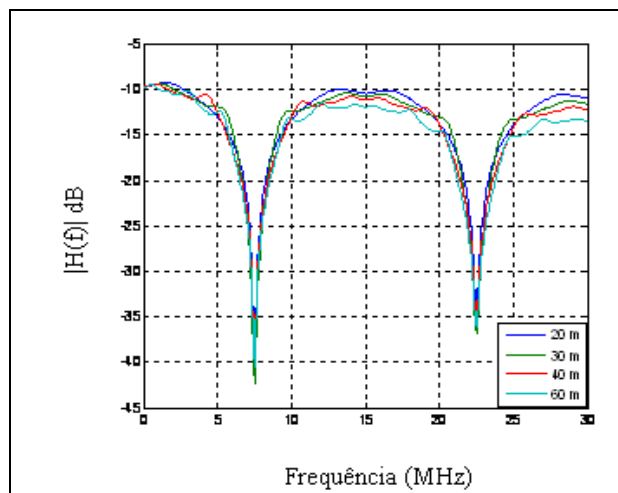


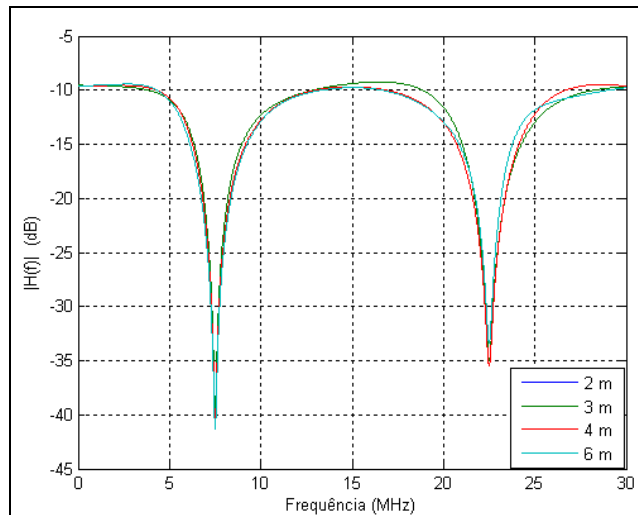
Figura 4.27 – Resultado da função de transferência da rede PLC com uma ramificação e em função da variação da distância desta ramificação: (a) canal genérico, (b) canal de uma casa popular.

Outra constatação obtida é a ocorrência do aumento de *notches* (cortes acentuados na atenuação do sinal) provocando ligeiras quedas na atenuação do sinal à medida que aumentou a distância do ponto final da ramificação na linha de transmissão. Quando utilizou a distância de 1 m, a atenuação do sinal foi muito baixa mesmo em função do aumento da frequência atingindo valor máximo de aproximadamente 17 dB. Para uma distância de 5 m do ponto da ramificação ocorreram dois *notches* enquanto para uma distância de 20 m, oito *notches* ocorreram [121]. Para o canal da casa popular ocorreu o mesmo comportamento da simulação realizada com o canal genérico. Entretanto, é importante citar que no canal da casa popular onde a distância entre o transmissor e o receptor é pequena, as amplitudes dos *notches* são maiores que as apresentadas no canal genérico e não ocorreram *ripples*.

Outra avaliação realizada para análise de desempenho da rede PLC é relativo à influência da distância entre o transmissor e o receptor mantendo fixa a distância da ramificação em 5 m. A figura 4.28 (a) ilustra o resultado da função de transferência do canal genérico da rede PLC com uma ramificação e diferentes distâncias da linha de transmissão entre os pontos do transmissor ao receptor. A figura 4.28 (b) refere-se ao canal da casa popular.



(a)



(b)

Figura 4.28- Função de transferência do canal PLC em função da distância da linha entre o transmissor e o receptor com uma ramificação: (a) canal genérico, (b) canal de uma casa popular.

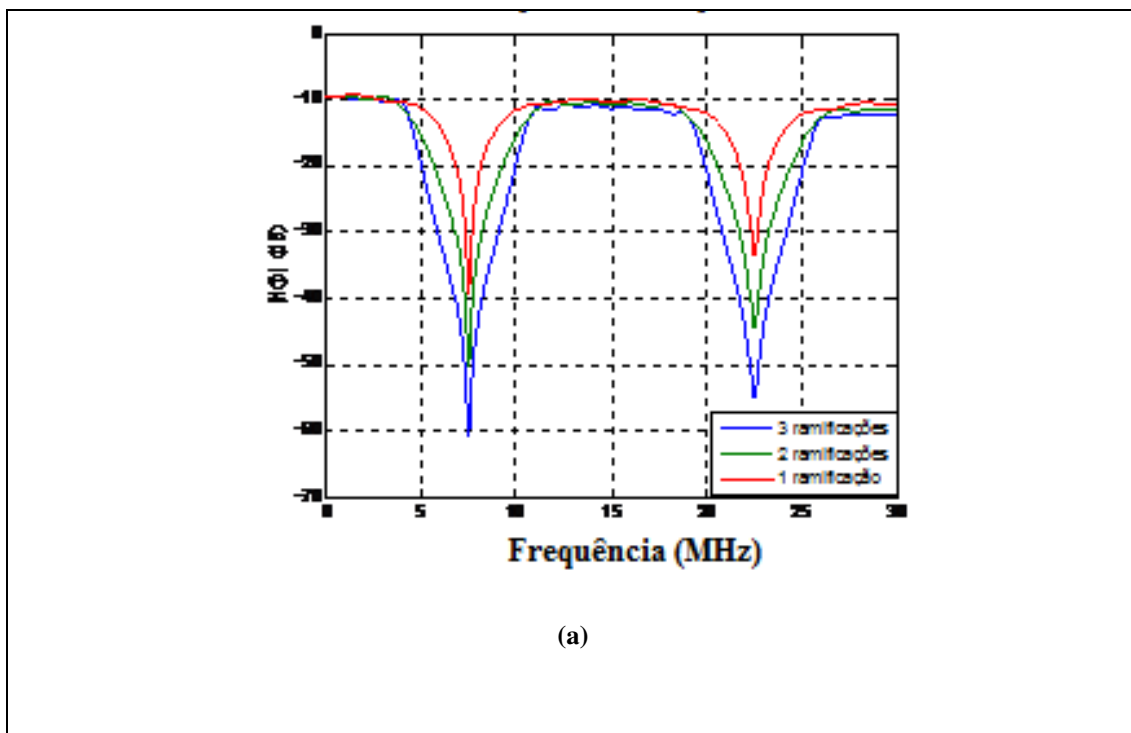
Para o canal genérico as distâncias utilizadas para a linha de transmissão foram: 20 m, 30 m, 40 m e 60 m. Os demais parâmetros necessários para a simulação não foram alterados. Para o canal utilizado para simular a casa popular, a distância do ponto da ramificação foi mantido em 5 m e os valores das distâncias utilizadas entre o transmissor e o receptor foram: 2 m, 3 m, 4 m e 6 m.

Analisando a figura 4.28 (a), é facilmente verificado que as posições dos *notches* não são dispersos em função do aumento da distância da linha de transmissão como ocorreu quando aumentou a distância do ponto final da ramificação ilustrado na figura 4.28. Isto ocorre porque a distância dos cabos da linha não afeta o valor da impedância da carga. Entretanto pode ser visto na figura 4.28 (a) que o aumento na distância da linha de transmissão provoca mais *ripples* nos picos da função de transferência e ocorre um discreto aumento da atenuação do sinal [121].

Para o canal da casa popular observou-se que aumentando a distância entre o transmissor e o receptor as posições e amplitudes dos *notches* não foram alterados e não se verificou *ripples* na curva da resposta em frequência. Com relação à avaliação do canal PLC

em função do número de ramificações foi estabelecido uma distância de 10 m entre cada ponto desde o transmissor até o receptor para um canal genérico e 1m para um canal PLC da casa popular. Foi realizado as simulações com 1, 2 e 3 ramificações . Para todas as ramificações a distância utilizada foi de 5 m para as duas situações avaliadas. Todas as impedâncias das cargas foram circuitos aberto. A figura 4.29 ilustra o resultado obtido da avaliação da rede PLC indoor em função do aumento do número de ramificações.

Pela observação da figura 4.29 (a) pode-se ver claramente que o aumento do número de ramificações provoca um aumento da atenuação do sinal. Para o caso da simulação com três ramificações, a resposta em frequência é quase 50 % mais atenuada do que no caso onde foi realizada a simulação com apenas uma ramificação. Outro fato importante que ocorre é o aumento de *ripples* à medida que aumenta o número de ramificações. Nesta análise verifica-se que as posições dos *notches* não são modificadas em função do aumento da frequência. Os profundos *notches* são consequência de múltiplos caminhos de propagação causado por ramificações igualmente espaçadas com as mesmas distâncias até o nó da linha de transmissão.



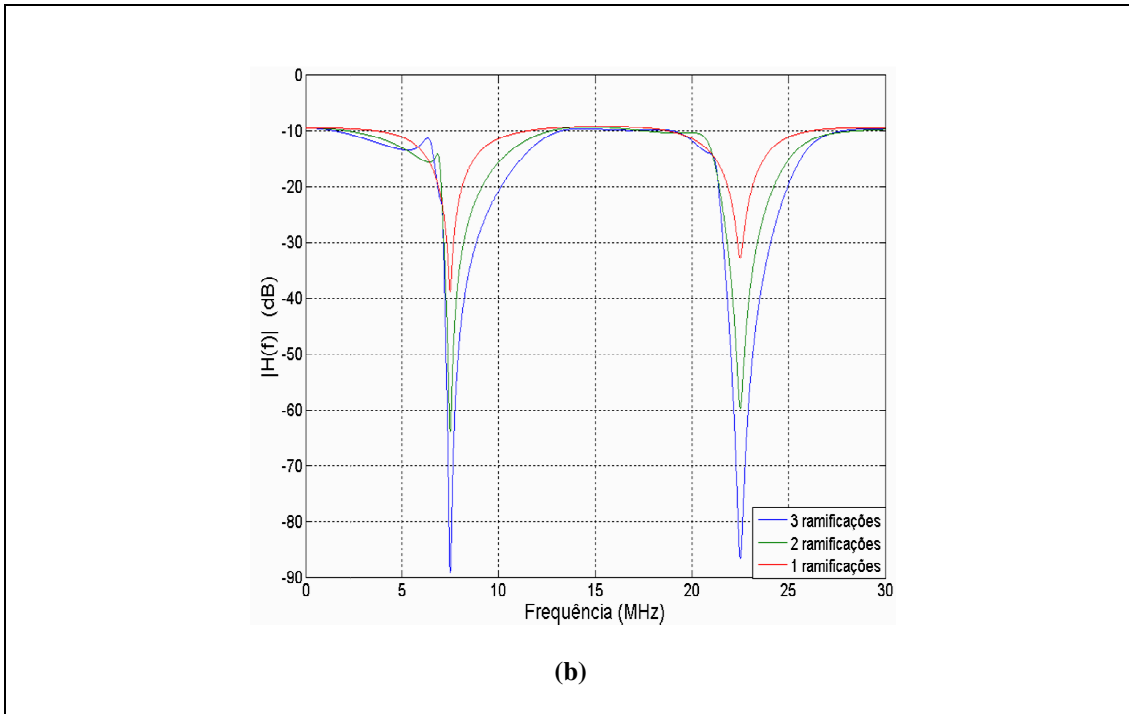


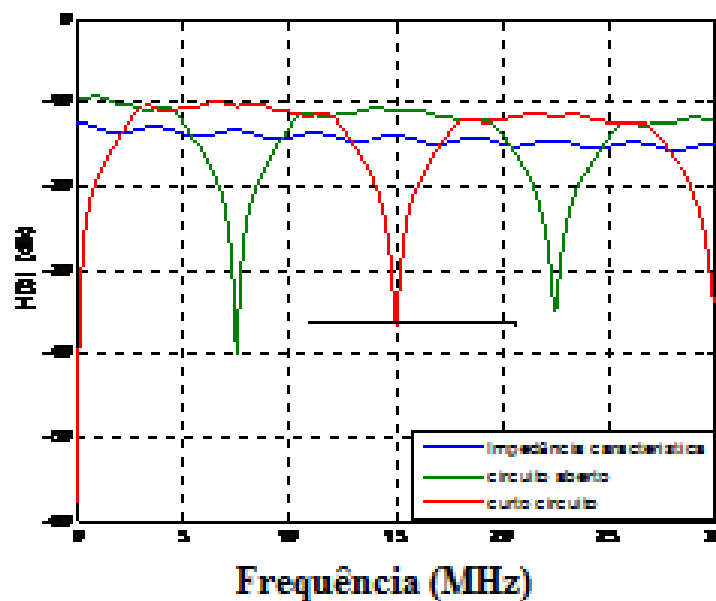
Figura 4.29 - Função de transferência da rede PLC com diferentes números de ramificações: (a) canal genérico, (b) canal para a casa popular.

Para o canal da casa popular o aumento do número de ramificações provoca aumento da amplitude dos *notches* e estas amplitudes são maiores que a verificada no canal genérico [121]. Outra observação realizada foi que não houve aparecimento de *ripples* com o aumento do número de ramificações para a casa popular.

Outro estudo realizado é a avaliação do canal PLC em função do casamento de impedância das cargas. O objetivo deste estudo é mostrar que a impedância na carga tem uma função muito importante para determinar a localização das amplitudes dos *notches* e os picos da atenuação do sinal. Para esta avaliação baseado no canal genérico a distância entre o transmissor e o receptor é de 40 m e a ramificação tem distância de 5 m, a impedância da carga utilizada foi: impedância constante (85Ω), circuito aberto e curto circuito. Para o canal da casa popular os valores alterados foram à distância de 6 m entre o transmissor e o receptor. A figura 4.30 (a) e (b) ilustra a função de transferência para a rede PLC com uma ramificação e diferentes valores da impedância da carga.

Observando a figura 4.30 (a) pode-se ver que a impedância da carga tem pouco efeito com o aumento da frequência, mas a amplitude do sinal aumenta com o aumento da frequência. Quando a impedância da carga é curto circuito e circuito aberto, a posição dos *notches* e picos são deslocados na frequência com a mesma atenuação. Entretanto para impedância característica (85Ω) os *notches* e picos não possuem amplitude relevante. Para o canal da casa popular o resultado obtido seguiu o mesmo comportamento do canal genérico com uma única diferença que corresponde ao não aparecimento de *ripples* na curva de resposta em frequência.

Com relação à avaliação da rede PLC em função da capacitância e da indutância no ponto da ramificação pode-se dizer que valores pequenos de C' e de L' afetam diretamente o denominador da função de transferência da rede PLC indoor.



(a)

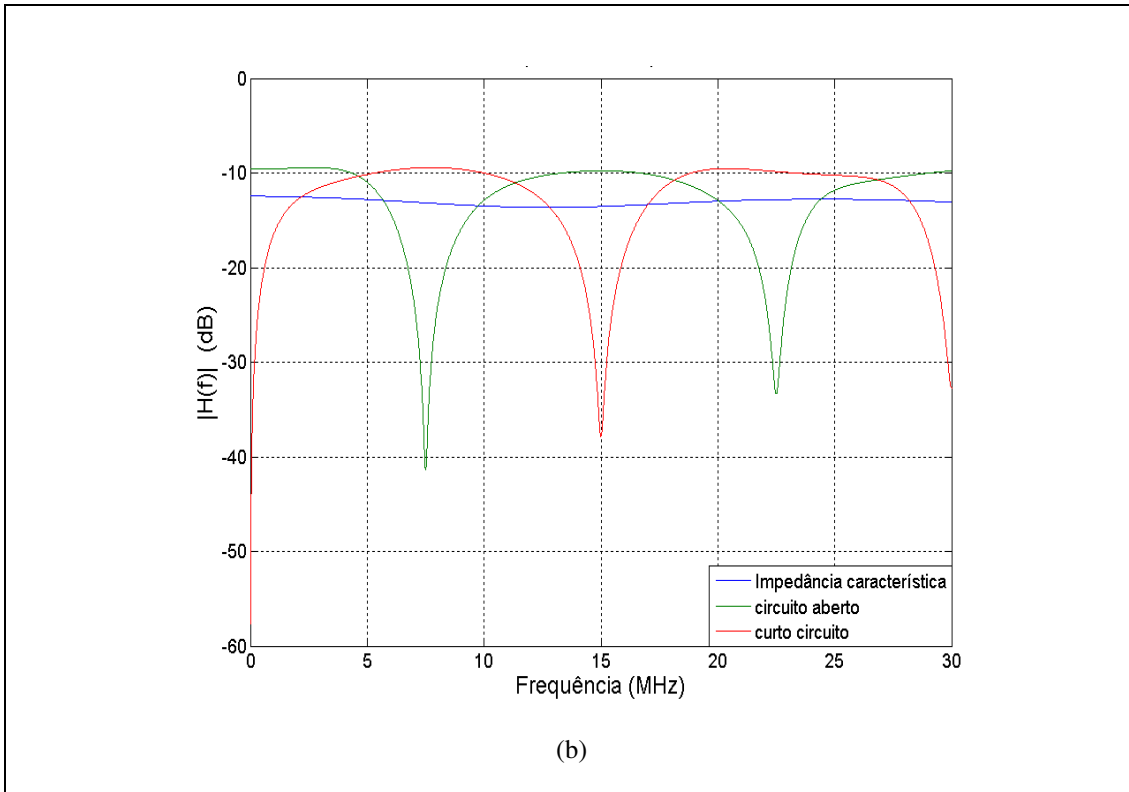


Figura 4.30- Função de transferência da rede PLC com uma ramificação e diferentes valores da impedância da carga: (a) canal genérico, (b) canal para uma casa popular.

Os *notches* e picos ocorrem na mesma frequência e apresentam *ripples* menores na atenuação e a magnitude do sinal é reduzida à medida que a frequência aumenta [89]. Isso representa uma maior estabilidade da atenuação do sinal. Os valores utilizados para a simulação são $L_1' = 640$ nH, $L_2' = 320$ nH e $L_3' = 160$ nH e $C_1' = 2$ nF, $C_2' = 1$ nF e $C_3' = 0,5$ nF. A distância entre o transmissor e o receptor é 40 m e a distância da ramificação é 10 m para um canal genérico.

A impedância da carga usada é circuito aberto e a impedância característica é 85Ω . Para o canal da casa popular, os valores utilizados foram: distância entre o transmissor e receptor igual a 6 m, distância da ramificação de 5 m e os demais valores de L' e C' foram mantidos os mesmos usadas no canal genérico. A figura 4.31 (a) e (b) ilustra a função de transferência da rede PLC em função da capacitância e indutância distribuída.

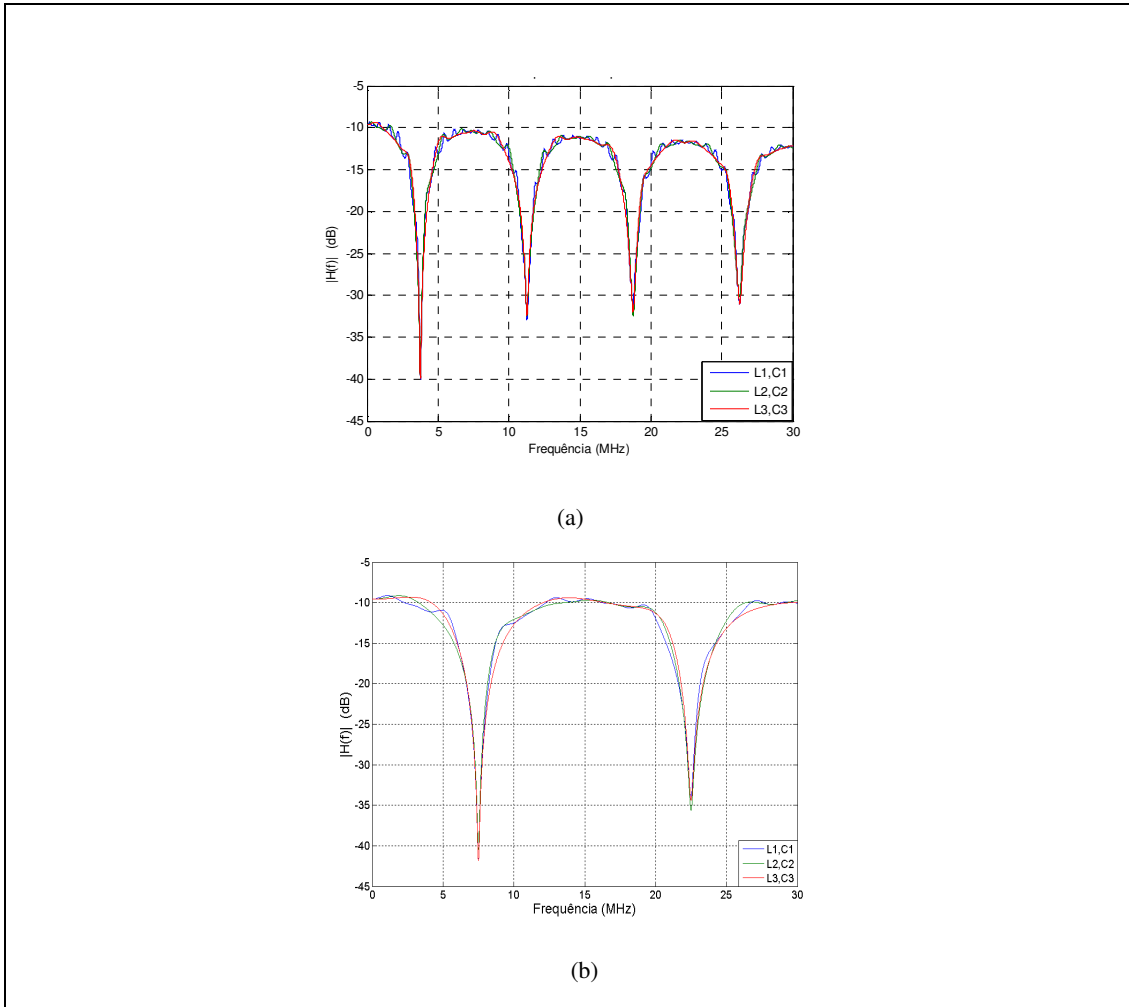


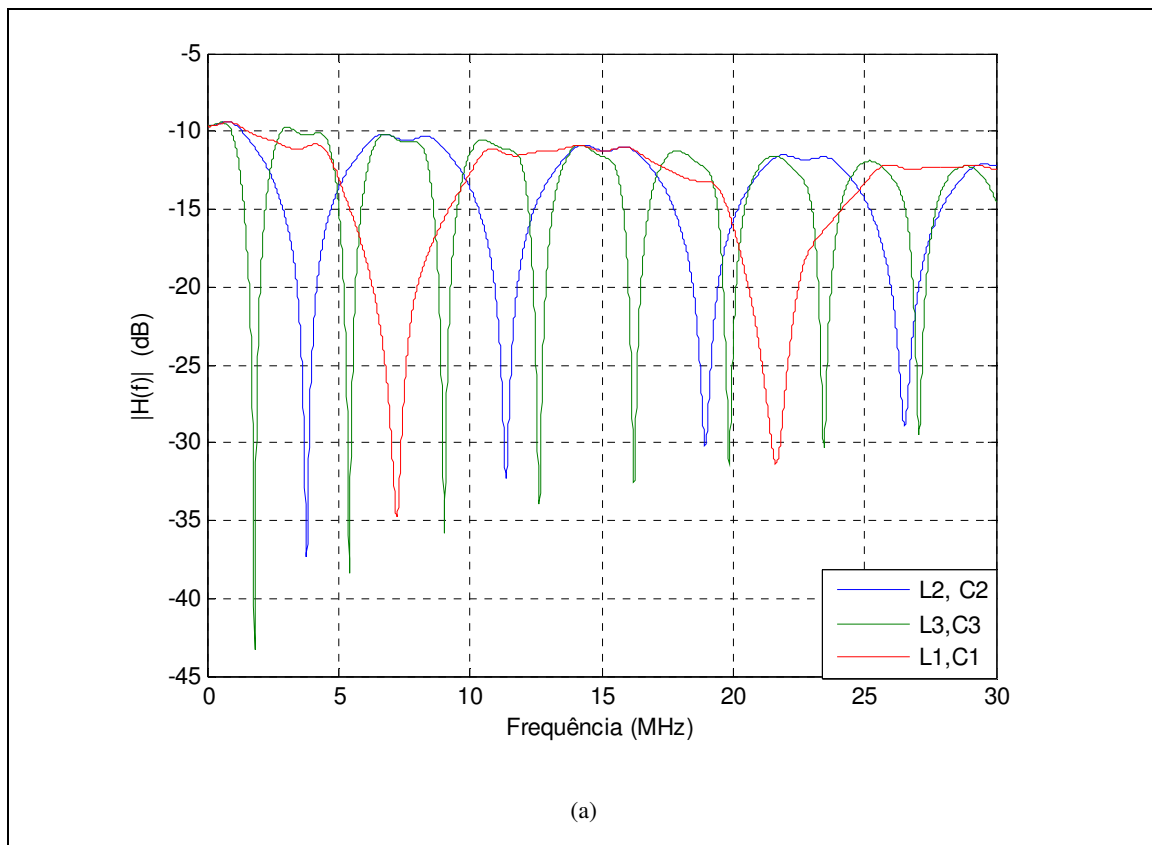
Figura 4.31 - Função de transferência da rede PLC com uma ramificação e diferentes valores de indutância e capacitância distribuída: (a) canal genérico, (b) canal PLC da casa popular.

Para o canal da casa popular observou-se que em comparação ao canal genérico ocorreu metade do número de *notches* e muito menos *ripples* na curva de resposta em frequência. O fato mais importante observado foi que a variação dos valores de C' e L' não produz alterações na curva de resposta em frequência.

Outro estudo realizado no canal PLC foi considerado em função da variação da indutância e da capacitância na carga. Para este caso no canal genérico foi realizado a simulação com os valores da capacitância na carga $C_1 = 140$ pF, $C_2 = 80$ pF e $C_3 = 160$ pF. Os valores da indutância na carga foram $L_1 = 30$ μ H, $L_2 = 60$ μ H e $L_3 = 120$ μ H. A distância entre o transmissor e o receptor é de 40 m e a distância do ponto de ramificação é de 10 m.

A impedância da carga utilizada é circuito aberto e a indutância característica é de 85Ω . Para o canal da casa popular se os valores de L' e C' da primeira parte da linha de transmissão são muito pequenos, a resposta em frequência do canal terão *ripples* e magnitude de atenuação do sinal menores indicando uma condição de transmissão de dados mais estável. Quando valores de C' e L' da segunda parte da linha de transmissão variam afeta diretamente o valor da impedância na carga. Para valores baixos de L' e C' os *notches* e picos não se mantém na mesma frequência ocorrendo o deslocamento dos *notches* para a direita [121]. A figura 4.32 representa o resultado obtido da função de transferência da rede PLC com uma ramificação e diferentes valores para a indutância e capacitância na carga.

Observando a figura 4.32 (a) verifica-se que aumentando o valor da indutância e da capacitância da carga, o número de *notches* e a magnitude da resposta em frequência da função de transferência também aumentam no canal PLC indoor.



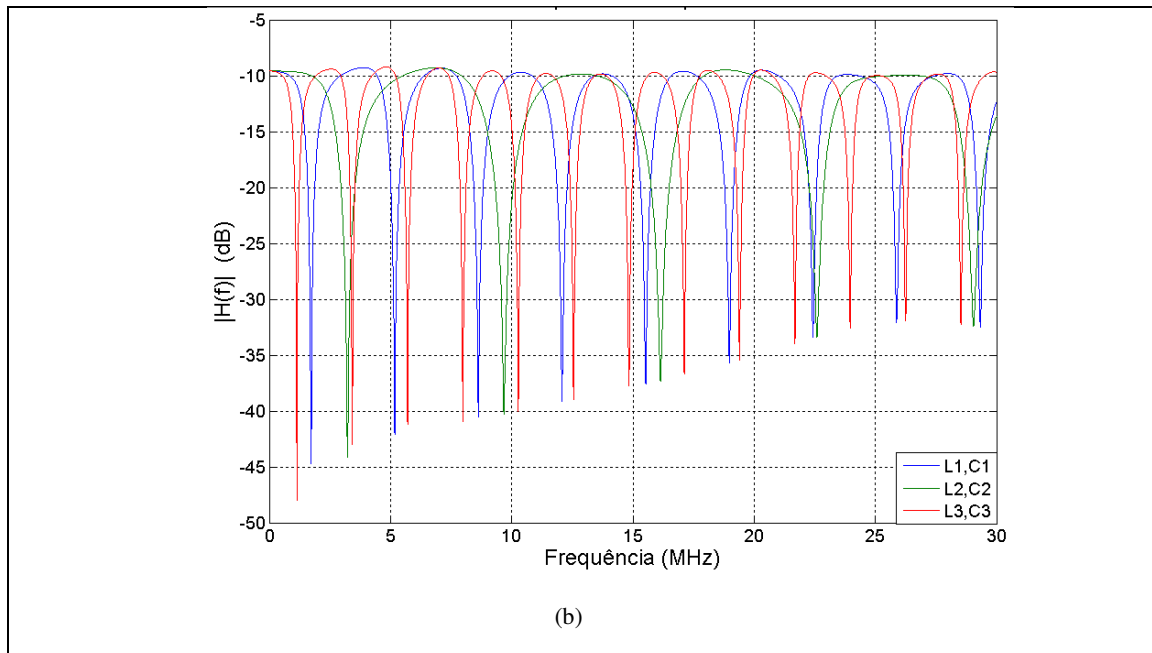


Figura 4.32 - Função de transferência da rede PLC com uma ramificação e diferentes valores de indutância e capacitância da carga: (a) canal genérico, (b) canal de uma casa popular.

Continuando a avaliação do canal da rede PLC indoor foi realizado a simulação variando o valor da constante a_1 que é a principal responsável pelo termo de atenuação da função de transferência e representa juntamente com a distância da linha de transmissão entre o transmissor e o receptor a característica passa-baixa para o canal. Conforme estudado na seção 4.7.4 que refere aos elementos da rede e revendo a figura 4.33 confirma-se que uma mínima variação de a_1 influencia na resposta em frequência e na amplitude do canal PLC.

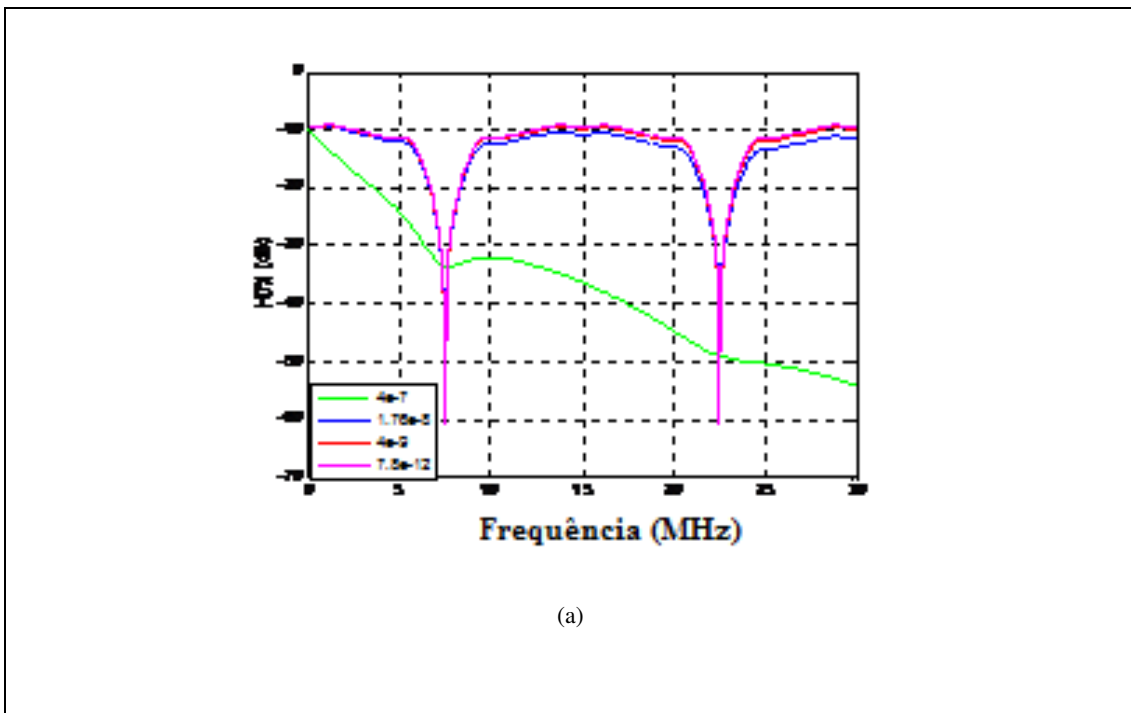
Desse modo a resposta da simulação apresentada na figura 4.33 (a) representa o comportamento do canal genérico da rede PLC indoor em função de diferentes valores de a_1 para o método das matrizes.

Os valores de a_1 utilizados na simulação foram 4×10^{-7} , $1,76 \times 10^{-8}$, 4×10^{-9} e $7,8 \times 10^{-12}$. Os demais valores utilizados na simulação foram $a_1 = 1,76 \times 10^{-8}$, $Z_l = 50 \Omega$, $Z_s = 50 \Omega$, $l_1 = l_2 = 15$ m, $l_{d1} = 5$ m, $Z_{cd1} = 85 \Omega$ e $Z_{br1} = 1 \times 10^{20} \Omega$. Para o canal da casa popular modificou-se apenas a distância do transmissor até o receptor para 3 m e o resultado obtido é mostrado na figura 4.33 (b).

Pela observação do gráfico da figura 4.33 (a) e (b) e pelo estudo realizado pode verificar que valores de a_1 muito baixos produzem uma alta atenuação no canal PLC. Para valores de a_1 superiores a 5×10^{-7} a atenuação no canal PLC genérico ultrapassa valores de 60 dB na frequência de 30 MHz. Para valores de a_1 maiores que aproximadamente $7,8 \times 10^{-12}$ a variação da atenuação do canal passa a ficar sem alterações em todas as faixas de frequência.

Com relação à variação do fator k que também atua diretamente na resposta de atenuação do sinal no canal PLC genérico, foi realizada a avaliação considerando os valores de k iguais a 0,2; 0,5; 0,75 e 0,85. Os demais valores utilizados para a simulação foram o seguinte: $a_1 = 1,76 \times 10^{-8}$, $Z_1 = 50 \Omega$, $Z_s = 50 \Omega$, $l_1 = l_2 = 15 \text{ m}$, $l_{d1} = 5 \text{ m}$, $Z_{cd1} = 85 \Omega$ e $Z_{br1} = 1 \times 10^{20} \Omega$.

Desse modo a resposta da simulação apresentada na figura 4.34 (a) representa o comportamento do canal da rede PLC indoor genérico em função de diferentes valores de k para o método das matrizes. Para o canal de uma casa popular, o único parâmetro que modificou foi $l_1 = l_2 = 1,5 \text{ m}$. O resultado obtido pela simulação é apresentado na figura 4.34 (b).



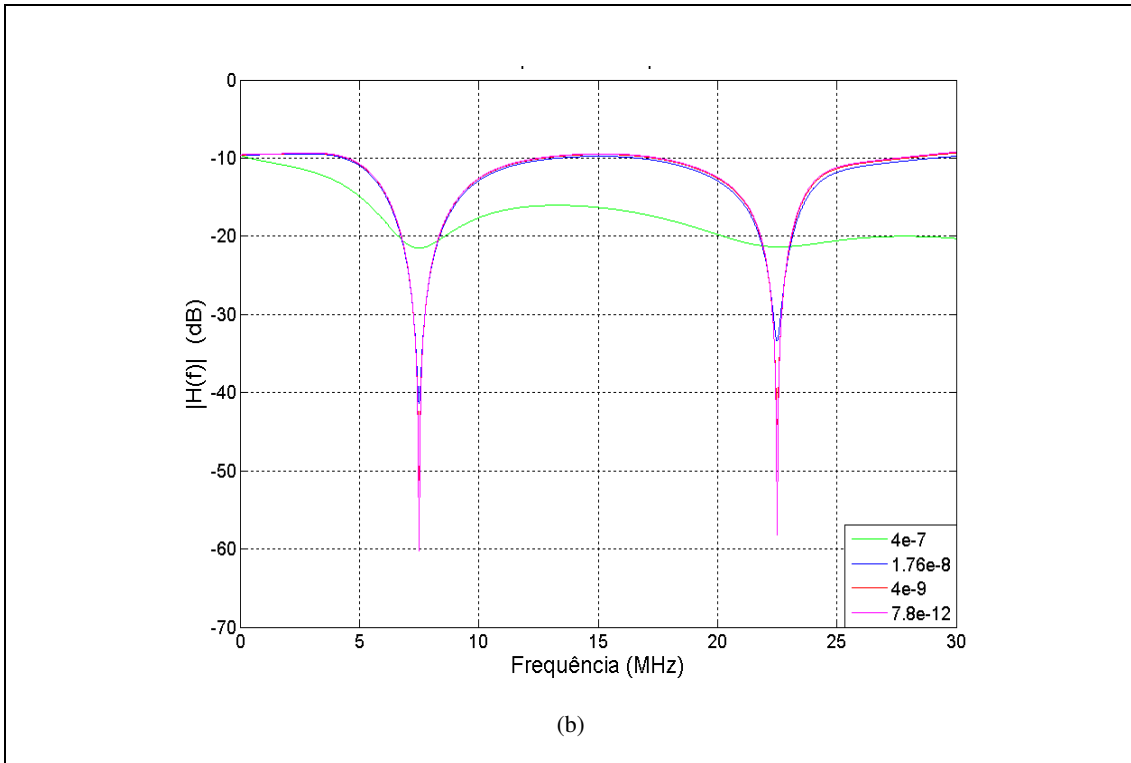
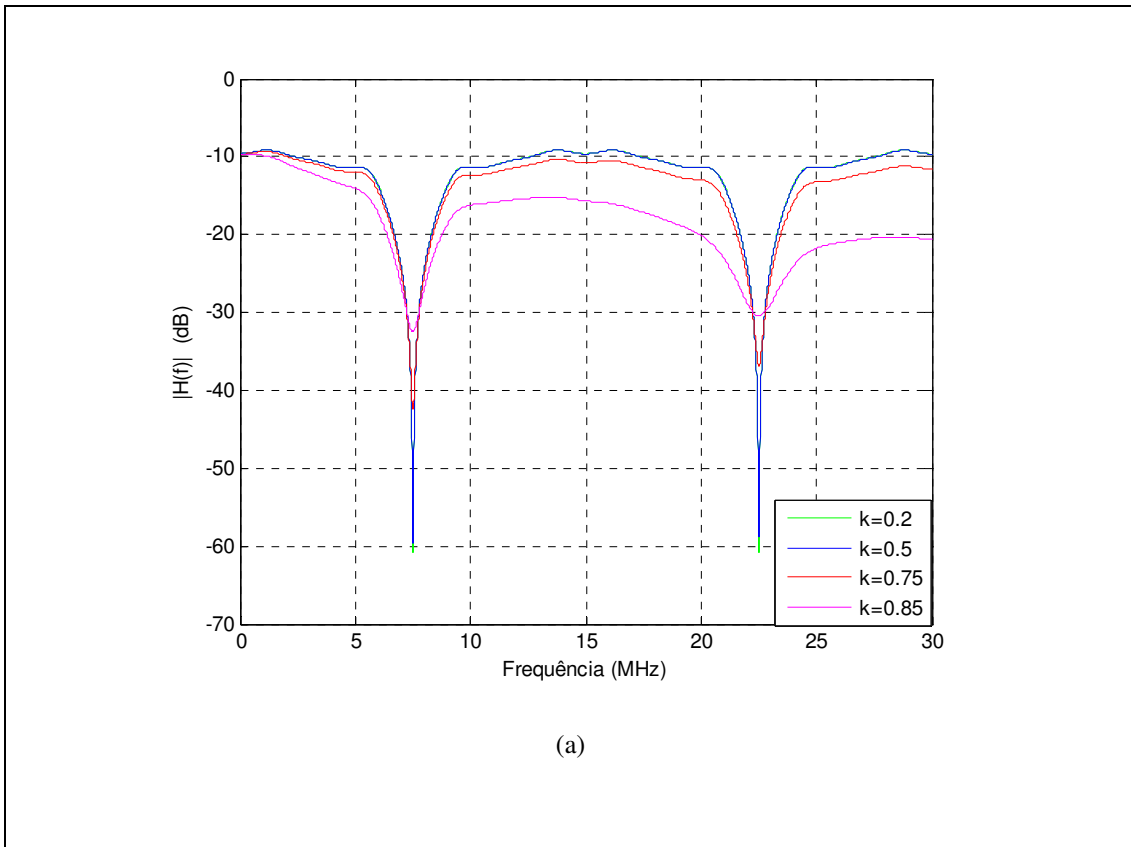


Figura 4.33 - Função de transferência da rede PLC com uma ramificação e diferentes valores de a_1 : (a) canal genérico, (b) canal de uma casa popular.



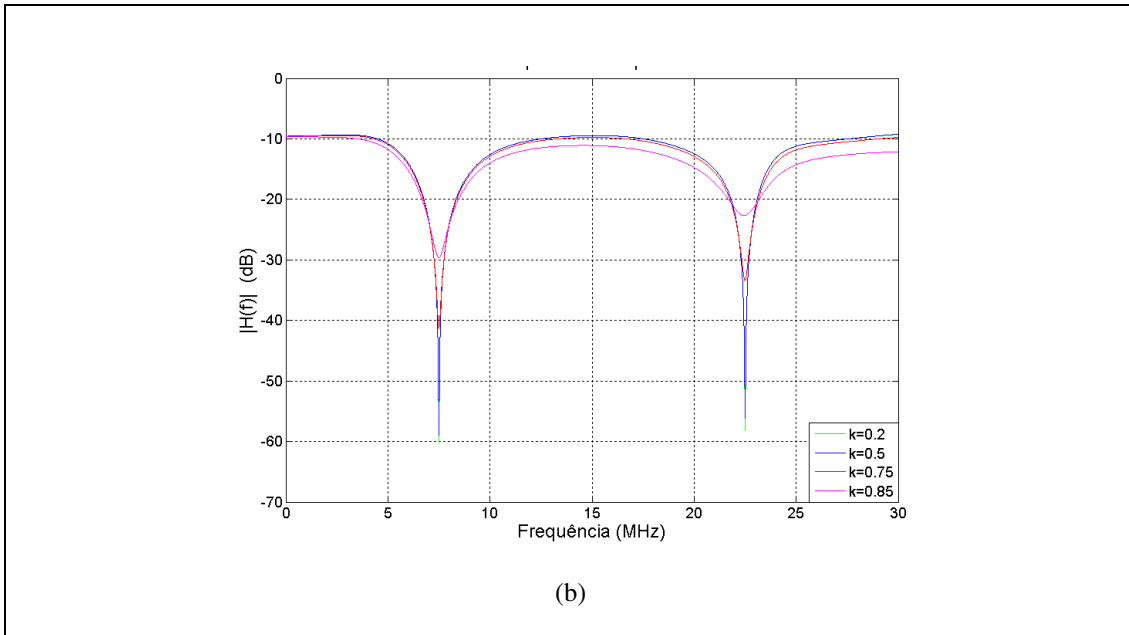


Figura 4.34 - Função de transferência da rede PLC com uma ramificação e diferentes valores de k: (a) canal genérico, (b) canal para uma casa popular.

Observando a figura 4.34 (a) e (b) constata-se que aumentando o valor de k, a atenuação na resposta em frequência aumenta, porém os pontos onde ocorrem os *notches* são reduzidos conforme se aumenta o valor de k. A curva de resposta em frequência para $k = 0,2$ e $0,5$ apresentaram a mesma atenuação do sinal divergindo sucintamente apenas nos pontos de *notches*. Entretanto pode-se dizer que para $k = 1$ ocorre uma desestabilização passando a resposta em frequência ter uma curva quase linear com altos valores de atenuação do sinal.

4.5 CONCLUSÕES

Este capítulo apresentou o estudo da propagação do sinal sobre uma linha de transmissão referenciando as principais equações que descrevem uma LT e sua aplicação na condição de múltiplos percursos. Em seguida foi abordado o modelo do canal no domínio do tempo e da frequência. Foi também realizada por meio de simulações no MATLAB, a avaliação da função de transferência do canal PLC. Dando continuidade foi apresentado um estudo pelo método das matrizes do canal PLC através das curvas da função de transferência

para um canal PLC *indoor* genérica e para um canal PLC de uma casa popular. As simulações realizadas referem-se à resposta em frequência, resposta de fase, atraso de grupo e resposta impulsiva. Avançando no estudo do canal PLC avaliou-se o resultado da função de transferência da rede PLC com uma ramificação e em função da variação da distância desta ramificação. Em sequência, avaliou-se a função de transferência do canal PLC em função da distância entre o transmissor e o receptor e com uma ramificação. Prosseguindo, foi apresentado o resultado da função de transferência do canal PLC com diferentes números de ramificações. Também foi apresentada a curva da função de transferência para a rede PLC com uma ramificação e diferentes valores da impedância de carga, para em seguida analisar a variação da indutância e capacitância distribuída do transmissor e do receptor.

Outra avaliação foi realizada variando os valores de indutância e capacitância da carga. Como última avaliação do canal PLC, foi verificada o comportamento da curva da função de transferência em função de diferentes valores de a_1 e em sequência o resultado obtido em função de diferentes valores de k .

Pelo estudo realizado observou-se que a resposta em frequência e o atraso de grupo para a casa popular apresentam menos *ripples*, e para distâncias bem curtas entre o transmissor e o receptor, menos *notches* ocorrem. Com relação à resposta de fase constatou-se que na casa popular ocorreram valores bem maiores de picos de distorção para distâncias curtas entre o transmissor e o receptor.

CAPÍTULO 5

AValiação DE DESEMPENHO DE UMA REDE PLC EM AMBIENTE INDOOR DE CASAS POPULARES

5.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo volta-se para apresentação de medidas, análises e avaliação de desempenho de uma rede via PLC em ambientes indoor de casas populares de área interna construída inferior a 40 m² que utiliza o sistema monofásico para a alimentação da rede elétrica de entrada. As casas estão localizadas na periferia de Cuiabá distantes aproximadamente 25 Km do centro da cidade. O capítulo tem início apresentando o resultado da avaliação de desempenho da rede PLC com relação à operação dos diversos algoritmos *Congestion Avoidance* TCP com fontes de tráfego CBR e VBR em função do aumento da taxa de erro no canal. Esta análise é importante porque a arquitetura de rede utilizada nos adaptadores PLC é o TCP/IP (*Transmission Control Protocol/Internet Protocol*). O protocolo TCP proporciona um serviço de *stream* confiável, com controle de fluxo fim a fim entre duas máquinas de velocidade de processamento arbitrárias que usem o mecanismo IP não-confiável para comunicação.

O protocolo TCP aplicado às redes PLC apresenta um baixo desempenho devido ao tempo de atraso de propagação, às características de BER e múltiplos caminhos.

Em ambientes de rede PLC, onde ocorrem muitas perdas de pacotes ocasionadas por erros de transmissão provocados, principalmente pelo ruído que numa rede PLC ocorre com bastante intensidade, o TCP “entende” como congestionamento qualquer segmento perdido (ou o recebimento de três ACKs fora de ordem) e reduz o valor da CWND para dar continuidade ao processo de transmissão de novos segmentos.

Também foi verificado o tamanho ideal da janela CWND por meio da avaliação da CWND em função do tempo de transmissão na rede PLC. Esta análise é importante porque é possível ajustar no software do adaptador PLC o tamanho desejado da CWND.

Em seguida, são mostrados os resultados de medições das principais fontes de ruído encontrados em casas populares proporcionado por diversos tipos de eletrodomésticos como televisão, ventilador, liquidificador, barbeador, secador de cabelos, lâmpada fluorescente compacta, fonte chaveada, batedeira e dimmer. As medições dos sinais de ruído foram realizadas com osciloscópio, analisador de espectro convencional e com o analisador de sinais vetoriais em tempo real.

Dando sequência são citados os equipamentos e materiais utilizados para avaliação de desempenho de uma rede via PLC, enfatizando as características técnicas dos adaptadores PLC. Em seguida é mostrada as configurações da rede via PLC para o estudo da avaliação de desempenho em diversas situações com e sem a utilização de filtros PLC.

Logo após, são mostrados os resultados obtidos da vazão da rede via PLC em função do aumento da CWND e do aumento da distância entre o transmissor e o receptor. Dando continuidade, neste capítulo são apresentados os resultados das medições de sinais na rede elétrica realizada com o osciloscópio digital, o analisador de espectro e o analisador de sinais vetoriais em tempo real dos diversos eletrodomésticos produzindo ruído na rede elétrica via PLC.

Na parte final são apresentadas as medições da qualidade de energia elétrica da rede via PLC sobre a influência da atuação dos principais eletrodomésticos encontrados numa casa popular dando ênfase a análise do DHT (Distorção Harmônica Total) e nas medidas de tensão e corrente na rede elétrica.

5.2 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DA REDE PLC INDOOR EM FUNÇÃO DOS ALGORITMOS TCP/IP

Nesta seção avalia-se o desempenho dos algoritmos TCP Tahoe, Reno, NewReno, SACK e Vegas, que apresentam comportamentos diferentes em situações em que múltiplas perdas de segmentos ocorrem em uma determinada CWND [122,123,124,125,126,127,128]. Nesta seção são apresentados os resultados dessa análise para identificar qual delas apresenta o melhor desempenho nas redes PLC. Tendo em vista a execução de uma análise mais criteriosa, a avaliação comparativa dos algoritmos é realizada com as fontes de tráfego CBR (*Constant Bit Rate*) e VBR (*Variable Bit Rate*)[129,130, 131,132,133].

De modo a investigar e comparar as implementações *Congestion Avoidance* TCP [39, 134] foi utilizado uma configuração da rede conforme ilustrado na figura 5.1. Para a simulação, a taxa de dados utilizada foi de 100 Mbps, RTT = 25 ms, tamanho do pacote = 576 bytes. As taxas de erro utilizadas foram: próxima de zero, 1 %, 2 % e 5 %, o valor da CWND é de 980 bytes, tamanho da janela inicial igual a 1 e as fontes de tráfegos utilizadas foram CBR e VBR. Os resultados foram obtidos mediante simulações realizadas utilizando o NS (*Network Simulator*) [135].

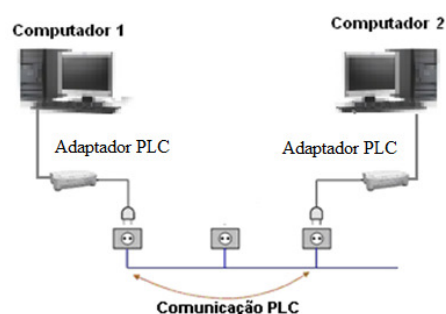


Figura 5.1 – Configuração da rede PLC.

A figura 5.2 apresenta o resultado comparativo do desempenho dos algoritmos TCP operando em redes PLC, considerando diferentes taxas de erro. Pela análise da figura 5.2 quando o valor de BER é próximo de zero, todas as implementações TCP alcançam o melhor desempenho para uma rede PLC e todos os algoritmos TCP apresentam resultados praticamente

iguais [63,131]. Com o aumento da taxa de erro o desempenho de todas as implementações TCP são reduzidos. Para a taxa de erro de 5 % pode ser verificado pela figura 5.2 que o desempenho da rede PLC cai aproximadamente 40 %.

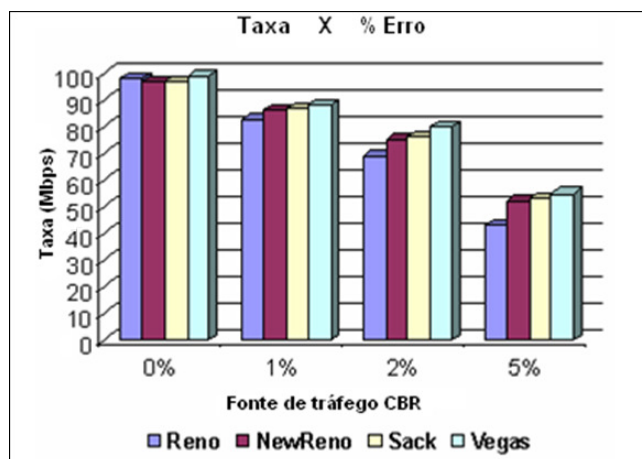


Figura 5.2 – Desempenho dos algoritmos *Congestion Avoidance* TCP em função do aumento da taxa de erro numa fonte de tráfego CBR.

Desse modo é de vital importância a utilização de filtros para eliminar ruídos na rede elétrica e um sistema de modulação robusto e utilizar mecanismos de controle de erro [135,136]. Para a situação onde a taxa de erro é considerada alta como ocorre nas redes PLC, o TCP Vegas apresenta desempenho superior a todas as outras implementações TCP para uma fonte de tráfego CBR. Constata-se facilmente que o TCP Vegas obteve o melhor desempenho para a rede PLC porque apresentou maior taxa de transmissão de dados. Isso se deve ao fato do Vegas utilizar um mecanismo diferenciado de retransmissão, que ao receber um ACK duplicado faz com que o algoritmo verifique se a diferença entre o tempo atual e o tempo registrado para o último segmento não reconhecido é maior que o valor do *timeout*. Sendo maior, o algoritmo retransmite o segmento sem ter que esperar por três ACKs duplicados. A figura 5.5 mostra o resultado do desempenho dos algoritmos *Congestion Avoidance* TCP, utilizando uma fonte de tráfego VBR. Para esta situação novamente o TCP Vegas apresentou o melhor desempenho entre todas as implementações TCP avaliadas.

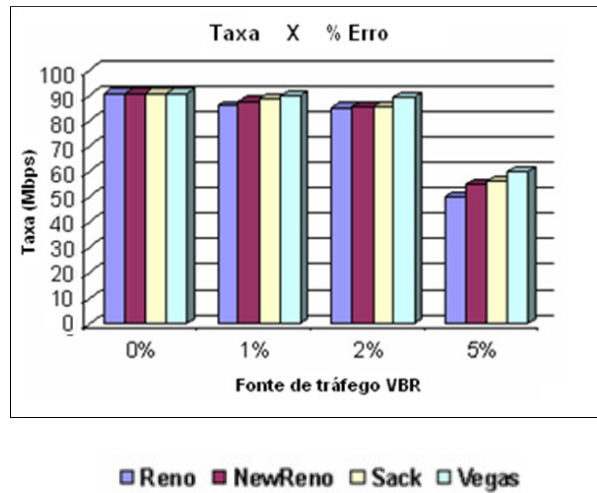


Figura 5.3 - Desempenho dos algoritmos *Congestion Avoidance TCP* em função do aumento da taxa de erro numa fonte de tráfego VBR.

As figuras 5.4 e 5.5 apresentam a comparação entre as implementações TCP com relação a CWND para as fontes de tráfego CBR e VBR.

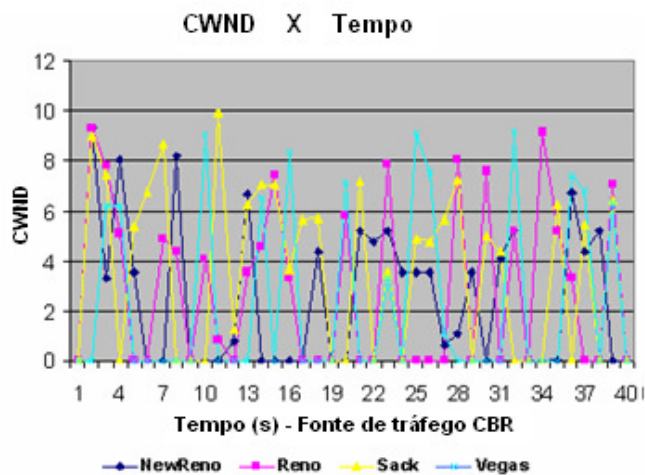


Figura 5.4 - Comparação da CWND x tempo entre as implementações TCP: Fonte de tráfego CBR.

Para as fontes de tráfego CBR e VBR, durante todo o tempo de simulação, em nenhuma vez o TCP Vegas aguardou o *timeout* expirar para retransmitir os segmentos perdidos. Este resultado pode ser comprovado visualizando os gráficos mostrados nas figuras 5.4 e 5.5. Desse

modo, constata-se novamente que o algoritmo TCP Vegas é o mais indicado para redes que apresentam alto valor de BER como é o caso da rede PLC.

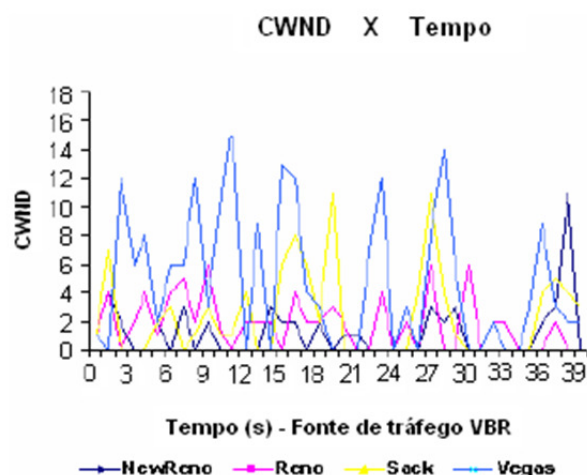


Figura 5.5 - Comparação da CWND x tempo entre as implementações TCP: Fonte de tráfego VBR.

5.3 MEDIÇÕES DE FONTES DE RUÍDO ENCONTRADOS EM CASAS POPULARES

Até o momento não há normas que regulamentam a geração de ruídos por parte de eletrodomésticos e a forma como a energia é distribuída não considera restrições à propagação do mesmo. Os ruídos esporádicos, gerados por descargas atmosféricas, e os instantes que ocorrem acionamento/desligamento de cargas são bastante consideráveis, mas são menos importantes comparados a ruídos contínuos ou intermitentes gerados por certos eletrodomésticos. Esses aparelhos produzem ruídos que se estendem por um amplo espectro de frequências, chegando à faixa dos MHz. A seguir são apresentadas as principais fontes de ruído intermitente ou contínuo que prejudicam a qualidade da transmissão de dados numa rede PLC.

A medição do ruído é realizada por meio de medida direta na rede de energia elétrica. As medições são executadas com osciloscópio ou com o analisador de espectro após o circuito de acoplamento conforme ilustrado nas figuras 5.6 e 5.7.

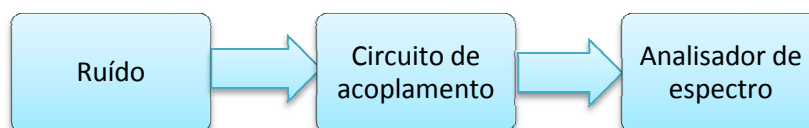


Figura 5.6 – Mecanismo para medição do espectro do sinal.

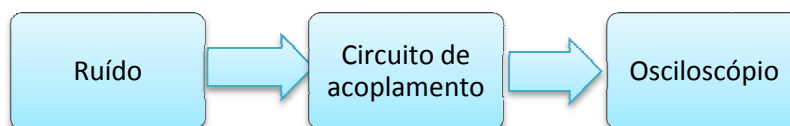


Figura 5.7 – Mecanismo para medição do sinal no domínio do tempo.

O acoplador capacitivo utilizado nas medições de sinais atua na frequência de 1 MHz até 40 MHz, tensão máxima de 450 VAC, conforme apresentado na figura 5.8.



Figura 5.8 – Acoplador capacitivo.

O acoplamento capacitivo consiste basicamente na ligação de um capacitor entre a rede de energia e um transformador de RF. Esse capacitor restringe o fluxo do sinal proveniente da rede elétrica para o equipamento PLC, mas não consegue eliminar as interferências de alta frequência no sentido inverso. Conforme foi apresentado no capítulo 4, os principais equipamentos que produzem ruído impulsivo são os motores AC elétricos como aspiradores de pó, barbeador elétrico, liquidificador, batedeira, espremedor de frutas, furadeira, máquina de serrar, máquina de costura, entre outros. Como exemplo de ruído impulsivo periódico e assíncrono à frequência fundamental pode ser citado as fontes chaveadas. Os computadores e secadores de cabelo produzem ruídos coloridos. As televisões e as rádios de ondas curtas provocam ruídos em banda estreita.

Os estabilizadores de tensão, nobreaks e dimmers geram ruído impulsivo periódico e síncrono. Baseado neste aspecto, a seguir são apresentados os sinais de ruído obtidos no domínio do tempo e no domínio da frequência. As medições no domínio do tempo foram realizadas com um osciloscópio de 60 MHz de faixa com taxa de amostragem de 1 GSa/s modelo 3000 da marca Agilent [137]. O equipamento para medir o sinal no domínio da frequência foi um analisador de espectro na faixa de frequência de 1 kHz até 3 GHz, modelo NS30 da marca Lignex e o analisador de sinais vetoriais em tempo real da marca Rohde [138]. Foi utilizado também um analisador de energia elétrica da marca RMS sistemas eletrônicos modelo MARH-21 [139]. Os equipamentos utilizados para gerar o sinal de ruído são: televisão, ventilador, liquidificador, batedeira, fonte chaveada, secador de cabelo, barbeador elétrico, dimmer e lâmpada fluorescente compacta com reator. A Análise do sinal de ruído foi realizada conforme procedimento ilustrado na figura 5.9.

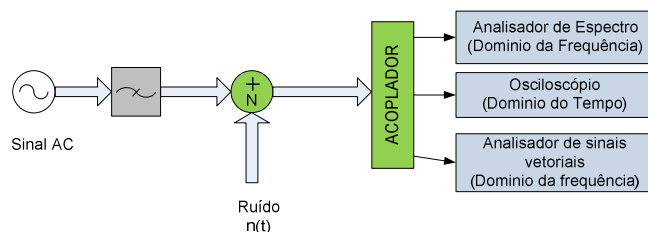


Figura 5.9 - Configuração para as medidas de ruído.

A primeira medida realizada com o analisador de espectro e com o analisador de sinais vetoriais foi do sinal da rede elétrica com a utilização de filtro PLC e sem a presença de ruído conforme apresentado nas figuras 5.10 (a) e (b). Pela análise da figura 5.10 (b) o nível do sinal de pico medido com o analisador de sinais vetoriais foi em torno de -60 dBm ou 1×10^{-9} W/Hz. Pela análise da curva de persistência a cor vermelha representa onde o sinal de ruído está com mais intensidade variando entre -70 a -80 dBm que corresponde com o valor lido no analisador de espectro.

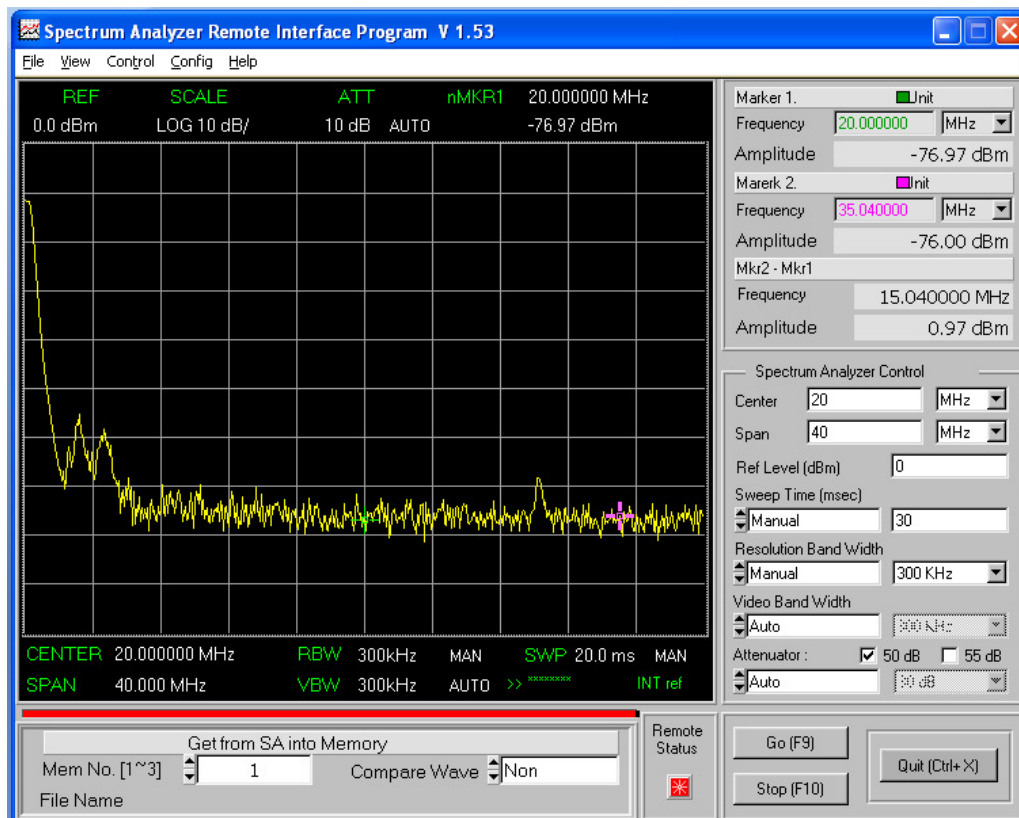


Figura 5.10 (a) – Espectro do sinal na rede elétrica com a utilização de filtro PLC e sem a presença de ruído.

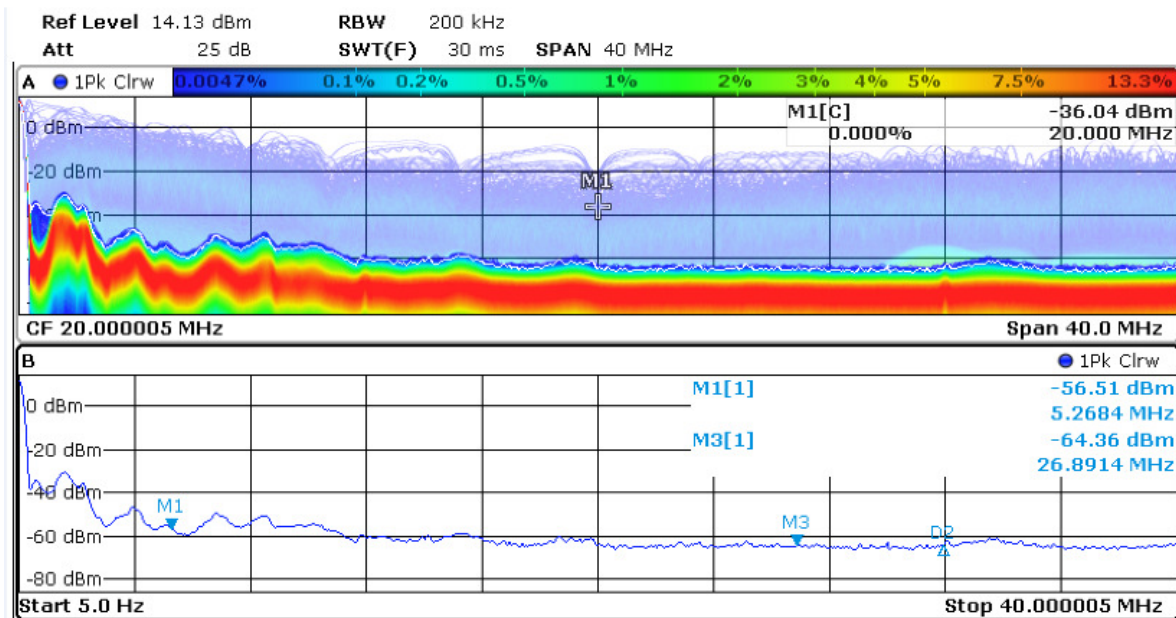


Figura 5.10 (b) – Espectro do sinal e curva de persistência na rede elétrica com a utilização de filtro PLC e sem a presença de ruído.

Analisando apenas o sinal de ruído conforme ilustrado nas figuras 5.11 até 5.18 e na tabela 5.1 apresentada a seguir, pode-se constatar que o dimmer cujos resultados das medidas são mostrados na figura 5.11(a) gerou a maior amplitude de tensão (25 V) com o período do sinal bem amplo se comparado com todos os demais eletrodomésticos.

Os dimmers são sistemas controladores de potência baseados em chaveamento utilizando um tiristor, em aplicações residenciais. São utilizados usualmente para controle de intensidade luminosa, mas algumas máquinas de lavar e mesmo chuveiros e aquecedores fazem uso deste tipo de controle.

Verificando a medição do ruído provocado pelo dimmer com o analisador de espectro observa-se um pico de amplitude (PSD) de -44,36 dBm na frequência aproximada de 15 MHz e a partir daí ocorre uma estabilização da amplitude do ruído na faixa de 20 a 40 MHz no mesmo nível que o sinal medido da rede elétrica, conforme mostra a figura 5.11(c). Observando a curva de persistência pode-se ver que até 20 MHz o sinal de ruído atua significativamente e a partir daí cai para valores entre -70 dBm até -80 dBm que é o nível de sinal da rede elétrica. O pico de amplitude do sinal varia de -10 dBm para baixas frequências até -40 dBm.

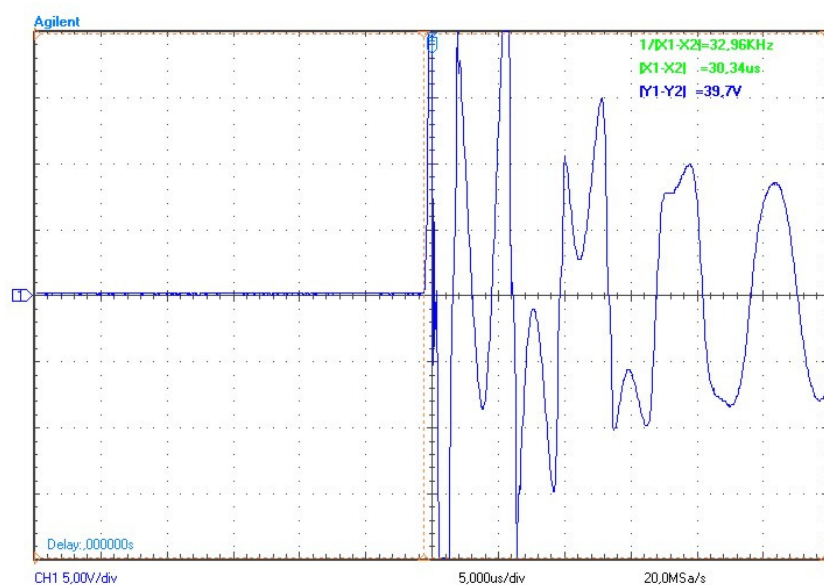


Figura 5.11 (a) - Ruído provocado pelo dimmer ligado medido com o osciloscópio.

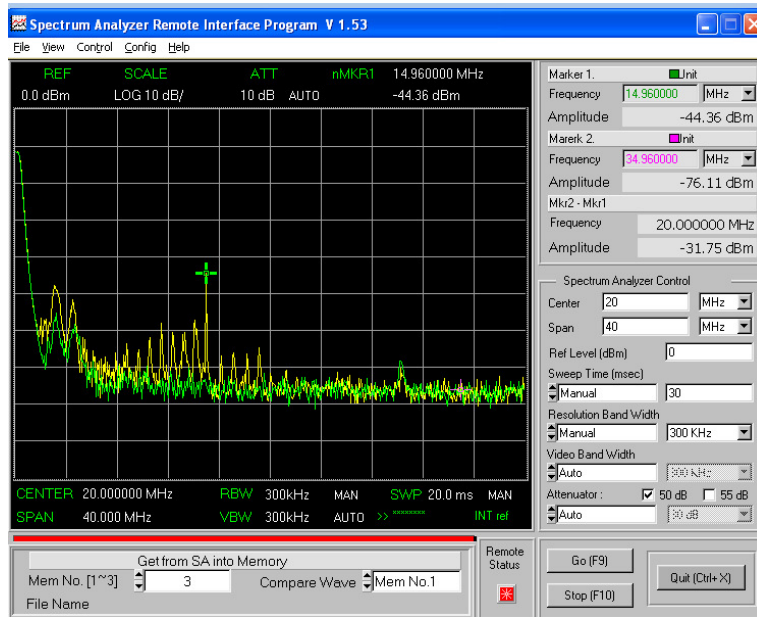


Figura 5.11(b) - Ruído provocado pelo dimmer ligado medido com o analisador de espectro.

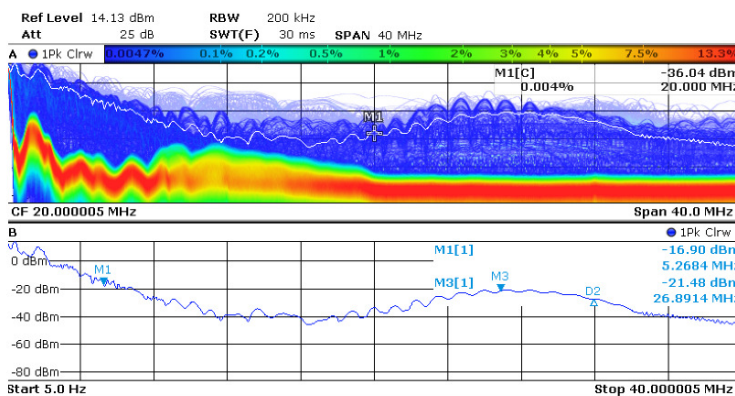


Figura 5.11(c) - Ruído provocado pelo dimmer ligado medido com o analisador de sinais vetoriais.

Os motores universais, usados em bateadeiras, liquidificadores, secador de cabelo e furadeiras, entre outros eletrodomésticos, possuem escovas que geram faíscas constantemente, provenientes do contínuo ligamento e desligamento do rotor, gerando ruído intenso que se estende até a faixa de kHz chegando a alguns MHz, dependendo do modelo, do fabricante e do tempo de vida do eletrodoméstico. O secador de cabelos produz ruído colorido de fundo na

frequência acima de 50 kHz. Este eletrodoméstico apresenta uma medição de amplitude de tensão e frequência aleatória que provocam sinais de radio frequência. Os resultados das medidas podem ser vistos na figura 5.12 (a), (b) e (c), onde se constata uma tensão máxima de 4,32 V visto com o osciloscópio conforme figura 5.12 (a).

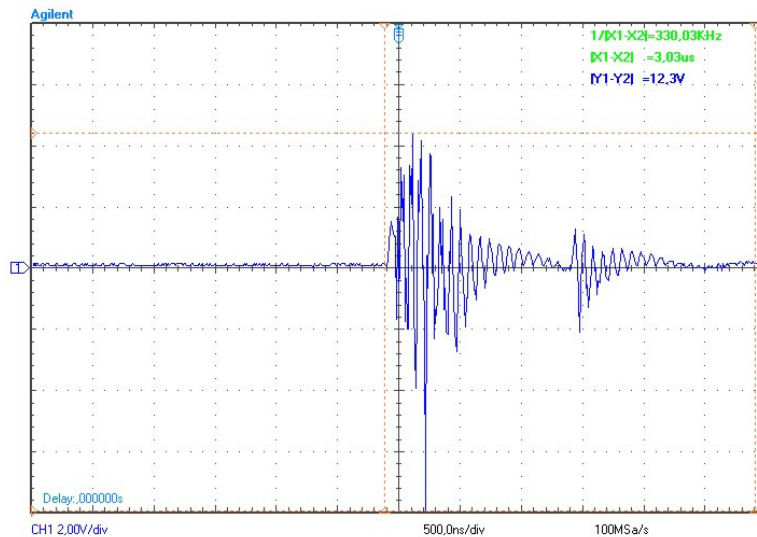


Figura 5.12 (a) - Ruído provocado pelo secador de cabelo ligado medido com o osciloscópio.

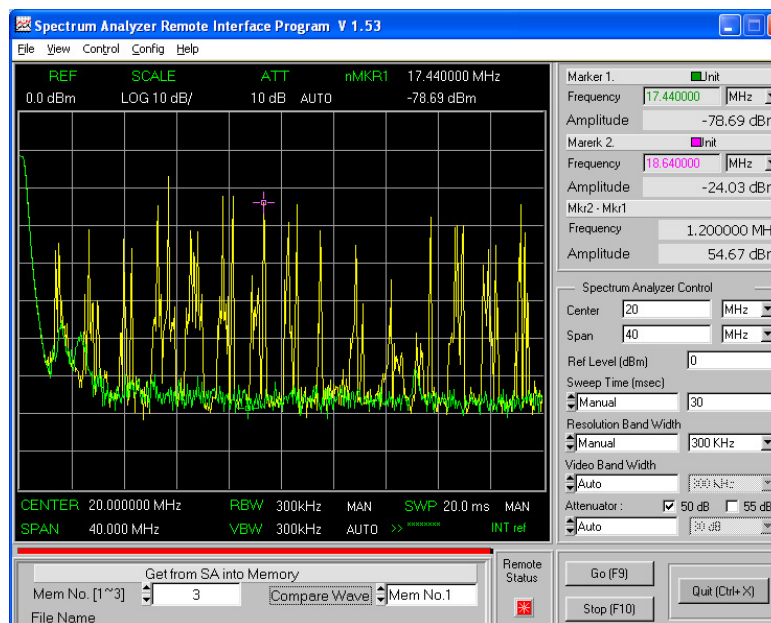


Figura 5.12 (b) - Ruído provocado pelo secador de cabelo ligado medido com o analisador de espectro.

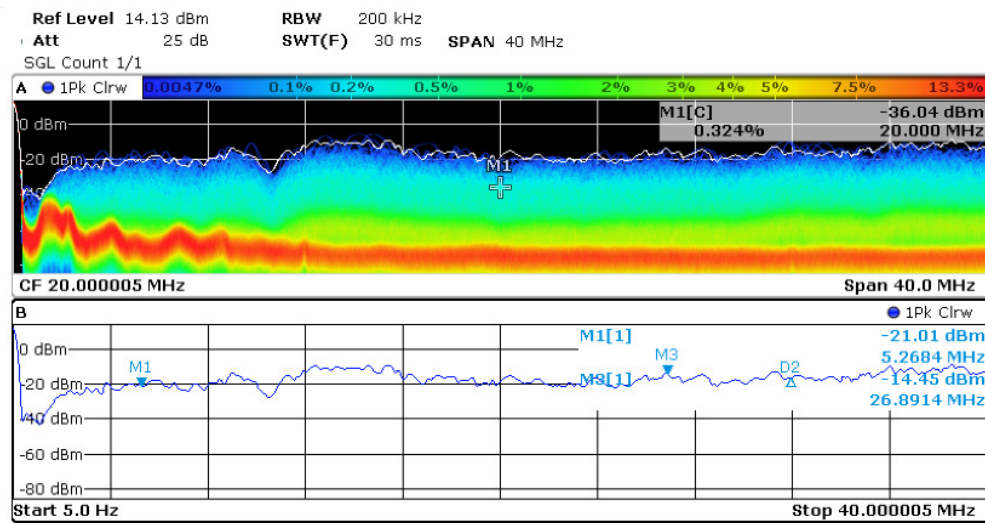


Figura 5.12 (c) - Ruído provocado pelo secador de cabelo ligado medido com o analisador de sinais vetoriais.

Pela observação com o analisador de espectro verifica-se uma forte oscilação de amplitude variando a PSD de -20 dBm até -80 dBm conforme pode ser visto na figura 5.12 (b). Com relação ao sinal medido com o analisador de sinais vetoriais, o pico de amplitude do sinal (PSD) está em torno de -20 dBm e com relação a persistência do sinal percebe-se uma maior intensidade do ruído até aproximadamente 10 MHz conforme apresentado na figura 5.12 (c).

Em seguida o liquidificador produziu uma tensão máxima de 3,84 V medida realizada com o osciloscópio conforme pode ser visto na figura 5.13 (a) e um sinal muito instável e significativo medido com o analisador de espectro, atingindo picos de aproximadamente -10 dBm na frequência de 14 MHz, conforme mostrado na figura 5.13 (b). Este eletrodoméstico pelas suas características atua de modo muito intenso em toda a faixa de frequência de operação do sinal PLC, provocando uma grande degradação na transmissão de dados numa rede PLC.

Com o analisador de sinais vetoriais mediu-se picos de amplitude atingindo 0 dBm em grande parte da faixa de frequência analisada de 0 até 40 MHz conforme pode ser visto na

figura 5.13 (c). Entretanto, a curva de persistência mostra que a intensidade mais significativa do ruído atua em torno de -50 dBm a -60 dBm.

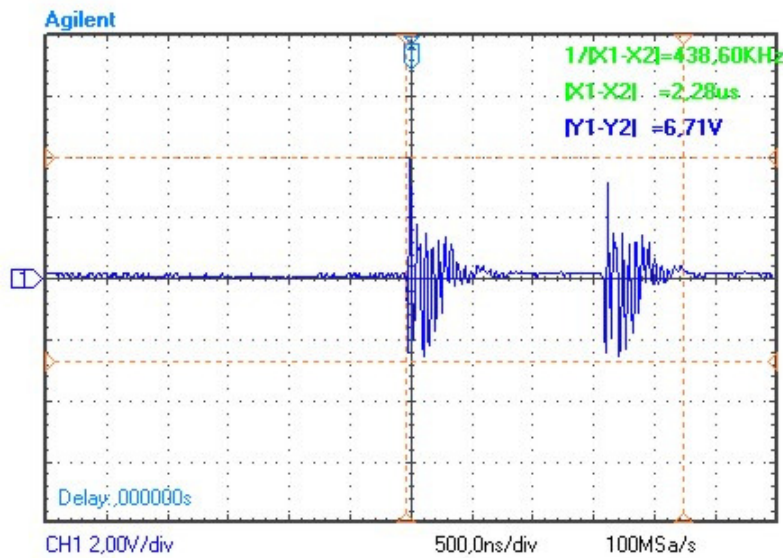


Figura 5.13 (a) - Ruído provocado pelo liquidificador ligado medido com o osciloscópio.

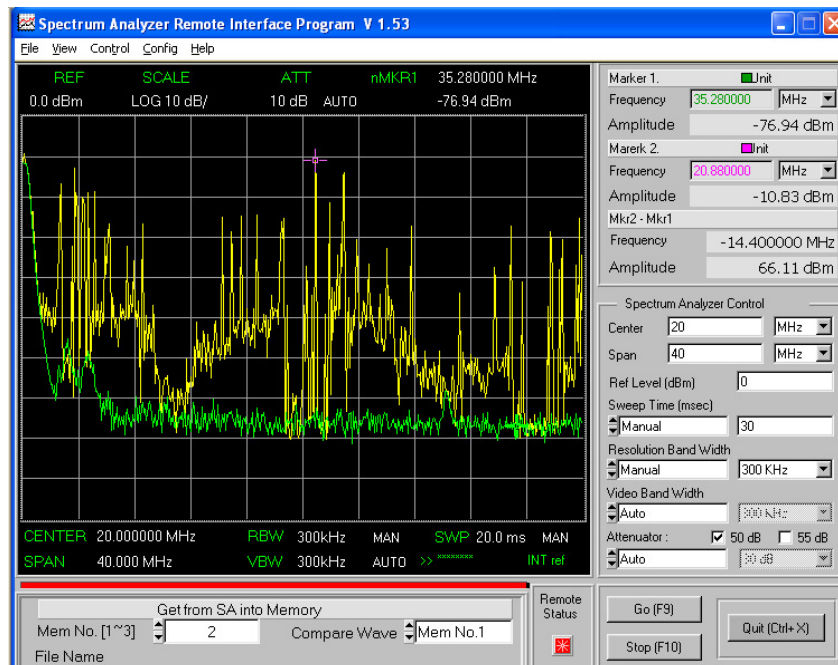


Figura 5.13 (b) - Ruído provocado pelo liquidificador ligado medido com o analisador de espectro.

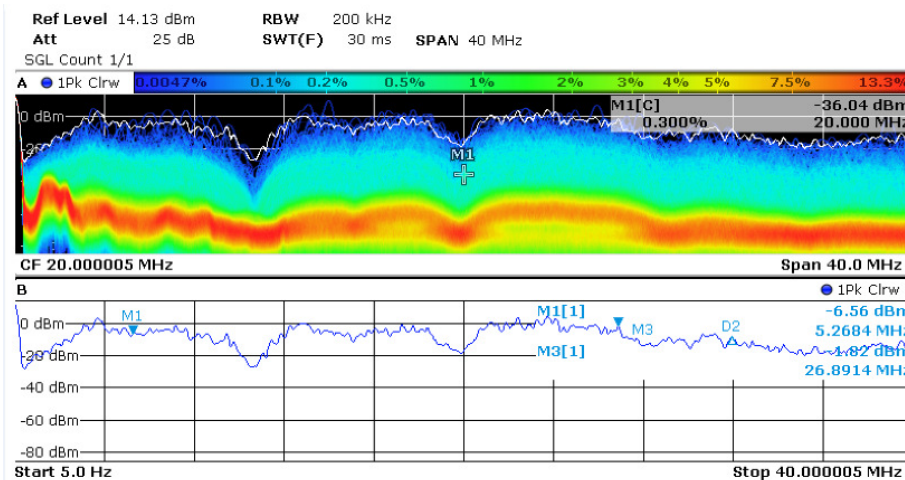


Figura 5.13 (c) - Ruído provocado pelo liquidificador ligado medido com o analisador de sinais vetoriais.

O secador de cabelos e o liquidificador produzem altos valores de amplitude de ruído, conforme foi mostrado nas figuras 5.12 e 5.13. A figura 5.14 tem por objetivo apresentar a comparação medida com o analisador de espectro do sinal de ruído produzido pelos dois eletrodomésticos na faixa de frequência de 0 Hz até 40 MHz.

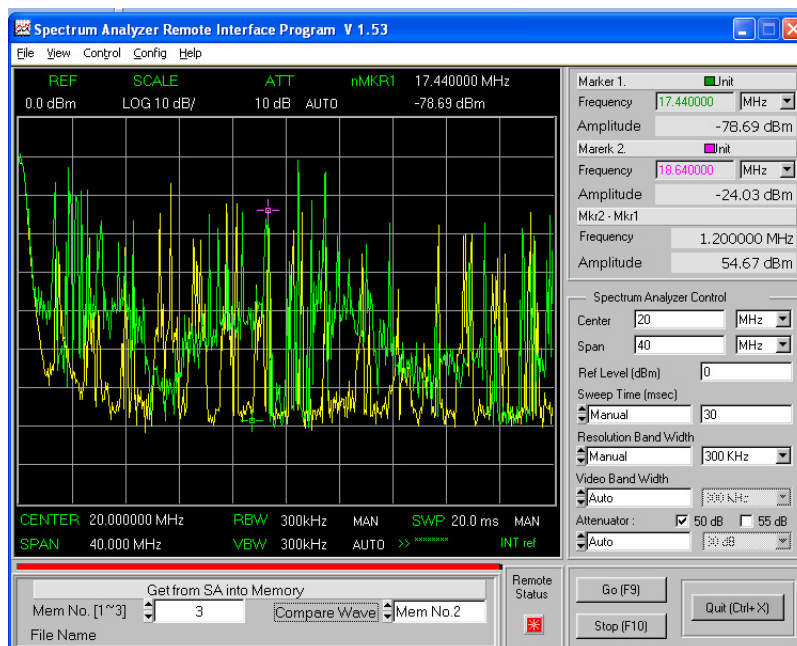


Figura 5.14- Comparação do sinal de ruído entre o secador de cabelos e o liquidificador.

A curva do liquidificador esta representada na cor verde, enquanto a curva do secador de cabelos é mostrada na cor amarela. Pela observação do gráfico da figura 5.14 verifica-se que o sinal de ruído produzido pelo liquidificador é mais intenso que o ruído produzido pelo secador de cabelos.

As fontes chaveadas operam com frequências de chaveamento de 20 kHz a 1 MHz, e esse chaveamento produz harmônicas em um amplo espectro. Atualmente, devido a seu pequeno volume em relação à potência são amplamente utilizadas em aparelhos eletrônicos como televisores, videocassetes, DVDs, computadores e aparelhos de som.

Além disso, o fato de possuírem um retificador de entrada com um capacitor de grande valor faz com que sua impedância varie em função da senoide da rede elétrica, produzindo ruído impulsivo periódico assíncrono de baixa frequência, porém muito fortes. O resultado da medida realizada pode ser visto na figura 5.15. A amplitude máxima de tensão do ruído produzido pela fonte chaveada foi de 1,44 V, medido com o osciloscópio.

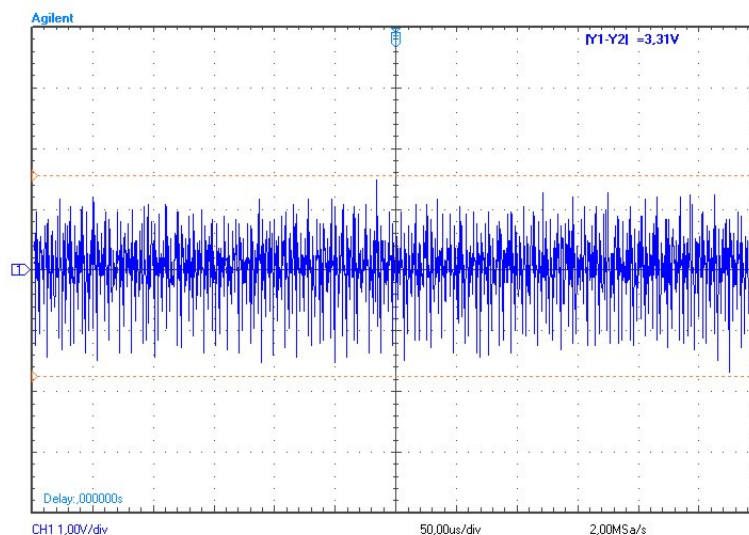


Figura 5.15 (a) - Ruído provocado pela fonte de alimentação chaveada ligado, medido com o osciloscópio.

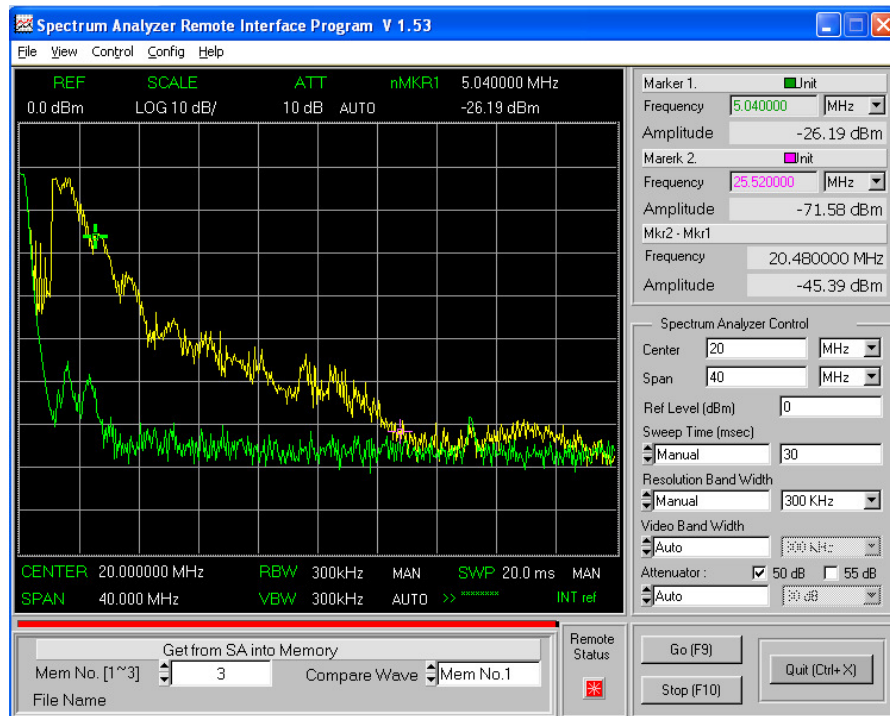


Figura 5.15 (b) - Ruído provocado pela fonte de alimentação chaveada ligado, medido com o analisador de espectro.

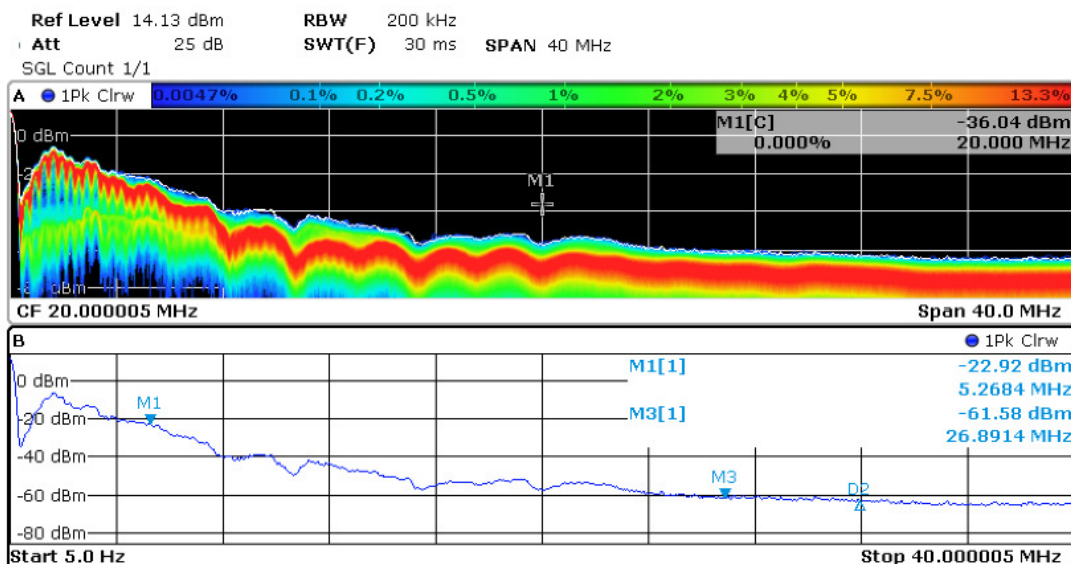


Figura 5.15 (c) - Ruído provocado pela fonte de alimentação chaveada ligado, medido com o analisador de sinais vetoriais.

Observando o sinal pelo analisador de espectro percebe-se que o ruído atua com grande intensidade até a frequência aproximada de 20 MHz, embora em toda a faixa de frequência até 40 MHz ele sobressai comparado ao sinal medido apenas da rede elétrica. Com o analisador de sinais vetoriais percebe-se claramente que à medida que a frequência cresce a amplitude do sinal do ruído diminui, podendo-se ver uma variação da PSD de -5 dBm até -60 dBm.

A lâmpada fluorescente compacta é encontrada facilmente nas residências e prédios, devido ao seu baixo consumo e por não apresentarem os inconvenientes das fluorescentes comuns. No entanto, estas lâmpadas não possuem um reator indutivo, como as convencionais, e sim uma fonte chaveada que opera em alta frequência, dispensando o starter, mas injetando ruído da ordem de alguns kHz na rede elétrica. Entretanto, a tensão máxima medida com o osciloscópio foi de apenas 0,128 V conforme pode ser visto na figura 5.16 (a). Pela medida realizada com o analisador de espectro observa-se que o ruído provocado pela lâmpada fluorescente compacta está na mesma amplitude do sinal medido somente da rede elétrica conforme pode ser constatado observando a figura 5.16 (b).

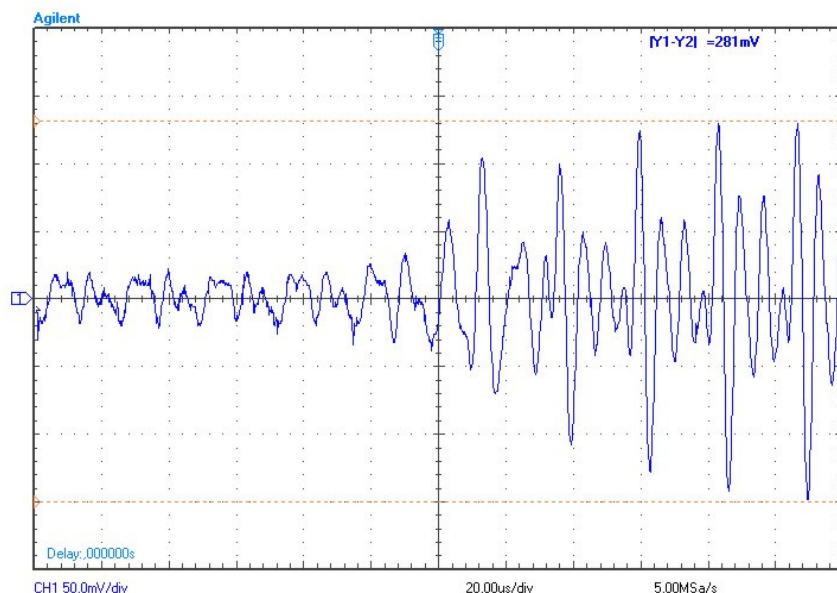


Figura 5.16 (a) - Ruído provocado pela lâmpada fluorescente compacta ligada, medido com o osciloscópio.

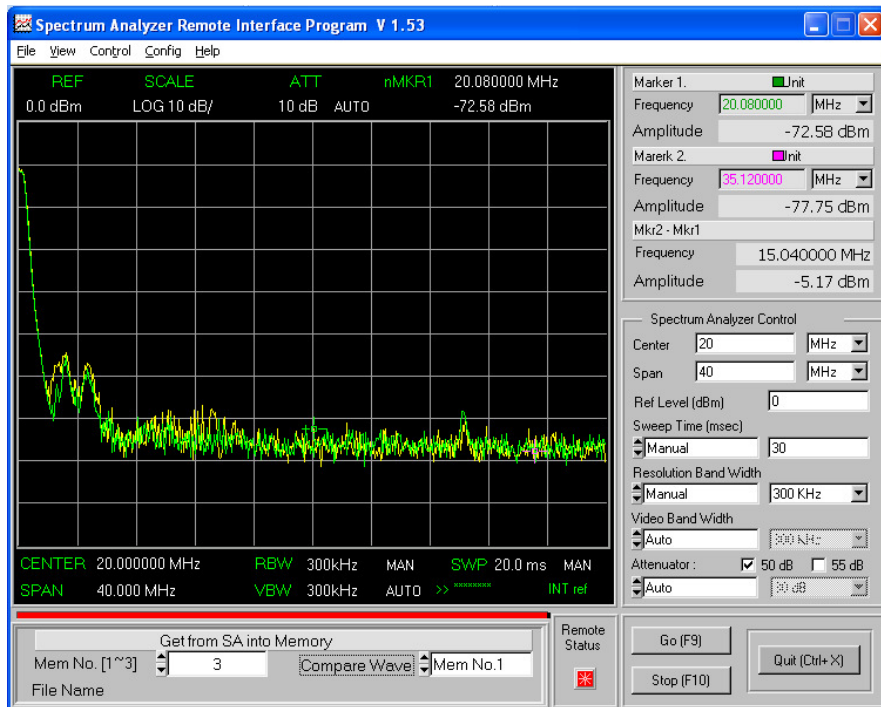


Figura 5.16 (b) - Ruído provocado pela lâmpada fluorescente compacta ligada medido com o analisador de espectro.

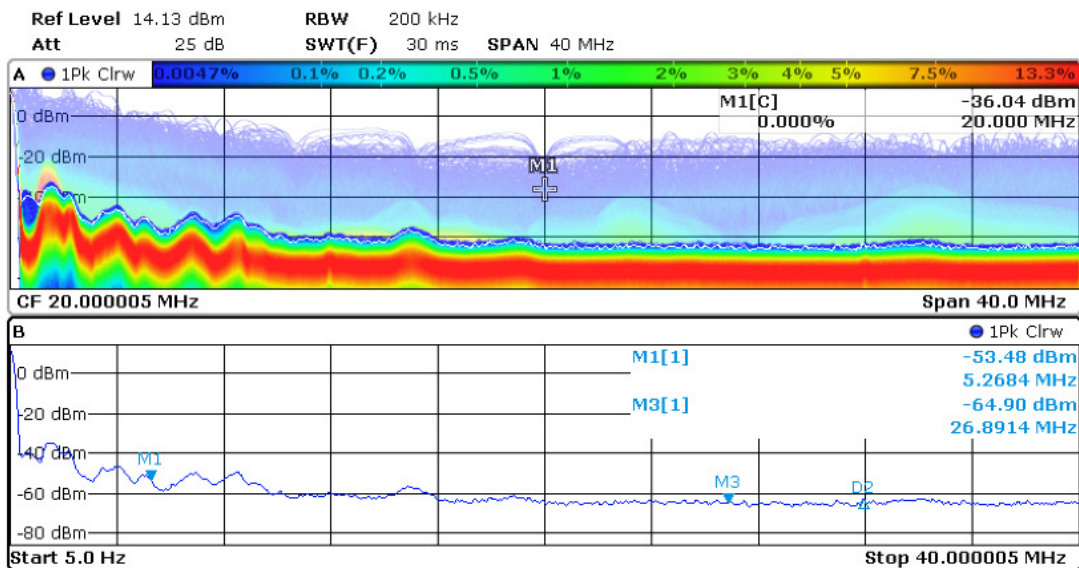


Figura 5.16 (c) - Ruído provocado pela lâmpada fluorescente compacta ligada, medido com o analisador de sinais vetoriais.

Observando a curva de pico com o analisador de sinais vetoriais verifica-se uma curva quase constante em torno de -60 dBm. A curva de persistência mostra o sinal de ruído mais intenso na mesma situação realizada na medição apenas da rede elétrica conforme ilustrado na figura 5.16 (c). A tabela 5.1 apresenta as principais medidas do sinal de ruído produzidos pelos diversos eletrodomésticos quando ligados a rede elétrica 127 V.

Com relação ao ruído produzido pela televisão em conjunto com o ventilador cujo resultado medido é mostrado na figura 5.17 a seguir, percebe-se que o valor da amplitude do sinal medido com o analisador de espectro é muito pequeno ao se comparar com o sinal espectral da rede elétrica, como foi mostrado na figura 5.10.

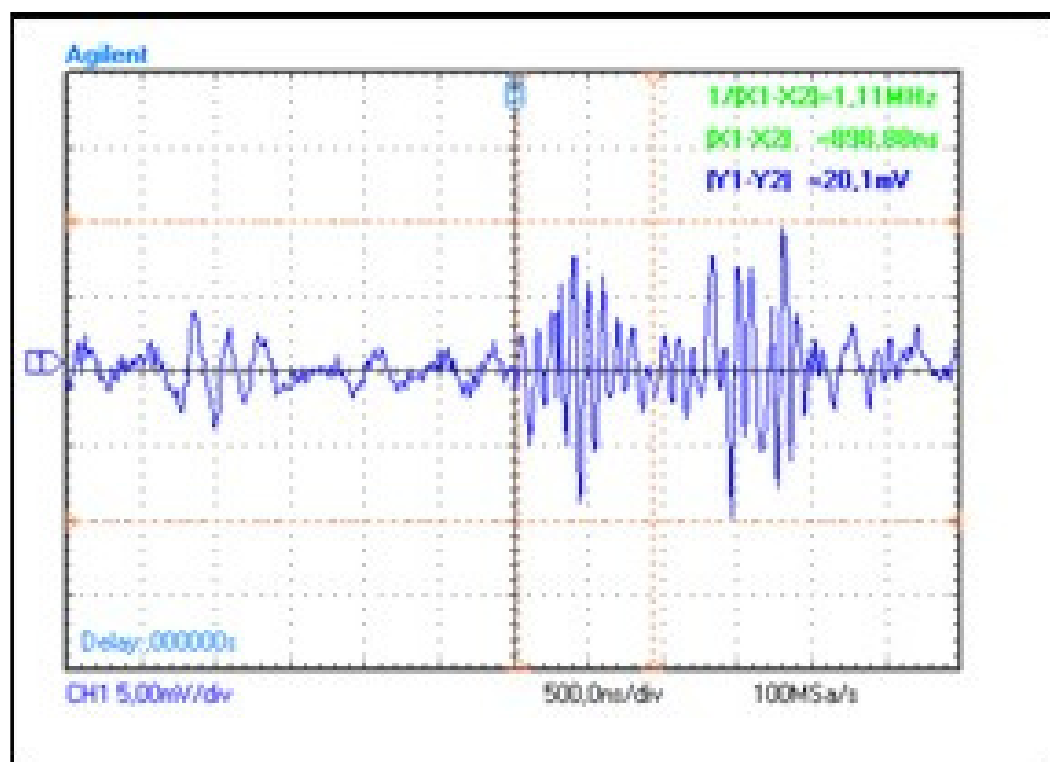


Figura 5.17 (a) - Ruído provocado pela televisão e ventilador ligados medido com o osciloscópio.

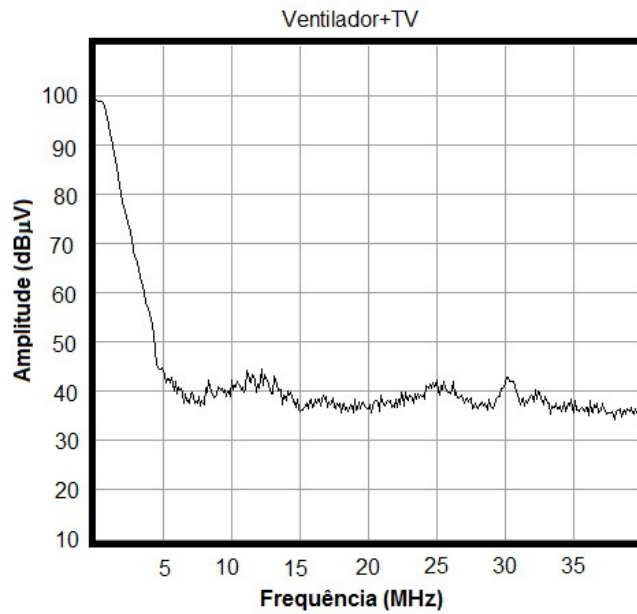


Figura 5.17 (b) - Ruído provocado pela televisão e ventilador ligados medido com o analisador de espectro.

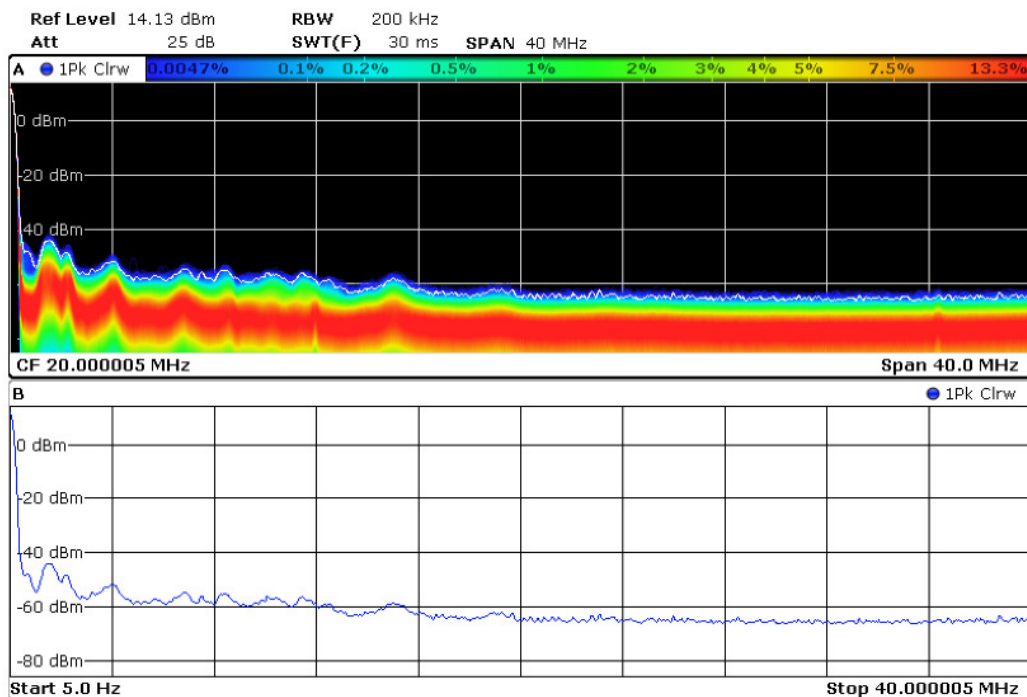


Figura 5.17 (c) - Ruído provocado pela televisão e ventilador ligados medido com o analisador de sinais vetoriais.

A medida realizada do ruído produzido pela bateadeira são mostrados nas figuras 5.18 (a), (b) e (c). Pela tabela 5.1 e pelo gráfico da tensão em função do tempo medido com osciloscópio e mostrado na figura 5.18 (a), verifica-se que a tensão de pico medido com o osciloscópio digital foi de 0,82 V. Pela análise do sinal medido com o analisador de espectro é possível visualizar que o sinal de ruído produzido pela bateadeira tem uma grande amplitude atuando em toda a faixa de frequência, sendo mais intenso entre a faixa de frequência próximo de 16 MHz até 24 MHz conforme mostrado na figura 5.18 (b). Com relação ao sinal medido com o analisador de sinais vetorial o pico de amplitude (PSD) varia de aproximadamente -20 dBm até -60 dBm. Pela curva de persistência, o sinal mais intenso está na mesma amplitude do sinal medido somente da rede elétrica sem qualquer tipo de ruído conforme mostrado na figura 5.18 (c).

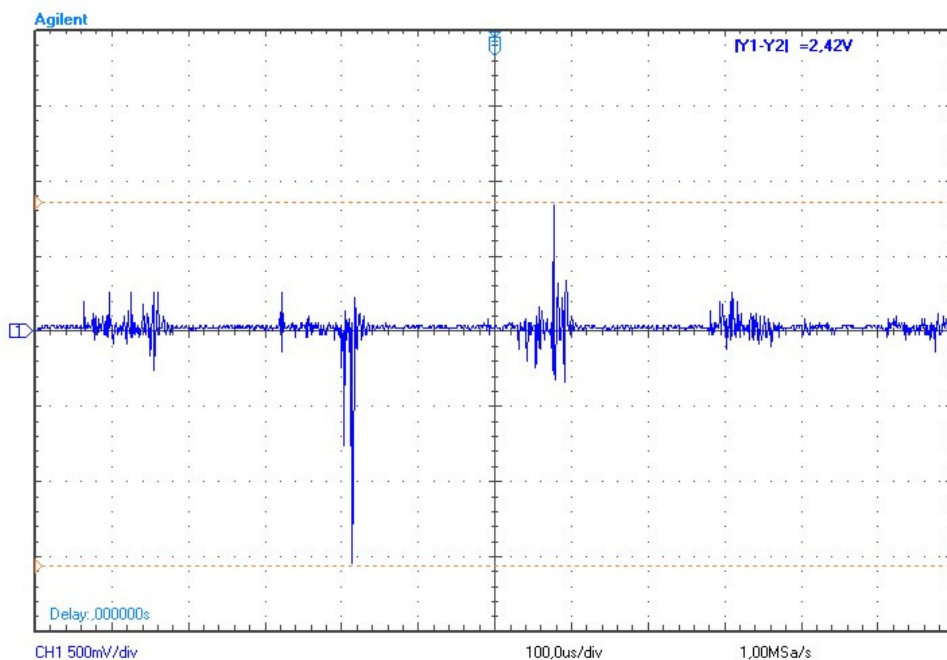


Figura 5.18 (a) - Ruído provocado pela bateadeira ligado, medido com o osciloscópio.

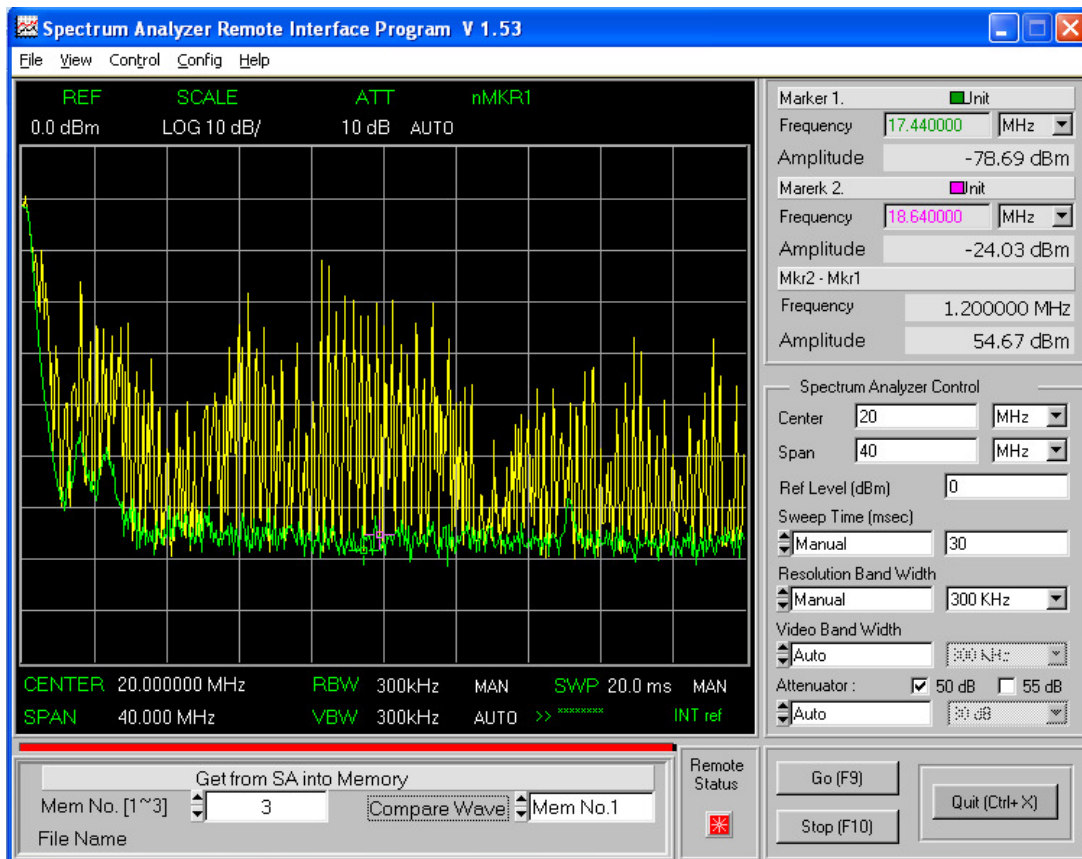


Figura 5.18 (b) - Ruído provocado pela bateadeira ligado, medido com o analisador de espectro.

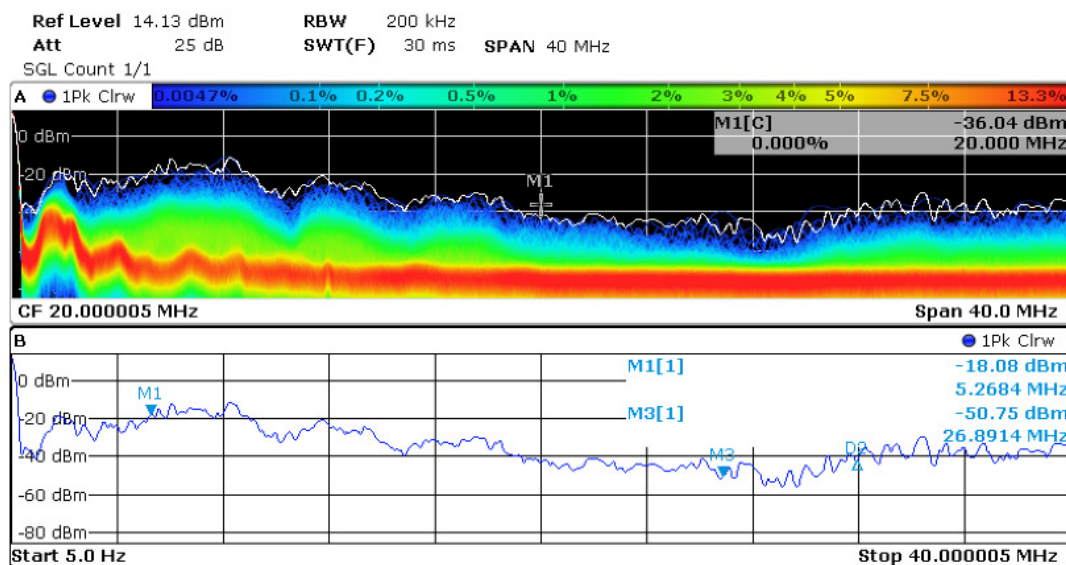


Figura 5.18 (c) - Ruído provocado pela bateadeira ligado, medido com o analisador de sinais vetoriais.