

**Caracterização do Canal de  
Comunicação em Redes de  
Distribuição de Energia Elétrica  
de Baixa Tensão**

**Richard Brandão Nogueira Vital**

**Abril / 2010**

# Caracterização do Canal de Comunicação em Redes de Distribuição de Energia Elétrica de Baixa Tensão

RICHARD BRANDÃO NOGUEIRA VITAL

Dissertação apresentada ao Instituto Nacional de Telecomunicações,  
como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em  
Engenharia Elétrica.

Orientador: PROF. DR. DAYAN ADIONEL GUIMARÃES

Santa Rita do Sapucaí  
2010

Dissertação defendida e aprovada em 30/04/2010, pela comissão julgadora:

---

(Prof. Dr. Dayan Adionel Guimarães / INATEL)

---

(Prof. Dr. Francisco Martins Portelinha / UNIFEI)

---

(Prof. Dr. Geraldo Gil Ramundo Gomes / INATEL)

---

**Prof. Dr. José Marcos Câmara Brito**  
**Coordenador do Curso de Mestrado / INATEL**

A minha querida família.

# Agradecimentos

A Deus por me conceder sabedoria e paciência para superar os desafios.

Aos meus pais pelos conselhos e exemplos de perseverança e, ainda, pela dedicação e incentivo em todas as etapas da minha vida.

A Tatiane pelo apoio e compreensão nos momentos difíceis.

A todos os parentes que influenciaram de forma positiva na minha formação técnica e humana.

Ao Professor Dayan pela orientação fornecida durante a elaboração deste trabalho.

Ao Professor Maurício Silveira pelo incentivo ao ingresso no Mestrado.

Aos Professores Carlos Ynoguti, Antônio Alves e Luciano Leonel pelo suporte técnico fornecido.

Ao amigo Wheberth Damascena Dias pela troca de experiência.

Ao Instituto Nacional de Telecomunicações por disponibilizar a infra-estrutura e recursos necessários ao desenvolvimento da pesquisa.

A todos os colegas, professores e funcionários do Instituto Nacional de Telecomunicações pela amizade.

Ao Centro de Pesquisas Avançadas Wernher von Braun e a Planeta Informática pela disponibilidade em permitir o desenvolvimento do trabalho.

# Índice

<b>Lista de Figuras</b>	<b>v</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>viii</b>
<b>Lista de Abreviaturas e Siglas</b>	<b>x</b>
<b>Lista de Símbolos</b>	<b>xii</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Contextualização e Motivação . . . . .	1
1.2 Estrutura e contribuições do trabalho . . . . .	3
1.3 A Tecnologia PLC . . . . .	4
1.3.1 Caracterização da rede de distribuição de energia elétrica .	4
1.3.2 A comunicação no canal PLC . . . . .	5
1.3.3 Obstáculos decorrentes da infra-estrutura . . . . .	6
1.3.4 Equipamentos de uma rede PLC em baixa tensão . . . . .	7
1.3.5 O estado da arte no Brasil e no Mundo . . . . .	8
1.3.6 Principais esquemas de modulação utilizados na tecnologia PLC . . . . .	9
<b>2 Caracterização e Simulação do canal PLC</b>	<b>16</b>
2.1 Modelamento do Canal . . . . .	16
2.2 Modelamento do Ruído . . . . .	19
2.2.1 Ruído Colorido . . . . .	20
2.2.2 Ruído de Faixa Estreita . . . . .	21
2.2.3 Ruído impulsivo periódico síncrono . . . . .	21
2.2.4 Ruído impulsivo periódico assíncrono . . . . .	21
2.2.5 Ruído impulsivo assíncrono . . . . .	22
2.2.6 Simulação dos ruídos colorido, de banda estreita e impul- sivo assíncrono . . . . .	22

<b>3</b>	<b>Extração dos parâmetros do canal PLC</b>	<b>31</b>
3.1	Técnicas de acoplamento . . . . .	31
3.2	Técnicas de extração de parâmetros . . . . .	32
3.3	Resultados experimentais . . . . .	34
3.3.1	Processo de preparação dos elementos usados na extração de parâmetros do canal . . . . .	34
3.3.2	Medidas das respostas dos canais . . . . .	40
3.3.3	Medidas do comportamento de fontes ruidosas presentes nos canais em análise . . . . .	47
3.4	Análise dos efeitos de propagação de pequena escala . . . . .	49
3.4.1	Banda de coerência . . . . .	49
3.4.2	Análise estatística das características obtidas pela extração de parâmetros do canal . . . . .	53
3.4.3	Método Kolmogorov-Smirnov para análise de variáveis aleatórias	57
<b>4</b>	<b>Conclusão</b>	<b>61</b>
4.1	Considerações finais . . . . .	61
4.2	Sobre os dados obtidos . . . . .	62
4.3	Sugestões para trabalhos futuros . . . . .	62
<b>A</b>	<b>Geração das Figuras 2.10, 2.11, 2.12 e 2.14</b>	<b>64</b>
<b>B</b>	<b>Geração das Figuras 2.2 e 2.3</b>	<b>68</b>
<b>C</b>	<b>Geração das Figuras 2.5, 2.8 e 2.9</b>	<b>70</b>
<b>D</b>	<b>Geração da Figura 3.27</b>	<b>73</b>
<b>E</b>	<b>Geração da Figura 3.28</b>	<b>75</b>
<b>F</b>	<b>Geração da Figura 3.29</b>	<b>77</b>
<b>G</b>	<b>Geração das Figuras 3.12, 3.13, 3.14, 3.15, 3.16, 3.31 e 3.34</b>	<b>79</b>
<b>H</b>	<b>Geração das Figuras 3.17, 3.18, 3.19, 3.20, 3.21, 3.32 e 3.35</b>	<b>85</b>
<b>I</b>	<b>Geração das Figuras 3.22, 3.23, 3.24, 3.25, 3.26, 3.33 e 3.36</b>	<b>90</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>96</b>

# Lista de Figuras

1.1	Comunicação PLC em ambientes domésticos . . . . .	6
1.2	Modulação BPSK: (a) Portadora senoidal. (b) Sequência binária modulante. (c) Sinal modulado. . . . .	10
1.3	Modulação BFSK: (a) Portadora senoidal. (b) Sequência binária modulante. (c) Sinal modulado. . . . .	11
1.4	Modulação 8-QAM: (a) Portadora senoidal. (b) Sequência modulante. (c) Sinal modulado. . . . .	12
1.5	Técnica de espalhamento espectral por sequência direta usando modulação BPSK: (a) Sequência modulante. (b) Sequência de espalhamento. (c) Sinal espalhado. (d) Portadora senoidal. (e) Sinal espalhado e modulado . . . . .	13
1.6	Representação de um sinal no domínio da frequência utilizando a técnica OFDM . . . . .	14
2.1	Estrutura que representa o Canal PLC . . . . .	17
2.2	Resposta em frequência de um canal PLC . . . . .	18
2.3	Resposta impulsiva de um canal PLC . . . . .	19
2.4	Esquema de comunicação em um canal PLC . . . . .	20
2.5	Modelo matemático aproximado do ruído colorido . . . . .	23
2.6	Diagrama em blocos do gerador de ruído limitado em banda . . . . .	23
2.7	Diagrama em blocos do simulador do ruído de banda estreita . . . . .	24
2.8	Ruído de banda estreita simulado . . . . .	25
2.9	Ruídos colorido e de banda estreita simulados . . . . .	26
2.10	Histograma da Variável Aleatória que modela a Amplitude dos Impulsos . . . . .	27
2.11	Histograma da Variável Aleatória que modela a Largura dos Impulsos . . . . .	28
2.12	Histograma da Variável Aleatória que modela os Intervalos entre Impulsos . . . . .	29
2.13	Ruído impulsivo assíncrono simulado . . . . .	29
2.14	Ruído impulsivo assíncrono simulado . . . . .	30



---

3.1	Circuito de acoplamento para sinais PLC de banda larga . . . . .	32
3.2	Configuração para extração de resposta em frequência do canal . .	33
3.3	Configuração para extração do espectro ruidoso . . . . .	34
3.4	Configuração para extração do comportamento temporal dos ruídos	34
3.5	Placas do circuito de acoplamento estudado . . . . .	35
3.6	Esquema para extração do comportamento do circuito de acoplamento . . . . .	35
3.7	Magnitude da resposta em frequência do circuito de acoplamento	36
3.8	Fase da resposta em frequência do circuito de acoplamento . . . .	36
3.9	Atraso de grupo da resposta em frequência do circuito de acoplamento . . . . .	37
3.10	Magnitude da resposta impulsiva do circuito de acoplamento . . .	38
3.11	Fase da resposta impulsiva do circuito de acoplamento . . . . .	38
3.12	Planta baixa dos laboratórios onde foram realizadas as medições de canal . . . . .	39
3.13	Magnitude da resposta em frequência do canal formado entre as tomadas 1 e 2 . . . . .	40
3.14	Fase da resposta em frequência do canal formado entre as tomadas 1 e 2 . . . . .	41
3.15	Atraso de grupo do canal formado entre as tomadas 1 e 2 . . . . .	41
3.16	Magnitude da resposta impulsiva do canal formado entre as tomadas 1 e 2 . . . . .	42
3.17	Fase da resposta impulsiva do canal formado entre as tomadas 1 e 2	42
3.18	Magnitude da resposta em frequência do canal formado entre as tomadas 1 e 3 . . . . .	43
3.19	Fase da resposta em frequência do canal formado entre as tomadas 1 e 3 . . . . .	43
3.20	Atraso de grupo do canal formado entre as tomadas 1 e 3 . . . . .	44
3.21	Magnitude da resposta impulsiva do canal formado entre as tomadas 1 e 3 . . . . .	44
3.22	Fase da resposta impulsiva do canal formado entre as tomadas 1 e 3	45
3.23	Magnitude da resposta em frequência do canal formado entre as tomadas 1 e 4 . . . . .	45
3.24	Fase da resposta em frequência do canal formado entre as tomadas 1 e 4 . . . . .	46
3.25	Atraso de grupo do canal formado entre as tomadas 1 e 4 . . . . .	46
3.26	Magnitude da resposta impulsiva do canal formado entre as tomadas 1 e 4 . . . . .	47
3.27	Fase da resposta impulsiva do canal formado entre as tomadas 1 e 4	48
3.28	Denidade espectral de potência do ruído no canal medido no ponto 4	48

---

3.29	Denidade espectral de potência do ruído no canal medido no Laboratório de Instrumentação . . . . .	49
3.30	Denidade espectral de potência do ruído no canal medido no laboratório de desenvolvimento de sistemas para TV Digital . . . . .	50
3.31	Comportamento temporal do ruído do canal extraído na tomada 1 . . . . .	50
3.32	Função de auto-correlação do canal formado entre as tomadas 1 e 2 . . . . .	51
3.33	Função de auto-correlação do canal formado entre as tomadas 1 e 3 . . . . .	52
3.34	Função de auto-correlação do canal formado entre as tomadas 1 e 4 . . . . .	52
3.35	Perfil de retardo do canal formado entre as tomadas 1 e 2 . . . . .	54
3.36	Perfil de retardo do canal formado entre as tomadas 1 e 3 . . . . .	54
3.37	Perfil de retardo do canal formado entre as tomadas 1 e 4 . . . . .	55
3.38	Comparação das respostas impulsivas dos canais: (a) formado entre as tomadas $TA$ e $TB$ (b) formado entre as tomadas $TB$ e $TC$ . . . . .	56
3.39	Comparação entre as cdf's teórica e empírica . . . . .	58

# Lista de Tabelas

1.1	Limites de radiações indesejadas causadas por sistemas BPL de RBT	8
1.2	Características dos símbolos de uma modulação 8-QAM	12
2.1	Características de uma rede PLC	18
2.2	Parâmetros para simulação do ruído de banda estreita	24
3.1	Características do analisador de redes vetorial utilizado para extrair a resposta em frequência do canal	33
3.2	Características do analisador de espectro utilizado na extração do comportamento dos ruídos no domínio da frequência	34
3.3	Osciloscópio digital utilizado na medição temporal dos ruídos	35
3.4	Detalhamento do circuito de acoplamento utilizado nas medições	35
3.5	Banda de coerência para os canais analisados	53
3.6	Atrasos dos canais analisados	55
3.7	Funções densidade de probabilidade de distribuições utilizadas na análise comparativa dos dados coletados	57
3.8	Parâmetros do teste K-S aplicado em uma amostra de amplitudes da resposta impulsiva de um canal PLC	59

# Lista de Abreviaturas e Siglas

**APTEL** *Associação de Empresas Proprietárias de Infra-Estrutura e Sistemas Privados de Telecomunicações* - Associação de empresas brasileira que estudam e desenvolvem soluções PLC

**ANATEL** *Agência Nacional de Telecomunicações* - Agência Brasileira de Regulamentação dos Serviços de Telecomunicações

**AWGN** *Additive White Gaussian Noise* - Ruído aditivo branco com função densidade de probabilidade Gaussiana

**BPL** *Broadband over Powerline* - Comunicação de dados em banda larga sobre a rede de distribuição de energia elétrica

**BPSK** *Binary Phase Shift Keying* - Modulação binária com chaveamento de fase

**CDF** *Cumulative Distribution Function* - Função de distribuição cumulativa

**COPEL** *Companhia Paranaense de Eletricidade*

**DSSS** *Direct Sequence Spread Spectrum* - Espalhamento espectral por sequência direta

**ECDF** *Empirical Cumulative Distribution Function* - Função de distribuição cumulativa empírica

**EMC** *Electromagnetic compatibility* - Compatibilidade eletromagnética

**FFT** *Fast Fourier Transformation* - Transformada Rápida de Fourier

**FSK** *Frequency Shift Keying* - Modulação por chaveamento na frequência

**IE** *Intermediate equipment* - Equipamento Intermediário

**IEEE** *Institute of Electrical and Electronic Engineers* - Instituto de Engenheiros Elétricos e Eletrônicos

**IFFT** *Inverse Fast Fourier Transformation* - Transformada inversa rápida de Fourier

**IP** *Internet Protocol* - Protocolo de comunicação utilizado na rede mundial de computadores

**ISI** *Inter-symbolic Interference* - Interferência inter-simbólica

**MPC** *Multipath Components* - Componentes de Múltiplos-percursos de propagação

**OFDM** *Orthogonal Frequency Division Modulation* - Modulação ortogonal por divisão de frequência

**OPLAT** *Ondas Portadoras em Linhas de Alta Tensão*

- PDF** *Probability Density Function* - Função densidade de probabilidade
- PLC** *Power Line Communications* - Comunicação através da rede de distribuição de energia elétrica
- PSK** *Phase Shift Keying* - Modulação por chaveamento de fase
- RBW** *Resolution bandwidth* - Resolução em largura de banda
- RMS** *Root Mean Square* - Raiz quadrática média
- RBT** *Rede de baixa tensão* - Rede de distribuição de energia elétrica de baixa tensão
- SCR** *Silicon Controlled Rectifier* - Diodos retificadores controlados
- SNR** *Signal to Noise Ratio* - Relação sinal/ruído
- SS** *Spread Spectrum* - Técnica de espalhamento espectral
- TDL** *Tapped Delay Line* - Linha de atraso com derivação
- TE** *Transformer Equipment* - Equipamento de transformação
- VNA** *Vector Network Analyser* - Analisador de redes vetorial

# Lista de Símbolos

- $\bar{\tau}$  Atraso médio de um canal de comunicação
- $\tau_i$  Atraso da  $i$ -ésima componente de múltiplo-percurso
- $\tau_{RMS}$  Atraso RMS de um canal de comunicação
- $g_i$  Fator de atenuação da  $i$ -ésima componente de múltiplo-percurso
- $Hz$  Unidade que representa a frequência de um sinal periódico
- $H(f)$  Resposta em frequência de um canal PLC
- $h(t)$  Resposta Impulsiva de um canal PLC
- $L_h$  Número de múltiplos-percursos da Resposta Impulsiva de um canal
- $\mu_i$  Média de uma distribuição gaussiana
- $n(t)$  Componente de ruído inserida pelo canal PLC
- $P_h(\tau)$  Perfil de potência de retardo de um canal
- $R(\Delta_f)$  Função de correlação
- $s(t)$  Sinal transmitido
- $\sigma_i$  Desvio padrão de uma distribuição gaussiana
- $t$  Variável temporal
- $W$  Unidade que representa a potência elétrica

# Resumo

Nesta dissertação apresentam-se os resultados de um estudo sobre a caracterização do canal de comunicação em linhas de distribuição de energia elétrica de baixa tensão para sistemas PLC (Powerline Communications). Além da abordagem teórica, apresenta-se um estudo de caso em que determinado canal PLC é alvo de medidas práticas de resposta em frequência, resposta ao impulso, atraso de grupo, banda de coerência, dispersão temporal e comportamento ruidoso. Menciona-se ainda como tais medidas podem ser analisadas do ponto de vista de suas características estatísticas.

Palavras-chave: Caracterização de canal, Tecnologia PLC.

# Abstract

In this dissertation we present the results of a study about the characterization of the low-voltage powerline communication (PLC) channel used in powerline communication systems. Besides the theoretical approach, we also present real measurements from a given indoor PLC channel as a case study. These measurements include frequency response, impulse response, group delay, coherence bandwidth, time dispersion and noise behavior. We also report how these measurements can be analyzed from the perspective of their statistical characteristics.

Keywords: Channel characterization, Powerline Communications, PLC.



# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Contextualização e Motivação

A crescente demanda por serviços de comunicação de maior velocidade e qualidade tem provocado um ritmo acelerado de desenvolvimento de soluções que atendam às necessidades existentes. Além disso, existe uma grande necessidade de se desenvolver tecnologias que promovam a universalização dos serviços de telecomunicações, provendo comunicação em áreas distantes dos grandes centros e a custos acessíveis à população com baixo poder aquisitivo.

Na busca por soluções eficientes, empresas e pesquisadores enfrentam diversos obstáculos, tais como:

- *limitação de banda disponível*, necessária para impedir a interferência entre diversas tecnologias e permitir o compartilhamento do espectro de frequência definido pelos agentes locais de regulamentação dos serviços de telecomunicações;
- *máxima potência de transmissão*, fator que pode limitar a área de abrangência de um determinado serviço;
- *aumento da taxa de transmissão de dados*, decorrente do desenvolvimento de serviços que necessitam de elevadas taxas para garantir uma qualidade satisfatória;
- *velocidade e capacidade de armazenamento e processamento dos dispositivos eletrônicos*, o que provoca o aperfeiçoamento das técnicas de produção de semicondutores para prover soluções mais adequadas às necessidades atuais;
- *redução dos efeitos de degradação provocados pelo meio onde a comunicação é realizada*, uma vez que as características do canal de comunicação podem

provocar a inoperância do sistema;

- *redução de custos*, para garantir um mercado consumidor que sustente novas pesquisas e, ainda, permita o acesso aos variados serviços de telecomunicações a uma maior parcela da população.

Diante do cenário apresentado, a técnica PLC (*Powerline Communications*) tem sido considerada uma interessante solução para transmissão de dados em alta velocidade [1]. A tecnologia PLC consiste na transmissão de dados utilizando a rede de distribuição de energia elétrica. Sua utilização é sustentada pela possibilidade de obtenção de taxas de transmissão na ordem de centenas de Mbps e, ainda, por apresentar baixo custo e facilidade de implementação, visto que a mesma utiliza a infra-estrutura já instalada.

De acordo com [2] existem diversos grupos de potenciais consumidores de serviços que utilizam a infra-estrutura de distribuição de energia elétrica. Um desses grupos consiste dos consumidores residenciais, comerciais, industriais e instituições públicas e outro consiste nas próprias concessionárias de distribuição de energia. Para o primeiro grupo citado destacam-se os seguintes serviços: interatividade e transmissão de sinais em aplicações de TV digital, vídeo sob-demanda, redes de computadores de alta velocidade, Voz sobre IP (VoIP), ensino a distância, sistemas de segurança, automação de ambientes, integração se serviços públicos, etc. Leitura automática de medidores, medição da qualidade da energia fornecida, gerenciamento de carga e de falhas são alguns dos possíveis serviços disponíveis para os consumidores do segundo grupo citado.

A transferência de dados através de rede de distribuição de energia elétrica tem sido estudada há bastante tempo, mas vem ganhando destaque somente nos últimos anos, com maior ênfase nos sistemas de comunicação em redes de distribuição em baixa tensão. Neste tipo de ambiente a comunicação apresenta maior segurança e eficiência e, além disso, muitas soluções já foram inseridas no mercado mundial, principalmente o europeu, onde muitos recursos tem sido disponibilizados para pesquisa e desenvolvimento de soluções destinadas a esse tipo de comunicação [3].

Visando suprir as variadas necessidades existentes, verifica-se a formação de diversas linhas pesquisas, tais como: extração de parâmetros, modelamento e simulação das características do canal de comunicação, projeto de circuitos e equipamentos utilizados nos diversos elementos da rede (transmissores, receptores, acopladores, adaptadores, filtros, etc), codificação de canal, emprego de variadas técnicas de modulação do sinal transmitido, definição de padrões e criação de protocolos que permitam uma comunicação com qualidade satisfatória.

Este trabalho almeja simular os fenômenos de propagação (resposta em frequência e comportamento de ruídos) que ocorrem em um canal de comunicação

PLC e, ainda, fornecer dados característicos de determinadas redes a fim de validar os modelos já apresentados. Além disso, são apresentados conhecimentos e experiências que levam à discussão sobre o emprego dessa tecnologia no contexto da realidade brasileira, uma vez que esta se apresenta como uma boa solução como meio de inclusão digital em países em desenvolvimento. Entretanto, existem grandes obstáculos para a massificação da utilização dessa tecnologia no Brasil, que vão desde a falta de políticas de regulamentação até o fraco investimento no desenvolvimento de novas soluções.

## 1.2 Estrutura e contribuições do trabalho

Este trabalho foi estruturado em quatro capítulos que mostram os principais conceitos necessários para a compreensão do tema em estudo e, ainda, apresentam ferramentas utilizadas e resultados obtidos durante a pesquisa.

O segundo capítulo aborda a caracterização do canal de comunicação PLC. Nessa caracterização são apresentados a resposta impulsiva do canal, assim como seu modelamento matemático, os principais tipos de ruídos existentes no canal PLC, as principais fontes geradoras desses ruídos e ainda, a faixa de maior influência dos mesmos. O comportamento do canal apresentado possui uma resposta impulsiva modelada de acordo com [4] e os ruídos sintetizados seguem os modelos estatísticos apresentados em [5]. Para ilustrar os conceitos estatísticos indispensáveis para a obtenção das fontes de ruído, são apresentadas teorias de filtragem e geração de variáveis aleatórias, conceitos esses que foram utilizados na configuração dos sinais simulados. O terceiro capítulo apresenta técnicas de extração de parâmetros do canal adequadas ao tipo de canal analisado e as principais técnicas de acoplamento de um sinal elétrico em uma rede de distribuição de energia elétrica de baixa tensão. Neste capítulo são apresentadas configurações utilizadas na extração de parâmetros de uma rede assim como os resultados obtidos durante as medições realizadas, além de análises estatísticas desses dados. O quarto e último capítulo investiga a possibilidade de transmissão de dados em alta velocidade em um canal PLC, ilustrando algumas experiências já bem sucedidas no mercado mundial. Nesta parte são revistos os requisitos definidos para o trabalho e apresentam-se os resultados obtidos que visam contribuir para o desenvolvimento de novos sistemas. Finalizando, são apresentadas algumas sugestões de estudos que necessitam ser realizados a fim de produzir novas contribuições ao estudo da técnica PLC.

## 1.3 A Tecnologia PLC

Esta seção apresenta as principais características da comunicação PLC, tratando de temas importantes como: principais padrões e regulamentação; estado da arte no Brasil e no mundo; aplicações e tendências futuras; comportamento e influência do canal de comunicação. O início da seção apresenta algumas teorias considerando a comunicação em redes de distribuição de energia elétrica, destacando a caracterização dos tipos de acordo com a faixa de tensão e os equipamentos necessários para a comunicação nesse ambiente. Além disso, a seção dá informações sobre as principais técnicas de modulação utilizadas nos sistemas de comunicação que utilizam redes de distribuição de energia elétrica.

### 1.3.1 Caracterização da rede de distribuição de energia elétrica

Os estudos da utilização da rede de distribuição de energia elétrica para transmissão de dados em altas taxas têm sido realizados a algumas décadas, mas vem ganhado interesse atual devido a algumas características:

- *baixo custo de implantação*, uma vez que utiliza parte da infra-estrutura já existente;
- *grande penetração*, visto que em grande parte do mundo os potenciais consumidores possuem acesso aos serviços de distribuição de energia elétrica;
- *facilidade de instalação*, pois basta conectar alguns equipamentos em locais de fácil acesso (tomadas, quadros de medição e distribuição, etc) e efetuar algumas configurações, que o sistema estará apto a funcionar;
- *flexibilidade*, permitindo a comunicação através de diversos pontos de acesso e a real possibilidade de operar em conjunto com outras soluções.

Existe uma definição clássica que divide a rede elétrica em três classes de acordo com o nível de tensão presente em cada uma, como detalhado a seguir.

A rede de distribuição de *alta-tensão* foi a primeira a ser utilizada para fins de comunicação, com serviços chamados OPLAT (Onda Portadora em Linha de Alta Tensão), que começaram a ser utilizados na década de 30 pelas empresas concessionárias de energia elétrica e permitiam aplicações limitadas [3]. O desenvolvimento de novas soluções possibilitou a ampliação de serviços como a medição da qualidade das linhas de distribuição e do consumo dos usuários, manutenção e controle remoto, etc. Essa rede compreende as linhas de distribuição com tensões entre 110 e 380 kV e possui comprimento de até 6.000 km [6]. Devido aos grandes

comprimentos das linhas e fenômenos de interferência, os dados são transmitidos a baixas taxas.

A utilização das linhas de distribuição de *média-tensão*, que compreendem níveis entre 10 e 30 kV, contempla algumas aplicações, como a comunicação em zonas rurais e em plantas industriais, mas sua utilização e desenvolvimento de novas soluções são limitados por fatores comerciais. Geralmente, essas linhas apresentam comprimento entre 5 e 25 km [6].

Já a utilização das linhas de *baixa-tensão* apresenta-se como uma promissora opção tanto no aspecto da capacidade de penetração dos serviços quanto em questões comerciais. Essa afirmação é baseada na possibilidade de transmissão de dados a elevadas taxas, na casa de centenas de Mbps, com qualidade satisfatória e a custos competitivos em relação a outras tecnologias existentes [3]. O nível de tensão dessas redes se encontra entre 127 e 400 V. A infra-estrutura de baixa tensão é utilizada principalmente em redes locais, onde as distâncias são inferiores a 1 km.

### 1.3.2 A comunicação no canal PLC

Como mencionado, a tecnologia PLC consiste na transmissão de dados sobre a infra-estrutura de distribuição de energia elétrica, geralmente na faixa entre 1 e 30 MHz. Essa limitação de banda é decorrente das características do canal, uma vez que o mesmo impõe elevadas perdas fora dessa faixa, inviabilizando a comunicação em alta velocidade. Dessa forma, verifica-se que a faixa de frequências disponíveis para a transmissão do sinal está diretamente relacionada com o comportamento do canal de comunicação. Essa característica demonstra a grande relevância de se conhecer o comportamento do canal para auxiliar o desenvolvimento de eficientes sistemas de comunicação.

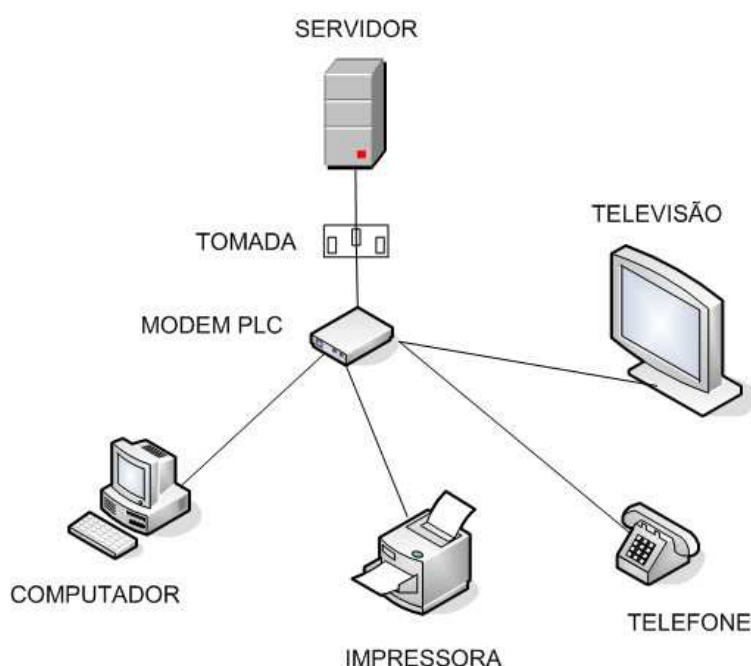
Estudos recentes têm demonstrado o grande potencial decorrente da transmissão de sinais com banda larga em redes pessoais (*PAN - Personal Area Network*) [1]. Essa tecnologia também é encontrada na literatura como *In-Home PLC*. A utilização dessa tecnologia tem sido pesquisada em diversos países, principalmente na Europa, onde os resultados têm-se demonstrado promissores.

Este trabalho concentra-se na transmissão de dados banda larga em redes de distribuição de baixa voltagem, tecnologia também conhecida como BPL (Broadband over Powerline). Neste cenário observa-se a possibilidade de implementação de serviços como [1][6][7]:

- Acesso em banda larga à Internet;
- Vídeo sob demanda;
- Telemedicina;

- Aplicações de TV e Rádio Digital;
- Telefonia IP (Internet Protocol);
- Serviços de monitoração e segurança;
- Automação residencial, comercial e industrial;
- Monitoramento de processos produtivos on-line;

A Figura 1.1 ilustra uma configuração típica da comunicação PLC em uma rede doméstica de baixa tensão.



**Figura 1.1:** Comunicação PLC em ambientes domésticos

### 1.3.3 Obstáculos decorrentes da infra-estrutura

Existem grandes desafios que precisam ser superados para proporcionar a comunicação em elevadas taxas em um canal PLC, dentre as quais podemos destacar: perda ôhmica no cabeamento, reflexões nas terminações (tomadas, emendas, etc) e o comportamento reativo de alguns equipamentos, tais como medidores de consumo e transformadores.

A qualidade do cabeamento da rede pode provocar uma acentuada atenuação do nível do sinal transmitido, podendo limitar a distância entre elementos transmissores e receptores. Para ultrapassar esse obstáculo poder-se-ia *aumentar a potência transmitida*, o que não seria uma boa solução por aumentar o consumo

do equipamento e provocar o aparecimento de interferência em outros equipamentos e sinais transmitidos; *aumentar a sensibilidade dos receptores*, o que muitas vezes não é possível pela limitação dos circuitos e componentes disponíveis. Dessa forma, torna-se necessário garantir uma qualidade mínima do cabeamento para facilitar a comunicação.

As terminações (tomadas, emendas, ...) existentes na rede podem inviabilizar a transmissão dos dados. Para isso torna-se cada vez mais necessário o desenvolvimento de técnicas que reduzam os efeitos provocados pelos múltiplos-percursos de propagação. A maioria das soluções encontradas são baseadas na combinação de técnicas de modulação e codificação de canal.

Medidores de consumo de energia elétrica e transformadores impedem o tráfego de informações de alta velocidade pela geração de perdas provocadas principalmente pelo efeito Foucault [1]. Foi então necessário o desenvolvimento de circuitos acopladores que viabilizaram a utilização do canal PLC para obtenção de taxas expressivas.

#### 1.3.4 Equipamentos de uma rede PLC em baixa tensão

O equipamento chamado Mestre ou TE (*Transformer Equipament*) é responsável pela troca de informações entre a rede local e o *backbone* de acesso a Internet. Esse equipamento é responsável por disponibilizar o sinal na rede elétrica. O controle de acesso à rede é feito pelo mesmo e é executado por meio de uma autenticação, evitando o acesso e uso indevido dos recursos. Geralmente o equipamento Mestre é instalado junto ao transformador, possibilitando a comunicação de dados em alta velocidade entre o backbone e a rede PLC local.

Junto ao medidor de consumo de energia elétrica se faz necessária a instalação de um equipamento denominado repetidor BT (Baixa-Tensão) ou IE (*Intermediate equipment*), que tem como função principal receber os sinais PLC gerados no(s) modem(s), efetuando o desvio do medidor e reinjetando-os na rede de baixa tensão.

Caso a distância entre medidores e transformadores seja grande, tipicamente maior que 300 metros, se faz necessária a inserção de um outro repetidor que tem a função de aumentar o nível do sinal. A inserção desse elemento é responsável pela expansão da cobertura do sistema.

O modem PLC é o dispositivo que permite ao usuário transmitir ou receber dados através da rede. Esse dispositivo é conectado a uma tomada do ambiente e possui interfaces padrões de mercado (Ethernet, USB, etc). O mesmo proporcionará a conexão de diversos tipos de aparelhos (Telefones IP, TV's, Computadores, Periféricos, etc) à rede.

### 1.3.5 O estado da arte no Brasil e no Mundo

A utilização da tecnologia PLC tem sido estudada e testada em diversas partes do mundo, principalmente nos Estados Unidos e Europa, onde diversas empresas se uniram a fim de padronizar algumas características dos serviços comercializados. A *HomePlug Powerline Alliance* é um grupo formado por 65 empresas, fundado em 2000, responsável pela definição de diversos padrões existentes no mercado como [8]:

- *HomePlug 1.0*, que define o método de acesso ao meio e especificações da camada física, preocupando-se com a robustez da transmissão de dados para compensar as adversidades do canal ;
- *HomePlug AV*, responsável pela especificação de serviços de TV de Alta-Definição (HDTV - High Definition Television) e VoIP;
- *HomePlug BPL*, que especifica as conexões entre empresas e consumidores;
- *HomePlug CC*, que padroniza os serviços de controle e comando.

Internacionalmente, um projeto de destaque é o OPERA (*Open PLC European Research Alliance*)[9]. Os objetivos desse projeto são: melhorar os sistemas já inseridos no mercado, desenvolver novas opções de serviço e, ainda, cooperar para a criação de padrões técnicos internacionais.

No Brasil, as condições para o uso de Radiofrequências por Sistemas de Banda Larga por meio de Redes de Energia Elétrica foram aprovadas em 8 de abril de 2009, por meio da Resolução 527 [10]. Essa resolução define a faixa de 1,705 MHz a 50 MHz para operação dos equipamentos BPL em caráter secundário, ou seja, os mesmos são tratados como equipamentos de radiocomunicação de radiação restrita e não podem provocar interferências que prejudiquem os serviços prioritários nessa faixa. A Tabela 1.1 mostra os limites de radiações indesejadas causadas por sistemas de distribuição de energia elétrica de baixa tensão (RBT).

**Tabela 1.1:** *Limites de radiações indesejadas causadas por sistemas BPL de RBT*

Frequências [MHz]	Intensidade de campo [V/m]	Distância da medida [m]
1,705 - 30	30	30
30 - 50	100	3

Antecipando-se à publicação da resolução, alguns grupos de pesquisas, principalmente ligados à APTEL (Associação de Empresas Proprietárias de Infra-Estrutura e Sistemas Privados de Telecomunicações) foram criados. Essas pesquisas geraram alguns projetos piloto que estão em fase de teste e avaliação técnica e



econômica. Empresas fornecedoras de energia elétrica começaram os testes a partir de 2001 [3]. O primeiro teste utilizando a tecnologia BPL no país foi realizado pela COPEL (Companhia Paranaense de Eletricidade) na cidade de Curitiba, onde 50 casas tiveram acesso ao serviço. Em 2003 a LIGHT, concessionária de distribuição de energia elétrica fluminense, fez as suas primeiras demonstrações de acesso via rede elétrica em prédios comerciais, residenciais e escolas públicas, através de uma parceria com o governo estadual. Nesse mesmo ano outras empresas como Cemig, Eletropaulo, Cemar e Celg também demonstraram interesse na utilização da tecnologia.

O projeto de maior repercussão na mídia brasileira foi realizado em 2004 na cidade maranhense de Barreirinhas, localizada a 240 km da capital do estado [3]. A escolha dessa cidade para receber o projeto piloto foi baseada nas características sociais locais e em políticas governamentais de "Inclusão Digital", uma vez que no local existiam poucas opções para comunicação. A cidade apresenta um dos piores índices de desenvolvimento humano do país, mas tem forte potencial turístico. Na segunda etapa desse projeto, coordenado pela APTEL, 14 pontos de acesso foram implantados em pontos estratégicos da cidade para prover acesso à Internet em banda larga.

Em 2006 um outro projeto de grande relevância foi implementado no bairro de Restinga, na cidade de Porto Alegre [3]. Nesse projeto, coordenado pela Procempa (Empresa de Tecnologia da Informação de Porto Alegre), conseguiu-se obter uma taxa de 45 Mbps em uma rede com mais de 3,5 km de raio, objetivando promover projetos de Inclusão Social.

### 1.3.6 Principais esquemas de modulação utilizados na tecnologia PLC

Existem diversas técnicas de modulação digital que se adequam ao canal PLC, mas a escolha deve levar em consideração diversos aspectos técnicos, como os listados a seguir [11]:

- Presença de diferentes fontes de ruído, o que provoca uma redução na relação sinal/ruído (*SNR - Signal to Noise Ratio*);
- Variação temporal e seletividade em frequência do canal;
- Regulamentações relacionadas à compatibilidade eletromagnética (*EMC - Electromagnetic compatibility*), o que limita a potência de transmissão;

A seguir são apresentadas as principais técnicas de modulação empregadas em sistemas PLC.

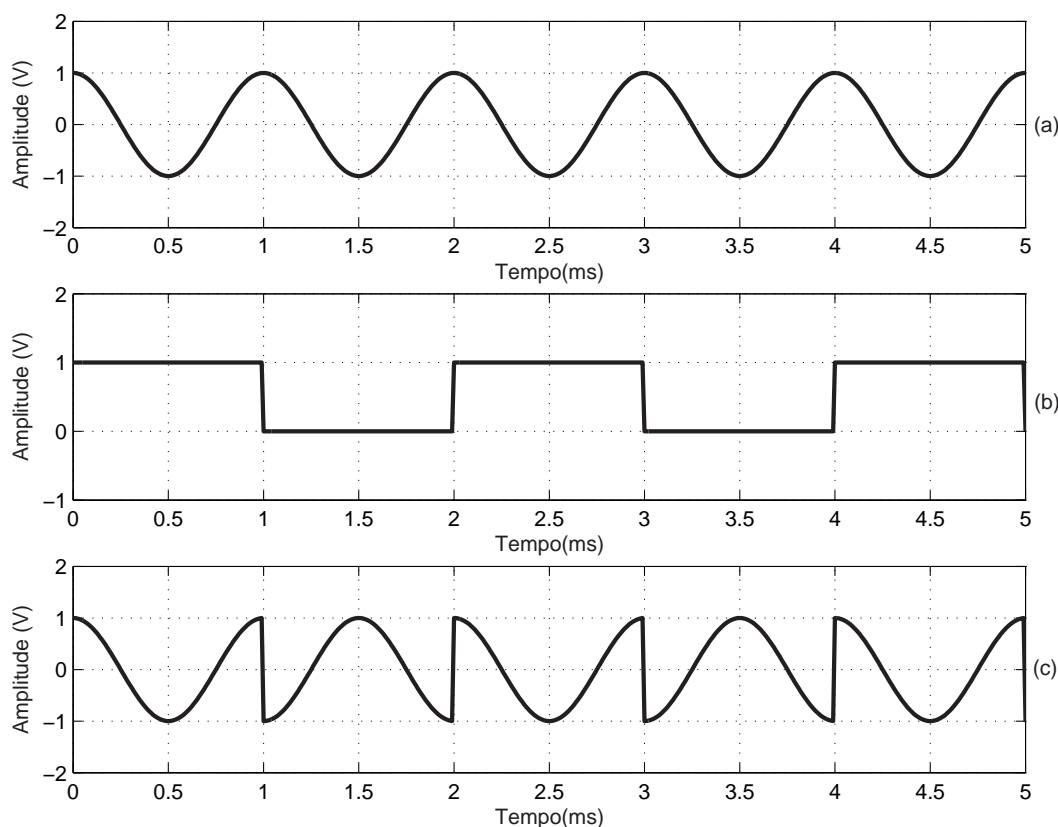
Os sistemas de modulação com portadora única são uma boa opção quando se considera a complexidade com fator limitante do projeto. Dentre os possíveis tipos de modulação desse grupo, para comunicação na rede de energia, destacam-se as modulações de chaveamento em fase (*PSK - Phase Shift Keying*) e frequência (*FSK - Frequency Shift Keying*) e ainda a modulação que combina alterações de fase e amplitude (*QAM - Quadrature Amplitude Modulation*).

Em um sistema M-PSK coerente, uma mensagem com  $M$  possíveis símbolos binários modula uma portadora de frequência  $f_c$  [12]. Nessa modulação, cada símbolo é representado por

$$s_i(t) = \sqrt{\frac{2E}{T}} \cos\left[2\pi f_c t + \frac{2\pi}{M}(i - 1)\right], \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (1.1)$$

onde  $E$  é a energia do sinal por símbolo e  $T$  é o intervalo de sinalização.

A Figura 1.2.c ilustra um sinal com modulação BPSK coerente, onde uma portadora senoidal (Figura 1.2.a) é modulada por uma mensagem digital (Figura 1.2.b).



**Figura 1.2:** Modulação BPSK: (a) Portadora senoidal. (b) Sequência binária modulante. (c) Sinal modulado.

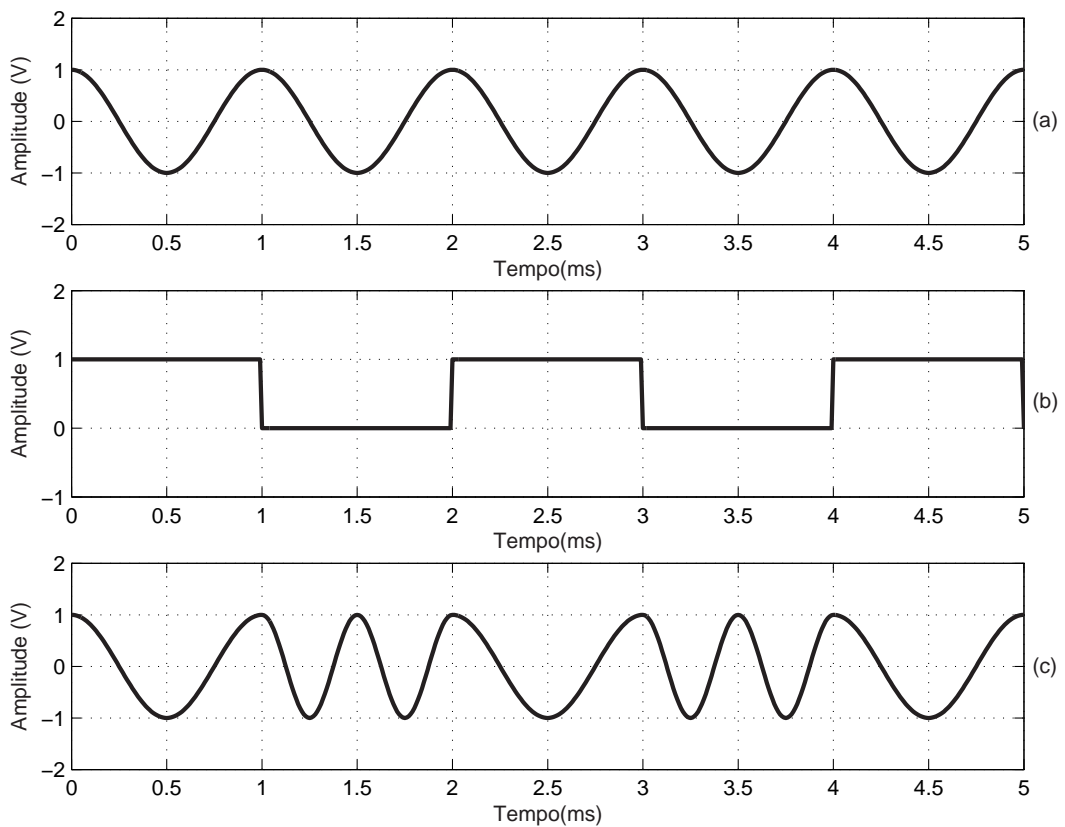
A utilização da modulação PSK é justificada pela baixa distorção de fase existente em um canal PLC [11].

Na modulação M-FSK coerente, uma mensagem com  $M$  possíveis símbolos binários modula uma portadora [12]. Cada símbolo dessa modulação é representado por

$$s_i(t) = \sqrt{\frac{2E}{T}} \cos\left[\frac{\pi}{T}(n_c + i)t\right], \quad 0 \leq t \leq T \quad (1.2)$$

onde  $i = 1, 2, \dots, M$ .

A Figura 1.3.c ilustra um sinal com modulação BFSK coerente. Essa forma de onda é obtida pela modulação de uma portadora senoidal (Figura 1.3.a) pela mensagem digital (Figura 1.3.b).



**Figura 1.3:** Modulação BFSK: (a) Portadora senoidal. (b) Sequência binária modulante. (c) Sinal modulado.

Em muitos casos a modulação FSK é considerada aplicável por permitir jitter de fase com valores elevados [11].

O sinal modulado M-QAM consiste de duas portadoras, uma em fase e outra em quadratura, que são moduladas individualmente por amplitudes discretas [12]. Os símbolos QAM são representados por

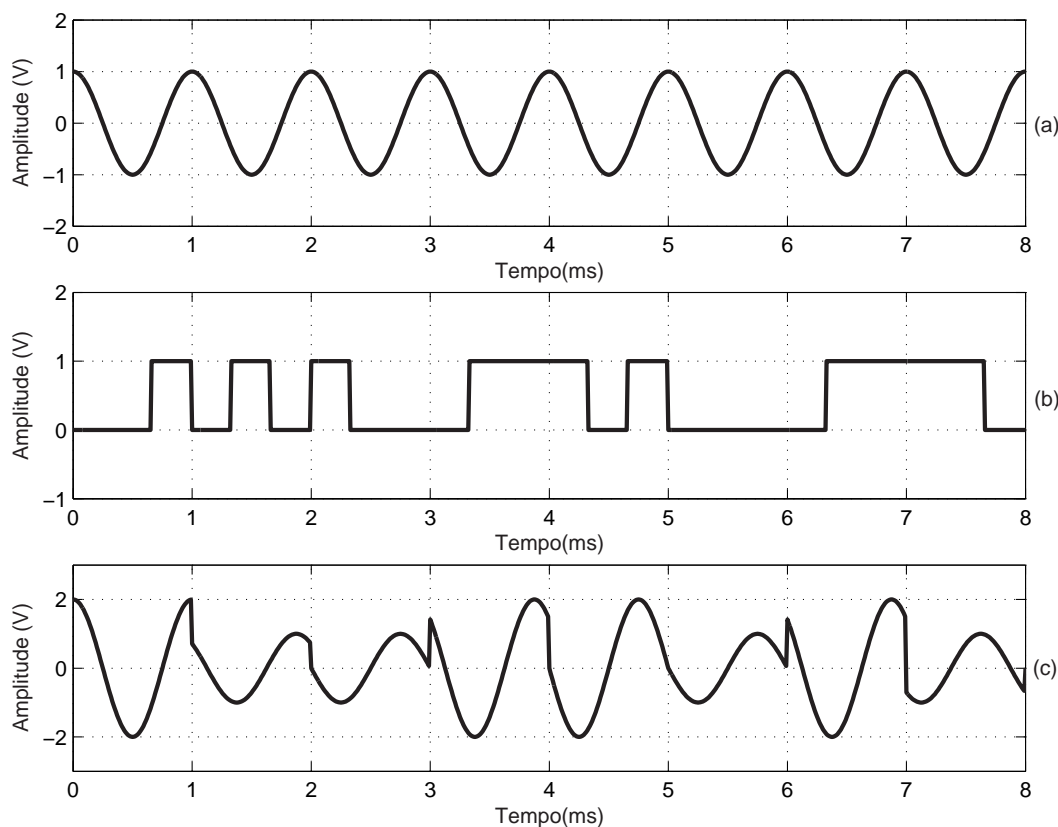
$$s_i(t) = \sqrt{\frac{2E_0}{T}} a_i \cos(2\pi f_c t) - \sqrt{\frac{2E_0}{T}} b_i \sin(2\pi f_c t), \quad 0 \leq t \leq T \quad (1.3)$$

onde  $i = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$  e  $E_0$  é a energia do sinal de menor amplitude.

A Figura 1.4 ilustra o processo de modulação 8-QAM com mapeamento dos símbolos mostrado na Tabela 1.2.

**Tabela 1.2:** Características dos símbolos de uma modulação 8-QAM

Sequência binária dos símbolos	Amplitude	Defasagem
000	1	0
001	2	0
010	1	$\frac{\pi}{4}$
011	2	$\frac{\pi}{4}$
100	1	$\frac{\pi}{2}$
101	2	$\frac{\pi}{2}$
110	1	$\frac{3\pi}{4}$
111	2	$\frac{3\pi}{4}$



**Figura 1.4:** Modulação 8-QAM: (a) Portadora senoidal. (b) Sequência modulante. (c) Sinal modulado.

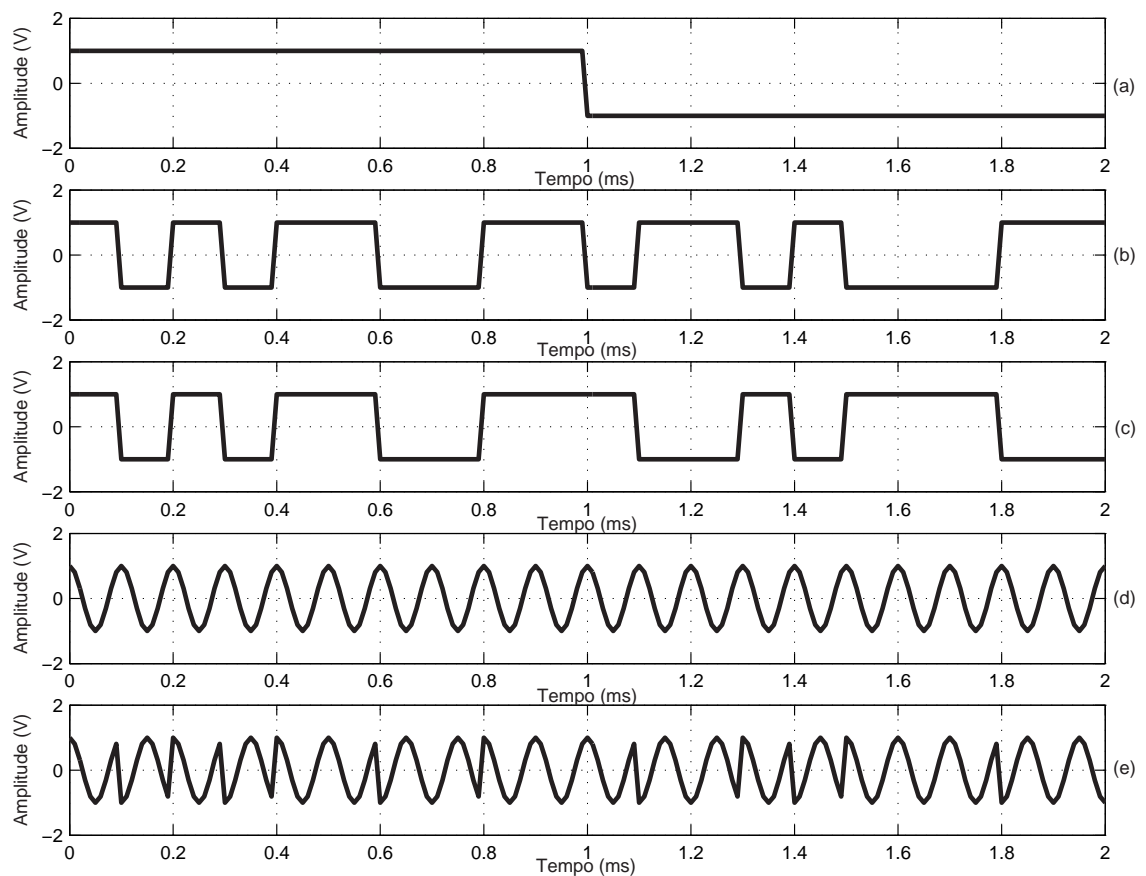
A utilização da técnica QAM é recomendada para ambientes onde a influência de ruídos impulsivos necessite ser considerada como fator limitante para viabilizar a comunicação. Entretanto, as características do canal, principalmente relacionados a interferência inter-simbólica (ISI - Inter Symbolic Interference), podem

exigir técnicas mais robustas de equalização e detecção, o que pode aumentar a complexidade do sistema.

Diversas pesquisas propõem a utilização de técnicas de espalhamento espectral como solução para driblar os obstáculos impostos pelo canal PLC no processo de transmissão de dados. Os tipos mais difundidos de sistemas com espalhamento espectral são:

- Sequência direta (*DS - Direct Sequence*), no qual a informação é multiplicada por um sinal pseudo-aleatório;
- Saltos em frequência (*FH - Frequency Hopping*), no qual um sinal modulado de faixa estreita salta em frequências dentro de um espectro finito, de forma pseudo-aleatória;

A Figura 1.5 ilustra o princípio do espalhamento espectral por sequência direta.



**Figura 1.5:** Técnica de espalhamento espectral por sequência direta usando modulação BPSK: (a) Sequência modulante. (b) Sequência de espalhamento. (c) Sinal espalhado. (d) Portadora senoidal. (e) Sinal espalhado e modulado

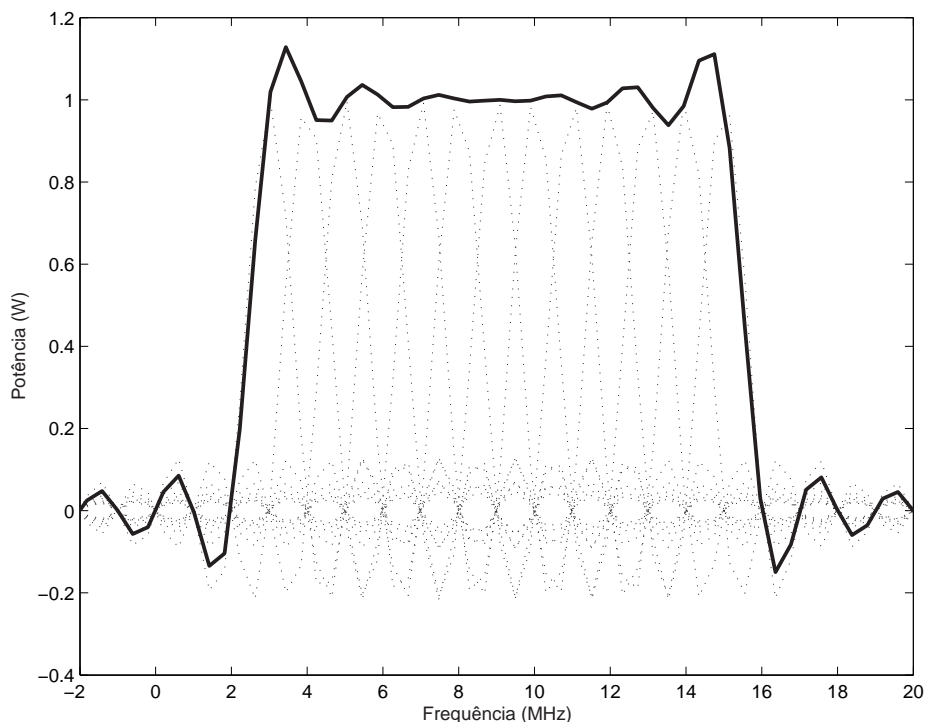
Para sistemas PLC, a técnica mais recomendada é a de espalhamento espectral por sequência direta (*DSSS - Direct Sequence Spread Spectrum*) [11]. A principal vantagem dessa técnica é o fornecimento de uma densidade espectral de potência baixa, evitando assim interferência sobre outros sistemas. Por outro lado, o espalhamento da potência do sinal sobre uma faixa muito larga impossibilita a obtenção de taxas elevadas em um canal PLC, visto que a banda disponível para esse tipo de comunicação é restrita.

A técnica mais recomendada por pesquisadores e padrões já estabelecidos, para transmissão de dados na casa de centenas de MHz, é a de multiplexação por divisão em frequências ortogonal (*OFDM - Orthogonal Frequency Division Multiplexing*). Nessa técnica um sinal é transmitido por  $K$  sub-portadoras moduladas que não interferem entre si, necessitando atender ao princípio da ortogonalidade. Os símbolos OFDM são representados por [13]:

$$s(t) = \sum_{k=0}^{K-1} i_k \cos(w_k t) + q_k \sin(w_k t) \quad (1.4)$$

onde  $i_k$  é a componente do sinal em fase e  $q_k$  é componente em quadratura de uma função senoidal de frequência  $w_k$ .

A Figura 1.6 ilustra o espectro resultante de um esquema OFDM.



**Figura 1.6:** Representação de um sinal no domínio da frequência utilizando a técnica OFDM

A recomendação da utilização da técnica OFDM é baseada na possibilidade de obtenção de taxas elevadas em espectro reduzido e, ainda, na elevada robustez a ambientes com desvanecimento seletivo em frequência e ruídos impulsivos [1][11]. Para que o resultado do emprego dessa técnica seja satisfatório, torna-se necessário ultrapassar alguns obstáculos que são: sincronismo de portadoras, sensibilidade a desvios de frequência e natureza inconstante da envoltória do sinal recebido.

# Capítulo 2

## Caracterização e Simulação do canal PLC

O conhecimento das características de um canal de comunicação apresenta grande relevância quando estão sendo desenvolvidos novos sistemas de comunicação, ou até mesmo na etapa de aperfeiçoamento de sistemas já existentes, uma vez que o desempenho do sistema pode ser limitado pelas características do canal.

### 2.1 Modelamento do Canal

Como mostrado em [1][6][4][14], observa-se que o canal de comunicação PLC apresenta características bastante complexas, visto que diversos fenômenos influenciam no comportamento da onda durante a propagação. Esses fenômenos são representados por desvanecimento seletivo em frequência e pela existência de componentes de múltiplos-percursos, que são provenientes de reflexão nas terminações do cabeamento.

A resposta do canal está diretamente relacionada com a função de transferência dos cabos utilizados na rede. O modelamento matemático correspondente pode ser obtido em [6][5] e é tratado em seguida.

A resposta impulsiva de um canal PLC está relacionada à atenuação de cada uma das  $L_h$  componentes de múltiplo-percurso ( $g_i$ ) e seu respectivo atraso ( $\tau_i$ ). A Equação (2.1) representa o modelo matemático para a resposta impulsiva do canal analisado.

$$h(t) = \sum_{i=1}^{L_h} g_i \delta(t - \tau_i) \quad (2.1)$$

O modelo descrito por (2.1) pode ser implementado pela estrutura ilustrada



na Figura 2.1, denominada de linha de atraso com derivações (*TDL - Tapped Delay Line*).

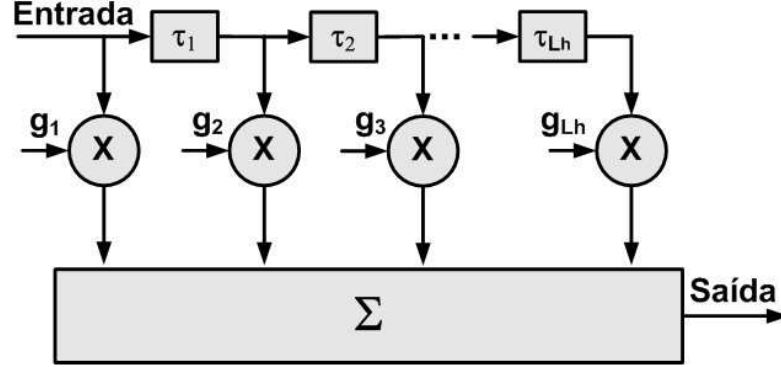


Figura 2.1: Estrutura que representa o Canal PLC

Philipps mostra em [4] que o fator de atenuação  $g_i$  é uma grandeza complexa da forma

$$g_i = |g_i| e^{j\varphi_i}. \quad (2.2)$$

Substituindo o fator de atenuação em (2.1), tem-se

$$h(t) = \sum_{i=1}^{L_h} |g_i| e^{j\varphi_i} \delta(t - \tau_i). \quad (2.3)$$

Aplicando-se a Transformada de Fourier, a resposta em frequência é descrita por

$$H(\omega) = \sum_{i=1}^{L_h} |g_i| e^{j\varphi_i} e^{-j\omega\tau_i}. \quad (2.4)$$

Substituindo a frequência angular ( $\omega$ ) e o atraso das componentes ( $\tau_i$ ), por suas definições:

$$\omega = 2\pi f, \quad (2.5)$$

$$\tau_i = \frac{d_i}{v_p}, \quad (2.6)$$

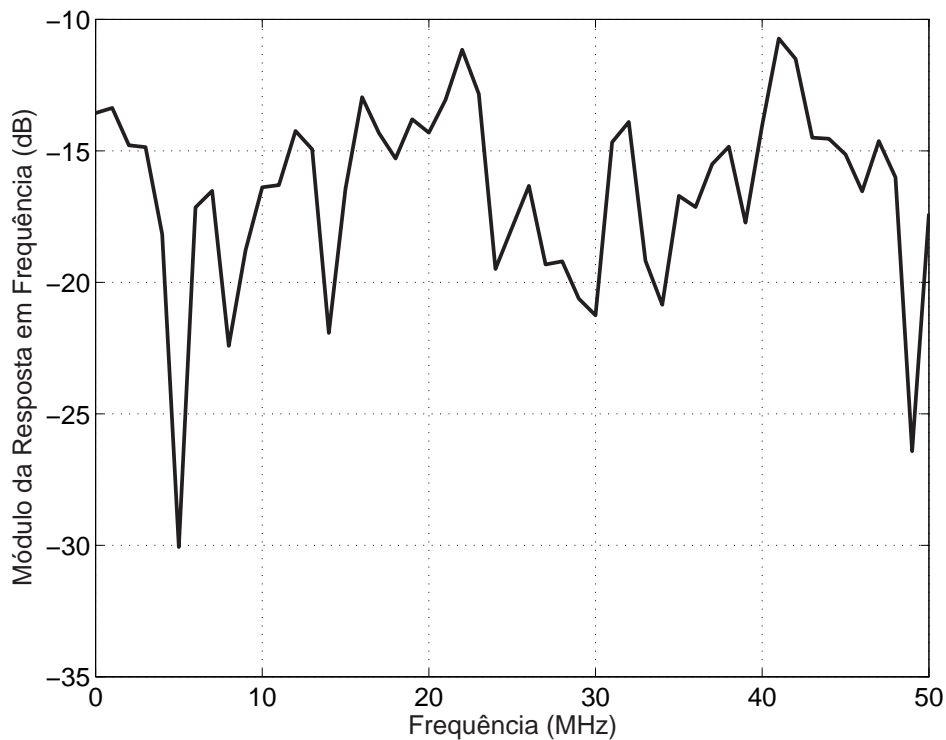
obtem-se uma resposta em frequência dependente do número de múltiplos-percursos interferentes ( $L_h$ ), da distância do raio refletido ( $d_i$ ), da frequência do sinal ( $f$ ) e da velocidade de propagação da onda eletromagnética ( $v_p$ ):

$$H(f) = \sum_{i=1}^{L_h} |g_i| e^{j\varphi_i} e^{-j2\pi f \frac{d_i}{v_p}}. \quad (2.7)$$

A Figura 2.2 ilustra a resposta em frequência de uma rede PLC [4], obtida pela substituição dos valores presentes na Tabela 2.1 na Equação (2.3).

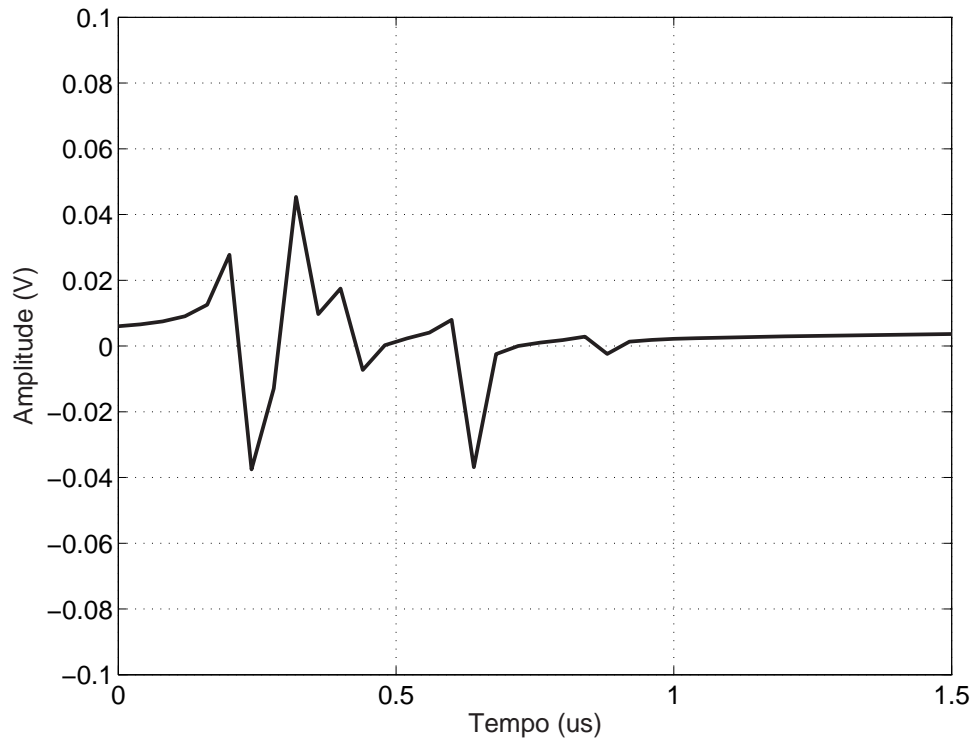
**Tabela 2.1:** Características de uma rede PLC

Componente	Amplitude	Defasagem [rad]	Atraso [ $\mu$ s]
1	0,151	0,691	0,110
2	0,047	-0,359	0,154
3	0,029	0,591	0,205
4	0,041	2,913	0,311
5	0,033	1,012	0,427



**Figura 2.2:** Resposta em frequência de um canal PLC

A Figura 2.3 ilustra a resposta impulsiva do canal em questão. Analisando as respostas obtidas, verifica-se o caráter seletivo em frequência do canal, que apresenta vales de até 30 dB próximo às frequências de 5 e 50 MHz. Além disso, apresenta variações temporais de quase  $1\mu$ s, que pode provocar interferência intersimbólica. No terceiro capítulo deste trabalho são apresentadas análises numéricas sobre essas características.



**Figura 2.3:** Resposta impulsiva de um canal PLC

Götz, Rapp e Dostert apresentam em [1] um modelo empírico que descreve o comportamento da fase ( $\varphi_i$ ) e do fator de atenuação  $g_i$ , sendo expressa por:

$$\varphi_i = -j(a_0 + a_1 f^k) d_i. \quad (2.8)$$

Combinando (2.8) e (2.7), a resposta em frequência (empírica) se torna dependente também do expoente do fator de atenuação durante a propagação ( $k$ ), cujos valores encontram-se entre 0,5 e 1, e de fatores de atenuação ( $a_0$  e  $a_1$ ) [14]:

$$H(f) = \sum_{i=1}^{L_h} |g_i| e^{(a_0 + a_1 f^k) d_i} e^{-j2\pi f \frac{d_i}{v_p}} \quad (2.9)$$

onde  $a_0$  é o nível mínimo de atenuação e  $a_1$  é a taxa de acréscimo na propagação dependente da frequência.

## 2.2 Modelamento do Ruído

Em um canal PLC típico o ruído introduzido é um somatório de sinais provenientes de diferentes fontes. O comportamento resultante está diretamente relacionado à faixa de frequência considerada. Este fato demonstra a variação do

ruído na frequência e diferencia-o de um ruído branco aditivo (*AWGN - Additive White Gaussian Noise*).

A Figura 2.4 mostra um modelo para o canal de comunicação em estudo, destacando as principais fontes de ruído existentes [1][6][15][16][17]. Nesse modelo,  $s(t)$  representa o sinal transmitido,  $n(t)$  é o somatório da contribuição de todos os tipos de ruído presentes no canal e  $r(t)$  é o sinal recebido.

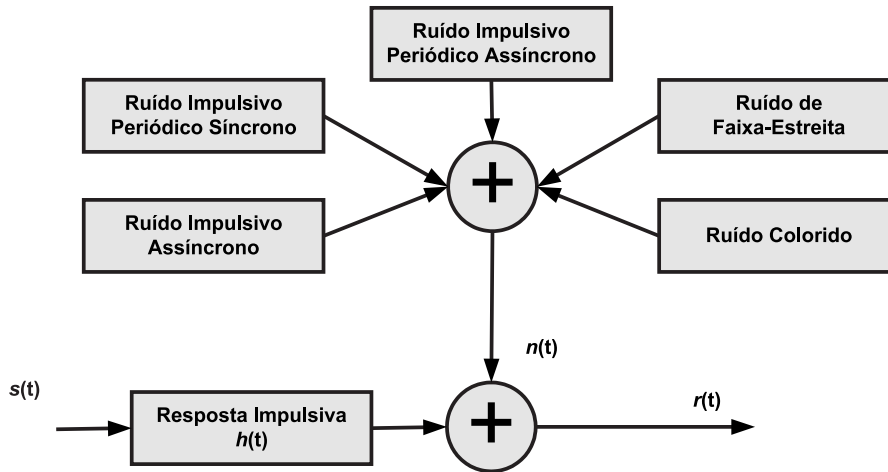


Figura 2.4: Esquema de comunicação em um canal PLC

Nesse modelo, os variados tipos de ruídos podem ser classificados em cinco grupos, conforme descrito nas seções a seguir.

### 2.2.1 Ruído Colorido

O ruído colorido pode ser gerado por diversas fontes como computadores, controladores de luminosidade de lâmpadas e secadores de cabelo. Sua principal característica é a redução da densidade espectral de potência com o aumento da frequência [6][15].

Em [5][16] é apresentado um modelo matemático aproximado que descreve a densidade espectral de potência do ruído colorido  $S_{n_C}(f)$  como sendo

$$S_{n_C}(f) = N_0 + N_1|f|^c [\text{dBm/Hz}] \quad (2.10)$$

onde  $N_0$  é o nível constante de ruído e  $N_1$  é a variação do ruído dependente da frequência.

Em [17][18][19] é apresentada uma variação cujo modelo é baseado em uma função exponencial como mostrado na Equação (2.11).

$$S_{n_C}(f) = N_0 + N_1 e^{\frac{f}{f_1}} [\text{dBm/Hz}] \quad (2.11)$$

onde  $f_1$  é a frequência central do espectro ruidoso e está relacionada ao tipo de ambiente [15].

### 2.2.2 Ruído de Faixa Estreita

As principais fontes desse tipo de ruído são interferências de serviços de rádio na faixa de 1 a 22 MHz e interferências geradas por harmônicos da frequência de deflexão horizontal de aparelhos de televisão [2][6][15].

Um modelo matemático para esse tipo de ruído apresentado em [17][19][20] é descrito por:

$$n_{BE}(t) = \sum_{d=0}^{D-1} A_d(t) \cos(2\pi f_d t + \phi_d), \quad (2.12)$$

onde  $D$  é a interferência de cada onda de rádio com amplitude modulada  $A_d(t)$ , frequência central  $f_d$  e fase  $\phi_d$ .

Em [18] é apresentado um outro modelo estatístico baseado em uma função gaussiana descrita por:

$$S_{n_{BE}}(f) = A_d e^{\frac{-(f-f_d)^2}{2B_k^2}}, \quad (2.13)$$

sendo  $B_k$  a largura de banda da função gaussiana.

### 2.2.3 Ruído impulsivo periódico síncrono

O ruído impulsivo periódico síncrono apresenta taxas de repetição de múltiplos da frequência da rede de distribuição de energia elétrica (50 ou 60 Hz) e é gerado principalmente por retificadores e tiristores [2][6][15].

### 2.2.4 Ruído impulsivo periódico assíncrono

Circuitos baseados em fontes chaveadas geram um ruído impulsivo periódico assíncrono que ocorre em frequências bem maiores que a da rede, na faixa de 50 a 200 kHz [2][6][15].

### 2.2.5 Ruído impulsivo assíncrono

O ruído impulsivo assíncrono é causado por transientes gerados na rede de energia elétrica. Esse tipo de ruído pode causar efeitos indesejados em uma rede PLC, uma vez que possui amplitudes superiores ao ruído colorido, em alguns casos atingindo valores de até 50 dB acima do ruído colorido. Adicionalmente, sua duração pode exceder o tempo de símbolo [14][15][16].

Esse tipo de ruído pode ser modelado por três variáveis aleatórias distintas:  $A_D$  descreve a amplitude de cada impulso, com duração  $t_L$  e distanciado do impulso adjacente por  $t_{I,i}$ . Conforme [21][22][23][24][25], o ruído impulsivo assíncrono pode ser descrito por

$$n_I(t) = \sum_{i=1}^N A_D \text{imp} \left( \frac{t - t_{I,i}}{t_L} \right) \quad (2.14)$$

onde  $\text{imp}(\cdot)$  é um trem de pulsos com  $N$  pulsos.

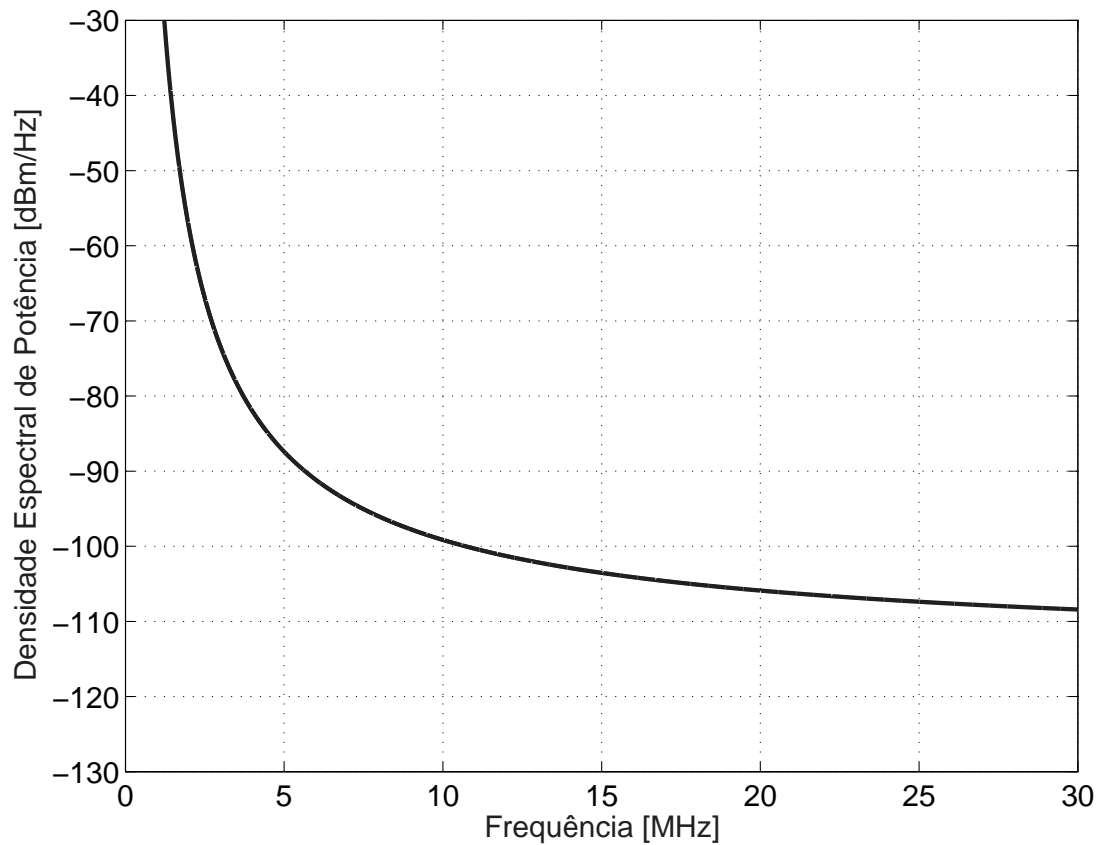
### 2.2.6 Simulação dos ruídos colorido, de banda estreita e impulsivo assíncrono

Em face da variedade de modelos de ruído apresentados por diversos autores e a não predominância de um dado modelo, decidiu-se implementar a simulação dos ruídos considerados mais relevantes ao menos na maior parte das publicações consultadas: o ruído colorido, o ruído de faixa estreita e o ruído impulsivo assíncrono.

Como os ruídos colorido e de banda estreita apresentam comportamento estacionário em variados intervalos de tempo, a simulação dos mesmos foi realizada seguindo o procedimento descrito em [18], onde os ruídos são gerados separadamente e o comportamento resultante de cada um deles é sobreposto.

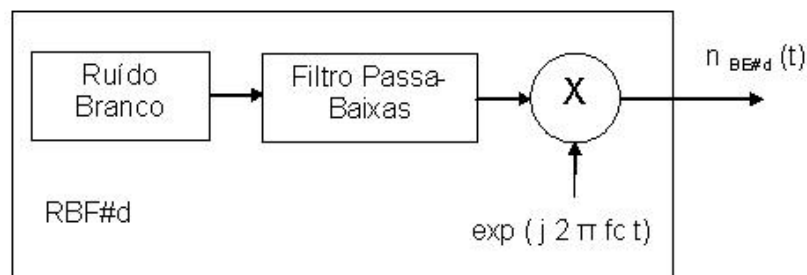
O ruído colorido é simulado usando a aproximação matemática descrita na Equação (2.10) e os parâmetros de um canal real publicados em [16]. Para esse modelo, os parâmetros utilizados são:  $N_0 = -115$  [dBm/Hz],  $N_1 = -100$  [dBm/Hz] e  $c = -0,8$ . Para os valores apresentados obtêm-se o comportamento mostrado na Figura 2.5.

A simulação do ruído de banda estreita foi realizada seguindo o procedimento de [20], que consiste na limitação em banda de um ruído branco para cada uma das frequências centrais dos sinais interferentes. Nessa implementação são geradas  $d$  fontes de ruído branco gaussiano que foram filtrados por filtros passa-baixa do tipo raiz de co-seno elevado, com fator de *roll-off* de 0,5 e frequência de corte definida pela metade do valor de largura de banda  $\frac{B}{2}$  apresentada na Tabela 2.2 e utilizando a estrutura ilustrada na Figura 2.6. Após a filtragem, o ruído gerado é



**Figura 2.5:** Modelo matemático aproximado do ruído colorido

multiplicado pela parcela que translandará o espectro da fonte ruidosa de forma que fique centralizada na frequência central  $f_c$ . Logo, todos sinais inteferentes são adicionados e ao sinal resultante é aplicada a Transformada Rápida de Fourier (*FFT - Fast Fourier Transform*).

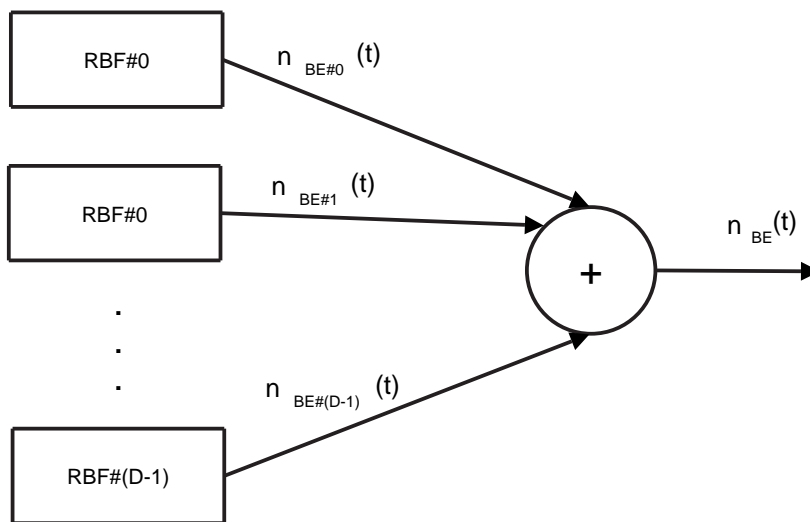


**Figura 2.6:** Diagrama em blocos do gerador de ruído limitado em banda

A Figura 2.8 ilustra o ruído simulado usando o modelo ilustrado na Figura

**Tabela 2.2:** *Parâmetros para simulação do ruído de banda estreita*

$d$	Frequência Central [MHz]	Largura de banda do filtro [kHz]
0	6,05	300
1	7,225	450
2	9,65	500
3	10,125	50
4	11,85	500
5	14,175	350
6	15,45	700
7	17,69	420

**Figura 2.7:** *Diagrama em blocos do simulador do ruído de banda estreita*

2.7 e os parâmetros da Tabela 2.2.

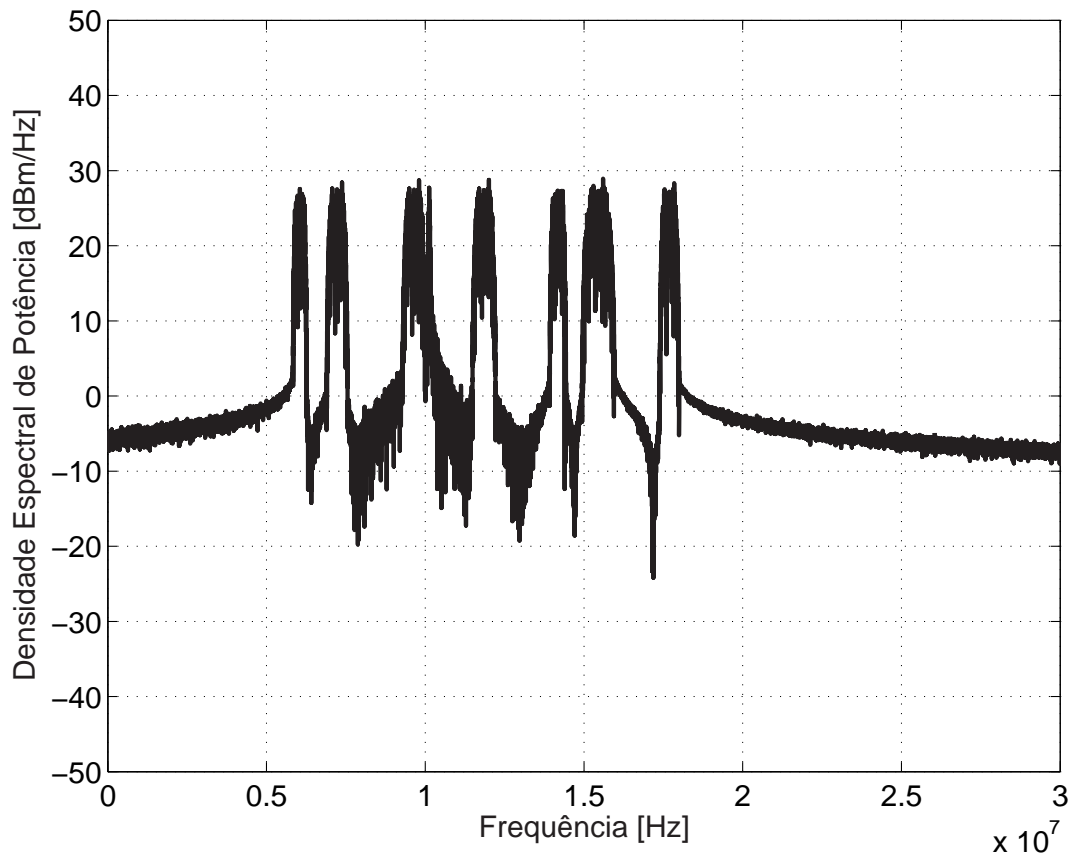
A Figura 2.9 mostra a combinação dos ruídos colorido e de banda estreita simulados, seguindo os métodos e valores acima apresentados.

Em [5] afirma-se que a maior fonte geradora do ruído impulsivo assíncrono no canal é resultante da operação de diodos retificadores controlados (*SCR - Silicon Controlled Rectifier*). Dessa forma, esse modelo foi o eleito para estudo do comportamento do ruído e simulação do mesmo. O modelo utilizado é baseado na combinação de três variáveis aleatórias que representam as variações de amplitude, largura e intervalo entre impulsos.

A variável aleatória que se refere à variação das amplitudes dos impulsos é modelada como uma distribuição Beta modificada [5], cuja função densidade de probabilidade é dada por

$$f_A(v) = \frac{\Gamma(a+b)}{\Gamma(a)} v^2 (1-v) \quad (2.15)$$





**Figura 2.8:** *Ruído de banda estreita simulado*

onde  $8 \leq v \leq 17[mV]$ .

A duração dos impulsos é descrita por uma variável aleatória modelada pela combinação de duas distribuições gaussianas com média  $\mu_i$  e desvio padrão  $\sigma_i$ , ponderadas por um fator  $P_i$  [5]:

$$f_L(v) = P_1 N(\mu_1, \sigma_1) + P_2 N(\mu_2, \sigma_2) \quad (2.16)$$

Na Equação (2.17) as distribuições gaussianas são definidas por:

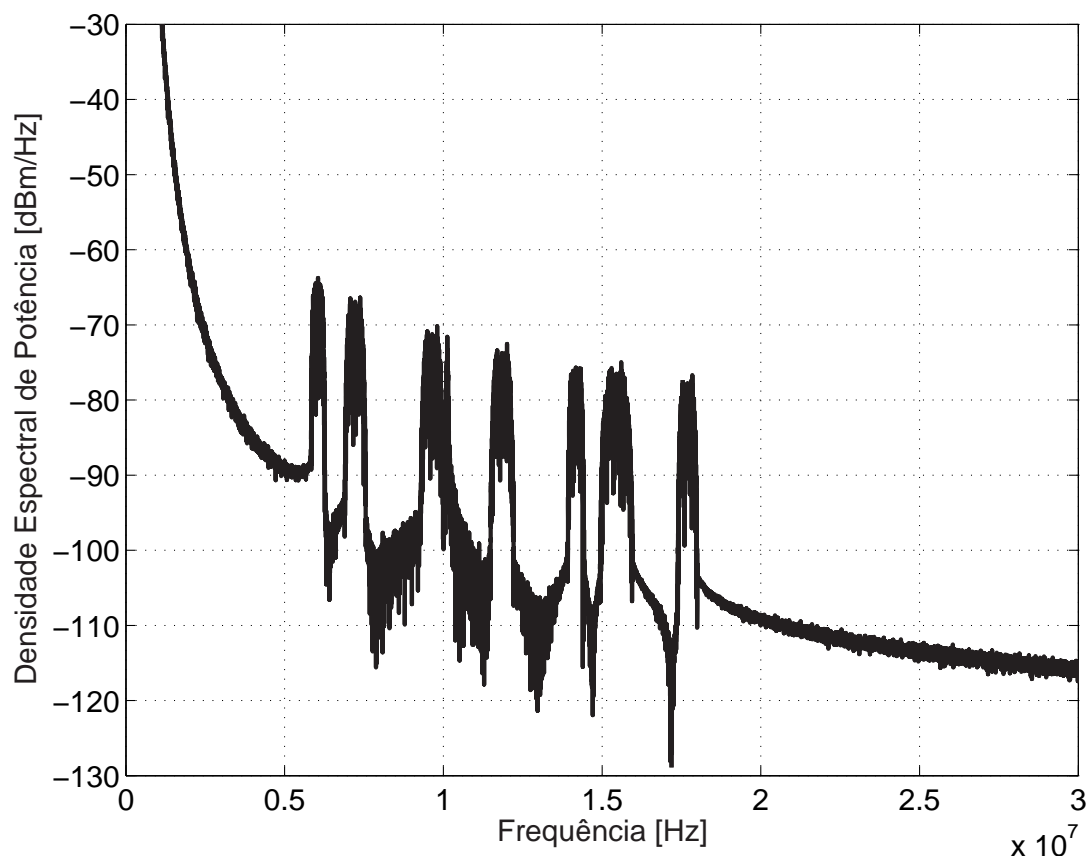
$$N(\mu, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(v - \mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (2.17)$$

Neste modelo,  $v$  é a largura dos impulsos em ( $\mu s$ ).

Já a variável aleatória que modela o intervalo entre impulsos tem distribuição Gamma [5]:

$$f_I(v) = \frac{1}{\Gamma(n)} v^{n-1} e^{-v} \quad (2.18)$$

onde  $v$  é o intervalo em [ms],  $n$  e  $\Gamma(n)$ .



**Figura 2.9:** Ruídos colorido e de banda estreita simulados

Existem diversos métodos para geração de variáveis aleatórias, sendo que os mais citados na literatura são: o Método da Transformada e o Método da Rejeição. Os dois modelos geram a variável aleatória com uma distribuição qualquer a partir de uma variável uniformemente distribuída num intervalo de observação. A diferença entre os dois métodos é o tipo de função utilizada para validar o valor da variável. No Método da Transformada é utilizada a função de distribuição cumulativa (cdf) e no Método da Rejeição utiliza-se a função densidade de probabilidade (pdf).

No método da Rejeição, a variável aleatória com uma determinada distribuição é gerada a partir de duas variáveis aleatórias uniformemente distribuída num plano [26]. Dessa forma, se o valor da variável uniforme for menor ou igual à função densidade de probabilidade o valor temporal da variável é armazenado, se não, o valor é desprezado.

Em [26] é apresentado um algoritmo simples que pode ser implementado de forma eficiente para a geração de uma variável aleatória segundo o método da rejeição:

- Inicialmente, uma variável aleatória  $X_i$  é gerada com distribuição uniforme

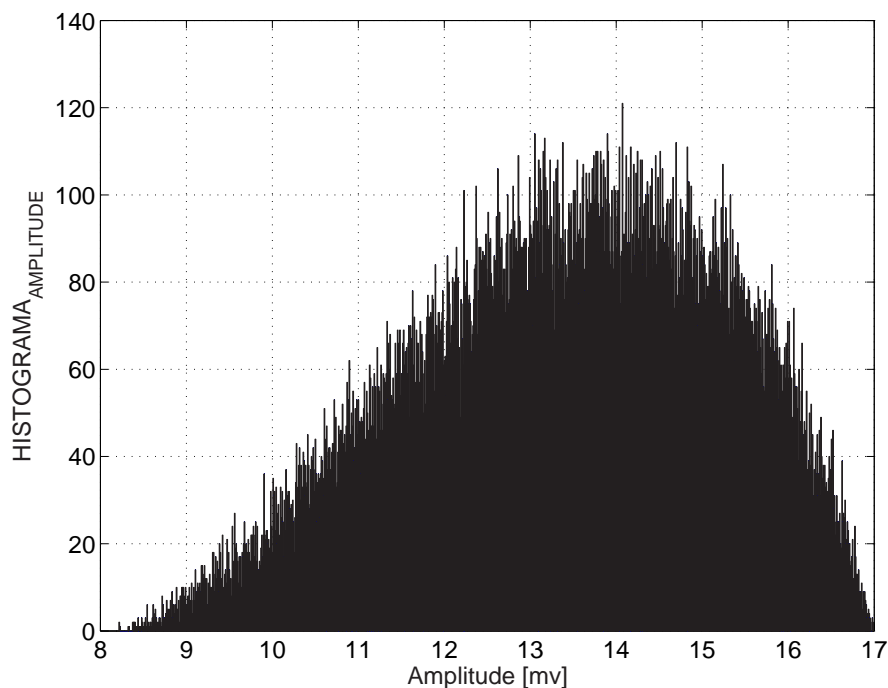
no intervalo  $[0,a]$ ;

- Depois, uma variável aleatória  $Y_i$  é gerada com distribuição uniforme no intervalo  $[0,b]$ ;
- Então,  $Y_i$  é comparado  $f_x(X_i)$  e se for menor ou igual, a variável aleatória gerada recebe  $X_i$ , caso contrário,  $X_i$  é rejeitado e o processo retorna ao passo inicial.

Este método é bastante eficaz, mas exige uma alta capacidade computacional e o tempo gasto para gerar a variável é maior. Isso é decorrência da necessidade de gerar-se uma grande quantidade de pontos e utilizar somente uma parte destes [26].

Para modelar a variável aleatória que representa as amplitudes dos impulsos do ruído impulsivo assíncrono, seguindo o modelo apresentado pela Equação (2.15), foram utilizados os parâmetros:  $a = 3$  e  $b = 5$  [5].

Na simulação realizada foram utilizados 100000 pontos para gerar as variáveis aleatórias  $X$  e  $Y$  com distribuição uniforme, gerando um vetor  $A_D(i)$  que gerou 55775 pontos, que representa a variável aleatória simulada. A Figura 2.10 mostra o histograma dessa variável.

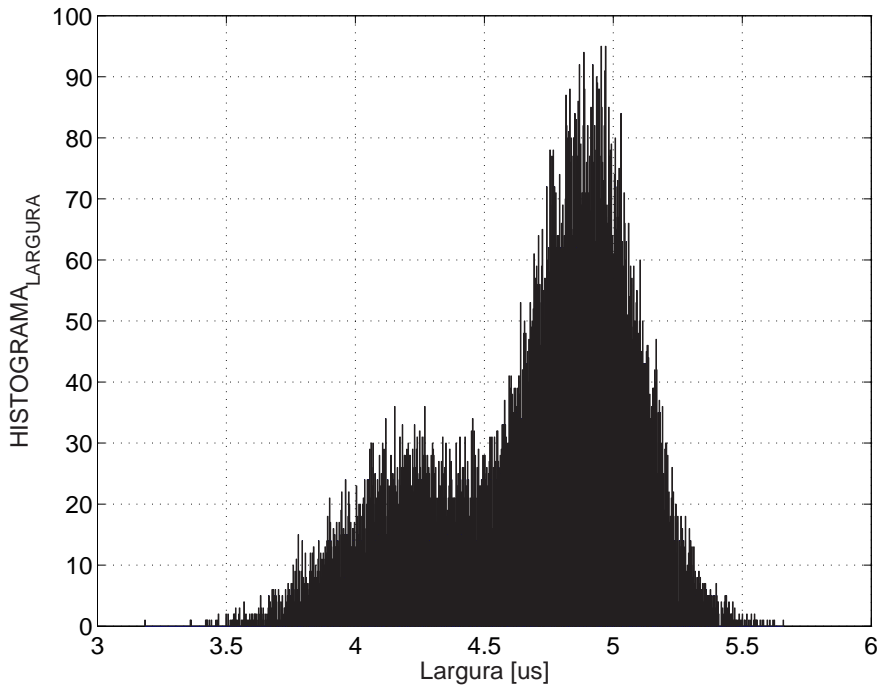


**Figura 2.10:** *Histograma da Variável Aleatória que modela a Amplitude dos Impulsos*

A variável aleatória que modela a largura dos impulsos do ruído, conforme

(2.16), foi gerada a partir de uma canal real apresentado por [5], para  $\mu_1 = 4,9$ ,  $\sigma_1 = 0,2$ ,  $P_1 = 0,0763$ ,  $\mu_2 = 4,2$ ,  $\sigma_2 = 0,25$  e  $P_2 = 0,0318$ .

O número de pontos utilizados para gerar as variáveis  $X$  e  $Y$  com distribuição uniforme foi o mesmo da situação anterior, gerando um vetor  $t_{LARG}(i)$  com 22426 pontos, cuja variável aleatória simulada gera o histograma da Figura 2.11.



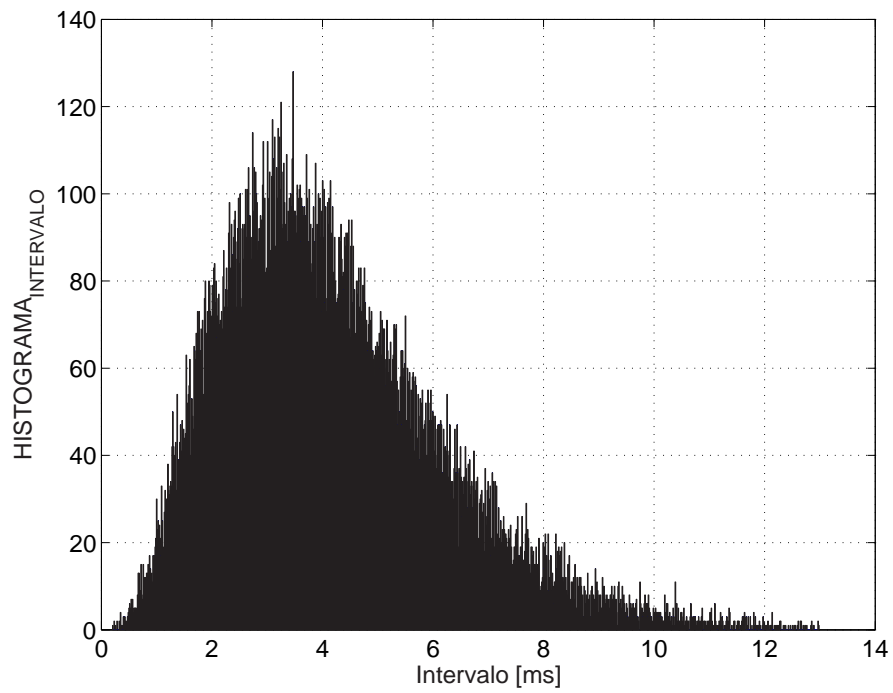
**Figura 2.11:** Histograma da Variável Aleatória que modela a Largura dos Impulsos

Já a variável aleatória que modela o intervalo entre impulsos, conforme (2.18), foi simulada utilizando o parâmetro  $n = 4,2$ , segundo modelo apresentado em [5].

O número de pontos utilizados para gerar as variáveis  $X$  e  $Y$  com distribuição uniforme foi o mesmo das situações anteriores, gerando um vetor  $t_{INTER}(i)$  contendo 34964 pontos, gerando variável aleatória cuja pdf é representada no histograma da Figura 2.12.

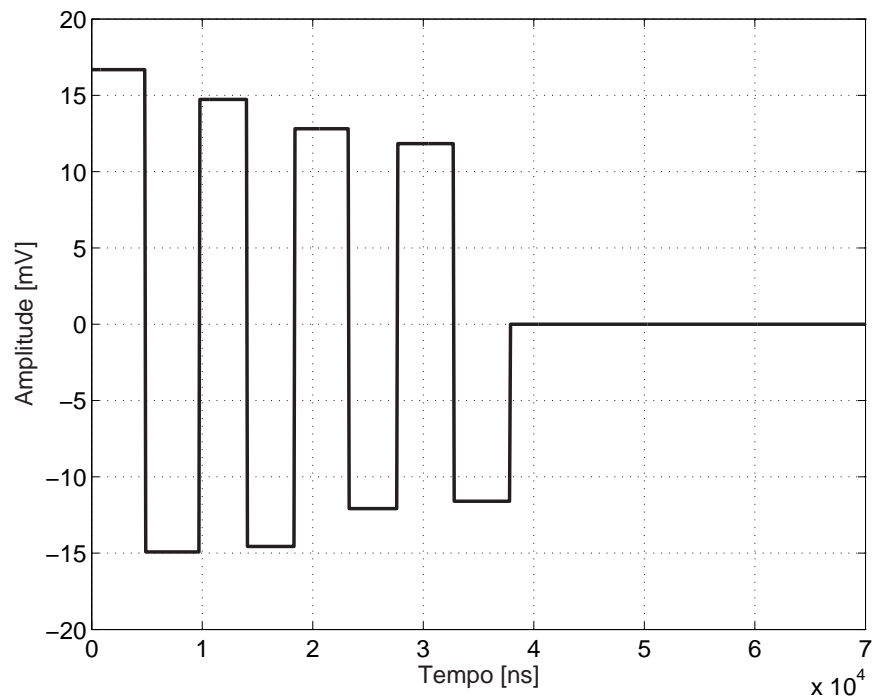
Uma outra forma de gerar as variáveis aleatórias citadas acima seria fixar o número de pontos desejados e gerar novos pontos com distribuição uniforme a cada iteração.

O ruído impulsivo assíncrono simulado é composto pela combinação dos três vetores gerados onde os agrupamentos de impulsos de largura  $t_L(i)$  e amplitude  $A(i)$  estão distanciados por  $t_I(i)$ . A Figura 2.13 mostra as variações de amplitude e largura dos impulsos, enquanto a Figura 2.14 mostra o intervalo entre ocorrências dos mesmos. O código responsável pelos resultados apresentados,



**Figura 2.12:** *Histograma da Variável Aleatória que modela os Intervalos entre Impulsos*

executados no MATLAB, é apresentado no Anexo A.



**Figura 2.13:** *Ruído impulsivo assíncrono simulado*

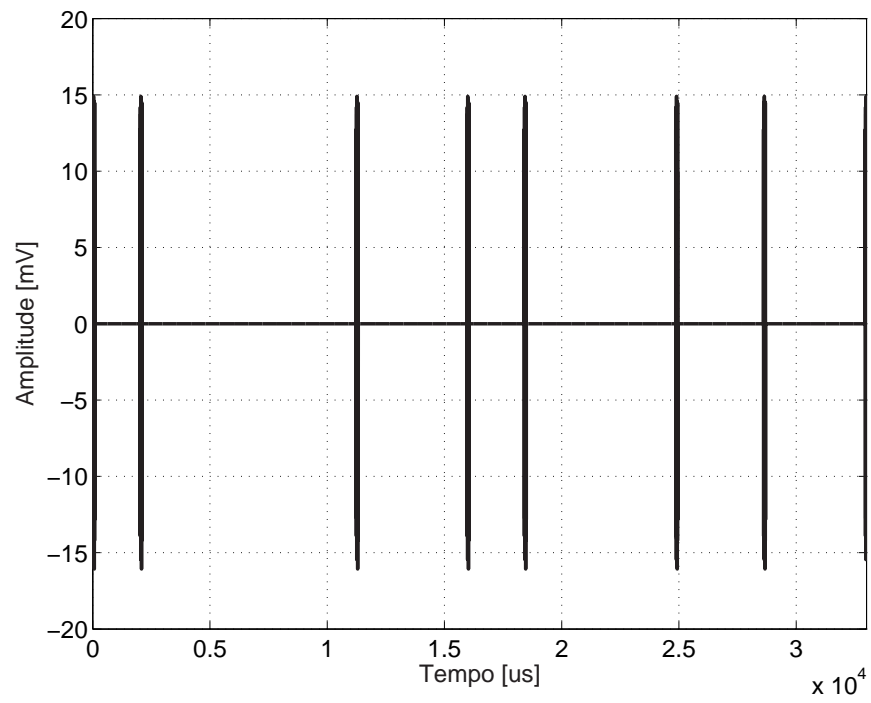


Figura 2.14: Ruído impulsivo assíncrono simulado

## Capítulo 3

# Extração dos parâmetros do canal PLC

Para o conhecimento do comportamento de um determinado canal de comunicação (resposta em frequência e comportamento ruidoso) é necessário utilizar de técnicas de medição adequadas a cada tipo de canal, assim como garantir o perfeito acoplamento do sinal para o canal e do canal para o instrumento de medição.

### 3.1 Técnicas de acoplamento

Um dos componentes mais críticos em um sistema PLC é a interface ou circuito de acoplamento [27]. Esse elemento é responsável pela injeção e adaptação de um sinal de alta frequência em um canal PLC, provendo isolamento galvânica entre o dispositivo de comunicação (transceptor) e a rede de energia elétrica. O comportamento desse circuito deve propiciar a menor perda possível para garantir a fidelidade da informação transportada no canal, garantindo ainda a operação de outros sistemas de comunicação de maneira harmoniosa, seguindo as normas vigentes no local de instalação do dispositivo PLC.

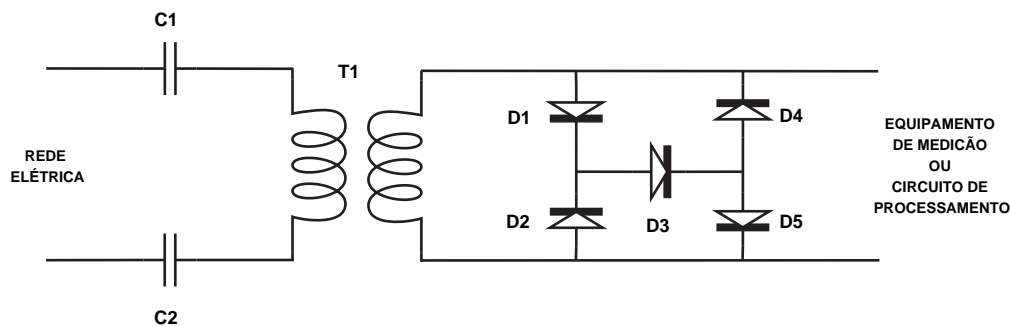
Em [15] classificam-se os tipos de circuitos de acoplamento em:

- *Acoplamento indutivo*, onde o sinal PLC é injetado ou extraído da rede de distribuição através de um transformador usando materiais como o ferrite, que facilita a indução de sinais de alta frequência [27][28];
- *Acoplamento capacitivo*, consiste na ligação de um capacitor entre a rede de energia e um transformador de rádio-frequência. Esse capacitor restringe o fluxo do sinal proveniente da rede de distribuição de energia elétrica para

o equipamento PLC, mas não consegue eliminar as interferências de alta frequência no sentido inverso [28];

- *Acoplamento condutivo*, utiliza filtros de supressão de interferência conduzida. Os filtros são geralmente compostos por capacitores e indutores;
- *Acoplamento por irradiação de campo eletromagnético*, cuja principal técnica de redução de interferência é a blindagem eletromagnética, que pode ser uma blindagem eletrostática ou magnetostática. A blindagem eletrostática utiliza materiais bons condutores para isolar uma região e evitar a interferência de um campo elétrico estático ou de baixa frequência. No caso da blindagem magnetostática, a região é isolada dos campos magnetostáticos através de estruturas com materiais ferromagnéticos de alta permeabilidade magnética.

Para definir-se qual circuito de acoplamento é o mais adequado para determinada necessidade, deve-se analisar que característica será valorada. Em [27] considera-se o circuito de acoplamento mostrado na Figura 3.1 para medições de sinais PLC de banda larga. Como o objetivo principal desse trabalho é o modelamento de um canal PLC de baixa voltagem para serviços de banda larga, tal circuito foi adotado.



**Figura 3.1:** *Circuito de acoplamento para sinais PLC de banda larga*

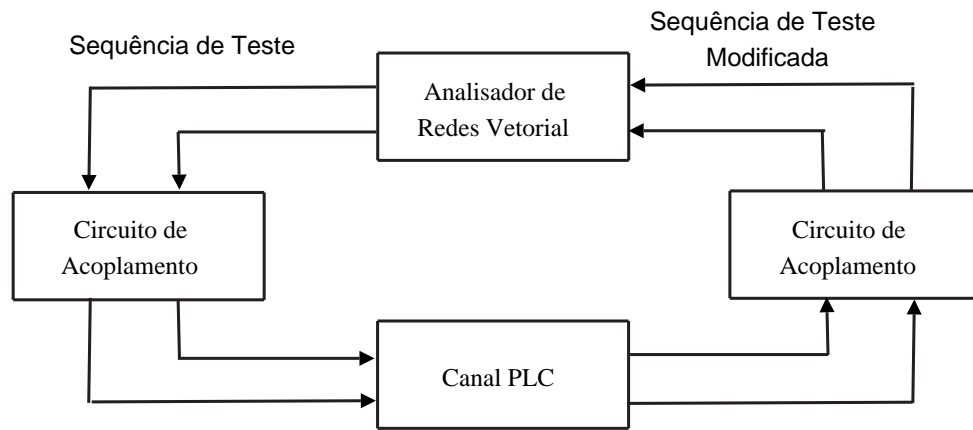
No circuito adotado, os capacitores e o transformador de RF atuam como um filtro passa-altas e os diodos protegem a entrada do equipamento de extração de parâmetros limitando o valor máximo na mesma [27].

## 3.2 Técnicas de extração de parâmetros

Para se extrair a resposta em frequência de um canal PLC torna-se necessário introduzir um sinal piloto com comportamento conhecido no mesmo e medir a deteriorização do sinal ao se propagar no canal. A injeção ou extração do sinal no



canal é realizada através dos circuitos de acoplamento. O equipamento capaz de gerar um sinal piloto e monitorar as alterações que o mesmo sofre quando propaga-se pelo canal é o analisador de redes vetorial (*VNA - Vetorial Network Analyser*), utilizando os parâmetros da matriz de espalhamento, também conhecidos como parâmetros "S". Na matriz de espalhamento, a resposta em frequência do canal é descrita pelo parâmetro  $S_{21}$  [16]. A Figura 3.2 mostra a configuração para medição da resposta em frequência de um canal PLC. A Tabela 3.1 apresenta algumas características do analisador de redes vetorial utilizado na extração dos parâmetros "S" do canal PLC sob estudo.



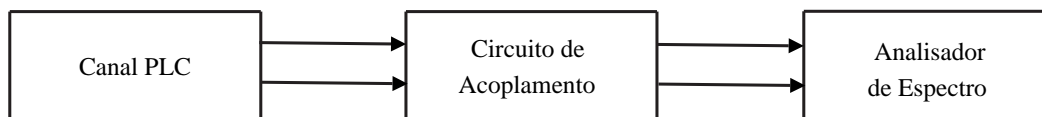
**Figura 3.2:** Configuração para extração de resposta em frequência do canal

**Tabela 3.1:** Características do analisador de redes vetorial utilizado para extrair a resposta em frequência do canal

Modelo	R3765CG
Fabricante	Advantest
Faixa de frequência	300 kHz a 3,8 GHz
Impedância de entrada	50 $\Omega$

Como descrito no segundo capítulo desse trabalho, os ruídos colorido e de faixa estreita apresentam variações significativas no domínio da frequência. Dessa forma a extração do comportamento dos mesmos pode ser realizada por um analisador de espectro conectado ao elemento responsável pelo acoplamento dos sinais ruidosos. Para efetuar as medições desejadas pode-se utilizar a configuração da Figura 3.3. O modelo do equipamento utilizado nesse esquema de medição é apresentado na Tabela 3.2.

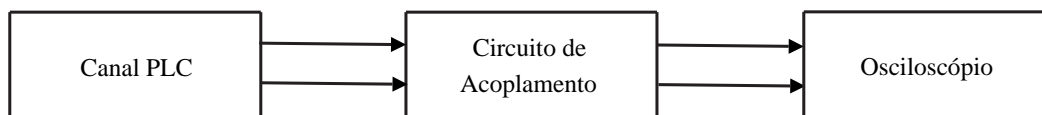
O comportamento temporal do ruído impulsivo é observado através de um osciloscópio, como mostrado na configuração da Figura 3.4, usando o equipamento descrito na Tabela 3.3.



**Figura 3.3:** Configuração para extração do espectro ruidoso

**Tabela 3.2:** Características do analisador de espectro utilizado na extração do comportamento dos ruídos no domínio da frequência

Modelo	R3132
Fabricante	Advantest
Faixa de frequência	9 kHz a 3 GHz



**Figura 3.4:** Configuração para extração do comportamento temporal dos ruídos

### 3.3 Resultados experimentais

#### 3.3.1 Processo de preparação dos elementos usados na extração de parâmetros do canal

Para que os resultados obtidos na extração das características de um canal PLC não sofram influência dos elementos utilizados no procedimento (equipamento, circuito de acoplamento e cabeamento), torna-se necessário conhecer o comportamento desses elementos isoladamente. Na medição do canal PLC, um dos elementos mais críticos é o circuito de acoplamento. Para garantir que esse circuito proporcione a menor interferência possível, montou-se diversas configurações, utilizando diferentes combinações de capacitores e transformadores de RF. Para o circuito mostrado na Figura 3.1 o conjunto que apresentou o melhor resultado (atenuação da magnitude menor que 1 dB e variação de fase menor que  $180^\circ$  dentro da faixa em estudo) foi o que utiliza os componentes descritos na Tabela 3.4.

A Figura 3.5 mostra placas de circuito impresso que foram confeccionadas para o estudo de uma canal PLC.

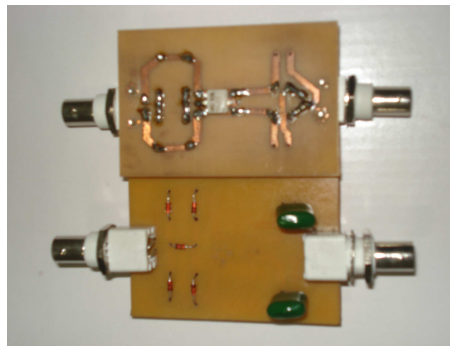
O comportamento dos circuitos de acoplamento montados foi obtido utilizando o esquema da Figura 3.6. Analisando os resultados obtidos e características dos elementos que compoem o conjunto para extração de parâmetros, concentrou-se a análise na faixa de estudo entre 1,5 MHz a 50 MHz, uma vez que a mesma

**Tabela 3.3:** *Osciloscópio digital utilizado na medição temporal dos ruídos*

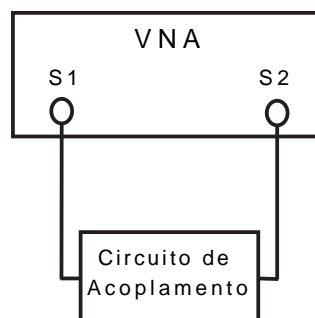
Modelo	54642
Fabricante	Agilent
Largura de banda	500 MHz
Taxa de amostragem	2 GSample/s

**Tabela 3.4:** *Detalhamento do circuito de acoplamento utilizado nas medições*

Referência	Descrição	Informações
C1 e C2	Capacitor de poliéster	Capacitância: 220 nF Tensão de isolamento: 400 V
T1	Transformador de RF	Modelo: T1-1T Banda: 80 kHz a 200 MHz
D1, D2, D3, D4 e D5	Diodo retificador	Modelo: 1N4148

**Figura 3.5:** *Placas do circuito de acoplamento estudado*

contempla a maioria dos serviços BPL comerciais [8] e, nessa faixa, o conjunto apresenta comportamento estável. As Figuras 3.7, 3.8 e 3.9 mostram o comportamento da resposta em frequência e do atraso de grupo do circuito de acoplamento montado.

**Figura 3.6:** *Esquema para extração do comportamento do circuito de acoplamento*

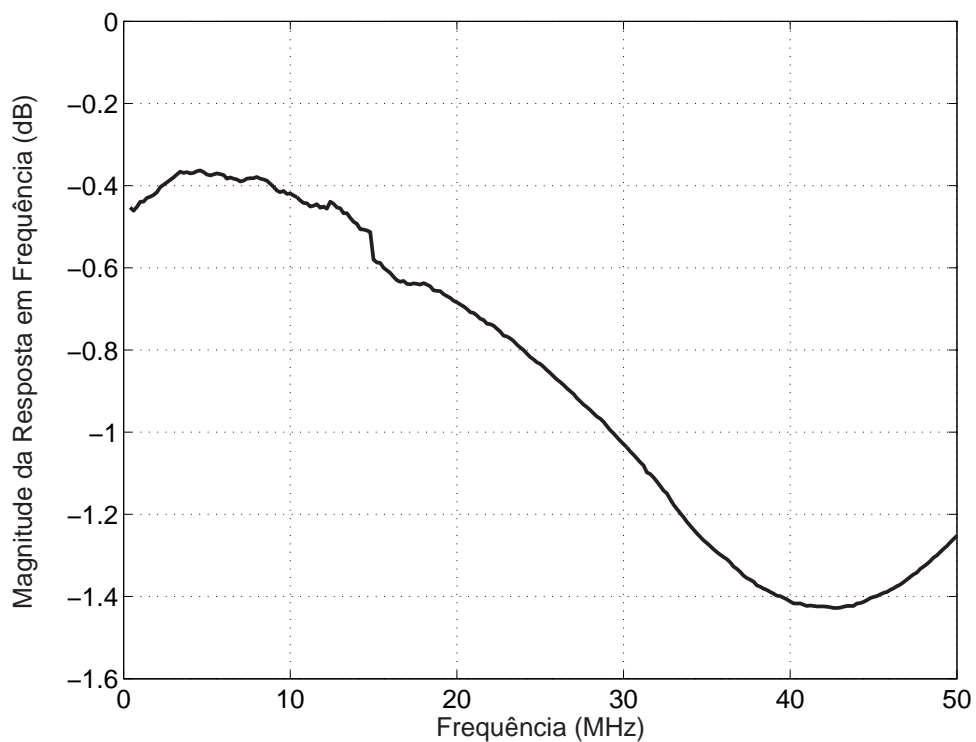


Figura 3.7: Magnitude da resposta em frequência do circuito de acoplamento

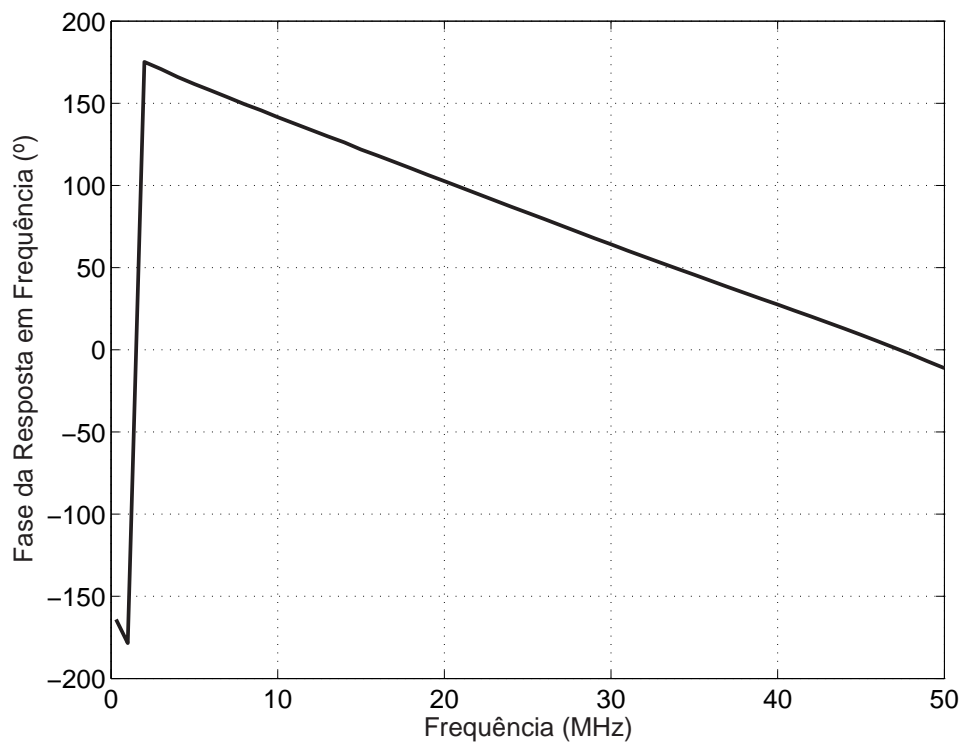
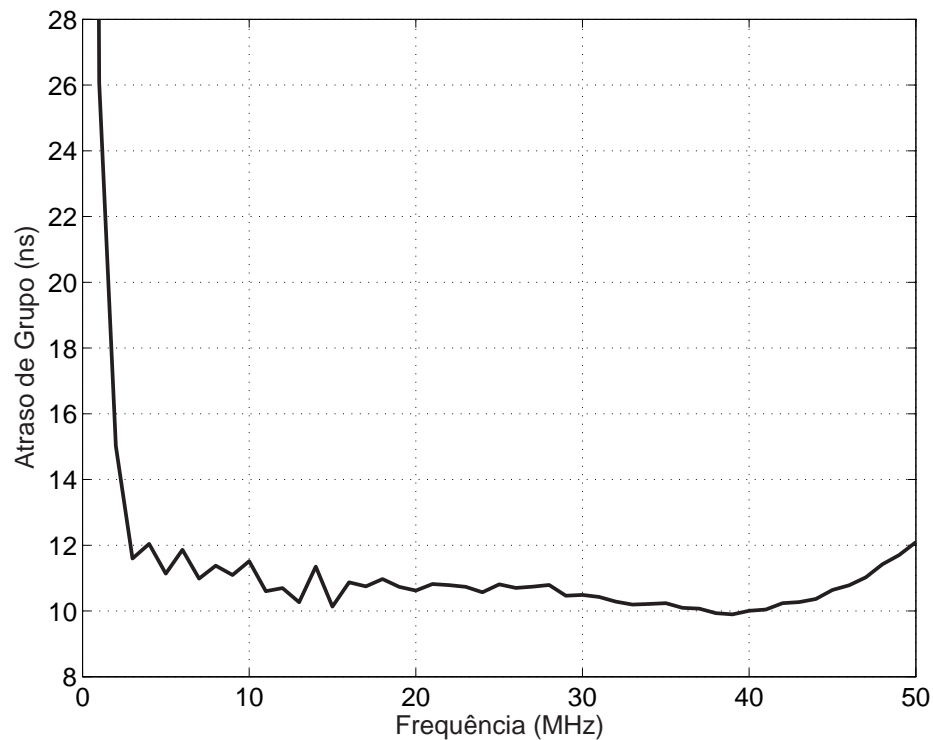


Figura 3.8: Fase da resposta em frequência do circuito de acoplamento



**Figura 3.9:** *Atraso de grupo da resposta em frequência do circuito de acoplamento*

Sabe-se que a resposta impulsiva de um bloco sob análise pode ser obtida aplicando-se a Transformada Inversa de Fourier sobre a resposta em frequência medida. Logo, as Figuras 3.10 e 3.11 mostram o comportamento da magnitude e fase obtida pela aplicação da IFFT usando o MATLAB sobre a resposta em frequência medida com o VNA. O atraso de grupo mede a relação entre a variação da fase frente a variação da frequência e é dado pelo negativo da derivada da resposta de fase [30].

Como mencionado, a resposta de um canal pode ser obtida utilizando o esquema da Figura 3.2, mas para obter-se resultados imunes à influência dos elementos do sistema de extração de parâmetros deve-se conectar os dois circuitos de acoplamento e efetuar as medidas isoladamente para calibrar o VNA (quando o mesmo tiver essa funcionalidade disponível) ou armazenar os dados para o procedimento de pós-correção dos dados medidos. Após o procedimento de calibração, vários testes de canais reais foram realizados em dois laboratórios do INATEL, cuja disposição física pode ser observadas na Figura 3.12. Os testes no ambiente apresentado foram realizados conectando os circuitos de acoplamento às tomadas da rede de 127 VCA nos pontos indicados como 1, 2, 3 e 4.

Para garantir que os resultados obtidos no processo de extração de parâmetros não sofra interferência dos ruídos do equipamento de medição e da rede, deve-se garantir a melhor relação sinal-ruído que é obtida utilizando-se a menor largura

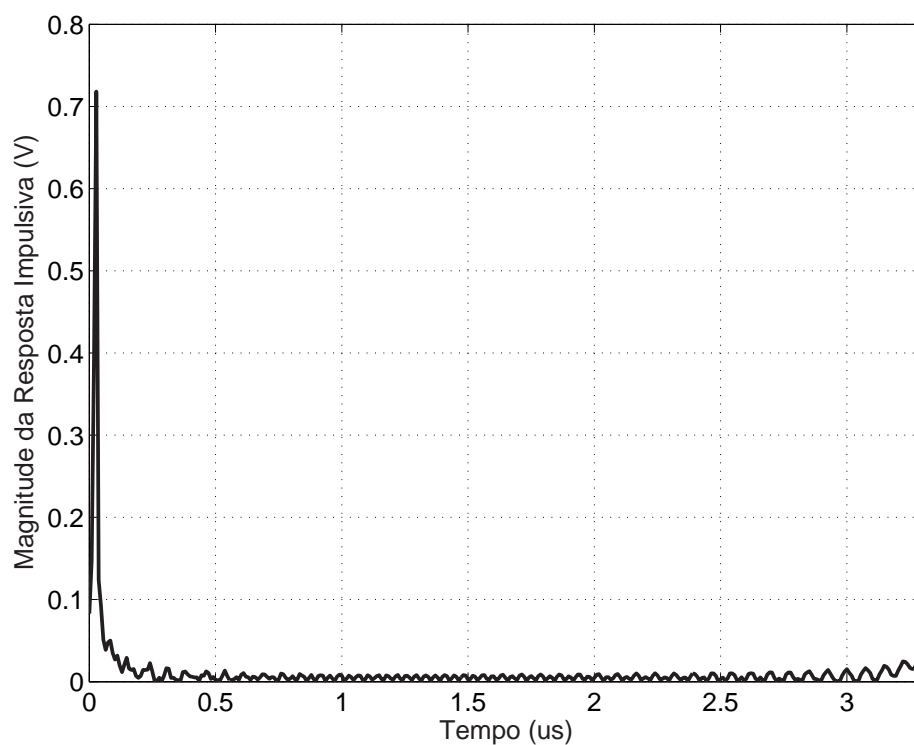


Figura 3.10: Magnitude da resposta impulsiva do circuito de acoplamento

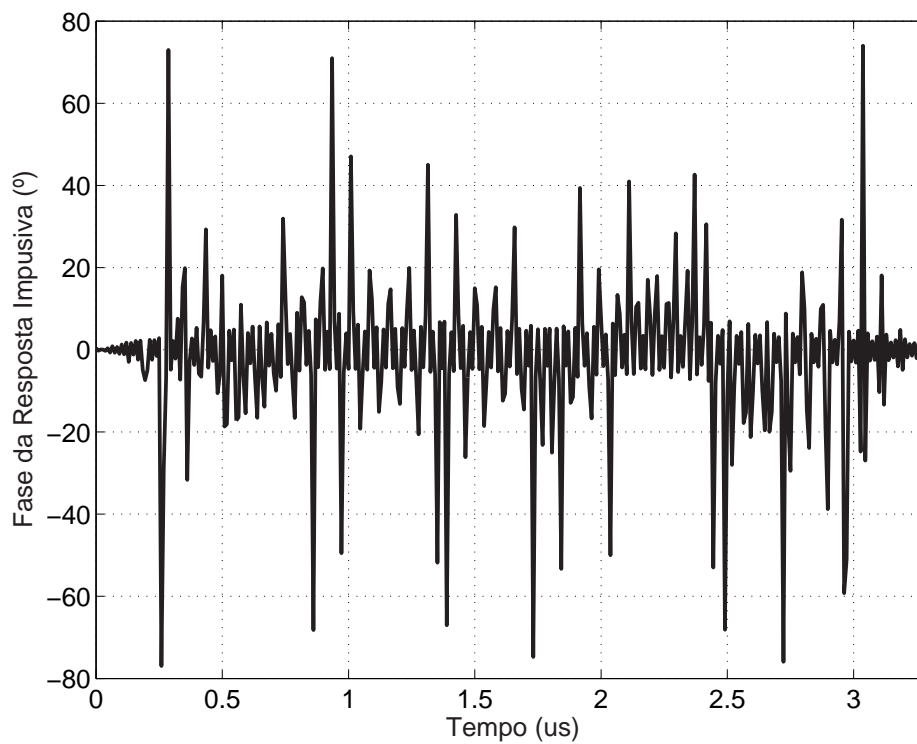
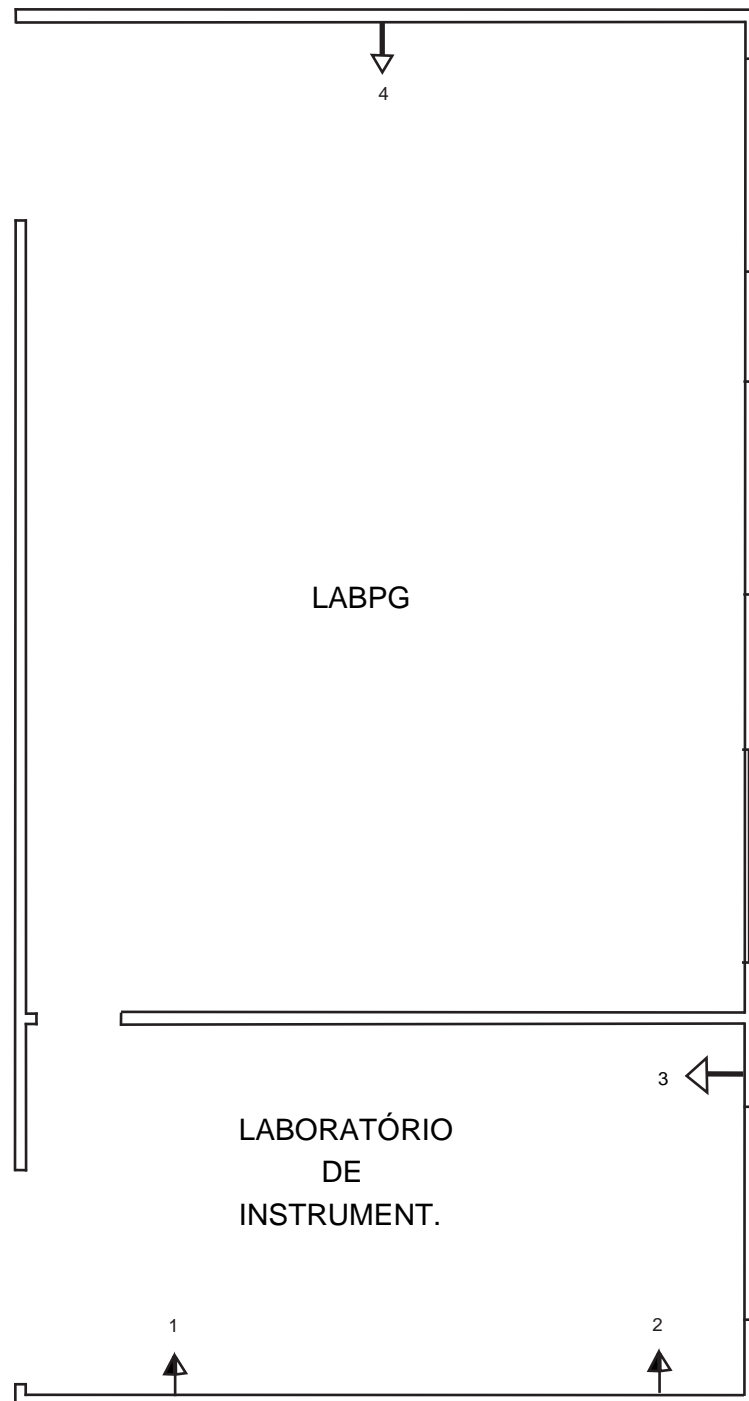


Figura 3.11: Fase da resposta impulsiva do circuito de acoplamento

de faixa de resolução ( $RBW$  - *Resolution Bandwidth*) disponível [31]. Para essa finalidade, o VNA foi calibrado com uma  $RBW$  de 10 Hz.

Analisando o comportamento apresentado pelo equipamento de medição e os resultados que serão apresentados, adotou-se 300 kHz como diferença entre duas amostras consecutivas para efetuar cálculos estatísticos desejados. Tal diferença é muito menor que a banda de coerência do canal, como apresentado mais adiante.

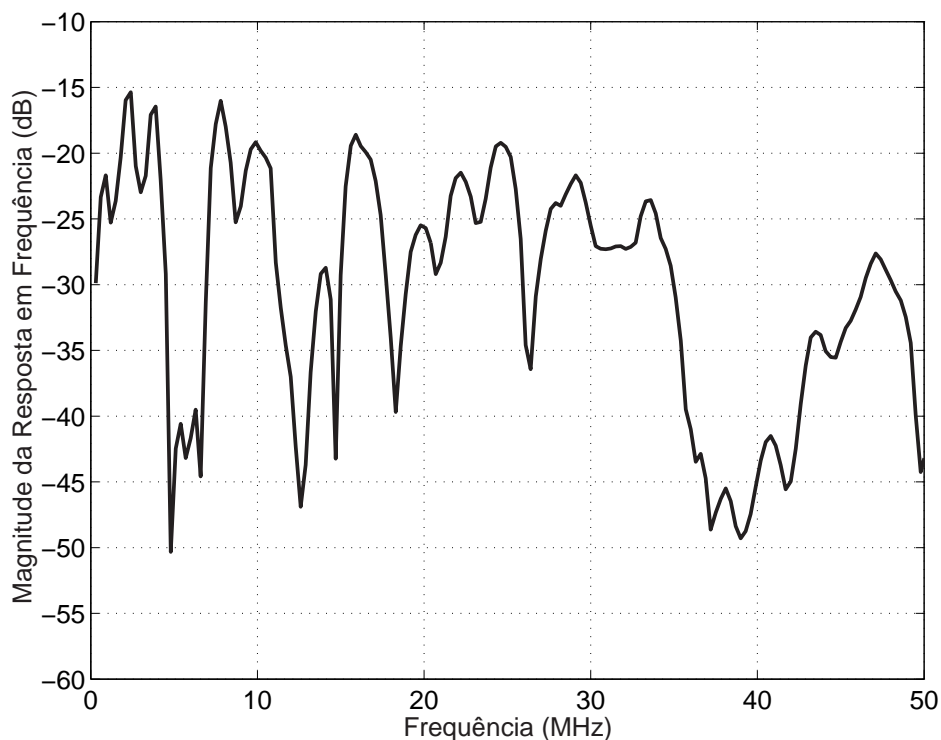


**Figura 3.12:** Planta baixa dos laboratórios onde foram realizadas as medições de canal

### 3.3.2 Medidas das respostas dos canais

O procedimento de extração das características do canal baseou-se na fixação de um circuito de acoplamento ligado à conexão  $S1$  do VNA ao ponto indicado como 1 na Figura 3.12, variando o ponto de fixação de outro circuito de acoplamento conectados a  $S2$  do VNA aos pontos 2, 3 e 4 do ambiente em estudo [16] [29].

O primeiro cenário é composto pelas tomadas identificadas por 1 e 2, distanciadas por 5 m. O comportamento para esse canal é mostrado nas Figuras 3.13, 3.14, 3.15, 3.16 e 3.17.



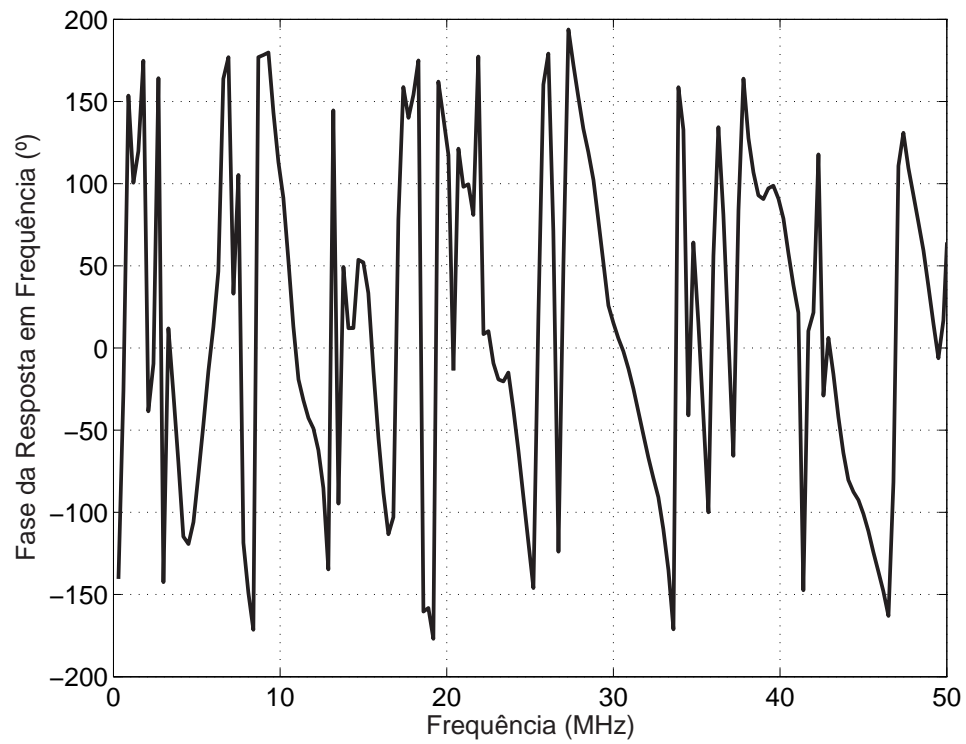
**Figura 3.13:** Magnitude da resposta em frequência do canal formado entre as tomadas 1 e 2

O segundo cenário é composto pelas tomadas identificadas por 1 e 3, distanciadas por 9 m. O comportamento para esse canal é mostrado nas Figuras 3.18, 3.19, 3.20, 3.21 e 3.22.

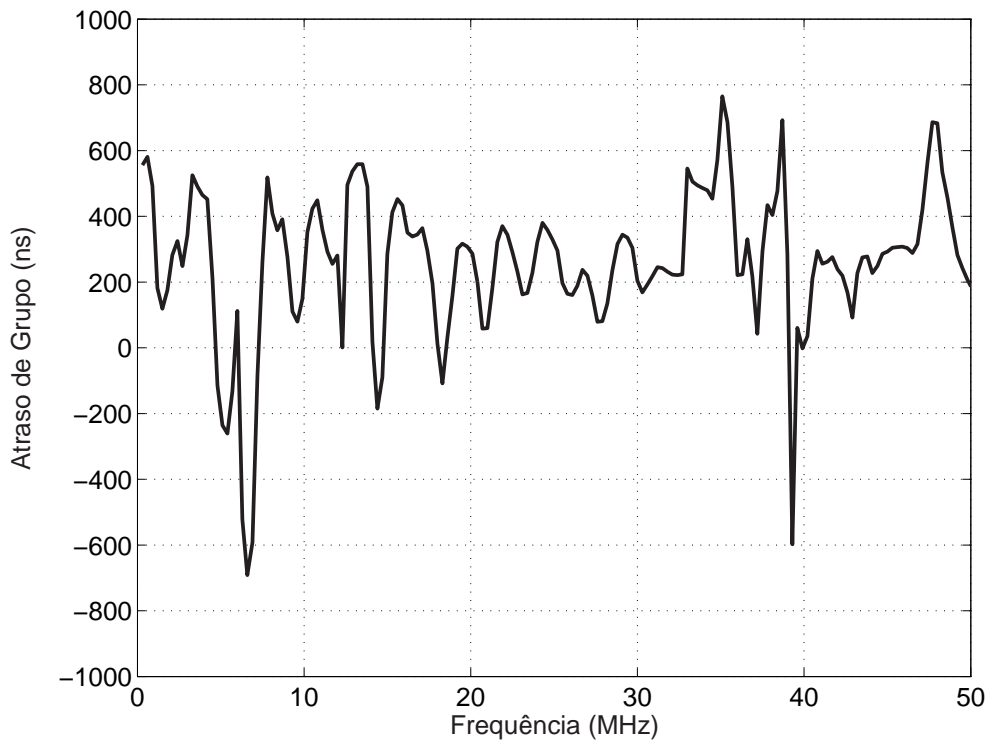
O terceiro cenário é composto pelas tomadas identificadas por 1 e 4, distanciadas por 16 m. O comportamento para esse canal é mostrado nas Figuras 3.23, 3.24, 3.25, 3.26 e 3.27.

Analisando as Figuras 3.13, 3.18 e 3.23 verifica-se o aumento da seletividade em frequência do canal frente ao comprimento e características do canal. Observa-se ainda uma semelhança em relação aos vales mais profundos que ocorrem em faixas de frequência próximas a 5 e 40 MHz. As variações de fase são frequentes e também dependentes das características dos circuitos conforme mostrado nas

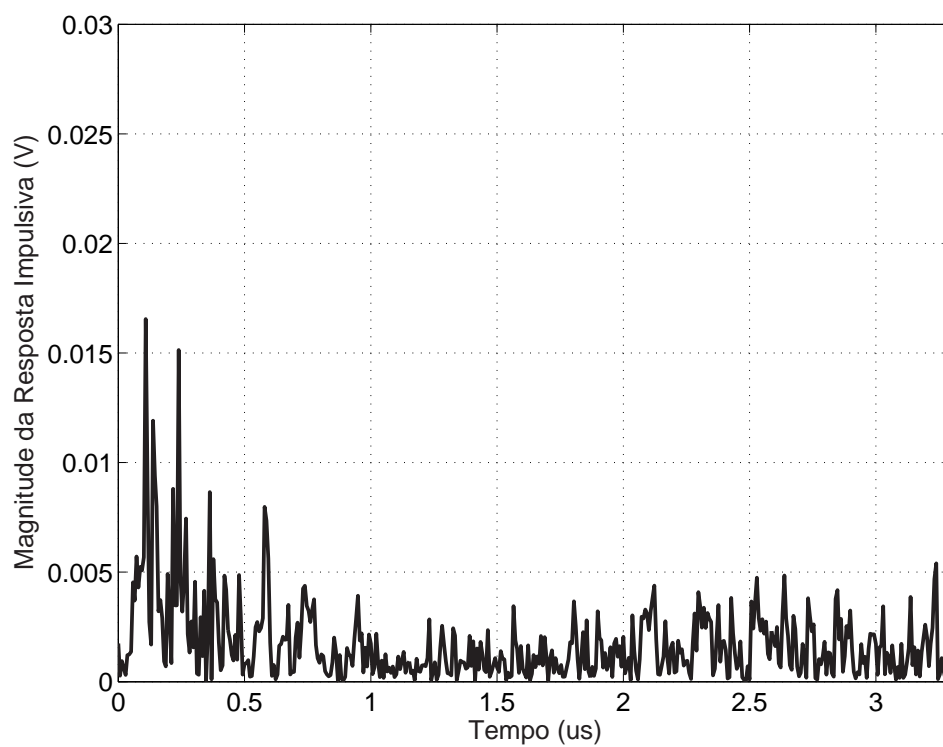




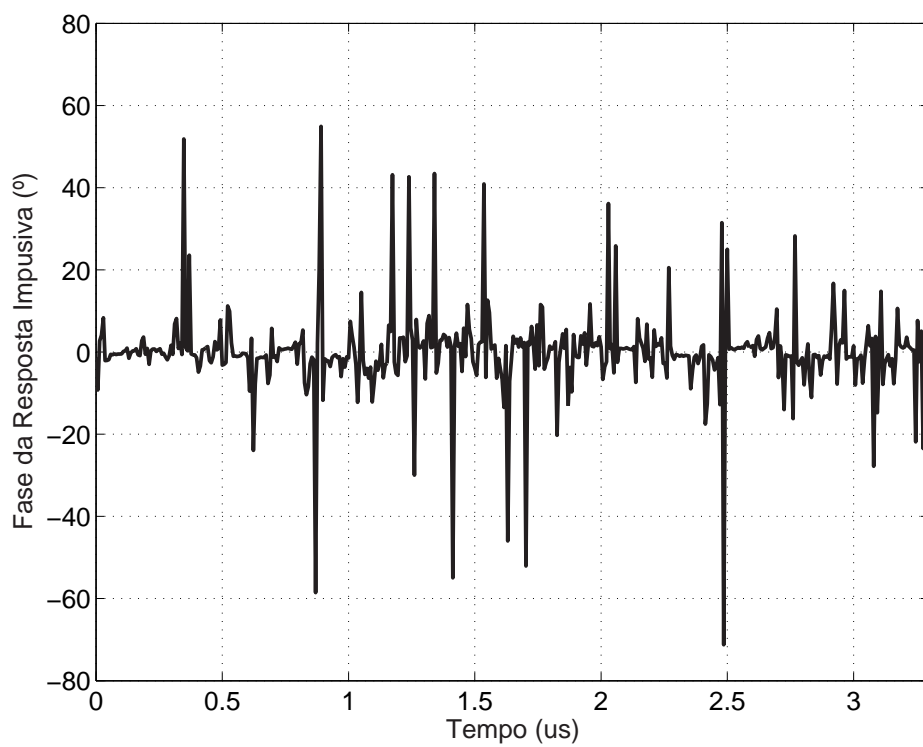
**Figura 3.14:** Fase da resposta em freqüência do canal formado entre as tomadas 1 e 2



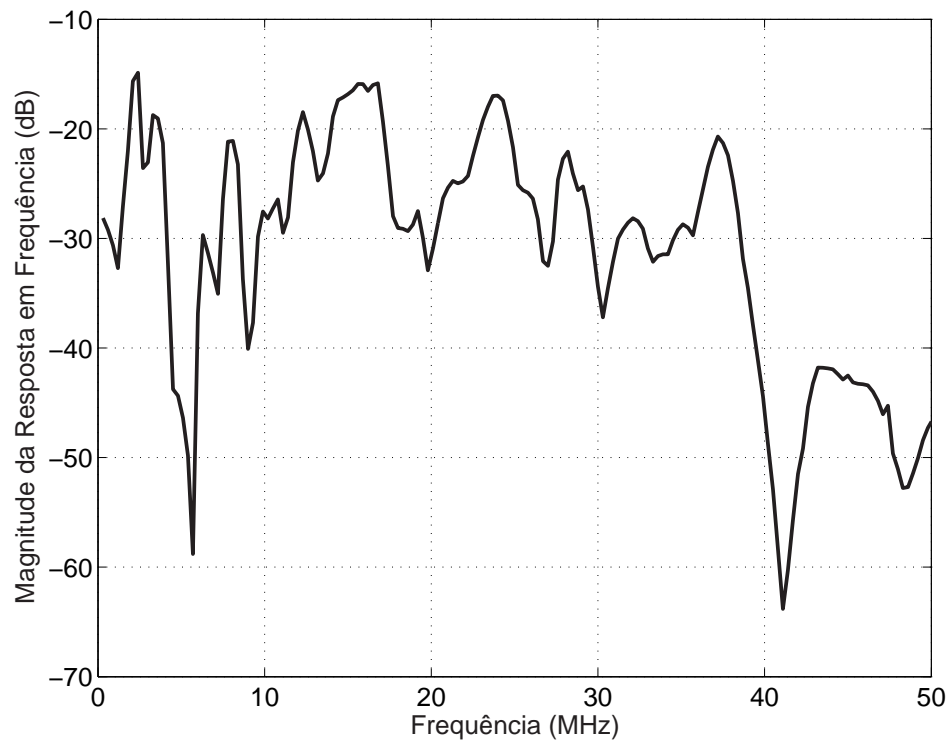
**Figura 3.15:** Atraso de grupo do canal formado entre as tomadas 1 e 2



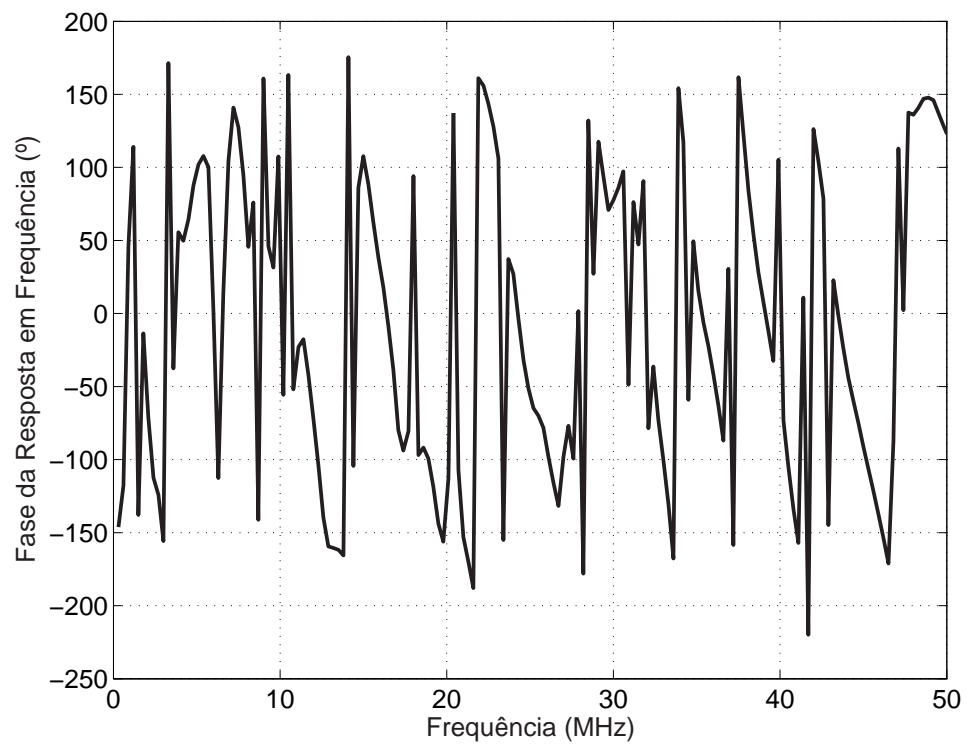
**Figura 3.16:** *Magnitude da resposta impulsiva do canal formado entre as tomadas 1 e 2*



**Figura 3.17:** *Fase da resposta impulsiva do canal formado entre as tomadas 1 e 2*



**Figura 3.18:** *Magnitude da resposta em frequência do canal formado entre as tomadas 1 e 3*



**Figura 3.19:** *Fase da resposta em frequência do canal formado entre as tomadas 1 e 3*

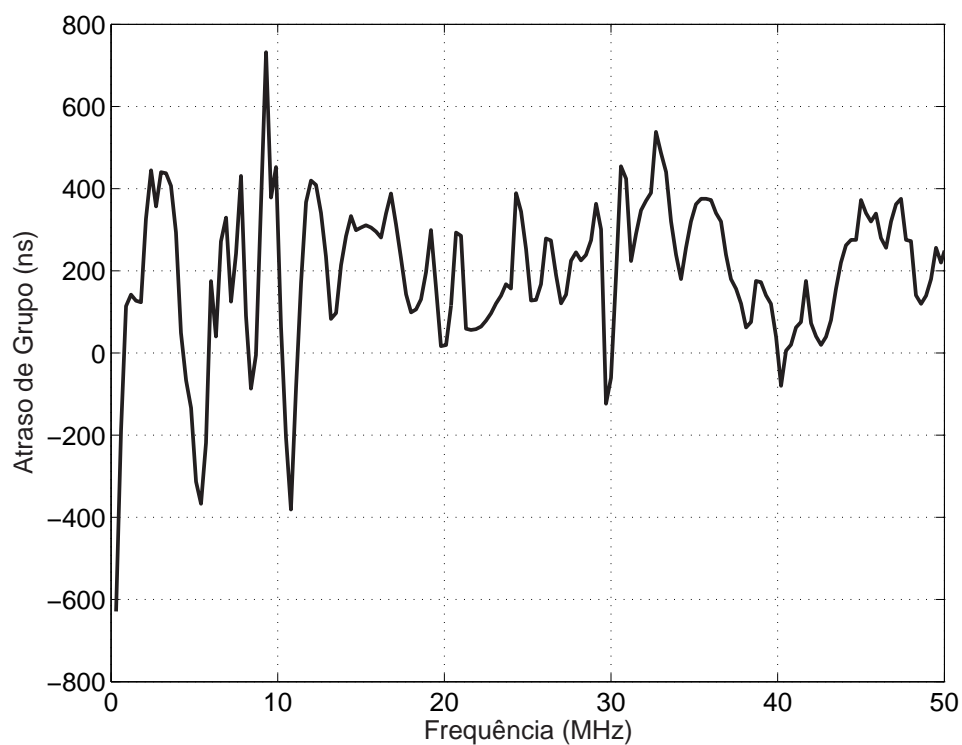


Figura 3.20: Atraso de grupo do canal formado entre as tomadas 1 e 3

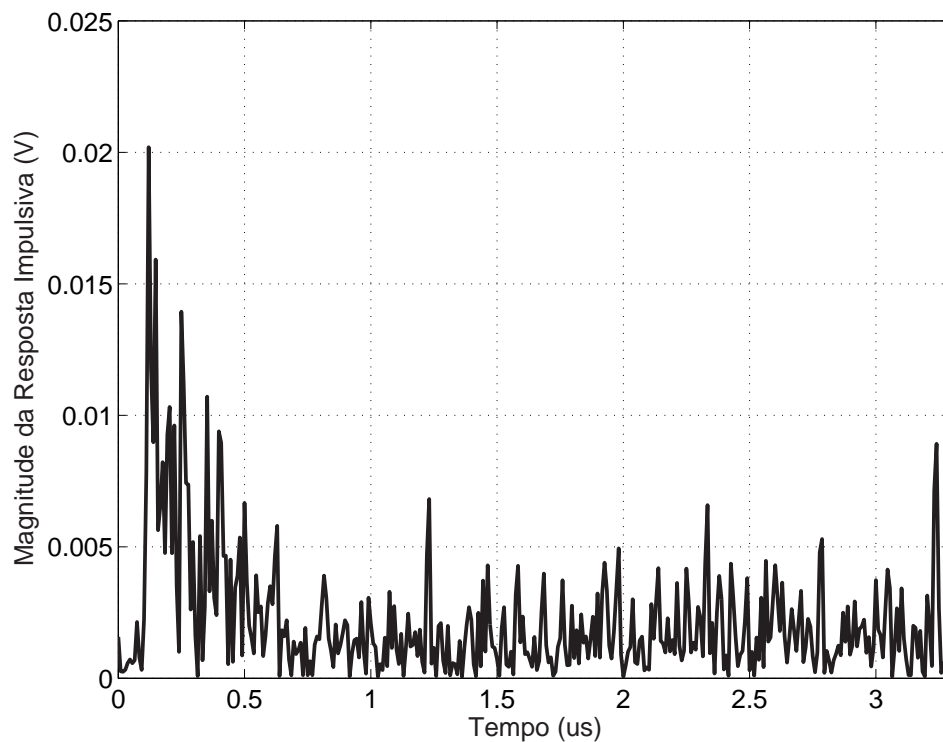
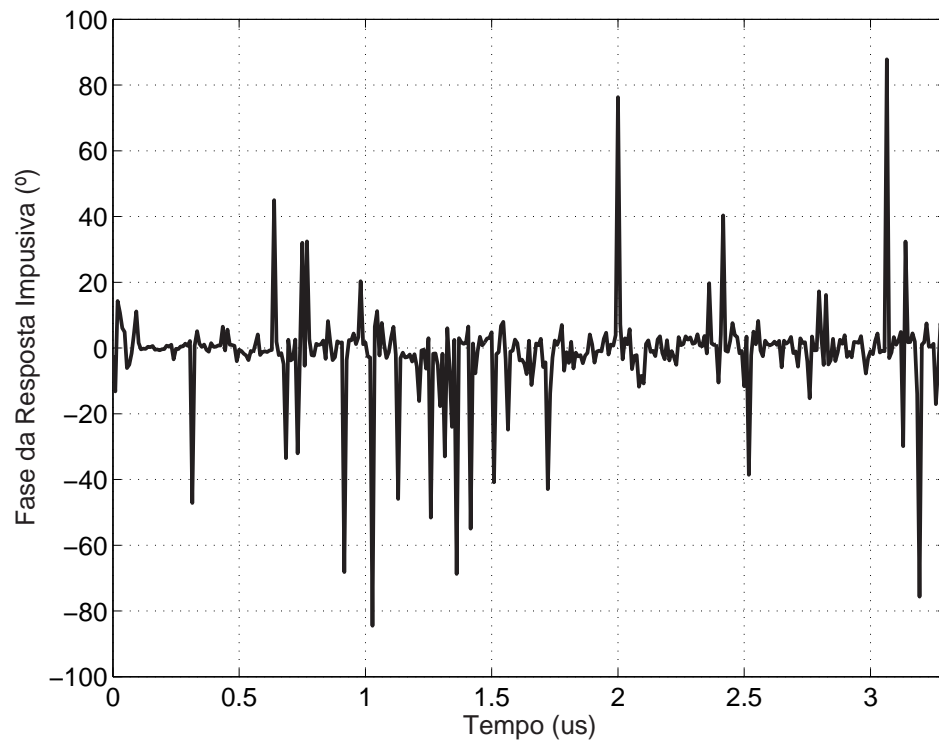
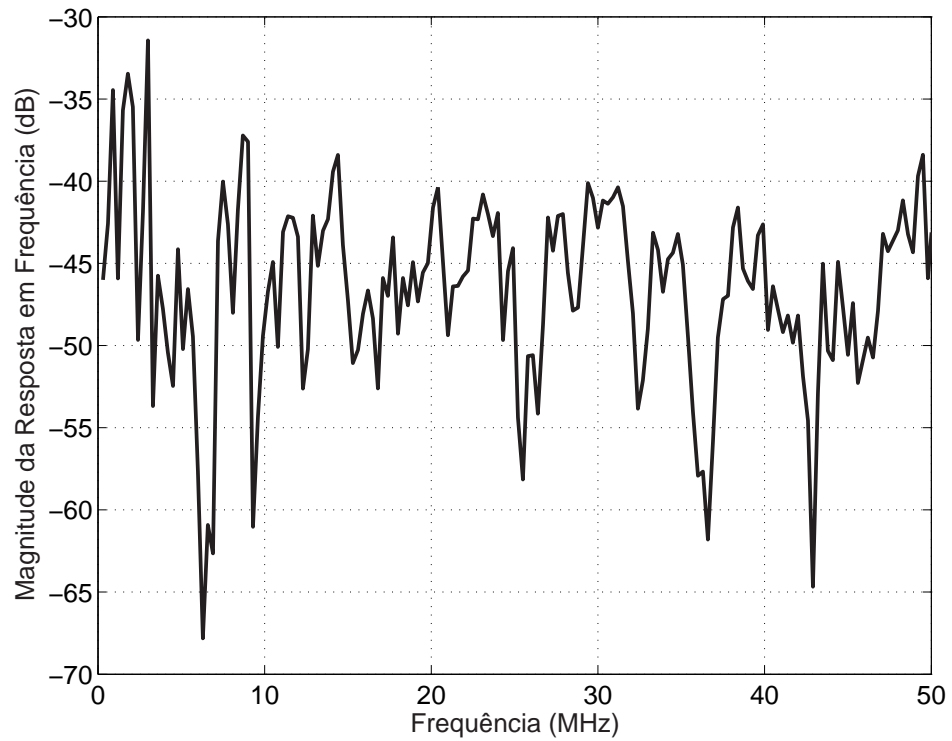


Figura 3.21: Magnitude da resposta impulsiva do canal formado entre as tomadas 1 e 3



**Figura 3.22:** Fase da resposta impulsiva do canal formado entre as tomadas 1 e 3



**Figura 3.23:** Magnitude da resposta em frequência do canal formado entre as tomadas 1 e 4

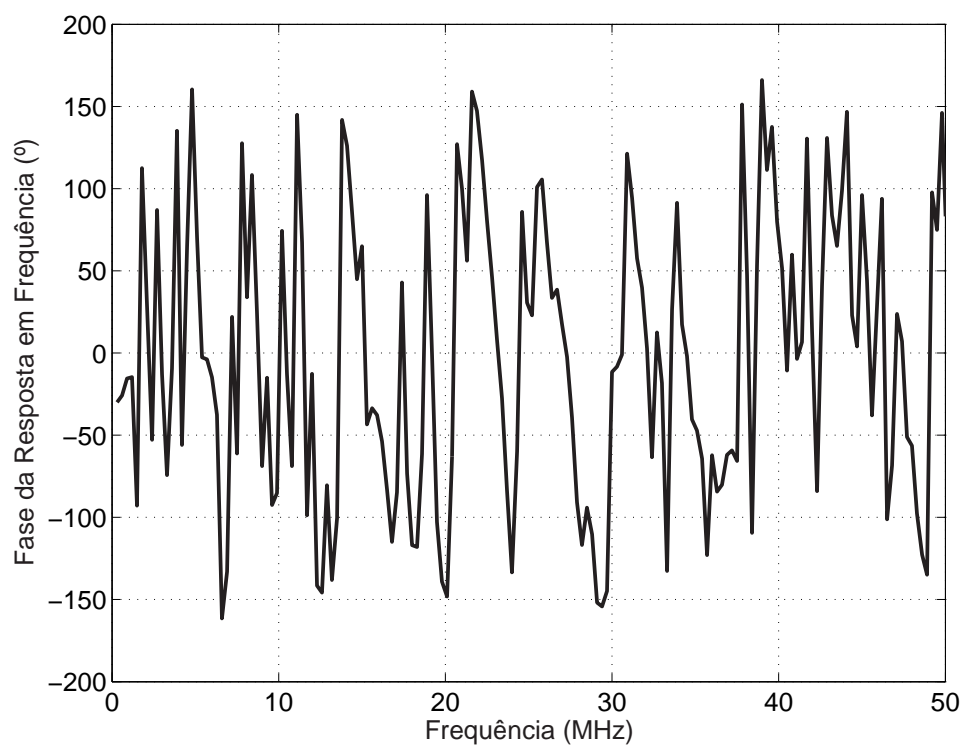


Figura 3.24: Fase da resposta em frequência do canal formado entre as tomadas 1 e 4

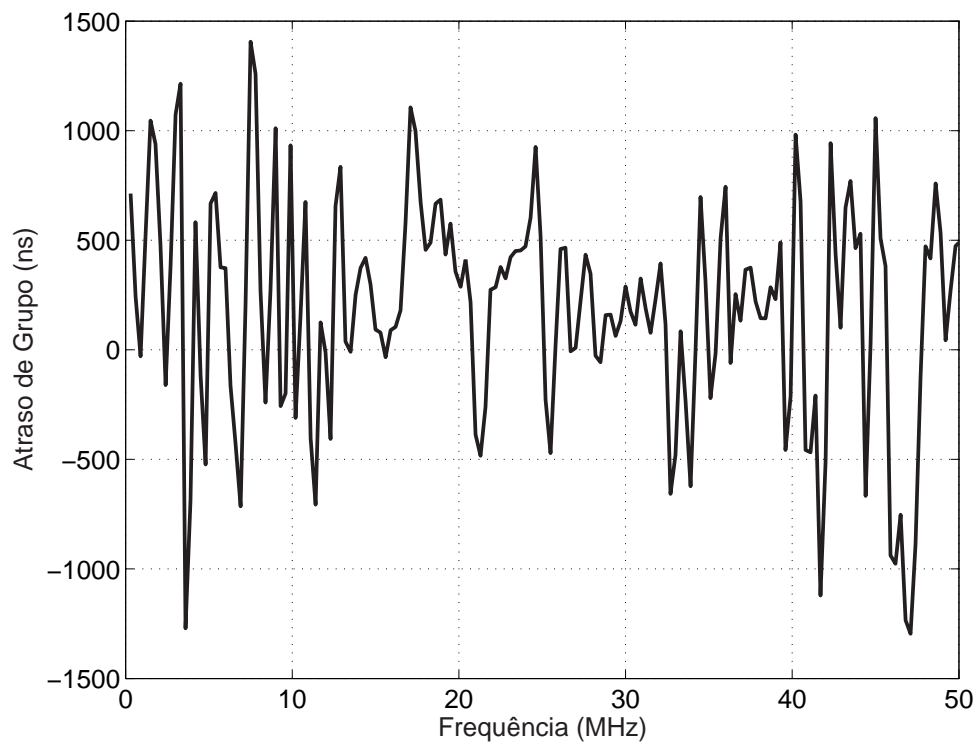
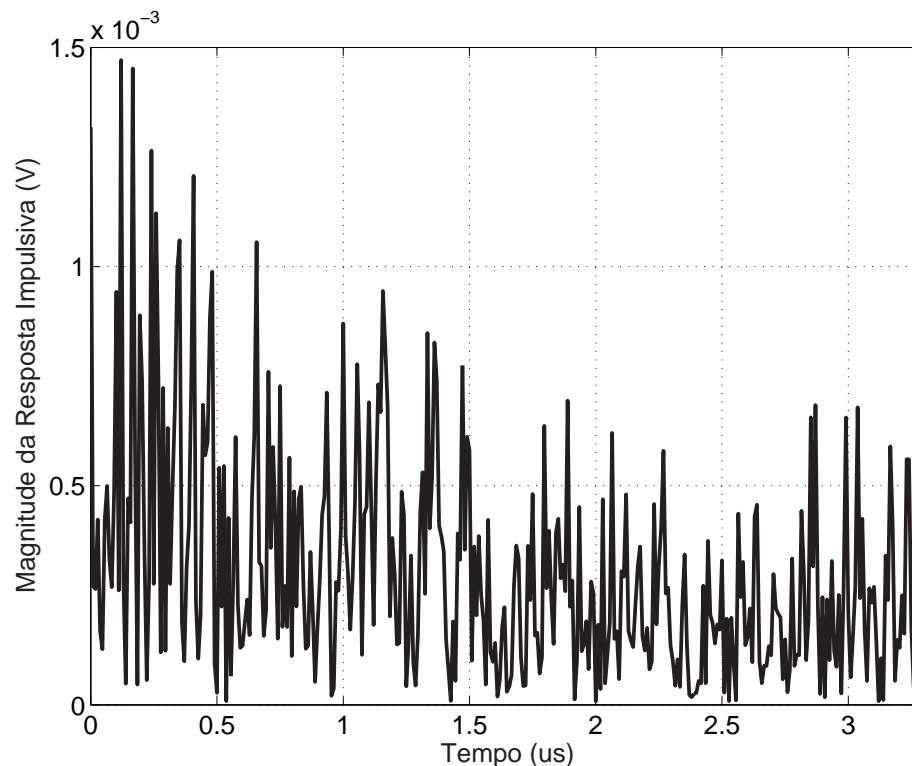


Figura 3.25: Atraso de grupo do canal formado entre as tomadas 1 e 4



**Figura 3.26:** *Magnitude da resposta impulsiva do canal formado entre as tomadas 1 e 4*

Figuras 3.14, 3.19 e 3.24.

### 3.3.3 Medidas do comportamento de fontes ruidosas presentes nos canais em análise

Ainda no ambiente descrito, foram realizadas medições do espectro ruidoso do canal usando o esquema da Figura 3.3, gerando os resultados mostrados nas Figuras 3.28 e 3.29. Esse resultado precisou de uma correção matemática após a medição, uma vez que não existia no analisador de espectro a função de calibração para compensar o comportamento introduzido pelo circuito de acoplamento. Esse procedimento de pós-correção consiste em subtrair do espectro ruidoso medido a atenuação provocada pelo circuito em cada frequência.

Para demonstrar as variações do comportamento ruidoso foi realizada a extração no laboratório da Faculdade direcionado ao desenvolvimento de sistemas para TV Digital. Esse comportamento é mostrado na Figura 3.30.

A Figura 3.31 mostra o comportamento do ruído impulsivo usando o esquema da Figura 3.4. Nessa análise, o objetivo principal é mostrar a presença e variabilidade comportamental do ruído impulsivo, dessa forma, a configuração realizada

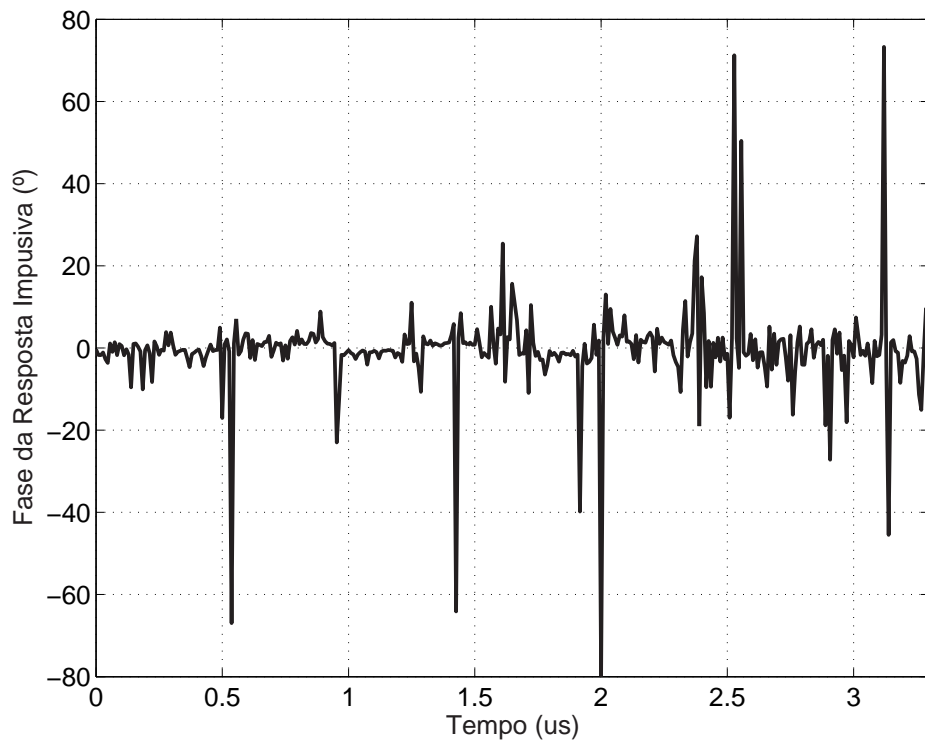


Figura 3.27: Fase da resposta impulsiva do canal formado entre as tomadas 1 e 4

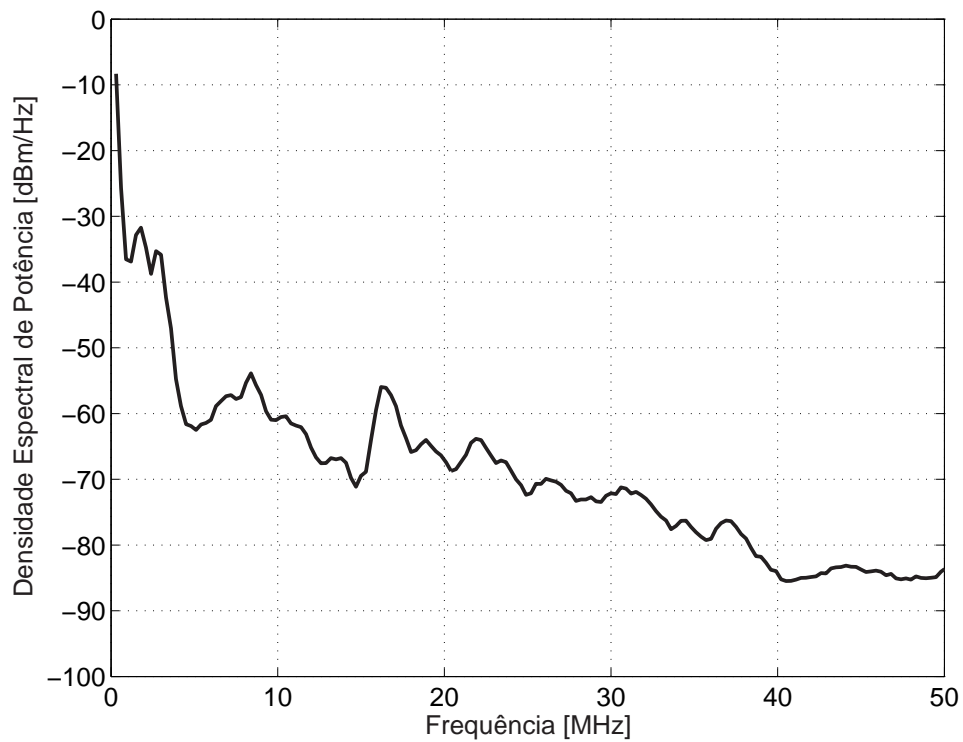
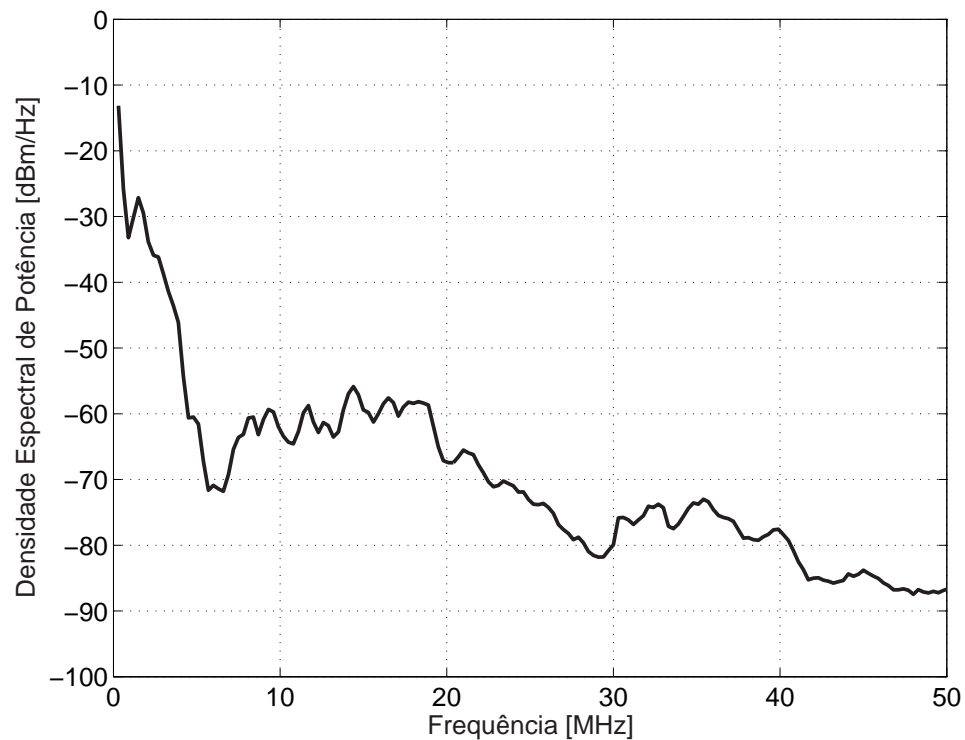


Figura 3.28: Densidade espectral de potência do ruído no canal medido no ponto 4





**Figura 3.29:** Densidade espectral de potência do ruído no canal medido no Laboratório de Instrumentação

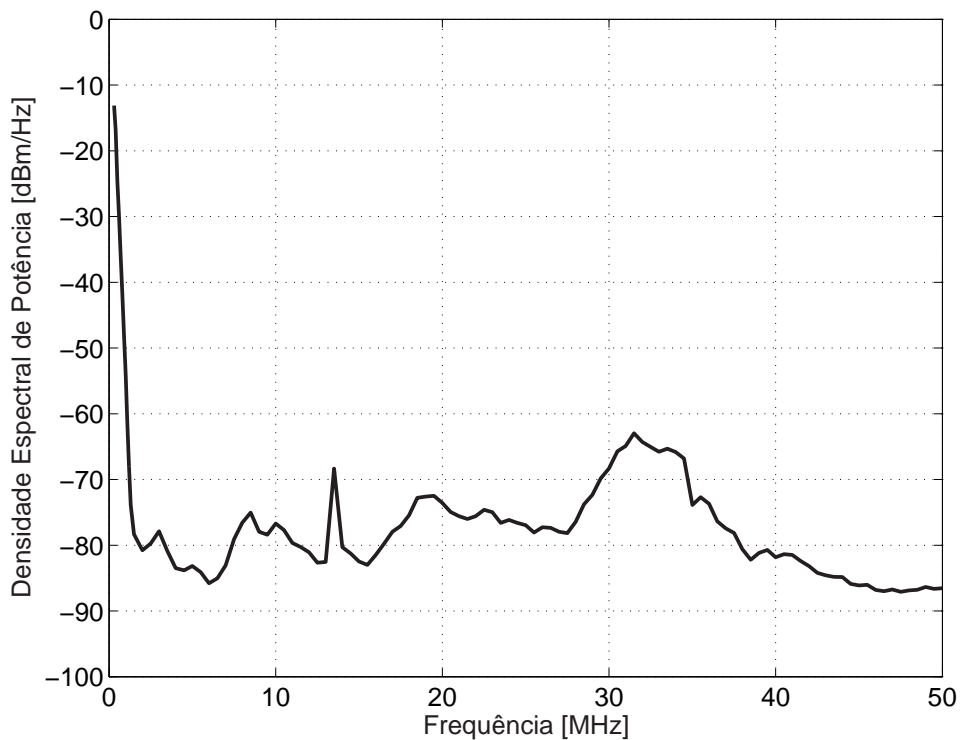
atendeu apenas a requisitos básicos como a captura de apenas 50 [ms] do ruído. Para uma análise mais completa, seria necessário utilizar outros equipamentos para garantir a captura de sinais com variações rápidas e não-periódicas.

## 3.4 Análise dos efeitos de propagação de pequena escala

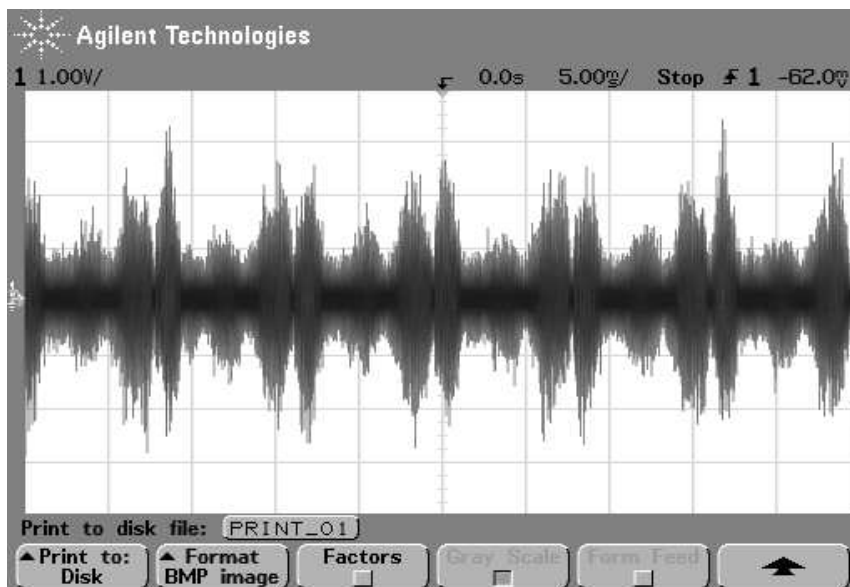
A partir dos resultados obtidos nos processos de extração de parâmetros apresentados anteriormente, pode-se realizar a análise estatísticas dos dados sob diversos aspectos. Algumas informações estatísticas importantes de um canal de comunicação são: banda de coerência e caracterização das variáveis que modelam uma resposta impulsiva obtidas no procedimento de sondagem do canal.

### 3.4.1 Banda de coerência

A banda de coerência mede a faixa de frequências na qual o canal pode ser considerado "plano", ou seja, apresenta ganho constante e fase linear [32]. Esse parâmetro possibilita o conhecimento do tipo de desvanecimento que o canal está



**Figura 3.30:** Densidade espectral de potência do ruído no canal medido no laboratório de desenvolvimento de sistemas para TV Digital



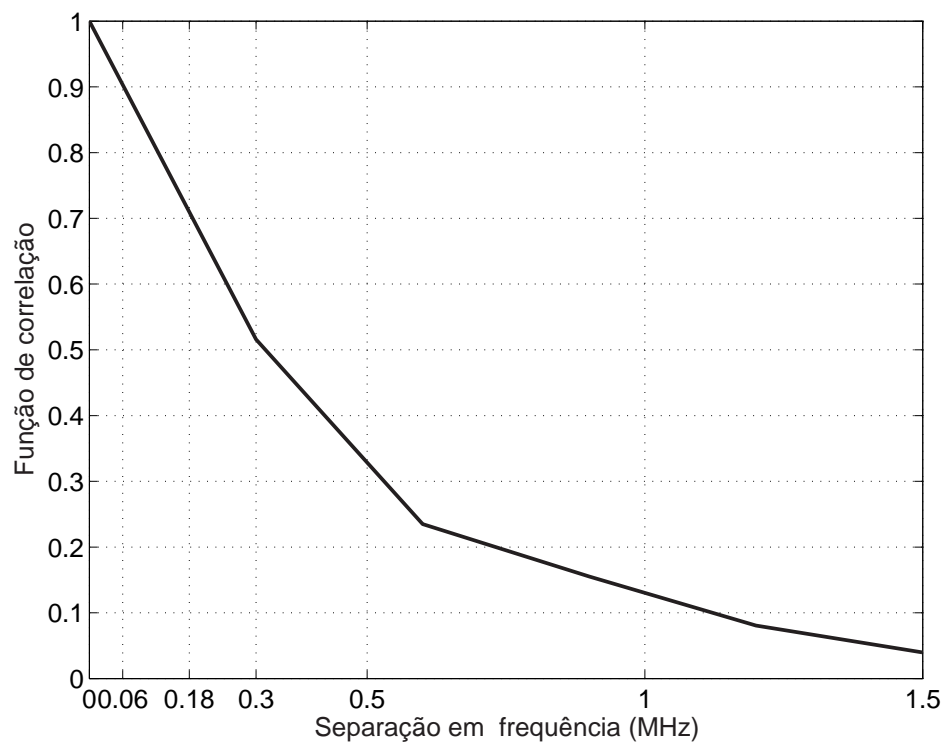
**Figura 3.31:** Comportamento temporal do ruído do canal extraído na tomada 1

submetido (desvanecimento seletivo ou plano). A banda de coerência é obtida através da função de auto-correlação da resposta em frequência do canal.

$$R(\Delta_f) = \int_{-\infty}^{+\infty} H(f)H^*(f + \Delta_f)df \quad (3.1)$$

onde  $H(f)$  é a função de transferência complexa do canal e  $H^*(f + \Delta_f)$  é o conjugado da resposta impulsiva deslocada de  $\Delta_f$  que é o espaçamento entre as amostras.

As Figuras 3.32, 3.33 e 3.34 mostram o comportamento da função de auto-correlação para os canais considerados nos cenários apresentados na seção anterior.



**Figura 3.32:** Função de auto-correlação do canal formado entre as tomadas 1 e 2

A partir das funções obtidas em cada um dos canais analisados, observou-se alguns valores de banda de coerência considerados como referência nas literaturas pesquisadas. Esses valores correspondem a 50, 70 e 90% do valor máximo da função de auto-correlação normalizada e são representados por  $B_{0,5}$ ,  $B_{0,7}$  e  $B_{0,9}$ . Os resultados de banda de coerência, que podem ser observados graficamente nas Figuras 3.32, 3.33 e 3.34, são mostradas na Tabela 3.5.

Comparando-se os canais formados pelas tomadas 1-2 e 1-4 observa-se que a banda de coerência reduz com o aumento da distância. Por outro lado, comparando os percursos entre as tomadas 1-2 e 1-3 observa-se que existem outros fatores que precisam ser levados em consideração como por exemplo a construção

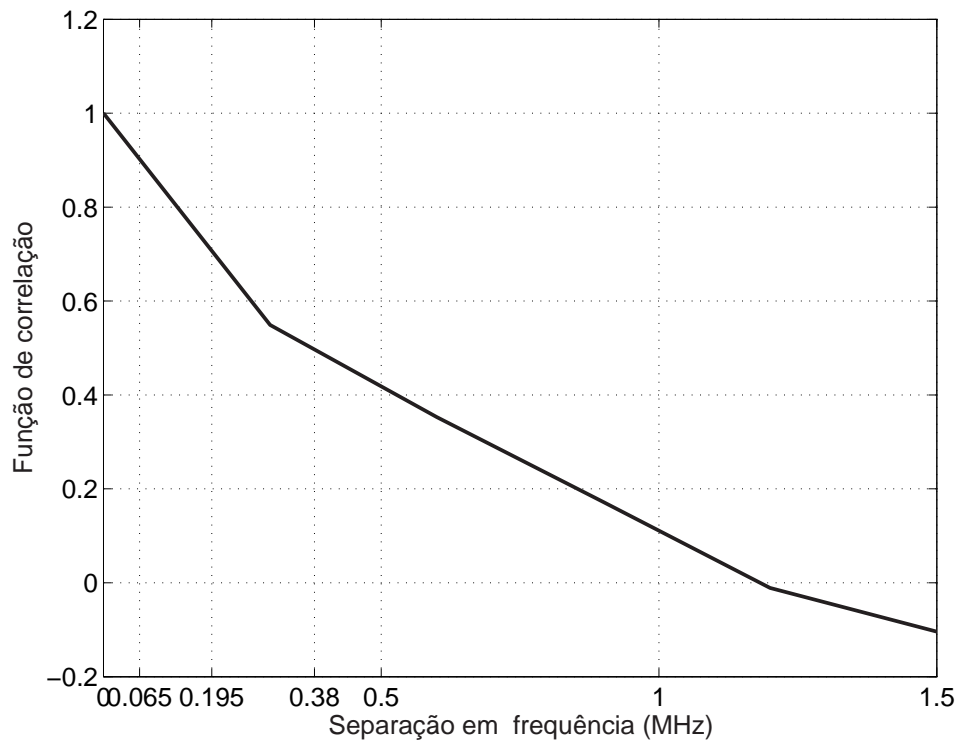


Figura 3.33: Função de auto-correlação do canal formado entre as tomadas 1 e 3

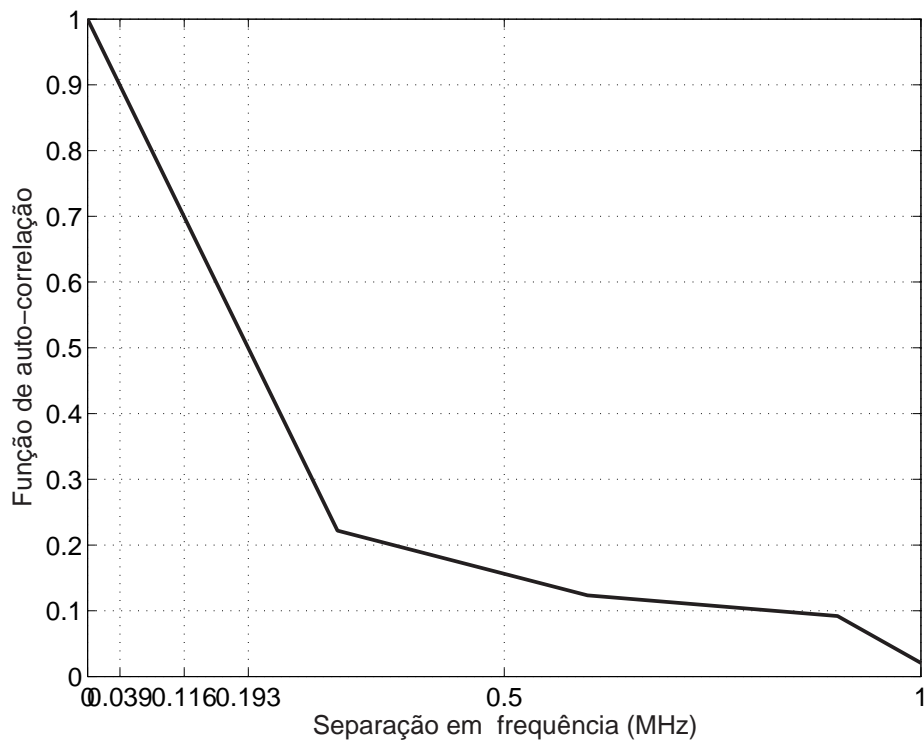


Figura 3.34: Função de auto-correlação do canal formado entre as tomadas 1 e 4

**Tabela 3.5:** Banda de coerência para os canais analisados

Canal definido pelas tomadas	$B_{0,5}$ [kHz]	$B_{0,7}$ [kHz]	$B_{0,9}$ [kHz]
1 e 2	300,00	180,00	60,00
1 e 3	380,00	195,00	65,00
1 e 4	192,72	115,60	38,54

física e derivações de um determinado circuito.

### 3.4.2 Análise estatística das características obtidas pela extração de parâmetros do canal

A resposta impulsiva de um canal pode ser analisada por variáveis determinísticas e estatísticas. Esse trabalho se concentrará no estudo do atraso médio, do atraso RMS e do comportamento estatístico das variáveis que modelam a resposta do canal. As características de atraso são obtidas a partir do perfil de potência de retardo  $P(\tau)$ , que representa a energia recebida em cada componente de multipercurso [32]. Esse perfil é obtido pelo módulo da resposta impulsiva, ou seja:

$$P_h(\tau) = |h(t)|^2 \quad (3.2)$$

Os cenários de medidas apresentados anteriormente geram os perfis mostrados nas Figuras 3.35, 3.36 e 3.37.

O atraso médio ( $\bar{\tau}$ ) é obtido a partir do primeiro momento do perfil de retardo [32]:

$$\bar{\tau} = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} \tau P_h(\tau) d\tau}{\int_{-\infty}^{+\infty} P_h(\tau) d\tau} \quad (3.3)$$

O atraso RMS ( $\tau_{RMS}$ ) é obtido a partir do segundo momento central do perfil de retardo, ou seja:

$$\tau_{RMS} = \sqrt{\frac{\int_{-\infty}^{+\infty} (\tau - \bar{\tau})^2 P_h(\tau) d\tau}{\int_{-\infty}^{+\infty} P_h(\tau) d\tau}} \quad (3.4)$$

A Tabela 3.6 mostra os valores obtidos em cada um dos cenários em análise, utilizando os algoritmos mostrados nos Anexos G, H e I.

Os dados da Tabela 3.6 demonstram a complexidade na caracterização de um canal PLC. Verifica-se que os atrasos apresentados não estão relacionados apenas com a propagação no percurso, ou seja, apenas relacionada à distância entre as tomadas e sim a diversos outros fatores como por exemplo quantidade e lo-

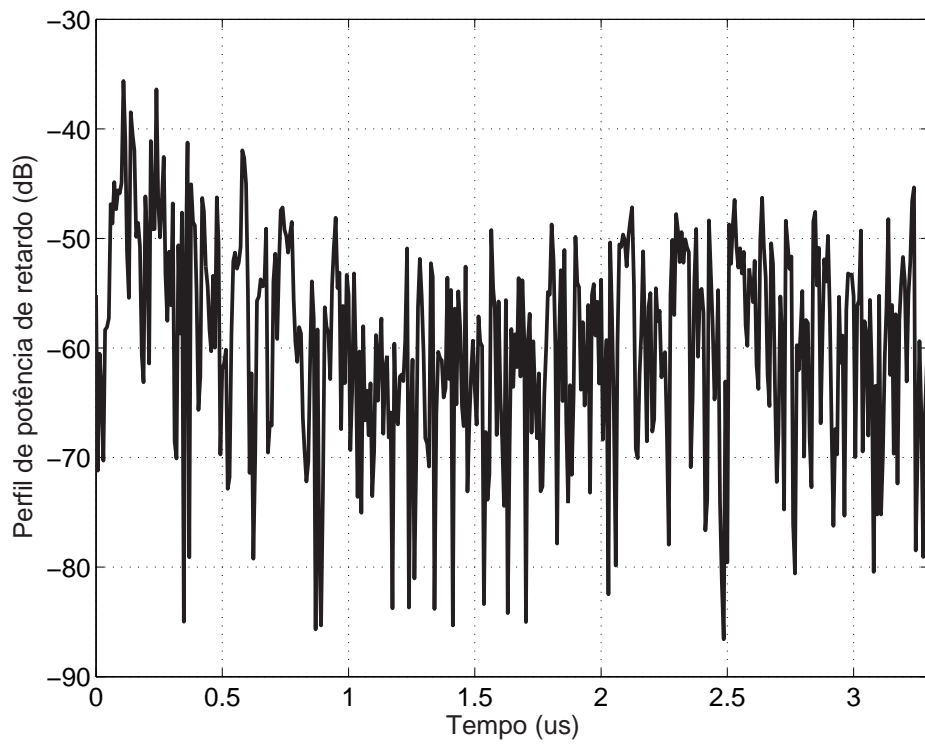


Figura 3.35: Perfil de retardo do canal formado entre as tomadas 1 e 2

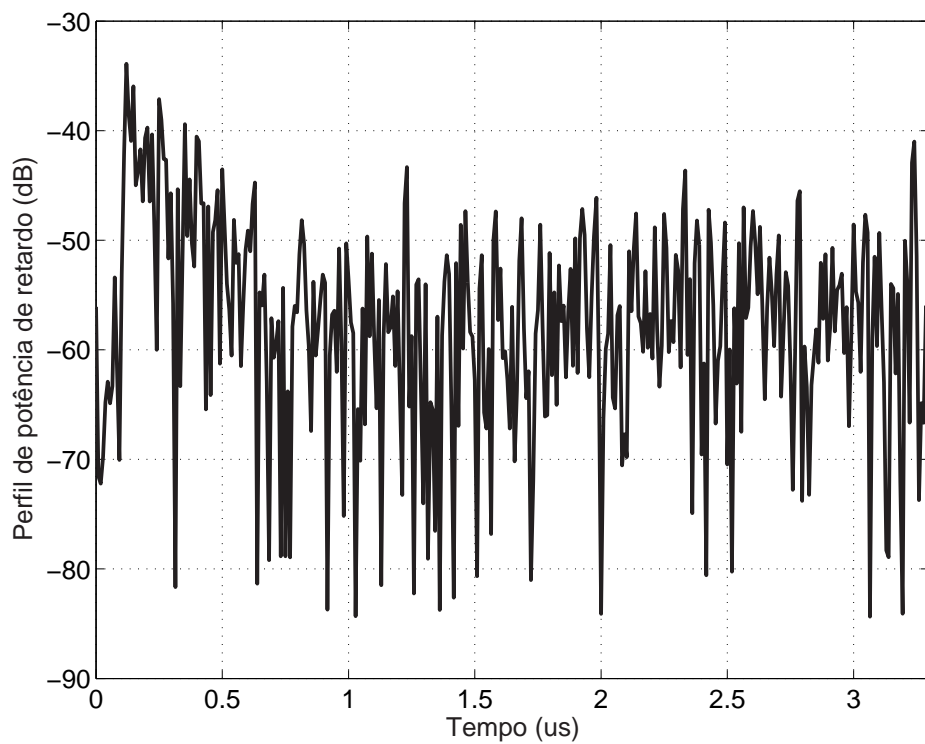
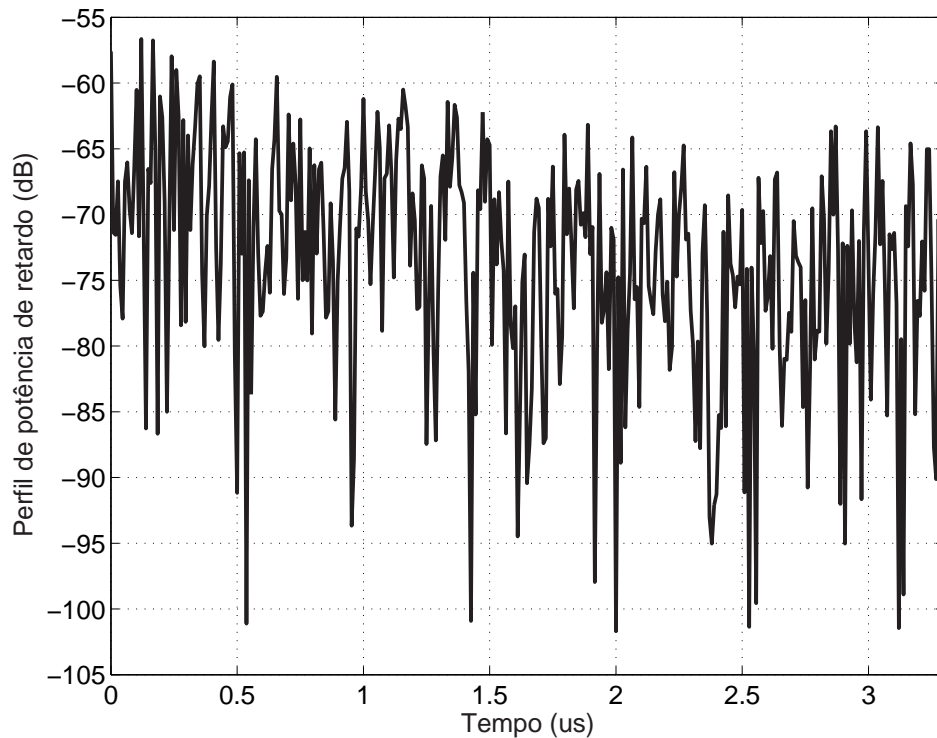


Figura 3.36: Perfil de retardo do canal formado entre as tomadas 1 e 3



**Figura 3.37:** Perfil de retardo do canal formado entre as tomadas 1 e 4

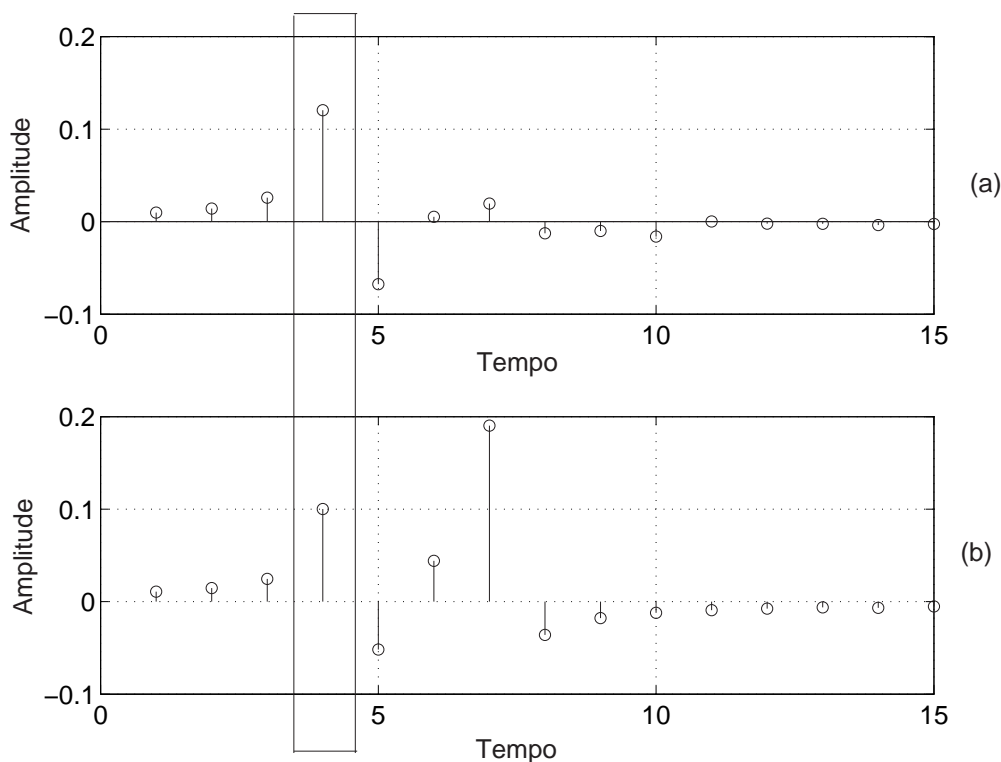
**Tabela 3.6:** Atrasos dos canais analisados

Canal definido pelas tomadas	$\bar{\tau}[\mu s]$	$\tau_{RMS}[\mu s]$
1 e 2	1,4069	1,0578
1 e 3	1,0716	0,8245
1 e 4	1,0633	0,7574

calização de derivações, características dos materiais dos elementos que estão interligados à rede, dentre outros fatores.

O estudo do desvanecimento em pequena escala do canal pode ser feito a partir da análise estatística da resposta impulsiva obtida no processo de extração de parâmetros. Pode-se verificar que mesmo efetuando medições entre tomadas localizadas à mesma distância, tomando-se um ponto como referência, obtêm-se respostas ao impulso diferentes. Para ilustrar essa característica, considere dois canais formados por tomadas igualmente distanciadas de uma considerada como referência espacial, cujas respostas impulsivas teóricas são mostradas na Figura 3.38. Verifica-se em uma janela de tempo pré-definida que as amplitudes sofrem variações. Essa situação demonstra o caráter estatístico da variável aleatória analisada (nesse exemplo a variável é a amplitude). Repetindo-se as medidas em outras tomadas, considerando a "B" como referência e utilizando a mesma distância, obtém-se a função densidade de probabilidade dessa variável aleatória.

Na caracterização de canais de comunicação, geralmente, compara-se uma pdf obtida a algumas distribuições de referência, usando critérios para garantir um determinado grau de precisão da aproximação. A Tabela 3.7 mostra as pdfs de algumas distribuições de referência [33].



**Figura 3.38:** Comparação das respostas impulsivas dos canais: (a) formado entre as tomadas TA e TB (b) formado entre as tomadas TB e TC

Gentle em [34] sugere o método conhecido como "Goodness-of-fit" para se conhecer a qual distribuição as características obtidas por sondagem do canal assemelham-se. A utilização desse método é justificada por 2 fatores: a validação de uma hipótese e a possibilidade de se prever eventos futuros. Diversos critérios de adequação são citados por [33],[34] e [35], mas os mais abordados são: "Kolmogorov-Smirnov", "Cramer-von-Mises" e "Chi-Squared". Nesses métodos, um conjunto de variáveis aleatórias sob observação são organizadas seguindo um determinado padrão a fim de ter seu comportamento comparado com uma distribuição conhecida. Esses critérios baseiam-se no estabelecimento de hipóteses e na verificação se a aplicação do mesmo produz a precisão desejada.

Na próxima subseção será abordado, de forma resumida, o método Kolmogorov-Smirnov, dada a sua aparente predominância de uso frente a outros métodos de "Goodness-of-fit".



**Tabela 3.7:** Funções densidade de probabilidade de distribuições utilizadas na análise comparativa dos dados coletados

Distribuição	Função Densidade de Probabilidade
Gaussiana	$p_R(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(r-\mu)^2}{2\sigma^2}}$
Rayleigh	$p_R(r) = \frac{r}{\sigma^2} e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}}$
Rice	$p_R(r) = \frac{r}{\sigma^2} e^{-\frac{r^2+s^2}{2\sigma^2}} I_0\left(\frac{rs}{\sigma^2}\right)$
Nakagami	$p_R(r) = \frac{2m^m r^{2m-1}}{\Gamma(m)\Omega^m} e^{-\left(\frac{m}{\Omega}\right)r^2}$
Weibull	$p_R(r) = \alpha\beta^{-\alpha} r^{\alpha-1} e^{-\left(\frac{r}{\beta}\right)^\alpha}$
Lognormal	$p_R(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma^2} e^{-\frac{[\ln(r)-\mu]^2}{2\sigma^2}}$

### 3.4.3 Método Kolmogorov-Smirnov para análise de variáveis aleatórias

De posse de uma variedade de medições de uma determinada variável aleatória em um determinada janela de observação, como por exemplo a amplitude da resposta impulsiva medida entre tomadas com um ponto fixo e outras igualmente distanciadas deste, pode-se aplicar o conceito de "goodness-of-fit" para estudar as características estatística do canal PLC. Devido à recorrência de citações nas referências pesquisadas e a fato de obtenção de amostras finitas no processo de extração de parâmetros, o critério de Kolmogorov-Smirnov (K-S) foi o eleito para ser abordado nesse trabalho. Esse critério consiste na busca pela maximização da diferença entre uma função de distribuição cumulativa empírica (ecdf) e uma distribuição conhecida, com uma precisão pré-definida.

No procedimento K-S o passo inicial consiste no estabelecimento das hipóteses:

Hipótese 1: A função empírica possui distribuição idêntica a uma distribuição conhecida  $F_n(x)$ :

$$F_n(x) = F(x) \quad (3.5)$$

Como exemplo podemos considerar as apresentadas na Tabela 3.7.

Hipótese 2: A função empírica não se assemelha a uma distribuição conhecida que foi escolhida para comparação.

$$F_n(x) \neq F(x) \quad (3.6)$$

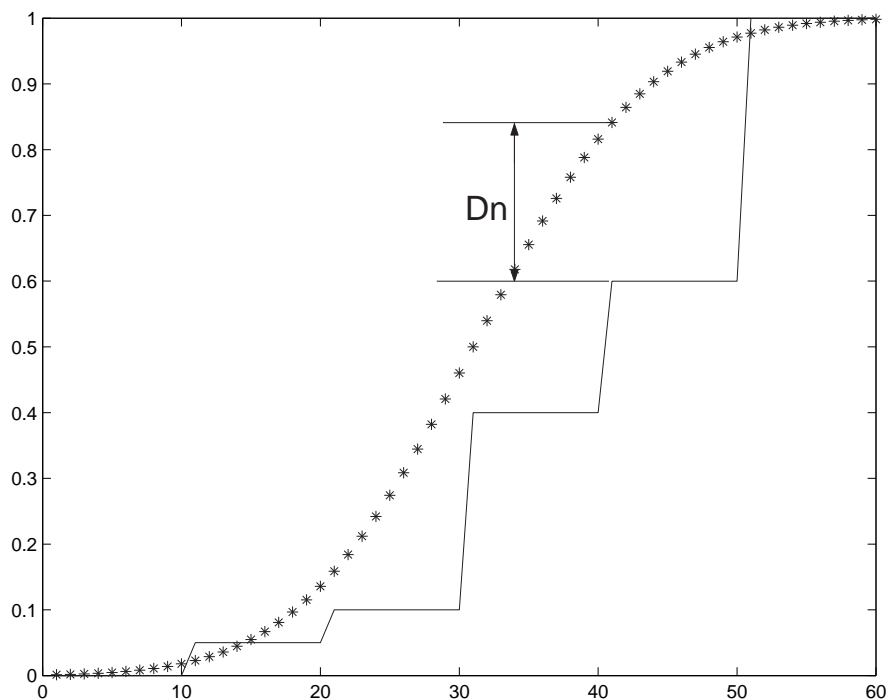
O segundo passo consiste na escolha de um número  $n$  de variáveis aleatórias independentes e igualmente distribuídas  $X = (X_1, X_2, \dots, X_n)$  que geram uma função de distribuição cumulativa  $F_n(x)$  [37]:

onde

$$F_n(x) = \begin{cases} 0 & x < x_1 \\ \frac{i}{n} & x_i < x < x_{i+1} \\ 1 & x_n < x \end{cases} \quad (3.7)$$

O passo seguinte consiste na busca pelo intervalo de análise que resulta o maior módulo da distância entre a função obtida no processo de extração e a distribuição escolhida para comparação, como ilustrado na Figura 3.39, onde

$$D_n = \max_x |F_n(x) - F(x)| \quad (3.8)$$



**Figura 3.39:** Comparação entre as cdf's teórica e empírica

Como a distribuição  $F(x)$  usada na comparação tem valores conhecidos, o valor do desvio pode ser calculado para cada valor de  $x$ . Entre todos os valores de  $D_n$ , o maior deles é uma indicativa de quanto os valores empíricos se distanciam dos valores teóricos.

O passo final consiste em verificar se o maior valor encontrado para  $D_n$  atende a distância crítica para um grau de precisão (significância)  $D_{n;\alpha}$  desejado, ou seja verifica-se se a condição ilustrada pela Equação (3.9) é verdadeira.

$$D_n < D_{n;\alpha} \quad (3.9)$$

O valor  $D_{n;\alpha}$  para uma determinada distribuição de referência é encontrado

em diversas tabelas. Esse valor representa a probabilidade de uma distribuição conhecida de  $n$  elementos apresentar o grau de significância  $\alpha$ , para geração da tabela observam-se os percentis obtidos pela aproximação de Monte-Carlo [36] e [37]. Em [38] e [39] são apresentadas alguns valores críticos assintóticos para  $D_{n;\alpha}$  como mostrado na Equação (3.10). Essa abordagem não é recomendada para pequenas amostras aleatórias.

$$D_{n;\alpha} = 1 - 2 \sum_{m=1}^{\infty} (-1)^{m-1} e^{-2m^2\alpha^2} \quad (3.10)$$

Se a condição da Equação (3.9) for verdadeira, a "Hipótese 1" é aceita, ou seja a distribuição conhecida escolhida pode ser utilizada para representar o comportamento do canal analisado [34], caso contrário um novo teste deve ser efetuado utilizando um outro modelo de distribuição ou diferentes parâmetros.

Para exemplificar a aplicação do teste K-S tomam-se amostras da amplitude da resposta impulsiva de um determinado canal e obtem-se o vetor  $X = (0,3049 ; 0,4288 ; 0,1272 ; 0,5898 ; 0,6400 ; 0,7062 ; 2,3890 ; 1,1279 ; 1,2262 ; 1,4022)$  [mV]. Inicialmente define-se a hipótese de que os valores obtidos seguem a distribuição Weibull. Seguindo os passos descritos acima, calcula-se as diferenças entre a amplitude empírica e a da distribuição conhecida obtendo-se os valores  $D_+$  e  $D_-$ , que correspondem ao módulo da diferença entre o início e final da amostra empírica respectivamente. Em posse das informações calculadas constroi-se a Tabela 3.8.

**Tabela 3.8:** Parâmetros do teste K-S aplicado em uma amostra de amplitudes da resposta impulsiva de um canal PLC

i	$X_i$	$F_n(x)$	$F(x)$	$D_+$	$D_-$
1	0,1272	0,1	0,0160	0,0840	0,0160
2	0,3049	0,2	0,0888	0,1112	0,0112
3	0,4288	0,3	0,1680	0,1320	0,0320
4	0,5898	0,4	0,2938	0,1062	0,0062
5	0,6400	0,5	0,3361	0,1639	0,0639
6	0,7062	0,6	0,3927	<b>0,2073</b>	0,1073
7	1,1279	0,7	0,7198	0,0198	0,1198
8	1,2262	0,8	0,7776	0,0224	0,0776
9	1,4022	0,9	0,8600	0,0400	0,0600
10	2,3890	1,0	0,9967	0,0033	0,0967

Analisando o valor de  $D_{10;\alpha}$  para um grau de significância de 5 %, obtido por tabela ou emprego da aproximação de Monte-Carlo, conclui-se que a hipótese é verdadeira, uma vez que  $D_{10;5\%} = 0,41$  é maior que a maior diferença entre  $F_n(x)$  e  $F(x)$  que é de 0,2073. Dessa forma, conclui-se que a amostra empírica obtida

segue a distribuição de Weibull.

# Capítulo 4

## Conclusão

### 4.1 Considerações finais

Para atender a inserção de novos usuários e suportar novos serviços de telecomunicações como TV de alta definição e redes pessoais de alta velocidade, torna-se necessário aperfeiçoar as tecnologias existentes e proporcionar a disponibilidade de tecnologias para atender a diferentes nichos de mercado. Nesse cenário, a tecnologia PLC surge como uma nova opção para atender a demanda crescente.

Analisando os temas abordados nesse trabalho e as experiências existentes em diversas partes do mundo, observa-se a potencialidade de utilização da rede de distribuição de energia elétrica como meio de transmissão de dados em taxas de centenas de Mbps. Por outro lado, para que a implementação da tecnologia PLC atenda seus objetivos (baixo custo operacional, facilidade no processo de implementação, grande amplitude na cobertura e qualidade satisfatória dos serviços) serão necessários estudos acerca dos diversos temas relacionados a esse tipo de comunicação. Além disso, novos investimentos precisarão ser realizados para que essa opção apresente custo competitivo quando comparada com outras tecnologias.

A respeito da caracterização do canal de comunicação, objetivo central desse trabalho, verifica-se a necessidade de formar uma base de dados extraídos de variados canais de comunicação em diferentes ambientes (residenciais, comerciais e industriais) e características físicas, a fim de obter um modelo de referência que possa nortear novas pesquisas, complementar os conhecimentos já existentes e participar do aprimoramento de sistemas comerciais. Verifica-se que essa tarefa encontrará muitas barreiras devido à complexidade e variabilidade dos fatores que interferem na comunicação PLC. A contribuição deste trabalho situa-se justamente na abordagem de uma possível forma de extração e análise de parâmetros de um canal PLC.

## 4.2 Sobre os dados obtidos

Os gráficos de magnitude da resposta em frequência dos canais medidos apresentam comportamento semelhante considerando o intervalo de frequência em análise, que contemplam a padronização brasileira para serviços PLC comerciais, sofrendo vales mais profundos em torno de 5 e 40 MHz. A análise das mesmas respostas leva a conclusão do carácter seletivo do canal PLC. Outra observação importante está relacionada a distância entre as tomadas e o nível de atenuação, como era de se esperar, quanto maior a distância maior a atenuação provocada pelo canal.

Nos canais estudados, as variações de fase são frequentes e também dependentes das características dos circuitos que formam os mesmos o que pode exigir técnicas e modulação e codificação especiais. Outra característica importante a ser considerada pelos projetistas de sistemas PLC está relacionada a possibilidade de ocorrência de interferência inter-simbólica caso a análise da resposta impulsiva nos mesmos não for cuidadosamente analisada.

Analisando os parâmetros estatísticos calculados a partir dos resultados do procedimento de sondagem do canal, verifica-se que banda de coerência e atrasos apresentam valores nas proximidades dos encontrados por Lich, Avril e Zeddam [32]. Esses resultados demonstram que o procedimento de sondagem aqui descrito é consistente e pode ser usado como ferramenta de caracterização de canais PLC. Além disso, a variação nos resultados obtidos demonstram a dificuldade de modelar o canal que apresenta dependência de variados fenômenos presentes no canal.

## 4.3 Sugestões para trabalhos futuros

Seguindo na linha de pesquisa de caracterização do canal de comunicação PLC, algumas atividades agregariam importante conhecimento ao estudo proposto. Algumas sugestões para continuidade da pesquisa realizada seriam:

- *repetição do processo de extração de resposta em frequência em diferentes canais*: obtendo-se uma quantidade maior de amostras será possível encontrar um modelo mais representativo que contemple possíveis variações locais das respostas obtidas.
- *medição do comportamento ruidoso em diferentes ambientes*, o que indicará uma determinada predominância de um ou mais tipos de ruído em determinado ambiente de acordo com determinadas características físicas ou de atividade desenvolvida no local. Nessa linha de pesquisa, uma interessante contribuição seria a aquisição de dados, usando um hardware a ser definido,

para se observar variações temporais locais em diferentes períodos do dia, e posterior caracterização estatística dos dados obtidos.

- *aplicação de diferentes testes de goodness-of-fit sobre dados estatísticos provenientes do processo de extração de parâmetros*, para avaliar o desempenho de um método submetido a um canal com determinada característica e encontrar a distribuição que melhor modela um parâmetro ou comportamento do canal.

# Anexo A

## Geração das Figuras 2.10, 2.11, 2.12 e 2.14

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
% Programa para simulacao do ruido impulsivo usando modelo de [5] %  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
  
clear all;  
close all;  
  
% Definicao do numero maximo de pontos gerados  
k = 100000;  
  
% Geracao da sequencia de pontos no plano  
x = unifrnd(3,6,1,k);  
y = unifrnd(0,0.16,1,k);  
  
% Geracao da variavel aleatoria que modela a largura dos pulsos  
for t = 1 : k  
widpdf(t)=(0.0763*normpdf(x(t),4.9,0.2))+(0.0318*normpdf(x(t),4.2,0.25));  
end;  
  
% Aplicacao do metodo da rejeicao  
j = 1;  
for i = 1 : k  
if(y(i) ≤ widpdf(i))  
z(j) = x(i);  
j = j + 1;  
end  
end
```



---

```
end;
end;
hist(z,1000)
grid on
xlabel('Largura [us]')
ylabel('HISTOGRAMA LARGURA')

% Geracao da sequencia de pontos no plano
x1 = unifrnd(8,17,1,k);
y1 = unifrnd(0,1.8,1,k);

% Geracao da variavel aleatoria que modela a amplitude dos pulsos
for t = 1 : k
amppdf(t)=((gamma(5)/gamma(3))*(((x1(t)-8)/9)^2)*(1-((x1(t)-8)/9)));
end;

% Aplicacao do metodo da rejeicao
j = 1;
for i = 1 : k
if(y1(i)≤ amppdf(i))
w(j) = x1(i);
j = j + 1;
end;
end;
figure
hist(w,1000)
grid on
xlabel('Amplitude [mv]')
ylabel('HISTOGRAMA AMPLITUDE')

% Geracao da sequencia de pontos no plano
x2 = unifrnd(0,13,1,k);
y2 = unifrnd(0,0.22,1,k);

% Geracao da variavel aleatoria que modela a amplitude dos pulsos
for t = 1 : k
intpdf(t)=((x2(t)^3.2)*exp(-x2(t)))/gamma(4.2);
end;

% Aplicacao do metodo da rejeicao
```

```

j = 1;
for i = 1 : k
if(y2(i) ≤ intpdf(i))
p(j) = x2(i);
j = j + 1;
end;
end;
figure
hist(p,1000)
grid on
xlabel('Intervalo [ms]')
ylabel('HISTOGRAMA INTERVALO')

% Definicao do numero de amostras aleatoria que serao utilizadas na geracao
% do ruido
if size(z) ≤ size(w) ≤ size(p)
tamanho = size(z);
elseif size(w) ≤ size(p) ≤ size(z)
tamanho = size(w);
else
tamanho = size(p);
end;
ruído = zeros(tamanho);

% Combinacao das variaveis aleatorias para geracao do ruido
tinicio = 1;
for i = 1 : 8
for n = 1 : 16
for t = tinicio : (tinicio+round(z(n)))
pulso(t)=((-1)n+1)*w(n);
end
tinicio=tinicio+round(z(n))+1;
end
for j=tinicio:round(p(i))
pulso(j)=0;
end
tinicio= tinicio+round(p(i)*1000)+1;
end
figure
plot(pulso,'LineWidth',2,'Color','k')

```

```
grid on  
xlabel('Tempo [us]')  
ylabel('Amplitude [mV]')
```

# Anexo B

## Geração das Figuras 2.2 e 2.3

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Programa para simulacao da resposta em frequencia do canal de [4] %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

clear all;
close all;

% Definicao do vetor de frequencias em analise
fmax = 50;
f = 0 : 1 : fmax;

% Geracao da resposta em frequencia
H = 0.151*exp(i*0.691)*exp(-i*2*pi*0.00011*(f*1000))+
0.047*exp(-i*0.359)*exp(-i*2*pi*0.000154*(f*1000))+
0.029*exp(i*0.591)*exp(-i*2*pi*0.000205*(f*1000))+
0.041*exp(i*2.913)*exp(-i*2*pi*0.000311*(f*1000))+
0.033*exp(i*1.012)*exp(-i*2*pi*0.000427*(f*1000));
Hfinal = 20*log10(abs(H));
plot(f,Hfinal,'LineWidth',2,'Color','k')
grid on
xlabel('Frequencia (MHz)')
ylabel('Modulo da Resposta em Frequencia (dB)')

% Geracao da resposta impulsiva usando a IFFT
t = 0 : 1/25 : fmax/25;
respimpul = real(iff(H));
figure
```

```
plot(t(1:40),respimpul(1:40),'LineWidth',2,'Color','k')  
grid on  
xlabel('Tempo (us)')  
ylabel('Amplitude (V)')
```

# Anexo C

## Geração das Figuras 2.5, 2.8 e 2.9

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
% Programa para simulacao dos ruidos colorido e de faixa-estreita %  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
close all;
```

```
clear all;
```

```
% Geracao do ruido AWGN
```

```
n = 60000;
```

```
x0 = wgn(1,n,0);
```

```
% Definicao das caracteristicas dos filtros
```

```
t = linspace(0,0.001,n);
```

```
dt = t(2)-t(1);
```

```
X0 = fftshift(fft(x0));
```

```
Df = 1/dt;
```

```
f = linspace(-Df/2,Df/2,n);
```

```
% Frequencia central dos sinais interferentes em [Hz]
```

```
fc0 = 6050000;
```

```
fc1 = 7225000;
```

```
fc2 = 9650000;
```

```
fc3 = 10125000;
```

```
fc4 = 11850000;
```

```
fc5 = 14175000;
```

```
fc6 = 15450000;
```

```
fc7 = 17690000;
```

---

```
% Banda ocupada pelos sinais interferentes em [Hz]
B0 = 300000;
B1 = 450000;
B2 = 500000;
B3 = 50000;
B4 = 500000;
B5 = 350000;
B6 = 700000;
B7 = 420000;

% Filtragem do ruido AWGN
mdYff0 = rfilterednoise1(B0,fc0,x0,t,Df);
mdYff1 = rfilterednoise1(B1,fc1,x0,t,Df);
mdYff2 = rfilterednoise1(B2,fc2,x0,t,Df);
mdYff3 = rfilterednoise1(B3,fc3,x0,t,Df);
mdYff4 = rfilterednoise1(B4,fc4,x0,t,Df);
mdYff5 = rfilterednoise1(B5,fc5,x0,t,Df);
mdYff6 = rfilterednoise1(B6,fc6,x0,t,Df);
mdYff7 = rfilterednoise1(B7,fc7,x0,t,Df);

% Adicao dos ruidos limitados em faixa gerados
mdyff = mdYff0+mdYff1+mdYff2+mdYff3+mdYff4+mdYff5+mdYff6+mdYff7;
mdYf = fftshift(fft(mdyff));
figure
plot(f(((n/2)+1):n),10*log10(abs(mdYf(((n/2)+1):n))), 'LineWidth',2,'Color','k')
grid on
xlabel('Frequencia [Hz]')
ylabel('Densidade Espectral de Potencia [dBm/Hz]')

% Geracao do ruido colorido
a = -115;
b = -100;
c = -0.8;
fcol = 0.001:0.001:30;
filter = 10.^(a - (b * (fcol.^c)));
figure
plot(fcol,log10(filter),'LineWidth',2,'Color','k')
grid on
xlabel('Frequencia [MHz]')
```

```
ylabel('Densidade Espectral de Potencia [dBm/Hz]')
background = log10(filter)+10*log10(abs(mdYf(((n/2)+1):n)));
figure
plot(f(((n/2)+1):n),background,'LineWidth',2,'Color','k')
grid on
xlabel('Frequencia [Hz]')
ylabel('Densidade Espectral de Potencia [dBm/Hz]')
```



# Anexo D

## Geração da Figura 3.27

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
% Programa para simulacao do comportamento ruidoso medido no laboratorio %  
% de pos-graduacao %  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
clear all;  
close all;
```

```
% Resposta em frequencia medida do conjunto de acoplamento  
magrespckt = [-0.575 -0.519 -0.511 -0.504 -0.501 -0.497 -0.484 -0.476 -0.455 -0.480  
-0.460 -0.458 -0.466 -0.463 -0.466 -0.474 -0.479 -0.476 -0.477 -0.488 -0.488 -0.495  
-0.492 -0.501 -0.495 -0.496 -0.500 -0.500 -0.513 -0.521 -0.521 -0.531 -0.539 -0.538  
-0.549 -0.562 -0.564 -0.571 -0.570 -0.567 -0.574 -0.574 -0.582 -0.586 -0.601 -0.616  
-0.623 -0.634 -0.643 -0.668 -0.710 -0.713 -0.727 -0.736 -0.745 -0.750 -0.751 -0.746  
-0.745 -0.741 -0.739 -0.748 -0.755 -0.759 -0.768 -0.774 -0.779 -0.785 -0.791 -0.797  
-0.802 -0.816 -0.831 -0.853 -0.903 -1.026 -1.394 -2.301 -2.835 -2.195 -1.733 -1.434  
-1.286 -1.206 -1.158 -1.131 -1.114 -1.102 -1.095 -1.094 -1.088 -1.091 -1.095 -1.098  
-1.101 -1.108 -1.116 -1.123 -1.132 -1.138 -1.144 -1.148 -1.153 -1.158 -1.167 -1.177  
-1.183 -1.190 -1.200 -1.209 -1.219 -1.229 -1.241 -1.254 -1.259 -1.267 -1.273 -1.278  
-1.281 -1.285 -1.291 -1.298 -1.306 -1.312 -1.320 -1.328 -1.336 -1.346 -1.355 -1.364  
-1.377 -1.393 -1.420 -1.459 -1.493 -1.503 -1.495 -1.486 -1.479 -1.475 -1.507 -1.514  
-1.523 -1.538 -1.558 -1.585 -1.621 -1.672 -1.744 -1.852 -2.142 -2.378 -2.549 -2.539  
-2.478 -2.385 -2.290 -2.204 -2.132 -2.072 -2.248 -2.170 -2.111 -2.065 -2.026 -1.996  
-1.971 -1.955 -1.943 -1.930 -1.910 -1.910 -1.904 -1.901 -1.899 -1.902 -1.903 -1.907  
-1.914 -1.919];
```

```
% Densidade espectral de potencia do ruido medido
```

```
ruido = [-8.90 -26.21 -37.04 -37.40 -33.35 -32.22 -35.22 -39.23 -35.76 -36.33 -42.82  
-47.51 -55.23 -59.32 -62.08 -62.39 -62.97 -62.14 -61.90 -61.45 -59.36 -58.61 -57.86  
-57.69 -58.29 -58.00 -55.83 -54.39 -56.18 -57.69 -60.18 -61.46 -61.54 -61.07 -60.97  
-62.06 -62.41 -62.65 -63.70 -65.73 -67.23 -68.14 -68.11 -67.36 -67.57 -67.39 -68.11  
-70.43 -71.79 -70.15 -69.57 -64.68 -60.18 -56.69 -56.83 -57.94 -59.62 -62.55 -64.53  
-66.59 -66.31 -65.43 -64.77 -65.68 -66.52 -67.14 -68.19 -69.54 -69.25 -68.18 -67.09  
-65.28 -64.67 -64.90 -66.15 -67.42 -68.93 -69.43 -70.23 -70.88 -71.76 -72.33 -73.66  
-73.33 -71.84 -71.85 -71.05 -71.27 -71.47 -71.95 -72.85 -73.22 -74.39 -74.17 -74.18  
-73.82 -74.47 -74.58 -73.65 -73.26 -73.39 -72.37 -72.58 -73.33 -73.09 -73.57 -74.14  
-75.00 -76.02 -76.88 -77.49 -78.83 -78.33 -77.58 -77.56 -78.50 -79.33 -80.02 -80.53  
-80.36 -78.82 -77.98 -77.57 -77.69 -78.57 -79.67 -80.36 -81.78 -83.04 -83.15 -84.06  
-85.17 -85.38 -86.68 -86.97 -86.95 -86.77 -86.49 -86.46 -86.34 -86.27 -85.79 -85.84  
-85.10 -84.95 -84.93 -84.75 -84.98 -85.08 -85.59 -86.25 -86.38 -86.45 -86.61 -87.08  
-86.78 -87.36 -87.43 -87.20 -87.33 -87.02 -87.18 -87.16 -87.04 -86.91 -86.05 -85.44  
-85.50 -85.20 -85.00 -84.87 -84.45 -84.27 -84.03 -83.91 -83.79 -83.77 -84.38 -84.62  
-84.72];
```

```
% Correcao dos valores medidos excluindo-se as caracteristicas do conjunto
```

```
%de acoplamento
```

```
ruidocor = ruido-magrespckt;
```

```
freq=0.3:0.3:54;
```

```
plot(freq,ruidocor,'LineWidth',2,'Color','k')
```

```
grid on
```

```
xlabel('Frequencia [MHz]')
```

```
ylabel('Densidade Espectral de Potencia [dBm/Hz]')
```

# Anexo E

## Geração da Figura 3.28

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
% Programa para simulacao do comportamento ruidoso medido no laboratorio %  
% de instrumentacao %  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
clear all;  
close all;
```

```
% Resposta em frequencia medida do conjunto de acoplamento  
magrespckt = [-0.575 -0.519 -0.511 -0.504 -0.501 -0.497 -0.484 -0.476 -0.455 -0.480  
-0.460 -0.458 -0.466 -0.463 -0.466 -0.474 -0.479 -0.476 -0.477 -0.488 -0.488 -0.495  
-0.492 -0.501 -0.495 -0.496 -0.500 -0.500 -0.513 -0.521 -0.521 -0.531 -0.539 -0.538  
-0.549 -0.562 -0.564 -0.571 -0.570 -0.567 -0.574 -0.574 -0.582 -0.586 -0.601 -0.616  
-0.623 -0.634 -0.643 -0.668 -0.710 -0.713 -0.727 -0.736 -0.745 -0.750 -0.751 -0.746  
-0.745 -0.741 -0.739 -0.748 -0.755 -0.759 -0.768 -0.774 -0.779 -0.785 -0.791 -0.797  
-0.802 -0.816 -0.831 -0.853 -0.903 -1.026 -1.394 -2.301 -2.835 -2.195 -1.733 -1.434  
-1.286 -1.206 -1.158 -1.131 -1.114 -1.102 -1.095 -1.094 -1.088 -1.091 -1.095 -1.098  
-1.101 -1.108 -1.116 -1.123 -1.132 -1.138 -1.144 -1.148 -1.153 -1.158 -1.167 -1.177  
-1.183 -1.190 -1.200 -1.209 -1.219 -1.229 -1.241 -1.254 -1.259 -1.267 -1.273 -1.278  
-1.281 -1.285 -1.291 -1.298 -1.306 -1.312 -1.320 -1.328 -1.336 -1.346 -1.355 -1.364  
-1.377 -1.393 -1.420 -1.459 -1.493 -1.503 -1.495 -1.486 -1.479 -1.475 -1.507 -1.514  
-1.523 -1.538 -1.558 -1.585 -1.621 -1.672 -1.744 -1.852 -2.142 -2.378 -2.549 -2.539  
-2.478 -2.385 -2.290 -2.204 -2.132 -2.072 -2.248 -2.170 -2.111 -2.065 -2.026 -1.996  
-1.971 -1.955 -1.943 -1.930 -1.910 -1.910 -1.904 -1.901 -1.899 -1.902 -1.903 -1.907  
-1.914 -1.919];
```

```
% Densidade espectral de potencia do ruido medido
```

```
ruido = [-13.73 -26.41 -33.73 -30.67 -27.63 -29.96 -34.34 -36.38 -36.63 -39.22 -41.88  
-44.03 -46.59 -54.73 -61.09 -60.98 -62.05 -67.70 -72.12 -71.39 -71.90 -72.30 -69.73  
-65.91 -64.10 -63.63 -61.15 -61.01 -63.69 -61.38 -59.86 -60.25 -62.52 -63.96 -64.88  
-65.15 -63.25 -60.41 -59.33 -61.83 -63.42 -61.90 -62.40 -64.13 -63.37 -60.01 -57.58  
-56.50 -57.75 -60.08 -60.50 -61.97 -60.72 -59.22 -58.34 -59.05 -61.12 -59.73 -58.99  
-59.16 -58.90 -59.12 -59.43 -62.63 -65.83 -67.90 -68.22 -68.24 -67.34 -66.33 -66.75  
-67.03 -68.58 -69.86 -71.25 -72.15 -72.30 -72.54 -73.44 -73.16 -73.65 -73.33 -74.31  
-74.98 -75.00 -74.78 -75.36 -76.23 -77.95 -78.72 -79.29 -80.26 -79.88 -80.70 -82.04  
-82.67 -82.93 -82.92 -81.96 -81.08 -76.99 -76.93 -77.31 -78.01 -77.33 -76.69 -75.26  
-75.46 -74.96 -75.50 -78.35 -78.71 -78.00 -76.86 -75.67 -74.85 -75.03 -74.28 -74.70  
-75.88 -76.76 -77.08 -77.28 -77.67 -78.99 -80.24 -80.19 -80.51 -80.61 -80.08 -79.74  
-79.06 -79.00 -79.87 -80.78 -82.31 -84.01 -85.20 -86.75 -86.48 -86.47 -86.83 -87.00  
-87.31 -87.10 -86.95 -85.99 -86.40 -86.17 -85.64 -86.41 -87.07 -87.60 -88.25 -88.62  
-89.17 -89.07 -88.85 -88.99 -89.55 -89.01 -89.28 -89.36 -89.08 -89.25 -88.86 -88.58  
-88.33 -87.87 -87.22 -87.28 -86.72 -86.94 -87.22 -86.92 -87.28 -87.55 -87.50 -88.05  
-87.97];
```

```
% Correcao dos valores medidos excluindo-se as caracteristicas do conjunto
```

```
% de acoplamento
```

```
ruidocor = ruido-magrespckt;
```

```
freq=0.3:0.3:54;
```

```
plot(freq,ruidocor,'LineWidth',2,'Color','k')
```

```
grid on
```

```
xlabel('Frequencia [MHz]')
```

```
ylabel('Densidade Espectral de Potencia [dBm/Hz]')
```

# Anexo F

## Geração da Figura 3.29

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
% Programa para simulacao do comportamento ruidoso medido no laboratorio %  
% de TV-digital %  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
clear all;  
close all;
```

```
% Resposta em frequencia medida do conjunto de acoplamento  
magrespckt = [-0.560 -0.521 -0.561 -0.523 -0.524 -0.525 -0.526 -0.565 -0.527 -0.528  
-0.529 -0.568 -0.572 -0.575 -0.579 -0.583 -0.586 -0.590 -0.591 -0.595 -0.598 -0.602  
-0.606 -0.610 -0.614 -0.618 -0.622 -0.625 -0.604 -0.609 -0.613 -0.618 -0.623 -0.628  
-0.633 -0.638 -0.643 -0.647 -0.656 -0.660 -0.666 -0.670 -0.674 -0.678 -0.683 -0.687  
-0.691 -0.701 -0.719 -0.737 -0.755 -0.773 -0.791 -0.809 -0.827 -0.845 -0.863 -0.881  
-0.894 -0.912 -0.931 -0.949 -0.967 -0.985 -1.004 -1.022 -1.040 -1.058 -1.076 -1.094  
-1.112 -1.131 -1.149 -1.167 -1.185 -1.203 -1.221 -1.239 -1.256 -1.274 -1.293 -1.311  
-1.329 -1.347 -1.366 -1.373 -1.366 -1.357 -1.344 -1.335 -1.326 -1.316 -1.307 -1.298  
-1.287 -1.277 -1.268 -1.259 -1.221 -1.209 -1.198 -1.186 -1.175 -1.163 -1.152 -1.140  
-1.129 -1.117 -1.117];
```

```
% Densidade espectral de potencia do ruido medido  
ruido = [-13.69 -17.30 -25.15 -30.55 -36.33 -42.26 -48.69 -54.77 -61.84 -68.61 -74.42  
-78.91 -81.34 -80.32 -78.45 -81.44 -84.08 -84.41 -83.75 -84.70 -86.38 -85.64 -83.68  
-79.69 -77.20 -75.66 -78.57 -79.03 -77.30 -78.30 -80.27 -80.90 -81.70 -83.29 -83.18  
-68.99 -80.95 -81.91 -83.14 -83.65 -82.18 -80.45 -78.62 -77.76 -76.13 -73.48 -73.29  
-73.19 -74.29 -75.69 -76.33 -76.78 -76.38 -75.42 -75.80 -77.46 -77.02 -77.48 -77.86  
-78.98 -78.19 -78.30 -78.93 -79.15 -77.45 -74.81 -73.38 -70.90 -69.40 -66.80 -66.03
```

```
-64.09 -65.45 -66.21 -66.98 -66.52 -67.05 -68.05 -75.13 -73.97 -74.98 -77.68 -78.76  
-79.49 -81.98 -83.58 -82.54 -82.08 -83.18 -82.69 -82.80 -83.73 -84.49 -85.50 -85.86  
-86.09 -86.12 -87.13 -87.34 -87.23 -88.01 -88.18 -87.92 -88.24 -88.02 -87.91 -87.48  
-87.76 -87.66];
```

```
% Correcao dos valores medidos excluindo-se as caracteristicas do conjunto  
% de acoplamento  
ruidocor = ruido-magrespckt;  
tempo(1:11)=0.3:0.1:1.3;  
tempo(12:109)=1.5:0.5:50;  
figure  
plot(tempo,ruidocor,'LineWidth',2,'Color','k')  
grid on  
xlabel('Frequencia [MHz]')  
ylabel('Densidade Espectral de Potencia [dBm/Hz]')
```

# Anexo G

## Geração das Figuras 3.12, 3.13, 3.14, 3.15, 3.16, 3.31 e 3.34

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
% Programa para simulacao das grandezas estatisticas do canal formado pelas %  
%tomadas 1 e 2 %  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
  
clear all;  
close all;  
  
% Numero de amostras da resposta  
npoints = 230;  
  
% Frequencia minima medida pelo VNA em [MHz]  
fmin = 0.3;  
  
% Espacamento em frequencia das amostras medidas pelo VNA em [MHz]  
fres = 0.3;  
  
% Frequencia maxima do espectro em analise em [MHz]  
fmax = 69;  
  
% Valores lineares de amplitude da resposta do canal  
limagespkt = [0.032050676 0.068083783 0.082376653 0.054410742 0.065740972  
0.096328268 0.15896852 0.170567944 0.089204728 0.070963741 0.081988278  
0.139881293 0.150302196 0.079136659 0.034703297 0.003044528 0.007522746  
0.009353752 0.006923341 0.008243443 0.010575974 0.005895066 0.02715304
```

0.087776431 0.128862972 0.158116172 0.126151768 0.091982272 0.054538696  
 0.062783179 0.085831229 0.103446815 0.110141495 0.102190702 0.096209568  
 0.087601872 0.038324788 0.025779848 0.0185835 0.014105252 0.007664771  
 0.004520741 0.006523738 0.014675349 0.025026995 0.034782916 0.036649816  
 0.027779923 0.00689168 0.034326837 0.074780233 0.106694969 0.117595784  
 0.106391198 0.10082167 0.094487208 0.078301353 0.058199042 0.034158785  
 0.01974496 0.01036861 0.018470635 0.029110787 0.042146104 0.048844717  
 0.05316248 0.051923614 0.045547979 0.034669965 0.038313414 0.048104852  
 0.068805011 0.080344109 0.084338962 0.077738516 0.068374246 0.054184077  
 0.054772008 0.067009331 0.0880551959 0.10609288 0.109429949 0.105720232  
 0.096738317 0.073068496 0.04717317 0.018624233 0.015078766 0.028512269  
 0.039582231 0.050734939 0.061333904 0.064585473 0.063091306 0.069651868  
 0.076413441 0.082390501 0.077126799 0.064842111 0.053039184 0.044292193  
 0.043301467 0.04312625 0.043416422 0.044156207 0.044326403 0.043251392  
 0.043984594 0.045669401 0.057446553 0.065631051 0.066302394 0.058965622  
 0.047560251 0.043258975 0.037317764 0.028288692 0.019360252 0.010607691  
 0.008914006 0.006702183 0.00718709 0.005799109 0.003701803 0.004300369  
 0.004846432 0.005308623 0.00475151 0.003813003 0.003431206 0.003651502  
 0.004241145 0.005404432 0.006785929 0.007972399 0.008409423 0.007724115  
 0.006512656 0.00526471 0.005649831 0.007519273 0.011127409 0.015569006  
 0.019906176 0.020931966 0.020353681 0.017672263 0.016760271 0.016687543  
 0.019178095 0.021643438 0.02303812 0.025402591 0.028361826 0.033538808  
 0.03798718 0.041577259 0.039454669 0.036002893 0.032916179 0.02979353  
 0.027528087 0.023795004 0.018973475 0.010057761 0.006124268 0.007299034  
 0.01285931 0.019370326 0.026136069 0.029746876 0.032221485 0.03279892  
 0.032942081 0.032668417 0.034745338 0.03896042 0.048007954 0.057680226  
 0.066709636 0.077070268 0.080290923 0.079828193 0.077554679 0.070574757  
 0.063614176 0.056744919 0.048222134 0.038950225 0.027644821 0.01918828  
 0.012352612 0.013012172 0.014686591 0.017165272 0.018827472 0.019911554  
 0.020082322 0.020238449 0.020559292 0.019236929 0.017290593 0.014396208  
 0.012681475 0.014273584 0.01768274 0.022282166 0.027237873 0.033041243  
 0.040832918 0.04618921 0.049952672 0.051750063 0.053459351 0.05511004  
 0.054128853 0.051685666 0.043028907 0.034290707 0.025655476 0.020287483  
 0.017331722 0.013950096 0.010918981 0.008561305 0.007421174 0.00685566  
 0.005713455 0.004520168 0.003237162];

% Valores em escala logaritmica de amplitude da resposta do canal  
 magrespckt = 20\*log10(lmagrespckt);

% Fase da resposta do canal



faserespckt = [-140.47 -26.03 153.56 100.54 119.72 174.81 -38.56 -9.56 164.15 -  
 142.46 11.94 -27.6 -69.31 -114.78 -119.26 -105.98 -76.87 -46.49 -14.06 12.81 46.7  
 163.82 176.95 33.02 105.31 -118.57 -148.94 -171.5 176.99 178.28 179.83 143.33  
 113.12 91.31 53.6 13.28 -19.12 -31.91 -42.63 -48.95 -62.19 -85.24 -134.73 144.54  
 -94.63 49.36 12.05 12.09 53.72 52.08 33.46 -14.06 -54.72 -88.17 -113.29 -102.89  
 78.29 158.81 140.02 154.15 174.95 -160.35 -158.18 -176.97 162.06 140.38 117.27  
 -13.6 121.24 98.1 99.56 80.97 177.34 8.39 10.27 -9.24 -19.12 -20.39 -15 -37.14 -  
 62.91 -90.87 -118.57 -146.07 19.25 160.29 179.16 71.09 -123.97 51.15 193.8 172.35  
 152.4 133.42 119.22 102.16 77.22 51.71 25.87 15.26 5.91 -2.01 -12.69 -24.93 -38.92  
 -52.89 -66.7 -79.11 -90.77 -110.23 -135.28 -171.18 158.65 132.75 -41.04 64.17 15.61  
 -42.37 -100.02 56.03 134.3 81.08 7.82 -65.63 83.92 163.85 127.72 106.9 92.87 90.56  
 97.17 98.71 90.79 78.7 57.65 38.28 21.35 -147.45 10.31 21.59 117.76 -28.97 6.2  
 -15.8 -41.82 -63.74 -80.33 -87.59 -92.54 -100.91 -111.47 -124.19 -135.96 -147.94  
 -163.05 -81.65 110.79 130.93 109.68 93.28 76.7 59.28 37.43 14.86 -6.21 16.83 84.85  
 87.46 74.9 52.4 29.25 8.67 -8.42 -23.9 -34.98 -45 -54.05 -68.5 -85.55 -109.47 -132.17  
 -157.34 177.07 -161.17 31.98 105.54 83.17 59.83 37.38 18.3 11.31 14.13 23.22 27.68  
 16.04 3.45 -9.81 -23.15 -36.75 -51.08 63.51 -94.74 -85.04 -85.46 -79.34 -82.31 -90.96  
 50.52 -116.78 -134.68 -155.46 -177.9 161.97 141.27 119.07 -125.29 66.21 44.92 23.79  
 10.64 -0.5 -10.38 -20.14 -27.64 -30.72 -32.31 -33.31 -44.13 -42.13 -16.48];

% Atraso em grupo da resposta do canal

delayrespckt = [555.622 580.872 492.463 181.772 118.705 174.741 282.035 324.606  
 248.721 342.487 525.1 490.968 464.694 451.896 211.079 -114.734 -235.69 -260.927 -  
 132.183 112.098 -521.495 -691.519 -592.037 -85.478 260.216 518.535 408.446 357.536  
 391.044 275.565 110.103 79.450 148.819 351.679 423.212 448.888 358.443 291.882  
 255.312 280.771 0.732476 495.577 536.915 558.673 558.652 490.161 18.569 -184.88  
 -89.971 285.377 412.418 452.776 432.971 350.128 338.624 344.722 364.199 295.876  
 195.456 11.717 -108.430 31.684 157.104 301.454 316.789 307.575 286.042 200.245  
 58.217 59.646 182.357 321.663 370.036 343.507 290.678 231.574 162.43 166.597  
 227.589 321.566 380.112 358.135 329.510 296.04 196.997 164.2 160.691 188.338  
 237.339 219.048 158.533 79.231 81.027 135.037 234.778 315.951 344.074 335.114  
 303.746 204.223 168.375 192.257 218.217 245.354 242.559 231.472 222.411 220.974  
 223.581 545.399 505.719 494.106 486.084 479.170 453.308 570.941 765.036 685.699  
 488.019 221.137 223.414 330.483 217.019 42.654 294.026 434.098 403.7 477.381  
 692.589 284.821 -597.872 60.368 -1.794 35.338 210.522 294.63 255.52 261.609  
 275.906 238.905 218.986 168.714 92.004 227.124 275.118 278.057 227.03 249.12  
 285.751 292.668 304.198 306.198 307.556 303.415 288.405 315.11 419.646 561.297  
 686.242 683.264 533.739 456.529 365.896 282.134 242.457 207.555 177.15 169.272  
 271.419 253.734];

```

freq=fmin:fres:fmax;
plot(freq,magrespckt,'LineWidth',2,'Color','k')
grid on
xlabel('Frequencia (MHz)')
ylabel('Magnitude da Resposta em Frequencia (dB)')
figure
plot(freq,faserespckt,'LineWidth',2,'Color','k')
grid on
xlabel('Frequencia (MHz)')
ylabel('Fase da Resposta em Frequencia (°)')
figure
plot(freq,delayrespckt,'LineWidth',2,'Color','k')
grid on
xlabel('Frequencia (MHz)')
ylabel('Atraso de Grupo (ns)')

% Obtencao da resposta impulsiva do canal a partir dos dados coletados
tmax=((2*npoints)-1)/(2*fmax);
tmin=1/(2*fmax);
tmp=0:tmin:tmax;
for t=1:(2*npoints)
if(t_j=npoints)
newm(t)=lmagrespckt(t);
newf(t)=faserespckt(t)*pi/180;
else
newm(t+1)= lmagrespckt(((2*npoints)+1)-t) ;
newf(t+1)=-faserespckt(((2*npoints)+1)-t)*pi/180;
end;
end
newm(npoints+1)=0;
newf(npoints+1)=0;
for p=1:(2*npoints)
comp(p)=newm(p)*exp(j*newf(p));
end;
temp=ifft(comp);
for p=1:(2*npoints)
magri(p)= sqrt((real(temp(p)))^2 + (imag(temp(p)))^2);
faseri(p)= atan(imag(temp(p))/real(temp(p)));
end;
figure

```

---

```

plot(tmp,magri,'LineWidth',2,'Color','k')
grid on
xlabel('Tempo (us)')
ylabel('Magnitude da Resposta Impulsiva (V)')
figure
plot(tmp,(faseri*180/pi),'LineWidth',2,'Color','k')
grid on
xlabel('Tempo (us)')
ylabel('Fase da Resposta Impusiva ( $^{\circ}$ )')
for i=1:npoints
rtf(i) = lmagrespckt(i)*(cos(faserespckt(i)*pi/180));
itf(i) = (lmagrespckt(i))*(j*sin(faserespckt(i)*pi/180));
tf(i) = rtf(i) + itf(i);
end
% Calculo da funcao de correlacao
deltaf=0:fres:(fmax-fres);
r=zeros(1,npoints);
for p=1:npoints
for i=1:(npoints-p+1)
r(p)=r(p)+((rtf(i)+itf(i))*(rtf(i+p-1)-itf(i+p-1)));
end;
r(p)=r(p)/(npoints-p+1);
end;
plot(deltaf,(real(r/r(1))),'LineWidth',2,'Color','k')
grid on
xlabel('Separacao em frequencia (MHz)')
ylabel('Funcao de auto-correlacao')

% Calculo dos atrasos
pdp=abs(temp);
pdplog=20*log10(pdp);
figure
plot(tmp,pdplog,'LineWidth',2,'Color','k')
grid on
xlabel('Tempo (us)')
ylabel('Perfil de potencia de retardo (dB)')
numerador = 0;
denominador = 0;
for p=1:(2*npoints)
numerador = numerador + ((tmp(p)/1000000)*pdp);

```

```
denominador = denominador + pdp;  
end;  
atrasomedio=numerador/denominador;  
numerador = 0;  
denominador = 0;  
for p=1:(2*npoints)  
numerador = numerador + (((tmp(p)/1000000) - atrasomedio)2) * pdp);  
denominador = denominador + pdp;  
end;  
atrasorms=sqrt(numerador/denominador);
```

# Anexo H

## Geração das Figuras 3.17, 3.18, 3.19, 3.20, 3.21, 3.32 e 3.35

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
% Programa para simulacao das grandezas estatisticas do canal formado pelas %  
% tomadas 1 e 3 %  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
  
clear all;  
close all;  
  
% Numero de amostras da resposta  
npoints = 180;  
  
% Frequencia minima medida pelo VNA em [MHz]  
fmin = 0.3;  
  
% Espacamento em frequencia das amostras medidas pelo VNA em [MHz]  
fres = 0.3;  
  
% Frequencia maxima do espectro em analise em [MHz]  
fmax = 54;  
  
% Valores lineares de amplitude da resposta do canal  
lmagrespckt = [0.039168597 0.034567065 0.029410493 0.023128834 0.044252424  
0.079269119 0.165222906 0.180269104 0.066162606 0.070375763 0.11564222  
0.111427584 0.086146773 0.024758204 0.006480113 0.006056797 0.004801871  
0.003228847 0.001148327 0.014404321 0.032769697 0.027186896 0.022075107
```

0.01767503 0.047812095 0.087360091 0.088151747 0.068854318 0.02068278  
0.009896507 0.013035731 0.032217442 0.041938523 0.038967103 0.043279209  
0.047648968 0.033540077 0.039406438 0.070393718 0.098177355 0.119232205  
0.099532849 0.079202021 0.058126533 0.062610329 0.07716671 0.113916391  
0.135144382 0.138945079 0.143923662 0.150024589 0.160197167 0.160025463  
0.148974238 0.158502939 0.161344526 0.108303691 0.067906366 0.039960228  
0.035286083 0.034989159 0.034120292 0.036563723 0.042137391 0.031913232  
0.022625161 0.028496582 0.037152096 0.048238664 0.053885873 0.057912661  
0.05637996 0.057550193 0.060956438 0.075268055 0.091553613 0.10971428  
0.126160473 0.141344703 0.14190159 0.134914522 0.108855274 0.082362074  
0.05546552 0.052515132 0.051160823 0.048055778 0.038624623 0.024919901  
0.023724733 0.03066846 0.058694224 0.07307282 0.078687822 0.062584688  
0.052479272 0.054584236 0.042828492 0.028968756 0.019089854 0.013803933  
0.018685044 0.02479201 0.031582906 0.034682073 0.037308173 0.039111778  
0.037886154 0.035066504 0.028457683 0.024749992 0.026281675 0.026762629  
0.026747021 0.03101997 0.034584223 0.036711286 0.035373054 0.03265858  
0.041756948 0.052869316 0.067089897 0.080255684 0.092278862 0.086130126  
0.075638477 0.057894652 0.041274619 0.02553022 0.018794793 0.012785464  
0.008837719 0.006006438 0.003641639 0.002265759 0.001211218 0.000644588  
0.0009668 0.001629701 0.002666212 0.003480402 0.005390728 0.006900475  
0.008143018 0.008118695 0.008071816 0.007997385 0.007590348 0.00717104  
0.007485058 0.006968519 0.006869839 0.006828774 0.006753661 0.006319445  
0.005736998 0.004982539 0.005453952 0.003302781 0.002804669 0.002294287  
0.0023168 0.002675892 0.003144001 0.003789998 0.004323488 0.004742996  
0.005409835 0.006123365 0.006801668 0.007062149 0.007094609 0.006289689  
0.005229966 0.003714776 0.003558159 0.004635876 0.008720311 0.013362985  
0.018219935];

% Valores em escala logaritmica de amplitude da resposta do canal

magrespckt = 20\*log10(lmagrespckt);

% Fase da resposta do canal

faserespckt = [-146.18 -117.74 45.94 114.09 -137.88 -13.58 -71.08 -112.41 -124.15  
-155.83 171.4 -37.61 55.6 49.73 64.59 87.64 101.95 107.85 100.24 2.93 -112.69  
13.95 104.61 140.95 127.39 94.68 45.65 75.93 -141.25 160.84 45.89 31.41 107.47  
-55.67 163.29 -51.91 -22.89 -17.65 -42.25 -72.04 -103.81 -139.57 -159.42 -160.45  
-161.79 -165.56 175.48 -104.35 86.14 107.68 88.67 61.81 38.07 17.61 -8.81 -38.7  
-79.97 -93.79 -80.55 94.13 -96.85 -91.78 -99.35 -118.69 -143.74 -156.21 -112.68  
137.25 -107.23 -153.1 -169.93 -188 161.05 155.95 143.36 127.93 106.08 -155.06  
37.36 27.23 -3.96 -31.76 -51.28 -64.78 -69.94 -78.2 -97.77 -115.39 -131.7 -98.13

---

```
-76.87 -99.3 1.62 -178.03 132.08 27.14 117.57 93.82 70.87 77.59 85.96 97.24 -48.7
76.29 47.19 90.72 -78.54 -36.29 -72.81 -99.97 -130.69 -167.72 154.23 117.15 -59.12
49.5 15.57 -6.23 -22.48 -41.79 -62.99 -87.02 30.65 -158.48 161.74 122.52 84.18 54.31
28.15 8.01 -11.91 -32.48 105.31 -73.11 -105.09 -133.63 -157.11 10.94 -219.9 126.23
103.99 78.59 -144.85 22.8 -1.4 -23.84 -43.98 -60.06 -75.07 -91.2 -106.36 -121.34
-137.12 -153.35 -171.14 -87.46 112.95 2.31 137.56 135.99 140.69 146.97 147.78
146.07 137.34 128.74 120.26 109.19 97.04 82.21 67.73 48.22 -150.29 23.23 28.57
43.21 66.28 -114.21 43.44 16.44 ];
```

% Atraso em grupo da resposta do canal

```
delayrespckt = [-628.982 -187.525 114.022 141.95 127.186 123.331 326.571 444.62
356.744 439.871 437.250 406.658 293.337 49.284 -66.819 -133.854 -313.097 -366.86
-218.765 175.057 40.151 271.515 329.281 124.833 242.105 431.114 90.190 -86.551
-4.751 368.263 731.868 378.196 452.484 64.525 -204.312 -381.09 -82.199 171.061
367.023 419.515 409.013 341.026 234.657 82.927 97.338 213.816 284.459 333.341
298.686 305.356 310.794 305.326 295.503 281.117 339.320 388.284 313.470 231.562
142.653 98.882 106.197 130.728 196.03 299.219 160.482 16.717 19.298 115.34
293.159 285.164 59.017 56.01 58.057 64.269 78.918 96.521 120.582 139.21 167.488
156.894 388.903 344.206 252.835 127.434 129.038 167.241 278.634 273.769 189.222
120.826 142.008 224.627 244.99 225.27 238.554 274.619 363.171 301.028 -123.588
-60.447 184.272 454.508 424.309 223.89 290.191 347.241 370.319 389.861 538.263
487.514 440.352 319.823 239.448 179.91 255.864 320.068 361.962 375.296 375.328
372.379 340.352 319.823 239.448 179.91 155.864 120.068 61.962 75.296 175.328
172.379 140.352 119.823 39.448 -79.91 5.864 20.068 61.962 75.296 175.328 72.379
40.352 19.823 39.448 79.91 155.864 220.068 261.962 275.296 275.328 372.379
340.352 319.823 339.448 279.91 255.864 320.068 361.962 375.296 275.328 272.379
140.352 119.823 139.448 179.91 255.864 220.068 261.962 325.296 175.328 272.379
340.352 319.823 239.448 179.91 255.864 320.068 361.962 375.296 375.328 372.379];
```

```
freq=fmin:fres:fmax;
```

```
plot(freq,magrespckt,'LineWidth',2,'Color','k')
```

```
grid on
```

```
xlabel('Frequencia (MHz)')
```

```
ylabel('Magnitude da Resposta em Frequencia (dB)')
```

```
figure
```

```
plot(freq,faserespckt,'LineWidth',2,'Color','k')
```

```
grid on
```

```
xlabel('Frequencia (MHz)')
```

```
ylabel('Fase da Resposta em Frequencia (°)')
```

```
figure
```

```

plot(freq,delayrespckt,'LineWidth',2,'Color','k')
grid on
xlabel('Frequencia (MHz)')
ylabel('Atraso de Grupo (ns)')

% Obtencao da resposta impulsiva do canal a partir dos dados coletados
tmax=((2*npoints)-1)/(2*fmax);
tmin=1/(2*fmax);
tmp=0:tmin:tmax;
for t=1:(2*npoints)
if(tj=npoints)
newm(t)=lmagrespckt(t);
newf(t)=faserespckt(t)*pi/180;
else
newm(t+1)= lmagrespckt(((2*npoints)+1)-t) ;
newf(t+1)=-(faserespckt(((2*npoints)+1)-t)*pi/180);
end;
end
newm(npoints+1)=0;
newf(npoints+1)=0;
for p=1:(2*npoints)
comp(p)=newm(p)*exp(j*newf(p));
end;
temp=ifft(comp);
for p=1:(2*npoints)
magri(p)= sqrt((real(temp(p)))2 + (imag(temp(p)))2);
faseri(p)= atan(imag(temp(p))/real(temp(p)));
end;
figure
plot(tmp,magri,'LineWidth',2,'Color','k')
grid on
xlabel('Tempo (us)')
ylabel('Magnitudo da Resposta Impulsiva (V)')
figure
plot(tmp,(faseri*180/pi),'LineWidth',2,'Color','k')
grid on
xlabel('Tempo (us)')
ylabel('Fase da Resposta Impusiva (°)')
for i=1:npoints
rtf(i) = lmagrespckt(i))*(cos(faserespckt(i)*pi/180));

```



---

```

itf(i) = (Imagrespckt(i))*(j*sin(faserespckt(i)*pi/180));
tf(i) = rtf(i) + itf(i);
end

% Calculo da funcao de correlacao
deltaf=0:fres:(fmax-fres);
r=zeros(1,npoints);
for p=1:npoints
for i=1:(npoints-p+1)
r(p)=r(p)+((rtf(i)+itf(i))*(rtf(i+p-1)-itf(i+p-1)));
end;
r(p)=r(p)/(npoints-p+1);
end;
plot(deltaf,(real(r/r(1))), 'LineWidth',2, 'Color', 'k')
grid on
xlabel('Separacao em frequencia (MHz)')
ylabel('Funcao de auto-correlacao')

% Calculo dos atrasos
pdp=abs(temp);
pdplog=20*log10(pdp);
figure
plot(tmp,pdplog, 'LineWidth',2, 'Color', 'k')
grid on
xlabel('Tempo (us)')
ylabel('Perfil de potencia de retardo (dB)')
numerador = 0;
denominador = 0;
for p=1:(2*npoints)
numerador = numerador + ((tmp(p)/1000000)*pdp);
denominador = denominador + pdp;
end;
atrasomedio=numerador/denominador;
numerador = 0;
denominador = 0;
for p=1:(2*npoints)
numerador = numerador + (((tmp(p)/1000000) - atrasomedio)^2) * pdp;
denominador = denominador + pdp;
end;
atrasorms=sqrt(numerador/denominador);

```

# Anexo I

## Geração das Figuras 3.22, 3.23, 3.24, 3.25, 3.26, 3.33 e 3.36

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Programa para simulacao das grandezas estatisticas do canal formado pelas %
% tomadas 1 e 4 %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

clear all;
close all;

% Numero de amostras da resposta
npoints = 180;

% Frequencia minima medida pelo VNA em [MHz]
fmin = 0.3;

% Espacamento em frequencia das amostras medidas pelo VNA em [MHz]
fres = 0.3;

% Frequencia maxima do espectro em analise em [MHz]
fmax = 54;

% Valores lineares de amplitude da resposta do canal
Imagrespckt = [0.005825 0.012217 0.010658 0.006656 0.024410 0.040878 0.018634
0.002820 0.008504 0.021643 0.004280 0.001948 0.003327 0.001374 0.002710 0.004349
0.002778 0.007044 0.001849 0.002772 0.002677 0.003871 0.005473 0.013120 0.012747
0.009785 0.011016 0.004181 0.010664 0.009585 0.004869 0.007732 0.004493 0.005184
```

0.007273 0.006752 0.005783 0.004688 0.009325 0.006842 0.003111 0.004898 0.005956  
0.004221 0.004287 0.010528 0.015795 0.021157 0.015071 0.013801 0.006553 0.004414  
0.008906 0.009194 0.004103 0.004351 0.003320 0.004386 0.007034 0.007602 0.007385  
0.006100 0.004847 0.006567 0.007375 0.005090 0.004674 0.007876 0.007963 0.005131  
0.002902 0.005459 0.005177 0.007280 0.007459 0.008174 0.011522 0.008527 0.004236  
0.005322 0.005277 0.005256 0.004199 0.004661 0.006414 0.004797 0.001940 0.003144  
0.005322 0.006540 0.006609 0.008283 0.006994 0.002298 0.003988 0.008295 0.009016  
0.008265 0.006991 0.007854 0.005221 0.008663 0.009188 0.008687 0.009725 0.008500  
0.005355 0.002730 0.001962 0.003060 0.003750 0.005054 0.006089 0.009918 0.008743  
0.004495 0.001875 0.001158 0.001240 0.000799997 0.001417 0.001837 0.001874  
0.002203 0.004434 0.004907 0.003209 0.004432 0.003593 0.005568 0.003134 0.003352  
0.003067 0.002296 0.002575 0.001744 0.000773027 0.001326 0.001397 0.002195  
0.003626 0.006891 0.003133 0.006983 0.004226 0.003478 0.001716 0.001357 0.001292  
0.001012 0.004073 0.003460 0.003406 0.003486 0.003569 0.003517 0.001634 0.003145  
0.006333 0.007397 0.008688 0.002971 0.003133 0.002125 0.001851 0.004494 0.003810  
0.002484 0.002358 0.003298 0.007462 0.008829 0.004703 0.005337 0.007332 0.005985  
0.010561 0.013892 0.009904 0.009113];

% Valores em escala logaritmica de amplitude da resposta do canal

magrespckt = [-46.003 -42.579 -34.453 -45.919 -35.687 -33.463 -35.490 -49.660  
-41.833 -31.437 -53.685 -45.753 -47.753 -50.417 -52.464 -44.143 -50.214 -46.564  
-49.452 -57.654 -67.817 -60.914 -62.653 -43.638 -40.020 -42.621 -48.011 -41.753  
-37.220 -37.598 -61.027 -54.317 -49.417 -46.724 -44.913 -50.084 -43.090 -42.136  
-42.230 -43.386 -52.621 -50.226 -42.091 -45.152 -43.012 -42.313 -39.422 -38.404  
-43.885 -47.214 -51.071 -50.267 -48.073 -46.647 -48.355 -52.609 -45.889 -46.977  
-43.418 -49.276 -45.888 -47.559 -44.921 -47.321 -45.557 -44.987 -41.601 -40.375  
-44.903 -49.378 -46.398 -46.378 -45.805 -45.436 -42.274 -42.325 -40.810 -41.988  
-43.344 -41.934 -49.670 -45.477 -44.078 -54.379 -58.154 -50.646 -50.587 -54.151  
-48.748 -42.212 -44.230 -42.115 -41.997 -45.582 -47.879 -47.688 -43.933 -40.120  
-41.013 -42.836 -41.181 -41.374 -40.975 -40.370 -41.524 -44.874 -48.040 -53.848  
-52.117 -48.989 -43.139 -44.187 -46.738 -44.746 -44.362 -43.215 -45.079 -49.499  
-54.073 -57.928 -57.666 -61.803 -55.920 -49.509 -47.177 -46.973 -42.818 -41.603  
-45.315 -46.074 -46.565 -43.298 -42.624 -49.051 -46.393 -47.808 -49.190 -48.170  
-49.828 -48.173 -51.867 -54.559 -64.677 -52.913 -45.021 -50.321 -50.886 -44.904  
-47.678 -50.566 -47.412 -52.283 -50.902 -49.515 -50.727 -47.896 -43.202 -44.266  
-43.629 -42.997 -41.170 -43.230 -44.330 -39.688 -38.395 -45.910 -41.909 -47.400  
-45.533 -51.035 -49.201 -45.100 -43.301 -43.593 -38.605 -43.959 -37.878 -43.912  
-38.746 -40.052];

% Fase da resposta do canal

```
faserespckt = [-30.03 -25.86 -15.54 -14.67 -92.84 112.45 29.87 -52.81 86.99 -13.08
-74.33 -9.40 135.20 -55.97 64.94 160.36 70.46 -2.61 -3.90 -14.73 -37.62 -161.56 -
133.02 21.97 -61.12 127.59 33.86 108.28 25.19 -68.84 -15.09 -92.53 -85.19 74.28
-12.84 -68.87 144.90 67.27 -98.74 -12.70 -141.56 -145.79 -80.52 -138.15 -100.38
141.86 126.07 85.93 44.89 64.97 -43.45 -33.62 -37.78 -53.77 -83.05 -114.97 -84.77
42.87 -73.30 -116.92 -118.09 -61.46 96.11 0.09 -102.79 -139.10 -148.16 -63.07 127.09
99.91 56.10 159.05 147.36 117.22 80.21 46.23 7.99 -27.51 -83.45 -133.51 -59.82 85.87
30.60 22.92 100.97 105.57 67.31 33.53 38.51 17.35 -2.33 -39.28 -90.83 -116.85 -94.12
-110.25 -151.86 -154.25 -144.84 -11.56 -8.37 -1.02 121.27 94.35 57.57 39.77 2.81
-63.40 12.50 -18.29 -132.65 26.48 91.32 17.28 -1.89 -40.38 -47.14 -64.29 -122.95
-62.23 -84.34 -80.22 -62.04 -59.30 -65.75 151.18 47.15 -109.45 52.99 166.05 111.38
137.57 79.92 51.56 -10.66 59.85 -3.61 6.65 130.42 12.95 -84.09 41.42 130.80 83.68
65.13 98.53 146.74 22.89 4.02 96.11 44.00 -37.92 27.91 93.85 -101.23 -68.47 23.78
7.12 -51.08 -56.43 -97.57 -122.71 -134.94 97.73 74.92 146.06 55.84 -45.48 12.24
4.49 26.28 -4.77 -46.79 -51.86 -94.83 -54.79 -127.23 -113.45 112.18 128.33];
```

% Atraso em grupo da resposta do canal

```
delayrespckt = [712.559 243.251 -29.583 520.465 1046 938.668 478.011 -160.983
385.908 1073 1214 -1271 -686.246 582.555 -119.976 -523.403 667.194 715.951
376.395 372.601 -163.039 -424.703 -714.621 213.326 1406 1259 267.358 -240.774
270.327 1011 -256.923 -199.636 932.916 -310.716 155.741 674.261 -404.265 -706.739
124.869 -12.900 -406.577 656.100 834.741 37.485 -8.927 250.512 373.153 419.996
298.262 92.230 78.489 -33.909 89.189 104.415 180.070 578.413 1106 998 673.038
456.007 489.532 666.847 685.539 434.344 575.653 356.922 287.838 411.939 217.454
-387.269 -483.477 -260.984 273.850 285.599 377.585 325.686 422.327 450.764
453.277 471.558 604.602 926.195 518.688 -227.806 -471.340 16.625 459.935 465.595
-7.181 8.425 223.096 433.989 346.989 -27.160 -56.515 158.658 160.598 63.172
130.450 288.761 174.473 114.298 325.258 189.337 77.046 230.983 394.414 117.175 -
657.675 -479.814 84.167 -236.010 -622.755 -2.829 697.451 310.802 -221.056 -14.718
509.180 744.409 -60.450 254.300 133.041 365.582 374.903 220.244 144.101 143.211
285.385 230.867 489.722 -457.271 -212.565 982 677.017 -457.209 -467.611 -208.682
-1121 -505.083 942.691 437.280 100.847 648.791 770.631 463.783 529.816 -666.674
28.498 1057 507.589 381.931 -937.730 -976 -752.682 -1234 -1296 -885.476 -128.354
472.010 416.516 759.287 532.276 43.178 269.865 473.916 496.205 285.944 -675.644
58.055 146.861 365.275 206.605 117.796 235.674 128.733 171.358 270.967 268.956
-40.492];
```

freq=fmin:fres:fmax;

plot(freq,magrespckt,'LineWidth',2,'Color','k')

---

```

grid on
xlabel('Frequencia (MHz)')
ylabel('Magnitude da Resposta em Frequencia (dB)')
figure
plot(freq,faserespckt,'LineWidth',2,'Color','k')
grid on
xlabel('Frequencia (MHz)')
ylabel('Fase da Resposta em Frequencia ( $^{\circ}$ )')
figure
plot(freq,delayrespckt,'LineWidth',2,'Color','k')
grid on
xlabel('Frequencia (MHz)')
ylabel('Atraso de Grupo (ns)')

% Obtencao da resposta impulsiva do canal a partir dos dados coletados
tmax=((2*npoints)-1)/(2*fmax);
tmin=1/(2*fmax);
tmp=0:tmin:tmax;
for t=1:(2*npoints)
if(t_i=npoints)
newm(t)=lmagrespckt(t);
newf(t)=faserespckt(t)*pi/180;
else
newm(t+1)= lmagrespckt(((2*npoints)+1)-t) ;
newf(t+1)=-(faserespckt(((2*npoints)+1)-t)*pi/180);
end;
end
newm(npoints+1)=0;
newf(npoints+1)=0;
for p=1:(2*npoints)
comp(p)=newm(p)*exp(j*newf(p));
end;
temp=ifft(comp);
for p=1:(2*npoints)
magri(p)= sqrt((real(temp(p)))2 + (imag(temp(p)))2);
faseri(p)= atan(imag(temp(p))/real(temp(p)));
end;
figure
plot(tmp,magri,'LineWidth',2,'Color','k')
grid on

```

```

xlabel('Tempo (us)')
ylabel('Magnitudo da Resposta Impulsiva (V)')
figure
plot(tmp,(faseri*180/pi),'LineWidth',2,'Color','k')
grid on
xlabel('Tempo (us)')
ylabel('Fase da Resposta Impulsiva (º)')
for i=1:npoints
rtf(i) = lmagrespckt(i)*(cos(faserespckt(i)*pi/180));
itf(i) = (lmagrespckt(i))*(j*sin(faserespckt(i)*pi/180));
tf(i) = rtf(i) + itf(i);
end

% Calculo da funcao de correlacao
deltaf=0:fres:(fmax-fres);
r=zeros(1,npoints);
for p=1:npoints
for i=1:(npoints-p+1)
r(p)=r(p)+((rtf(i)+itf(i))*(rtf(i+p-1)-itf(i+p-1)));
end;
r(p)=r(p)/(npoints-p+1);
end;
plot(deltaf,(real(r/r(1))), 'LineWidth',2,'Color','k')
grid on
xlabel('Separacao em frequencia (MHz)')
ylabel('Funcao de auto-correlacao')
% Calculo dos atrasos
pdp=abs(tmp);
pdplog=20*log10(pdp);
figure
plot(tmp,pdplog,'LineWidth',2,'Color','k')
grid on
xlabel('Tempo (us)')
ylabel('Perfil de potencia de retardo (dB)')
numerador = 0;
denominador = 0;
for p=1:(2*npoints)
numerador = numerador + ((tmp(p)/1000000)*pdp);
denominador = denominador + pdp;
end;

```

```
atrasomedio=numerador/denominador;
numerador = 0;
denominador = 0;
for p=1:(2*npoints)
numerador = numerador + (((tmp(p)/1000000) - atrasomedio)2) * pdp);
denominador = denominador + pdp;
end;
atrasorms=sqrt(numerador/denominador);
```

# Referências Bibliográficas

- [1] GÖTZ, M.; RAPP, M.; DOSTERT, K. **Power Line Channel Characteristics and Their Effect on Communication System Design**. IEEE Communications Magazine. v. 42, p. 78-86, Abr. 2004.
- [2] VIDAL, A.M. **Estudo do Estado da Arte e Análise de Desempenho de Sistema de Comunicação PLC de Banda Larga**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2005.
- [3] ASSOCIAÇÃO DE EMPRESAS PROPRIETÁRIAS DE INFRA-ESTRUTURA E SISTEMAS PRIVADOS DE TELECOMUNICAÇÕES. **Power Line Communications - PLC**. v. 1, 2003.
- [4] PHILIPPS, H. **Modelling of Powerline Communications Channels**. International Symposium on Power Line Communications. p. 14-21, Mar. 1999.
- [5] ESMAILIAN, T.; KSCHISCHANG, F. R.; GULAK, P. G. **In-building power lines as high-speed communication channels: channel characterization and a test channel ensemble**. International Journal of Communication Systems. vol. 16, p. 381-400, Mai. 2003.
- [6] DOSTERT, K. **Powerline Communications**. Prentice Hall. 2001.
- [7] ZIMMERMANN, M. M. R. **Avaliação Tecnológica do PLC in Home**. Monografia (Engenharia de Telecomunicações). Universidade Regional de Blumenau, Blumenau, 2004.
- [8] HOMEPLUG®Powerline Alliance. **HomePlug Powerline Alliance Fact Sheet**. 2006.
- [9] ASSOCIAÇÃO DE EMPRESAS PROPRIETÁRIAS DE INFRA-ESTRUTURA E SISTEMAS PRIVADOS DE TELECOMUNICAÇÕES. **O uso da tecnologia PLC no contexto da realidade brasileira**. 2007.



- [10] AGÊNCIA NACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES. **Resolução 527**. 2009.
- [11] BIGLIERI, E. **Coding and Modulation for a Horrible Channel**. IEEE Communications Magazine. p. 92-98, Mai. 2003.
- [12] HAYKIN, S. **Sistemas de comunicação: analógicos e digitais**. Porto Alegre: Bookman. 4.ed, p. 370-531, 2004.
- [13] LIMA, G. C.; AQUINO, F. J.A.; MACHADO, R.; FILHO, B. F. U.; NETO, M. de N.; SOUZA, R. D.; MENDES, L. L. **Projeto MI-SBTVD: STC-OFDM e Estimação de Canal**. Inatel: Revista Científica Periódica - Telecomunicações, v. 09, 2006.
- [14] ZIMMERMANN, M.; DOSTERT, K. **A Multipath Model for the Powerline Channel**. IEEE Transactions on Communications. vol. 50, p. 553-559, Abr. 2002.
- [15] HRASNICA, H.; HAIDINE, A.; LEHNERT, R. **Broadband Powerline Communications - Network Design**. Londres: John Wiley and Sons. 2004.
- [16] LIU, E.; GAO, Y.; BILAL, O.; KORHONEN, T. **BroadBand Characterization of Indoor Powerline Channel**. IEEE International Conference on Communications. vol. 2, p. 901-905, Mai. 2005.
- [17] RIBEIRO, M. V. **Power Line Communications: A Promising Communication System's Paradigm for Last Miles and Last Meters Applications**. Fundação Edson Queiroz , p. 133-156, 2006.
- [18] BENYOUCEF, D. **A New Statistical Model of the Noise Power Density Spectrum for Powerline Communication**. International Symposium on Power-Line Communications and Its Applications. p. 136-141, Mar. 2003.
- [19] OPEN PLC EUROPEAN RESEARCH ALLIANCE **Theoretical Postulation of PLC Channel Model**. 2005.
- [20] UMEHARA, D.; NISHIYORI, H.; MORIHIRO Y. **Performance Evaluation of CMFB Transmultiplexer for Broadband Power Line Communications under Narrowband Interference**. International Symposium on Power Line Communications. p. 50-55, Mar. 2006.
- [21] GAO, Y. **Powerline Communications: Channel Characterization and Modem Design**. Helsinki University of Technology. Abr. 2005.

- [22] DEGARDIN, V.; LIENARD, M.; DEGAUQUE, P. **Transmission on indoor power lines: from a stochastic channel model to the optimization and performance evaluation of multicarrier systems**. International Journal of Communication Systems. vol. 16, p. 363-379, Abr. 2003.
- [23] ZIMMERMANN, M.; DOSTERT, K. **Analysis and Modeling of Impulsive Noise in Broad-Band Powerline Communications**. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. vol. 44, p. 249-258, Fev. 2002.
- [24] CHAN, M. H. L.; DONALDSON, R. W. **Amplitude, Width and Inter-arrival Distributions for Noise Impulses on Intrabuilding Power Line Communications Networks**. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. vol. 31, p. 320-323, Ago. 1989.
- [25] KATAYAMA, M.; YAMAZATO, T.; OKADA, H. **A Mathematical Model of Noise in Narrowband Power Line Communication Systems**. IEEE Journal on Selected Areas in Communications. vol. 24, p. 1267-1276, Jul. 2006.
- [26] LEON-GARCIA, A. **Probability and Random Processes for Electrical Engineering**. USA: Addison-Wesley Publishing Company. 2.ed, 1994.
- [27] BILAL, O.; GAO, Y.; KORHONEN, T. O. **Design of Broadband Coupling Circuits for Power-Line Communications**. International Symposium on Power Line Communications. 2004.
- [28] BINKOFSKI, J. **Influence of the properties of magnetic materials**. International Symposium on Power Line Communications. p. 281-284, Abr. 2005.
- [29] BERNARDO, B.; SIMÕES, R.; TEODORO, S.; ESTEVES, M. A. M.; GIL, J. M. **Channel Measurements for Power Line Communications in Buildings**. Conference on Telecommunications. Mai. 2007.
- [30] HRANAC, R. **Group Delay**. Manual. Cisco Systems. 2005.
- [31] GOMES, G. G. R. **Técnicas de Medição em Sistemas Rádio**. Notas de aula. Inatel, 2 ed., 1996.
- [32] TLICH, M.; AVRIL, G.; ZEDDAM, A. **Coherence Bandwidth and its Relationship with the RMS delay spread for PLC channels using Measurements up to 100 MHz**. International Federation for Information Processing Publications. p. 129-142, 2008.

- [33] GLAZUNOV, A. A.; ASPLUND, H.; BERG, J.-E. **Statistical analysis of measured short-term impulse response functions of 1.88 GHz radio channels in Stockholm with corresponding channel model.** IEEE Vehicular Technology Conference. vol. 1, p. 107-111, Set. 1999.
- [34] GENTLE, J. E. **Random Number Generation and Monte Carlo Methods.** 2.ed. USA: Springer, 2003.
- [35] NARSKY, I. **Goodness of Fit: What Do We Really Want to Know ?.** Stanford Linear Accelerator Center. Set. 2003.
- [36] FERREIRA, M. A. M. **Métodos para geração de entidades, em modelos de simulação, para processos estocásticos de renovação não estacionários.** Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.
- [37] JUSTEL, A.; PEÑA, D.; ZAMAR, R. **A multivariate Kolmogorov-Smirnov test of goodness of fit.** Statistics and Probability Letters. vol. 35, p. 251-259, Out. 1997.
- [38] BARCELÓ, F.; JORDÁN, J. **Channel Holding Time Distribution in Public Cellular Telephony.** International Thyroid Congress. vol. 3a, p. 107-116, Jun. 1999
- [39] GOMES, M. I. **Testes de Ajustamento.** Notas de aula. Universidade de Lisboa, 2009.