

JESSÉ GOMES DOS SANTOS

**DESEMPENHO DO OFDM EM UM SISTEMA ÓPTICO NO ESPAÇO LIVRE  
NA PRESENÇA DE TURBULÊNCIA**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Marcelo Eduardo Vieira Segatto - PhD

Co-Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Maria José Pontes

VITÓRIA

2011

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)  
(Biblioteca Central da Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

---

Santos, Jessé Gomes dos, 1977-

S237d Desempenho do OFDM em um sistema óptico no espaço livre na presença de turbulência / Jessé Gomes dos Santos. – 2011.  
82 f. : il.

Orientador: Marcelo Eduardo Vieira Segatto.

Co-Orientadora: Maria José Pontes.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Comunicação Óptica. 2. OFDM. 3. Turbulência Óptica. 4. Métodos Experimentais. I. Segatto, Marcelo Eduardo Vieira. II. Pontes, Maria José. III. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. IV. Título.

CDU: 621.3

---

JESSÉ GOMES DOS SANTOS

DESEMPENHO DO OFDM EM UM SISTEMA ÓPTICO NO ESPAÇO LIVRE  
NA PRESENÇA DE TURBULÊNCIA

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 04 de maio de 2011.

COMISSÃO EXAMINADORA

---

Prof. Marcelo Eduardo Vieira Segatto - PhD  
Universidade Federal do Espírito Santo  
Orientador

---

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Maria José Pontes  
Universidade Federal do Espírito Santo  
Co-Orientadora

---

Prof. Dr. Andrés Pablo López Barbero  
Universidade Federal Fluminense

---

Prof. Dr. Daniel José Custódio Coura  
Universidade Federal do Espírito Santo

“Grandes coisas fez o Senhor por nós, por isso estamos alegres.”

**Salmos 126:4**

Dedico este trabalho aos meus pais.

## **Agradecimentos**

A Deus, pois segundo o próprio coordenador do programa do PPGEE eu por ter sido qualificado na última posição seria o único a não ser chamado, porém como a própria bíblia diz: "A porta que Deus abre, ninguém pode fechar".

A meus pais pelo suporte emocional e espiritual sem os quais seria impossível concluir este mestrado.

Ao professor Marcelo Segatto pelo tratamento desde o dia que me recebeu quando vim fazer a minha matrícula me ajudando com os documentos que faltavam e depois me oferecendo esta linha de pesquisa.

Aos professores Maria José, Andrés Pablo e Ricardo pelas orientações quando da elaboração de artigo aceito pelo MOMAG 2010.

A professora Maria Thereza juntamente com os colegas Anderson Gomes, Luiz Henrique e Alberto Cruz pela atenção quando realização das medidas no IME.

Aos professores Daniel Coura e Gabriel Lavangholi pelas importantes contribuições relacionadas à parte gráfica deste trabalho e os colegas Jefferson Moro e Anthony pelos artigos obtidos através do acesso da UNICAMP referente ao sistema óptico no espaço livre.

A CAPES por meio do programa PRO-DEFESA pelo apoio financeiro o qual me proporcionou mais tranquilidade para a realização desta pesquisa.

## Resumo

Embora centenária, a tecnologia óptica para transmissão em espaço livre ainda pode ser considerada bastante desconhecida, pois durante décadas as pesquisas nesta área do conhecimento permaneceram restritas aos meios militares.

Esta restrição é justificada em virtude de o sistema óptico no espaço livre depender intensamente do ambiente atmosférico e, portanto, está sujeito às intempéries existentes neste meio.

Porém, a partir do século XXI, o desenvolvimento da tecnologia voltada à transmissão por fibra óptica, similar a em discussão, vem contribuindo, ainda que de forma lenta, para que o sistema óptico no espaço livre expanda seus domínios.

A utilização da técnica de transmissão *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) é mais um instrumento capaz de ajudar este sistema de comunicação a enfrentar as adversidades existentes no ambiente atmosférico.

Diante desta constatação, esta dissertação apresenta os resultados de testes experimentais realizados em laboratório que mostram o desempenho obtido pela utilização em conjunto destas duas tecnologias para interligar ponto a ponto duas estações sem fio em meio a ambientes com e sem turbulência.

Os resultados apresentados neste trabalho de pesquisa mostram que a utilização do OFDM no sistema de comunicação óptico em espaço livre é possível e possibilita em parte do tempo manter o enlace de comunicação ativo, mesmo durante a ocorrência de fenômenos adversos como a turbulência óptica.

# Sumário

Resumo .....	xi
Sumário.....	xi
Lista de Figuras .....	xii
Lista de Tabelas .....	xxi
Lista de Siglas.....	xxii
Capítulo 1: Introdução .....	1
1.1. Trabalhos relacionados ao tema.....	1
1.2. Motivação .....	2
1.3. Objetivo, metodologia e contribuição.....	3
1.4. Organização da dissertação.....	4
Capítulo 2: Aspectos Teóricos.....	5
2.1. Sistema óptico no espaço livre .....	5
2.1.1. Funcionamento do sistema óptico no espaço livre.....	8
2.2. Turbulência atmosférica .....	9
2.3. Sistema de transmissão sem fio elétrico .....	12
2.3.1. Padrão IEEE 802.11g .....	13
2.3.2. Arquiteturas de rede em IEEE 802.11 .....	13
2.3.3. Camada Física .....	14
2.4. Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) .....	17
2.4.1. OFDM Convencional .....	18
2.4.2. OFDM Óptico .....	21
Capítulo 3: Desenvolvimento Experimental .....	23
Capítulo 4: Resultados e Discussão.....	30
4.1. Experimentos Preliminares .....	30



---

4.1.1. <i>Back-to-Back</i> Elétrico .....	30
4.1.2. Sistema óptico em espaço livre na ausência de turbulência.....	34
4.1.3. Sistema óptico em espaço livre na presença de turbulência.....	38
4.2. Experimentos Finais .....	42
4.2.1. <i>Back-to-back</i> elétrico.....	42
4.2.2. <i>Back-to-back</i> óptico.....	44
4.2.3. Sistema óptico sem turbulência.....	47
4.2.4. Sistema óptico com turbulência .....	49
4.3. Caracterização do enlace óptico .....	52
4.3.1. Caracterização das condições mínimas para funcionamento do sistema óptico no espaço livre utilizando os dispositivos presentes nos experimentos.....	55
Capítulo 5: Conclusão .....	60
Referências Bibliográficas.....	59
Apêndice A: Jperf.....	63
Apêndice B: Iperf .....	66

## Lista de Figuras

Figura 2.1: Publicações sobre sistema de óptico no espaço no IEEE.....	5
Figura 2.2: Adversidades enfrentadas pelo sistema óptico no espaço livre. ....	7
Figura 2.3: Diagrama de bloco mostrando enlace de sistema óptico no espaço livre. ....	8
Figura 2.4: Representação da turbulência em cascata. ....	10
Figura 2.5: Representação da localização dos pontos em que foram capturados as temperaturas $T_1$ e $T_2$ .....	11
Figura 2.6: Efeito da cintilação causado pela presença dos bolsões de ar.....	12
Figura 2.7: Diagrama distinguindo redes ponto a ponto. ....	14
Figura 2.8: Representação da camada física e da subcamada MAC do IEEE 802.11.....	15
Figura 2.9: Relação entre as competências da camada física e da subcamada MAC.....	15
Figura 2.10: Sequência de mensagem no CSMA/CA. ....	16
Figura 2.11: Espectro típico do sinal OFDM. ....	18
Figura 2.12: Diagrama em blocos representando OFDM/RF. ....	20
Figura 2.13: Diagrama em blocos representando OFDM Óptico.....	22
Figura 3.1: Representação da rede ponto-a-ponto utilizada durante o <i>back-to-back</i> elétrico. .	24
Figura 3.2: Representação da rede ponto-a-ponto utilizada durante o <i>back-to-back</i> óptico. ...	26
Figura 3.3: Representação da rede ponto-a-ponto utilizada durante a transmissão utilizando o sistema óptico no espaço livre com medidor de potência óptico. ....	28
Figura 3.4: Representação da rede ponto-a-ponto utilizada durante a transmissão utilizando o sistema óptico no espaço livre amplificado pelo EDFA.....	29
Figura 4.1: Comportamento da taxa de transmissão calculada durante <i>back-to-back</i> elétrico na estação transmissora. ....	30
Figura 4.2: Taxas de transmissão segmentadas por tipo de modulação e codificação durante utilização do <i>back-to-back</i> elétrico.....	31

Figura 4.3: Espectro elétrico transmitido capturado logo após a placa *wi-fi* transmissora e antes do modulador Mach-Zehnder durante o *back-to-back* elétrico. .... 32

Figura 4.4: Espectro elétrico recebido capturado após o fotodetector e antes da placa *wi-fi* receptora durante o *back-to-back* elétrico. .... 33

Figura 4.5: Comportamento da taxa de transmissão calculada na estação transmissora durante utilização do sistema óptico no espaço livre na ausência de turbulência. .... 34

Figura 4.6: Taxas de transmissão segmentadas por tipo de modulação e codificação durante utilização do sistema óptico no espaço livre na ausência de turbulência. .... 36

Figura 4.7: Níveis de potência óptica capturados na antena receptora durante utilização do sistema óptico no espaço livre na ausência de turbulência. .... 37

Figura 4.8: Espectro elétrico recebido capturado após o fotodetector e antes da placa *wi-fi* receptora durante o enlace realizado com sistema óptico no espaço livre na ausência de turbulência. .... 37

Figura 4.9: Comportamento da taxa de transmissão calculada durante a utilização do sistema óptico no espaço livre na presença de turbulência. .... 39

Figura 4.10: Níveis de potência óptica capturados na antena receptora durante utilização do sistema óptico no espaço livre na presença de turbulência. .... 40

Figura 4.11: Taxas de transmissão segmentadas por tipo de modulação e codificação durante utilização do sistema óptico no espaço livre com turbulência. .... 41

Figura 4.12: Espectro elétrico recebido capturado após o fotodetector e antes da placa *wi-fi* receptora durante o enlace realizado com sistema óptico no espaço livre na presença de turbulência. .... 41

Figura 4.13: Taxa de transmissão durante *back-to-back* elétrico calculada através do *Jperf* na estação transmissora. .... 42

Figura 4.14: Taxas de transmissão segmentadas por tipo de modulação e codificação durante utilização do *back-to-back* elétrico. .... 43

Figura 4.15: Espectro elétrico recebido capturado após o fotodetector e antes da placa *wi-fi* receptora durante o enlace utilizando o *back-to-back* elétrico. .... 44

Figura 4.16: Taxa de transmissão durante *back-to-back* óptico calculada através do *Jperf* na estação transmissora. .... 45

Figura 4.17: Taxas de transmissão segmentadas por tipo de modulação e codificação durante utilização do *back-to-back* óptico.....46

Figura 4.18: Espectro elétrico recebido capturado após o fotodetector e antes da placa *wi-fi* receptora durante o enlace utilizando *back-to-back* óptico. ....46

Figura 4.19: Taxa de transmissão utilizando sistema óptico no espaço livre em ambiente sem turbulência calculada através do Jperf na estação transmissora. ....47

Figura 4.20: Distribuição dos percentuais de utilização de tipos de modulação e codificação. ....48

Figura 4.21 Espectro elétrico recebido capturado após o fotodetector e antes da placa *wi-fi* receptora durante o enlace utilizando sistema óptico no espaço sem turbulência.....49

Figura 4.22: Taxa de transmissão utilizando sistema óptico no espaço livre em ambiente com turbulência calculada através do Jperf na estação transmissora. ....50

Figura 4.23: Distribuição da taxa de *bit* utilizando sistema óptico no espaço livre com turbulência. ....51

Figura 4.24: Espectro elétrico do sinal capturado durante transmissão utilizando o sistema óptico no espaço livre modulado por laser de sinal com turbulência.....52

Figura 4.25: Espectro do sinal e nível de potência ópticos na conexão entre laser e EDFA....53

Figura 4.26: Espectro do sinal e nível de potência ópticos do sinal na conexão entre EDFA e cabeça óptica transmissora. ....53

Figura 4. 27: Espectro do sinal e nível de potência ópticos na conexão entre cabeça óptica e fotodetector.....54

Figura 4.28 Espectro do sinal e nível de potência óptico na entrada do fotodetector. ....54

Figura 4.29: Espectro do sinal e nível de potência ópticos com potências mínimas para funcionamento do sistema óptico no espaço livre durante a execução do experimento. ....55

Figura 4.30: Espectro elétrico do sinal para sistema óptico no espaço livre operando com potência de transmissão mínima.....56

Figura A.1: Configuração do modo servidor..... 63

Figura A.2: Configuração do modo cliente. .... 63

Figura A.3: Configuração da métrica de transmissão e formato de apresentação..... 64

Figura A.4: Tipo de protocolo utilizado na transmissão. .... 64

Figura A.5: Campo destinado à apresentação do desempenho da taxa de bit. .... 65

Figura A.6: Campo de saída das grandezas calculadas pelo Jperf. .... 65

## Lista de Tabelas

Tabela 2.1: Principais característica dos padrões IEEE 802.11(a/ b).....	12
Tabela 2.2: Principais características do OFDM-RF.....	18
Tabela 2.3: Taxas de bit e codificação, modulação e potência emitida praticadas pelo OFDM. .....	19
Tabela 4.1: Grandezas estatísticas referente a taxa de transmissão calculadas durante a utilização do <i>back-to-back</i> elétrico.....	31
Tabela 4.2: Níveis de potência em pontos do espectro elétrico recebido, capturado após o fotodetector e antes da placa <i>wi-fi</i> receptora durante o <i>back-to-back</i> elétrico.....	34
Tabela 4.3: Grandezas estatísticas referente a taxa de transmissão calculadas durante a utilização do sistema óptico no espaço livre na ausência de turbulência. ....	35
Tabela 4.4: Grandezas estatísticas referentes aos níveis de potência óptica capturados na antena receptora.....	37
Tabela 4.5: Grandezas estatísticas referente a taxa de transmissão e níveis de potência calculadas durante a utilização do sistema óptico no espaço livre na presença de turbulência. .....	40
Tabela 4.6: Grandezas estatísticas referente a taxa de transmissão calculadas durante a utilização do <i>back-to-back</i> elétrico.....	43
Tabela 4.7: Grandezas estatísticas referente a taxa de transmissão calculadas durante a utilização do <i>back-to-back</i> óptico.....	45
Tabela 4.8: Grandezas estatísticas referente a taxa de transmissão calculadas durante a utilização do sistema óptico no espaço livre sem turbulência. ....	48
Tabela 4.9: Grandezas estatísticas referente a taxa de transmissão calculadas durante a utilização do sistema óptico no espaço livrecom turbulência.....	50

## Lista de Siglas

ACK	<i>Acknowledgement</i>
ANATEL	<i>Agência Nacional de Telecomunicações</i>
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
BSA	<i>Basic Service Area</i>
BSS	<i>Basic Service Set</i>
BPSK	<i>Binary Phase Shift Keying</i>
BER	<i>Bit Error Rate</i>
CSMA/CA	<i>Carrier Sensing Multiple Access with Collision Avoidance</i>
CSMA/CD	<i>Carrier Sensing Multiple Access with Collision Detection</i>
CRC	<i>Cyclic Redundancy Check</i>
DIFS	<i>DCF Interframe Space</i>
DWDM	<i>Dense Wavelength Division Multiplexing</i>
DFT	<i>Discrete Fourier Transform</i>
DCF	<i>Distributed Coordination Function</i>
EDFA	<i>Erbium Doped Fiber Amplifier</i>
CENELEC	<i>European Committee for Electrotechnical Standardization</i>
EISF	<i>Extended Interframe Space</i>
ESS	<i>Extended Service Set</i>
HR-DSSS	<i>High Rate Direct Sequence Spread Spectrum</i>
IBSS	<i>Independent Basic Service Set</i>
IM-BSS	<i>Infrastructure Mode Basic Service Set</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IME	<i>Instituto Militar de Engenharia</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IDFT	<i>Inverse Fast Fourier Transformed</i>
LD	<i>Laser Diode</i>
LED	<i>Light-Emitting Diode</i>
MPDU	<i>Mac Protocol Data Unit</i>
MIB	<i>Management Information Base</i>

---

MAC	<i>Media Access Control</i>
OOK	<i>On-Off Keying</i>
ONU	<i>Organização das Nações Unidas</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
PRNET	<i>Packet Radio Network</i>
PCI	<i>Peripheral Component Interconnect</i>
PSK	<i>Phase-Shift Keying</i>
PLME	<i>Phy Layer Management Entity</i>
PPDU	<i>Phy Protocol Data Unit</i>
PLCP	<i>Physical Layer Convergence Procedure</i>
PMD	<i>Physical Medium Dependent</i>
PNBL	Plano Nacional de Banda Larga
PRÓ-DEFESA	Programa de Apoio ao Ensino e a Pesquisa Científica e Tecnológica em Defesa Nacional
QAM	<i>Quadrature amplitude modulation</i>
QPSK	<i>Quadrature Phase Shift Keying</i>
RTS	<i>Request To Send</i>
SAP	<i>Service Access Point</i>
SIFS	<i>Short Inter-Frame Space</i>
STAs	<i>Stations</i>
WIMAX	<i>Worldwide Interoperability for Microwave Access</i>



# Capítulo 1: Introdução

A perspectiva de proporcionar benefícios à população, tais como acesso dinâmico a informações e serviços referentes à educação, economia, entretenimento e saúde, tem contribuído de forma incisiva para que governos de diversos países adotem programas de incentivo às pesquisas orientadas a sistemas de comunicação cujo acesso ocorre por meio óptico.

Além destes benefícios, outros fatores têm colaborado para a intensificação das pesquisas relacionadas a sistemas ópticos no espaço livre tais como: crescente oferta de serviços, e aplicações envolvendo principalmente a transferência de imagem seja por vídeo conferência ou sob demanda e jogos on-line [1], aumento da demanda por conexões em banda larga a baixo custo além da necessidade de prover conexão em alta velocidade aos usuários localizados na última milha.

De acordo com estudo apresentado por MOURA *et al*, o Brasil apresenta enorme potencial para utilizar os sistemas ópticos no espaço livre, pois a maioria das cidades brasileiras estudadas pertencentes às regiões nordeste, centro-oeste, sudeste e sul apresenta condições climáticas bastante favoráveis à implantação deste tipo de sistema de comunicação [2].

## 1.1. Trabalhos relacionados ao tema

A transmissão óptica em espaço livre surgiu no final do século XVIII com a invenção do telégrafo óptico por Claude Shappe, permitindo assim, o envio de mensagens por longas distâncias [3].

Após um século do descobrimento de Shappe, Alexander Graham Bell e Charles Summer Tainter patentearam, em 14 de dezembro de 1880 sob o número 235.496, o “*photophone*”, sistema de comunicação projetado para transmitir a voz de um operador por uma determinada distância utilizando a modulação da luz do sol refletida em um diafragma de alumínio [4,5].

Porém, a falta de recursos tecnológicos capazes de facilitar a implantação, aliada a já conhecida invenção do telefone fez com que o sistema óptico no espaço livre permanecesse, até 1960, sem qualquer avanço significativo.

Neste ano, a descoberta do *laser* de rubi por Theodore Maiman, possibilitou a construção do primeiro sistema óptico no espaço livre a *laser* denominado “*Lighthphone*” [3].

Entre 1960 e 2004, embora as pesquisas fossem mais concentradas em sistemas a fibra óptica, universidades como Berkeley e Oxford além de empresas como IBM, Fuji, Fujitsu, AT&T, HP, Hitachi Matsushita e Motorola continuaram desenvolvendo pesquisas e produtos capazes de possibilitar que o sistema óptico no espaço livre alcançasse taxas de dados iguais a 155 Mbps [3].

Em 2005 Gonzales *et al*, propõe a utilização de um *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) adaptativo buscando proporcionar o aumento da taxa de transmissão nos sistema óptico no espaço livre em ambiente interno [6] e só em 2010 é publicado estudo apresentando um modelo analítico referente a sinais transmitidos utilizando OFDM óptico através de sistemas ópticos no espaço livre mostrando os parâmetros mais significativos capazes de degradar a qualidade da transmissão do sinal [7].

## 1.2. Motivação

A principal motivação para realizar esta pesquisa originou-se em um dos tópicos propostos para o projeto “Estudo de Tecnologias para Provimento de Comunicações em Sistemas Estratégicos em Defesa Nacional” contido no PRÓ-DEFESA (Programa de Apoio ao Ensino e a Pesquisa Científica e Tecnológica em Defesa Nacional) [8].

O segundo fator motivador é a necessidade de ampliação dos estudos relacionados à técnica de transmissão OFDM para sistemas ópticos no espaço livre, área de pesquisa que começa a despertar o interesse de pesquisadores relacionados a redes ópticas sem fio [7,9,10].

Além disso, embora seja um sistema potencialmente capaz de contribuir para solução do problema da última milha; o sistema óptico no espaço livre é uma tecnologia pouco utilizada no Brasil.

### 1.3. Objetivo, metodologia e contribuição

O objetivo deste trabalho é estudar o comportamento da técnica de transmissão OFDM em um sistema óptico no espaço livre na presença de turbulência.

Para alcançar este objetivo, o trabalho é desenvolvido em diferentes etapas possibilitando a caracterização do espectro elétrico transmitido e recebido, o registro da taxa de bit além dos níveis de potência óptica na presença e ausência da turbulência.

O objetivo da primeira etapa é realizar, durante o *back-to-back* elétrico, a caracterização dos espectros elétricos transmitido e recebido utilizando dispositivos como circuladores, acopladores e cabos SMA fêmea-fêmea, assim como a taxa de transmissão utilizando o aplicativo Jperf.

Os testes de caracterização do *back-to-back* óptico são realizados na segunda etapa. Nesta etapa é levantada a taxa de transmissão e a caracterização do espectro elétrico recebidos, possibilitando a verificação das perdas inseridas pelo modulador externo Mach-Zehnder.

O objetivo da terceira etapa é transmitir o sinal através das cabeças ópticas registrando a taxa de transmissão, o espectro elétrico recebido e os níveis de potência óptica emitida e recebida.

Na quarta etapa o objetivo é inserir e caracterizar turbulência ao longo do enlace juntamente com o registro da taxa de bit, espectro elétrico recebido e níveis de potência óptica recebida.

A finalização dos procedimentos da metodologia é realizada na quinta etapa caracterizando: os espectros ópticos após os principais dispositivos ópticos inseridos no circuito, a potência óptica mínima para realização de comunicação entre dois pontos utilizando sistema óptico no espaço livre para comprimento de enlace igual a 2,5 metros e os equipamentos disponíveis para o experimento, e também o registro do espectro elétrico durante as citadas condições.

A primeira contribuição deste trabalho está em demonstrar a transparência do sistema óptico no espaço livre em relação ao tipo de modulação utilizado na geração do sinal e o comportamento desse sistema de transmissão na presença de turbulência.

A segunda é a elaboração de um roteiro, executado entre as etapas um e quatro descritas neste capítulo, que permite registrar o desempenho da taxa de transmissão e a caracterização do espectro elétrico durante a realização de uma transmissão óptica no espaço livre.

#### **1.4. Organização da dissertação**

Esta dissertação é composta por cinco capítulos e dois anexos os quais apresentam aspectos teóricos e resultados relacionados aos experimentos realizados no laboratório de fotônica do Instituto Militar de Engenharia (IME).

A primeira parte desta dissertação encontra-se inserida nas primeiras três seções deste capítulo, enquanto o restante da dissertação organiza-se da seguinte forma:

No capítulo 2 são apresentados os aspectos teóricos sobre o sistema óptico no espaço livre, o sistema sem fio convencional, a turbulência atmosférica e também sobre a técnica de transmissão OFDM.

O capítulo 3 descreve os procedimentos executados durante a preparação e execução dos experimentos.

O capítulo 4 apresenta os resultados e discussões a respeito dos experimentos realizados no laboratório de fotônica do IME.

O capítulo 5 encarrega-se de apresentar as considerações finais a respeito do trabalho.

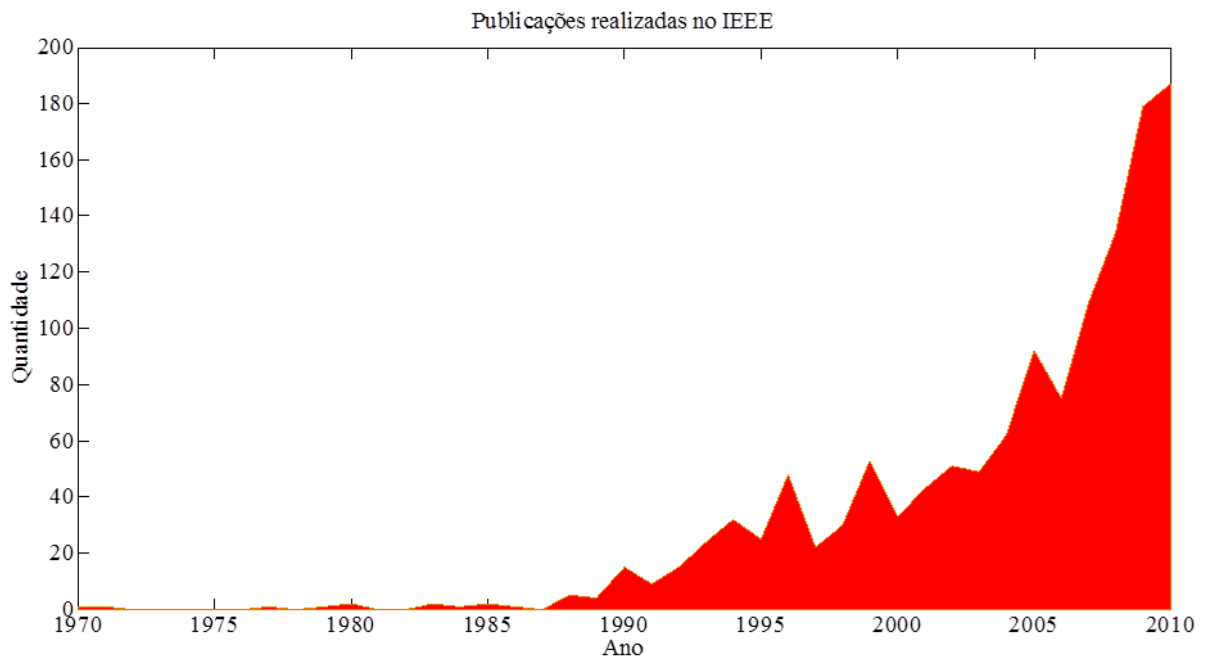
Os anexos A e B apresentam respectivamente úteis informações sobre os aplicativos Jperf e Iperf.

## Capítulo 2: Aspectos Teóricos

Este capítulo trata dos conhecimentos específicos relacionados à transmissão óptica no espaço livre. Esta abordagem inicia-se com as características do sistema óptico no espaço livre; em seguida são apresentados aspectos sobre a turbulência, *wi-fi* e OFDM.

### 2.1. Sistema óptico no espaço livre

O sistema óptico no espaço livre tem atraído a atenção de inúmeros pesquisadores ao redor do mundo. Através da figura 2.1, que apresenta a quantidade de artigos anuais apresentados no *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) durante os últimos 30 anos, verifica-se uma intensificação no número de publicações a partir do ano 1987.



**Figura 2.1:** Publicações sobre sistema de óptico no espaço no IEEE.

Dentre os fatores que contribuem para o aumento deste interesse está o fato de a implantação deste sistema de comunicação não requerer escavações e nem pagamento às concessionárias de energia elétrica, como é o caso das implantações de fibra subterrâneas e aéreas. Estes fatores representam uma economia de 80% nos custos de implantação e manutenção em relação a um enlace de fibra de mesmo comprimento [11].

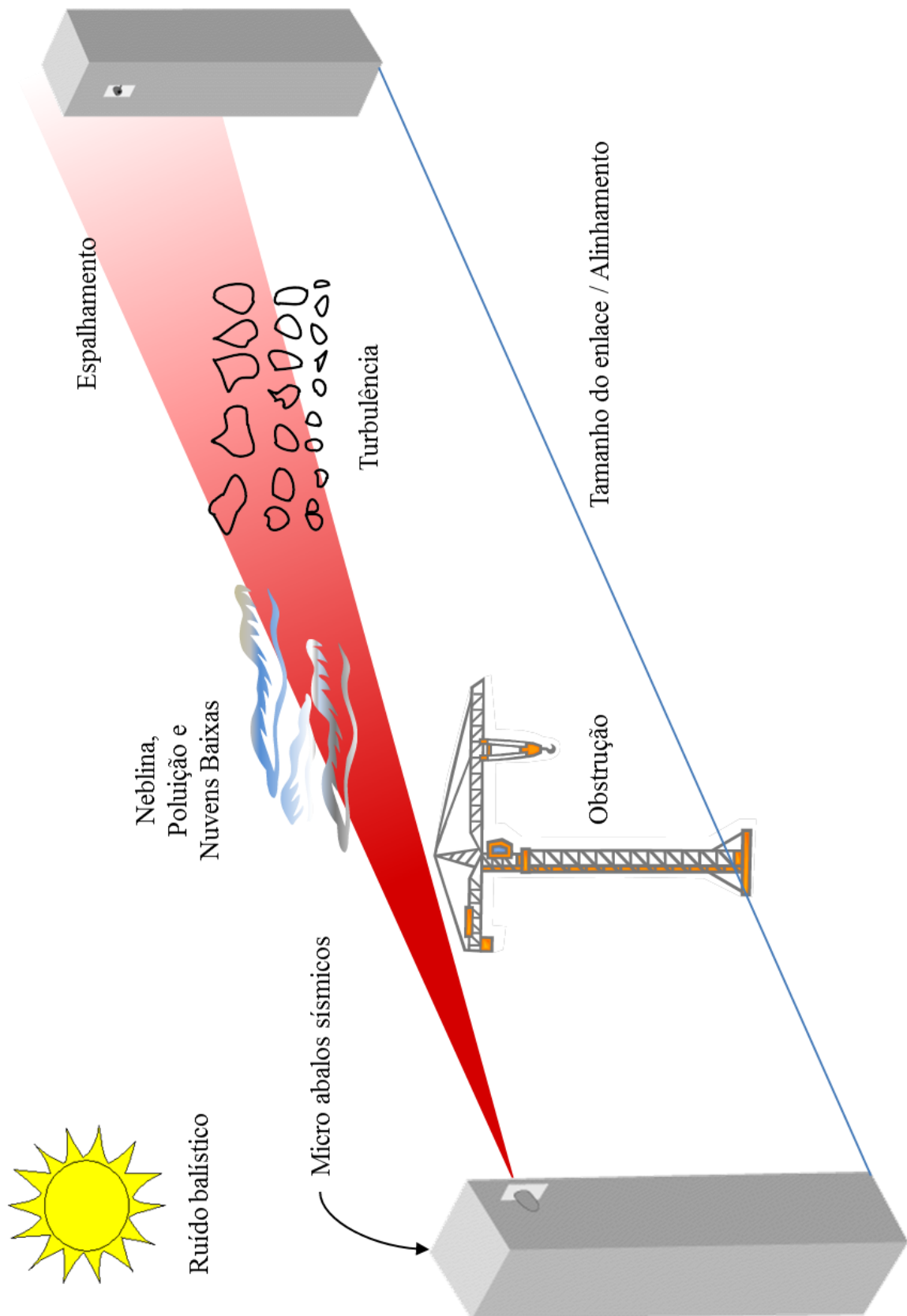
O sistema óptico no espaço livre sobressai-se em relação aos sistemas comerciais utilizando rádio frequência e também todas as tecnologias baseadas em cobre, visto que aqueles necessitam de licenças junto a Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) enquanto estas não oferecem potencial para suportar altos níveis de crescimento, em curto espaço de tempo, além de possuir taxa de *bit* limitada a 622 Mbps [11].

Este sistema óptico, destaca-se ainda, por proporcionar altas taxas de bit, da ordem de 10 Gpbs, elevada segurança em virtude de o feixe ser bastante estreito (1 – 11 mrad), imunidade à interferência eletromagnética, inexistência de risco a saúde da população e a possibilidade de interligar duas ou mais redes de forma rápida e transparente [12,13].

Porém, assim como ocorre com outros sistemas de comunicação, o sistema óptico no espaço livre também possui desvantagens, especialmente relacionadas à utilização da atmosfera como meio de transporte do sinal óptico. Esta dependência faz com que o desempenho deste sistema esteja diretamente ligado às condições atmosféricas, provocando de forma conjunta ou isolada os efeitos de: absorção, espalhamento e/ou turbulência óptica (cintilação).

Embora os três influenciem negativamente a transmissão do sinal, o efeito mais severo é causado pela turbulência óptica (cintilação), fenômeno ligado à turbulência atmosférica e que será apresentada na seção 2.2.

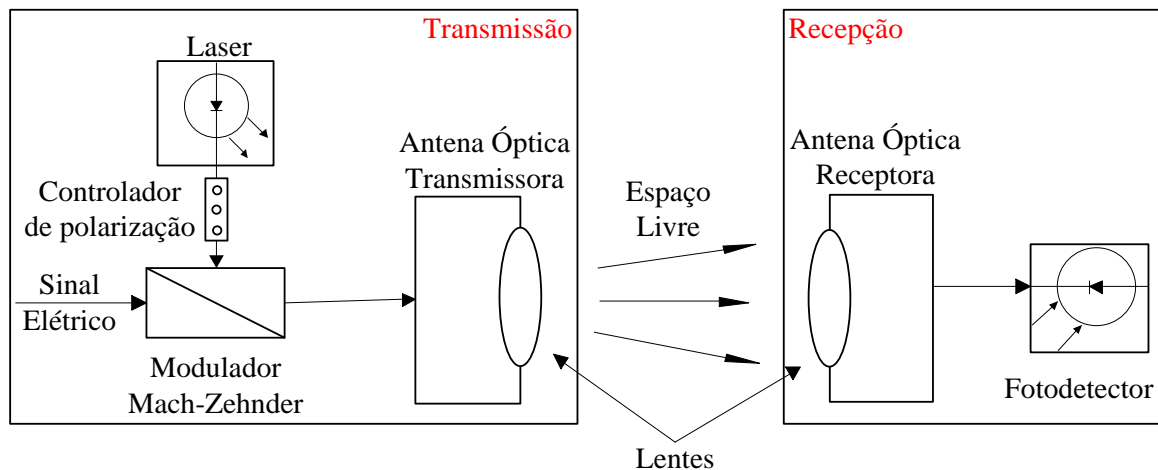
A figura 2.2 mostra que além da turbulência óptica, o tamanho do enlace /alinhamento, a poluição atmosférica, neblina e nuvens baixas, abalos sísmicos, ruído balístico e obstruções presentes na linha de visada são fatores prejudiciais ao bom funcionamento do sistema óptico no espaço livre.



**Figura 2.2:** Adversidades enfrentadas pelo sistema óptico no espaço livre.

### 2.1.1. Funcionamento do sistema óptico no espaço livre

A figura 2.3 [14] apresenta um diagrama em blocos que ilustra os principais dispositivos ópticos necessários ao funcionamento do sistema óptico no espaço livre modulado por intensidade e com detecção direta.



**Figura 2.3:** Diagrama de bloco mostrando enlace de sistema óptico no espaço livre.

Através da mesma figura 2.3 é possível observar na parte da transmissão uma antena óptica composto de lente utilizada para direcionar a luz no espaço livre, um laser que é a fonte de luz do sistema, um controlador de polarização para ajustar o nível de potência óptico e o modulador externo Mach-Zehnder responsável por modular o sinal do domínio elétrico para o óptico.

Conforme mostra a figura 2.3 a informação antes de ser enviada ao espaço livre passa pelo processo de modulação, tanto elétrica como óptica.

Nos experimentos optou-se pelo método de modulação óptica externa (modulação indireta), devido a disponibilidade de equipamento, capaz de prover taxas de *bit* superiores a 1 Gbps usando um modulador do tipo Mach-Zehnder [4,15].

Ainda no processo de modulação é utilizada o *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* (LASER) apropriado a fornecer taxas de transmissão de até 2,5 Gbps e permitir enlaces da ordem de centenas de metros utilizada nesta pesquisa. A preferência pelo LASER justifica-se em virtude de o *Light-Emitting Diodes* (LED) proporcionar taxas de *bit* não superiores a 155 Mbps [11,16].



Na recepção, composta pela antena óptica responsável por captar a luz do espaço livre e um fotodetector, o sinal é captado por lentes convergentes e encaminhado através de uma fibra óptica até o fotodetector onde o sinal óptico é reconduzido ao domínio elétrico.

## 2.2. Turbulência atmosférica

A turbulência atmosférica é um fenômeno resultado de variações aleatórias do índice de refração pela temperatura. Com o movimento de convecção do ar são formados redemoinhos ou células de ar (bolhas) provocando variações também aleatórias na forma de propagação do feixe. A turbulência é uma das principais causadoras de instabilidades sofridas por sistemas ópticos no espaço livre.

A descrição teórica deste fenômeno natural desenvolvida por Kolmogorov afirma que os aquecimentos e resfriamentos da superfície terrestre juntamente com ciclos diurnos, são a causa de grandes variações na temperatura do ar fazendo-o fluir [17].

Quando este fluxo excede o número crítico de Reynolds ( $10^5$  próximo à superfície da Terra) o regime de escoamento passa do tipo em camadas, cujas velocidades características são uniformes ou modificam-se de forma regular, para turbulento cujo estado é mais caótico [18,17].

No regime turbulento, caracterizado pela mistura do ar de diferentes temperaturas, ocorre a geração de bolsões de ar denominados células turbulentas que se distribuem aleatoriamente e variam em tamanho e temperatura [18].

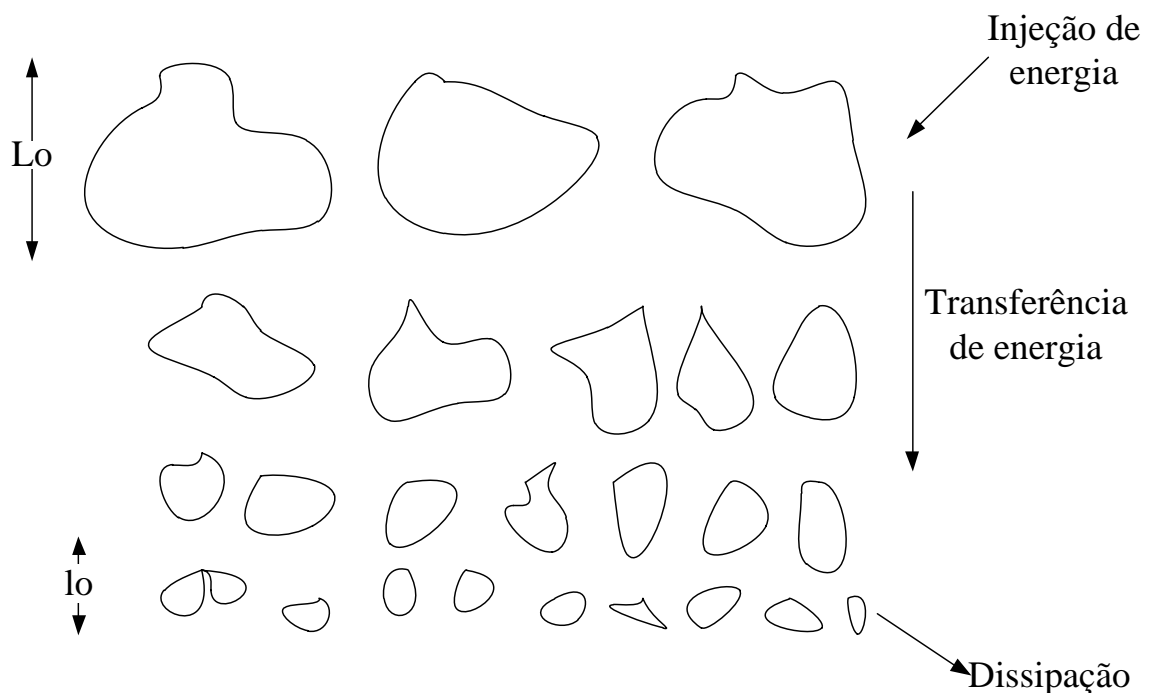
Estas bolsas de ar, que se forma e produzem turbulência, são caracterizadas de duas formas. As bolsas de ar maiores, denominadas células de escala superior de turbulência óptica ( $L_o$ ), representam a máxima escala em que a turbulência é considerada estatisticamente homogênea e isotrópica. Nesta situação, o sinal óptico propagante não sofre frequentes mudanças de curso [17].

Segundo Andrews *et al* [17] alguns modelos desenvolvidos para calcular o tamanho destes redemoinhos afirmam que, até a altitude de 100 metros,  $L_o$  pode ser considerado igual à ordem de altura do ponto de observação acima do solo. Já para altitudes superiores,  $L_o$  podem atingir algumas dezenas de centenas de metros. Andrews *et al* afirma ainda que as bolsas menores ( $l_o$ ), denominadas células de escala inferior de turbulência óptica, variam de alguns

milímetros, próximo a superfície terrestre até alguns centímetros em altitudes mais elevadas. Porém, atualmente o modelo mais aceito diz que os valores de  $l_o$  e  $L_o$  são dependentes dos comprimentos do enlace e de onda utilizados situando no intervalo  $l_o \leq \sqrt{l\lambda} \leq L_o$  [19].

Além disso, a teoria estatística desenvolvida por Kolmogorov diz que no regime turbulento, as grandes células de ar, sob influência de forças inerciais, quebram-se em células menores produzindo uma cascata contínua de bolsas de ar, cujos tamanhos variam entre  $l_o$  e  $L_o$ . Este fenômeno, denominado intervalo inercial (figura 2.4) [20], é o produto da reação de um corpo a uma força de aceleração igual em magnitude e oposta em direção à força de aceleração e contribui de forma significativa para a variação do índice de refração [17,21].

Esta variação, também denominado de turbulência óptica, pode ser caracterizada através de três parâmetros:  $l_o$ ,  $L_o$  e o parâmetro de estrutura do índice de refração ( $C_n^2$ ). Enquanto os dois primeiros descrevem a velocidade da flutuação da turbulência óptica, o  $C_n^2$ , cujos valores variam entre  $10^{-17}$  (turbulência muito fraca) e  $10^{-13}$  (turbulência forte), indica a intensidade da turbulência no local em que o enlace encontra-se instalado [17,21].



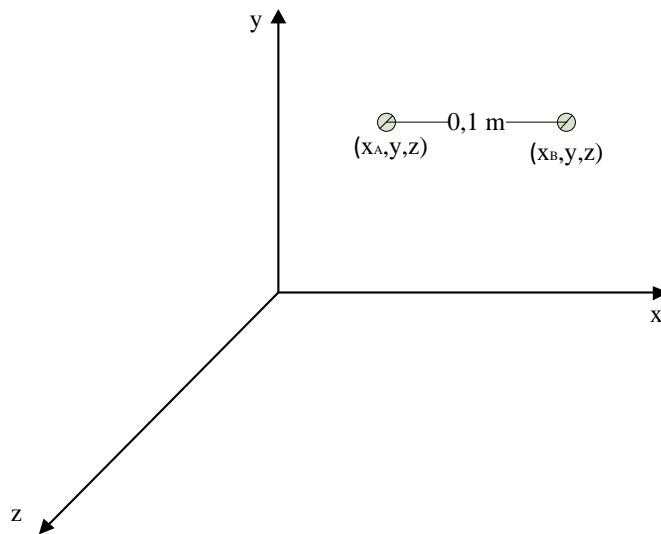
**Figura 2.4:** Representação da turbulência em cascata.

Entre os modelos disponíveis para o cálculo do parâmetro de estrutura do índice de refração, há o apresentado por Sanches [22] que se destaca por permitir a obtenção da intensidade de  $C_n^2$  utilizando os parâmetros pressão ( $P$ ), temperatura ( $T$ ) e distância ( $R$ ) cuja expressão é dada por

$$C_n^2 = \left(79 \times 10^{-6} P / \langle T \rangle^2\right)^2 \times \frac{\langle (T_1 - T_2)^2 \rangle}{R^{2/3}}. \quad (1)$$

Nesta relação,  $P$  identifica a pressão atmosférica em milibar,  $T$  a temperatura média em Kelvin,  $T_1$  e  $T_2$  são as temperaturas em Kelvin coletadas em dois pontos de mesmas coordenadas  $y$  e  $z$  e diferentes coordenadas  $x$ , cuja distância encontra-se representada por  $R$  em metros, conforme ilustrado pela figura 2.5.

GARCIA-ZAMBRANA afirma que para enlaces horizontais menores que 10 km o parâmetro de estrutura do índice de refração pode ser considerado constante [23].



**Figura 2.5:** Representação da localização dos pontos em que foram capturados as temperaturas  $T_1$  e  $T_2$ .

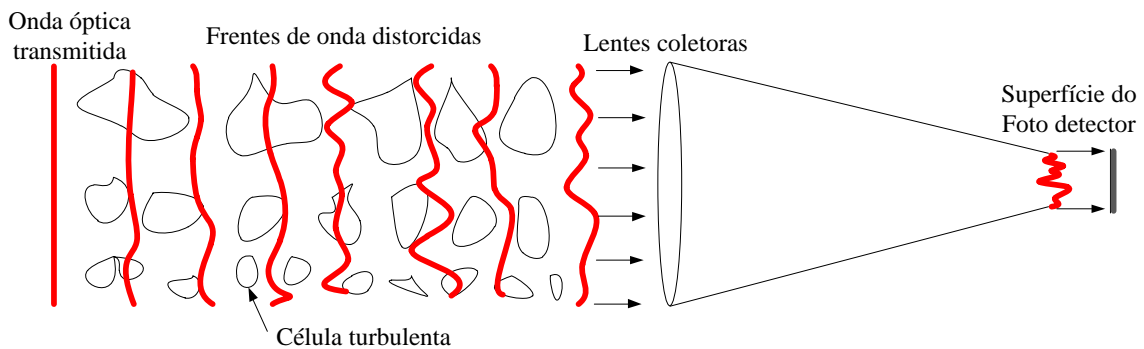
A presença da turbulência atmosférica cria três fenômenos.

O primeiro faz com que o feixe óptico tenha uma abertura maior do que a prevista na teoria de difração (*beam spreading*), este excesso de abertura reduzindo a intensidade do sinal captado pela cabeça óptica receptora.

O segundo (*beam wander*) a presença de células de ar turbulentas com diâmetro superior ao do feixe resulta em seu deslocamento.

O último e mais prejudicial fenômeno causado pela turbulência atmosférica, ilustrado na figura 2.6 é a turbulência óptica (cintilação) que é a distorção da frente de onda óptica transmitida.

Esta deformação é caracterizada por fortes variações na frente de onda do sinal devido à flutuação temporal da intensidade do sinal no receptor causada pelas rápidas modificações da temperatura e umidade [24].



**Figura 2.6:** Efeito da cintilação causado pela presença dos bolsões de ar.

### 2.3. Sistema de transmissão sem fio elétrico

A partir da década de 1990, com a popularização de equipamentos como *laptop*, a indústria passou a se interessar por esta tecnologia e devido a este interesse o *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) estabeleceu um subcomitê, IEEE 802.11, para padronizar as técnicas utilizadas em redes sem fio. Inicialmente, foram criados dois padrões, o 802.11a e o 802.11b, cujas principais características estão apresentadas na tabela 2.1 [25], em seguida em 2001 foi aprovado o padrão IEEE 802.11g e em 2007 o IEEE 802.11n.

**Tabela 2.1:** Principais característica dos padrões IEEE 802.11(a/ b).

Padrão IEEE	Frequência (GHz)	Máxima taxa de bit (Mbps)	Alcance (m)	Modulação
802.11 a	5,15 – 5,35 e 5,725 – 5,825	54	20	OFDM
802.11 b	2,4 – 2,483	11	70	CCK, DQPSK e DBPSK

### 2.3.1. Padrão IEEE 802.11g

Aprovado em novembro de 2001, para acabar com a disputa existente entre os padrões IEEE 802.11a e IEEE 802.11b disponibilizados em 1999, o padrão 802.11g opera no intervalo de frequência compreendido entre 2,4 e 2,4835 GHz utilizando o OFDM como técnica de transmissão [26].

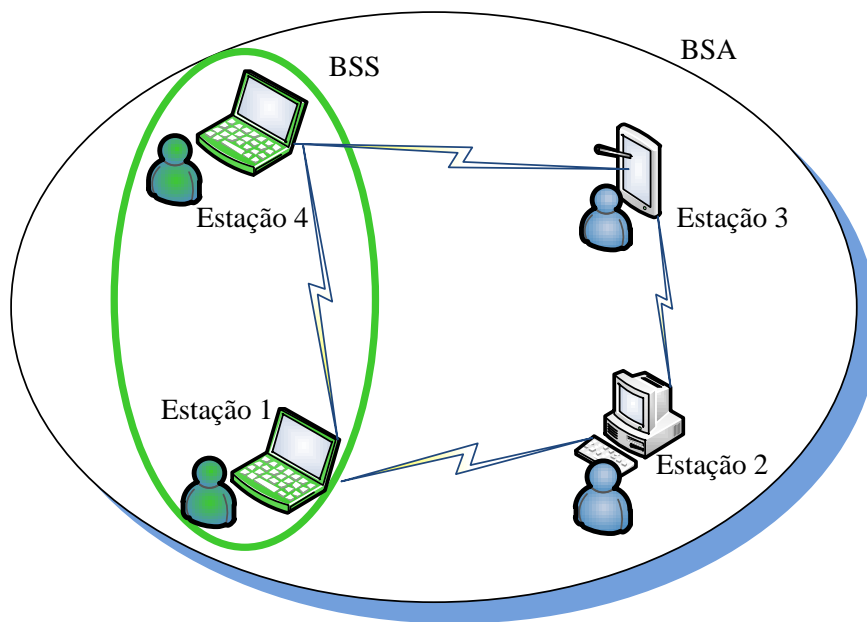
A compatibilidade com o 802.11b é fator preponderante para a aprovação do IEEE 802.11g. Isto permite que ele identifique três tipos de equipamentos distintos, a saber:

- Somente dispositivos g que são usuários do OFDM;
- Somente dispositivos b preparados para utilizar a modulação *High Rate Direct Sequence Spread Spectrum* (HR-DSSS);
- Dispositivos b e g capazes de suportar os dois tipos.

Estas características aliada ao baixo custo e grande desenvolvimento possibilitaram a elevação deste padrão à condição de mais utilizado. No entanto, este padrão enfrenta algumas adversidades, tais como: a elevada concorrência do canal atmosférico, menores largura de banda (20 MHz) e potência máxima de transmissão (15 dBm) que as existentes no IEEE 802.11b, 22 MHz e 18 dBm respectivamente, sendo este último em virtude do menor alcance do IEEE 802.11g [27,28].

### 2.3.2. Arquiteturas de rede em IEEE 802.11

No IEEE 802.11 a forma básica de uma rede sem fio é denominada *Basic Service Set* (BSS) e ocorre quando a rede é formada por apenas duas estações. Esta forma básica na maioria da vezes encontra-se localizada em uma *Basic Service Area* (BSA) que consiste em três ou mais estações comunicando entre si conforme ilustrado na figura 2.7 [29].



**Figura 2.7:** Diagrama distinguindo redes ponto a ponto.

O IEEE 802.11 define que podem existir três tipos de arquitetura de rede: *Extended Service Set* (ESS), *Infrastructure Mode Basic Service Set* (IM-BSS) e *Independent Basic Service Set* (IBSS) ou Ad-Hoc, utilizado nos experimentos descritos no capítulo 3 deste trabalho, e destacado na figura 2.7.

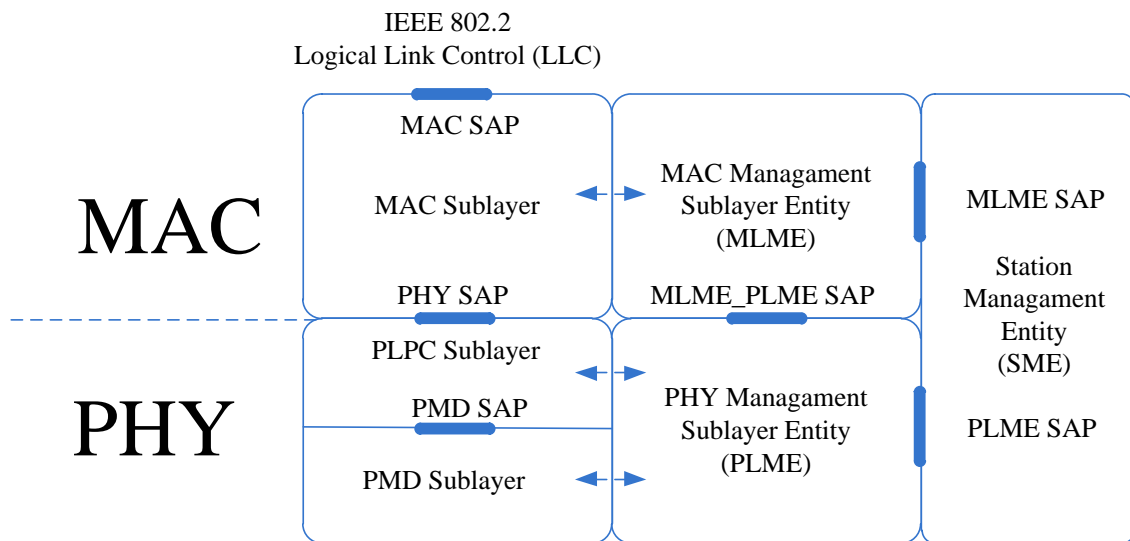
Esta última arquitetura caracteriza-se pelo fato da comunicação ocorrer diretamente entre um par de estações, como ocorre, por exemplo, com as estações 1 e 4, sendo necessário que tais estações estejam dentro do raio de alcance máximo suficiente para a ocorrência de tal transmissão [30].

### 2.3.3. Camada Física

Embora também denominado rede *Ad-Hoc* o padrão IEEE 802.11-2007 difere do desenvolvido pelo *internet engineering task force* (IETF) através do grupo de trabalho “Rede *Ad-hoc* Móveis” (IETF,2006b), pois este atua na camada IP enquanto o padrão desenvolvido pelo IEEE restringe-se apenas a camada 1 e metade da camada 2 (subcamada MAC).

A figura 2.8 [27] mostra de forma mais detalhada como encontra-se dividida a subcamada MAC quando as enxergamos através do IEEE 802.11. Através da figura 2.8 é possível verificar que a camada de rede é dividida em três subcamadas e que todas as

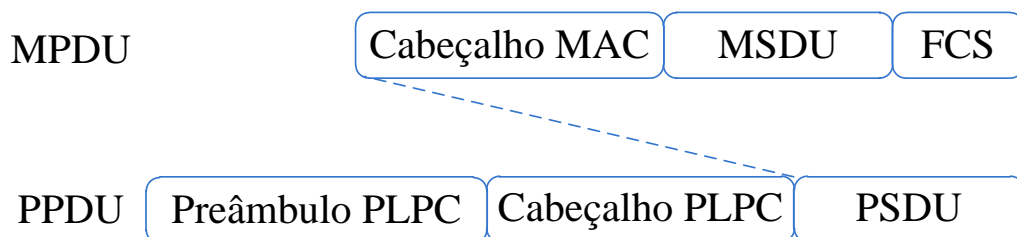
interações entre as subcamadas ou dentro de uma subcamada são realizadas pelo *Service Access Point (SAP)*.



**Figura 2.8:** Representação da camada física e da subcamada MAC do IEEE 802.11.

A figura 2.8 mostra ainda que a primeira subcamada a ser explorada é denominada *Physical Medium Dependent (PMD)*. Esta camada é a responsável pelo envio e recepção dos *frames* através do canal, tradicionalmente atmosférico.

Já a segunda, nomeada *Physical Layer Convergence Procedure (PLCP)*, relaciona as competências da subcamada MAC, expressadas através do PMD, aos serviços disponibilizados pela camada física. Essa relação é realizada através do mapeamento da *Mac Protocolo Data Unit (MPDU)* em uma *Phy Protocol Data Unit (PPDU)*, conforme ilustrada na figura 2.9 [27].



**Figura 2.9:** Relação entre as competências da camada física e da subcamada MAC.

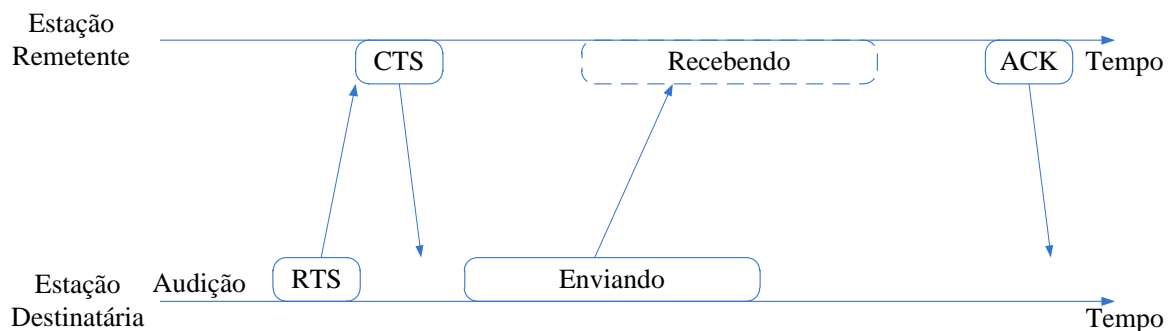
A última subdivisão da camada física é a *Phy Layer Manangement Entinty (PLME)* responsável por prover o serviço de *Manangement Information Bases (MIB)* [31].

O protocolo *Media Access Control* (MAC) é essencial para a existência de uma *Wireless Local Area Network* (WLAN), pois ele possibilita que o acesso de um ponto sem fio ao canal atmosférico seja realizado de forma ordenada e eficiente além de satisfazer regras de projetos como eficiência, flexibilidade e escalabilidade.

Este protocolo pode ser classificado, conforme o método de operação, de duas maneiras: a primeira, chamada de protocolos centralizados, é caracterizada pela existência de um nó especial responsável pela alocação do canal. A segunda, denominada protocolos distribuídos, caracteriza-se pelo fato de todos os nós na rede contenderem pelo meio de acesso sem qualquer coordenação centralizadora através do método de acesso ao canal denominado aleatório [32].

Este método de acesso é realizado através da *Distributed Coordination Function* (DCF) utilizando o *Carrier Sensing Multiple Access with Collision Avoidance* (CSMA/CA), conjunto de regras que torna possível a comunicação entre duas estações, sendo este respectivamente, modo e mecanismo mais básico de acesso.

A figura 2.10 mostra que o modo mais comum utilizado pelo mecanismo para envio de dados inicia-se verificando a ociosidade ou não do canal. Se o canal permanecer ocioso por um tempo superior ao *DCF Interframe Space* (DIFS) a estação transmissora envia um requisição denominada *Request To Send* (RTS) para a receptora que deseja transmitir, se a receptora estiver disponível, ela autoriza a transmissão através de uma mensagem chamada *Clear to Send* (CTS) [25,33].



**Figura 2.10:** Sequência de mensagem no CSMA/CA.

Caso o meio compartilhado encontre-se ocupado, situação ocorrida quando o nó emissor detecta um nível de energia acima de um limiar determinado, a transmissão deve ser adiada até o fim da corrente ocupação, reduzindo assim a probabilidade de colisões.



Quando a transmissão termina a estação transmissora aguarda um DIFS antes de escolher um tempo de espera aleatório (*backoff time*), o qual após escolhido é decrementado, caso o canal esteja ocioso, até zero quando então a estação inicia a transmissão.

O CSMA/CA, ao contrário do *Carrier Sensing Multiple Access with Collision Detection* (CSMA/CD), não efetua detecção de colisão devido à utilização de sistemas *half-duplex* os quais impendem o nó de enviar e receber dados simultaneamente. Por isso, uma falsa detecção de colisão é feita de forma indireta através do não recebimento do *Acknowledgement* (ACK) referente ao pacote transmitido [29].

Se após dois *Short Inter-Frame Space* (SIFS) o ACK não for recebido, devido a dados corrompidos ou a eventuais colisões, a estação remetente agenda uma nova transmissão. A detecção desses erros, ocorridos durante a transmissão, é realizado pelo algoritmo *Cyclic Redundancy Check* (CRC) e força as estações envolvidas esperarem um tempo denominado *Extended Interframe Space* (EIFS) antes de reativar o *backoff time* [25,34].

## 2.4. Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)

Segundo Liu *et al* [30] embora os conceitos de transmissão sobre múltiplas portadoras fossem conhecidos desde a década de 1950, a alta eficiência espectral a baixo custo só aconteceu após a utilização da técnica matemática *Discrete Fourier Transform* (DFT).

Esta técnica executa os processos de modulação e demodulação eliminando a necessidade de inclusão de osciladores, multiplexadores e também da separação das componentes de RF para cada subportadora tanto no transmissor como no receptor. A técnica DFT aliada à economia de banda e o combate à seletividade em frequência foram três importantes fatores que contribuíram para a popularização da técnica de transmissão OFDM.

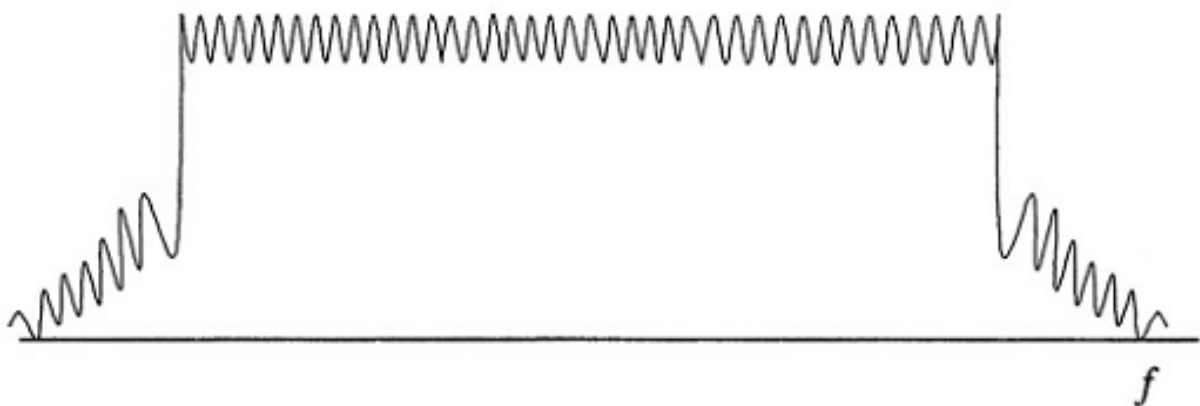
O uso prático desta técnica pode ser observado em importantes sistemas de comunicação como rádio e televisão digitais, sistemas sem fio *wi-fi* e *Worldwide Interoperability for Microwave Access* (WiMAX).

Já em outros sistemas como o híbrido AM/OFDM a cabo, rádio sobre fibra e o sistema óptico no espaço livre a utilização do OFDM vem sendo proposta [35].

### 2.4.1. OFDM Convencional

Para uma rede sem fio funcionar é necessário alguns pré-requisitos básicos tais como: único MAC suportar múltiplas camadas físicas, robustez a interferência, mecanismos para tratar nós escondidos e sobreposição de várias redes entre outros.

Visando atender estas exigências o padrão IEEE 802.11g optou por utilizar o OFDM convencional, cujo espectro elétrico característico encontra-se apresentado na figura 2.11 e as principais características são apresentadas na tabela 2.2 [30].



**Figura 2.11:** Espectro típico do sinal OFDM.

Através da tabela 2.2 verifica-se que para transmitir cada símbolo a técnica OFDM, no padrão IEEE 802.11g, utiliza 52 das 64 subportadoras disponíveis. Deste total utilizado, quatro denominadas pilotos, realizam o sincronismo e 48 são destinadas ao transporte da conteúdo útil enquanto as 12 restantes não são utilizadas [36].

**Tabela 2.2:** Principais características do OFDM-RF.

<b>Característica</b>	<b>Valor</b>
Subportadoras existentes (SE)	64
Subportadoras para transporte de conteúdo útil	48
Subportadoras pilotos	4
Subportadoras não utilizadas	12
Duração do símbolo OFDM	$4 \mu\text{s} (T_{GI} + T_{FFT})$
Intervalo de guarda ( $T_{GI}$ )	$0,8 \mu\text{s}$
Espaçamento de subportadora ( $\Delta F$ )	$312,5 \text{ kHz} (EC / SE)$
Período da FFT/IFFT ( $T_{FFT}$ )	$3,2 \mu\text{s} (1 / \Delta F)$
Largura de banda em -3 dB	$16,25 \text{ MHz}$
Espaçamento do canal (EC)	$20 \text{ MHz}$

A duração de um símbolo OFDM no padrão IEEE 802.11g é de 4  $\mu$ s. Este valor inclui 0,8  $\mu$ s do intervalo de guarda ( $T_{GI}$ ), que é a técnica responsável pelo combate aos efeitos indesejados proveniente dos múltiplos percursos, e os 3,2  $\mu$ s restantes são destinados à realização dos processos de modulação e demodulação do sinal ( $T_{FFT}$ ).

Embora o dado teórico da largura do canal disponível para transmissão da informação seja de 20 MHz a largura efetiva utilizada é 16,25 MHz; este valor é obtido multiplicando-se o número de 52 portadoras utilizadas pelo espaçamento (0,3125 kHz) disponibilizado a cada subcanal. O restante da banda fica livre e corresponde às 12 subportadoras não utilizadas.

A tabela 2.3 mostra outra característica importante do OFDM: são suas taxas de transmissão. O padrão 802.11g apresenta oito possíveis taxas de transmissão as quais estão diretamente relacionadas a outras características do padrão, como: o tipo de modulação, a taxa de codificação e a potência do transmissor.

**Tabela 2.3:** Taxas de bit e codificação, modulação e potência emitida praticadas pelo OFDM.

Taxa de bit [Mbps]	Modulação	Taxa de Codificação	Potência Emitida [dBm]
0 6	BPSK	1/2	16 - 18
6 9	BPSK	3/4	
9 12	QPSK	1/2	
12 18	QPSK	3/4	
18 24	16-QAM	1/2	15 - 17
24 36	16-QAM	3/4	
36 48	64-QAM	2/3	14 - 16
48 54	64-QAM	3/4	13 - 15

A tabela 2.3 também indica que a maioria das taxas de transmissão (62,5%) são obtidas utilizando potências oscilando entre 16 e 18 dBm, enquanto as restantes (37,5%) necessitam de potências entre 13 e 17 dBm.

Ainda na tabela 2.3 é possível observar a presença de taxas de codificação iguais 1/2, 2/3 e 3/4 sendo o numerador a quantidade de *bits* de redundância enquanto o denominador significa o número de símbolos transmitidos.

Este recurso, embora diminua a eficiência espectral para respectivamente 1/2, 2/3 e 3/4 da eficiência apresentada pela modulação, apresenta como ponto positivo a redução da taxa de erro de *bit* permitindo ao sistema operar mesmo com baixa relação sinal/ruído.

Outra informação contida na tabela 2.3 são os tipos de modulação utilizada pela técnica de transmissão OFDM para prover as taxas de bit capazes de alcançar teoricamente até 54 Mbps.

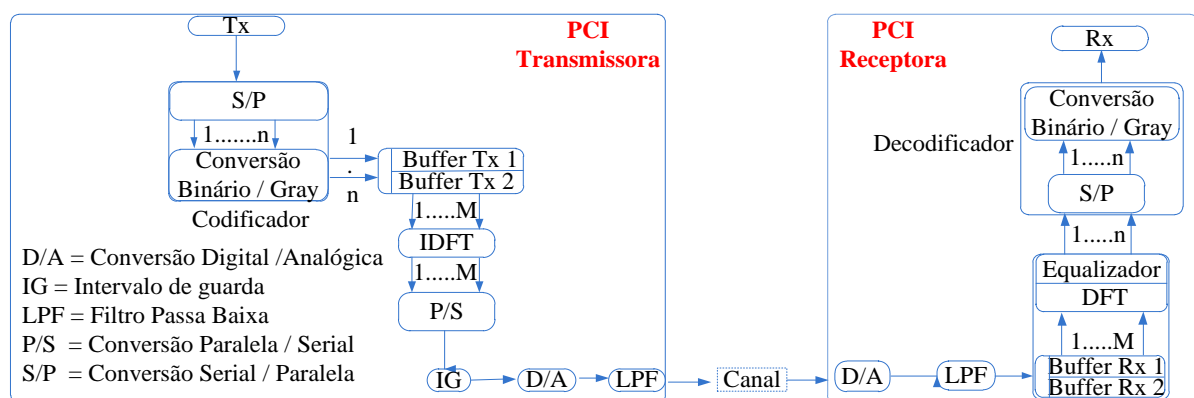
O primeiro é *Binary Phase Shift Keying* (BPSK) forma particular da modulação *Phase Shift Keying* (PSK). Nesta forma os bits 0 e 1 são obtidos variando a fase da portadora em  $180^\circ$  enquanto a amplitude e a frequência do sinal permanecem constante.

Observa-se também a presença do *Quadrature Phase Shift Keying* (QPSK), que utiliza a fase e a quadratura da onda para realizar a modulação do sinal a ser transmitido.

O último é o *Quadrature Amplitude Modulation* (QAM) que também utiliza a quadratura e a fase da onda na modulação da informação, porém, diferente do que acontece no PSK, os símbolos não se encontram a distâncias iguais da origem. 16-QAM e 64-QAM utilizam respectivamente 16 e 64 símbolos sendo respectivamente 4 e 16 em cada quadrante do diagrama de constelação que é a representação do sinal modulado por uma modulação digital [37].

As especificações contidas na tabela 2.2 e na tabela 2.3 são responsáveis pelo funcionamento do OFDM convencional representado pela figura 2.12 [38] que apresenta todos os passos executados por um sistema de transmissão usuário do OFDM.

A figura 2.12 mostra que a geração do sinal OFDM inicia-se submetendo os *bits* a um codificador onde ocorre a paralelização para a formação de  $n$  símbolos a serem codificados em Gray, sistema de código binário em que a variação entre um número e outro apenas acontece em apenas um *bit*.



**Figura 2.12:** Diagrama em blocos representando OFDM/RF.

Após a codificação, os símbolos são armazenados inicialmente no *buffer* 1 e depois transportados para o *buffer* 2 a fim de serem modulados pela transformada inversa de Fourier (IDFT).

Finalizada a modulação os símbolos são reordenados de forma serial e em seguida aplica-se o intervalo de guarda responsável por combater possíveis perdas que possam ocorrer no ambiente atmosférico.

Por fim é realizada uma conversão digital-analógica através de um filtro passa baixa tornando o sinal pronto para ser transmitido [38].

Após propagar pelo ambiente atmosférico o sinal que incide na estação receptora realiza um novo processo preparatório iniciado pela conversão analógica/digital. Há em seguida o armazenamento no *buffer* Rx 2 em seguida no *buffer* Rx 1 e a reconversão para o domínio da frequência através da *Discrete Fourier Transformed* (DFT). Após esta etapa, os *bits* são paralelizados permitindo a decodificação do formato Gray para o binário permitindo a recondução ao formato em série e a entrega ao destinatário.

#### 2.4.2. OFDM Óptico

De acordo com Armstrong [39] a distinção entre o OFDM convencional e o óptico é feita com base em duas principais características.

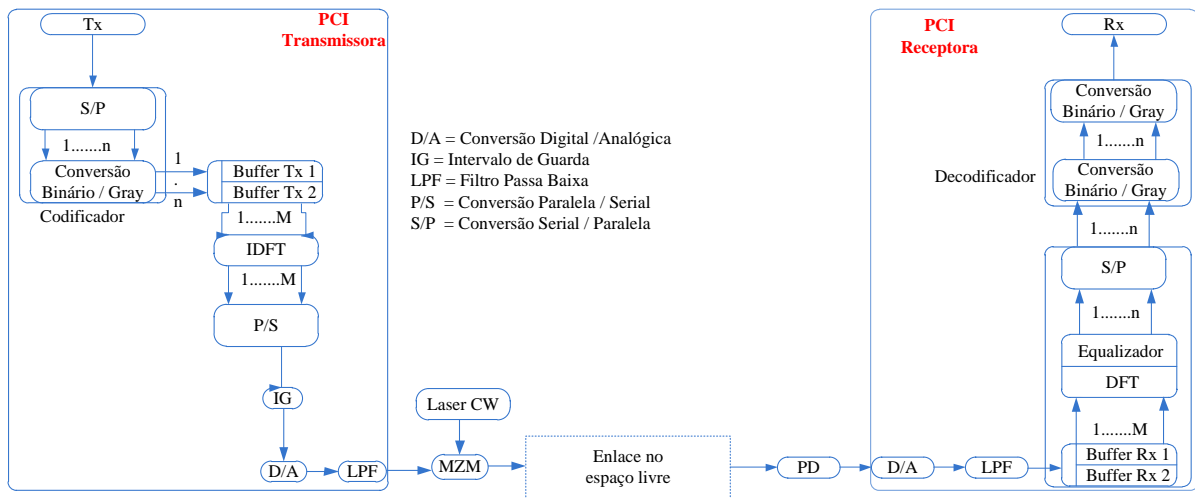
A primeira é o fato de o OFDM convencional transportar a informação sobre o campo elétrico enquanto o OFDM óptico utiliza a intensidade óptica. O transporte utilizando o campo elétrico permite que o sinal seja representado tanto por valores positivos quanto negativos, já o uso da intensidade óptica restringe esta representação a valores positivos.

Na recepção, enquanto o OFDM convencional realiza uma detecção coerente o OFDM óptico realiza a detecção direta e, portanto mais simples.

Conforme ilustrado na figura 2.13 [38] a obtenção, pelo OFDM óptico, de taxas superiores a 1 Gbps é conseguida através da inserção do *laser* de sinal, do modulador Mach-Zehnder, duas antenas ópticas e um foto detector.

Os primeiros dois componentes (*laser* de sinal e modulador) são responsáveis por mapear a informação do domínio elétrico para o domínio óptico, as antenas ópticas realizam a

emissão e a recepção do sinal no ambiente atmosférico enquanto o fotodetector efetua a reconversão do domínio óptico para o elétrico.



**Figura 2.13:** Diagrama em blocos representando OFDM Óptico.

## Capítulo 3: Desenvolvimento Experimental

Este capítulo destina-se a apresentar a metodologia utilizada para realização dos experimentos no laboratório de fotônica do Instituto Militar de Engenharia (IME).

A primeira etapa experimental envolveu a montagem e caracterização do transmissor e receptor elétrico.

A figura 3.1 ilustra a montagem utilizada para a transmissão das subportadoras elétricas. O canal de comunicação é suprimido e o transmissor é conectado diretamente, através de cabos coaxiais, com o receptor. Esta configuração é denominada *back-to-back* elétrico.

Este experimento é importante, pois permite levantar as máximas condições de operação na ausência das perdas causadas pelo canal de comunicação.

A figura 3.1 mostra que para esta primeira experiência foram utilizados dois computadores Pentium 4<sup>®</sup>/DELL gerenciados pelo sistema operacional Linux utilizando a distribuição Ubuntu 10.04, duas placas *wi-fi* fabricadas pela D-Link com potência de transmissão igual a 0 dBm, seis cabos coaxiais CBL4FT-SMS+ / MINI-CIRCUITS, dois circuladores SM2327C01 e três isoladores SM2327T01 ambos da QUEST, um atenuador 3340C/HP e o analisador de espectro MS2034A responsável por capturar o espectro elétrico do sinal recebido.

Os três isoladores, o atenuador e a potência igual a 0 dBm foram utilizados para evitar que a transmissão e a recepção do sinal fossem realizadas por uma única parte do circuito conforme detectado nos experimentos realizados em [40].

Logo após a implantação física da rede ponto-a-ponto, ilustrado pela figura 3.1, é realizada, no Ubuntu 10.04 e utilizando o padrão o IEEE 802.11g, a configuração da rede implantada fisicamente.

Após a implantação de configuração da rede inicia-se a etapa de geração de fluxo de dados entre os dois microcomputadores. Para isso, é utilizado o Jperf<sup>®</sup>, interface gráfica desenvolvido em plataforma Java<sup>®</sup> que executa o Iperf, aplicativo livre que funciona com arquitetura cliente/servidor, o qual é utilizado para medir a vazão existente em uma determinada rede.

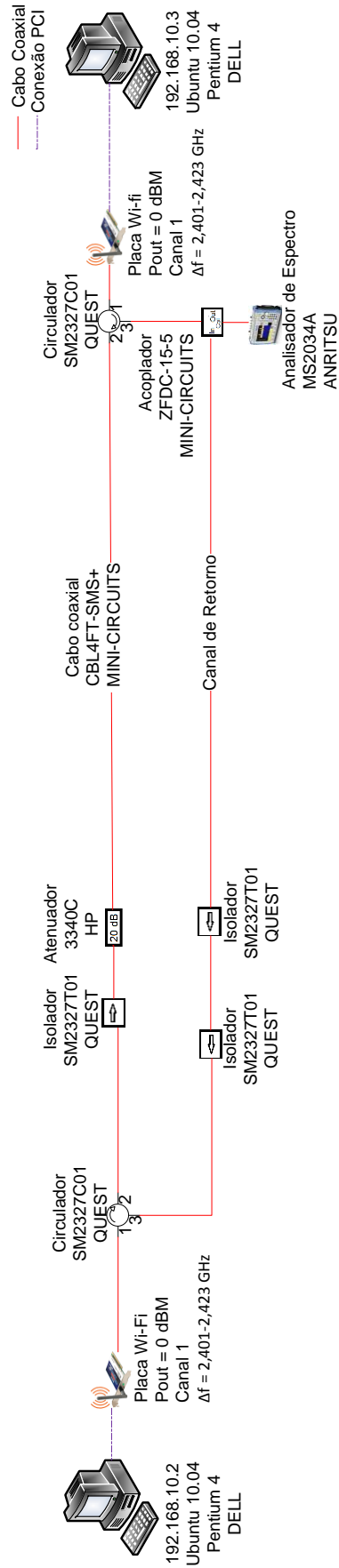


Figura 3.1: Representação da rede ponto-a-ponto utilizada durante o *back-to-back* elétrico.



Para que o fluxo fosse gerado, é atribuído ao microcomputador com endereço 192.168.10.3 o título simbólico de servidor, esta atribuição é executada escolhendo a opção *server* e confirmando a sua escolha através do botão *Run IPerf*.

O microcomputador identificado pelo endereço 192.168.10.2 é configurado como cliente. Para realizar esta configuração é necessário realizar os seguintes passos: marcar a opção *Client* e informar o endereço da estação servidora (*Server Address*), determinar o intervalo de transmissão através da opção *Transmit* e escolher o tipo de protocolo.

A escolha do protocolo UDP é por este ser capaz de permitir ao Jperf gerar fluxo de dados utilizando sua máxima capacidade. Completou-se a configuração informando no campo *UDP Bandwidth* a taxa de bit máxima a ser transmitida.

Na primeira fase do experimento utilizou-se a taxa de bit igual a 54 Mbps, na segunda fase de teste esta taxa é alterada para 30 Mbps.

Configuração semelhante é utilizada para caracterizar o sistema óptico, conforme ilustra a figura 3.2. Neste estágio são computadas algumas perdas devido ao a inclusão dos dispositivos ópticos: modulador, fotodetector e as fibras monomodo acopladas aos dois dispositivos ópticos anteriormente citados.

Além do modulador e do fotodetector a figura 3.2 indica a presença de outros dispositivos tais como: um *laser* utilizado na transmissão e outro laser presente no canal de retorno com comprimentos de ondas guias iguais a 1482,89 nm e 1560,56 nm respectivamente, o controlador de polarização, o acoplador elétrico, fontes de alimentação do Mach-Zehnder e fotodetector e o analisador de espectro.

A figura 3.2 também mostra que a rede é instalada utilizando o canal 1 com intervalo de frequência variando entre 2,401 e 2,423 GHz com a potência da placa *wi-fi* configurada em 0 dBm.

Após a realização destas etapas foram iniciadas as medições, utilizando o sistema de transmissão sem fio óptico, inicialmente sem turbulência e posteriormente com presença deste fenômeno natural simulado por um soprador de ar industrial modelo HL-1500 / STEINEL.

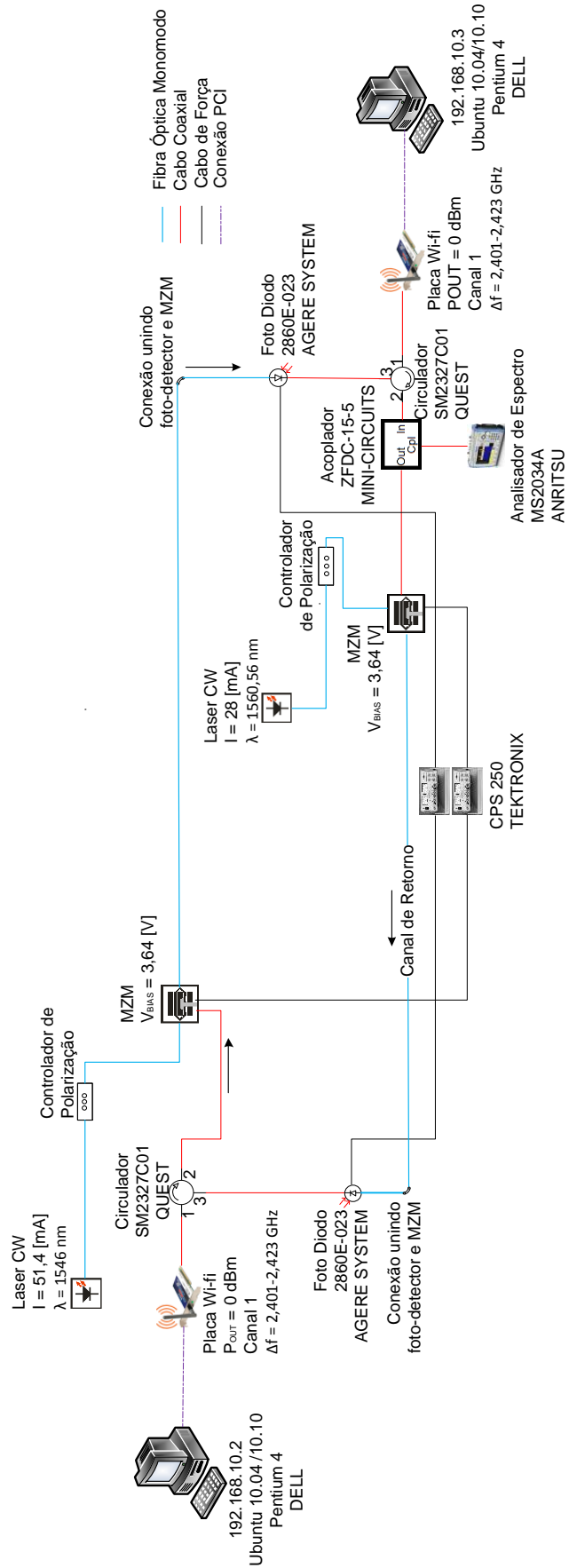


Figura 3.2: Representação da rede ponto-a-ponto utilizada durante o *back-to-back* óptico.

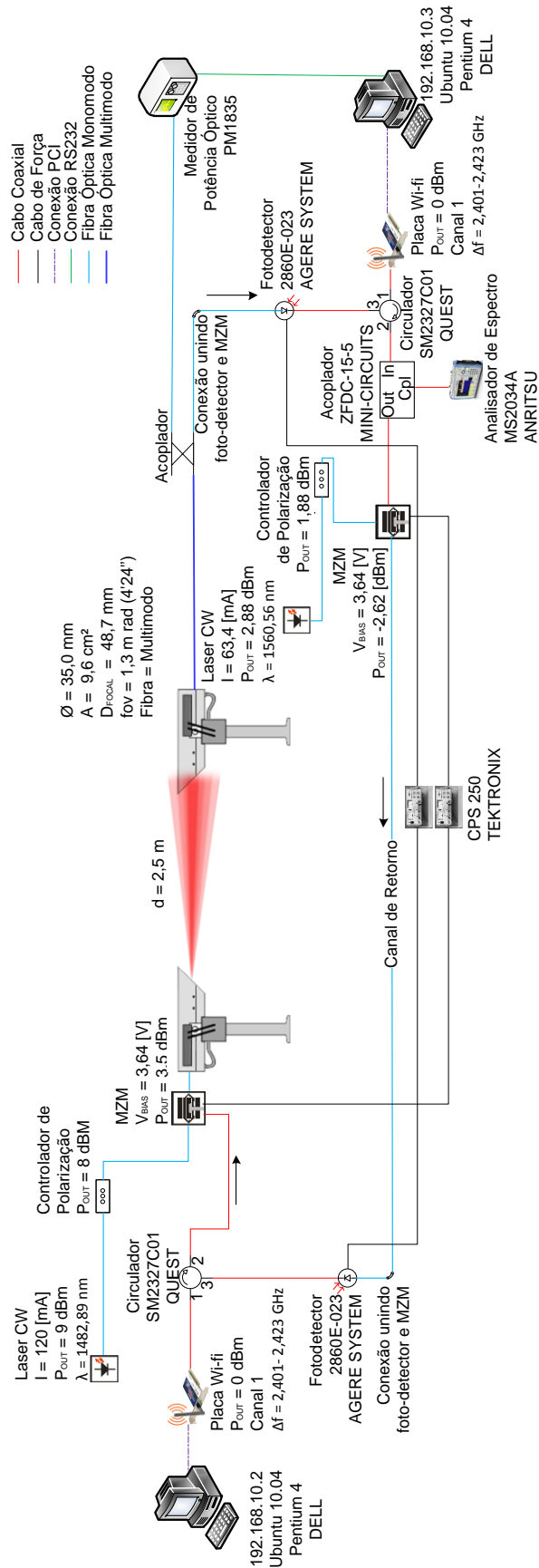
A figura 3.3 mostra que nesta configuração alguns dispositivos foram adicionados, tais como: antenas ópticas sendo uma transmissora (emitindo potência igual a 3,5 dBm) e outra receptora (captando potência óptica igual a 1,9 dBm), um acoplador WDM responsável por permitir que a potência óptica captada na cabeça óptica seja em parte encaminhada ao medidor de potência óptico PM1835 para fins de registro e a outra parte siga para o fotodetector fechando desta forma o circuito.

A figura 3.4 aponta algumas diferenças quando comparada à representação da figura 3.3. Uma delas é a exclusão do medidor de potência, pois ele não conseguiu registrar e encaminhar as informações sobre os níveis de potência óptica capturada ao programa que gerencia o próprio medidor.

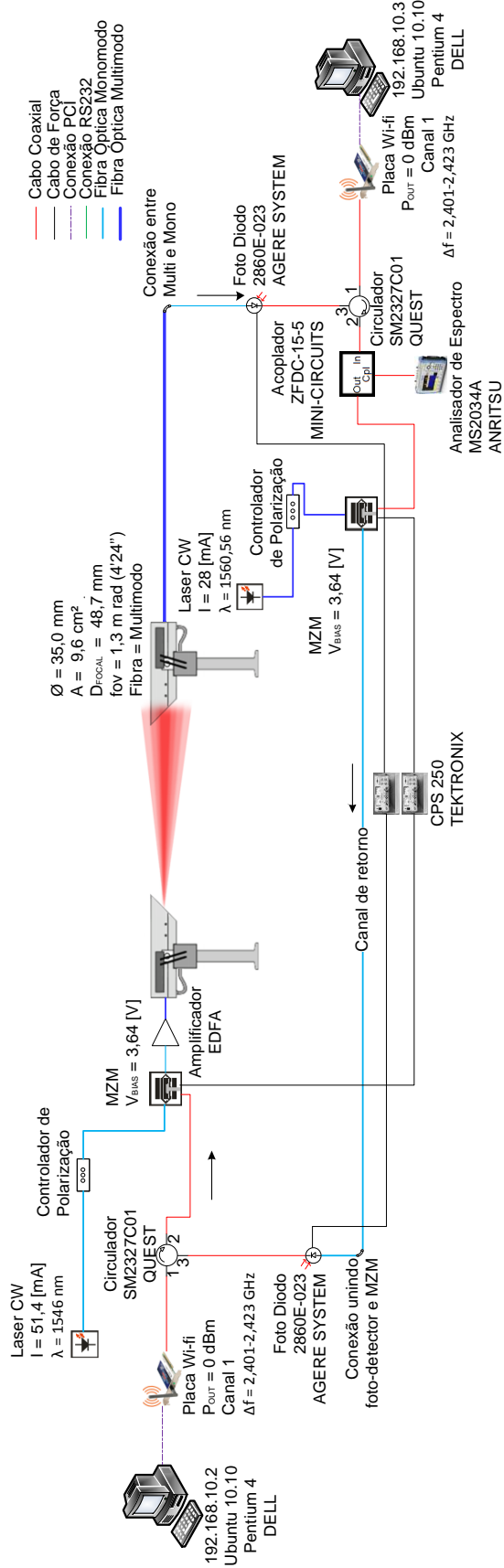
A outra mudança é a inclusão do *Erbium Doped Fiber Amplifier* (EDFA). A adição deste dispositivo óptico é necessária em virtude de não ter sido possível alcançar o bom alinhamento como o obtido na conexão explicitada pela figura 3.3.

No entanto, apenas a inclusão do EDFA não foi suficiente para a realização da conexão, pois o sinal óptico captado na antena óptica seguia através de uma fibra multimodo até um fotodetector que o recebia por meio de uma fibra monomodo. O encontro destes dois tipos de fibras passou a inserir perdas que impedia a conclusão da conexão.

Durante a busca pela solução do problema percebeu-se que ao ser movimentada a fibra que saía do EDFA o nível de sinal óptico aumentava. Diante desta constatação resolveu-se formar um anel com esta fibra e posicioná-lo na posição vertical buscando a manutenção dos máximos níveis verificados durante a movimentação da fibra. Esta solução se revelou acertada, pois a partir deste momento a conexão entre as duas estações sem fio é obtida.



**Figura 3.3:** Representação da rede ponto-a-ponto utilizada durante a transmissão utilizando o sistema óptico no espaço livre com medidor de potência óptico.



**Figura 3.4:** Representação da rede ponto-a-ponto utilizada durante a transmissão utilizando o sistema óptico no espaço livre amplificado pelo EDFA.

## Capítulo 4: Resultados e Discussão

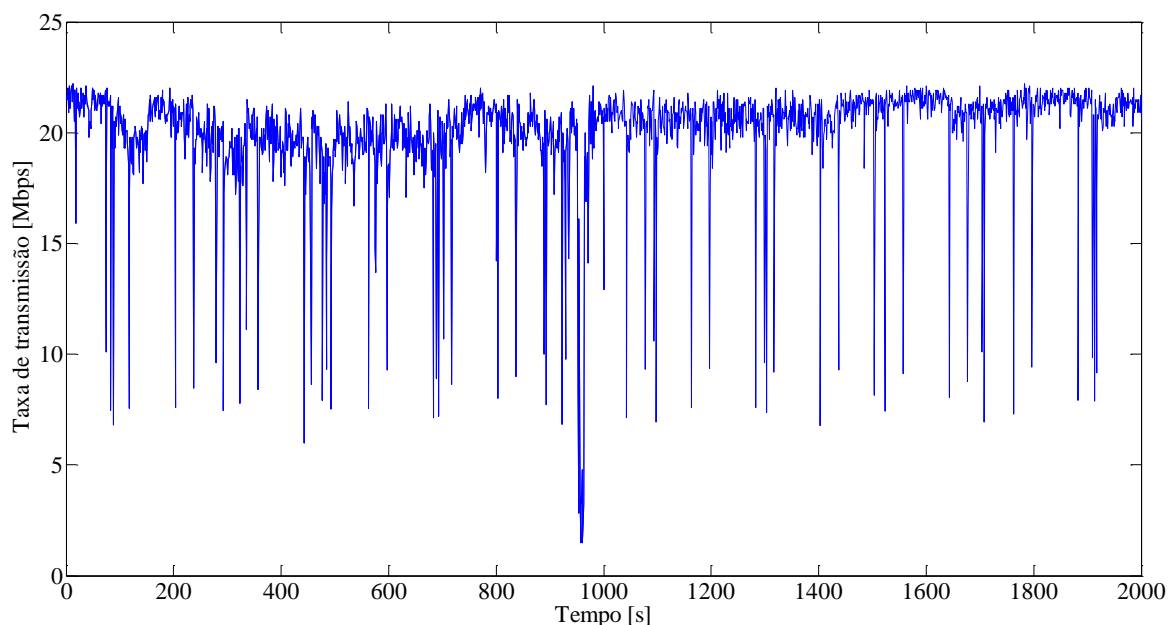
Este capítulo apresenta os resultados em três seções. A seção 4.1 exibe os resultados dos experimentos preliminares realizados utilizando a distribuição Linux Ubuntu 10.04. Na seção 4.2 são apresentados e comentados os resultados colhidos durante os experimentos finais realizados no Ubuntu 10.10. A seção 4.3 expõe os resultados referentes à caracterização do sinal no domínio óptico.

### 4.1. Experimentos Preliminares

Nesta fase inicial dos testes, o aplicativo de geração de fluxo de dados Jperf<sup>®</sup> 2.0.2 é configurado para transmitir com taxa máxima de *bit* igual a 54 Mbps.

#### 4.1.1. *Back-to-Back* Elétrico

A figura 4.1 e a tabela 4.1 indicam que durante os dois mil segundos analisados a taxa de *bit* apresentou média em torno de 20 Mbps equivalendo a 37% da taxa nominal.



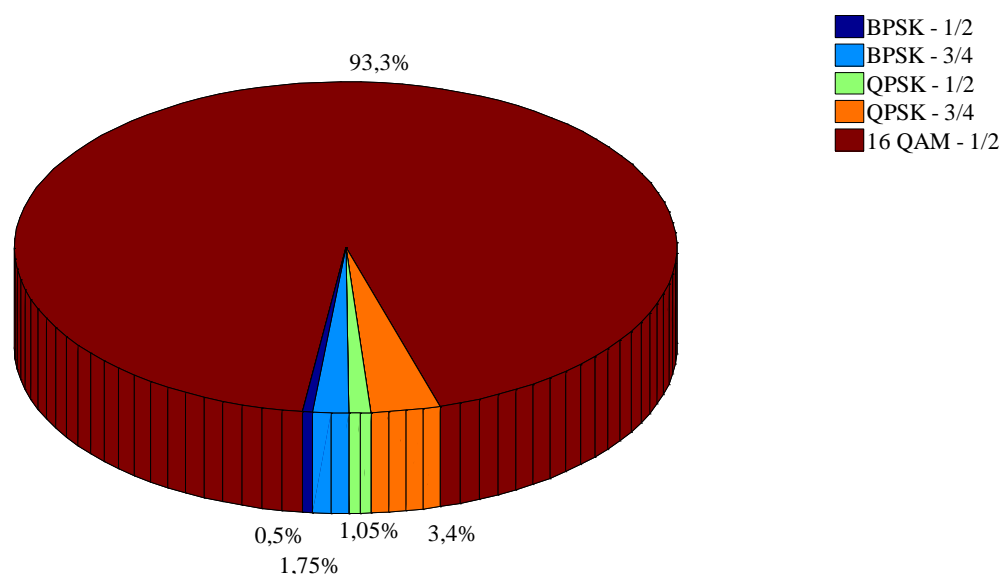
**Figura 4.1:** Comportamento da taxa de transmissão calculada durante *back-to-back* elétrico na estação transmissora.

**Tabela 4.1:** Grandezas estatísticas referente a taxa de transmissão calculadas durante a utilização do *back-to-back* elétrico.

Métrica	Taxa de bit [Mbps]
Média	20,03
Moda	20,90
Mínimo	1,48
Máximo	22,20

A tabela 4.1 também mostra, que a taxa de bit mais registrada (Moda) é 20,9 Mbps, o *Jperf*<sup>®</sup> também registrou como taxas mínima e máxima de transmissão os valores 1,48 e 22,20 Mbps respectivamente.

Os valores percentuais das taxas de *bit* em relação aos tipos de modulação e codificação, expostas na figura 4.2, permite concluir que, durante o *back-to-back* elétrico utilizando a distribuição Linux Ubuntu 10.04, houve um predomínio, 93,3% do tempo, da modulação 16 QAM com taxa de codificação igual a 1/2. Nesta configuração as taxas de *bit* variam de 18 a 24 Mbps.

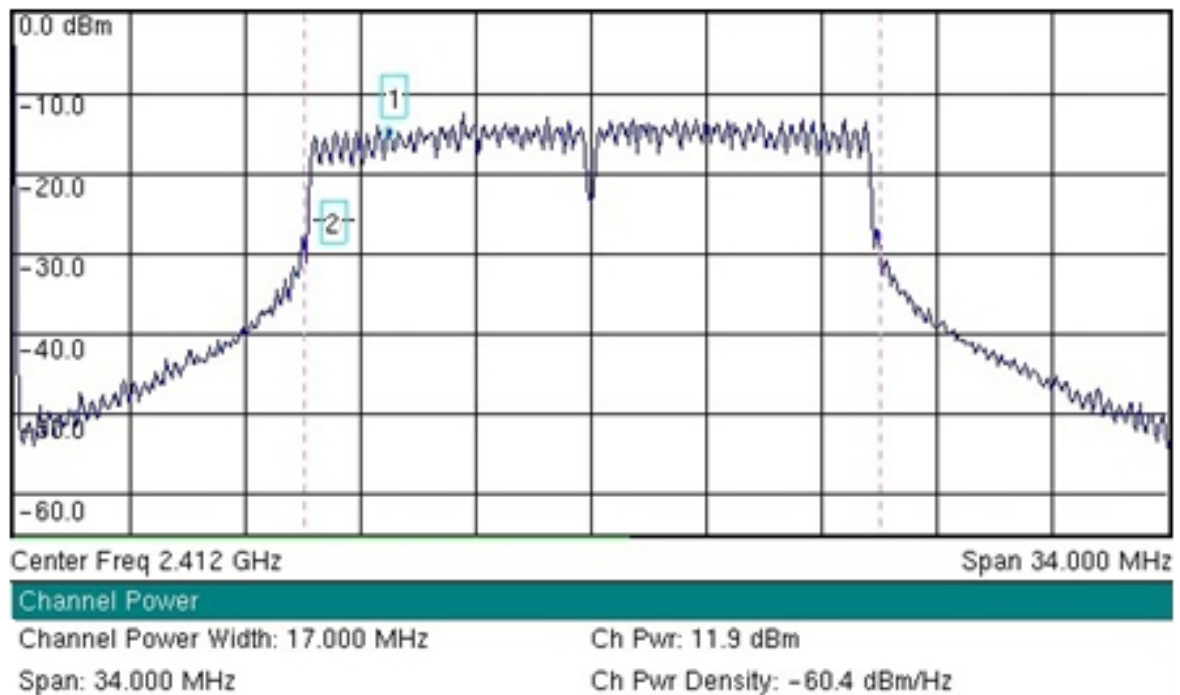


**Figura 4.2:** Taxas de transmissão segmentadas por tipo de modulação e codificação durante utilização do *back-to-back* elétrico.

Após a 16 QAM – 1/2 a figura 4,2 mostra que QPSK - 3/4, cujas taxas de *bit* variam de 12 a 18 Mbps, é a modulação mais utilizada, no entanto em um percentual bem inferior (3,4%), em seguida a BPSK – 3/4, cujas taxas variam entre 6 a 9 Mbps, é utilizada em 1,75%, a QPSK – 1/2, com taxa de bit variando entre 9 a 12 Mbps, é empregada em 1,05% e a BPSK

– 1/2, que possibilita taxas de até 6 Mbps, é usada em 0,5% das taxas de bit verificadas durante o experimento.

A figura 4.3 mostra o sinal emitido pela estação transmissora durante o *back-to-back* elétrico. A figura 4.3 indica uma relação sinal ruído de aproximadamente 14 dB. Este valor é obtido subtraindo a potência elétrica do ponto 1, igual a -16 dBm, da potência registrada na base do espectro (ponto 2) igual a -30 dBm.

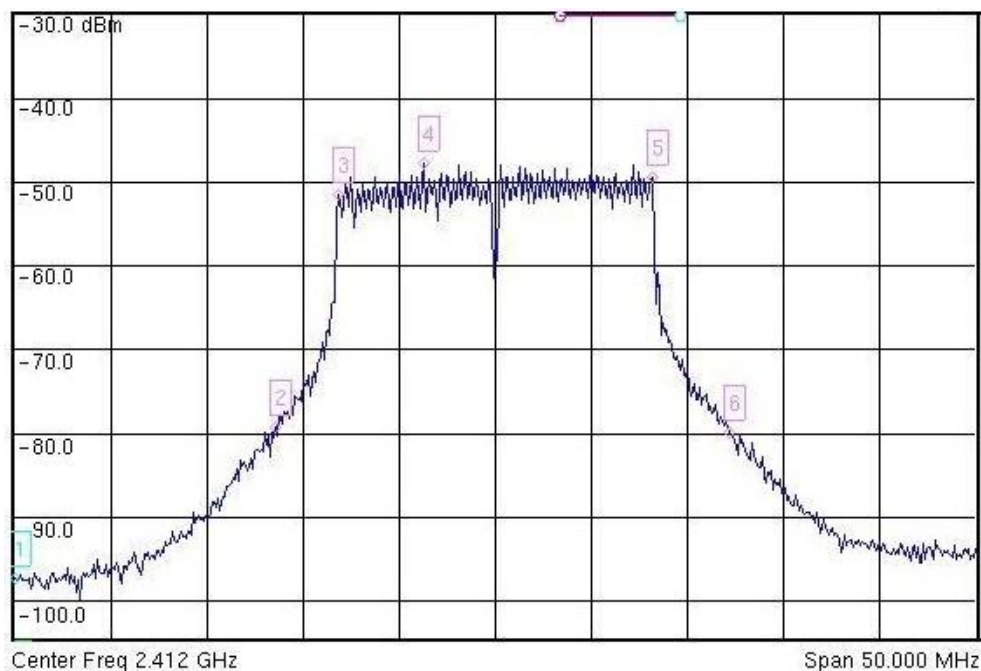


**Figura 4.3:** Espectro elétrico transmitido capturado logo após a placa *wi-fi* transmissora e antes do modulador Mach-Zehnder durante o *back-to-back* elétrico.

Objetivando comparar os valores apresentados no espectro teórico do sinal *wi-fi* apresentado em [34] com os valores reais registrou-se através da figura 4.4 o espectro elétrico das múltiplas subportadoras medido na entrada do receptor.

Através da figura 4.4 obtêm-se duas informações. A primeira é que o espectro semelhante ao apresentado por (SHIEH e DJORDJEVIC, p. 19) [34] e a segunda é que ele também se assemelha ao típico espectro OFDM apresentada na Figura 2.11.





**Figura 4.4:** Espectro elétrico recebido capturado após o fotodetector e antes da placa *wi-fi* receptora durante o *back-to-back* elétrico.

A tabela 4.2 apresenta os principais valores representados na figura 4.4 através dos seis marcadores.

Na base do espectro e frequência 2,387 GHz (marcador 1) é registrada uma potência igual a -97,38 dBm. Na cintura do mesmo espectro (marcador 2), cuja frequência é 2,4 GHz esse valor passa a ser -79,30 dBm. O marcador 3 mostra que a potência máxima da primeira portadora, situada em 2,403 GHz, é -51,46 dBm.

O marcador 4 destaca que a potência da portadora (situada na frequência 2,408 GHz) é a mais elevada e igual a -47,66 dBm. O marcador 5 registra que a potência da última portadora situada em 2,419 GHz encontra-se em -49,47 dBm enquanto o marcador 6 registra -79,85 dBm.

Subtraindo as frequências dos marcadores (3 e 5) observa-se que a largura de banda do canal é de aproximadamente 16 MHz. Os marcadores (2 e 6) mostram que os níveis de potência espaçado 12 MHz da frequência central encontra-se em torno -79 dBm.

Quando a comparação é realizada entre os espectros transmitido e recebido observa-se perdas de aproximadamente 31 dB [ponto 1 (figura 4.3) – ponto 4 (figura 4.4)], parte das perdas (20 dB) é devido a inserção do atenuador e os 11 dB restantes é devido a presença de circuladores, cabos coaxiais e conexão existentes no circuito.

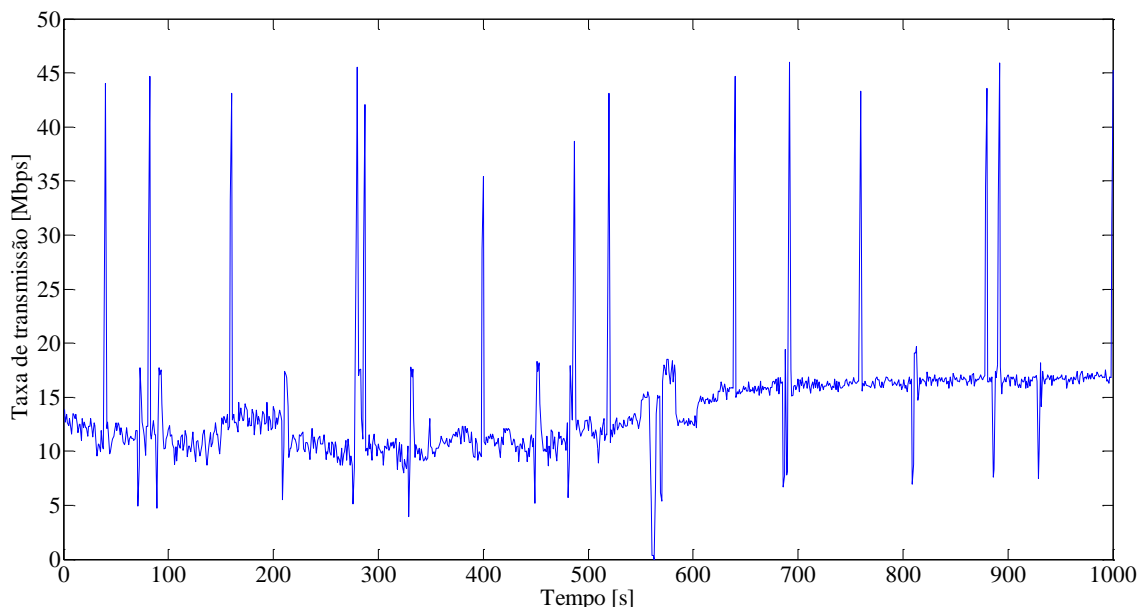
**Tabela 4.2:** Níveis de potência em pontos do espectro elétrico recebido, capturado após o fotodetector e antes da placa *wi-fi* receptora durante o *back-to-back* elétrico.

Marcador	Frequência [GHz]	Potência [dBm]
1	2,387	-97,38
2	2,400	-79,30
3	2,403	-51,46
4	2,408	-47,66
5	2,419	-49,47
6	2,424	-79,85

#### 4.1.2. Sistema óptico em espaço livre na ausência de turbulência

Nesta subseção é analisado e discutido o desempenho do sistema de óptico no espaço livre em rede ponto a ponto utilizando duas estações gerenciadas pelo Ubuntu 10.04 cuja ilustração encontra-se apresentada na figura 3.3.

A figura 4.5 mostra que a inserção do sistema óptico no espaço livre contribui para uma oscilação das taxas de *bit*. Este resultado já era esperado, pois nesta configuração ocorrem mais perdas, devido o espaço livre, e conseqüentemente os níveis de potências percebidos pelo cartão de interface de rede *wi-fi* receptor serão menores que os do primeiro experimento.



**Figura 4.5:** Comportamento da taxa de transmissão calculada na estação transmissora durante utilização do sistema óptico no espaço livre na ausência de turbulência.

A figura 4.5 também mostra a existência de quatorze taxas de transmissão reais bem superiores aos valores médios registrados em virtude de ter sido informada no aplicativo Jperf campo *bandwidth* valores de taxas máximas iguais a 54 Mbps. Contudo, conforme constatado em experimentos anteriores a estes, estas elevadas taxas é compensada com perdas de pacotes superiores a 90%.

**Tabela 4.3:** Grandezas estatísticas referente a taxa de transmissão calculadas durante a utilização do sistema óptico no espaço livre na ausência de turbulência.

Métrica	Taxa de bit [Mbps]
Média	14,03
Moda	16,5
Mínimo	0
Máximo	46

A tabela 4.3 mostra que a taxa média, neste período, sofreu um decréscimo de aproximadamente 30%, devido ao motivo já explicado, ela abandona os 20 Mbps médios verificados no *back-to-back* elétrico e passa a apresentar um patamar médio igual a 14,03 Mbps.

Outra medida que oscilou negativamente é a moda, porém felizmente o valor da queda é menor, em torno de 21%. Esta medida que antes havia registrado valor igual a 20,90 Mbps passou a registrar valores iguais a 16,5 Mbps.

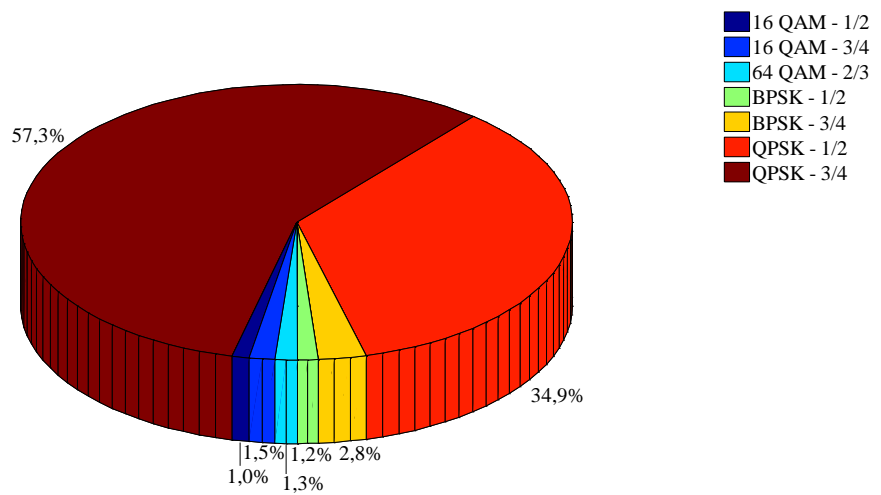
A tabela 4.3 mostra ainda, durante a transmissão, dois instantes especiais. O primeiro quando a transmissão apresentou taxa de bit nula (segundo 563) e o outro (segundo 692) ao alcançar taxa de bit igual a 46 Mbps, valores comprovados pela figura 4.5.

O aprofundamento na análise dos dados, contidos na figura 4.6, possibilita verificar que em 57,3% do tempo, a taxa de *bit* ( $T$ ) situou-se no intervalo  $12 < T \leq 18$  [Mbps] confirmando o valor da moda apresentado na tabela 4.3 acima e mostrando que a modulação QPSK utilizando a codificação 3/4 é a mais utilizada, superando a QPSK 1/2 utilizada em 34,9% do tempo e tipo de modulação mais utilizada no experimento anterior.

É importante também citar que os valores próximos ao mínimo e, portanto abaixo de 6 Mbps representaram 1,2%, enquanto outros 1,3% situaram-se entre 36 e 48 Mbps utilizando respectivamente as modulações BPSK – 1/2 e 64 QAM – 2/3.

A figura 4.6 também mostra que taxas de *bit* entre 6 e 9 Mbps (BPSK – 3/4), 18 e 24 Mbps (16 QAM – 1/2), 24 e 36 Mbps (16 QAM – 3/4) representaram respectivamente 2,8%, 1,1% e 1,5% de todos os valores verificados.

Estes dados refletem com mais intensidade a constatação de que neste experimento a interligação de dois pontos utilizando sistema óptico no espaço livre insere perdas capazes de deslocar a faixa de transmissão de QAM ( $T > 24$  Mbps) para QPSK ( $9 < T < 18$ ) Mbps.

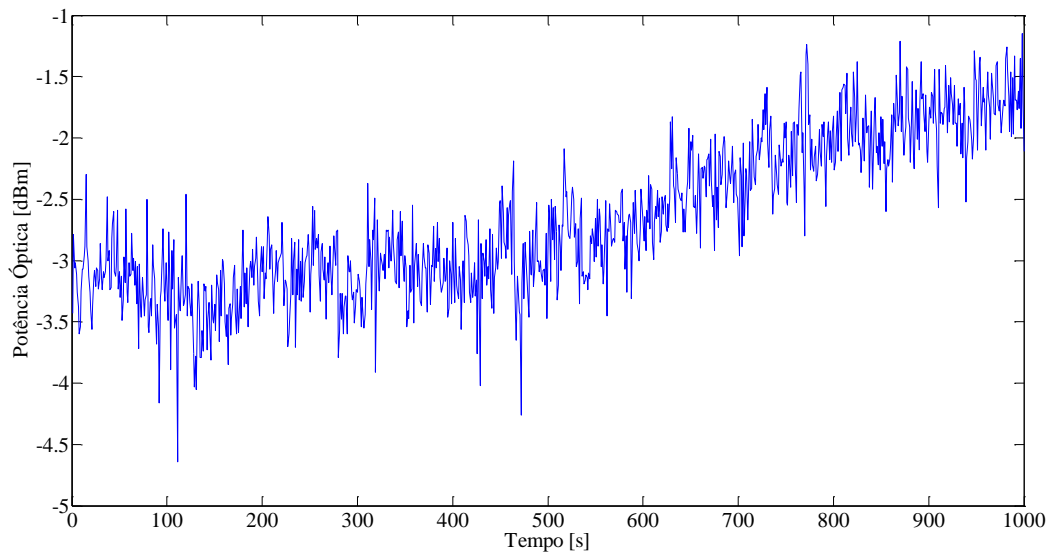


**Figura 4.6:** Taxas de transmissão segmentadas por tipo de modulação e codificação durante utilização do sistema óptico no espaço livre na ausência de turbulência.

Em paralelo ao registro das taxas de *bit* é também realizado o armazenamento dos níveis de potência óptica captados pela antena óptica receptora distante 2,5 metros da antena óptica transmissora o qual emitia potência de aproximadamente 3 dBm.

A figura 4.7 mostra que até o segundo 500 a potência óptica do sinal oscilou em torno de -3 dBm. A partir deste instante o nível de potência óptica do sinal começa a se elevar até alcançar valores próximos a -1,00 dBm.

As informações contidas na tabela 4.4 mostra que durante o experimento os níveis de potência óptica médio registrados são de -3,01 dBm, o valor mais observado (Moda) é -3,27 dBm e que as intensidades de potência óptica recebida oscilaram entre -4,74 e -1,34 dBm.

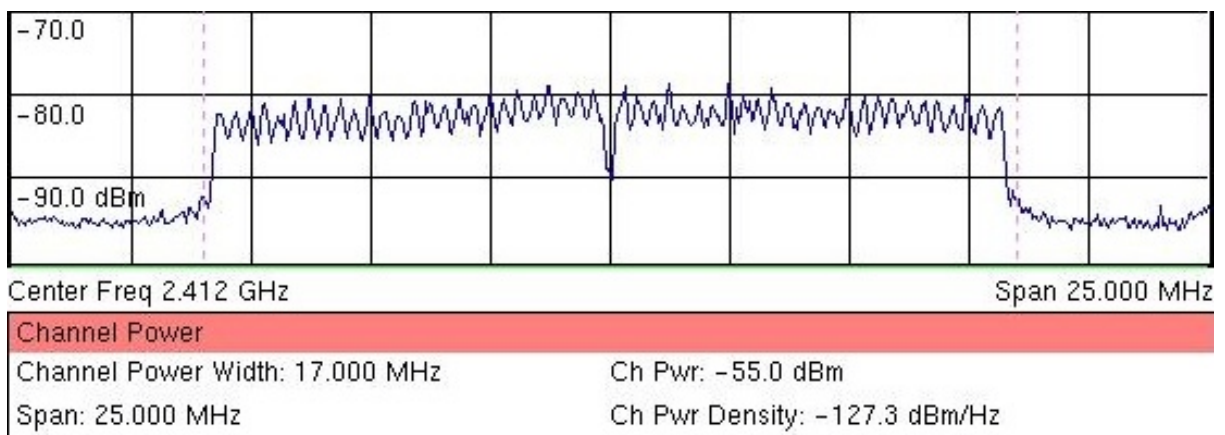


**Figura 4.7:** Níveis de potência óptica capturados na antena receptora durante utilização do sistema óptico no espaço livre na ausência de turbulência.

**Tabela 4.4:** Grandezas estatísticas referentes aos níveis de potência óptica capturados na antena receptora.

Métrica	Níveis de Potência [dBm]
Média	-3,01
Moda	-3,27
Mínimo	-4,74
Máximo	-1,34

O espectro elétrico, apresentado na figura 4.8, mostra que, durante esta experiência, a largura de banda é de aproximadamente 16,25 MHz. Este valor pode ser estimado em virtude da distância entre as linhas tracejada ser igual a 17 MHz.



**Figura 4.8:** Espectro elétrico recebido capturado após o fotodetector e antes da placa *wi-fi* receptora durante o enlace realizado com sistema óptico no espaço livre na ausência de turbulência.

Verifica-se ainda, na figura 4.8, a presença de 52 picos de tensão representando as 52 subportadoras utilizada pelo padrão IEEE 802.11 e também que estes picos apresentam valores em torno de -81 dBm o que confirma as especificações obtidas junto *datasheet* do dispositivo. Este mesmo documento correlaciona este nível de potência a velocidades em torno de 18 Mbps [41].

#### 4.1.3. Sistema óptico em espaço livre na presença de turbulência

Esta seção mostra o comportamento do sistema óptico no espaço livre quando submetido à influência de turbulência caracterizada pelo parâmetro do índice de refração contabilizada pela equação (1) apresentada na seção 2.2.

As intensidades das temperaturas ( $T_1 = 355$  K e  $T_2 = 354,8$  K) capturadas através de um termômetro a laser em dois pontos distintos do eixo “x” e mesmas coordenadas nos eixos “y e z”. O valor utilizado para T (354,9 K) é o valor médio entre a menor e maior temperatura. A pressão atmosférica utilizada é a observada ao nível do mar (1013,25 mbar). Já a distância entre os dois pontos onde foram medidas as respectivas temperaturas é 0,1 m. Substituindo todos os valores na equação (1), temos um parâmetro do índice de refração ( $C_n^2$ ) igual  $7,5 \times 10^{-14}$ , o qual conforme GARCIA-ZAMBRANA [21] indica a existência de uma turbulência em nível moderado.

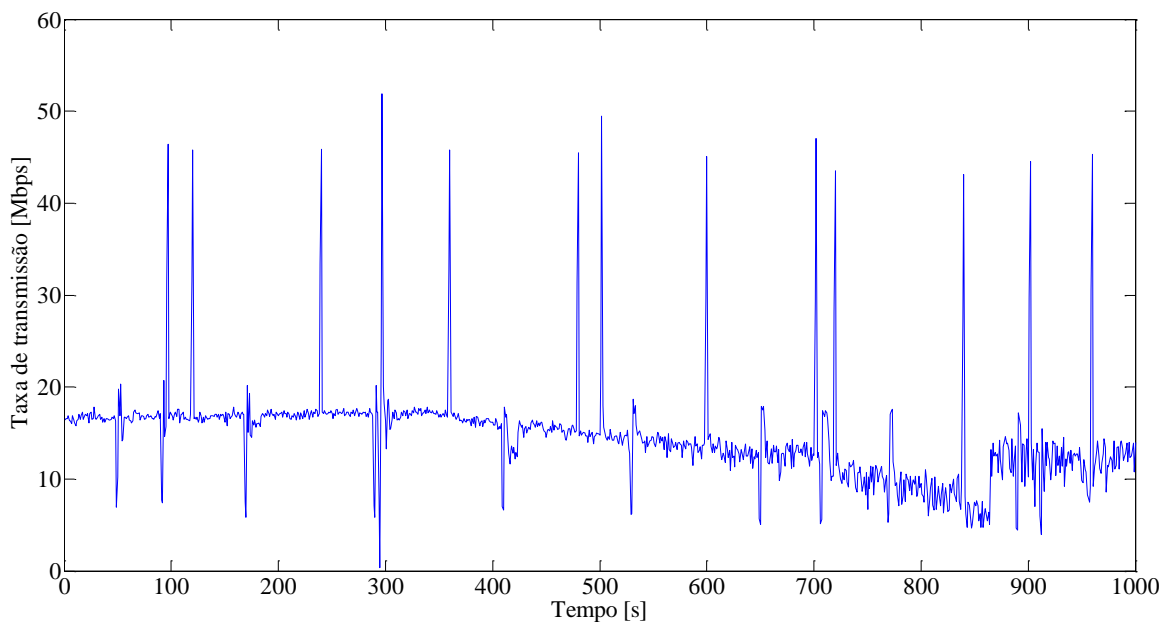
A figura 4.9 mostra que até o segundo 200 o sistema mantém-se relativamente estável embora apresente taxas de transmissão próxima a 50 Mbps. Isso corrobora com a informação apresentada na figura 4.10 – Nível I, que também mostra níveis de potência óptica estáveis.

Neste período o soprador térmico HL 1500 (STEINEL) é utilizado no nível I, situação que, conforme o manual do dispositivo, a emissão de ar acontece a uma taxa de 240 litros por minuto a uma temperatura igual a 300°C.

A figura 4.9 mostra também que entre os segundos 200 e 300 as taxas de transmissão ainda apresentam relativa estabilidade, embora neste período o soprador já esteja sendo utilizado em seu nível II. Neste nível, o soprador térmico emite ar a uma taxa de 400 litros por minuto a uma temperatura de 500°C.

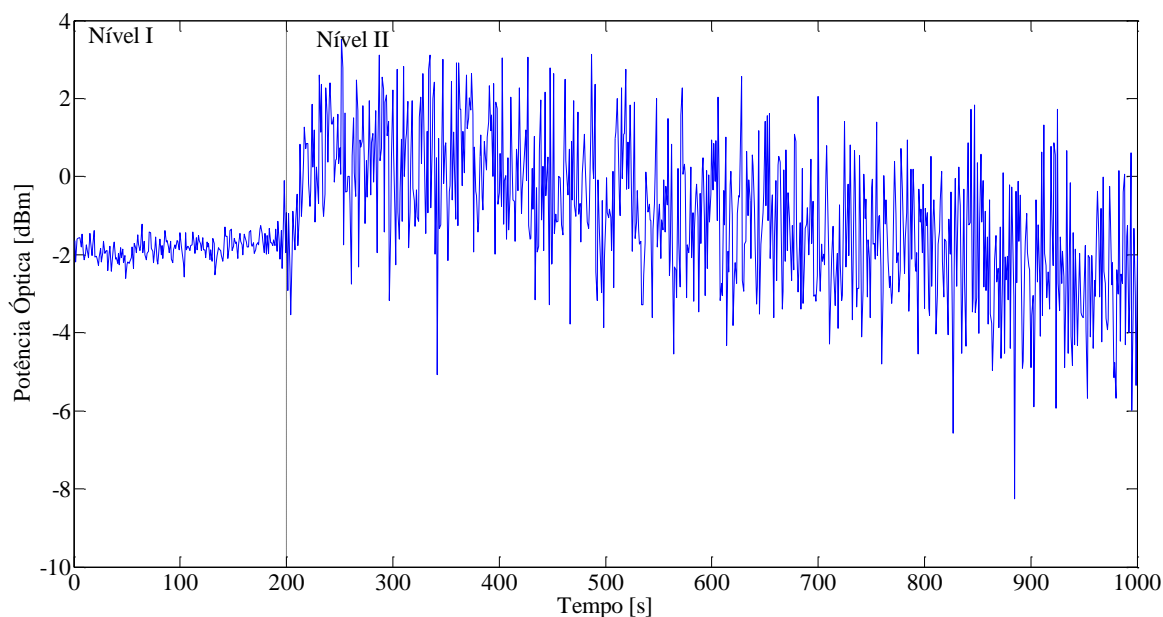
O resultado desta mudança pode ser observado através da figura 4.10 – Nível II. Através dela é possível verificar que os níveis de potência óptica oscilam muito mais frequentemente.

Só a partir do segundo 300 é que a taxa de transmissão entra em declínio voltando a apresentar taxas de transmissão semelhantes àsquelas observadas entre o período compreendido ente 0 e 300 s após o segundo 880. É importante citar que no período em que a taxa encontra-se em declínio há registros de taxas de transmissão próximas de 50 Mbps.



**Figura 4.9:** Comportamento da taxa de transmissão calculada durante a utilização do sistema óptico no espaço livre na presença de turbulência.

A tabela 4.5 também contribui para o melhor entendimento dos resultados apresentados graficamente pelas figura 4.9 e figura 4.10, pois ela apresenta medidas que ajudam a descrever os comportamentos da taxa de bit e dos níveis de potência durante os mil segundos analisados.



**Figura 4.10:** Níveis de potência óptica capturados na antena receptora durante utilização do sistema óptico no espaço livre na presença de turbulência.

Quando estes são comparados com os apresentados nas tabelas 4.3 e 4.4 pode-se verificar a ocorrência de modificações significativas somente nos itens valor mínimo e máximo do nível de potência, permanecendo os demais relativamente estáveis.

**Tabela 4.5:** Grandezas estatísticas referente a taxa de transmissão e níveis de potência calculadas durante a utilização do sistema óptico no espaço livre na presença de turbulência.

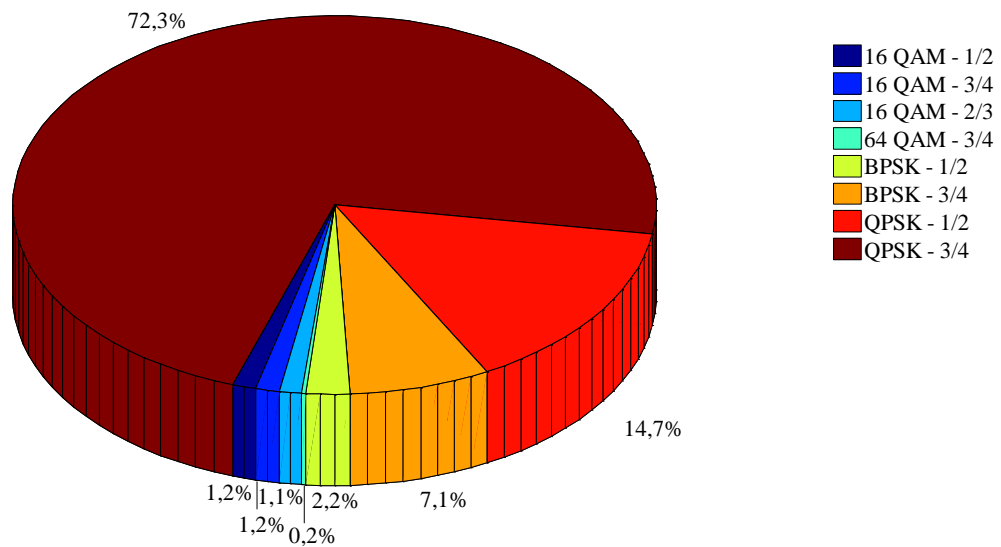
Métrica	Taxa de bit [Mbps]	Potência [dBm]
Média	14,62	-1,24
Moda	17,10	-1,83
Mínimo	0,39	-8,36
Máximo	51,90	3,42

A figura 4.11 mostra uma intensificação no uso da modulação QPSK – 3/4 que aumentou de 57,3% para 72% no percentual de sua utilização, isso significa que a ocorrência das taxas de bits entre 12 e 18 Mbps se tornaram ainda mais constantes.

Outro crescimento é constatado no percentual de participação do BPSK 3/4 passando de 2,8% para 7,1%. Outras modulações que foram contempladas com aumento de seus respectivos percentuais foram: BPSK – 1/2 indo de 1,2% para 2,2%, 16 QAM – 1/2 saindo 1% para 1,2% além do registro da modulação 64 QAM – 3/4 com 0,2%.

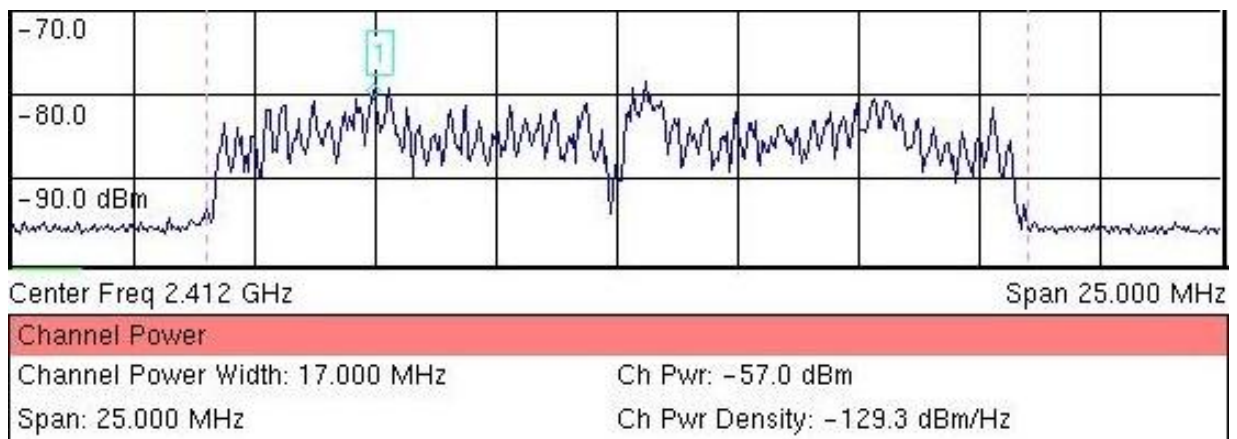
Contudo, a QAM 3/4, BSPK 3/4 e QPSK 1/2 diminuíram suas respectivas participações, sendo a última aquela a sofrer a maior perda.





**Figura 4.11:** Taxas de transmissão segmentadas por tipo de modulação e codificação durante utilização do sistema óptico no espaço livre com turbulência.

Por fim a figura 4.12 mostra o comportamento do espectro elétrico do sinal OFDM quando submetido a uma turbulência com intensidade moderada. Percebe-se uma intensificação da deformação do espectro em relação àquele capturado durante a ausência de turbulência apresentado na figura 4.8 confirmando o efeito nocivo da turbulência.



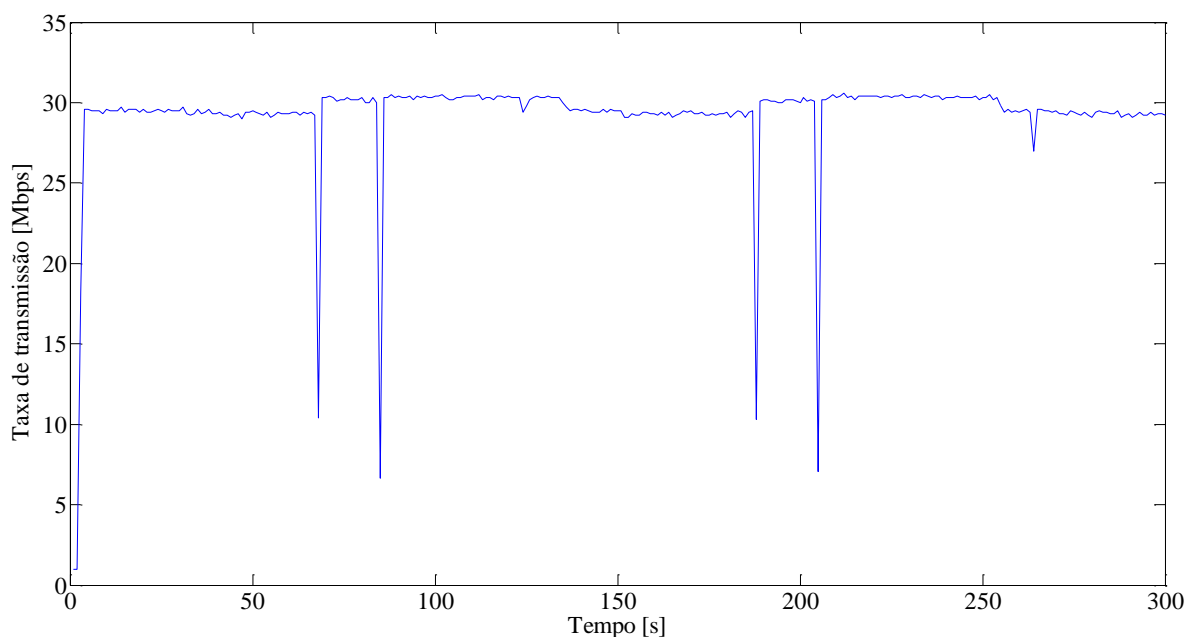
**Figura 4.12:** Espectro elétrico recebido capturado após o fotodetector e antes da placa *wi-fi* receptora durante o enlace realizado com sistema óptico no espaço livre na presença de turbulência.

## 4.2. Experimentos Finais

Nos experimentos finais é trocado a taxa máxima de bit para 30 Mbps. Esta escolha foi feita, pois experimentos realizados entre os dois períodos de testes, que resultaram nesta dissertação, mostraram que esta mudança torna a taxa de *bit* mais estável e com média mais elevada que o experimento apresentado na seção 4.1. Outras mudanças realizadas na segunda fase dos experimentos foram a alteração e padronização do tempo de observação em 300s, tempo considerado suficiente para coleta dos dados apresentados neste trabalho, e a utilização da nova versão do Ubuntu a 10.10.

### 4.2.1. Back-to-back elétrico

Os resultados ora apresentados foram obtidos utilizando a configuração representada na figura 3.1. A figura 4.13 quando comparada à figura 4.1 mostra que a alteração da taxa de bit máxima de 54 para 30 Mbps possibilita taxas de *bit* mais estáveis e elevadas.



**Figura 4.13:** Taxa de transmissão durante *back-to-back* elétrico calculada através do *Jperf* na estação transmissora.

A tabela 4.6 confirma esta primeira análise mostrando um aumento no valor da média da ordem de quase 40%. Esta mudança fez a taxa de *bit* eleva-se de 20,03 Mbps para 27,83 Mbps. A moda, taxa de *bit* mais registrada durante o experimento, aumentou de 20,90 para 28 Mbps, representando um acréscimo de aproximadamente 34%.

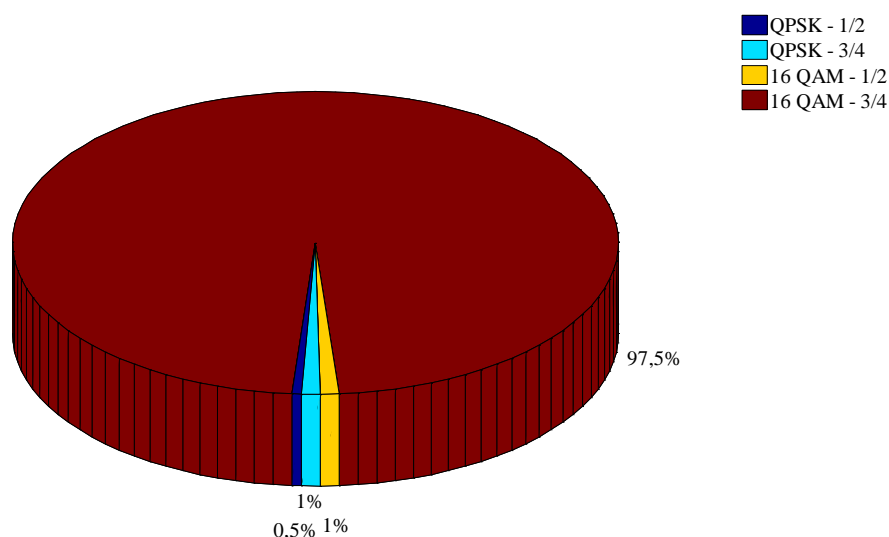
O valor mínimo registrado é multiplicado por fator superior a sete, passando de 1,48 Mbps para 10,90 Mbps, enquanto o valor máximo que anteriormente representava em torno de 41% do valor nominal agora representa 55% deste mesmo valor.

**Tabela 4.6:** Grandezas estatísticas referente a taxa de transmissão calculadas durante a utilização do *back-to-back* elétrico.

Métrica	Taxa de bit [Mbps]
Media	27,83
Moda	28,00
Mínimo	10,90
Máximo	29,70

Quando a análise é feita considerando a distribuição do tipo de modulação, a figura 4.14 mostra como estas novas taxas modificaram o percentual de participação do conjunto de modulações utilizado pela técnica de transmissão OFDM durante a realização do enlace.

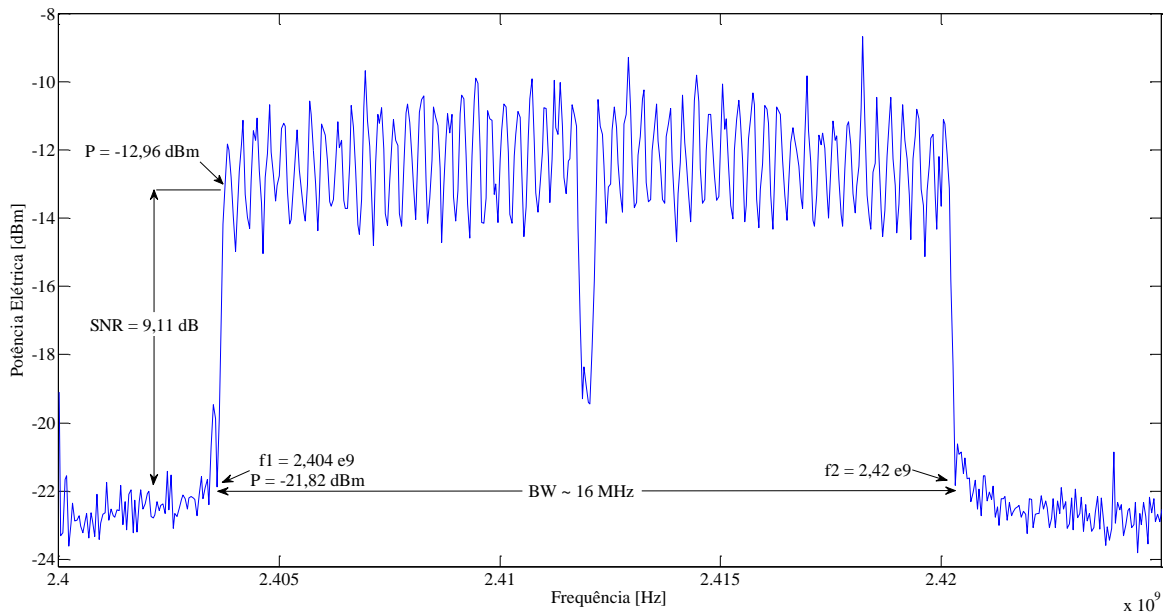
A hegemonia de 16 QAM – 1/2 é transferida e intensificada para 16 QAM – 3/4. A figura 4.14 mostra que o novo percentual de participação alcança 97,5% contra 93,3% registrada anteriormente, enquanto as demais modulações passaram a apresentar participações de no máximo 1%.



**Figura 4.14:** Taxas de transmissão segmentadas por tipo de modulação e codificação durante utilização do *back-to-back* elétrico.

A nova caracterização do espectro elétrico na entrada da estação receptora, apresentado na figura 4.15, confirma o típico formato de espectro OFDM. A figura 4.15

indica que o sinal possui uma largura de banda de aproximadamente 16 MHz, a relação sinal ruído é calculada em 9,11 dB e a potência média do sinal que transporta os dados registrou uma média de -12,96 dBm.

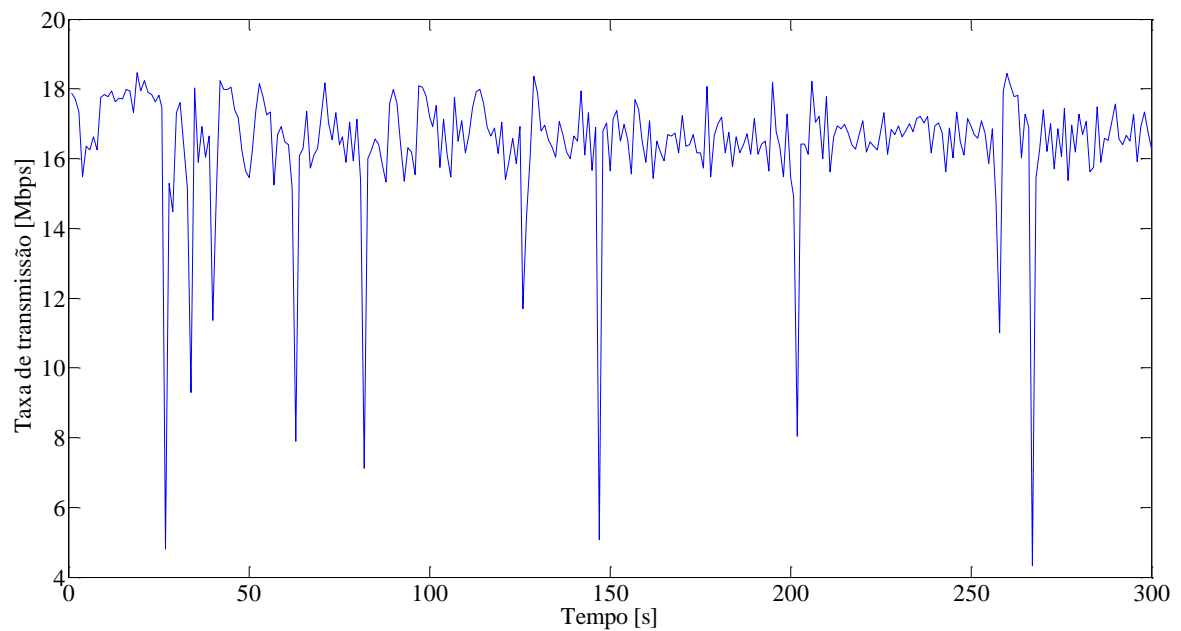


**Figura 4.15:** Espectro elétrico recebido capturado após o fotodetector e antes da placa *wi-fi* receptora durante o enlace utilizando o *back-to-back* elétrico.

#### 4.2.2. *Back-to-back* óptico

Esta subseção apresenta o comportamento da taxa de transmissão após a adição de uma parte do sistema óptico, cujo *layout* é apresentado no diagrama em blocos da figura 3.2.

Os resultados representados na figura 4.16 e quantificados na tabela 4.7 mostram taxas de *bits* variando entre 4,33 e 18,46 Mbps, a tabela 4.7 ainda revela que o valor mais constante (moda) é 16,39 Mbps e o valor médio é de 16,43 Mbps.



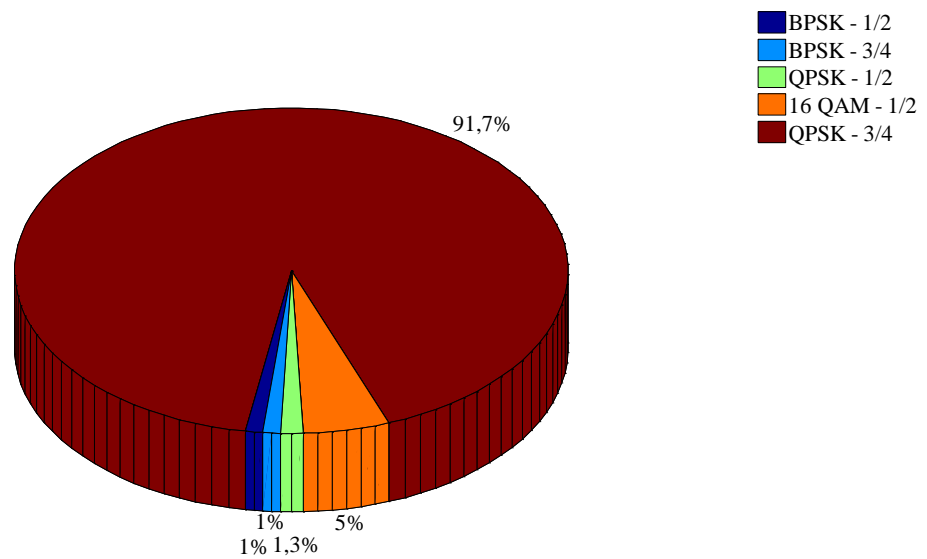
**Figura 4.16:** Taxa de transmissão durante *back-to-back* óptico calculada através do *Jperf* na estação transmissora.

**Tabela 4.7:** Grandezas estatísticas referente a taxa de transmissão calculadas durante a utilização do *back-to-back* óptico.

Métrica	Taxa de bit [Mbps]
Media	16,43
Moda	16,39
Mínimo	4,33
Máximo	18,46

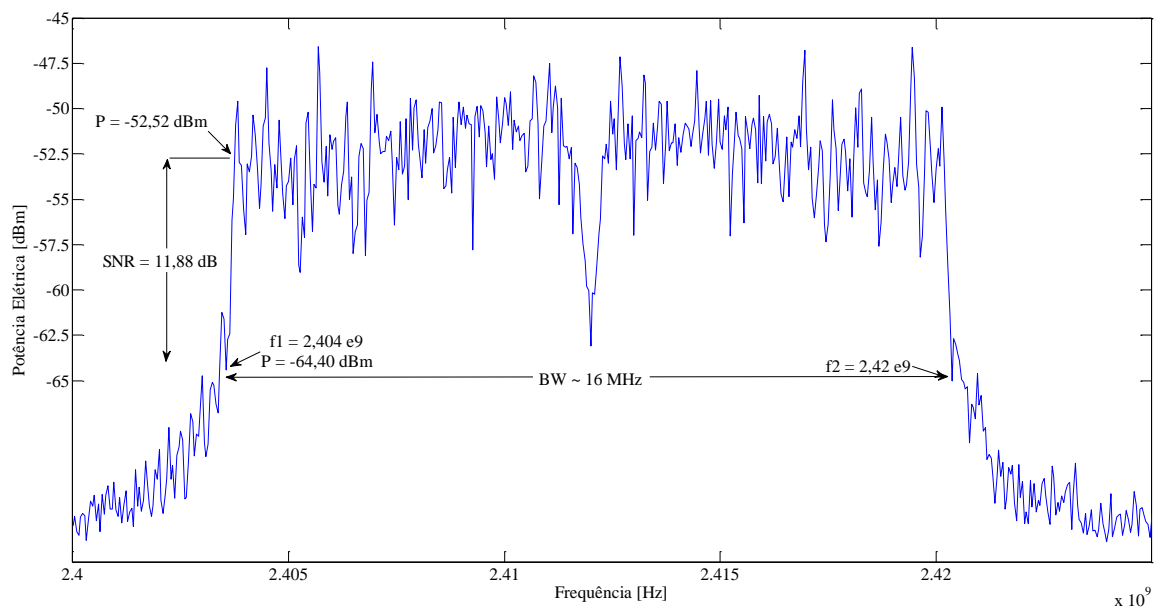
A análise quanto à utilização do tipo de modulação, apresentada na figura 4.17, mostra um predomínio da modulação QPSK – 3/4. Neste experimento, ela é utilizada em 91,7% do tempo, após ela a modulação 16 QAM – 1/2 foi a mais utilizada com 5%. Com 1% das interações estão QPSK 1/2, BPSK 1/2 e BPSK 3/4.

Estes resultados mostram que a inserção dos dispositivos ópticos na rede inseriu uma perda na taxa de bit da ordem de 41%. Esta é uma depreciação bastante expressiva, pois anteriormente a inserção do mesmo sistema óptico em conjunto com o canal atmosférico implicou em perda da ordem de 27%.



**Figura 4.17:** Taxas de transmissão segmentadas por tipo de modulação e codificação durante utilização do *back-to-back* óptico.

A análise do espectro do sinal elétrico capturado durante o *back-to-back* óptico apresentado na figura 4.18 apresenta um aspecto mais deteriorado, quando comparado ao apresentado na figura 4.15, fato normal devido a inserção de novos dispositivos os quais inserem perdas ao sinal.



**Figura 4.18:** Espectro elétrico recebido capturado após o fotodetector e antes da placa *wi-fi* receptora durante o enlace utilizando *back-to-back* óptico.

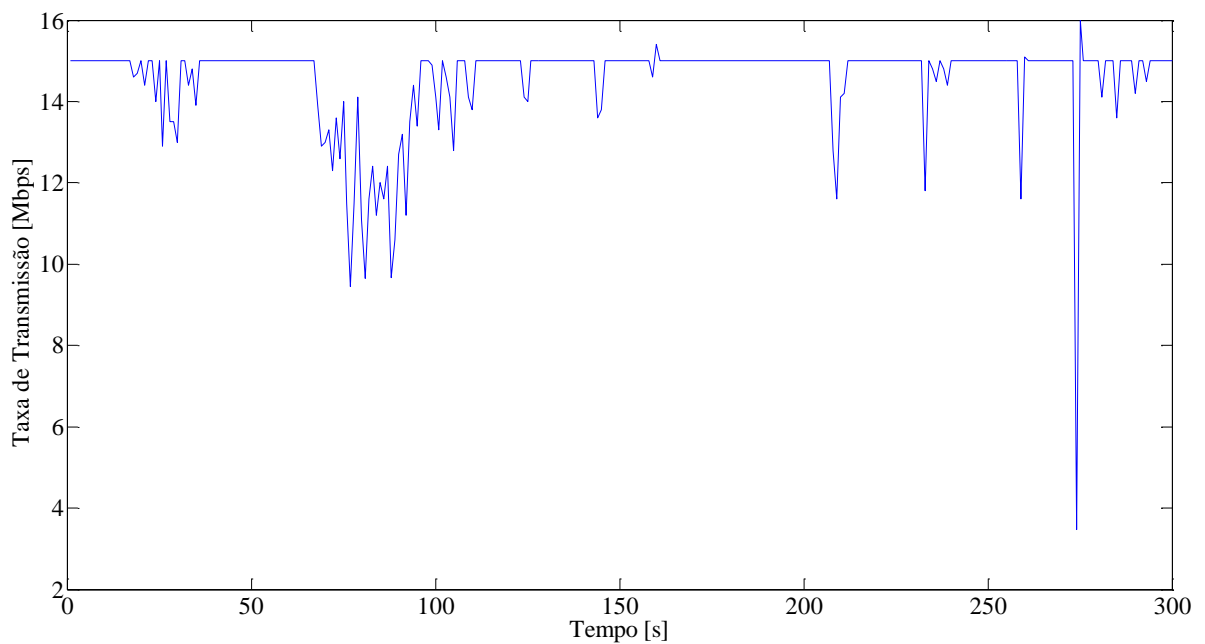
A figura 4.18 também mostra que a potência média do sinal da portadora é  $-41,0$  dBm a relação sinal ruído saltou para  $11,88$  dB permanecendo a largura de banda em  $16$  MHz.

#### 4.2.3. Sistema óptico sem turbulência

Nesta subseção são apresentados os resultados obtidos durante testes utilizando a configuração apresentada na figura 3.4.

A figura 4.19 contendo o perfil das taxas de *bit* registradas durante o enlace utilizando sistema óptico no espaço livre e sem turbulência auxiliada pela tabela 4.8 confirma a hipótese levantada no parágrafo anterior desta seção.

Os resultados mostram que, nesta experiência, a taxa de *bit* média é aproximadamente  $11,5\%$  inferior as praticadas no *back-to-back* óptico fazendo a taxa de bit cair de  $16,43$  para  $14,56$  Mbps.



**Figura 4.19:** Taxa de transmissão utilizando sistema óptico no espaço livre em ambiente sem turbulência calculada através do Jperf na estação transmissora.

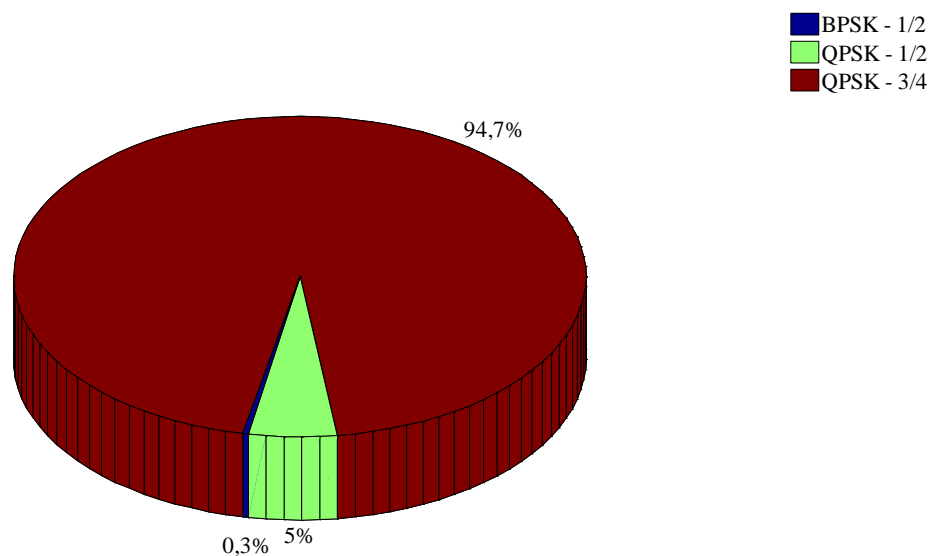
As taxas de *bit* mais frequentes também oscilaram negativamente em torno de  $8,5\%$  registrando agora valores iguais a  $15$  Mbps inferiores aquelas praticadas nos testes anteriores ( $16,39$  Mbps).

A taxa mínima, calculada agora, representa aproximadamente 80% das outrora apresentadas (3,48 versus 4,33) Mbps enquanto as máximas representam 87% dos valores observados no experimento anterior,

**Tabela 4.8:** Grandezas estatísticas referente a taxa de transmissão calculadas durante a utilização do sistema óptico no espaço livre sem turbulência.

Métrica	Taxa de bit [Mbps]
Media	14,56
Moda	15,00
Mínimo	3,48
Máximo	16,00

Quando as informações contidas na figura 4.20 são analisadas percebe-se que com a inserção do canal atmosférico e a consequente inserção de perdas, a modulação QAM deixa de ser utilizada.



**Figura 4.20:** Distribuição dos percentuais de utilização de tipos de modulação e codificação.

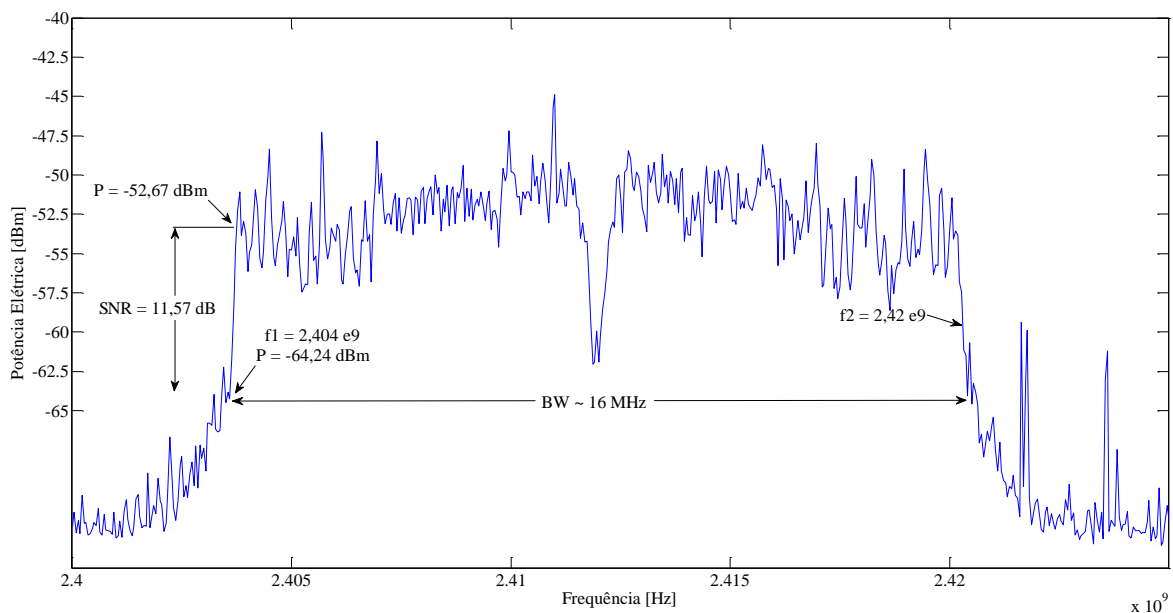
A figura 4.20 mostra que durante o experimento em 94,7% do tempo é utilizada a modulação QPSK com codificação 3/4 um acréscimo de 3 pontos percentuais em relação ao valor contabilizado no *back-to-back* óptico. A figura 4.20 mostra ainda que a técnica QPSK 1/2 quase quadruplicou, passando de 1,3% para 5%, enquanto BPSK 1/2 sofreu um decréscimo em sua participação da ordem de aproximadamente 33% caindo de 1% para 0,3%.



Está confirmado, através destes resultados que o ambiente atmosférico provoca perdas. Porém, no ambiente coberto, como o acontecido durante estes experimentos, as perdas são menos intensa, por isso a taxa de *bit* exibida na figura 4.19 apresenta relativa estabilidade em torno de 15 Mbps.

Analisando o espectro elétrico apresentado na figura 4.21 verifica-se que a inserção do canal atmosférico, mesmo na ausência de turbulência, contribui para deformar com mais intensidade o formato do espectro do sinal OFDM coletado junto à estação receptora.

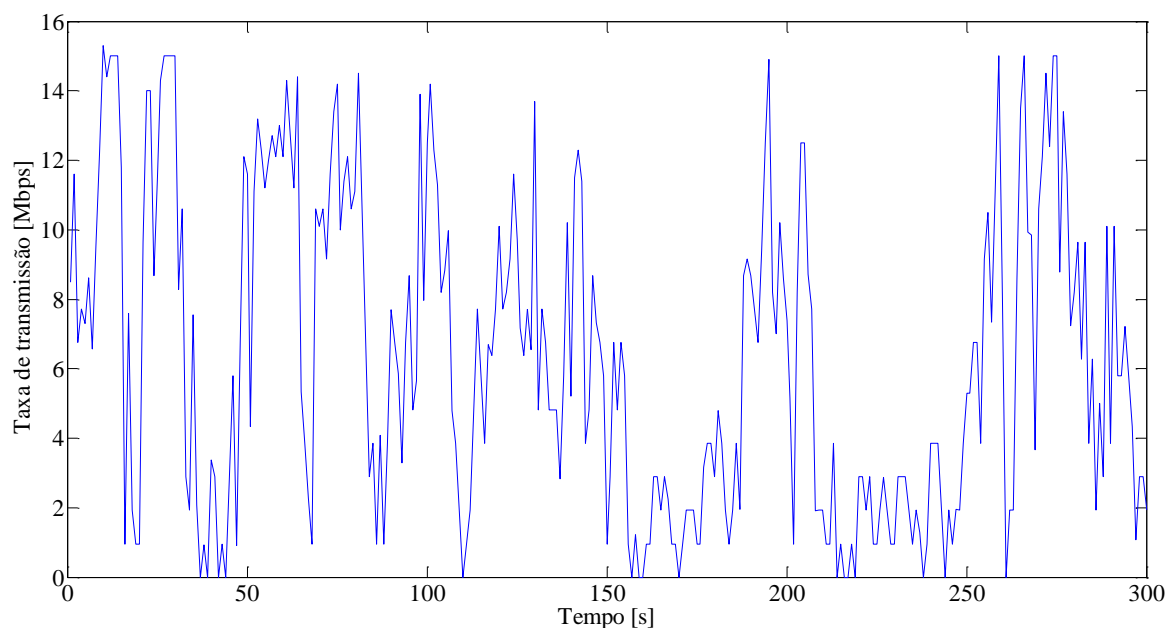
Esta inserção fez os níveis de potências recebidas oscilarem de níveis médios de -40 dBm, no *back-to-back* óptico, para -53 dBm; uma perda média de 13 dB. A relação sinal ruído (SNR) registrou também um decréscimo de 11,88 para 11,57, porém a largura de banda permanece em aproximadamente 16 MHz.



**Figura 4.21** Espectro elétrico recebido capturado após o fotodetector e antes da placa *wi-fi* receptora durante o enlace utilizando sistema óptico no espaço sem turbulência.

#### 4.2.4. Sistema óptico com turbulência

Esta subseção apresenta os nocivos efeitos da turbulência inserida ao longo do enlace do sistema transmissão óptico no espaço livre. Através da figura 4.22 percebe-se que a turbulência provoca significativa queda de desempenho da taxa de transmissão e fortes oscilações chegando a provocar taxas de transmissões nulas.



**Figura 4.22:** Taxa de transmissão utilizando sistema óptico no espaço livre em ambiente com turbulência calculada através do Jperf na estação transmissora.

A tabela 4.9 confirma esta primeira impressão e mostra uma taxa média de *bit* bem inferior àquela alcançada durante o experimento relatado na seção 4.2.3, agora a taxa média de *bit* calculada é de 6,38 Mbps representando aproximadamente 43,8% da taxa obtida durante o experimento cujos resultados são apresentados na seção imediatamente anterior.

**Tabela 4.9:** Grandezas estatísticas referente a taxa de transmissão calculadas durante a utilização do sistema óptico no espaço livre com turbulência.

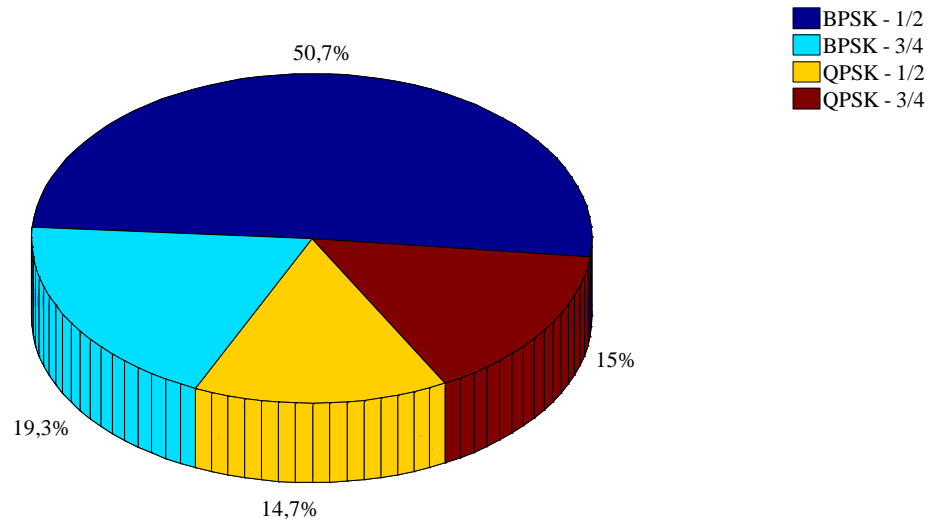
Métrica	Taxa de bit [Mbps]
Media	6,38
Moda	0,96
Mínimo	0,00
Máximo	15,30

A tabela 4.9 mostra ainda que a taxa de bit mais frequente, representado pela moda, é 0,96 Mbps bem inferior aos 15 Mbps obtidos no experimento da seção 4.2.3. A taxa de *bit* mínima que na experiência anterior havia registrado 3,48 Mbps tornou-se nula enquanto a taxa de *bit* máxima registrou 15,3 Mbps.

A figura 4.23 reafirma o resultado prejudicial da inserção da turbulência durante o enlace, pois mostra que a modulação e codificação as quais fornecem menores taxas de bit

(BPSK – 1/2) são as mais utilizadas (50,7%) durante este experimento, contra apenas 0,3% registrado no experimento da seção 4.2.3.

A figura 4.23 mostra ainda que BPSK – 3/4 é utilizada em 19,3% do tempo, a QPSK – 1/2 em 14,7% e a QPSK 3/4 que no experimento anterior é utilizada em 94,7% teve sua participação reduzida para apenas 15,3%.

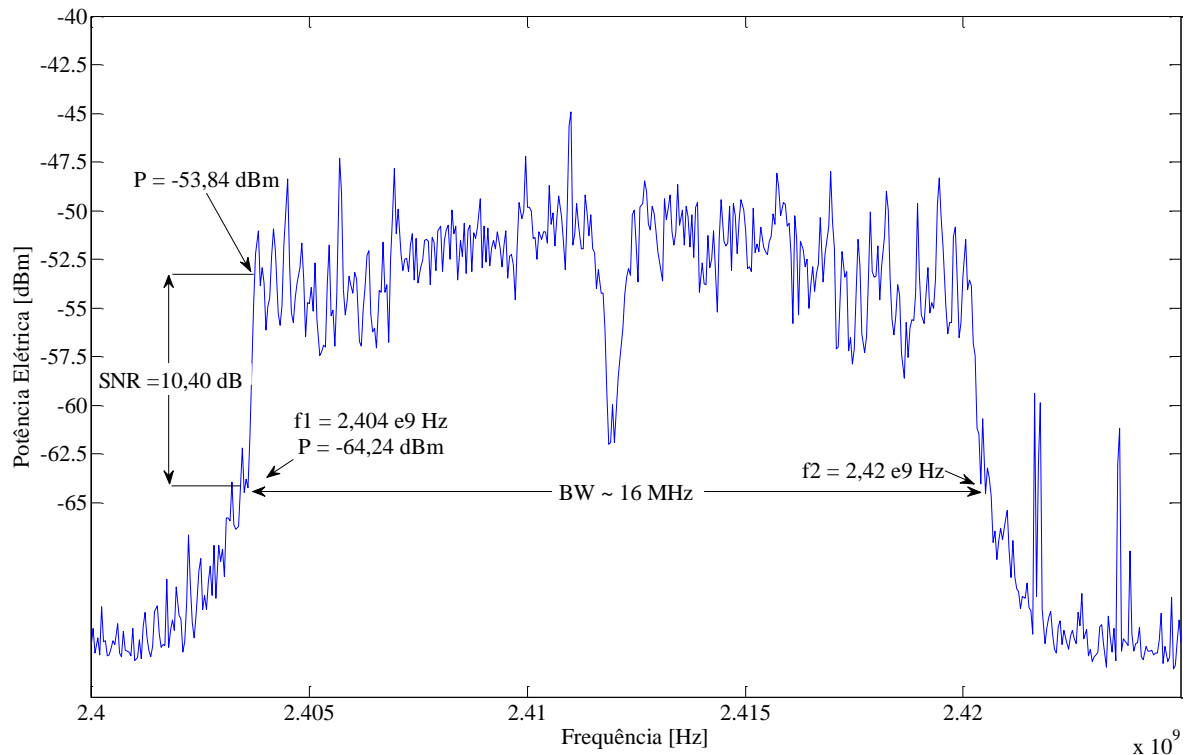


**Figura 4.23:** Distribuição da taxa de *bit* utilizando sistema óptico no espaço livre com turbulência.

Durante a inserção da turbulência a técnica de modulação mais utilizada é a BPSK (70%) capaz de prover taxas de *bit* máximas iguais a 9 Mbps enquanto QPSK provedora de taxas que variam entre 9 e 18 Mbps é utilizada em 30% do tempo.

O espectro apresentado na figura 4.24 é mais um indicativo dos maléficos efeitos produzidos pela turbulência sob o sinal óptico, comprovados pela queda da relação sinal/ruído (SNR) para 10,40 dB.

Ao ser comparado com seu congênere, exposto na figura 4.21, percebe-se que o espectro capturado durante a inserção da turbulência apresenta maior deformação embora não tenha perdido suas características principais permitindo ainda assim identificá-lo como um espectro OFDM.



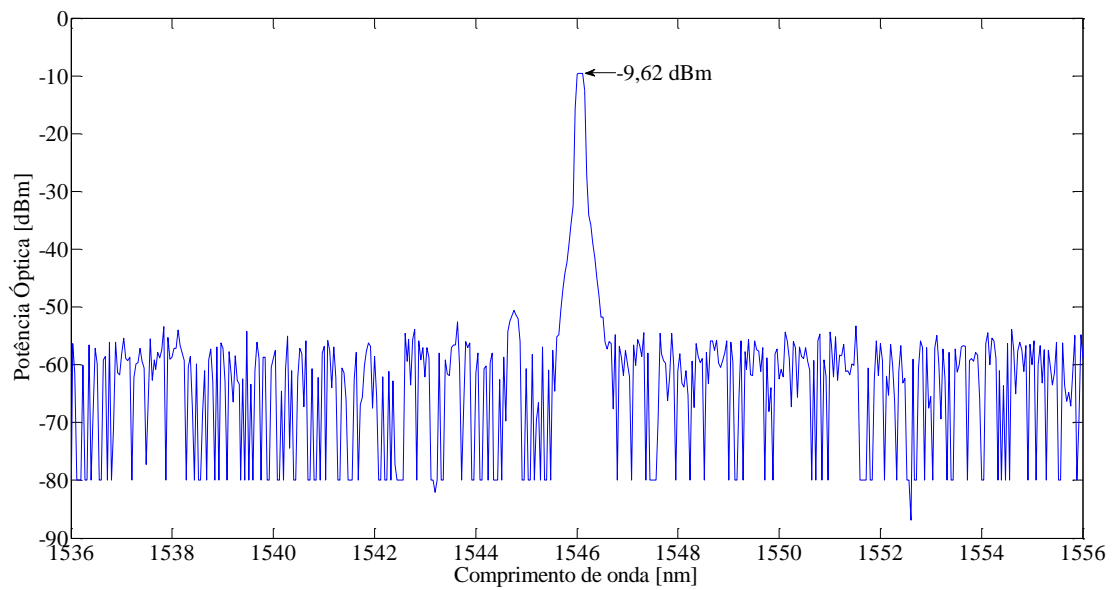
**Figura 4.24:** Espectro elétrico do sinal capturado durante transmissão utilizando o sistema óptico no espaço livre modulado por laser de sinal com turbulência.

### 4.3. Caracterização do enlace óptico

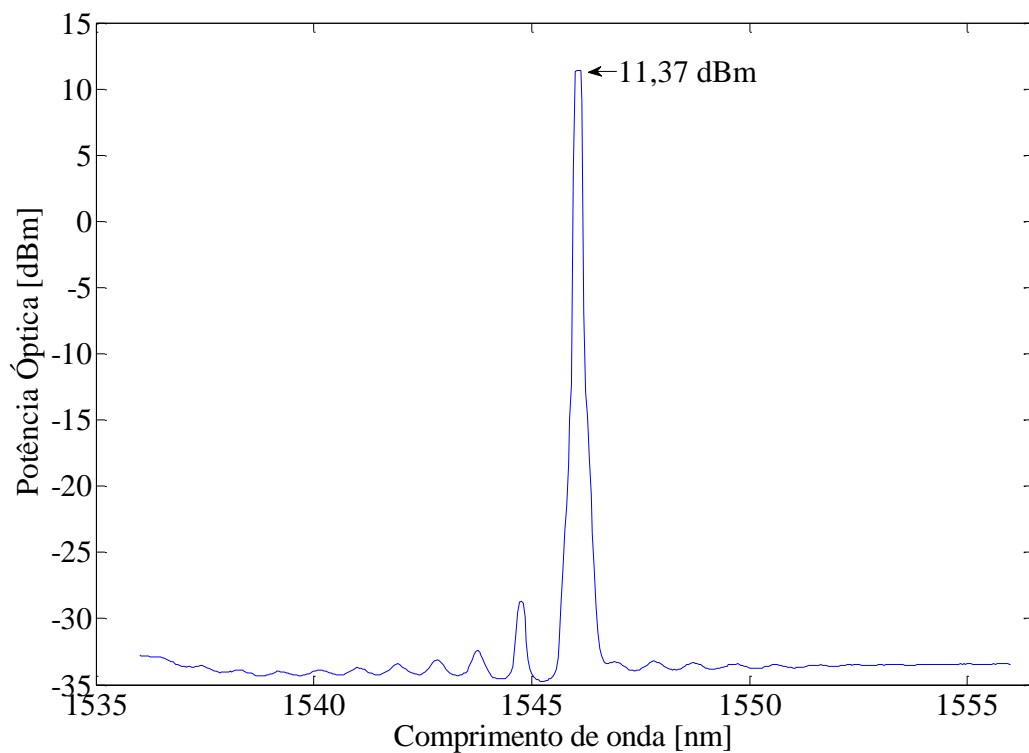
A análise dos resultados do enlace óptico é concluída com a apresentação dos níveis de potência óptica capturados na conexão dos dispositivos ópticos utilizados no sistema óptico no espaço livre.

A figura 4.25 mostra que a potência máxima fornecida pelo laser de sinal  $-9,62 \text{ dBm}$ , potência que se mostrou insuficiente para concretização da comunicação ponto a ponto em discussão.

A inserção do amplificador EDFA possibilitou que o sinal recebesse um acréscimo de potência igual a  $21 \text{ dB}$  fazendo-o oscilar de  $-9,62 \text{ dBm}$  conforme consta na figura 4.25 para  $11,37 \text{ dBm}$  segundo figura 4.26.

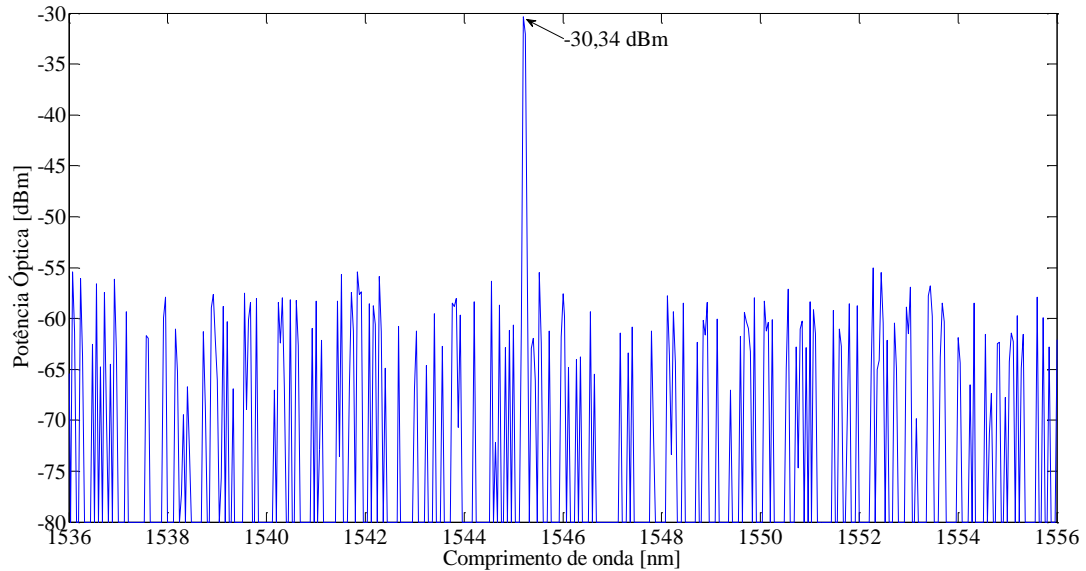


**Figura 4.25:** Espectro do sinal e nível de potência ópticos na conexão entre laser e EDFA.



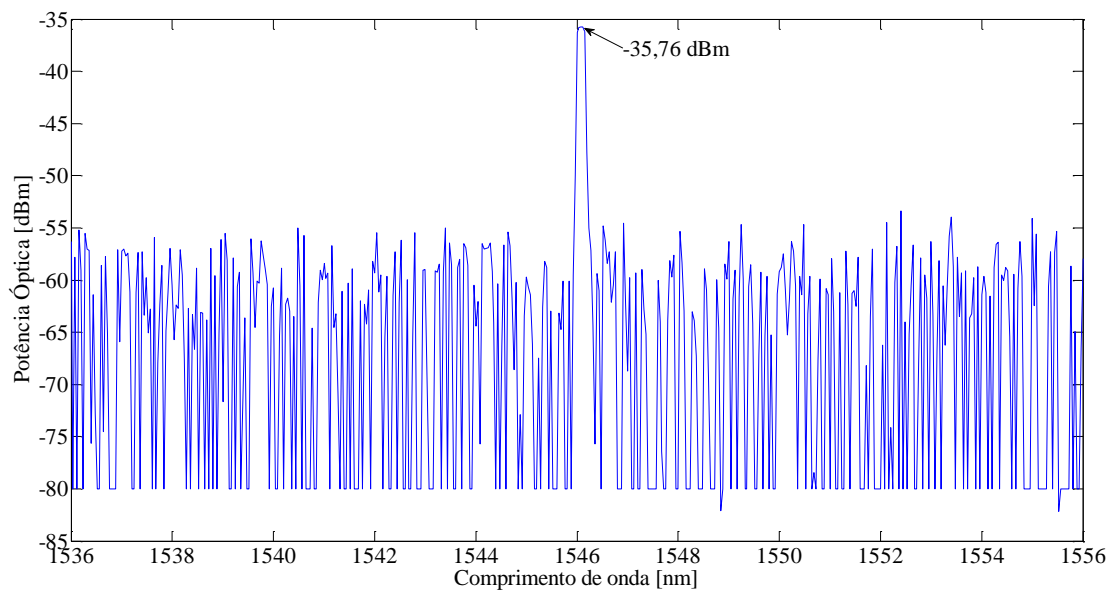
**Figura 4.26:** Espectro do sinal e nível de potência ópticos do sinal na conexão entre EDFA e cabeça óptica transmissora.

O sinal óptico amplificado após percorrer o enlace óptico de 2,5m é captado por outra antena óptica e daí conduzido ao fotodetector. A figura 4. 27 mostra que após o trajeto o sinal registrou uma intensidade de potência igual a -30,34 dBm representando perda de 41,72 dB.



**Figura 4. 27:** Espectro do sinal e nível de potência ópticos na conexão entre cabeça óptica e fotodetector.

Visando simular quais os níveis de potência que chegam ao receptor é inserida uma fibra monomodo de comprimento semelhante a existente no fotodetector, capturando, em seguida, o nível de potência em sua saída apresentado na figura 4.28.



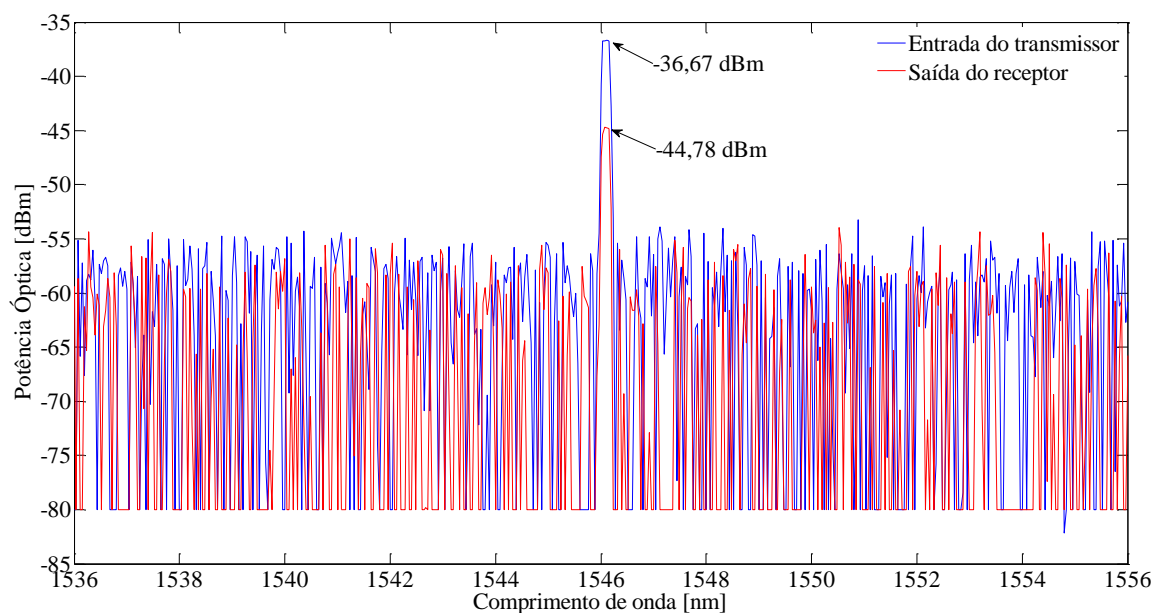
**Figura 4.28** Espectro do sinal e nível de potência óptico na entrada do fotodetector.

O nível de potência apresentado na figura 4.28 indica que a transposição de um sinal vindo de uma fibra multimodo para uma monomodo insere uma perda de potência superior a 5,42 dB, que é o resultado da conexão em conjunto com a diferença de diâmetro das fibras.

#### 4.3.1. Caracterização das condições mínimas para funcionamento do sistema óptico no espaço livre utilizando os dispositivos presentes nos experimentos

A complementação dos experimentos é realizada caracterizando a potência óptica mínima necessária ao funcionamento do sistema óptico em espaço livre utilizando os dispositivos presentes nos experimentos.

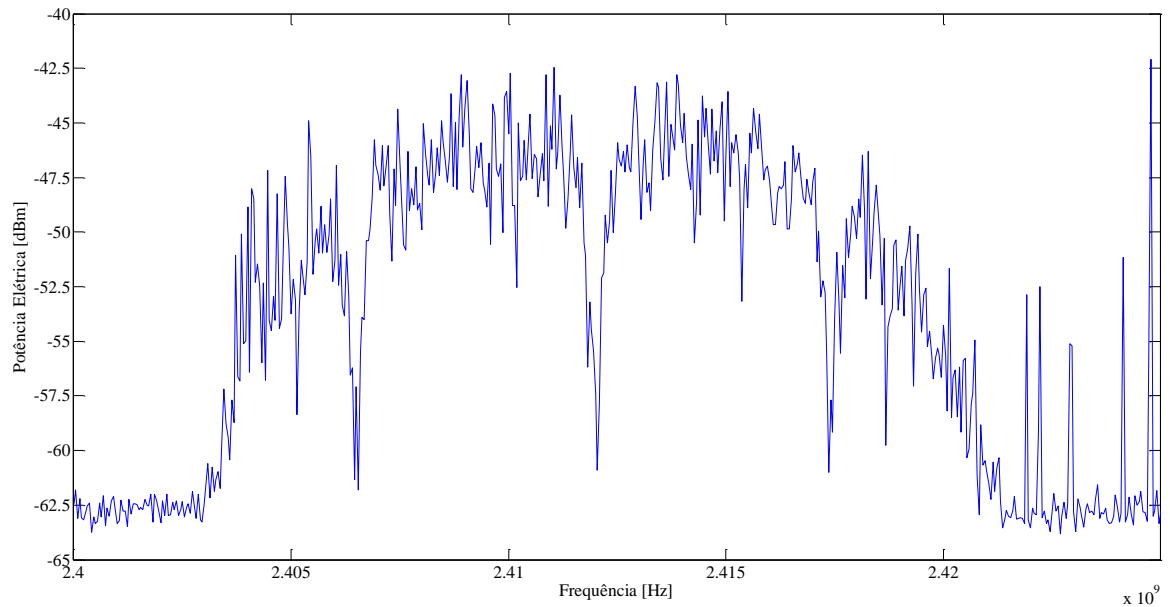
A figura 4.29 registra que sob as condições e equipamentos disponíveis no momento do experimento, a realização de enlace só é possível a partir do instante em que a potência mínima na saída da cabeça óptica atingiu -36,67 dBm ou 0,215 mW. Ela mostra ainda que após 2,5 m a potência existente é de -44,78 dBm (33,3  $\mu$ W) significando a ocorrência de perda superior a 8 dB devido ao ambiente atmosférico.



**Figura 4.29:** Espectro do sinal e nível de potência ópticos com potências mínimas para funcionamento do sistema óptico no espaço livre durante a execução do experimento.

A figura 4.30 complementa esta análise mostrando o formato do sinal OFDM durante o funcionamento do sistema óptico no espaço livre sob estas condições mínimas. Através dela

observa um sinal bastante deformado apresentando potência máxima de aproximadamente -42,5 dBm.



**Figura 4.30:** Espectro elétrico do sinal para sistema óptico no espaço livre operando com potência de transmissão mínima.



## Capítulo 5: Conclusão

Através dos resultados expostos neste trabalho é possível verificar que o sistema óptico no espaço livre é transparente ao tipo de modulação utilizado na geração do sinal, o que permitiu a utilização de OFDM neste sistema de transmissão.

Observou-se ainda que a adoção do OFDM em sistemas de transmissão óptico no espaço livre possibilitou a permanência da conexão mesmo durante a inserção de turbulência, embora com taxas de *bit* inferiores às registradas na ausência deste fenômeno natural. Esta robustez advém de técnicas como a taxa de codificação capaz de permitir a continuidade do enlace mesmo com a queda da relação sinal ruído.

Esta verificação pôde ser comprovada durante as realizações dos experimentos contidos na seção 4.1.3 e 4.2.4 que mostram o desempenho do sistema óptico em espaço livre em ambiente turbulento.

Os experimentos também contribuíram à medida que apresentou possíveis valores de potência óptica mínima para que o sistema óptico no espaço livre mostrado na figura 3.4 entre em funcionamento.

Como trabalhos futuros, propõe-se repetir os experimentos ópticos aumentando o tamanho do enlace até não ser possível mais realizar a conexão, realizar a comunicação, através do sistema óptico em espaço livre, entre duas redes *wi-fi* operando no modo infraestrutura e também conectar câmeras de monitoramento sem fio visando o registro da qualidade de imagem durante a conexão.

## Referências Bibliográficas

- [1] T. V. Villalba. “Distribuição de Divisores de Potência em Redes Ópticas Passivas Utilizando Algoritmos Genéticos”, São Carlos, Escola de Engenharia da Universidade de São Paulo, 2009.
- [2] L. E. S. Moura, A. P. L. Barbero; P. B. Harboe e J. R. Souza. “Estudos Teórico e Experimental da Viabilidade da Tecnologia Óptica no Espaço Livre”, Revista de Ciência e Tecnologia, vol. 12, no. 23, pp. 25-35, 2004.
- [3] S. Hranilovic, “Wireless Optical Communication Systems”, Boston, Springer Science + Business Media Inc, 2005.
- [4] O. Bouchetm, H. Sizun, C. Boisrobert, F. Fornel e P-N. Favennec, “Free-Space Optics Propagation and Communication”, New Port Beach, ISTE, 2006.
- [5] A. K. Majundar e J. C. Rinclin, “Free-Space Laser Communications Principles and Advances”, Nova Iorque, Springer Science+Business Media, LLC, 2008.
- [6] O. Gonzalez, R. Perez-Jimenez, S. Rodriguez, J. Rabadan e A. Ayala, “OFDM over indoor wireless optical channel”, Optoelectronics, IEEE Proceedings, vol. 152, no. 4, pp. 199-204, 2005.
- [7] A. Bekkali, K. K. Naila, K. Wakamori e M. Matsumoto, “Transmission Analysis of OFDM-Based Wireless Services Over Turbulente Radio-on-FSO Links Modeled by Gamma-Gamma Distribuion”, IEEE Photonics Journal, vol. 2, no. 3, pp. 510-520, 2010.
- [8] MINISTÉRIO da Defesa, “PRÓ-DEFESA”, Disponível em: <[www1.defesa.gov.br/pro\\_defesa/index.php?page=relacao](http://www1.defesa.gov.br/pro_defesa/index.php?page=relacao)>, Acesso em: 25 Outubro 2010.
- [9] D. Marinos, C. Aidinis, N. Schimitt, J. Klaue, J. Schalk, T. Pistner, P. Kouros, “Wireless optical OFDM implementation for aircraft cabin communication links”. 5th International Symposium on Wireless Pervasive Computing (ISWPC). pp. 465-470, 2010.
- [10] A. Parakkevopoulos, J. Vucic, S-H. Vob, “Optical Wireless Communication Systems in the Mb/s to Gb/s Range, Suitable for Industrial Applications”, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 15, no. 4, pp. 541-547, 2010.

- [11] L. M. Wasiczko, “Techniques to mitigate the effects of Atmospheric turbulence on free space optical communication links” Universidade Maryland, 2004.
- [12] K. Kazuara, “Studies on Performance of Ultra High Speed Free-Space Optical Communication Systems”, Honjo Shi, Wesada University, 2007.
- [13] H. Willebrand, B. G. Ghuman, “Free Space Optics: Enabling Optical Connectivity in Today's Networks”, Indianápolis, SAMS, 2002.
- [14] V. S. de Sanctis, S. M. Moreolo, F. Curti, M. Guglielmuccim, F. T. Beleffi, D. Forin, A. Teixeira, “DWDM Transparent FSO System for ultrahigh bit rate applications”, European Conference on Lasers and Electro-Optics and International Quantum Electronics Conference. pp. 17-22, 2007.
- [15] HOVERSTEN, E. V.; HARGER, R. O.; HALME, S. J. “Communication Theory for the Turbulent Atmosphere”, Proceedings of the IEEE, vol. 58, no. 10, pp. 1626-1650, 1970.
- [16] R. Ramirez-Iniguez, S. M. Idrus, Z. Sun, “Optical Wireless Communications: IR for wireless connectivity”, London: CRC Press, 2008.
- [17] L. Xia, R. Mardling, J. Armstrong, “Channel Capacity of IM/DD Optical Communication Systems and of ACO-OFDM”, IEEE International Conference on Communications. pp. 2128-2133, 2007.
- [18] L. Dordová, O. Wilfert, “Laser Beam Attenuation Determined by the Method of Available Optical Power in Turbulent Atmosphere”, Journal of Telecommunications and Information Technology, pp. 53-57, fev. 2009.
- [19] J. D. Shimidt, “Numerical Simulation of Optical Wave Propagation With examples in MATLAB<sup>®</sup>”, Bellingham, SPIE, 2010.
- [20] L. C. Andrews, R. L. Phillips, C. Y. Hopen, “Laser Beam Scintillation with Applications”, Bellingham: SPIE, 2001.
- [21] W. O. Popoola, Z. Ghassemlooy, C. G. Lee, A. C. Boucouvalas, “Scintillation effect on intensity modulated laser communication systems — a laboratory demonstration”, Optics & Laser Technology, vol. 42, pp. 682-692, 2009.

- [22] L. C. Andrews, "Field Guide to Atmospheric Optics", Bellingham: SPIE, 2004.
- [23] A. Garcia-Zambrana, C. Castillo-Vasquez, B. Castillo-Vasquez, "On the Capacity of FSO Links over Gamma-Gamma Atmospheric Turbulence Channels Using OOK Signaling", *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, pp. 1-9, 2010.
- [24] L. J. Sanchez, V. V. Voitsekhovich, V. G. Orlov, R. Ávila, S. Cuevas, "Efficiency of off-axis astronomical adaptive systems: comparison of experimental data for different astronomical sites", *Adaptive Optics System Technologies*, Munich, pp. 749-755, 2000.
- [25] A. K. Majumdar, "Free-space laser communication performance in the atmospheric channel", *Journal of Optical and Fiber Communications Reports*, vol. 2, pp. 345-396, 2005.
- [26] L. C. Andrews, "Free-Space Laser Propagation: Atmospheric Effects", *IEEE Lasers & Electro-Optics Society*, vol. 19, no. 5, pp. 6-8, 2005.
- [27] S. Basagni, M. Conti, S. Giordano, I. Stojmenovic, "Mobile Ad-Hoc Networking". Piscataway: IEEE Press, 2004.
- [28] A. S. Tanenbaum, "Computers Networks", 4<sup>a</sup>. ed. New Jersey, Prentice Hall, 2003.
- [29] B. G. Lee, S. C. Choi, "Broadband Wireless Access and Local Networks Mobile WiMAX and WiFi", Norwood, Artech House, 2008.
- [30] W. Soyinka, "Wireless Network Administration A Beginner's Guide". New York, McGraw-Hill, 2010.
- [31] J. Kennington, E. Olinick, D. Rajan, "Wireless Network Design Optimization Models and Solution", Dallas, Springer, 2011.
- [32] H. Liu, G. Li, "OFDM-Based Broadband Wireless Networks Design and Optimization", Hoboken: John Wiley & Sons, 2005.
- [33] B. H. Walke, B. H.; S. Mangold, L. Berlemann, "IEEE 802 Wireless Systems Protocols, Multi-hop Mesh/Relaying, Performance and Spectrum Coexistence", West Sussex: Wiley, 2006.
- [34] R. Olexa, "Implementing 802.11, 802.16, and 802.20 Wireless Networks Planning,

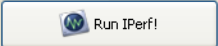
- Troubleshooting and Operations”, Burlington: Elsevier, 2005.
- [35] S. Q. Xiao, M. T. Zhou, Y. Zhang, “Millimeter Wave Technology in Wireless PAN, LAN, AND MAN”, New York, CRC Press, 2008.
- [36] E. Mccune, “Practical Digital Wireless Signals”, Cambridge, Cambridge University Press, 2010.
- [37] S. K. Makki, P. Reiher, K. Makki, N. Pissiou, S. Makki, “Mobile and Wireless Network Security and Privacy”, New York, Springer, 2007.
- [38] W. Shieh, I. Djordjevic, “OFDM for Optical Communications”, Burlington: Elsevier, 2010.
- [39] M. Ghavami, L. B. Michael, R. Kohno, “Ultra Wideband Signals and Systems in Communication Engineering”, 2<sup>a</sup>. ed. Weste Sussex: Wiley, 2007.
- [40] R. M. Carvalho, “Princípios de Comunicação”, Vitória, Túlio Samorin, 2000.
- [41] L. Hanzo, Y. Akhtman, L. Wang, M. Jiang, “MIMO-OFDM for LTE, Wi-Fi and WiMAX Coherent versus Non-coherent and Cooperative Turbo-transceivers”, West Sussex: Wiley, 2011.
- [42] J. Armastrong, “OFDM for Optical Communications”, IEEE Journal of Lightwave Technology, vol. 27, no. 3, pp. 189-204, 2009.
- [43] J. G. dos Santos, L. H. Silva, M. E. V. Segatto, A. P. L. Barbero, M. J. Pontes, R. M. Ribeiro, “Tecnologia Wireless-over-Fiber (WoF) para Flexibilização da Área de Cobertura de Redes Locais”. MOMAG 2010. Vitória, pp. 1-6, 2010.
- [44] A. G. Vieira, A. R. da Cruz, M. T. M. R. Giraldi, “Enlace FSO de Alta Taxa para Acesso à Última Milha”, MOMAG 2010. Vitória, pp. 1-5 2010.
- [45] D-LINK. “DataSheet: Wireless 108 G PCI CARD”, Publicação Eletrônica, 2009.

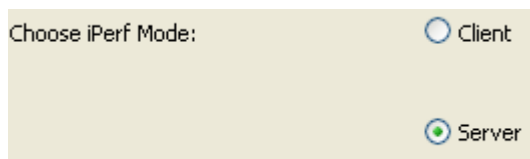
## Apêndice A: Jperf

O Jperf 2.0.2 é uma ferramenta gráfica construído em Java, por isso a razão do “J” na palavra Jperf, que interage com o Iperf aplicativo utilizado para medir a vazão de uma determinada rede.

Este aplicativo é baseado no modelo computacional cliente/servidor o que torna possível utilizá-lo com múltiplos clientes. O Jperf gera fluxo de dados utilizando tanto o protocolo TCP quanto o UDP, os quais se encontram presentes na camada de transporte.

Após a conexão do cliente ao servidor é gerado um fluxo de dados, a partir do cliente, com objetivo de maximizar a utilização da rede entre os dois *hosts*, possibilitando a medição das taxas de *upload* e *download*. Estas informações serão armazenadas respectivamente nos microcomputadores configurados como cliente e servidor.

A configuração do microcomputador como servidor é realizada marcando a opção *Server* conforme apresentado na figura A.1 clicando em seguida no botão  .



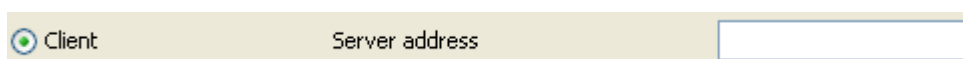
Choose iPerf Mode:

Client

Server

**Figura A.1:** Configuração do modo servidor.

Para que a estação seja considerada como cliente é necessário marcar a opção *Client* e preencher o campo *Server address* com o endereço ip do servidor (figura A.2).



Client

Server address

**Figura A.2:** Configuração do modo cliente.

Em seguida determina-se o tempo em segundos e a quantidade de *bytes* transmitida juntamente com o formato de saída dos dados conforme apresentado na figura A.3.

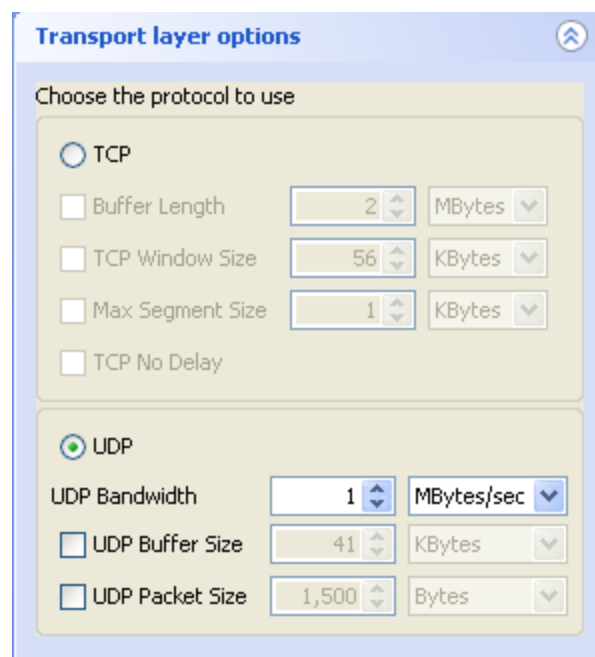


The image shows a configuration panel with two sections. The first section, labeled 'Transmit', has a numeric input field containing '10' and two radio buttons: 'Bytes' (unselected) and 'Seconds' (selected). The second section, labeled 'Output Format', has a dropdown menu currently set to 'MBits'.

**Figura A.3:** Configuração da métrica de transmissão e formato de apresentação.

Após a realização desta etapa é feita a escolha do tipo de protocolo disponível em *Transport Layer Options* (Figura A.4). A opção TCP é utilizada para sistema de transmissão que não prover nenhuma segurança e UDP para aqueles cuja preocupação com a segurança é desnecessária.

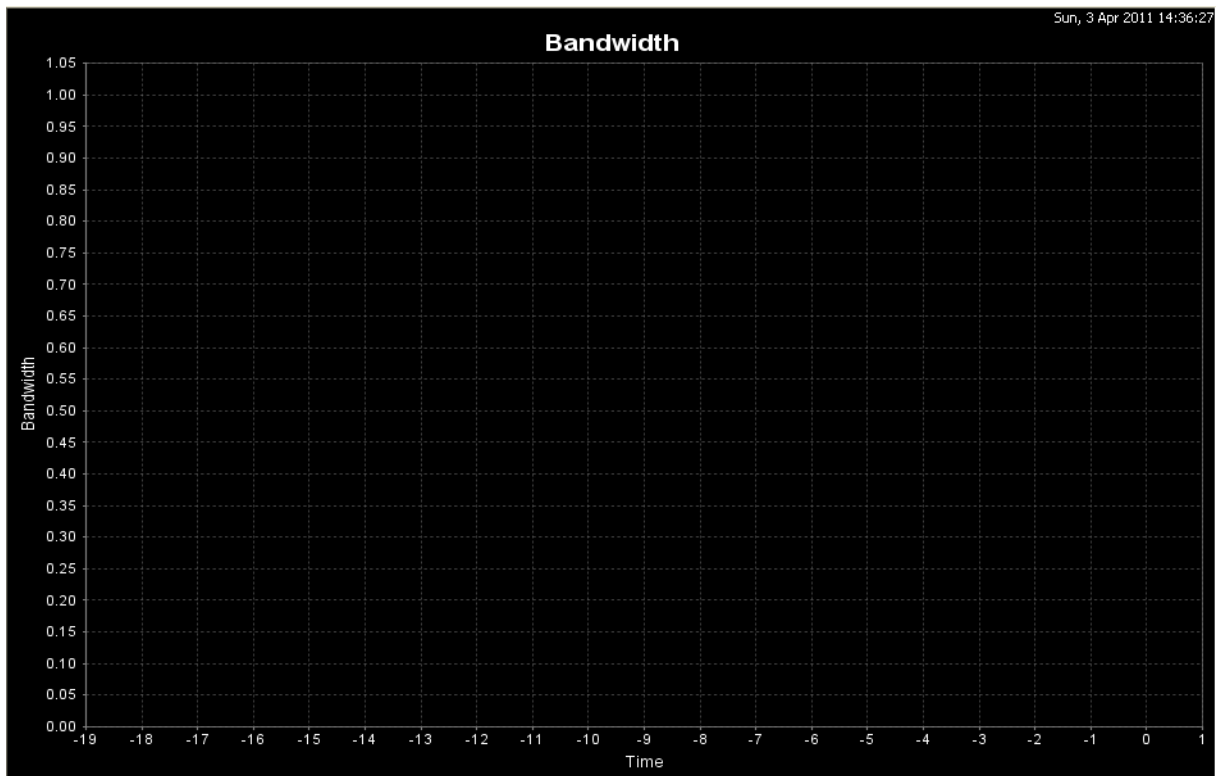
O protocolo UDP permite ainda que seja determinada a taxa de *bit* máxima que o Jperf pode utilizar. Este valor é inserido no campo *UDP Bandwidth*. Utilizando este tipo de protocolo é possível alterar os tamanhos do *buffer* e dos pacotes a serem transmitidos.



The image shows a dialog box titled 'Transport layer options'. It has two main sections. The first section, 'Choose the protocol to use', has a radio button for 'TCP' (unselected) and four checkboxes: 'Buffer Length' (unchecked, value 2, unit MBytes), 'TCP Window Size' (unchecked, value 56, unit KBytes), 'Max Segment Size' (unchecked, value 1, unit KBytes), and 'TCP No Delay' (unchecked). The second section, 'UDP', has a radio button for 'UDP' (selected) and three checkboxes: 'UDP Bandwidth' (checked, value 1, unit MBytes/sec), 'UDP Buffer Size' (unchecked, value 41, unit KBytes), and 'UDP Packet Size' (unchecked, value 1,500, unit Bytes).

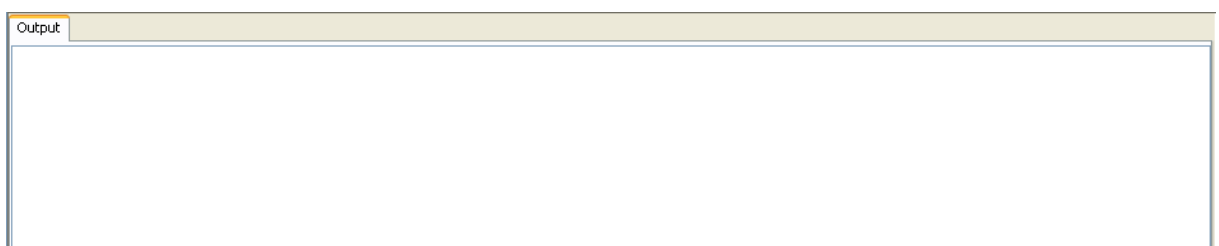
**Figura A.4:** Tipo de protocolo utilizado na transmissão.

O gráfico mostrando o desempenho da taxa de *bit* no tempo é apresentado em espaço próprio conforme ilustra a figura A.5.



**Figura A.5:** Campo destinado à apresentação do desempenho da taxa de bit.

O campo *output* apresentado na figura A.6 serve para mostrar os valores calculados pelo Jperf referentes à taxa de *bit*, *jitter*, quantidades de dados transmitidos e perdas de pacotes.



**Figura A.6:** Campo de saída das grandezas calculadas pelo Jperf.

As informações apresentadas no campo *output* podem ser salvam em modo texto ao ser acionada a tecla  .



## Apêndice B: Iperf

*Iperf* é uma ferramenta para realizar a medição de largura de banda e a qualidade de um enlace. O enlace é delimitado por dois microcomputadores executando o *Iperf*. Enquanto a taxa de transmissão é calculada através do teste TCP, a qualidade do enlace pode ser medida através dos seguintes itens:

- Latência: medido através do comando *Ping*;
- *Jitter*: medido com um teste UDP;
- Perda do datagrama: medido com um teste UDP;

As opções disponíveis no *Iperf* tanto no servidor quanto no cliente são:

- f Formata a saída em: *Kbits, Mbits, Kbytes, Mbytes*.
- i Intervalo, em segundos, entre uma informação sobre taxa de transmissão e outra.
- l Informa o tamanho do *buffer* para ler ou escrever (padrão 8 KB).
- m Mostra o tamanho máximo do segmento TCP.
- p Especifica a porta do servidor para ser ouvida/conectada.
- u Utiliza o protocolo UDP em vez do padrão TCP.
- w Informa o tamanho da janela TCP.
- B Vincula um host a uma interface ou endereço de *multicast*.
- C Para ser utilizado versões antigas do *Iperf*.
- M Configura o tamanho máximo do segmento utilizando o TCP.
- N Utiliza o TCP sem atraso
- V Utiliza o *Iperf* no domínio IPv6.
- h Executa o help

As opções disponíveis para ser utilizado no *Iperf* apenas no servidor são:

- s Configura o microcomputador no modo servidor.
- U Configura o servidor para trabalhar apenas com o protocolo UDP.
- D Configura o servidor para funcionar como um emulador.

As opções disponíveis para ser utilizado no *Iperf* apenas no cliente são:

- b Utilizado com o UDP, configura a taxa de transmissão máxima.
- c Configura o microcomputador no modo cliente.
- d Permite que haja um teste simultâneo bidirecional
- n Informa o número de byte a ser transmitido. Esta opção pode ser utilizada se o usuário não deseja que a duração do teste seja controlada por uma quantidade de tempo.
- r Executa o teste bidirecional, porém de forma individual.
- t Especifica a quantidade de segundos que vai durar o teste.
- F Define uma entrada de dados para ser transmitido a partir de um arquivo
- I Define uma entrada de dados para ser transmitido a partir de um padrão de entrada.
- L Define a porta para receber os testes bidirecionais de volta.
- P Define a quantidade de clientes a ser executado em paralelo.
- T Define o tempo de vida do frame para o caso de um teste *multicast*.