

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA  
ELÉTRICA

MODELAGEM *CROSS-LAYER* DA QUALIDADE DE  
EXPERIÊNCIA PARA TRANSMISSÕES DE VÍDEO EM  
SISTEMAS SEM FIO OFDM

BRUNO SOUZA LYRA CASTRO

TD 01/2014

UFPA / ITEC / PPGEE  
Campus Universitário do Guamá  
Belém-Pará-Brasil  
2014



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

BRUNO SOUZA LYRA CASTRO

MODELAGEM *CROSS-LAYER* DA QUALIDADE DE  
EXPERIÊNCIA PARA TRANSMISSÕES DE VÍDEO EM  
SISTEMAS SEM FIO OFDM

TD 01/2014

UFPA / ITEC / PPGEE  
Campus Universitário do Guamá  
Belém-Pará-Brasil  
2014

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

BRUNO SOUZA LYRA CASTRO

MODELAGEM *CROSS-LAYER* DA QUALIDADE DE  
EXPERIÊNCIA PARA TRANSMISSÕES DE VÍDEO EM  
SISTEMAS SEM FIO OFDM

Tese submetida à Banca  
Examinadora do programa de Pós-  
graduação em Engenharia Elétrica  
da UFPA para obtenção do Grau  
de Doutor em Engenharia Elétrica  
na área de Telecomunicações.

UFPA / ITEC / PPGEE  
BELÉM - PARÁ  
2014

SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

MODELAGEM *CROSS-LAYER* DA QUALIDADE DE  
EXPERIÊNCIA PARA TRANSMISSÕES DE VÍDEO EM  
SISTEMAS SEM FIO OFDM

AUTOR: BRUNO SOUZA LYRA CASTRO

TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA À AVALIAÇÃO DA BANCA EXAMINADORA  
APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA ELÉTRICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ.

BANCA EXAMINADORA:

---

Prof. Dr. Gervásio Protásio dos Santos Cavalcante - UFPA  
Orientador

---

Prof. Dr. Jasmine Priscyla Leite de Araújo - UFPA  
Membro

---

Prof. Dr. João Crisóstomo Weyl Albuquerque Costa - UFPA  
Membro

---

Prof. Dr. Adaildo Gomes d'Assunção - UFRN  
Membro Externo

---

Prof. Dr. Gláucio Lima Siqueira – PUC-Rio  
Membro Externo

Visto:

---

Prof. Dr. Evaldo Goncalves Pelaes

A todos que tornaram possível a realização deste trabalho

## AGRADECIMENTOS

Ao Professor Dr. Gervásio Protásio dos Santos Cavalcante, pela dedicação e paciência com que me orientou na elaboração desta dissertação;

A toda a minha família pelos ensinamentos e por todo apoio e suporte prestado durante toda a minha vida de estudos;

A Viviane Ferraz Viegas pelo companheirismo imensurável, tanto nas alegrias quanto nos momentos de fraqueza, ajudando a manter meu foco na busca por meus objetivos;

Ao meu parceiro de doutorado Igor Ruiz Gomes que com sua amizade sempre me apoiou colaborando diretamente para a realização deste trabalho;

A Professora Josiane do Couto Rodrigues pelo apoio e ensinamento prestados durante a minha graduação e pós-graduação;

Ao Laboratório de Computação e Telecomunicações (LCT) e seus integrantes, pela excelente infraestrutura e ajuda prestada, tornando possível este trabalho;

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE) que com seus ensinamentos contribuíram para a realização deste trabalho;

Ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Comunicações Sem Fio (INCT-CSF) pelo suporte prestado na defesa do meu artigo, contribuindo para a concretização deste trabalho;

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro em forma de bolsa;

A Universidade Federal do Pará, pela oportunidade dada a mim para a realização desta dissertação.



## LISTA DE ACRÔNIMOS

|       |   |
|-------|---|
| ARF   | <i>Automatic Rate Fallback</i>                      |
| AVC   | <i>Advanced video Coding</i>                        |
| BCH   | <i>Bose, Ray-Chaudhuri and Hocquenghem</i>          |
| BER   | <i>Bit Error Ratio</i>                              |
| BPSK  | <i>Binary Phase Shift Keying</i>                    |
| DCF   | <i>Distributed Coordination Function</i>            |
| DSL   | <i>Digital Subscriber Line</i>                      |
| DVB-T | <i>Digital Vídeo Broadcasting - Terrestrial</i>     |
| FCT   | <i>Faculdade de Computação e Telecomunicações</i>   |
| FDM   | <i>Frequency Division Multiplexing</i>              |
| FEC   | <i>Forward Error Correction</i>                     |
| FFT   | <i>Fast Fourier Transform</i>                       |
| GPS   | <i>Global Positioning System</i>                    |
| IFFT  | <i>Inverse Fast Fourier Transform</i>               |
| IP    | <i>Internet Protocol</i>                            |
| LCT   | <i>Laboratório de Computação e Telecomunicações</i> |
| MAN   | <i>Metropolitan Area Network</i>                    |
| MER   | <i>Modulation Error Ratio</i>                       |
| MPEG  | <i>Moving Picture Experts Group</i>                 |
| MER   | <i>Modulation Error Ratio</i>                       |
| MIMO  | <i>Multiple Input Multiple Output</i>               |
| MSE   | <i>Mean Square Error</i>                            |
| OFDM  | <i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>   |
| PSNR  | <i>Peak Signal-Noise Ratio</i>                      |
| QAM   | <i>Quadrature Amplitude Modulation</i>              |
| QoS   | <i>Quality of Service</i>                           |
| QPSK  | <i>Quadrature Phase Shift Keying</i>                |
| RS    | <i>Reed Solomon</i>                                 |
| SNMP  | <i>Simple Network Management Protocol</i>           |
| SNR   | <i>Signal-to-Noise Ratio</i>                        |
| TCP   | <i>Transmission Control Protocol</i>                |
| VQM   | <i>Video Quality Metrics</i>                        |
| WiMAX | <i>World Interoperability for Microwave Access</i>  |
| WiFi  | <i>Wireless Fidelity</i>                            |
| WLAN  | <i>Wireless Local Área Network</i>                  |

## LISTA DE FIGURAS

|             |   |    |
|-------------|---|----|
| Figura 2.1  | <i>Fitting</i> exponencial para <i>Throughput</i> versus SNR [4]  | 4  |
| Figura 2.2  | Varição do <i>Throughput</i> em função do número de usuários e a SNR do canal [3]   | 5  |
| Figura 2.3  | PSNR média vs SNR do canal [9]  | 6  |
| Figura 2.4  | VQM score versus potência recebida ( $P_R$ ) [6]  | 7  |
| Figura 2.5  | VQM score versus MER [6]  | 7  |
| Figura 2.6  | Canalização estimada para uma vazão mínima de 256 Kbps[8]   | 8  |
| Figura 2.7  | Canalização estimada para uma vazão mínima de 512 Kbps [8]  | 8  |
| Figura 2.8  | Mapa de probabilidade cobertura utilizando dois pontos de acesso com base em parâmetros de QoS [9]  | 9  |
| Figura 3.1  | Etapas básicas envolvidas em uma transmissão digital  | 10 |
| Figura 3.2  | Passagem da informação em banda base para banda passante  | 11 |
| Figura 3.3  | Imagem ilustrativa do funcionamento de um codificador convolucional[16]   | 13 |
| Figura 3.4  | Comportamento da probabilidade de erro de bit para dados codificados ( <i>coded</i> ) e não codificados ( <i>uncoded</i> ) [17]                 | 14 |
| Figura 3.5  | Constelações geradas pelas modulações BPSK, QPSK, 16QAM e 64QAM   | 15 |
| Figura 3.6  | Varição da modulação utilizada em função da área de cobertura   | 16 |
| Figura 3.7  | Diferença entre a ocupação espectral no sistema FDM e OFDM [16]   | 17 |
| Figura 3.8  | Reposta em frequência do canal ocasionando desvanecimento plano e seletivo para diferentes sinais com diferentes bandas de ocupação no espectro | 17 |
| Figura 3.9  | Geração de um símbolo OFDM a partir de informação binária.  | 18 |
| Figura 3.10 | Inserção do prefixo cíclico no início dos símbolos OFDM [16].   | 19 |
| Figura 4.1  | Pontos selecionados para a medição <i>outdoor</i>   | 21 |
| Figura 4.2  | Estação rádio base (esquerda) e rádio cliente (direita)   | 21 |
| Figura 4.3  | Computador realizando a aquisição de dados dentro do veículo  | 22 |
| Figura 4.4  | Ocupação de banda mostrada no gerenciador do sistema operacional  | 23 |
| Figura 4.5  | Montagem dos equipamentos utilizados para a aferição de dados <i>indoor</i>   | 23 |
| Figura 4.6  | Etapas envolvidas na simulação do sistema OFDM  | 26 |
| Figura 4.7  | Esquema da configuração no FEC  | 26 |
| Figura 4.8  | Ocorrência de perda de PSNR no processo de transmissão do vídeo   | 27 |
| Figura 4.9  | Analogia entre perda de propagação e perda de qualidade   | 29 |
| Figura 4.10 | Ilustração da perda de PSNR no processo de transmissão e recepção do vídeo  | 30 |
| Figura 5.1  | $E_b/N_0$ vs BER para as modulações BPSK, QPSK, 16QAM e 64QAM com FEC 1/2, 2/3 e 3/4 em canal AWGN.   | 32 |
| Figura 5.2  | $E_b/N_0$ vs BER para as modulações BPSK, QPSK, 16QAM e 64QAM com FEC 1/2, 2/3 e 3/4 em canal Rayleigh.   | 33 |
| Figura 5.3  | Perda de PSNR para a modulação BPSK com três variações de FEC em canal AWGN (A) e Rayleigh (R).   | 33 |
| Figura 5.4  | Perda de PSNR para a modulação QPSK com três variações de FEC em canal AWGN (A) e Rayleigh (R).   | 34 |
| Figura 5.5  | Perda de PSNR para a modulação 16QAM com três variações de FEC em canal AWGN (A) e Rayleigh (R).  | 34 |

|             |  |    |
|-------------|--|----|
| Figura 5.6  | Perda de PSNR para a modulação 64QAM com três variações de FEC em canal AWGN (A) e Rayleigh (R). | 35 |
| Figuras 5.7 | Dados coletados a partir de todas as simulações realizadas                                       | 36 |
| Figuras 5.8 | Perda de PSNR para Modulação 16QAM com FEC 3/4 em ambiente <i>outdoor</i>                        | 37 |
| Figura 5.9  | Perda de PSNR para Modulação 64QAM com FEC 3/4 em ambiente <i>outdoor</i>                        | 37 |
| Figura 5.10 | Perda de PSNR versus $E_b/N_0$ para a modulação BPSK   | 38 |
| Figura 5.11 | Perda de PSNR versus $E_b/N_0$ para a modulação QPSK   | 39 |
| Figura 5.12 | Perda de PSNR versus $E_b/N_0$ para a modulação 16 QAM   | 39 |
| Figura 5.13 | Perda de PSNR vs $E_b/N_0$ para a modulação 64 QAM   | 40 |
| Figura 5.14 | Degradação do vídeo para modulação BPSK com $E_b/N_0 = 3$ dB em canal AWGN                       | 41 |
| Figura 5.15 | Degradação do vídeo para modulação BPSK com $E_b/N_0 = 10$ dB em canal Rayleigh                  | 41 |
| Figura 5.16 | Degradação do vídeo para modulação QPSK com $E_b/N_0 = 4$ dB em canal AWGN                       | 42 |
| Figura 5.17 | Degradação do vídeo para modulação QPSK com $E_b/N_0 = 11$ dB em canal Rayleigh                  | 42 |
| Figura 5.18 | Degradação do vídeo para modulação 16QAM com $E_b/N_0 = 8$ dB em canal AWGN                      | 43 |
| Figura 5.19 | Degradação do vídeo para modulação 16QAM com $E_b/N_0 = 15,5$ dB em canal Rayleigh               | 43 |
| Figura 5.20 | Degradação do vídeo para modulação 64QAM com $E_b/N_0 = 12$ dB em canal AWGN                     | 44 |
| Figura 5.21 | Degradação do vídeo para modulação 64QAM com $E_b/N_0 = 18$ dB em canal Rayleigh                 | 44 |
| Figura 5.22 | Degradação dos vídeos <i>news</i> e <i>mother_daughter</i> obtidas das medições <i>indoor</i> .  | 45 |
| Figura 5.23 | Exemplo de um vídeo íntegro recebido durante as medições <i>outdoor</i>                          | 46 |
| Figura 5.24 | Exemplo de um vídeo degradado recebido durante as medições <i>outdoor</i>                        | 46 |
| Figura 5.25 | $E_b/N_0$ VS Perda de PSNR para a modulação 64QAM com FEC 3/4                                    | 47 |
| Figura 5.26 | $E_b/N_0$ VS Perda de PSNR para a modulação 16QAM com FEC 3/4                                    | 48 |
| Figura 5.27 | $E_b/N_0$ VS Perda de PSNR para a modulação QPSK com FEC 3/4                                     | 48 |
| Figura 5.28 | $E_b/N_0$ VS Perda de PSNR para a modulação BPSK com FEC 3/4                                     | 49 |
| Figura 5.29 | $E_b/N_0$ VS Perda de PSNR para a modulação 64QAM com FEC 3/4 <i>outdoor</i>                     | 50 |
| Figura 5.30 | $E_b/N_0$ VS Perda de PSNR para a modulação 16QAM com FEC 3/4 <i>outdoor</i>                     | 50 |
| Figura 5.31 | Ilustração da interação de uma camada inferior com uma camada superior [32]                      | 51 |
| Figura 5.32 | Análise <i>Cross-Layer</i> proposta neste trabalho   | 51 |

|            |   |    |
|------------|---|----|
| Figura 6.1 | Obtenção do valor de $P_{max}$ das últimas 30 amostras  | 53 |
| Figura 6.2 | Modelo proposto em relação aos dados coletados em todas as simulações                               | 54 |
| Figura 6.3 | Procedimento para utilização do modelo <i>Cross-Layer</i> em comparação com as aferições realizadas | 55 |
| Figura 6.4 | Dados preditos vs dados medidos <i>indoor</i> para modulação 64QAM com FEC 3/4                      | 56 |
| Figura 6.5 | preditos vs dados medidos <i>indoor</i> para modulação 16QAM com FEC 3/4                            | 56 |
| Figura 6.6 | Dados preditos vs dados medidos <i>indoor</i> para modulação QPSK com FEC 3/4                       | 57 |
| Figura 6.7 | Dados preditos vs dados medidos <i>indoor</i> para modulação BPSK com FEC 3/4                       | 57 |
| Figura 6.8 | Dados preditos vs dados medidos <i>outdoor</i> para modulação 64QAM com FEC 3/4                     | 58 |
| Figura 6.9 | Dados preditos vs dados medidos <i>outdoor</i> para modulação 64QAM com FEC 3/4                     | 59 |

**LISTA DE TABELAS**

|            |   |    |
|------------|---|----|
| Tabela 4.1 | Itens necessários para a aplicação de coleta de dados | 22 |
| Tabela 4.2 | Configuração dos rádios Alvarion Breeze Access VL     | 24 |

## RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo sobre transmissões de vídeo em sistemas sem fio. O objetivo da metodologia aplicada é comprovar a existência de uma relação direta entre a BER e a perda de qualidade (Perda de PSNR) nas transmissões de vídeo em sistemas OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*). Os resultados foram obtidos a partir de simulações, desenvolvidas no ambiente computacional Matlab®, e, aferições em cenários reais, realizadas no *campus* universitário e dentro do laboratório de estudos, em ambiente controlado. A partir da comparação entre dados simulados e aferidos, foi comprovada a relação entre BER e Perda de PSNR, resultando na formulação de um modelo empírico *Cross-Layer* com característica exponencial. A modelagem obteve erro RMS e desvio padrão próximos de 1,65 dB quando comparada com as simulações. Além disso, sua validação foi realizada a partir dos dados obtidos de cenários reais, que não foram usados para ajustar os parâmetros da equação obtida. O modelo obtido não necessita da especificação do tipo de canal ou codificação utilizada no FEC (*Forward Error Correction*), possibilitando uma futura integração com softwares de planejamento de redes, em versões comerciais ou *open-sources*.

Palavras-chaves: Redes sem fio, OFDM, transmissões de vídeo, modelagem empírica, *Cross-Layer*.

## ABSTRACT

This work presents a study about video transmission in wireless systems. The applied methodology aims to prove the existence of a direct relationship between BER and quality loss (PSNR loss) on video streams in OFDM (Orthogonal Frequency Division) systems. The results were obtained from simulations, developed in Matlab™ environment, and, measurements in real scenarios, held on university *campus* and inside the research laboratory in an controlled environment. From the comparison between simulated and measured data it was possible to prove the relationship between BER and PSNR loss, which led to the formulation of an empirical Cross-Layer Model with exponential characteristic. The modeling has obtained a RMS error and standard deviation close to 1.65 dB when compared to simulations. Moreover, its validation was performed from data obtained from real-world scenarios, which were not used to adjust the parameters of the proposed equation. This Cross-Layer model does not depend on the type of channel or coding in FEC (Forward Error Correction), allowing future integration with commercial or open-source network planning softwares.

Keywords: Wireless network, OFDM, video transmissions, empirical modeling, Cross-Layer.

## SUMÁRIO

|   |      |
|---|------|
| <b>LISTA DE ACRÔNICOS</b>                               | viii |
| <b>LISTA DE FIGURAS</b>                                 | ix   |
| <b>LISTA DE TABELAS</b>                                 | xii  |
| <b>RESUMO</b>   | xiii |
| <b>ABSTRACT</b>   | xiv  |
| <b>CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO</b>                          | 1    |
| 1.1 – CONTEXTO  | 1    |
| 1.2 - JUSTIFICATIVA                                     | 1    |
| 1.3 – OBJETIVOS   | 2    |
| 1.3.1 - Objetivo Geral                                  | 2    |
| 1.3.2 - Objetivos Específicos                           | 2    |
| 1.4 – CONTRIBUIÇÕES                                     | 2    |
| 1.5 – ORGANIZAÇÃO                                       | 3    |
| <b>CAPÍTULO 2 - TRABALHOS CORRELATOS</b>                | 4    |
| 2.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS                            | 4    |
| 2.2 - ANÁLISE CROSS-LAYER                               | 4    |
| 2.3 - OTIMIZAÇÃO CROSS-LAYER                            | 5    |
| 2.4 - MEDIÇÕES CROSS-LAYER                              | 6    |
| 2.5 - MODELAGEM CROSS-LAYER                             | 8    |
| 2.6 - CONSIDERAÇÕES FINAIS                              | 9    |
| <b>CAPÍTULO 3 - SISTEMAS DE TRANSMISSÃO COM OFDM</b>    | 10   |
| 3.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS                            | 10   |
| 3.2 - TRANSMISSÃO DIGITAL DE SINAIS                     | 10   |
| 3.3 - CODIFICAÇÃO DE CANAL                              | 11   |
| 3.3.1 - Codificação RS (Reed Solomon)                   | 12   |
| 3.3.2 - Codificação Convolutacional                     | 12   |
| 3.3.3 - Limiar de um FEC                                | 13   |
| 3.4 - MODULAÇÃO DIGITAL                                 | 14   |
| 3.5 - TRANSMISSÃO OFDM                                  | 16   |
| 3.6 - CONSIDERAÇÕES FINAIS                              | 19   |
| <b>CAPÍTULO 4 - METODOLOGIA PARA AFERIÇÃO DE DADOS</b>  | 20   |
| 4.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS                            | 20   |
| 4.2 - CAMPANHAS DE MEDIÇÃO                              | 20   |
| 4.2.1 - Medições <i>Outdoor</i>                         | 20   |
| 4.2.2 - Medições <i>Indoor</i>                          | 23   |
| 4.3 - SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL                           | 25   |
| 4.4 - ANÁLISE DOS DADOS                                 | 27   |
| 4.4.1 – Codificação                                     | 29   |
| 4.4.2 – Transmissão                                     | 29   |
| 4.4.3 – Decodificação                                   | 29   |
| 4.4.4 - Cálculo da Perda de Qualidade                   | 29   |
| 4.5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS                              | 31   |
| <b>CAPÍTULO 5 - DADOS COLETADOS E MODELAGEM</b>         | 32   |
| 5.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS                            | 32   |
| 5.2 – SIMULAÇÕES  | 32   |
| 5.3 - MEDIÇÕES <i>OUTDOOR</i>                           | 36   |
| 5.4 - MEDIÇÕES <i>INDOOR</i>                            | 38   |
| 5.5 - CONSÊQUÊNCIAS DA DEGRADAÇÃO DO CANAL PARA O VÍDEO | 40   |



|  |    |
|--|----|
| 5.5.1 - Dados Obtidos de Simulações                            | 40 |
| 5.5.2 - Dados Obtidos nas Medições <i>Indoor</i>               | 45 |
| 5.5.3 - Dados Obtidos das Medições <i>Outdoor</i>              | 46 |
| 5.6 - COMPARAÇÕES ENTRE OS DADOS COLETADOS                     | 47 |
| 5.6.1 - Comparação entre Aferições <i>Indoor</i> e Simulações  | 47 |
| 5.6.2 - Comparação entre Aferições <i>Outdoor</i> e Simulações | 49 |
| 5.7 - MODELAGEM PROPOSTA                                       | 51 |
| 5.8 - CONSIDERAÇÕES FINAIS                                     | 52 |
| <b>CAPÍTULO 6 - RESULTADOS FINAIS</b>                          | 53 |
| 6.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS                                   | 53 |
| 6.2 - RESULTADOS OBTIDOS COM A MODELAGEM                       | 53 |
| 6.3 - CONSIDERAÇÕES FINAIS                                     | 59 |
| <b>CONCLUSÃO</b>   | 60 |
| DISCUSSÃO  | 60 |
| TRABALHOS FUTUROS  | 61 |
| PRODUÇÕES CIENTÍFICAS DURANTE OS ESTUDOS                       | 61 |
| <b>REFERÊNCIAS</b>   | 63 |
| <b>ANEXO A</b>   | 67 |

## CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

### 1.1 - CONTEXTO

O constante aumento na demanda por serviços com qualidade vem resultando em uma crescente necessidade por largura de banda. Somado a isso, existem os custos envolvidos na concepção de redes banda larga e, o tempo necessário para a implantação das mesmas. Neste cenário, as redes sem fio ganham destaque pelo menor custo e menor tempo de estabelecimento de serviços, quando comparados com outras tecnologias de acesso banda larga.

Os conteúdos multimídia estão se tornando os grandes responsáveis pela evolução das tecnologias de acesso sem fio. Neste cenário a principal evolução ocorrida em transmissões de dados sem fio é o uso da técnica OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), permitindo assim, maior robustez contra a natureza variável do meio sem fio. Portanto, a modelagem *Cross-Layer*, proposta neste estudo, será baseada em tecnologias que adotam este recurso.

### 1.2 - JUSTIFICATIVA

A abordagem *Cross-Layer* se apresenta como uma ferramenta de grande utilidade para planejamento de cobertura seja em redes sem fio IP (Internet Protocol), ou em sistemas de radio difusão, como a TV digital. Este tipo de modelagem não se limita a análise do sinal recebido devido à perda de propagação. Também é verificada como será a experiência do usuário em determinada localização na área de cobertura.

Esta metodologia para análise de sistemas, que não se limita à análise do sinal recebido, é encontrada na literatura e já vem sendo adotada. Como exemplo tem-se os trabalhos em [1], onde os autores propõem restrições baseadas em qualidade de serviço (QoS), influenciando diretamente no planejamento de cobertura em uma rede WLAN (Wireless Local Área Network). Outros trabalhos, como verificado em [2], buscam mapear a influência da interferência no desempenho de uma WLAN em nível de QoS. Já em [3], uma análise *Cross-Layer* é utilizada para modelar a interação entre diversos protocolos em uma rede sem fio.

## 1.3 - OBJETIVOS

### 1.3.1 - Objetivo Geral

Comprovar que existe uma relação direta entre BER e perda de PSNR para transmissão de vídeos em sistemas OFDM, obtendo posteriormente um modelo empírico que representa esta relação.

### 1.3.2 - Objetivos Específicos

São objetivos específicos desta tese:

- Modelagem *Cross-Layer* da perda de qualidade de vídeos;
- Realização de testes em ambientes reais através de *testbeds*;
- Comparação entre os dados obtidos por simulação e os dados coletados em cenário real;

## 1.4 - CONTRIBUIÇÕES

Podem ser destacadas como principais contribuições desta Tese:

- Análise de sistemas sem fio OFDM com foco voltado para transmissões de vídeo em tempo real;
- Modelagem *Cross-Layer* usando como principal critério a BER (taxa de erro de bit) através de uma abordagem unificada;
- Equacionamento empírico de fácil manipulação e baixo custo computacional de simulação, sendo uma ferramenta de grande auxílio em projetos de sistemas OFDM;
- Criação de um ambiente computacional de simulação programado em Matlab® para representar transmissões de vídeo através de interação com o programa Evalvid;

- Aferição de dados em ambientes reais obtendo informações importantes para este trabalho e pesquisas futuras;

## 1.5 - ORGANIZAÇÃO

No capítulo 2, através da revisão bibliográfica, são apresentados trabalhos sobre a abordagem *Cross-Layer*, envolvendo análise, modelagem e otimização.

O capítulo 3 descreve os sistemas de transmissão OFDM, mostrando suas características.

O capítulo 4 apresenta a metodologia adotada no trabalho, descrevendo as campanhas de medições realizadas.

O capítulo 5 mostra os dados coletados e apresentará a proposta de modelagem.

No capítulo 6, os resultados finais são discutidos e analisados.

## CAPÍTULO 2 - TRABALHOS CORRELATOS

### 2.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Antes de iniciar a descrição dos estudos e metodologias adotadas neste trabalho, é necessário realizar um levantamento dos trabalhos e pesquisas que adotam a abordagem *Cross-Layer* como estratégia para a análise, otimização, medição e modelagem de sistemas sem fio banda larga e sistemas de TV digital.

### 2.2 - ANÁLISE CROSS-LAYER

No meio acadêmico, a análise *Cross-Layer* ganhou espaço devido à concepção gerada acerca da estrutura de um sistema de comunicação. Neste tipo de análise procura-se eliminar as fronteiras existentes entre eventos ocorridos na camada física e acontecimentos decorrentes nas camadas de rede, transporte e aplicação. Shakkottai e Rappaport (2003)[4], comentam sobre a importância da análise *Cross-layer* em projetos de redes sem fio. Como exemplo, um dos resultados obtidos, a partir de aferições, é mostrado na Figura 2.1 onde é vista uma abordagem empírica, envolvendo a relação sinal-ruído (SNR) e o *Throughput*.

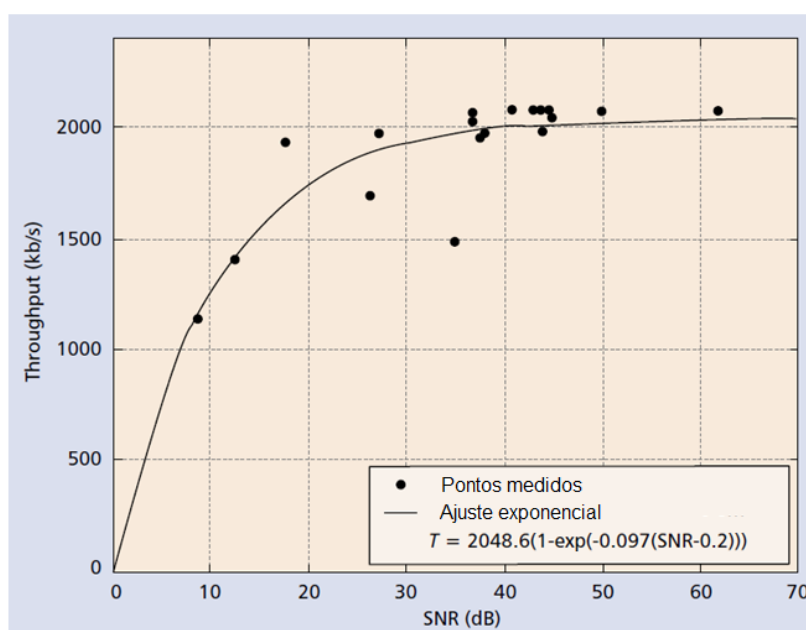


Figura 2.1 - Ajuste exponencial para *Throughput* versus SNR [4]

A pesquisa feita por Robert (1999) [5], analisou a qualidade do vídeo recebido em função de variações na codificação do canal no sistema LMDS (*Local Multipoint Distribution Service*). Seus resultados, obtidos através de simulação, mostraram que a BER (Taxa de Erro de Bit) não deve ser relacionada à qualidade do vídeo, enfatizando que métricas de camada física não devem ser utilizadas para prever a qualidade do vídeo recebido em diferentes arquiteturas de sistemas. Partes da pesquisa realizada podem ser encontradas em [6] e [7].

No trabalho desenvolvido por Choi J. e Kim (2009) [3], citado no capítulo anterior, uma abordagem *Cross-Layer* é realizada para analisar a interação entre diversos serviços em uma WLAN, onde são considerados os protocolos ARF (*Automatic Rate Fallback*), DCF (*Distributed Coordination Function*) e TCP (*Transmission Control Protocol*). Um dos resultados encontrados pelos autores pode ser observado na Figura 2.2, onde é mostrada a relação entre *Throughput* (vazão na camada de enlace), o número de usuários (N) em disputa no canal e a SNR do canal.

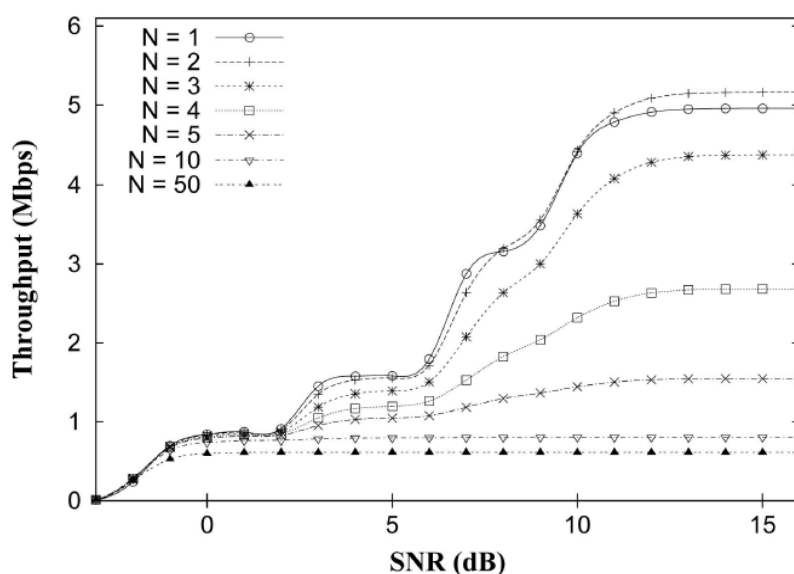


Figura 2.2 - Variação do *Throughput* em função do número de usuários e a SNR do canal [3]

### 2.3 - OTIMIZAÇÃO CROSS-LAYER

Através da análise *Cross-Layer*, estratégias de melhorias podem ser adotadas para otimizar o funcionamento e a oferta de serviços em sistemas sem fio. Tendo esta ideia como base, pode-se citar o estudo desenvolvido por Lu R. (2010) [8] que propõe melhorias

na transmissão de vídeo em um sistema adaptativo MIMO (*Multiple Input, Multiple Output*) OFDM. Para tanto, os autores utilizam otimização *Cross-Layer* para garantir uma mesma qualidade do vídeo recebido em uma SNR de 3-5 dB menor do que a prevista.

Outro estudo importante foi o desenvolvido por Yang Z. e Wang X. (2013) [9], onde os autores desenvolveram uma ferramenta para projeto de transmissões escaláveis de vídeo com abordagem *cross-layer*. A pesquisa desenvolvida foi baseada no codec H.264/AVC aplicado em sistemas MIMO OFDM. Com base nisto, os autores utilizaram estratégias de alocação dinâmica de sub-portadoras, modulação e codificação de canal adaptativa, e, obtiveram bons resultados. A métrica adotada no estudo foi a PSNR média, em função da SNR do canal. O desempenho de uma das estratégias adotadas pelos autores é mostrada na Figura 2.3, onde, são comparadas técnicas de alocação de sub-portadoras, mostrando a qualidade do vídeo recebido em função da SNR do canal.

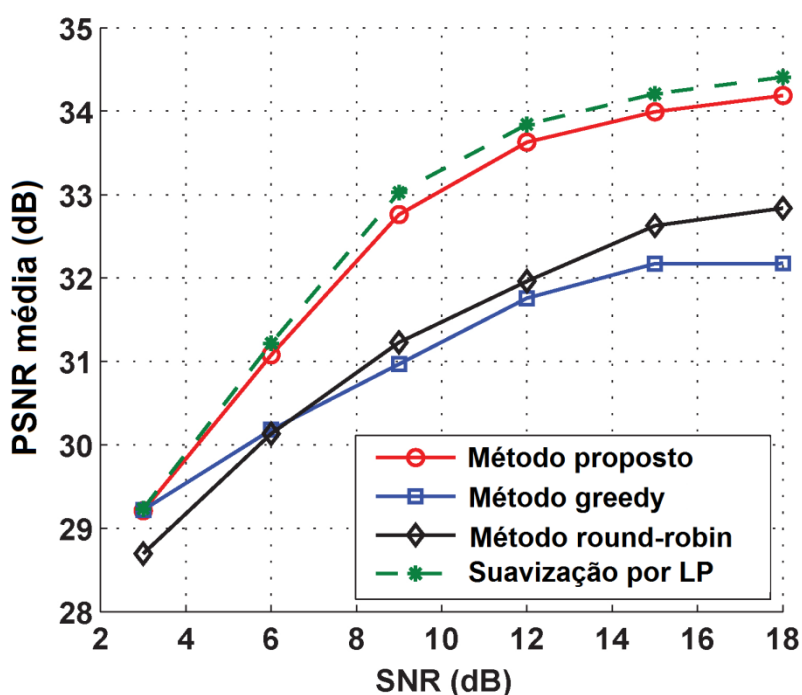


Figura 2.3 – PSNR média vs SNR do canal [9]

## 2.4 - MEDIÇÕES CROSS-LAYER

Medições *Cross-Layer* são procedimentos eficientes para análise e compreensão do comportamento de redes sem fio, incluindo também os sistemas de TV digital. Bertocco M. et al (2008)[10], analisaram o desempenho do sistema de TV digital europeu DVB-T

(*Digital Video Broadcasting - Terrestrial*) com base em medições de parâmetros da camada física, como potência recebida ( $P_R$ ) e erro de modulação (MER). Também foram coletadas amostras da qualidade do vídeo recebido (VQM), sendo esta uma métrica do tipo LB (*lower is better*) [11]. As Figuras 2.4 e 2.5 mostram os resultados obtidos das medições.

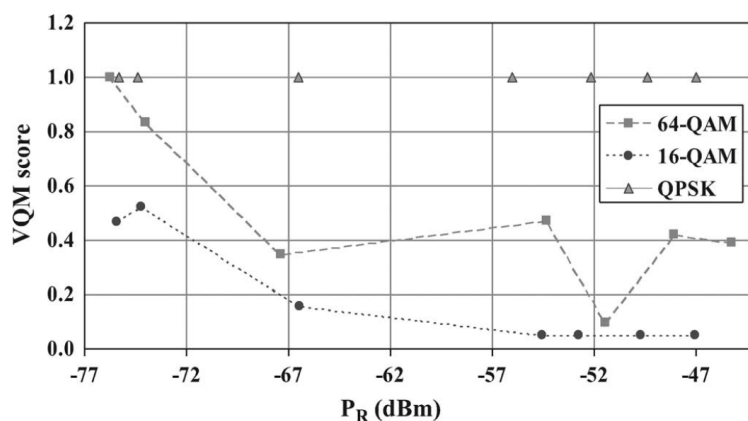


Figura 2.4 - VQM score vs potência recebida ( $P_R$ ) [10]

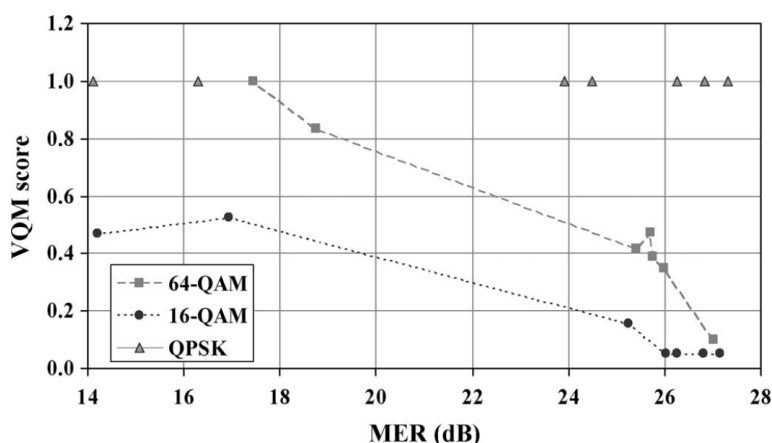


Figura 2.5 - VQM score vs MER [10]

No trabalho apresentado, os autores destacam a importância da medição *Cross-Layer* para análise e solução de problemas em sistemas de DVB-T, bem como, as informações práticas obtidas, que ajudam de forma considerável no projeto de sistemas deste tipo.



## 2.5 - MODELAGEM CROSS-LAYER

A modelagem *Cross-Layer* se apresenta como uma grande ferramenta no planejamento e estimação do comportamento de sistemas sem fio. Dito isto, pode-se citar a pesquisa feita por Lu J. et al (2006) [12], onde os autores utilizam uma modelagem markoviana baseada em restrições de QoS (*Quality of Service*) para o planejamento de redes WLAN. Os resultados obtidos podem ser verificados nas Figuras 2.6 e 2.7.

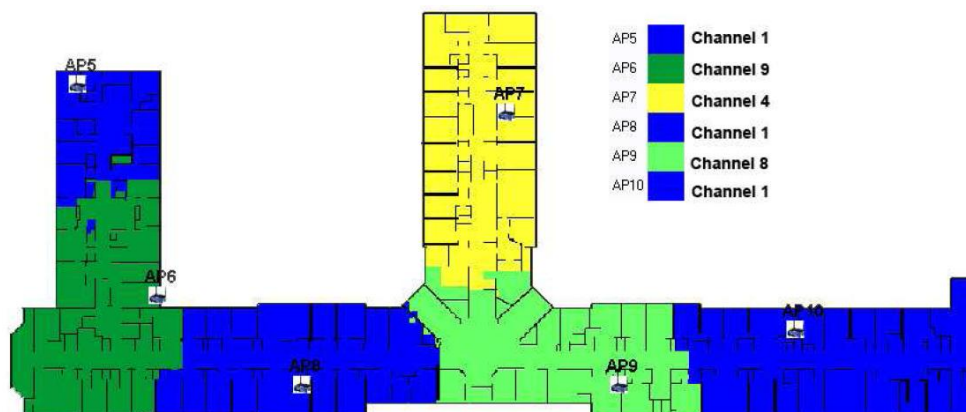


Figura 2.6 - Canalização estimada para uma vazão mínima de 256 Kbps[12]

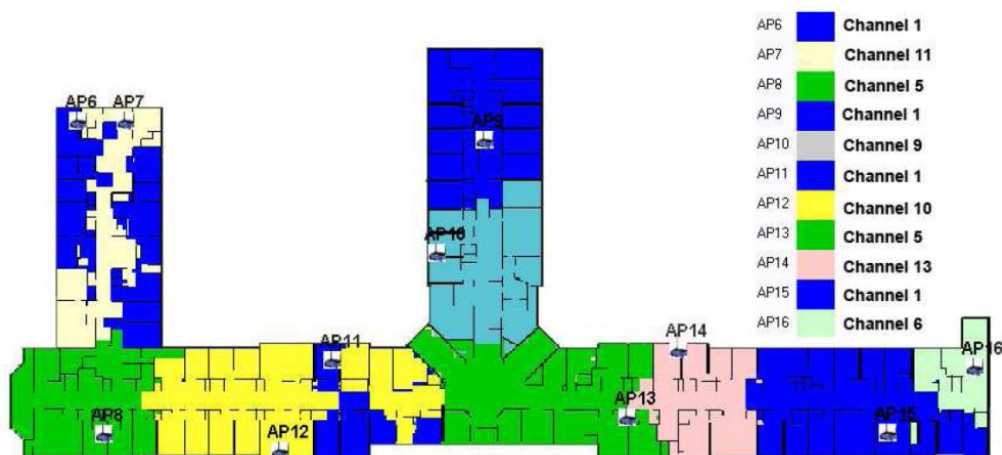


Figura 2.7 - Canalização estimada para uma vazão mínima de 512 Kbps [12]

Outro trabalho importante, na área de planejamento de WLANs, pode ser observado na tese de doutorado de Simone (2009) [13], onde é proposta uma modelagem empírica, baseada em medições, com utilização da técnica de algoritmos genéticos para solução de um problema multi-objetivo com restrições. Esta modelagem envolve previsões de perda

de propagação e parâmetros de QoS para estimação de cobertura otimizada. A Figura 2.8 mostra um exemplo de resultado obtido da modelagem.

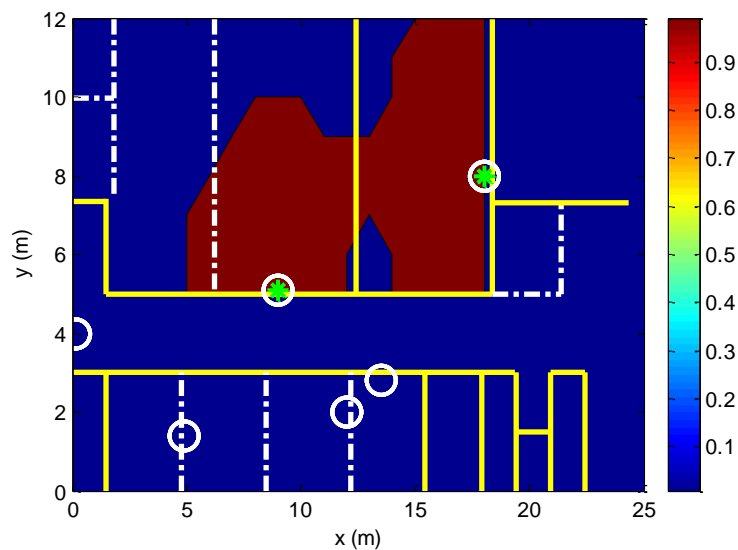


Figura 2.8 - Mapa de probabilidade cobertura utilizando dois pontos de acesso com base em parâmetros de QoS [13]

## 2.6 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresentou uma revisão acerca de trabalhos e pesquisas envolvendo a abordagem *Cross-Layer*, onde foram feitas divisões a respeito das áreas de pesquisa as quais este tipo de abordagem é aplicado. Os diversos trabalhos apresentados utilizam ferramentas que vão desde a modelagem analítica até a metodologia empírica, baseada em medições. Sendo assim, é importante destacar a modelagem de equações empíricas, a partir de medições, por possuírem baixo custo computacional de implementação e fácil manipulação, sendo esta, a metodologia adotada no desenvolvimento desta tese. No próximo capítulo, será explanada a transmissão em sistemas OFDM.

## CAPÍTULO 3 - SISTEMAS DE TRANSMISSÃO COM OFDM

### 3.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A tecnologia sem fio permite a transmissão de dados sem o uso de cabos, que são utilizados, por exemplo, em redes ópticas, redes DSL (Digital Subscriber Line), e redes de computadores (Fast Ethernet, Gigabit Ethernet e etc).

Atualmente, boa parte dos sistemas de transmissão de dados sem fio usam a técnica OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) para prover maior robustez contra as imposições geradas pela natureza variável do canal. Isto posto, este capítulo descreverá os elementos que compõem o mecanismo de transmissão OFDM.

### 3.2 - TRANSMISSÃO DIGITAL DE SINAIS

Grande parte dos sistemas de comunicação existentes trabalham com sinais digitais, indo desde os satélites utilizados por emissoras de televisão, até as redes celulares, que em sua quase totalidade, operam com sinais digitais. A transmissão destes tipos de sinais, independente do meio (cabado ou sem fio) utilizado, é descrita pelas seguintes etapas [14], mostradas na Figura 3.1.

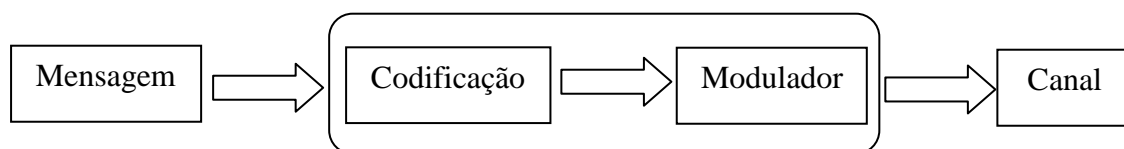


Figura 3.1 - Etapas básicas envolvidas em uma transmissão digital

De maneira geral, os sistemas cabeados e sem fio operam com esta mesma ideia, recebendo uma mensagem (dados, voz ou vídeo), codificando-a em conjunto de bits para mapeamento em símbolos dentro do modulador, e, enviando os símbolos gerados no canal. A transmissão sem fio exige utilização do conceito chamado transmissão em banda passante. Este artifício se baseia na utilização de uma portadora (canal) cuja frequência de operação  $f_c$  é elevada, e, esta é utilizada para comportar a informação banda base, que possui frequência entre zero e  $f_m$ , onde  $f_m$  é muito menor que  $f_c$ . A Figura 3.2 [15] exhibe a mudança ocorrida no espectro do sinal modulado.

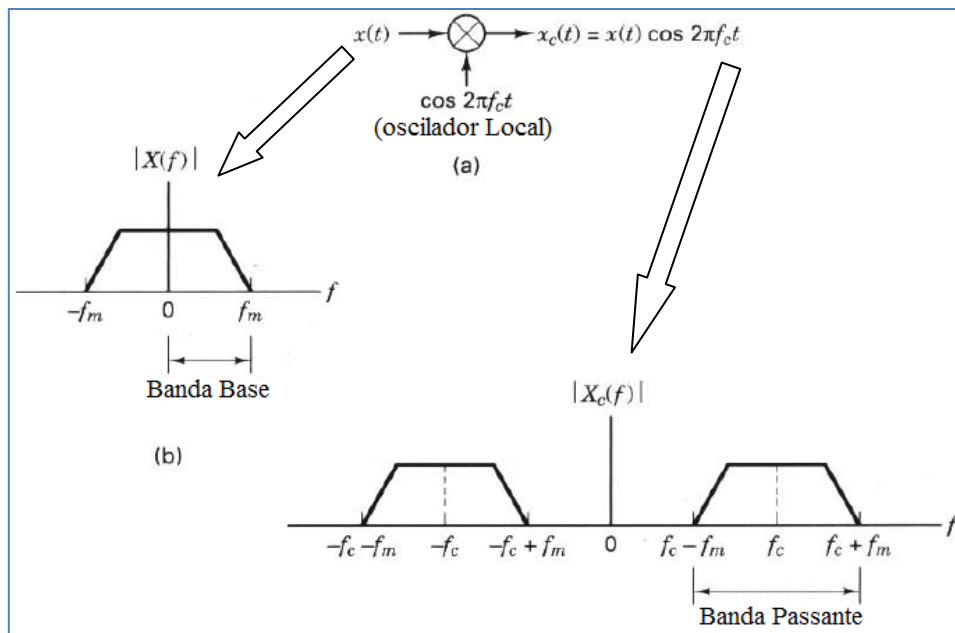


Figura 3.2 - Passagem da informação em banda base para banda passante

De acordo com a Figura 3.2 tem-se que  $x(t)$  é a mensagem modulada, ou seja, o seu espectro  $|X(f)|$  está em banda base, delimitada por  $f_m$ , que é a frequência da mensagem. Após a inserção de uma portadora, o espectro banda base é deslocado e centralizado na frequência  $f_c$ .

### 3.3 - CODIFICAÇÃO DE CANAL

No processo de envio de uma informação deve haver primeiramente o tratamento da mesma, visando atenuar os efeitos de uma possível degradação, gerada pela variabilidade do meio de transmissão sem fio. Neste contexto, diversas técnicas de codificação de canal vêm sendo desenvolvidas com o intuito de reduzir falhas ocasionadas pelo canal de transmissão, onde a principal métrica, utilizada para mensurar o desempenho da codificação de canal, é a taxa de erro de bit, conhecida como BER (Bit Error Ratio). No estudo desenvolvido nesta tese, são abordadas as técnicas de codificação RS (Reed Solomon) e codificação convolucional, ambas classificadas como técnicas FEC (Forward Error Correction).

### 3.3.1 - Codificação RS (Reed Solomon)

A codificação RS, criada por Irving Reed e Gus Solomon, pertence a uma classe de códigos de bloco, que tiveram início com os avanços encontrados nas pesquisas de Bose, Ray-Chaudhuri and Hocquenghem, que em 1960 desenvolveram uma grande classe de códigos para correção de múltiplos erros, chamada de códigos BCH [16].

O processo de codificação é realizado em grupos de símbolos, cuja notação usada para a codificação é  $RS(n,k)$ , onde  $k$  representa o número de símbolos dentro de um bloco a ser codificado, e,  $n$  é comprimento do bloco de símbolos codificados gerados, além disso, cada símbolo tratado na codificação geralmente corresponde a um *byte* (8 *bits*). Desta forma, para um símbolo com  $m$  bits de comprimento e capacidade de correção de  $t$  símbolos, o codificador RS possui a seguinte relação [15].

$$(n, k) = (2^m - 1, 2^m - 1 - 2t) \quad (3.1)$$

Em uma codificação  $RS(n,k)$  a capacidade  $t$  de correção de símbolos, para um bloco com  $n$  símbolos e  $k$  símbolos codificados, é expressa pela equação (3.2) [15].

$$t = \frac{n - k}{2} \quad (3.2)$$

No desenvolvimento deste trabalho, será empregada codificação  $RS(204,188)$  que é baseada em símbolos de comprimento  $m = 8$  bits, para converter 188 símbolos em um bloco codificado de 204 símbolos, que resultará em uma capacidade de correção de 8 símbolos.

### 3.2.2 - Codificação Convolutiva

A codificação Convolutiva foi introduzida por Peter Elias no artigo “*Coding for Noise Channels*” em 1955 [16], e seu funcionamento foi baseado na utilização de circuitos com registradores de deslocamento que realizavam operações de convolução em dados sequenciais. O processo é feito em nível binário onde um número  $k$  de bits é convertido em  $n$  bits codificados em uma razão  $k/n$  para  $m$  registradores de deslocamento.

Realizações práticas de um codificador convolucional utilizam  $m=7$ , onde o número de registradores de deslocamento utilizado equivale a  $m-1$ . A configuração de um codificador é expressa através de um polinômio gerador ou vetor gerador. A configuração da codificação usada neste trabalho possui vetores  $\{1011011\}$  e  $\{1110011\}$  representados por  $\{133\}$  e  $\{171\}$  em octal [17]. Cada vetor corresponde à configuração das conexões com os somadores módulo-2 existentes no codificador. A Figura 3.3 representa o esquema do codificador.

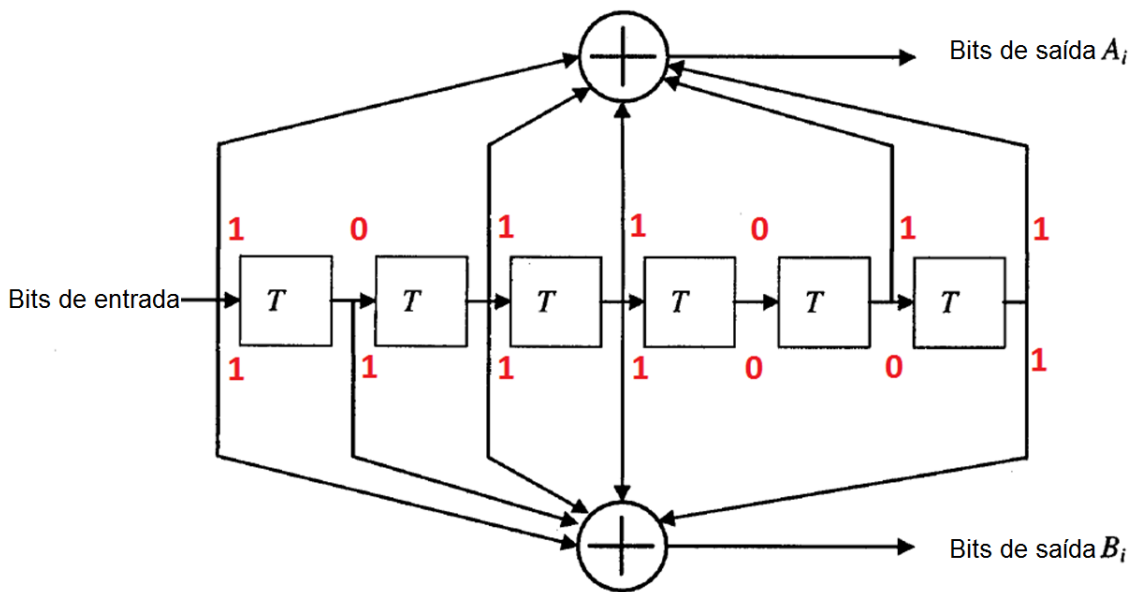


Figura 3.3 - Imagem ilustrativa do funcionamento de um codificador convolucional [17].

A razão deste codificador é  $1/2$ , pois, para  $k$  bits de entrada tem-se  $n=2k$  bits pelo fato de existir duas saídas geradas por dois somadores módulo-2. As demais taxas de codificação ( $2/3$ ,  $3/4$  e outras) são obtidas removendo-se alguns bits de redundância para que a razão do codificador seja elevada. Este processo é chamado de *puncturing* [17].

### 3.3.3 - Limiar de um FEC

Informações que passam pelo processo de codificação apresentam um limiar onde o desempenho na correção de erro reduz rapidamente a BER a partir de uma determinada condição de canal, fato este que não ocorre com dados não codificados, pois estes apresentam uma redução gradativa. Este comportamento é explicado na

Figura 3.4 que mostra uma comparação entre a BER para dados codificados e não codificados.

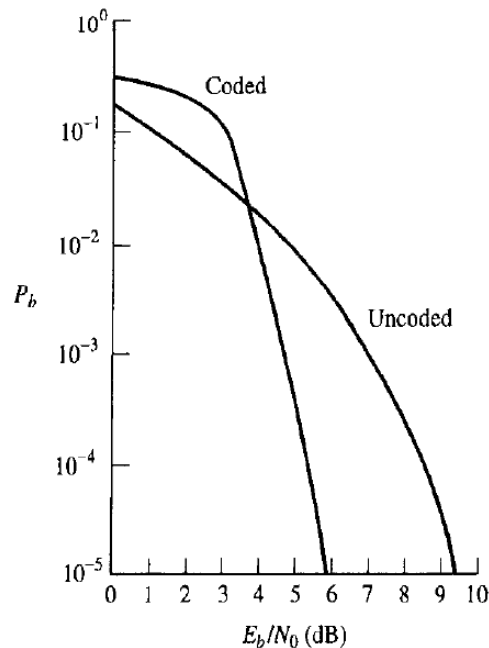


Figura 3.4 - Comportamento da probabilidade de erro de bit para dados codificados (*coded*) e não codificados (*uncoded*) [18].

De acordo com o exposto na Figura 3.4 pode-se observar uma redução acentuada nos valores de BER a partir de uma determinada condição de canal ( $E_b/N_0$ ). Também pode ser notado que a BER em dados codificados é mais elevada que nos dados não codificados, para valores reduzidos de  $E_b/N_0$ . Isto se deve às falhas no codificador de canal que, na tentativa de corrigir os erros, acaba fazendo o contrário, aumentando a taxa de erro devido o alto grau de corrupção dos dados codificados [18].

### 3.4 - MODULAÇÃO DIGITAL

Antes do processo de transmissão, a informação precisa ser mapeada em valores complexos, chamados de símbolos. De acordo com a modulação digital utilizada, os símbolos podem comportar mais ou menos bits. As principais modulações utilizadas em sistemas banda larga sem fio são: BPSK, QPSK, 16QAM e 64QAM.

A modulação BPSK (*Binary Phase Shift Keying*) trabalha com o mapeamento de um bit por símbolo, onde, cada símbolo possui uma mudança de fase de 180 graus. Este conceito é utilizado na modulação QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*), em que os

símbolos são representados por uma componente em fase (I) e uma componente em quadratura (Q) formando assim uma grandeza complexa  $I + jQ$ . As modulações 16 e 64 QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*) também operam com transmissão em fase e quadratura, alterando também a amplitude do sinal. A Figura 3.5 mostra as constelações normalizadas geradas pelas quatro modulações.

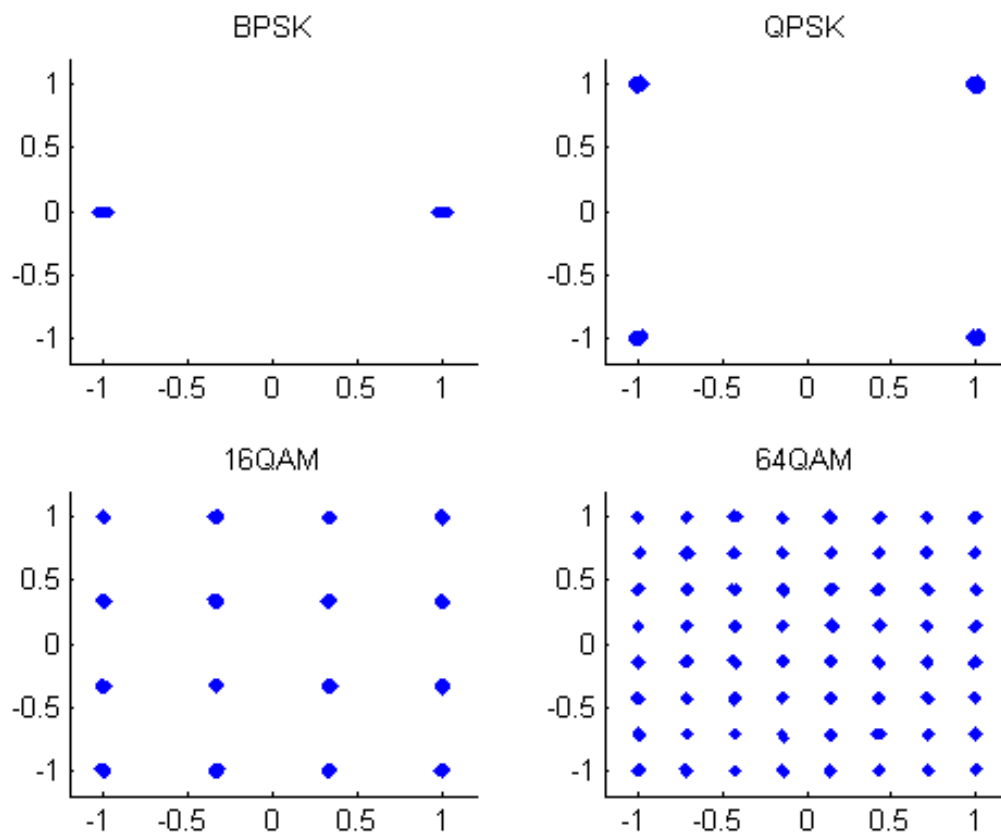


Figura 3.5 - Constelações geradas pelas modulações BPSK, QPSK, 16QAM e 64QAM.

Quanto mais símbolos uma modulação utiliza, menos robusta a mesma é para uma dada fonte de interferência. Em teoria, levando em consideração a atenuação do sinal transmitido por uma estação rádio base, quanto mais longe o receptor estiver da estação rádio base, menor será a sua potência recebida e pior será a relação sinal-ruído (SNR), conseqüentemente, deverá ser utilizada uma modulação inferior para tolerar baixa qualidade de transmissão do canal. A Figura 3.6 mostra a variação de modulação entre o centro da área de cobertura e a sua extremidade.



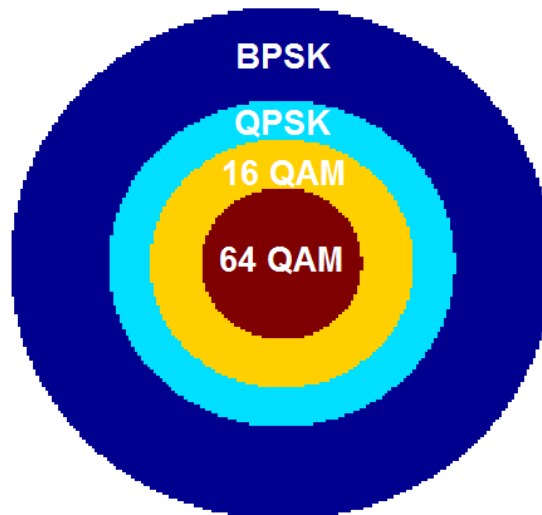


Figura 3.6 - Variação da modulação utilizada em função da área de cobertura

### 3.5 - TRANSMISSÃO OFDM

A transmissão OFDM se baseia na transmissão paralela, dividindo a banda disponível em sub-portadoras ortogonais para enviar os dados modulados em diversos sub-canais. Diferente da técnica FDM (Frequency Division Multiplexing) que divide o espectro em sub-canais espaçados por uma banda de guarda, a técnica OFDM aloca uma quantidade maior de sub-canais dentro da mesma faixa espectral. Porém, é interessante frisar que o conceito de transmissão paralela devido à multiplexação por frequência foi publicado em meados de 1960 [19] e, somente em Janeiro de 1970, uma patente americana foi gerada a cerca deste assunto [20].

No sistema clássico de transmissão paralela de dados, a banda é dividida em  $N$  sub-canais não sobrepostos que são multiplexados em frequência. Entretanto, é necessário um espaçamento (guarda) entre sub-canais para evitar interferências entre os mesmos. Problema este, que pode ser contornado com o uso de sub-canais sobrepostos, desde que os mesmos sejam ortogonais entre si, garantindo um melhor aproveitamento da banda disponível [17]. A diferença na ocupação espectral em entre as técnicas FDM e OFDM é ilustrada na Figura 3.7.

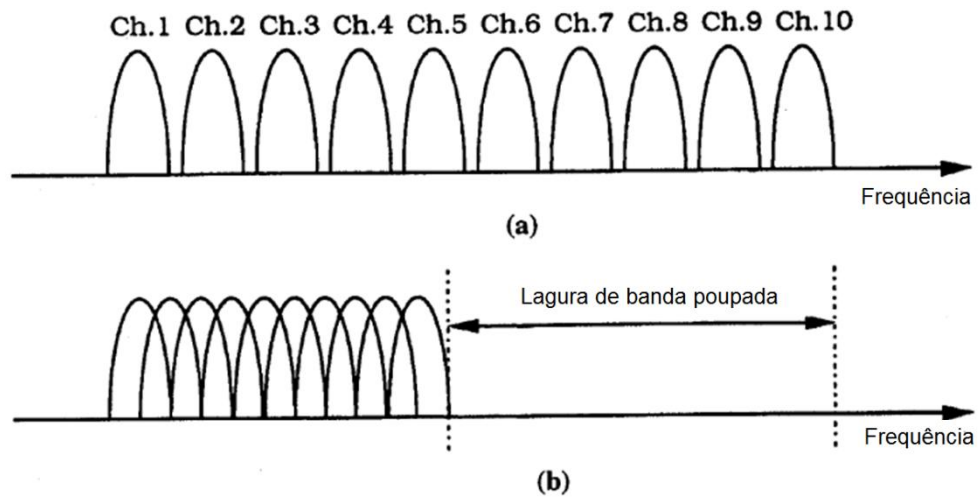


Figura 3.7 - Diferença entre a ocupação espectral no sistema FDM e OFDM [17].

Baseado na ideia de dividir o canal em diversos sub-canais ortogonais, a técnica OFDM transforma uma elevada taxa de dados serial em diversos fluxos paralelos com taxas de transmissão reduzidas. Além disso, esta divisão em diversos subcanais transforma os mesmos em sinais banda estreita, quando comparados com a banda de coerência do canal, indicando que cada sub-canal pode experimentar desvanecimento plano, permitindo uma equalização menos complexa [21]. A Figura 3.8 exemplifica a ocorrência de desvanecimento plano para um sinal faixa estreita (Banda do sinal 1) e, o desvanecimento seletivo em frequência para um sinal banda larga (Banda do sinal 2) em função da resposta em frequência  $|H(f)|$  do canal.

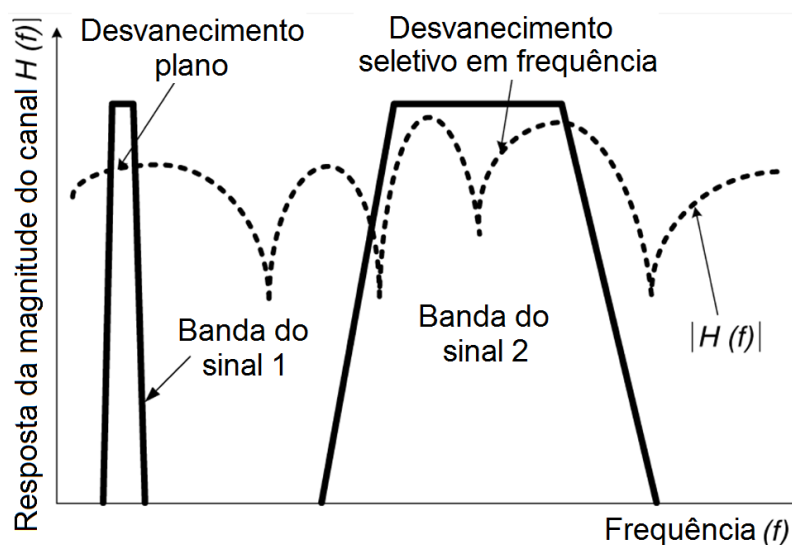


Figura 3.8 - Resposta em frequência do canal ocasionando desvanecimento plano e seletivo para diferentes sinais com diferentes bandas de ocupação no espectro.

Usando o conceito de sub-canais, pode-se dividir uma taxa  $R$  de símbolos/s em  $N$  fluxos paralelos com taxa  $R/N$ , onde o período  $T$  do símbolo OFDM é expresso por  $T=N/R$ . A frequência  $f_n$ , definida para cada sub-canal, é descrita por  $f_n = f_0 + n\Delta f$  para  $n=1, 2, \dots, N-1$ . Então, a formulação do símbolo OFDM  $S(t)$  é descrita pela equação (3.3) [22], que representa um sinal transmitido no intervalo  $0 \leq t \leq T$  transportando símbolos na notação complexa  $a(n) + jb(n)$ , originados de modulações digitais a exemplo das descritas na seção 3.3.

$$S(t) = \sum_{n=0}^{N-1} a(n) \cos(2\pi f_n t) + b(n) \text{sen}(2\pi f_n t) \quad (3.3)$$

O processo de transmissão em um sistema OFDM utiliza um bloco IFFT, recebendo a conversão serial-paralelo (S/P) dos símbolos gerados após a modulação, onde, a quantia de fluxos paralelos deve ser dimensionada para preencher os sub-canais ortogonais. A Figura 3.9 apresenta o esquema que descreve o processo de criação de um símbolo OFDM.

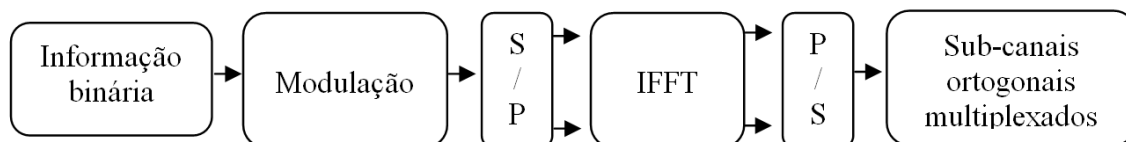


Figura 3.9 - Geração de um símbolo OFDM a partir de informação binária.

A divisão do espectro em sub-canais confere robustez ao processo de transmissão de dados em canais seletivos em frequência, entretanto, existem outros problemas como a recepção de réplicas atrasadas do sinal enviado, em função do multipercurso. Este problema ocasiona o fenômeno ISI (Interferência Inter-Simbólica) resultando na sobreposição temporal entre símbolos, porém, esta situação pode ser contornada com adição de tempo de guarda.

O tempo de guarda pode ser preenchido através de *Zero-Padding* que é representado pelo não envio de formas de onda no tempo de guarda. Outra alternativa, é a utilização de prefixo cíclico (PC), cópia de parte do símbolo transmitido, destinado a ser inserido no início do símbolo, conforme mostrado na Figura 3.10.

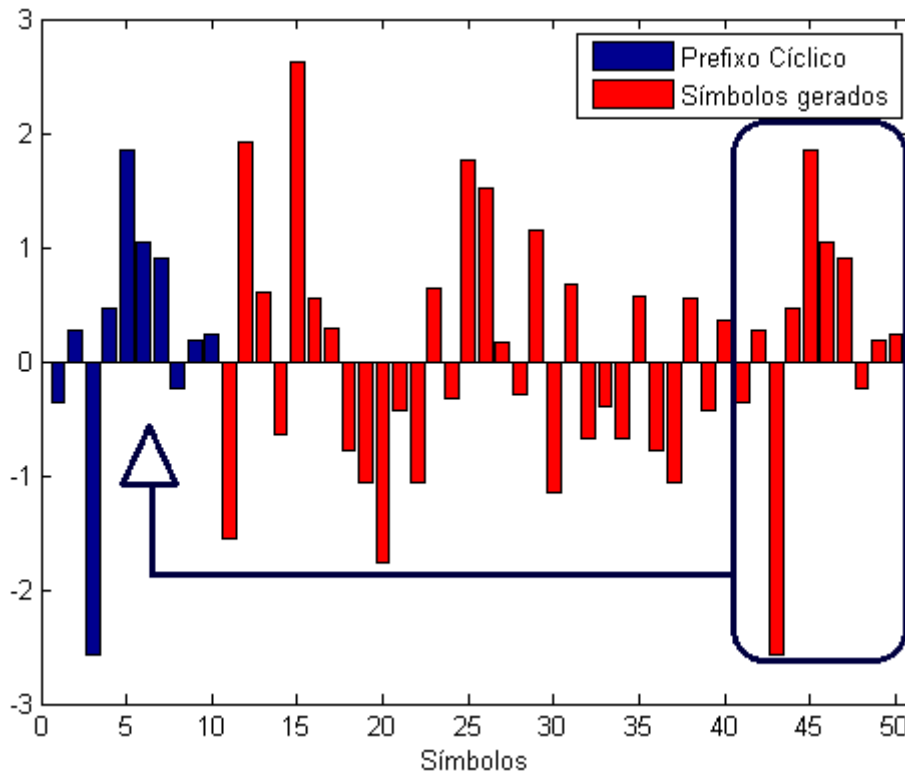


Figura 3.10 - Inserção do prefixo cíclico no início dos símbolos OFDM [16].

Após a inserção do PC, o sinal OFDM em banda base já pode, teoricamente, ser estudado em nível de desempenho e degradação, a partir de simulações. Outras etapas de tratamento do sinal OFDM, como o janelamento (*windowing*) e a conversão para banda passante, são utilizadas para a otimização do espectro [23] e transmissão pelo ar das componentes reais e imaginárias [17]. Estas etapas não são incluídas nas simulações realizadas neste trabalho.

### 3.6 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os assuntos tratados neste capítulo apresentaram uma base para o entendimento do processo de criação de um símbolo OFDM, como a utilização da IFFT para geração de fluxos de símbolos ortogonais e a inserção de prefixo cíclico para amenizar os problemas gerados pelo multipercurso. A seguir neste trabalho, serão discutidas as metodologias envolvidas nas simulações do sistema OFDM, bem como a aferição de dados em ambiente real.

## CAPÍTULO 4 - METODOLOGIA PARA AFERIÇÃO DE DADOS

### 4.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O capítulo anterior abordou as técnicas de transmissão de dados em meio sem fio. Nestes tipos de sistemas, a qualidade experimentada pelo usuário de um serviço pode ser degradada por problemas no meio físico de transmissão. Em um sistema sem fio, a modelagem das influências da camada física na qualidade do serviço ofertado, pode ser entendida como uma modelagem *Cross-Layer*.

Utilizando o exemplo de uma rede sem fio (IEEE 802.11), a modelagem do seu funcionamento poderia ser feita de maneira similar a modelagem de uma rede cabeada, simulando o seu desempenho na pilha de protocolos, indo da camada física até a camada de aplicação. Em sistemas onde o canal apresenta pouca variabilidade, este tipo de modelagem é empregado com sucesso, porém, em redes sem fio, a modelagem da pilha de protocolos não funciona de forma eficiente devido à natureza variável do canal de comunicação. Esta situação tem levado a um crescimento na adoção de técnicas de modelagem *Cross-Layer* em redes sem fio [24]. Com base nisto, este capítulo descreve aquisição de dados que serão utilizados como referência nas análises, bem como a metodologia adotada para a modelagem proposta.

### 4.2 - CAMPANHAS DE MEDIÇÃO

A coleta de dados tem como objetivo a obtenção das influências, exercidas por mudanças da camada física, na qualidade do serviço ofertado. Para tanto, medições foram realizadas em ambiente *indoor* (interno) e *outdoor* (externo).

#### 4.2.1 - Medições *Outdoor*

As medições *outdoor* foram realizadas no *campus* profissional da Universidade Federal do Pará (UFPA). Nestas medições, 14 pontos foram utilizados para a coleta de dados relacionados à qualidade do vídeo recebido. A Figura 4.1 mostra a região selecionada para as medições, bem como os pontos onde os dados foram coletados.

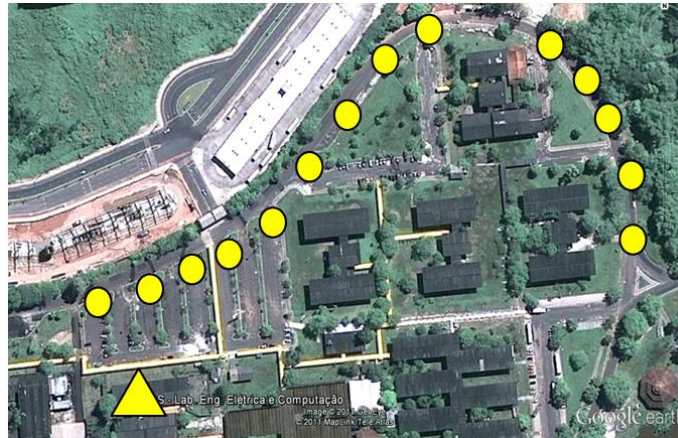


Figura 4.1 - Pontos selecionados para a medição *outdoor*

Com base na Figura 4.1, tem-se que os círculos representam o posicionamento dos pontos de coleta, e, o triângulo representa a localização da estação rádio base. Em cada ponto, foram realizadas transmissões do vídeo *Rush\_Hour* [25] em alta definição (1920x1080 pixels) com duração de 20 segundos. Para tanto, foi utilizada a ferramenta Evalvid [26] integrada com o Matlab® no processo de transmissão, recepção e, avaliação da qualidade do vídeo recebido através da métrica objetiva PSNR (*Peak Signal-to-Noise Ratio*).

A estação rádio base foi fixada no terraço do bloco de laboratórios da engenharia elétrica. As antenas utilizadas para os testes (estação radio base e cliente) eram omnidirecionais com ganho de 8 dB. A Figura 4.2 mostra a fixação da estação (terraço) e do cliente (veículo), e, a Figura 4.3 mostra o computador realizando a aquisição de dados dentro do veículo, com o rádio cliente recebendo o tráfego de vídeo.



Figura 4.2 - Estação rádio base (esquerda) e rádio cliente (direita)



Figura 4.3 - Computador realizando a aquisição de dados dentro do veículo.

As medições *outdoor* foram realizadas com a opção de modulação adaptativa desabilitada, onde eram configuradas manualmente as modulações 64QAM, 16QAM, QPSK e BPSK. O processo de coleta da SNR, medida na recepção, é feito usando uma aplicação desenvolvida em Matlab® [27], que se comunica com rádio e, obtém os dados necessários através do protocolo SNMP (Simple Network Management Protocol). A ideia é que esta ferramenta seja aplicada para *Drive-Test*. Os itens necessários para a implementação desta aplicação, bem como suas funções, são listados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Itens necessários para a aplicação de coleta de dados.

| <b>Itens</b>                        | <b>Função</b>   |
|-------------------------------------|---|
| Veículo                             | Locomoção   |
| Inversor de corrente                | Aproveita a energia da bateria do veículo para alimentar os equipamentos  |
| GPS                                 | Marcação dos pontos medidos   |
| Estação base compatível com SNMP    | Transmissão de dados  |
| Estação cliente compatível com SNMP | Recepção de dados e análise da camada física                              |
| Computador portátil                 | Recebe a biblioteca SNMP e o programa usado na coleta de dados            |
| Biblioteca SNMP                     | Habilita o programa utilizado para coletar informações da estação cliente |
| Matlab®                             | Programa utilizado para aquisição e processamento de dados                |

#### 4.2.2 - Medições *Indoor*

A realização das medições *indoor* se deu no Laboratório de Computação e Telecomunicações (LCT) da FCT/UFPA. Os dados foram coletados de maneira similar a empregada nas medições *outdoor*, com utilização do software Evalvid, onde os vídeos *news* e *mother\_daughter* [25] foram enviados três vezes seguidas, de acordo com o observado na Figura 4.4 que mostra o gráfico de ocupação de banda na recepção dos vídeos. A PSNR coletada representa a média das seis amostras geradas.

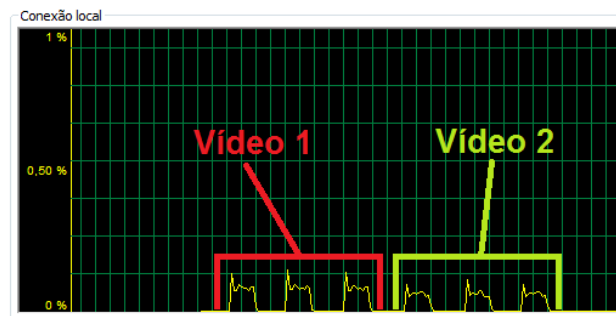


Figura 4.4 - Ocupação de banda mostrada no gerenciador do sistema operacional.

Neste cenário, o rádio servidor (TX) e o rádio cliente (RX) estão fixos, desta forma, a diminuição dos valores de potência foi realizada através da redução da potência de transmissão no rádio servidor, em intervalos de aproximadamente 3dB, que resultará na redução da SNR. A Figura 4.5 mostra os rádios utilizados, pertencentes à série *BreezeAccess* VL da fabricante Alvarion [28].

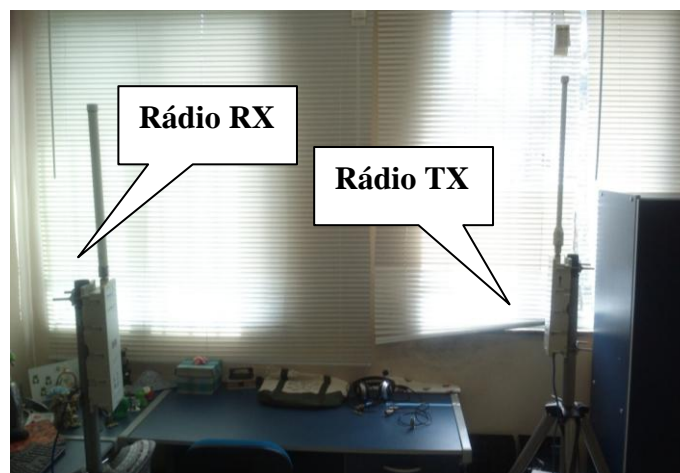


Figura 4.5 - Montagem dos equipamentos utilizados para a aferição de dados *indoor*



Os rádios transmissor e receptor utilizam o OFDM para transmissão de dados, e, suas configurações são descritas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Configuração dos rádios Alvarion BreezeAccess VL.

| <b>Itens</b>              | <b>Especificação</b> |
|---------------------------|----------------------|
| Frequência de Operação    | 5725-5850 MHz        |
| Largura banda             | 10-20 MHz            |
| Nº de pontos da IFFT/FFT  | 64 pontos            |
| Nº de sub-canais de dados | 48 canais            |
| FEC                       | 1/2, 2/3 e 3/4       |
| Prefixo cíclico           | 1/4                  |

O objetivo das medições com os equipamentos, descritos anteriormente, é verificar a queda da qualidade do vídeo recebido, quando a SNR do canal é reduzida em função da atenuação do sinal recebido. Neste cenário controlado a opção de modulação adaptativa foi desabilitada, com isso, diversas medições foram realizadas em cada modulação com base nas seguintes etapas:

- Transmitir dois vídeos diferentes três vezes seguidas, em cada modulação, para diversos valores de SNR.
- Realizar as transmissões até que os valores de SNR alcancem o mínimo tolerável para a modulação selecionada.
- Analisar os dados obtidos das medições e compara-los com os dados gerados a partir de simulações.

Após a realização das medições, é necessária a análise dos dados coletados em busca de padrões de comportamento e, possíveis relações entre o desempenho na camada física e a perda de qualidade do vídeo recebido. Os valores de SNR serão convertidos para  $E_b/N_0$  (SNR por bit), sendo esta uma métrica normalizada que representa a qualidade do canal de comunicação. A relação entre SNR e  $E_b/N_0$  é descrita na equação (4.1) [17].

$$SNR = \frac{E_b}{N_0} \times \frac{bN_s r}{BT_s} \quad (4.1)$$

Onde:

$E_b \rightarrow$  Energia do bit, J

$N_0 \rightarrow$  Densidade espectral de potência do ruído, W/Hz

$T_s \rightarrow$  Duração de um símbolo OFDM, s

$B \rightarrow$  Largura de banda do sistema, Hz

$N_s \rightarrow$  Número de sub-canais de dados

$r \rightarrow$  Taxa de codificação do FEC

$b \rightarrow$  Número de bits alocados por sub-canal

Em termos gerais, é verificada pela equação (4.1) que a SNR é expressa pela  $E_b/N_0$  multiplicada pela eficiência espectral do sistema (EES) de transmissão OFDM em bits/s/Hz. Pode-se então representar a SNR em dB através da seguinte equação.

$$SNR_{dB} = 10 \log_{10} \left( \frac{E_b}{N_0} \right) + 10 \log_{10} (EES) \quad (4.2)$$

A conversão para  $E_b/N_0$  é necessária, pois, a comparação entre dados medidos e dados simulados se torna válida quando valores normalizados são utilizados.

#### 4.3 - SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Dentro da proposta deste trabalho, é necessária a obtenção de dados através de simulações para que os mesmos sejam comparados com os dados experimentais, coletados nas medições. Para tanto, o ambiente computacional Matlab® foi utilizado no processo de simulação, onde o mesmo dispõe de ferramentas (*toolboxes*) adequadas, utilizadas para descrever sistemas de comunicação de dados.

Para a realização das simulações, foi necessário idealizar um modelo de sistema para a representação da transmissão de vídeo em um sistema OFDM. Com base nos elementos

descritos no capítulo anterior, as simulações realizadas seguiram o padrão do modelo descrito na Figura 4.6. Detalhes sobre este modelo são mostrados no Anexo A deste trabalho.

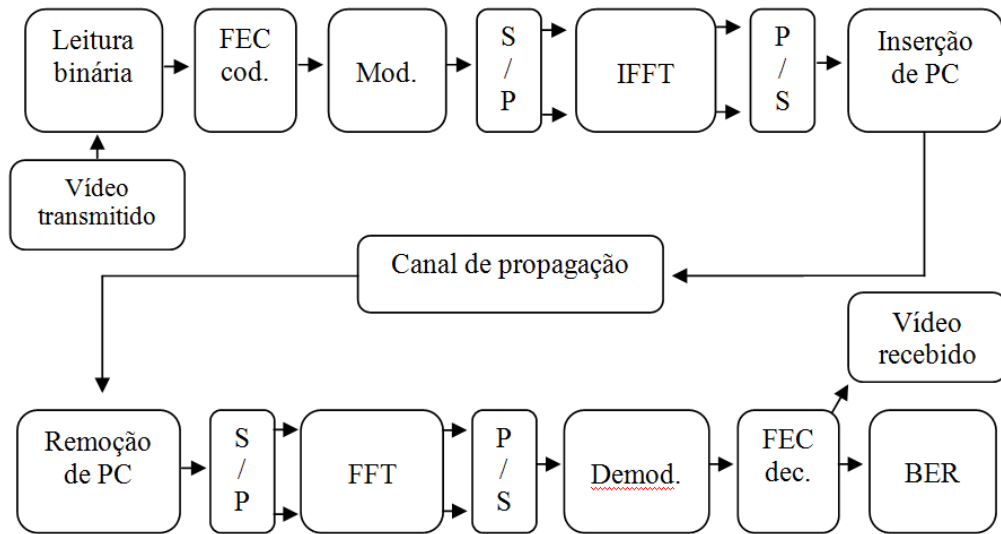


Figura 4.6 - Etapas envolvidas na simulação do sistema OFDM

O bloco “*FEC cod.*” representa a codificação de canal envolvida no processo de tratamento da informação, baseada em um codificador externo e um interno, conforme ilustrado na Figura 4.7. Devido o codificador RS ser implementado em apenas uma forma de codificação, a nomenclatura definida para as configurações do FEC será baseada na codificação convolucional.

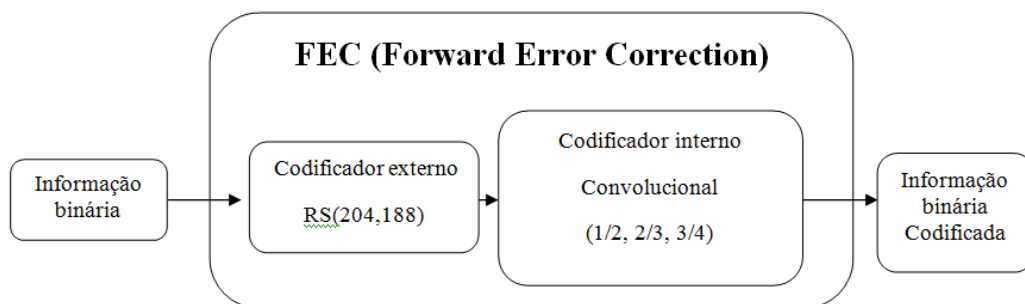


Figura 4.7 - Esquema da configuração no FEC

No bloco “*Canal de propagação*”, são utilizadas representações de canais AWGN e Rayleigh. Uma informação  $X$  que passa por um canal  $H$  sujeito a um ruído  $N$ , resulta em uma informação recebida  $Y$ , representada por:

$$Y = X * H + N \quad (4.3)$$

Nesta formulação,  $N$  é um ruído gaussiano e  $H$  representa um canal Rayleigh. Nas simulações que envolvem apenas o canal gaussiano, a operação de convolução não é utilizada.

Os dados utilizados para a simulação foram obtidos do vídeo *News* [25] codificado em H.264/AVC com duração de 10 segundos. Este arquivo será carregado através de leitura binária usando a função *fopen*, disponível no Matlab®.

#### 4.4 - ANÁLISE DOS DADOS

Realizadas as medições *outdoor* e *indoor*, os dados coletados foram divididos em quatro grupos de acordo com as modulações utilizadas. Neste experimento, a estratégia adotada se baseia na mesma utilizada em [29], onde o principal interesse não é a verificação da qualidade do vídeo recebido, e sim, perda de qualidade do vídeo, resultante do canal de propagação da informação, em um dado nível de  $E_b/N_0$ .

Como dito anteriormente, a métrica utilizada para medir a qualidade do vídeo é a PSNR, sendo assim, este estudo se baseou na análise da perda na PSNR. A Figura 4.8 explica a perda de qualidade do vídeo nos processos de codificação, transmissão e decodificação. A metodologia aplicada está focada na análise da perda de PSNR do vídeo em função de sua transmissão no canal.

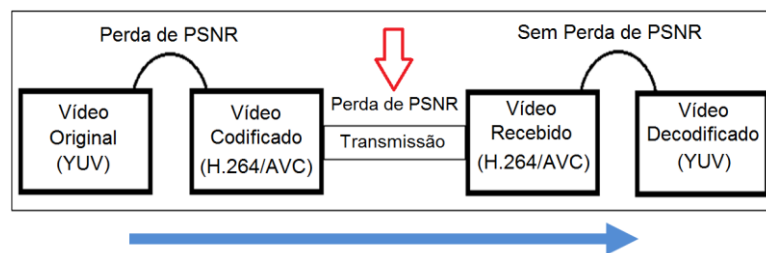


Figura 4.8 - Ocorrência de perda de PSNR no processo de transmissão do vídeo

Como base na Figura 4.8, deve-se analisar a perda de qualidade do vídeo nas duas situações existentes (codificação e transmissão).

Um vídeo é composto por vários quadros, responsáveis pela criação da sensação de movimento. Quando se compara um vídeo original com ele mesmo, a sua PSNR possui um valor indefinido. Para entender este conceito, deve-se conhecer o cálculo da PSNR entre dois

vídeos, que é realizado quadro a quadro, de acordo com a formulação composta pelas equações 4.4 e 4.5 [30]:

$$MSE = \frac{1}{mn} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} (I(i, j) - K(i, j))^2 \quad (4.4)$$

$$PSNR = 10 \log_{10} \left( \frac{MAX_I^2}{MSE} \right) \quad (4.5)$$

Onde:

$MSE$  - Erro quadrático médio

$I(i,j)$  - Matriz que compõe um quadro transmitido

$J(i,j)$  - Matriz que compõe um quadro recebido

$m$  e  $n$  - Representam a dimensão do quadro

$MAX_I$  - É o valor máximo do pixel da imagem

Para uma imagem com precisão de oito bits por pixel, o valor máximo que o mesmo pode assumir é 255, portanto,  $MAX_I$  assume o valor de 255, ou  $2^N - 1$ , onde  $N$  é o número bits usados para quantificar um pixel em uma imagem.

Para uma melhor análise da imagem, a mesma é decomposta em uma componente de luminância (Y) e duas de crominância (UV) gerando assim o formato YUV. Na maioria dos casos uma imagem é composta de pixels representados por 24 bits, sendo 8 bits para a componente Y, 8 bits para a componente U e, 8 bits para a componente V.

Nas simulações realizadas utilizou-se apenas o cálculo da PSNR na componente Y, pois a visão humana apresenta maior sensibilidade às mudanças ocorridas nesta componente [31].

#### 4.4.1 - Codificação

No processo de codificação, o vídeo apresenta perda de PSNR devido ao processo de compressão aplicado. O codec de compressão mais utilizado para transmissão de vídeo é o MPEG-4/AVC [32], sendo este o codec aplicado neste estudo.

#### 4.4.2 - Transmissão

A transmissão de vídeo em tempo real, seja em uma rede sem fio (WiFi, WiMAX, LTE e etc.) ou em rádio difusão (TV digital), pode apresentar perda de informação devido a degradação do canal de comunicação, impactando diretamente na perda de quadros (rede sem fio) ou na degradação dos mesmos (rádio difusão).

#### 4.4.3 - Decodificação

Após a codificação e transmissão de um vídeo, o mesmo, após ser recebido, passa por um processo de decodificação para depois ser apresentado ao usuário. O processo de decodificação não apresenta perdas.

#### 4.4.4 - Cálculo da Perda de Qualidade

Para calcular a perda de qualidade (perda de PSNR) em função do canal de transmissão, a metodologia pode ser avaliada de maneira muito similar à propagação de sinais. A Figura 4.9 mostra a analogia utilizada neste estudo.

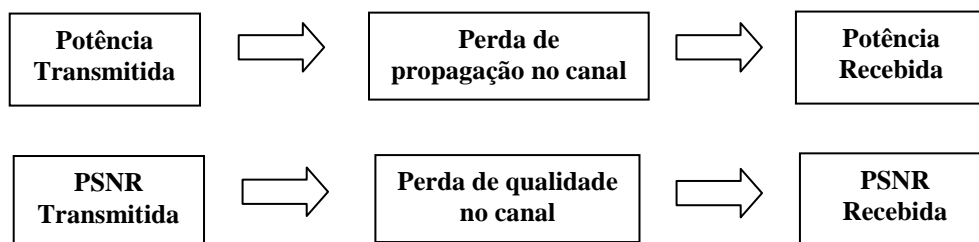


Figura 4.9 - Analogia entre perda de propagação e perda de qualidade

Da mesma forma que os estudos em propagação de sinais buscam modelar a influência do meio na perda do sinal, este estudo tem seu foco voltado para a perda de qualidade em função do meio de transmissão, mais especificamente o sem fio. Sendo assim, tem-se a seguinte modelagem inicial para a análise proposta com unidade em dB.

Perda de Qualidade = Qualidade Transmitida – Qualidade Recebida

$$PERDA_{PSNR} = PSNR_T - PSNR_R$$

$PERDA_{PSNR} \rightarrow$  Resultante da modulação, SNR, BER, e outros.

Onde:

$PERDA_{PSNR}$  - Perda de qualidade na passagem pelo canal, dB

$PSNR_T$  - PSNR transmitida, dB

$PSNR_R$  - PSNR recebida, dB

A aferição de dados nos ambientes *indoor* e *outdoor*, bem como as simulações, se basearam na coleta da PSNR recebida. Sendo assim, a perda de PSNR foi encontrada através da diferença entre a PSNR transmitida (após a codificação H.264/AVC) e a PSNR recebida. Partindo desta análise teórica, precisa-se adequar esta metodologia ao *software* utilizado (Evalvid). O programa Evalvid realiza comparações entre vídeos usando representação YUV. Desta forma, os vídeos a serem comparados precisam estar neste formato. A Figura 4.10 mostra em que etapas do processo de transmissão e recepção ocorrem conversões para YUV.

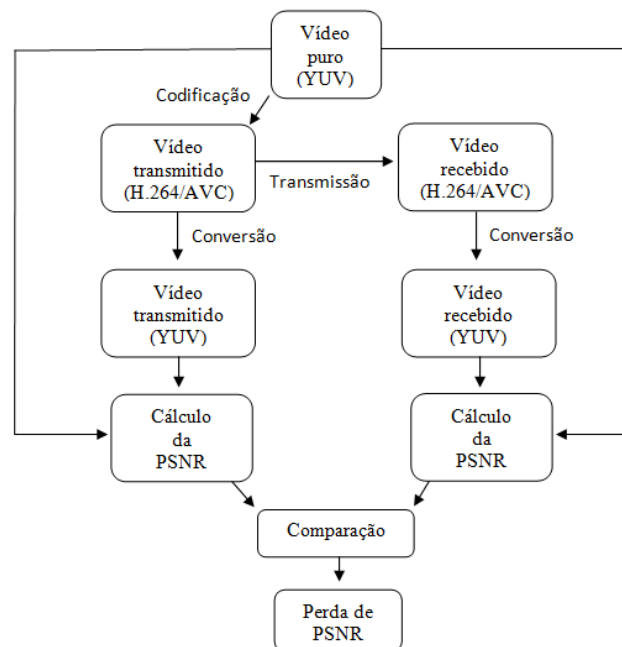


Figura 4.10 - Ilustração da perda de PSNR no processo de transmissão e recepção do vídeo

Durante a conversão do vídeo recebido para YUV, o vídeo não apresenta perdas. Esta comparação entre vídeo transmitido e recebido resulta em um valor de perda de PSNR para cada modulação em um dado valor de  $E_b/N_0$  ou BER no canal.

#### 4.5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo, foram descritas as etapas que compõe a metodologia deste trabalho. As campanhas de medição realizadas foram explicadas, bem como o procedimento empregado para a análise dos dados coletados. No próximo capítulo serão mostrados os resultados obtidos com base nas campanhas de medição realizadas.



## CAPÍTULO 5 - DADOS COLETADOS E MODELAGEM

### 5.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Com base na metodologia exposta no capítulo anterior, campanhas de medições e simulações foram realizadas. Desta forma, os dados foram coletados e comparados. Os valores de SNR aferidos foram convertidos para  $E_b/N_0$  (valor normalizado), de acordo com o exposto no capítulo anterior. Sendo assim, de posse destas informações, diversos gráficos foram gerados e observados. Neste capítulo também, é mostrada a modelagem proposta que possui como base fundamental a relação entre BER e perda de PSNR, independentemente do tipo de canal, modulação ou codificação de canal empregada.

### 5.2 - SIMULAÇÕES

As simulações realizadas nos programas desenvolvidos em Matlab® foram divididas em diversas configurações, variando os tipos de modulação, a taxa de codificação no FEC, sendo que para a codificação RS foi mantida uma única configuração. Desta forma, como primeira análise, pode-se avaliar o desempenho das configurações utilizadas em nível de BER. Isto posto, os primeiros dados obtidos são baseados no FEC com a utilização de codificação RS(204,188,8) concatenado com a codificação Convolutacional com razão 1/2, 2/3 e 3/4. Estes estão representados nas Figuras 5.1 e 5.2, para canais AWGN e Rayleigh.

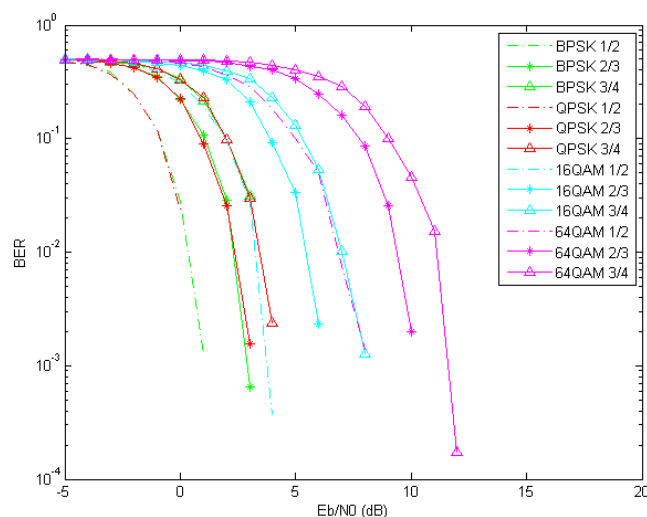


Figura 5.1 -  $E_b/N_0$  vs BER para as modulações BPSK, QPSK, 16QAM e 64QAM com FEC 1/2, 2/3 e 3/4 em canal AWGN.

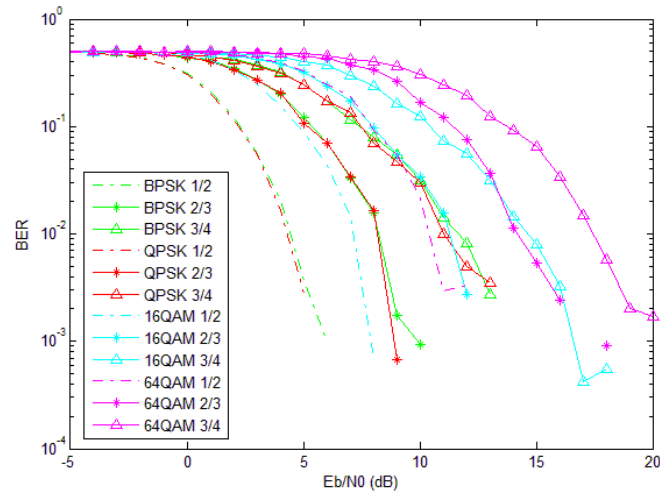


Figura 5.2 -  $E_b/N_0$  vs BER para as modulações BPSK, QPSK, 16QAM e 64QAM com FEC 1/2, 2/3 e 3/4 em canal Rayleigh.

A partir das figuras mostradas, pode se perceber uma maior degradação nas simulações com o canal Rayleigh quando comparadas com as simulações em canal AWGN. Estas simulações representam apenas a degradação a nível físico (BER). Entretanto, existem os dados extraídos da perda PSNR que também são representados em função de  $E_b/N_0$ , conforme mostrado nas Figuras 5.3-5.6.

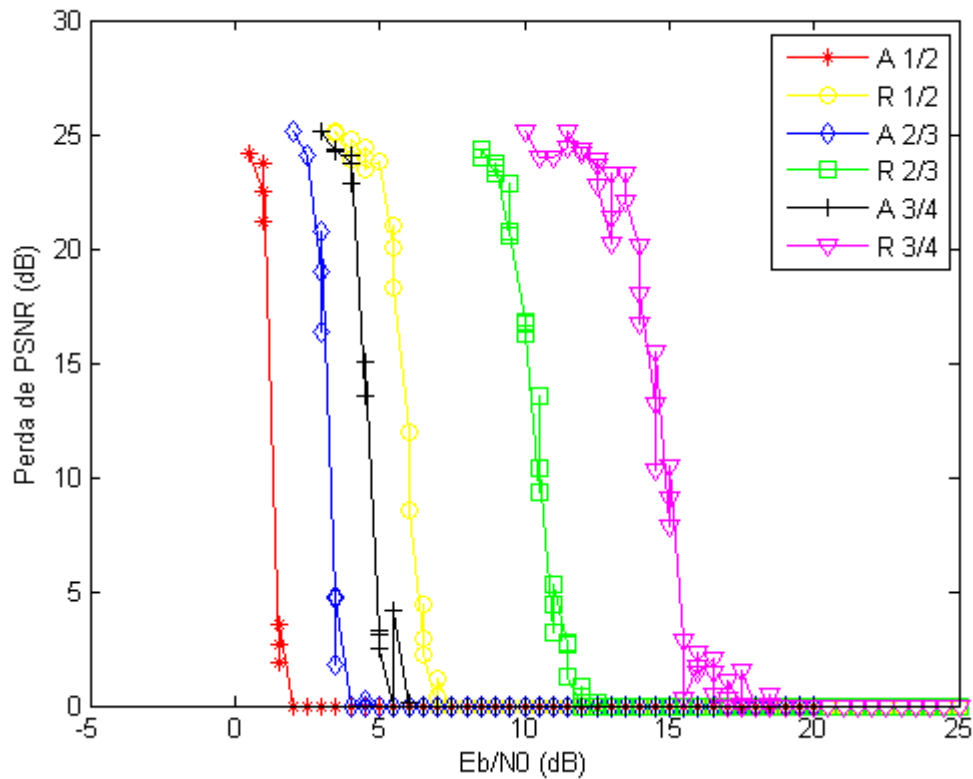


Figura 5.3 - Perda de PSNR para a modulação BPSK com três variações de FEC em canal AWGN (A) e Rayleigh (R).

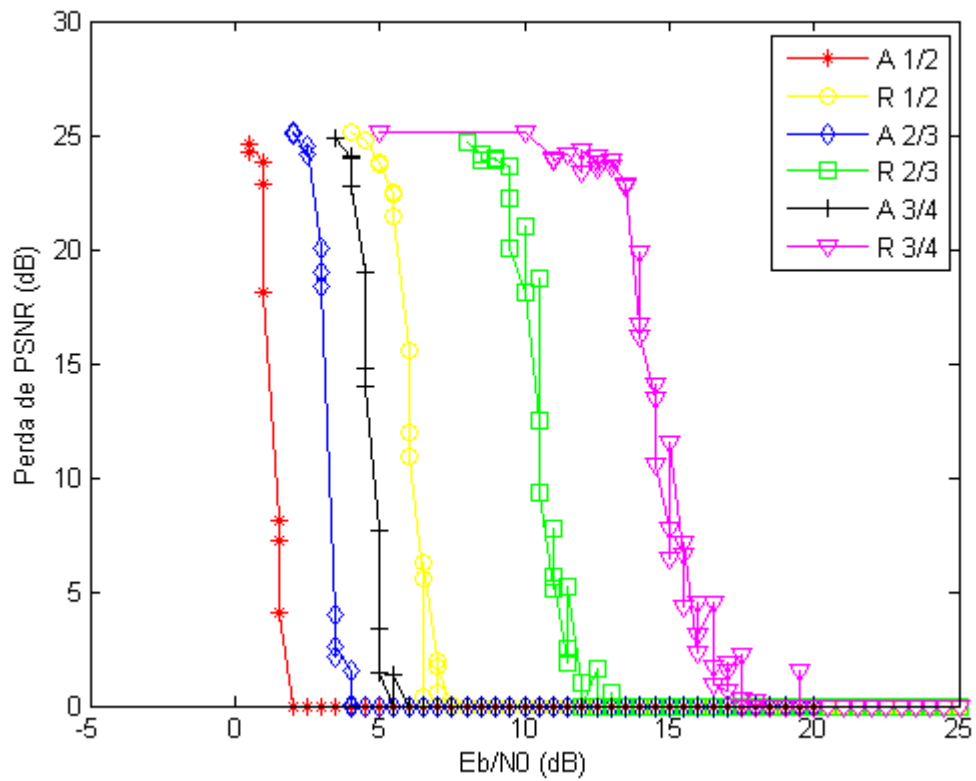


Figura 5.4 - Perda de PSNR para a modulação QPSK com três variações de FEC em canal AWGN (A) e Rayleigh (R).

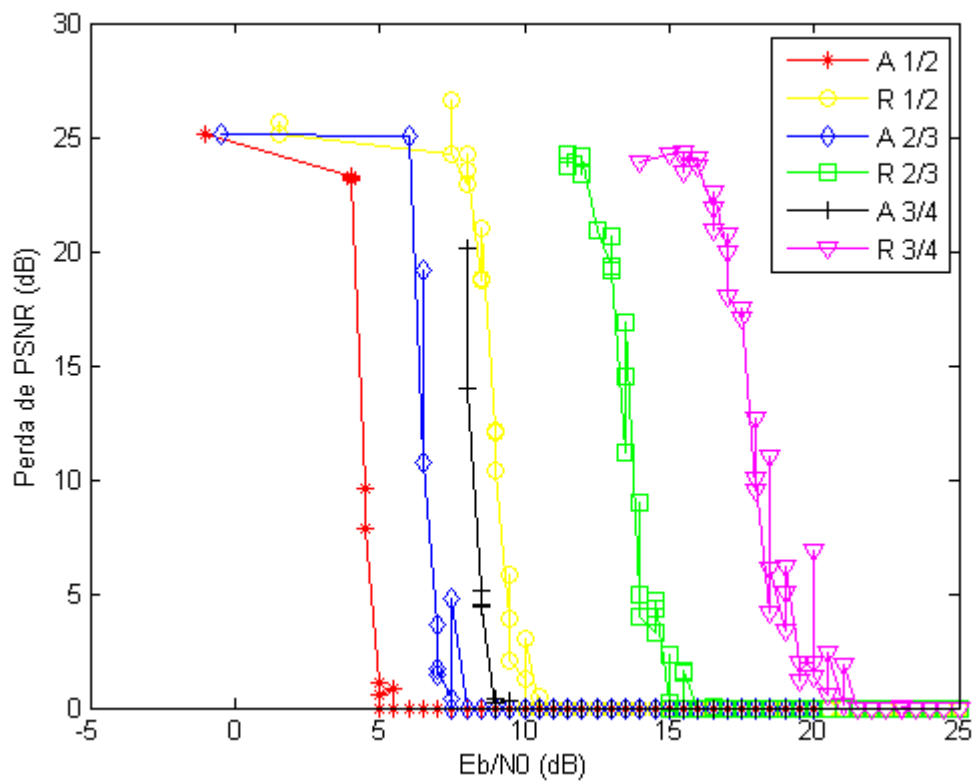


Figura 5.5 - Perda de PSNR para a modulação 16QAM com três variações de FEC em canal AWGN (A) e Rayleigh (R).

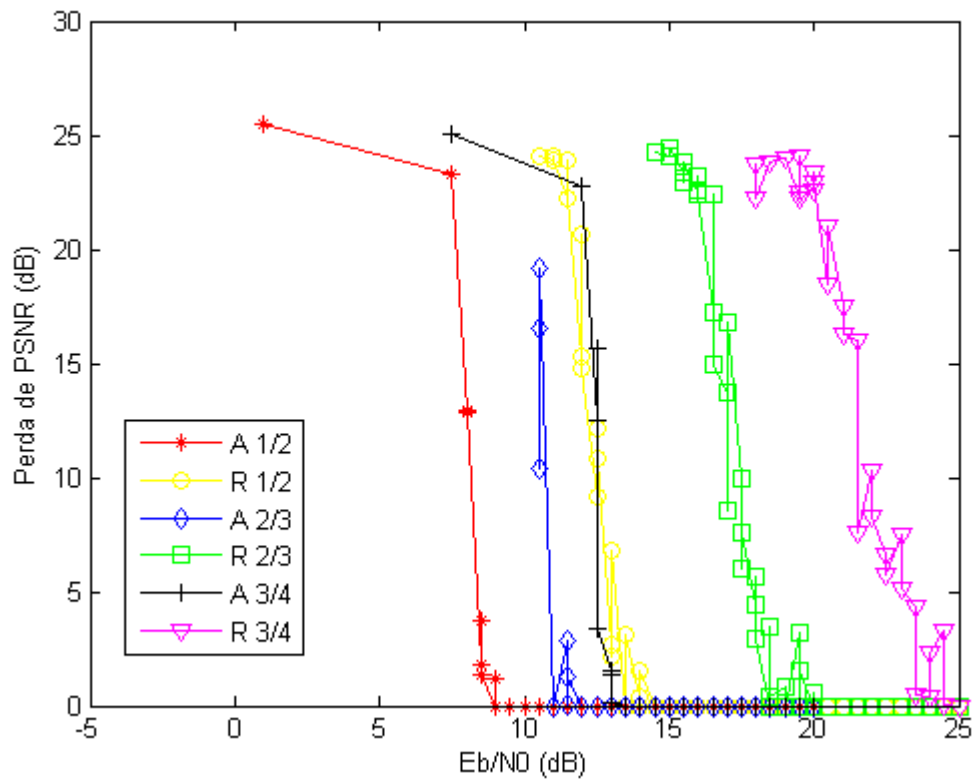


Figura 5.6 - Perda de PSNR para a modulação 64QAM com três variações de FEC em canal AWGN (A) e Rayleigh (R).

Analisando os gráficos de perda de PSNR em função de  $E_b/N_0$ , pode-se perceber que alguns resultados possuem mais amostras que outros. Isto se deve ao fato de que nem todos os vídeos degradados puderam ser reconstruídos, em função do elevado grau de corrupção que as vezes os arquivos apresentavam.

Após realizar as simulações, todos os dados referentes à perda de PSNR foram agrupados e representados em função de suas respectivas taxas de erro de bit (BER). Estas informações podem ser vistas na Figura 5.7 onde é possível verificar uma tendência que representa todos os dados, embora estes sejam resultantes de diferentes simulações.

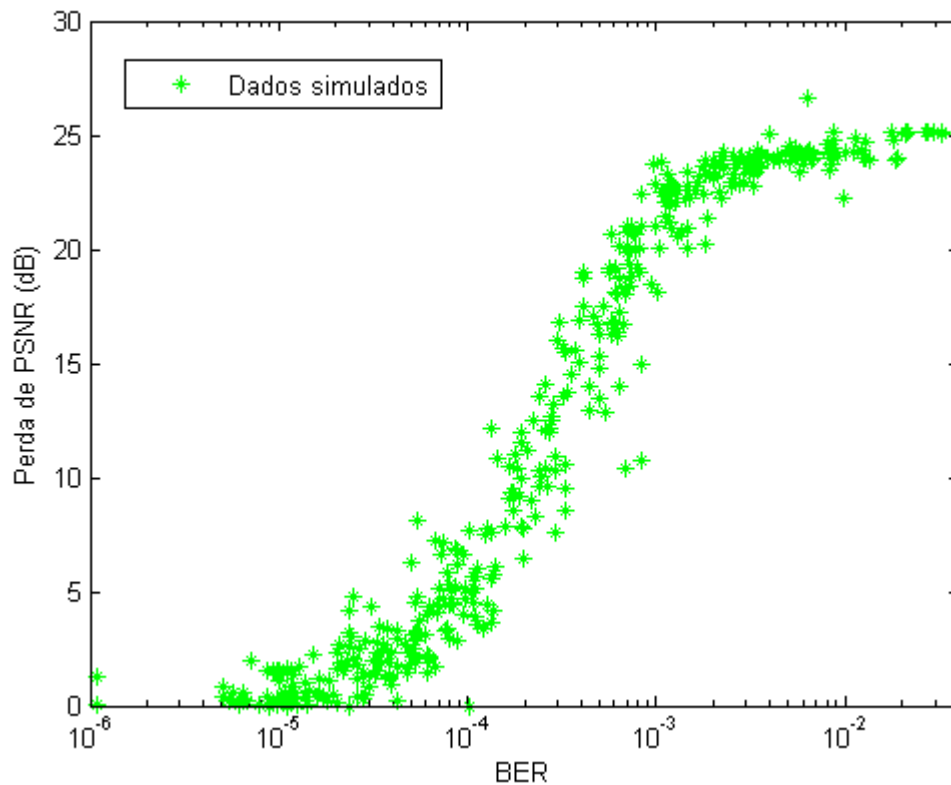


Figura 5.7 - Dados coletados a partir de todas as simulações realizadas

Os dados obtidos apresentam um comportamento médio quando a BER é usada como referência, de forma contrária ao que é descrito em [5] onde o autor afirma que existe uma dissociação entre BER e PSNR, em função do tipo de codificação de canal utilizada. Com base nesta afirmação, a modelagem BER vs PSNR não apresenta viabilidade, entretanto, os dados gerados retificam o que é afirmado em [5], uma vez que, as perdas de PSNR são apenas valores normalizados de PSNR, que visam apenas unificar a abordagem que será usada na modelagem. Outra conclusão, diferente da exposta em [5], é a percepção de que a relação entre BER e PSNR (ou Perda de PSNR) apresenta comportamento exponencial.

### 5.3 - MEDIÇÕES *OUTDOOR*

Durante as medições *outdoor* diversas aferições foram realizadas no percurso descrito (Figura 4.1) no capítulo anterior. Como resultado, foi obtido comportamento da perda de PSNR do vídeo recebido vs  $E_b/N_0$  do canal de propagação. As Figuras 5.1 e 5.2 apresentam os dados coletados para as modulações 16QAM e 64QAM FEC com codificação 3/4.

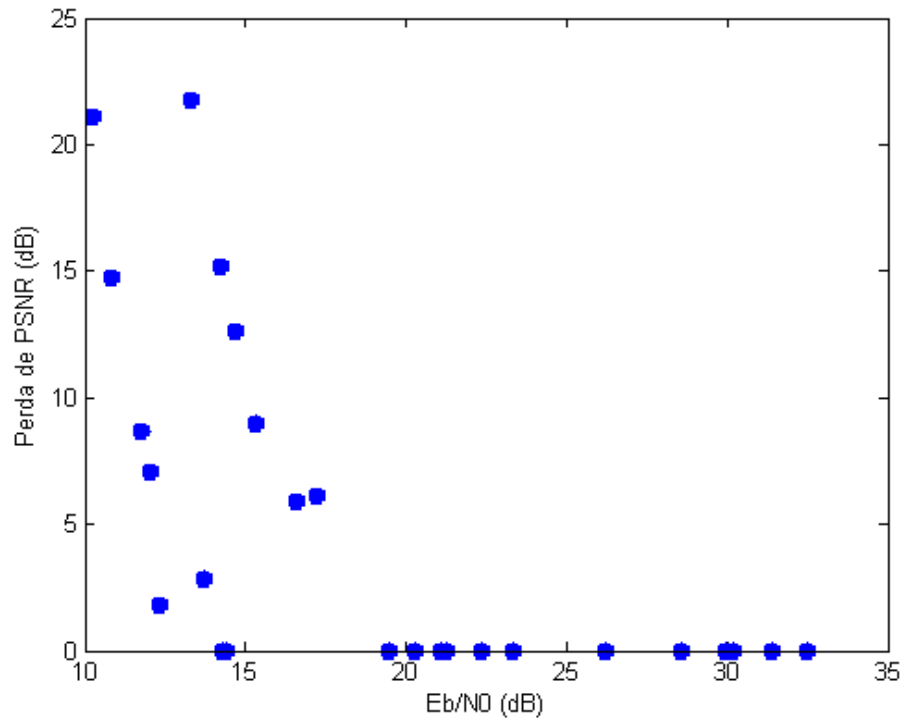


Figura 5.8 - Perda de PSNR para Modulação 16QAM com FEC 3/4 em ambiente *outdoor*

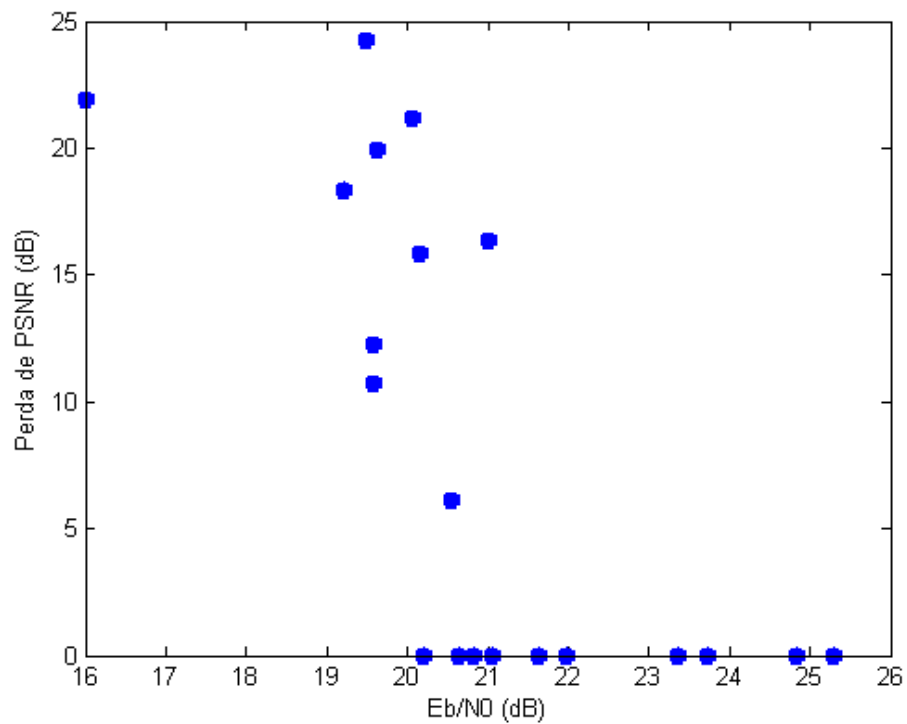


Figura 5.9 – Perda de PSNR para Modulação 64QAM com FEC 3/4 em ambiente *outdoor*

#### 5.4 - MEDIÇÕES *INDOOR*

Além das medições *outdoor*, diversas medições *indoor* foram realizadas dentro do laboratório de Computação e Telecomunicações (LCT).

Estas medições foram realizadas de forma similar às medições *outdoor*, com o diferencial de que os vídeos utilizados apresentavam resoluções inferiores, o que possibilitou a utilização de todas as modulações em função da menor ocupação de banda. A variação da SNR do canal era obtida através da alteração da potência de transmissão no rádio servidor. Este estudo foi necessário para verificar a limitação de cada modulação na conservação da qualidade do vídeo transmitido. As Figuras 5.10-5.13 mostram os resultados obtidos com transmissões de vídeo em cada modulação utilizando um FEC com codificação 3/4.

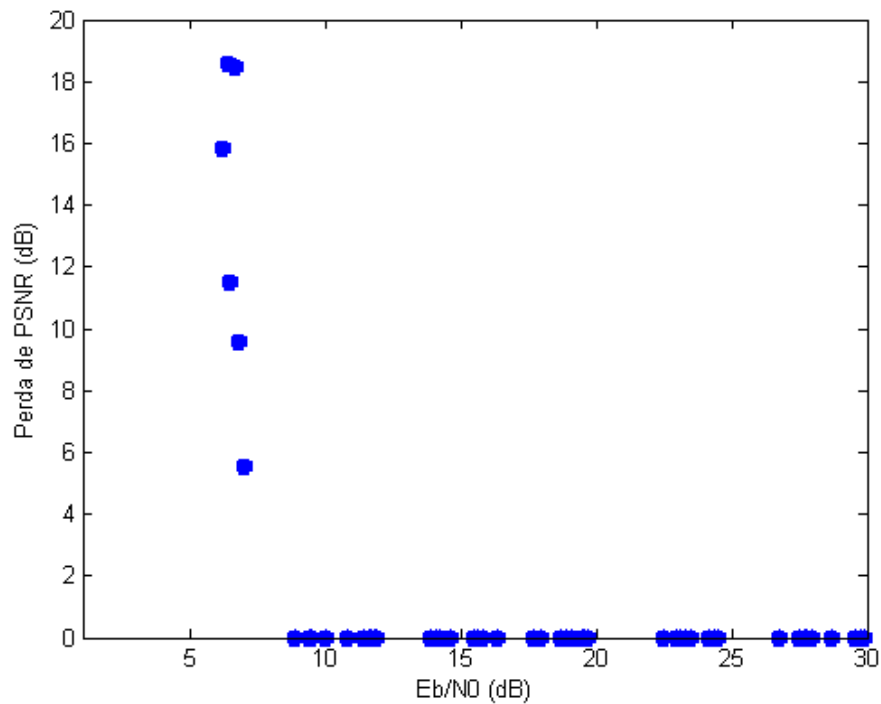


Figura 5.10 - Perda de PSNR versus Eb/N0 para a modulação BPSK

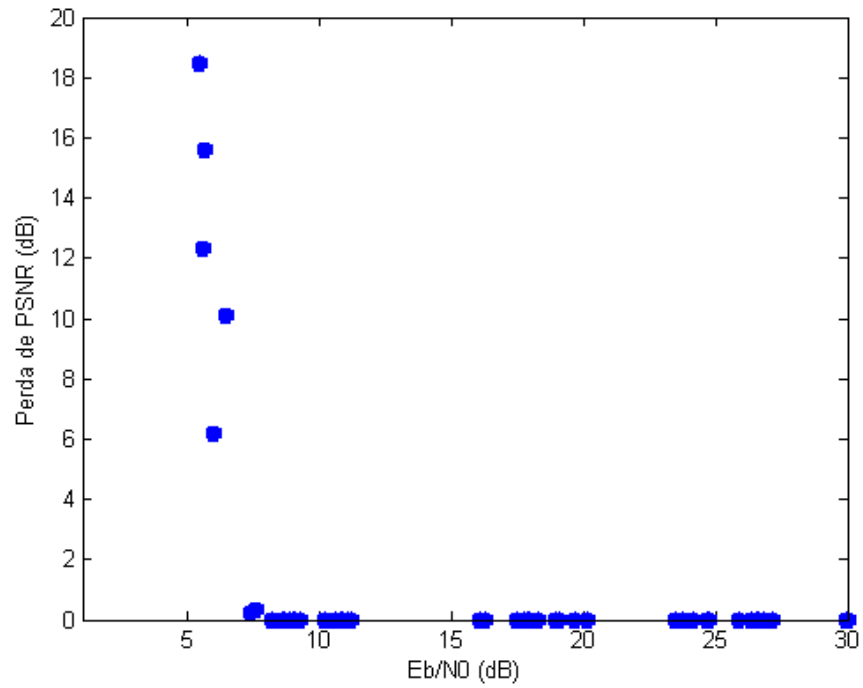


Figura 5.11 - Perda de PSNR versus  $E_b/N_0$  para a modulação QPSK

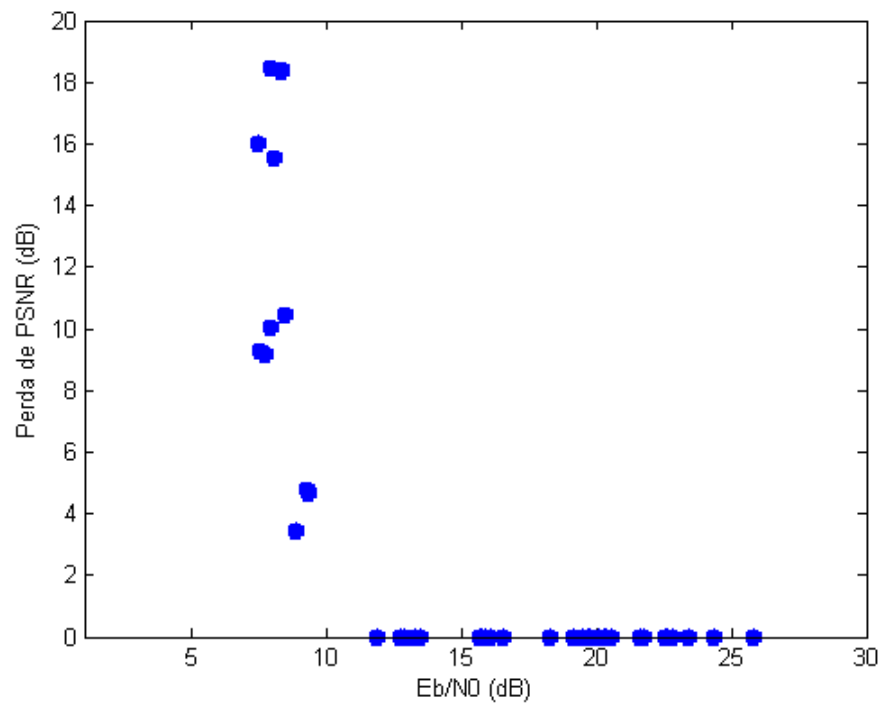


Figura 5.12 - Perda de PSNR versus  $E_b/N_0$  para a modulação 16 QAM



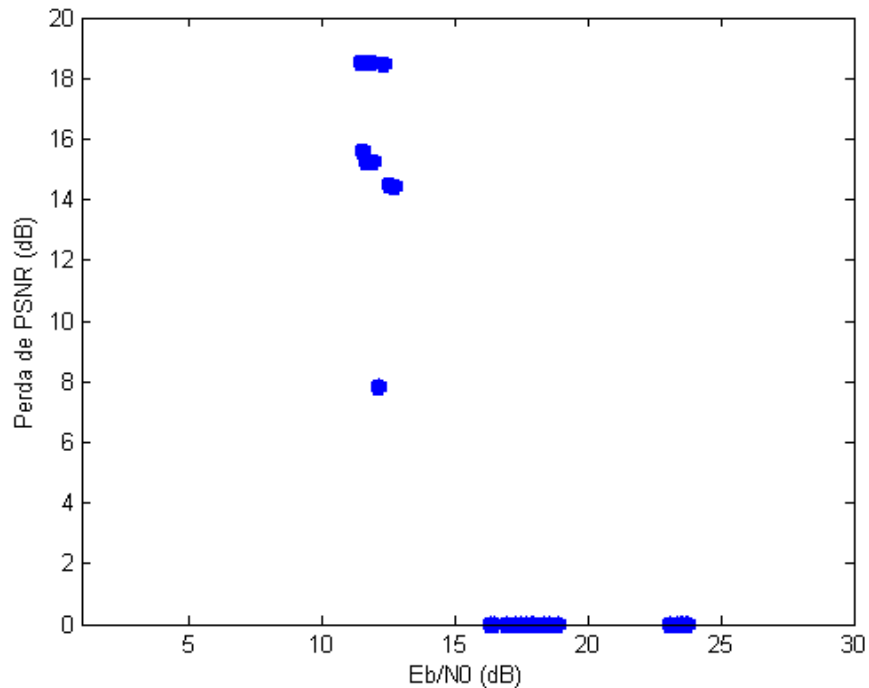


Figura 5.13 - Perda de PSNR vs Eb/N0 para a modulação 64 QAM

Analisando nas figuras mostradas anteriormente, é notável a limitação de cada modulação em função da redução dos valores de Eb/N0. A próxima seção mostrará os efeitos da degradação do canal nos *frames* dos vídeos, recebidos em todos os cenários (simulados e reais) estudados neste trabalho.

## 5.5 - CONSEQUÊNCIAS DA DEGRADAÇÃO DO CANAL PARA O VÍDEO

Neste tópico serão expostos os resultados visuais obtidos a partir dos dados coletados nas simulações e nos ambientes reais.

### 5.5.1 - Dados Obtidos de Simulações

As simulações realizadas foram configuradas para cenários com canais AWGN e Rayleigh com o vídeo *news*, resultando em diversas amostras de vídeos degradados. As Figuras de 5.14 a 5.21 mostram vídeos degradados para o mesmo valor de Eb/N0 em diferentes configurações de FEC para as modulações BPSK, QPSK, 16QAM e 64QAM.

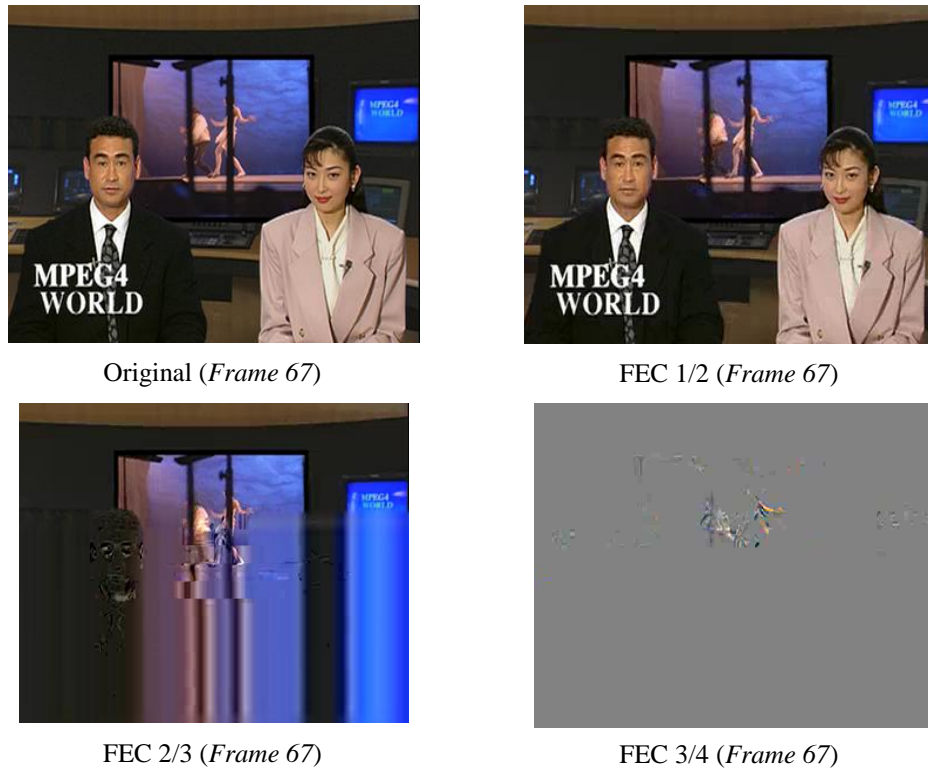


Figura 5.14 - Degradação do vídeo para modulação BPSK com  $E_b/N_0 = 3$  dB em canal AWGN

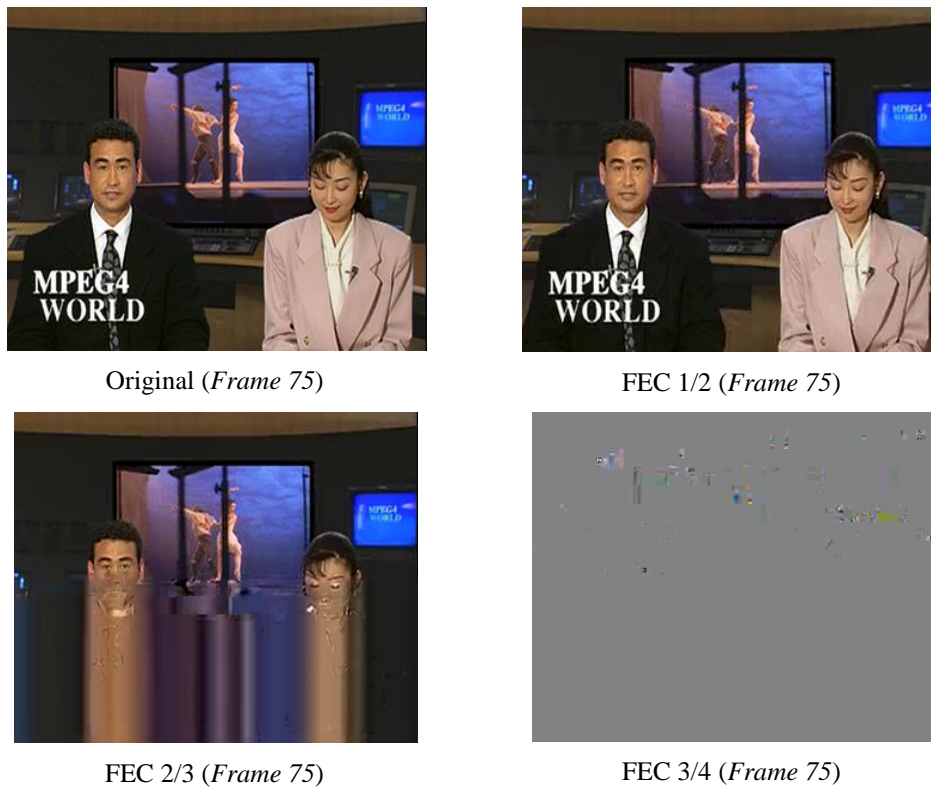


Figura 5.15 - Degradação do vídeo para modulação BPSK com  $E_b/N_0 = 10$  dB em canal Rayleigh



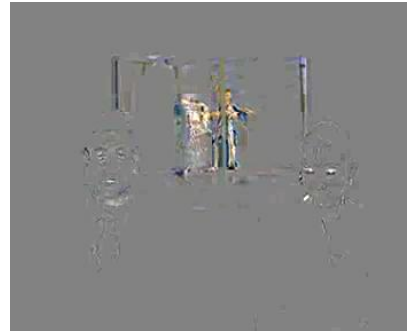
Original (Frame 73)



FEC 1/2 (Frame 73)



FEC 2/3 (Frame 73)



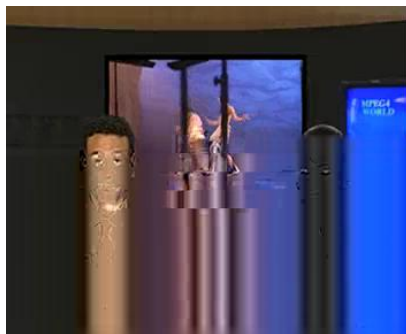
FEC 3/4 (Frame 73)

Figura 5.16 - Degradação do vídeo para modulação QPSK com  $E_b/N_0 = 4$  dB em canal AWGN

Original (Frame 68)



FEC 1/2 (Frame 68)



FEC 2/3 (Frame 68)



FEC 3/4 (Frame 68)

Figura 5.17 - Degradação do vídeo para modulação QPSK com  $E_b/N_0 = 11$  dB em canal Rayleigh



Original (Frame 138)



FEC 1/2 (Frame 138)



FEC 2/3 (Frame 138)



FEC 3/4 (Frame 138)

Figura 5.18 - Degradação do vídeo para modulação 16QAM com  $E_b/N_0 = 8$  dB em canal AWGN

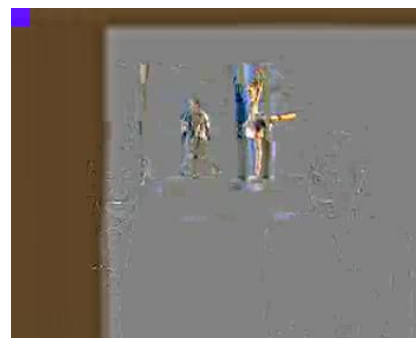
Original (Frame 35)



FEC 1/2 (Frame 35)



FEC 2/3 (Frame 35)



FEC 3/4 (Frame 35)

Figura 5.19 - Degradação do vídeo para modulação 16QAM com  $E_b/N_0 = 15,5$  dB em canal Rayleigh

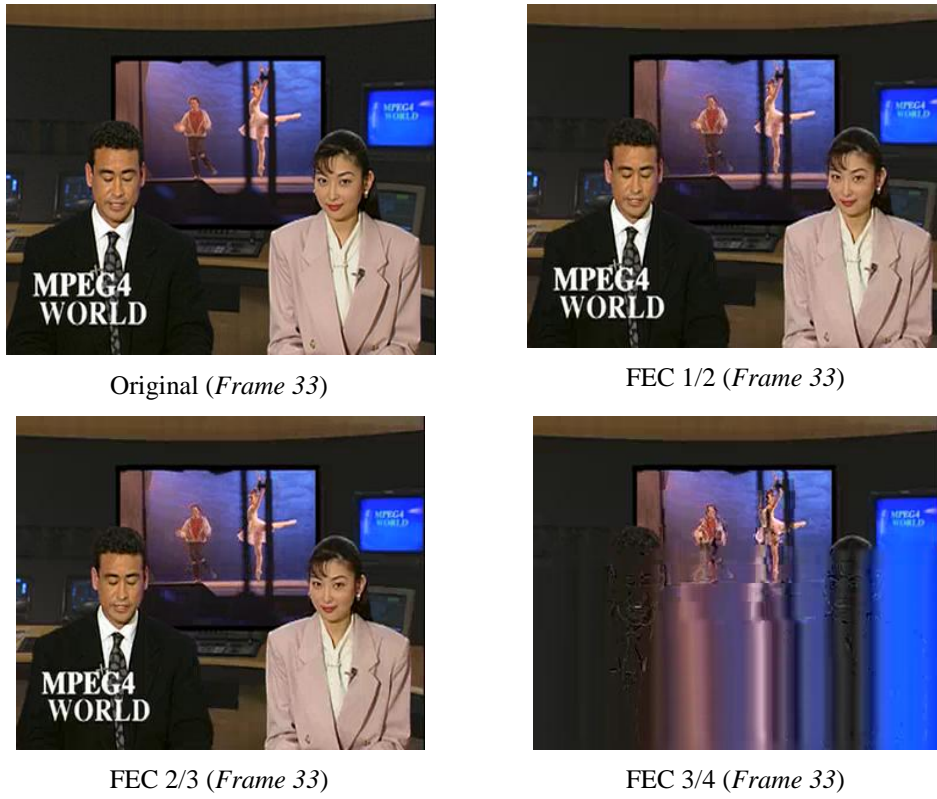


Figura 5.20 - Degradação do vídeo para modulação 64QAM com  $E_b/N_0 = 12$  dB em canal AWGN

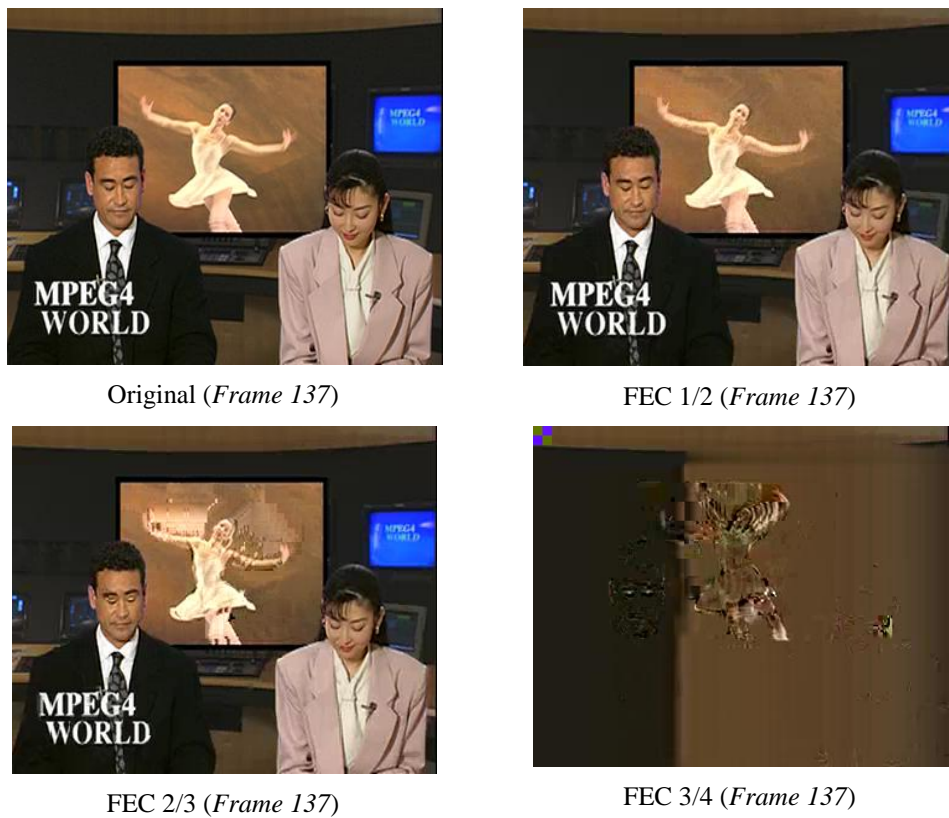


Figura 5.21 - Degradação do vídeo para modulação 64QAM com  $E_b/N_0 = 18$  dB em canal Rayleigh

Conforme observado nas imagens expostas, é notável que a diferença de desempenho na recepção do vídeo está relacionada com razão do FEC utilizado. A menor razão (FEC 1/2) possui mais informação redundante, necessária para garantir uma maior capacidade de correção, que para um mesmo valor de  $E_b/N_0$ , apresentará uma menor BER quando comparada com outras razões de FEC.

Os valores de  $E_b/N_0$ , escolhidos para a geração das imagens, foram tais para que houvesse a possibilidade de analisar diferentes codificações (1/2, 2/3 e 3/4) sobre as mesmas condições de canal, contudo, algumas amostras para FEC 2/3 não apresentaram degradação, pois, esta possui comportamento intermediário entre FEC 1/2 e FEC 3/4, podendo gerar perdas ou não, na qualidade do vídeo em determinadas situações. Neste contexto, pôde ser percebida uma diferença de aproximadamente 7dB nos valores de  $E_b/N_0$ , entre canais AWGN e Rayleigh, para que fosse notada uma degradação severa no vídeo recebido.

#### 5.5.1 - Dados Obtidos nas Medições *Indoor*

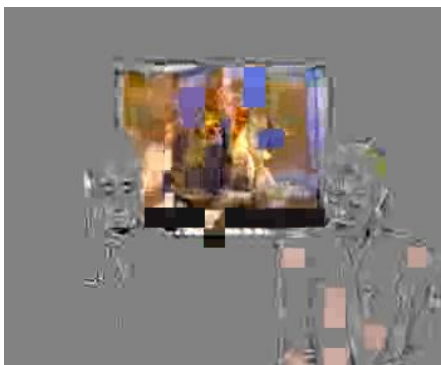
Os dados gerados foram obtidos das medições com o *testbed* descrito no capítulo 4. Nestas medições foram utilizados os vídeos *news* e *mather\_daughter*. Os exemplos de degradações sofridas pelos vídeos são mostrados na Figura de 5.22.



Pouca degradação (*Frame 232*)



Pouca degradação (*Frame 84*)



Muita degradação (*Frame 232*)



Muita degradação (*Frame 84*)

Figura 5.22 - Exemplos de degradação dos vídeos *news* e *mother\_daughter*, obtidos das medições *indoor*.

As degradações obtidas das medições *indoor* apresentam muitas similaridades com as degradações geradas por simulação. A numeração dos *frames* escolhidos para gerar as imagens são os mesmos, representando apenas a variação no impacto visual.

#### 5.5.1 - Dados Obtidos das Medições *Outdoor*

As medições realizadas em ambiente *outdoor* foram baseadas no vídeo *rush\_hour*. As Figuras 5.23 e 5.24 mostram exemplos de vídeos recebidos, íntegros e degradados, gerados nas medições *outdoor*.



Figura 5.23 - Exemplo de um vídeo íntegro recebido durante as medições *outdoor*



Figura 5.24 - Exemplo de um vídeo degradado recebido durante as medições *outdoor*

## 5.6 - COMPARAÇÕES ENTRE OS DADOS COLETADOS

Nesta seção os dados coletados nas medições *outdoor*, *indoor* e nas simulações são comparados, cujo objetivo é avaliar a representatividade das simulações que serão a base para a modelagem proposta neste trabalho.

### 5.6.1 - Comparação entre Aferições *Indoor* e Simulações

Para iniciar a análise comparativa os dados medidos em ambiente *indoor* são comparados com os dados simulados para uma transmissão em canal AWGN. Os dados obtidos nestas medições utilizam codificação FEC 3/4 bem como os dados simulados. As Figuras 5.25-5.28 mostram os dados aferidos em ambas as situações para as modulações 64QAM, 16QAM, QPSK e BPSK.

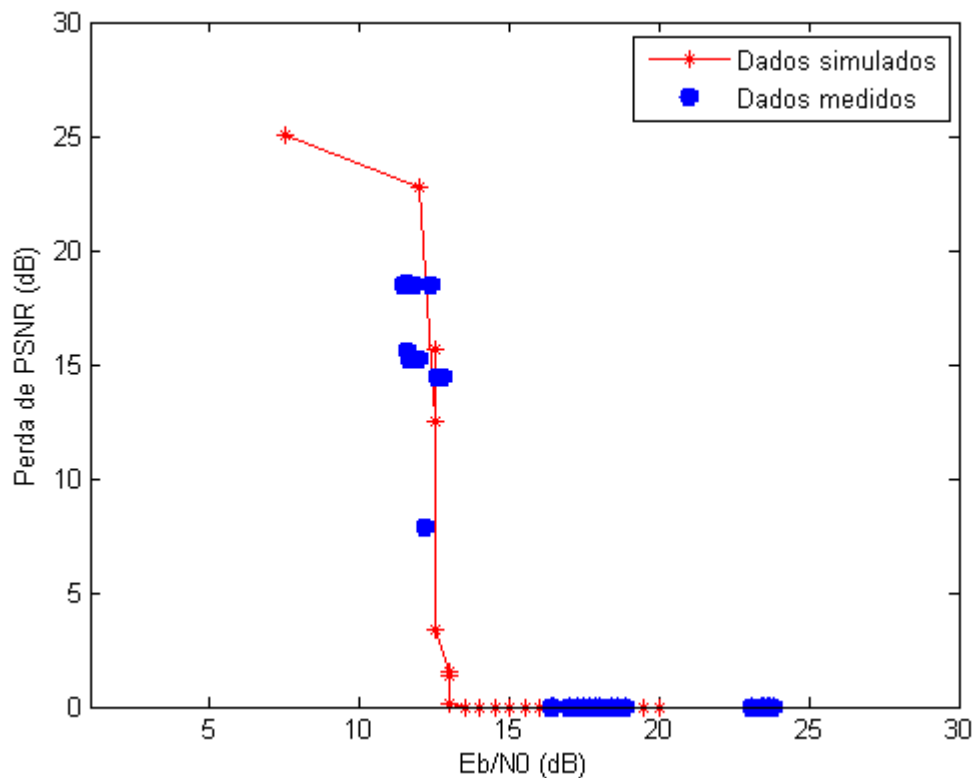


Figura 5.25 – Eb/N0 VS Perda de PSNR para a modulação 64QAM com FEC 3/4



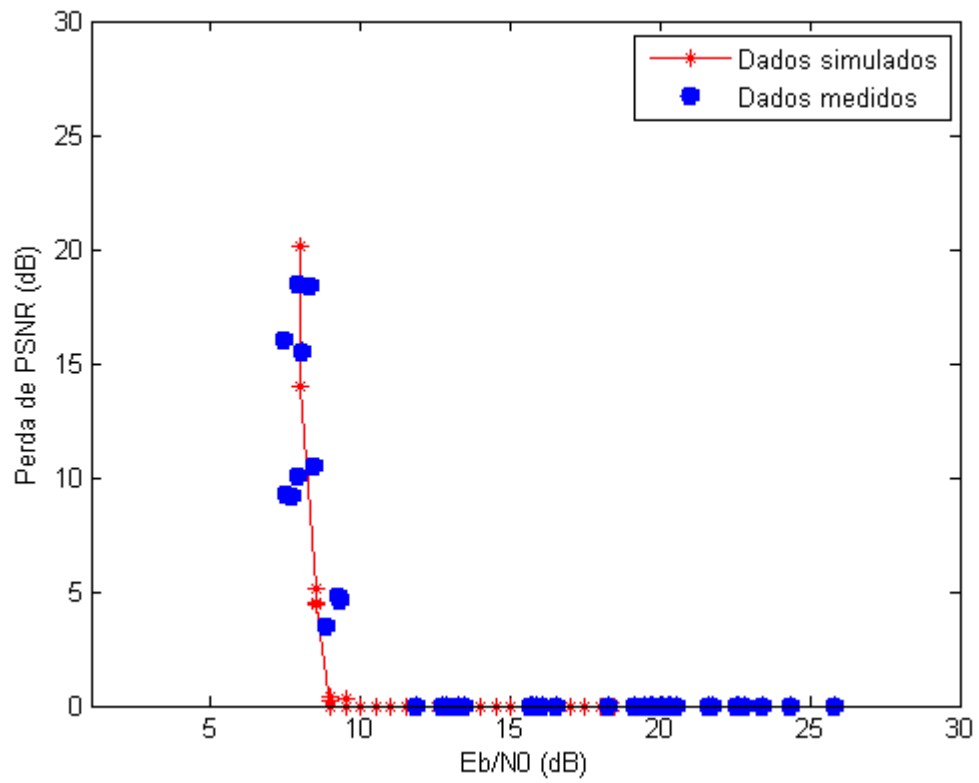


Figura 5.26 -  $E_b/N_0$  VS Perda de PSNR para a modulação 16QAM com FEC 3/4

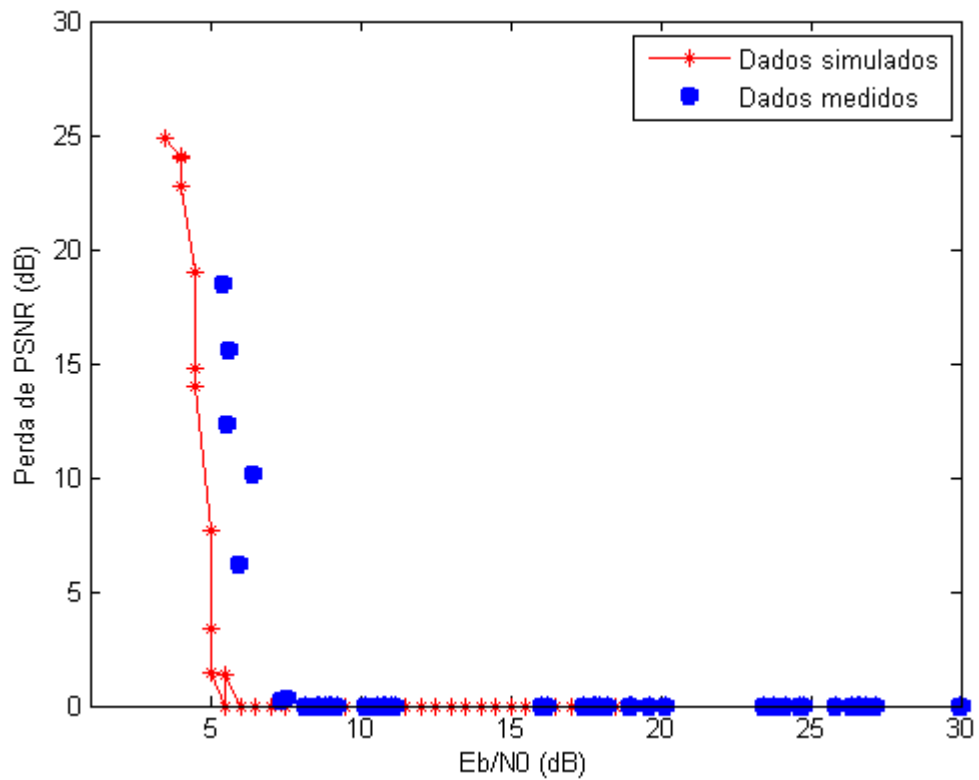


Figura 5.27 -  $E_b/N_0$  VS Perda de PSNR para a modulação QPSK com FEC 3/4

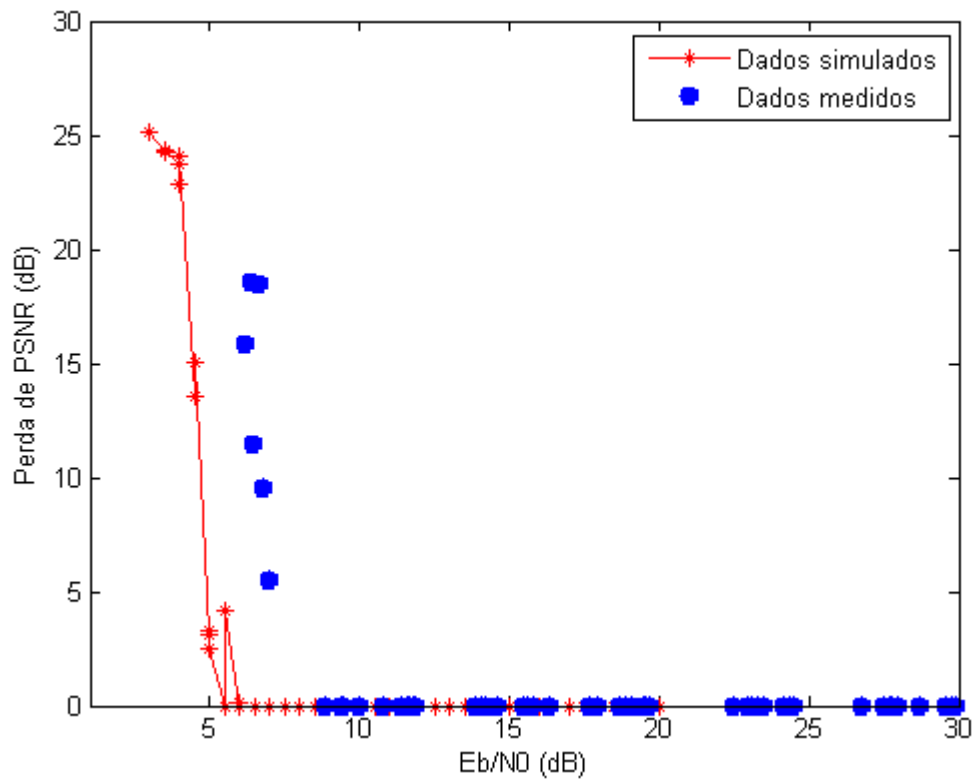


Figura 5.28 - Eb/N0 VS Perda de PSNR para a modulação BPSK com FEC 3/4

Ao analisar os resultados mostrados, pôde-se constatar uma boa concordância entre os dados medidos e os dados simulados. Entretanto, os dados obtidos pelas modulações QPSK e BPSK apresentaram um pequeno desvio (entre 1dB e 2dB), sendo este uma consequência do limiar de recepção do equipamento que impedia a recepção de níveis de sinal mais atenuados. É importante frisar que o ambiente *indoor*, onde os dados foram coletados, não representa de fato um canal AWGN, entretanto, os equipamentos estavam em condições consideradas adequadas para transferência de dados sem o comprometimento, a priori, do desempenho.

### 5.6.2 - Comparação entre Aferições *Outdoor* e Simulações

Neste processo de comparação, os dados medidos em ambiente *outdoor*, para as modulações 16QAM e 64QAM com FEC 3/4, são comparados com simulações realizadas utilizando a mesma configuração para canais AWGN e Rayleigh. As Figuras 5.29 e 5.30 mostram os dados aferidos em ambas as situações citadas.

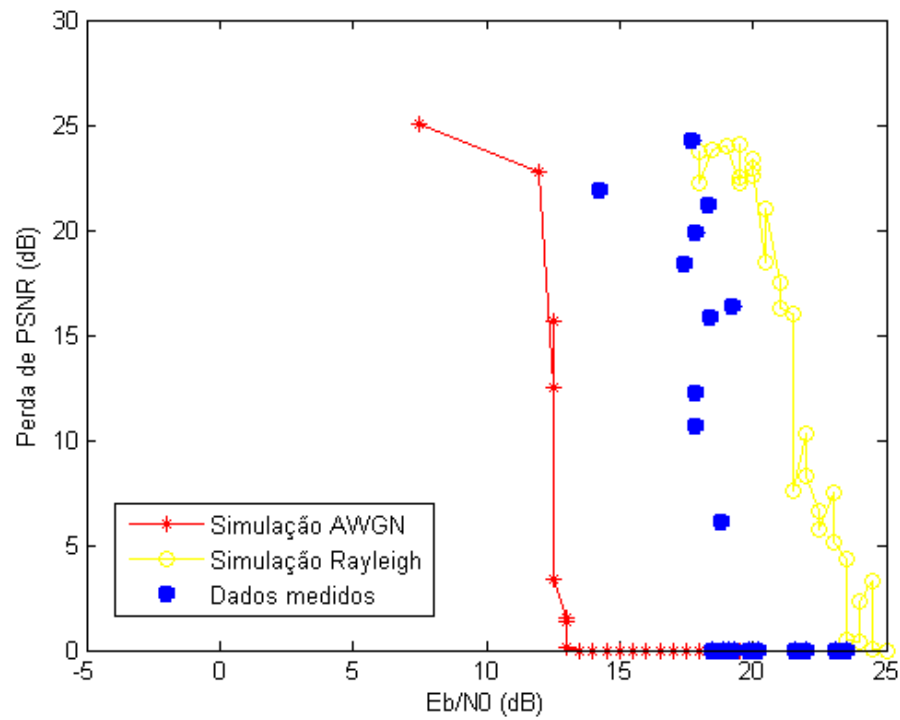


Figura 5.29 - Eb/N0 VS Perda de PSNR para a modulação 64QAM com FEC 3/4 *outdoor*

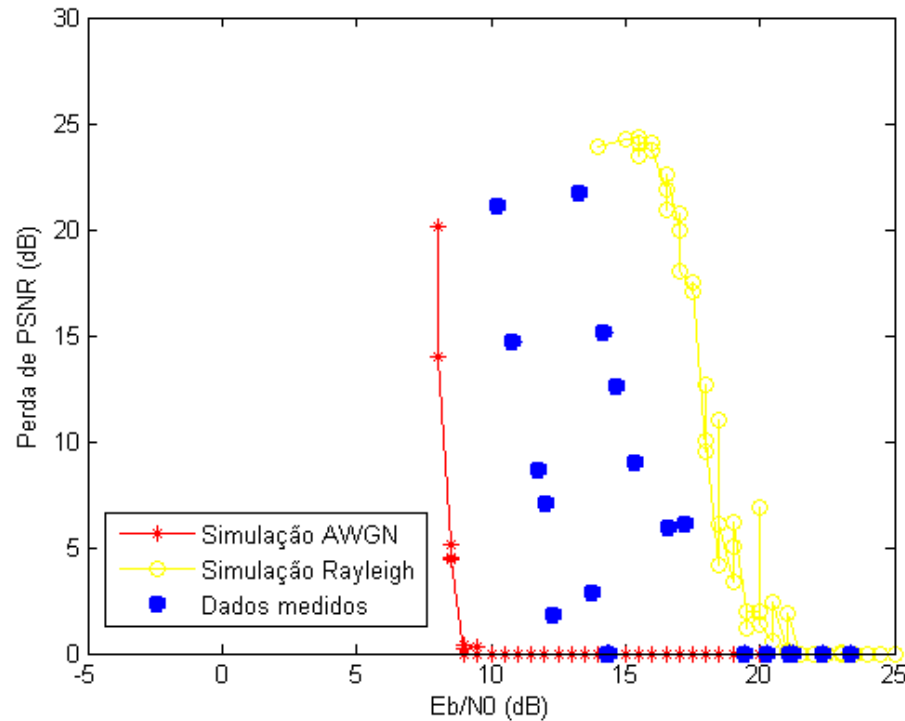


Figura 5.30 - Eb/N0 VS Perda de PSNR para a modulação 16QAM com FEC 3/4 *outdoor*

Para os dados coletados em ambiente *outdoor* a comparação foi realizada com base nas simulações para canais AWGN e Rayleigh e os dados obtidos por aferição *outdoor* não

apresentaram semelhanças com as simulações. Todavia, este resultado era esperado, uma vez que, durante boa parte das medições realizadas o enlace entre o rádio transmissor e receptor não se caracterizava como NLOS (Non-line of sight), ou seja, durante a medição *outdoor* ocorriam as recepções das componentes de multipercurso juntamente com a componente direta (linha de visada). Desta forma, a degradação esperada deveria ser mais acentuada que a simulada no canal AWGN e inferior que a encontrada no canal Rayleigh.

Os dados coletados nas medições *indoor* e *outdoor* são fundamentais para a validação da modelagem do sistema OFDM, obtida através de simulação.

### 5.7 - MODELAGEM PROPOSTA

A modelagem *Cross-Layer* proposta é baseada no fluxo *upward* envolvendo análise ou comunicação de uma camada inferior com uma camada superior [33], conforme mostrado na Figura 5.31.

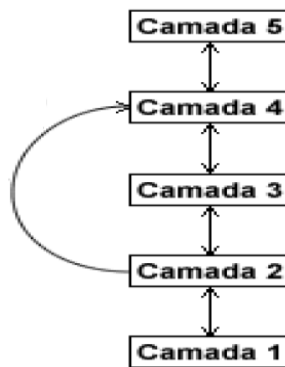


Figura 5.31 - Ilustração da interação de uma camada inferior com uma camada superior [33].

Neste trabalho a análise será baseada no estudo da influência da camada física na camada do usuário (aplicação). Desta forma, usando como exemplo o modelo de referência OSI (Open Systems Interconnection) [34], tem-se a seguinte proposta de análise para interação entre camadas, demonstrada na Figura 5.32.

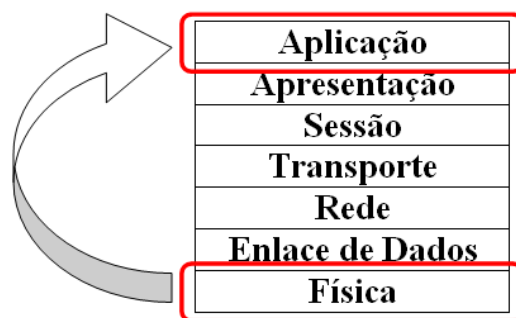


Figura 5.32 – Análise *Cross-Layer* proposta neste trabalho

A realização da análise, para uma posterior modelagem, foi baseada na aferição dos dados em diversos cenários simulados, onde foi possível verificar uma tendência que possibilita a modelagem da perda de PSNR a partir de valores da BER. Entretanto, deve-se inicialmente entender o comportamento dos dados obtidos.

De acordo com o observado na Figura 5.7, pôde-se notar um comportamento exponencial que apresenta estabilização da perda de PSNR para elevados valores de BER. Este fenômeno também ocorre para valores de BER próximos de zero (abaixo de  $10^{-5}$ ).

Com base nestas informações a equação empírica proposta para representar a perda de PSNR em função da BER é mostrada a seguir.

$$Perda (BER) = P_{\max} - P_{\max} e^{(-BER \times Peso)} \quad (5.1)$$

Onde:

$Perda(BER) \rightarrow$  Perda de PSNR, dB

$P_{\max} \rightarrow$  Perda máxima de PSNR, dB

$BER \rightarrow$  Taxa de erro de bit

$Peso \rightarrow$  Parâmetro de ajuste da equação

Observando a equação proposta em (5.1), nota-se que a mesma tende a atingir seu valor máximo ( $P_{\max}$ ) à medida que os valores da BER aumentam. Entretanto, o domínio da função apresenta valores muito baixos, que necessitam de um peso para que a equação alcance a estabilidade desejada, de maneira similar à encontrada nos dados obtidos por simulação. O valor de  $P_{\max}$  pode ser encontrado a partir do valor médio das perdas de PSNR mais elevadas.

## 5.8 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresentou os dados coletados nas simulações e campanhas de medição *indoor* e *outdoor* onde tendências foram observadas, bem como, a limitação de cada modulação para transmissões de vídeo. Além disso, foi apresentada a modelagem proposta com base na observação dos dados medidos. No próximo capítulo serão apresentados os resultados obtidos com a modelagem, bem como a utilização da mesma em simulações de sistemas OFDM.

## CAPÍTULO 6 - RESULTADOS FINAIS

### 6.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O processo de coleta de dados realizado possibilitou a aquisição de informações importantes para obtenção de um modelo empírico. De posse destas informações, diversos gráficos foram gerados e observados. Neste capítulo serão expostos os resultados obtidos com os dados coletados e a obtenção dos parâmetros do Modelo *Cross-Layer* proposto, onde o mesmo será comparado com os dados coletados, usando a mesma metodologia exposta no capítulo anterior.

### 6.2 - RESULTADOS OBTIDOS COM A MODELAGEM

Definido o modelo empírico, os dados obtidos de todas as simulações foram utilizados como referência para o ajuste da equação proposta. A Figura 6.1 mostra como foi obtido o valor de  $P_{max}$  a partir da média dos valores que se concentram na região com as perdas de PSNR mais elevadas, representadas aproximadamente pelas últimas 30 amostras.

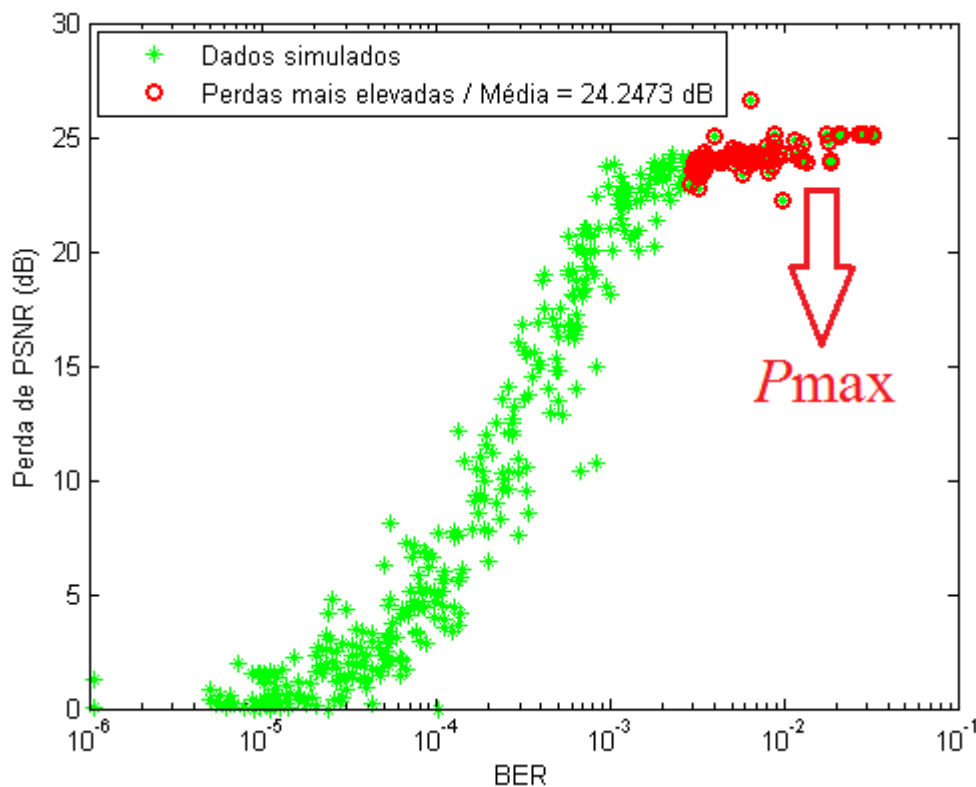


Figura 6.1 - Obtenção do valor de  $P_{max}$  das últimas 30 amostras

Partindo deste ponto, foi realizado um ajuste não linear através do *Curve Fitting Toolbox* do Matlab® com o intuito de encontrar o valor ótimo do parâmetro *Peso*, utilizado na equação proposta. Com base nos valores calculados de *Pmax* e *Peso*, a equação empírica que representa a modelagem da perda de PSNR em função da BER é mostrada na equação (6.1).

$$Perda(BER) = 24.25 - 24.25e^{(-2249BER)} \quad (6.1)$$

A modelagem apresentada neste trabalho reflete o comportamento dos dados simulados, com o objetivo de estimar a perda de PSNR em um vídeo tendo como referência a BER, sendo esta uma métrica de qualidade da camada física. A comparação entre os dados medidos e a modelagem empírica é mostrada na Figura 6.2.

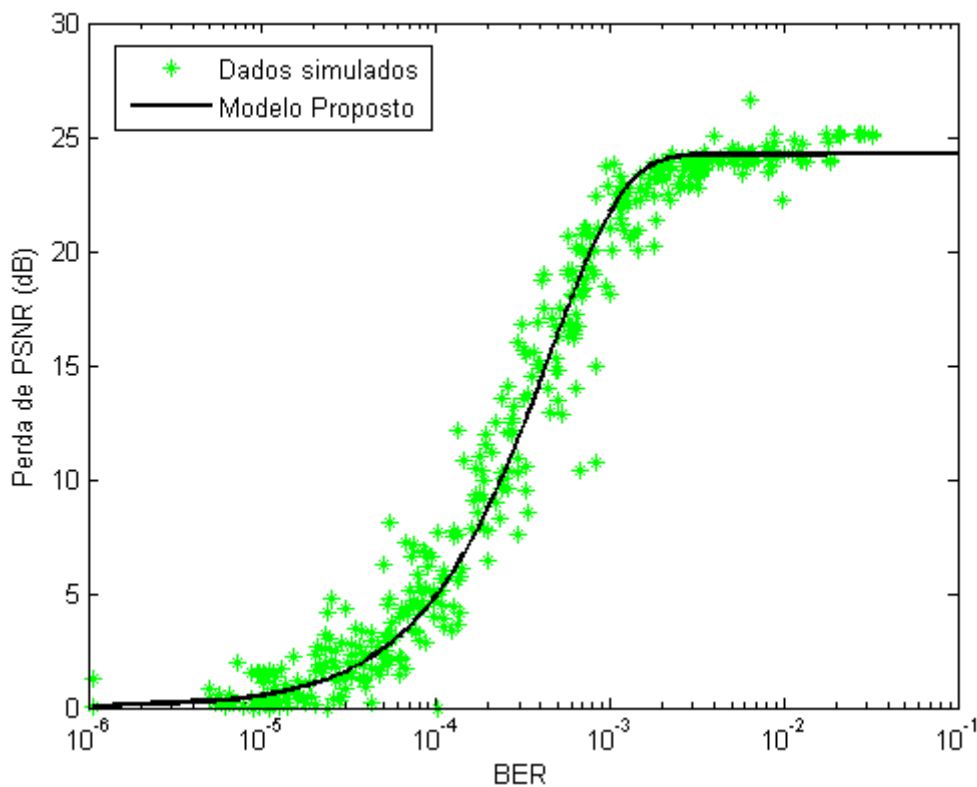


Figura 6.2 - Modelo proposto em relação aos dados coletados em todas as simulações

De acordo com a Figura 6.2, pode-se perceber que o modelo proposto possui boa representatividade com relação aos dados obtidos por simulação.

Para verificar a qualidade da modelagem proposta em comparação com as simulações, o erro RMS (Root Mean Square) e o desvio padrão foram utilizados como métricas de avaliação, e ambos, apresentaram valores em torno de 1,65 dB.

Após a avaliação do modelo proposto, o mesmo foi utilizado para a predição dos valores de perda de PSNR, a partir da BER simulada para canais AWGN e Rayleigh. Os dados gerados foram comparados com as informações coletadas por aferição (*indoor* e *outdoor*) de acordo com esquema representado na Figura 6.3.

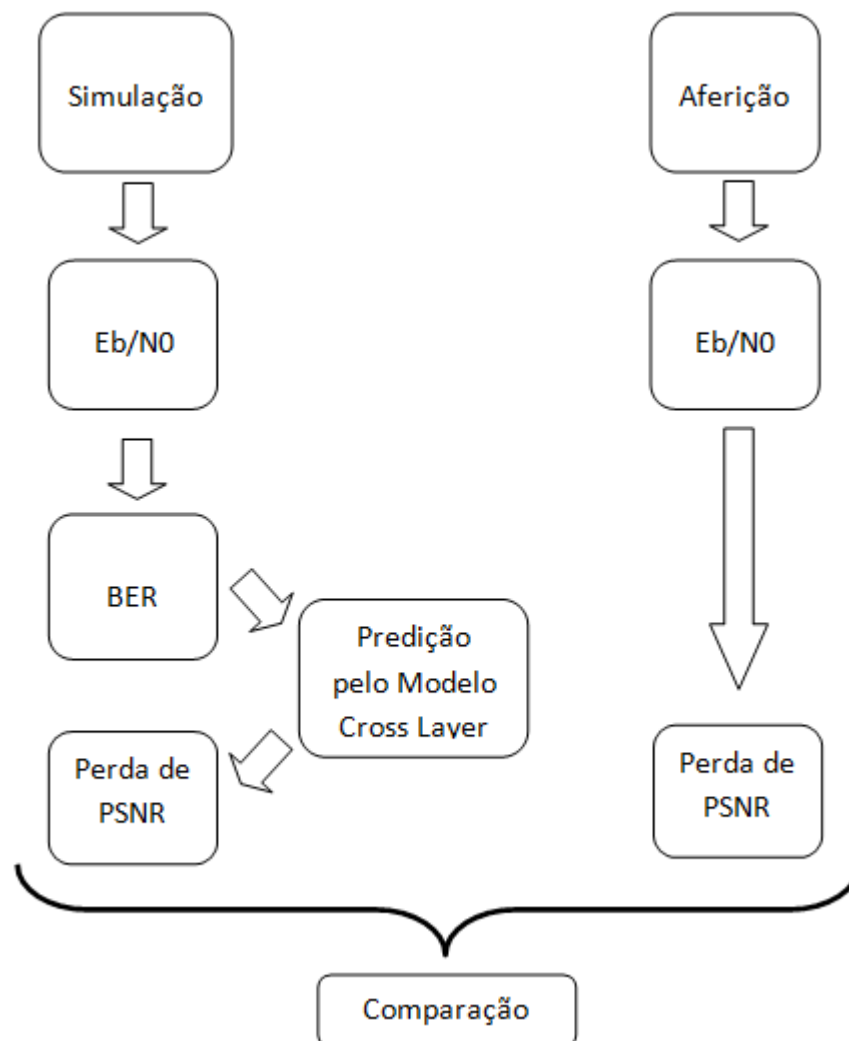


Figura 6.3 - Procedimento para utilização do modelo *Cross-Layer* em comparação com as aferições realizadas

Os dados obtidos a partir da comparação entre aferição (*indoor*) e modelagem *Cross-Layer* são mostrados nas Figuras 6.4-6.7.



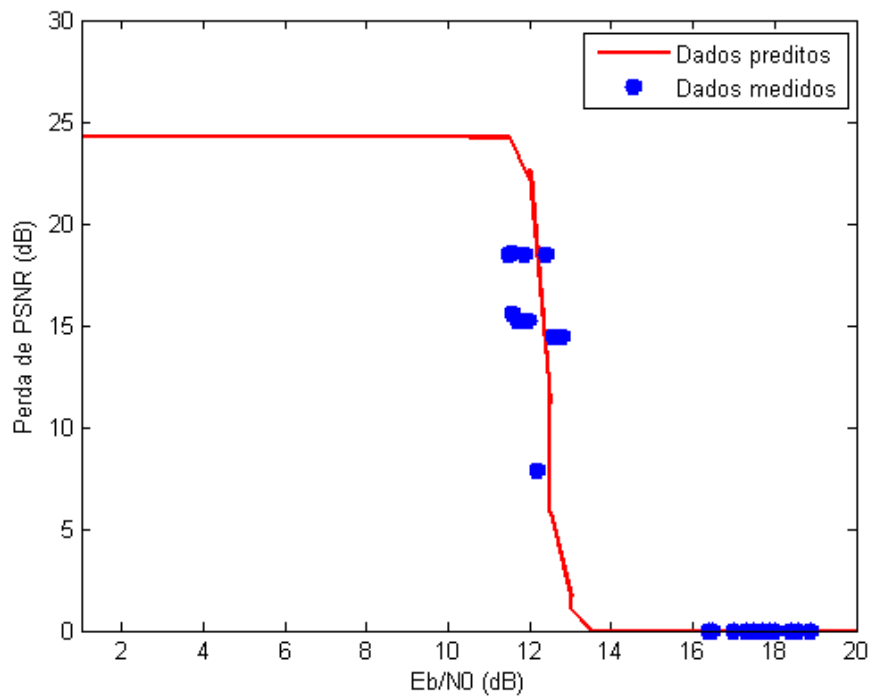


Figura 6.4 - Dados preditos vs dados medidos *indoor* para modulação 64QAM com FEC 3/4

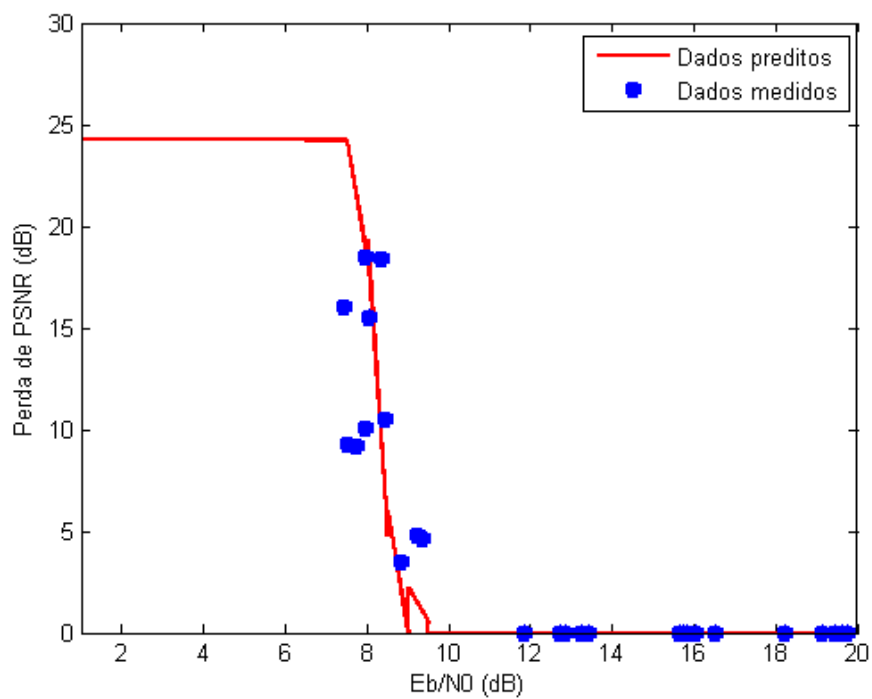


Figura 6.5 - Dados preditos vs dados medidos *indoor* para modulação 16QAM com FEC 3/4

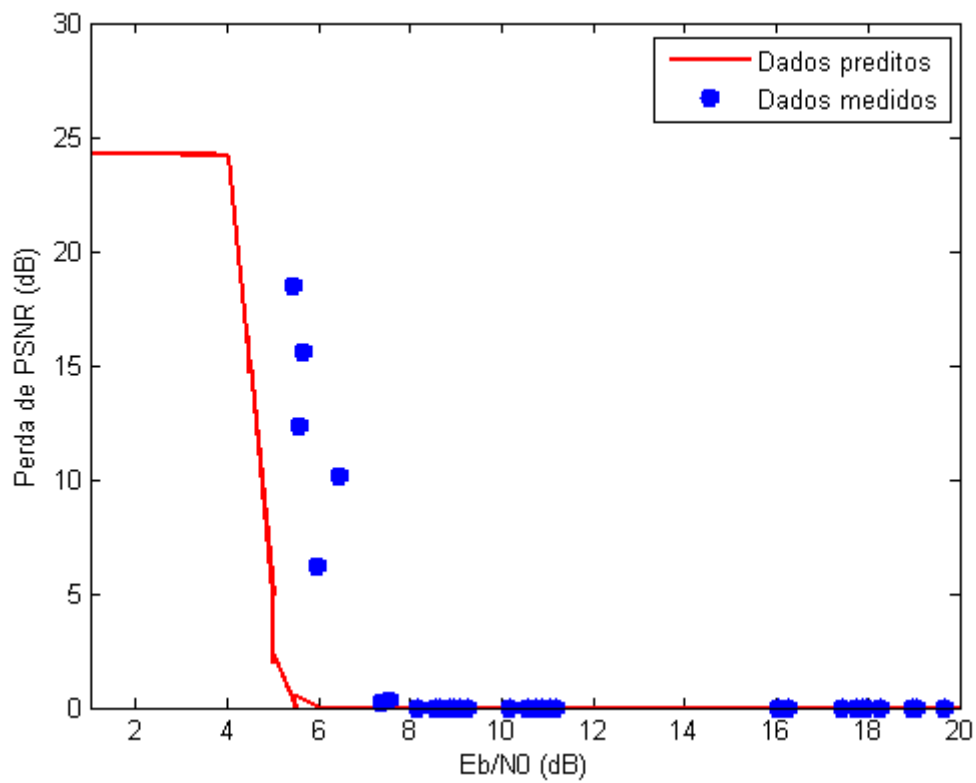


Figura 6.6 - Dados preditos vs dados medidos *indoor* para modulação QPSK com FEC 3/4

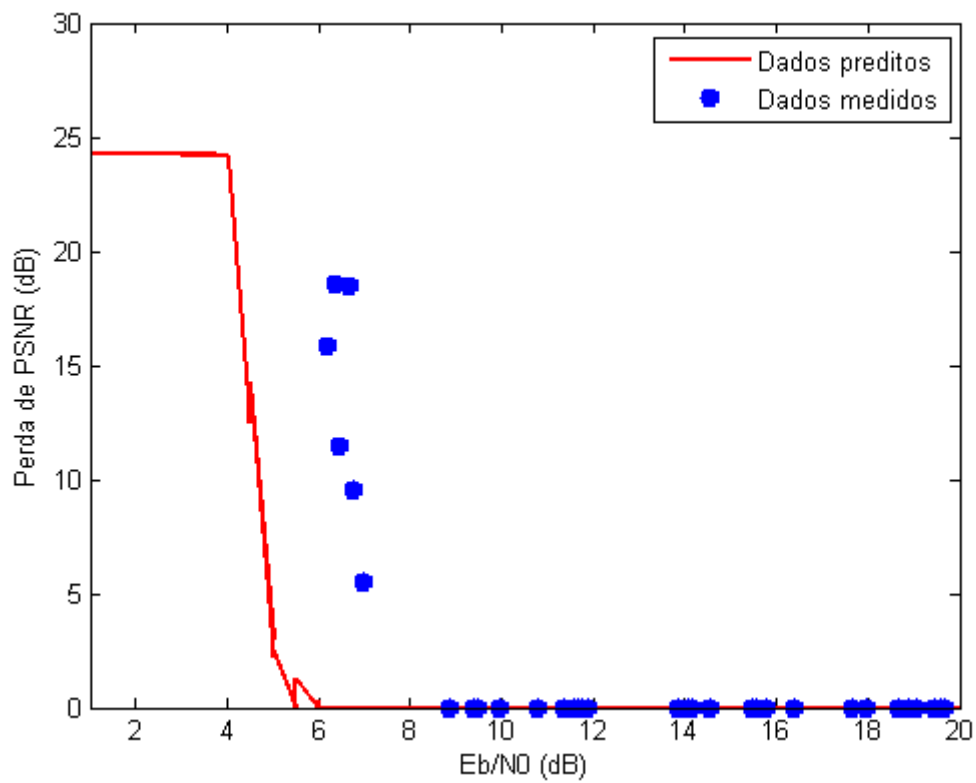


Figura 6.7 - Dados preditos vs dados medidos *indoor* para modulação BPSK com FEC 3/4

Os resultados obtidos com a modelagem *Cross-Layer* mostram boa representatividade em relação aos dados medidos em ambiente *indoor*. É importante frisar o comportamento das modulações QPSK e BPSK, que em função do limiar de recepção do equipamento, não permitem a obtenção dos valores de  $E_b/N_0$  alcançados na simulação.

Após a comparação com os dados coletados em ambiente *indoor*, as informações obtidas no cenário *outdoor* também foram comparadas com as previsões realizadas a partir da BER gerada pelas simulações em canal AWGN e Rayleigh utilizando um FEC 3/4. As Figuras 6.8 e 6.9 mostram as comparações entre dados medidos e dados preditos para as modulações 64QAM e 16QAM.

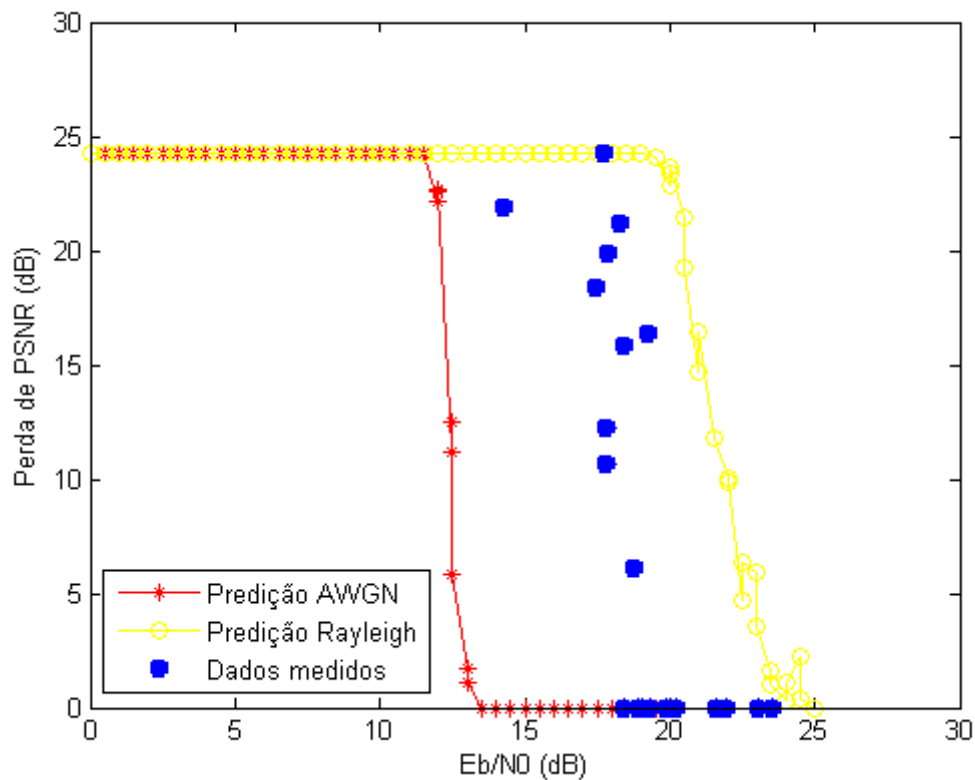


Figura 6.8 - Dados preditos vs dados medidos *outdoor* para modulação 64QAM com FEC 3/4

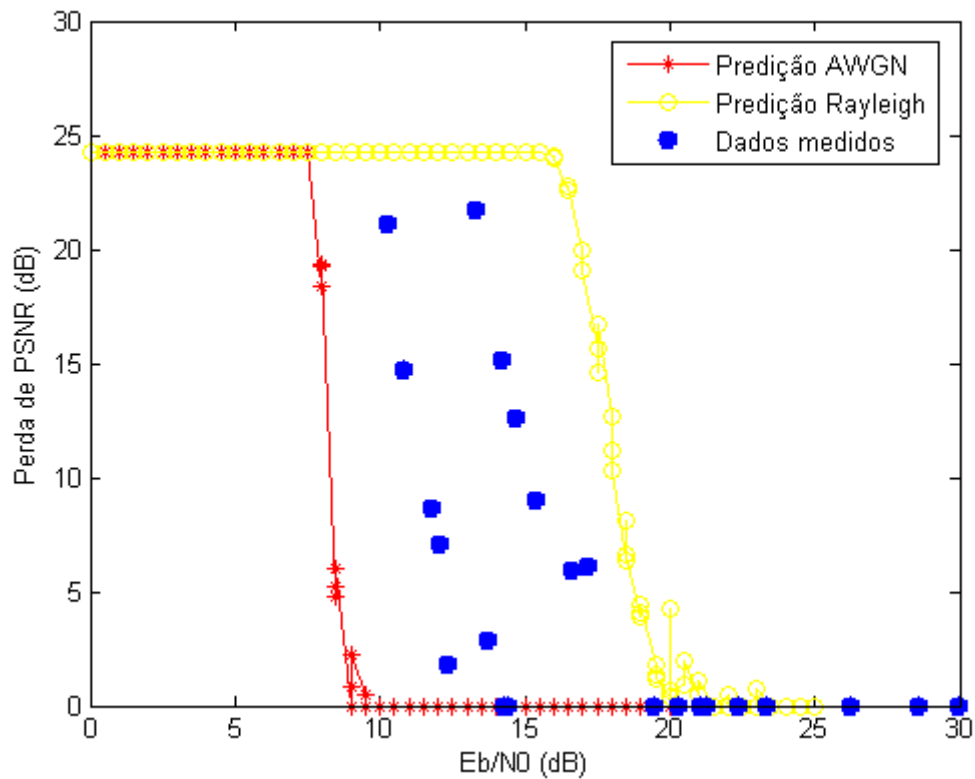


Figura 6.9 - Dados preditos vs dados medidos *outdoor* para modulação 64QAM com FEC 3/4

Os resultados obtidos, quando a comparação com a predição é realizada, apresentam grande semelhança com dados obtidos por simulação, explanados no capítulo 5 deste trabalho. Nesta situação, também é possível verificar que os dados medidos em ambiente *outdoor* apresentam degradação superior à imposta pelo canal AWGN e inferior à encontrada no canal Rayleigh.

### 6.3 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

A modelagem *Cross-Layer* apresentou bons resultados representando a perda de PSNR em função da BER imposta por canais AWGN e Rayleigh na presença de diversas configurações de FEC (1/2, 2/3 e 3/4). No capítulo a seguir é feita uma análise geral das propostas e resultados alcançados neste trabalho, explorando as contribuições e expondo perspectivas para trabalhos futuros.

## CONCLUSÃO

### DISCUSSÃO

Os diversos estudos que se baseiam na abordagem *Cross-Layer*, em sua maioria, estão voltados para a área de análise e otimização, onde a predição baseada na modelagem empírica não apresenta muitas pesquisas. Estas são fundamentais para auxiliar em planejamentos, dimensionamentos e projetos de sistemas de transmissão de dados. Entretanto, exigem maior esforço para a sua concepção, tendo em vista que são necessários dados experimentais, que precisam ser confrontados para se chegar a um resultado sólido.

Neste trabalho, os dados aferidos são utilizados como estratégia de validação para a modelagem, obtida a partir de dados simulados. Foram alcançados bons resultados a partir da abordagem *Cross-Layer* proposta, que pôde comprovar existência de uma relação direta entre BER e perda de PSNR para transmissão de vídeos em sistemas OFDM. A modelagem exponencial utilizada apresentou boa concordância com os dados simulados gerando erro RMS e desvio padrão em torno de 1,65 dB.

O equacionamento empírico obtido é fundamental, e futuramente poderá ser incorporado em softwares de simulação usados em projetos de telecomunicações, de maneira muito similar aos modelos empíricos de perda de propagação, que são empregados em larga escala nos softwares comerciais de planejamento de redes [35] e [36].

Além da abordagem e modelagem propostas, o trabalho desenvolvido apresenta outras contribuições importantes, como a obtenção de dados experimentais que podem ser compartilhados na comunidade científica e, a criação de um modelo de simulação computacional que integra os softwares Matlab® e Evalvid para análise de transmissões de vídeo em diversas condições de canal.

## TRABALHOS FUTUROS

Como proposta para trabalhos futuros podem-se destacar:

- Realização de pesquisa de opinião através da aplicação de formulários para modelar a influência da perda de PSNR nos valores de MOS (Mean Opinion Score).
- Criação de um software em linguagem C++ para simulação de sistemas OFDM, com transmissão de vídeo, para fins didáticos.
- Implementação do *Modelo Cross-Layer* obtido em softwares comerciais e *open-sources* visando ampliar a capacidade de simulação dos mesmos.
- Disseminação da metodologia adotada para criação de novas linhas de pesquisa envolvendo a modelagem *Cross-Layer* e, para formação de recursos humanos.

## PRODUÇÕES CIENTÍFICAS DURANTE OS ESTUDOS

Artigos completos publicados em periódicos

- Castro B. S. L., Pinheiro M. R., Gomes I. R., Carneiro O. O., Cavalcante G. P. S., "Comparison Between Known Propagation Models Using Least Squares Tuning Algorithm on 5.8 GHz in Amazon Region Cities", *Journal of Microwaves and Optoelectronics*, v.10, p.106-113, 2011.

Trabalhos completos publicados em anais de eventos

- Castro B. S. L., Gomes I. R., Cavalcante G. P. S., "Design of an Alternative Drive-Test Setup for SNMP-Based Equipments in Broadband Wireless Networks", *EuCAP*, 2011, Roma.
- Machado V.A., Silva C. N., Silva R. J. M., Castro B. S. L., Gomes I. R., Frances C. R. L., Cavalcante G. P. S., Costa J. C. W. A., "Cross-Layer Model to Predict Performance Parameters on OFDM-Based Wireless Networks", *IMOC*, 2011, Natal.

- Vale M. F., Gomes I. R., Cavalcante G. P. S., Barros F. J. B., Castro B. S. L., "New Terrain Proposal for SUI Model Equations Based on 5.8 GHz Measurements in Wooded Cities Found in Amazon Region", EuCAP, 2012, Praga.

- Gomes I. R., Gomes H. S., Castro B. S. L., Fraiha R. L., Fraiha S. G., Cavalcante G. P. S., "Indoor Propagation Model in 2.4 GHz with QoS Parameters Estimation in Voip Calls, Considering Different Types of Walls and Floors", EuCAP, 2012, Praga.

- Fraiha R. L., Castro B. S. L., Gomes I. R., Cavalcante G. P. S., "Cross-Layer Model to Predict Quality Parameters on Nomadic Wireless Networks", MOMAG, 2012, João Pessoa.

- Almeida M. V., Gonzalez P. V., Barros F. J. B., Fraiha S. G., Gomes H. S., Castro B. S. L., Cavalcante G. P. S., "Medidas e Análise de Modelo para TV Digital em Cidade Amazônica", MOMAG, 2012, João Pessoa.

- Barros F. J. B., Gonzalez P. V., Bergmann J. R., Siqueira G. L., Castro B. S. L., Cavalcante G. P. S., "Channel Model and Data Analysis for Indoor Environment", EuCAP, 2012, Praga.

- Braga A. S., Araújo J, Rodrigues J. C., Costa A. B., Fraiha R. L., Gomes H.S., Fraiha S. G. C., Castro B. S. L., Cavalcante G. P. S., "Implementation of a New Propagation Model for 5.8GHz Systems in OPNET Simulator", EuCAP, 2013, Gothenburg.

#### Trabalhos aceitos para publicação

- Castro B. S. L., Gomes I.R., se Souza P. H. C., Cavalcante G. P. S., "A Methodology for Evaluation of Vídeo Quality Loss of OFDM-Based Networks Due to Propagation Losses", Artigo aceito para publicação, EuCAP, 2013, Gothenburg.

## REFERÊNCIAS

- [1] Jaffrès-Runser K., Gorce J-M., Ubéda S., "Multiobjective QoS-oriented planning for indoor wireless LANs", IEEE Vehicular Technology Conference, 2006, Montreal.
- [2] Araújo J. P. L. et al, "The Influence of Interference Networks in QoS Parameters in a WLAN 802.11g: A Bayesian Approach", Broadband Access Communication Technologies, 2007, Boston.
- [3] Choi J., Park K., Kim C., "Analysis of Cross-Layer Interaction in Multirate 802.11 WLANs", IEEE Transactions on Mobile Computing, 2009.
- [4] Shakkottai S. & Rappaport T. S., "Cross-Layer Design for Wireless Networks", IEEE Communications Magazine, 2003.
- [5] Robert P. M., "Simulation Tool and Metric for Evaluating Wireless Digital Video Systems", Dissertação de Mestrado, Virginia Polytechnic Institute and State University, 1999.
- [6] Robert P. M., Darwish A. M. e Reed J. H., "Effect of Error Distribution in Channel Coding Failure on MPEG Wireless Transmission", IS&T/SPIE Conference on Visual Communications and Image Processing, São Francisco, 1999.
- [7] Robert P. M., Darwish A. M. e Reed J. H., "MPEG video quality prediction in a wireless system", IEEE Vehicular Technology Conference, Houston, 1999.
- [8] Lu R. Y-P., Lin J-W, Chiueh T-D, "Cross-Layer Optimization for Wireless streaming via Adaptive MIMO OFDM", Proceedings of IEEE International Symposium on Circuits and Systems, 2010.
- [9] Yang Z. e Wang X., "Scalable Video Broadband Over Downlink MIMO-OFDM Systems", IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, Vol. 23, Nº 2, pp. 805-813, Fevereiro, 2013.
- [10] Bertocco M., Farias M., Fortin D., Sona A., "Cross-Layer Measurement for analysis of DVB-T System Performance", IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2008.



- [11] Jain R., "Art of Computer Systems Performance Analysis Techniques For Experimental Design Measurements Simulation and Modeling", John Wiley & Sons, 1991.
- [12] Lu J. et al, "Indoor wLAN Planning with a QoS constraint based on a Markovian Performance Evaluation Model", IEEE international Conference Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications, 2006.
- [13] Fraiha S. G. C., "Localização Ótima de Pontos de Acesso em Ambientes *Indoor* em Projetos de Sistemas *Wireless*", Tese de Doutorado, Universidade Federal do Pará, 2009, Belém.
- [14] Cioffi J. M., "Digital Communications", Stanford University, Livro Digital hospedado em <http://www.stanford.edu/group/cioffi/book/>. Ultimo acesso em 29/01/2014.
- [15] Sklar B., "Digital Communications: Fundamentals and Applications", Prentice Hall, 2ª edição, California, 2001.
- [16] Blahut R. E., "Algebraic codes for data transmission", Cambridge University Press, Nova Iorque. 2003.
- [17] Nee R. V., Prasad Ramjee, "OFDM for Wireless Multimedia Communications", Artech House, Boston, 2000.
- [18] Glover I., Grant P., "Digital Communications", Prentice Hall, Londres, 1998.
- [19] Salzberg, B. R., "Performance of an efficient parallel data transmission system", IEEE Trans. Comm., Vol. COM-15, pp. 805-813, Dezembro, 1967.
- [20] "Orthogonal Frequency Division Multiplexing", U.S. Patent N°. 3, 488,4555, Janeiro, 1970.
- [21] Prasad R., "OFDM for Wireless Communications Systems", Artech House, Boston, 2004.
- [22] Jeruchim M. C., Balaban P. e Shanmugan K. S., "Simulation of Communication Systems", Kluwer, 2ª edição, Nova Iorque, 2000.

- [23] Chiueh T. e Tsai P., "OFDM Baseband Receiver Design for Wireless Communications" John Wile and Sons (Asia), Singapura, 2007.
- [24] Marathe A. et al, "Cross layer design for rate selection and link failure prediction in MANETS", International Symposium on Computing, Communication and Control, 2009.
- [25] "Xiph.org Video test Media", <https://media.xiph.org/video/derf/>, último acesso em 18/02/2014.
- [26] Evalvid - Video Evaluation tool, disponível em "<http://www2.tkn.tu-berlin.de/research/evalvid/EvalVid/docevalvid.html>", último acesso em 01/14/2013.
- [27] Castro B. S. L., Gomes I. R., Cavalcante G. P. S., "Design of an Alternative Drive-Test Setup for SNMP-Based Equipments in Broadband Wireless Networks", EuCAP, 2011, Roma.
- [28] Alvarion BreezeAccess VL product Series, disponível em "<http://www.alvarion.com/products/product-portfolio/breezeaccess/breezeaccess-vl>". último acesso em 01/14/2013.
- [29] Castro B. S. L., Gomes I.R., se Souza P. H. C., Cavalcante G. P. S., "A Methodology for Evaluation of Vídeo Quality Loss of OFDM-Based Networks Due to Propagation Losses", Artigo aceito para publicação, EuCAP, 2013, Gothenburg.
- [30] Gross J., Klaue J., Karl H., Wolisz A., "Cross-Layer optimization of OFDM transmission systems for MPEG-4 video streaming", Computer Communications, Elsevier, 2004.
- [31] Bouazizi I., "Estimation of Packet Loss Effects on Video Quality", First International Symposium on Control, Communications and Signal Processing, 2004.
- [32] "MPEG-4 Advanced Video Coding", <http://mpeg.chiariglione.org/standards/mpeg-4/advanced-video-coding>, último acesso em 15/02/2013.
- [33] Mendes L. D. P., "Algumas Análises de Soluções Cross-Layer para Redes TCP/IP Sem Fio". Dissertação de Mestrado, INATEL, 2009.
- [34] Tanenbaum A. S., "Redes de Computadores", Pearson Education, 5ª edição, 2011.

[35] “OPNET: Application and Network Performance Solutions”,  
<http://www.riverbed.com/products-solutions/products/opnet.html?redirect=opnet>,  
ultimo acesso em 01/02/2014.

[36] “Celplan Wireless Global technologies”, [www.celplan.com.br](http://www.celplan.com.br), ultimo acesso em  
01/02/2014.

# ANEXO A

## A.1 - DESCRIÇÃO DA SIMULAÇÃO DO SISTEMA OFDM

