

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
ENGENHARIA ELETRÔNICA E DE TELECOMUNICAÇÕES

HAISLAN MENDES MARTINS

ONDAS MILIMÉTRICAS SOBRE FIBRA: *backhaul* para redes móveis de quinta geração

PATOS DE MINAS
2018

HAISLAN MENDES MARTINS

ONDAS MILIMÉTRICAS SOBRE FIBRA: *backhaul* para redes móveis de quinta geração

Trabalho apresentado como requisito para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2 do curso de Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações da Universidade Federal de Uberlândia – Campus Patos de Minas.

Orientador: Prof. Dr. André Luiz Aguiar da Costa

PATOS DE MINAS

2018

HAISLAN MENDES MARTINS

ONDAS MILIMÉTRICAS SOBRE FIBRA: *backhaul* para redes móveis de quinta geração

Trabalho apresentado como requisito para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2 do curso de Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações da Universidade Federal de Uberlândia – Campus Patos de Minas.

Patos de Minas, 05 de julho de 2018.

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. André Luiz Aguiar da Costa
Universidade Federal de Uberlândia
Orientador

Prof^a. Dr^a. Karine Barbosa Carbonaro
Universidade Federal de Uberlândia
Examinadora

Prof. Dr. Pedro Luiz Lima Bertarini
Universidade Federal de Uberlândia
Examinador

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Dr. Pedro Luiz Lima Bertarini, que me apresentou a área de comunicações ópticas e me influenciou diretamente nesse trabalho.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. André Luiz Aguiar da Costa, por todos os ensinamentos e orientações ao longo deste período.

Agradeço à Prof^a. Dr^a. Indayara Bertoldi Martins (PUC de Campinas), que me disponibilizou o *software VPI transmission maker* para realização das simulações necessárias do presente trabalho.

Agradeço aos meus colegas de curso com quem tive a felicidade de conviver durante esta graduação.

Agradeço à Universidade Federal de Uberlândia, pelo ambiente criativo e amigável proporcionado durante esses anos.

RESUMO

O processo de padronização das redes móveis de quinta geração estabelece que estas deverão apresentar altíssimas taxas de transferência de dados, extrema confiabilidade, uma boa eficiência energética, bem como ser viável economicamente. Para que isso seja possível, uma alternativa proposta foi a utilização da frequência da portadora na faixa do espectro de ondas milimétricas, visto que o espectro de micro-ondas vem enfrentando grandes dificuldades para acomodar o aumento significativo no tráfego de dados e não seria capaz de suportar os serviços esperados para a nova geração de redes móveis. Entretanto, para as altas frequências propostas, os guias de onda metálicos limitariam a qualidade do sinal propagado. Dito isso, a alternativa encontrada para o *backhaul* das redes móveis de quinta geração é a substituição dos guias de onda metálicos por fibras ópticas, empregando o sistema de rádio sobre fibra (ROF, *Radio Over Fiber*). Nesse contexto, o presente trabalho demonstra, por meio de simulações, o impacto do efeito linear da dispersão cromática e dos efeitos não lineares da automodulação de fase (SPM, *Self-Phase Modulation*) e da mistura de quarto ondas (FWM, *Four Wave Mixing*), nas fibras ópticas: padrão (STDF, *Standard Fiber*), de dispersão deslocada (DSF, *Dispersion Shifted Fiber*), anômala e normal. Diante dos resultados encontrados, fica claro que a fibra óptica de dispersão deslocada é a melhor opção para ser utilizada no *backhaul* das redes móveis de quinta geração.

Palavras-chave: Ondas milimétricas. Micro-ondas. Rádio sobre fibra.

ABSTRACT

The process of standardization of fifth generation mobile networks establishes that these should present high data transfer rates, extreme reliability, good energy efficiency, as well as be economically feasible. For this to be possible, a proposed alternative was the use of carrier frequency in the millimeter wave spectrum range, since the microwave spectrum has been struggling to accommodate the significant increase in data traffic and would not be able to support the expected services for the new generation of mobile networks. However, at the proposed high frequencies, metallic waveguides would limit the quality of the propagated signal. That said the alternative found for the backhaul of the fifth generation mobile networks is the replacement of the metallic wave-guides by optical fibers, using the radio over fiber (ROF) system. In this context, the present work demonstrates, by means of simulations, the impact of the chromatic dispersion and of non-linear effects like self-phase modulation (SPM) and the four wave mixing (FWM) in the optical fibers: standard (STDF), dispersion shifted (DSF), anomalous and normal. After the results, it is clear that the dispersion-shifted fiber is the best option to be used in the backhaul of the fifth generation mobile networks.

Keywords: Millimeter waves. Microwaves. Radio over fiber.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Requisitos para a quinta geração de redes móveis (5G x LTE-A).....	18
Figura 2.1 - Esquemas para convergência de um sinal de rádio sobre fibra utilizando ondas milimétricas.....	24
Figura 2.2 - Sistema RoRof para um <i>backhauling</i> de alta capacidade em redes móveis heterogêneas.	25
Figura 3.1 - Três maneiras de transporte de um sinal sobre uma fibra óptica.....	28
Figura 3.2 - Modulação DSB utilizando um EOM.....	29
Figura 3.3 - Modulação DSB-SC utilizando um MZM.....	30
Figura 3.4 - Modulação SSB utilizando um MZM.....	31
Figura 3.5 - Oscilador optoeletrônico.....	33
Figura 3.6 - Tipos de fibras ópticas.	35
Figura 4.1 - Subportadoras OFDM no domínio da frequência.....	38
Figura 4.2 - Resposta impulsiva do RCF para diferentes valores de β	41
Figura 4.3 - Espectro do RCF para diferentes valores de β	41
Figura 5.1 - Esquema proposto para a transmissão de uma onda milimétrica a 90 GHz em um sistema ROF.....	45
Figura 5.2 - Desempenho das modulações QPSK, 16-QAM e 64-QAM em um cenário B2B.	46
Figura 5.3 - Curvas de dispersão.	48
Figura 5.4 - Propagação de uma onda milimétrica a 90 GHz na fibra (G.652) usando modulação QPSK.	49
Figura 5.5 - Propagação de uma onda milimétrica a 90 GHz na fibra (G.652) usando modulação 16-QAM.....	50
Figura 5.6 - Propagação de uma onda milimétrica a 90 GHz na fibra (G.652) usando modulação 64-QAM.....	50
Figura 5.7 - Propagação de uma onda milimétrica a 90 GHz na fibra (G.653) usando modulação QPSK.	51

Figura 5.8 - Propagação de uma onda milimétrica a 90 GHz na fibra (G.653) usando modulação 16-QAM.....	52
Figura 5.9 - Propagação de uma onda milimétrica a 90 GHz na fibra (G.653) usando modulação 64-QAM.....	52
Figura 5.10 - Propagação de uma onda milimétrica a 90 GHz na fibra (G.655+) usando modulação QPSK.	53
Figura 5.11 - Propagação de uma onda milimétrica a 90 GHz na fibra (G.655+) usando modulação 16-QAM.....	54
Figura 5.12 - Propagação de uma onda milimétrica a 90 GHz na fibra (G.655+) usando modulação 64-QAM.....	54
Figura 5.13 - Propagação de uma onda milimétrica a 90 GHz na fibra (G.655-) usando modulação QPSK.	55
Figura 5.14 - Propagação de uma onda milimétrica a 90 GHz na fibra (G.655-) usando modulação 16-QAM.....	55
Figura 5.15 - Propagação de uma onda milimétrica a 90 GHz na fibra (G.655-) usando modulação 64-QAM.....	56
Figura 5.16 - Análise do efeito da SPM em 40 km para modulação QPSK.....	57
Figura 5.17 - Análise do efeito da SPM em 40 km para modulação 16-QAM.	58
Figura 5.18 - Análise do efeito da SPM em 40 km para modulação 64-QAM.	58
Figura 5.19 - Análise do efeito da SPM em 7 km para modulação QPSK.....	59
Figura 5.20 - Análise do efeito da SPM em 3 km para modulação 16-QAM.	59
Figura 5.21- Análise do efeito da SPM em 1 km para modulação 64-QAM.	60
Figura 5.22 - Esquema proposto para análise do efeito FWM.	62
Figura 5.23 - Análise do efeito do FWM na modulação QPSK para diferentes potências de entrada.	63
Figura 5.24 - Análise espectral da modulação QPSK para uma potência média de entrada de 0 dBm.	63
Figura 5.25 - Análise espectral da modulação QPSK para uma potência média de entrada de 4 dBm.	64

Figura 5.26 - Análise espectral da modulação QPSK para uma potência média de entrada de 8 dBm.	64
Figura 5.27 - Análise do efeito do FWM na modulação 16-QAM para diferentes potências de entrada.	64
Figura 5.28 - Análise espectral da modulação 16-QAM para uma potência média de entrada de 0 dBm.....	65
Figura 5.29 - Análise espectral da modulação 16-QAM para uma potência média de entrada de 4 dBm.....	65
Figura 5.30 - Análise espectral da modulação 16-QAM para uma potência média de entrada de 8 dBm.....	65
Figura 5.31 - Análise do efeito do FWM na modulação 64-QAM para diferentes potências de entrada.	66
Figura 5.32 - Análise espectral da modulação 64-QAM para uma potência média de entrada de 0 dBm.....	66
Figura 5.33 - Análise espectral da modulação 64-QAM para uma potência média de entrada de 4 dBm.....	67
Figura 5.34 - Análise espectral da modulação 64-QAM para uma potência média de entrada de 8 dBm.....	67
Figura 6.1- Arquitetura de uma rede móvel para trens de alta velocidade.....	70
Figura A.1 - Análise matemática do esquema proposto para a transmissão de uma onda milimétrica a 90 GHz em um sistema ROF.....	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 - Dados das fibras ópticas utilizados para as simulações.	48
Tabela 6.1 - Resultados das simulações para análise da dispersão.	68

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AMPS - Sistema Avançado de Telefonia Móvel - (*Advanced Mobile Phone System*).

AWG - Conjunto de Grades de Guias de Onda - (*Arrayed Waveguide Grating*).

BPF - Filtro Passa Banda - (*Band Pass Filter*).

CDMA - Acesso Múltiplo por Divisão de Código - (*Code Division Multiple Access*).

CFO - Deslocamento da Frequência da Portadora - (*Carrier Frequency offset*).

CP - Prefixo Cíclico - (*Cyclic Prefix*).

C-RANs - Redes de Acesso de Rádio Baseadas em Nuvem - (*Cloud Based Radio Access Networks*).

CS - Estação Central - (*Central Station*).

DCF - Fibra Compensadora de Dispersão - (*Dispersion Compensating Fiber*).

DFT - Transformada Discreta de Fourier - (*Discrete Fourier Transform*).

DSB - Banda Lateral Dupla - (*Double SideBand*).

DSB-SC - Banda Lateral Dupla com Portadora Suprimida - (*Double Sideband Suppressed Carrier*).

DSF - Fibra de Dispersão Deslocada - (*Dispersion Shifted Fiber*).

D2D - Dispositivo a Dispositivo - (*Device To Device*).

EDGE - Taxa de Dados Aprimorados Para GSM - (*Enhanced Data Rates For GSM*).

EHF - Banda de Frequência Extremamente Alta - (*Extremely High Frequency*).

EOM - Modulador Óptico Externo - (*External Optical Modulator*).

ERBs - Estações Rádio Base - (*Radio Base Station*).

FEC - Correção Antecipada de Erros - (*Forward Error Correction*).

FBG - Grade de Fibra de Bragg - (*Fiber Bragg Grating*).

FM - Modulada em Frequência - (*Frequency Modulation*).

FWM - Mistura de Quatro Ondas - (*Four Wave Mixing*).

Gbps - Giga Bits por Segundo - (*Gigabits per Second*).

GHz - Giga Hertz - (*Giga hertz*).

GPRS - Serviço de Rádio de Pacote Geral - (*General Packet Radio Service*).

GSM - Sistema Global para Comunicações Móveis - (*Global System Mobile Communications*).

HSPA - Acesso a Pacotes de Alta Velocidade - (*High Speed Packet Access*).

HSPA+ - Mais Acesso a Pacotes de Alta Velocidade - (*High Speed Packet Access Plus*).

IDFT - Transformada Inversa Discreta de Fourier - (*Inverse Discrete Fourier Transform*).

IF - Frequência Intermediária - (*Intermediate Frequency*).

IFFT - Transformada Inversa de Fourier - (*Inverse Fast Fourier Transform*).

IM-DD - Modulação de Intensidade com Detecção Direta - (*Intensity Modulation with Direct Detection*).

IOT - Internet Das Coisas - (*Internet of Things*).

ISI - Interferência Intersimbólica - (*Intersymbol Interference*).

IS-95 - Padrão Provisório 95 - (*Interim Standard 95*).

IS-136 - Padrão Provisório 136 - (*Interim Standard 136*).

ITU - União Internacional de Telecomunicações - (*International Telecommunication Union*).

kbps - Quilo Bits por Segundo - (*kilobit per Second*).

kHz - Quilo Hertz - (*Quilo Hertz*).

km - Quilômetro - (*kilometre*).

km/h - Quilômetro por hora - (*kilometre per hour*).

LPF - Filtro Passa Baixa - (*Low Pass Filter*).

LTE - Evolução de Longo Prazo - (*Long Term Evolution*).

Mbps - Mega Bits por Segundo - (*Megabits Per Second*).

MHz - Mega Hertz - (*Mega Hertz*).

MIMO - Múltiplas Entradas e Múltiplas Saídas - (*Multiple Input Multiple Output*).

M2M - Máquina a Máquina - (*Machine To Machine*).

MZM - Modulador Mach–Zehnder - (*Mach–Zehnder Modulator*).

OEO - Oscilador OptoEletrônico - (*Opto-Electronic Oscillator*).

OFDM - Multiplexação por Divisão de Frequências Ortogonais - (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing / Multiple Access*).

QoS - Qualidade de Serviço - (*Quality of Service*).

RAU - Unidade de Antena Remota - (*Remote Antenna Unit*).

RCF - Filtro Cosseno Levantado - (*Raised Cosine Filter*).

RF - Rádio Frequência - (*Radio Frequency*).

ROF - Rádio Sobre Fibra - (*Radio Over Fiber*).

RoRoF - Rádio em Rádio Sobre Fibra - (*Radio On Radio Over Fiber*).

RRH - Cabeça de Rádio Remota - (*Remote Radio Head*).

SCM - Multiplexagem de Subportadora - (*Subcarrier Multiplexing*).

SER - Taxa de Erro de Símbolos - (*Symbol Error Rate*).

SHF - Banda de Alta Frequência - (*Super High Frequency*).

SIM - Modulo de Identificação do Assinante - (*Subscriber Identity Module*).

SNR - Relação Sinal Ruído - (*Signal to Noise Ratio*).

SPM - Automodulação De Fase - (*Self-Phase Modulation*).

SSB - Banda Lateral Única - (*Single Sideband*).

STDF - Fibra Padrão - (*Standard Fiber*).

TDMA - Acesso Múltiplo por Divisão de Tempo - (*Time Division Multiple Access*).

UHF - Frequência Ultra Alta - (*Ultra High Frequency*).

W-CDMA - Múltiplo Acesso por Divisão de Código em Banda Larga - (*Wide-Band Code-Division Multiple Access*).

WLAN - Rede de Área Local sem Fio - (*Wireless Local Area Network*).

SUMÁRIO

	CAPÍTULO 1	16
	INTRODUÇÃO	16
1.1	Problematização	21
1.2	Objetivos	21
1.2.1	Objetivos Gerais	21
1.2.2	Objetivos Específicos	21
1.3	Justificativa	22
1.4	Proposta e organização do trabalho	22
	CAPÍTULO 2	23
	BACKHAUL PARA REDES MÓVEIS DE QUINTA GERAÇÃO	23
	CAPÍTULO 3	27
	RÁDIO SOBRE FIBRA	27
3.1	O sistema ROF	27
3.2	Geração fotônica de ondas milimétricas	29
3.2.1	Geração de sinal com banda lateral dupla	29
3.2.2	Geração de sinal com banda lateral dupla e portadora suprimida	30
3.2.3	Geração de sinal com banda lateral única	31
3.2.4	Geração de frequências harmônicas	31
3.2.5	Geração heteródina	32
3.2.6	Oscilador optoeletrônico	32
3.3	Fotodeteccção	33
3.4	Classificação das fibras ópticas	34
3.5	Vantagens e limitações do sistema ROF	35
	CAPÍTULO 4	37
	MULTIPLEXAÇÃO POR DIVISÃO DE FREQUÊNCIAS ORTOGONAIS	37
4.1	Desenvolvimento do OFDM	37
4.2	O OFDM	37
4.3	Transformada discreta de Fourier	39
4.4	Filtro cosseno levantado - (RCF, <i>Raised Cosine Filter</i>)	40
4.5	Tons Piloto	41
4.6	Vantagens e limitações OFDM	42
	CAPÍTULO 5	44
	SIMULAÇÕES E RESULTADOS	44
5.1	Simulações	44
5.1.1	Descrição do cenário	44

5.2	Resultados	46
5.2.1	<i>Back to Back</i> (B2B)	46
5.2.2	Análise da dispersão cromática nas fibras ópticas	47
5.2.2.1	Fibra óptica padrão	49
5.2.2.2	Fibra óptica de dispersão deslocada	51
5.2.2	Fibra óptica anômala	52
5.2.2.4	Fibra óptica normal	54
5.2.2.5	Análise dos resultados da dispersão cromática	56
5.2.3	Automodulação de Fase	56
5.2.3.1	Efeito da automodulação de fase na fibra óptica de dispersão deslocada	57
5.2.3.2	Efeito da automodulação de fase na fibra óptica padrão	58
5.2.3.3	Análise dos resultados do efeito não linear da automodulação de fase	60
5.2.4	Mistura de quatro ondas	61
	CAPÍTULO 6	68
	CONCLUSÃO E ESTUDOS FUTUROS	68
6.1	Conclusão	68
6.2	Estudos Futuros	70
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71
	APÊNDICE A - CENÁRIO ROF	77

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O modo de vida e a maneira como os seres humanos se comunicam vem sendo influenciados diretamente pela evolução tecnológica. Neste contexto, a telefonia móvel revolucionou o mercado de telecomunicações, visto que, a partir de então, qualquer pessoa em posse de um celular poderia estabelecer comunicação com outra; desde que as mesmas estivessem em uma determinada área geográfica que contasse com a cobertura de uma estação rádio base (ERBs, *Radio Base Station*) [1].

A telefonia móvel realiza a comunicação entre dois dispositivos por meio de ondas de rádio frequência (RF, *Radio Frequency*). A sua arquitetura é composta por ERBs, nas quais são posicionadas antenas transmissoras e receptoras para realizar a cobertura de uma determinada região, usualmente chamada de *cluster*. As ERBs, por sua vez, são conectadas a uma determinada central telefônica. Isso permite que um usuário possa realizar ou receber chamadas por meio da comunicação de seu aparelho móvel com uma ERB [1].

Nos últimos anos, a comunicação móvel tem evoluído e melhorado a experiência do usuário, permitindo, assim, novos serviços e aprimorando os já existentes. É possível fazer uma cronologia desta evolução, tomando como ponto de partida o extinto sistema avançado de telefonia móvel (AMPS, *Advanced Mobile Phone System*), também chamado de primeira geração. Neste caso, o sistema era analógico e foi desenvolvido originalmente para a transmissão da voz, apresentando sua frequência central em 850 MHz. Para isso, a voz era modulada em frequência (FM, *Frequency Modulation*) e se propagava em sinais de RF nas faixas de frequências ultra alta (UHF, *Ultra High Frequency*) [1] [2] [3].

A migração dos sistemas analógicos para digitais marcou o início da segunda geração de telefonia móvel, quando foi possível a transmissão da voz digital e também a troca de mensagens de texto. Os principais sistemas de segunda geração foram: IS-136 (TDMA, *Time Division Multiple Access*), o sistema global para comunicações móveis (GSM, *Global System Mobile Communications*) e IS-95 (CDMA, *Code Division Multiple Access*) [1] [2] [3].

O IS-136 operava nas faixas de frequências de 800 e 1900 MHz, com bandas de 30 kHz, e utilizava a técnica de múltiplo acesso por divisão de tempo (TDMA). O sistema GSM operava nas frequências de 900 e 1800 MHz, com bandas de 200 kHz, e também era

empregada a mesma técnica de múltiplo acesso do sistema IS-136. Tal sistema teve como grande diferencial a utilização dos cartões de módulo de identificação do assinante (SIM, *Subscriber Identity Module*), os quais guardam dados referentes ao aparelho celular, além da inserção da criptografia no processo de transmissão da voz, tornando as ligações mais seguras [1] [2] [3]. Já o sistema IS-95 utilizava a técnica de múltiplo acesso por divisão de código (CDMA), em que para cada usuário era atribuído um código único para sua identificação, possibilitando assim o compartilhamento da banda de transmissão de 1,23 MHz [1] [2] [3].

Antes de consolidar a terceira geração, a popularização da internet móvel exigiu a adaptação dos dispositivos utilizados até então, surgindo assim, uma geração intermediária entre a terceira e a segunda. Tal geração apresentava o serviço de rádio de pacote geral (GPRS, *General Packet Radio Service*), que permitia o transporte de dados por pacotes. O GPRS foi aprimorado posteriormente com o surgimento das taxas de dados aprimoradas para GSM (EDGE, *Enhanced Data Rates For GSM*), o qual apresentou uma velocidade máxima de 473 kbps, contra a teórica 170 kbps oferecida pelo GPRS que na prática, normalmente, não apresentava taxas superiores a 80 kbps [1] [2] [3].

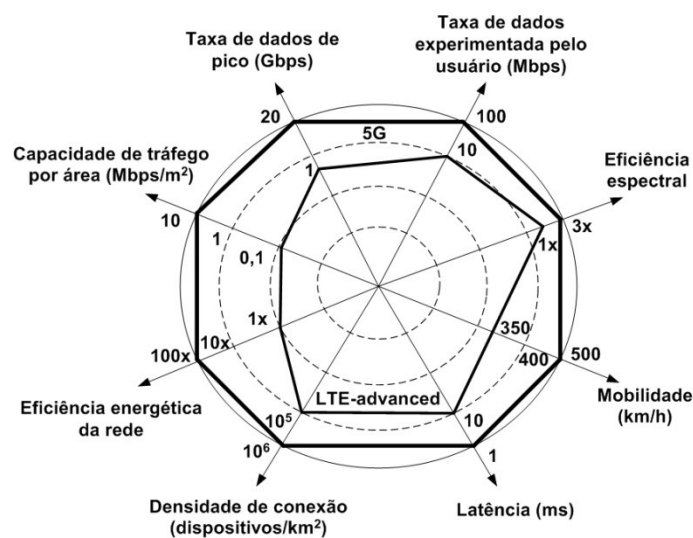
A terceira geração dos sistemas de comunicações móveis melhorou consideravelmente a transmissão de dados, além de apresentar novos recursos como a vídeo chamada. A técnica de múltiplo acesso utilizada nesta geração era a mesma do sistema IS-95, ou seja, o CDMA. Entretanto, nesta geração a banda de transmissão passou de 1,23 MHz para 5 MHz, dando origem ao termo múltiplo acesso por divisão de códigos em banda larga (W-CDMA, *Wide-Band Code-Division Multiple Access*), que alcançou taxas de 2 Mbps. Posteriormente, tal sistema evoluiu para o acesso a pacotes em alta velocidade (HSPA, *High Speed Packet Access*) e apresentou uma velocidade de até 7,2 Mbps, sendo melhorada com o lançamento do (HSPA+, *High Speed Packet Access plus*), que teoricamente poderia chegar a 168 Mbps [1] [2] [3].

O padrão adotado pela quarta geração foi a evolução de longo prazo (LTE, *Long Term Evolution*), a qual se baseia nas tecnologias W-CDMA e GSM. Entretanto, a rede apresenta maior estabilidade e velocidade em razão de a prioridade agora ser o tráfego de dados e não mais o de voz. A tecnologia LTE utiliza uma banda de frequência de 20 MHz, sendo capaz de atingir taxas de transferências de dados em torno de 100 Mbps para o enlace da ERB para o usuário e 50 Mbps para o sentido contrário, apresentando ainda uma latência

de no máximo 30 ms. O padrão americano de quarta geração de comunicações móveis utiliza o espectro eletromagnético na frequência de 700 MHz. No Brasil, tal frequência foi reservada a transmissão do sinal de televisão analógica, o que impede a utilização desta por outros serviços. Porém, a televisão analógica vem sendo desligada em todo território nacional gradualmente, liberando assim a frequência de 700 MHz. Uma alternativa utilizada até os dias de hoje são as frequências em torno de 2,5 GHz [4].

Em todas as gerações descritas anteriormente, a internet móvel é oferecida com o objetivo principal de atender os usuários. Atualmente, o sistema de comunicação móvel de quinta geração está sendo padronizado pela união internacional de telecomunicações (ITU, *International Telecommunication Union*), de acordo com a recomendação [5], na qual está previsto serviços inovadores, tais como: comunicações máquina a máquina (M2M, *Machine To Machine*) e dispositivo a dispositivo (D2D, *Device To Device*), além da internet das coisas (IOT, *Internet Of Things*) e da internet tátil. Esses serviços só serão possíveis devido aos requisitos padronizados por [5], conforme ilustrado pela Figura 1.1, para a quinta geração de redes móveis, sendo eles: taxa de dados de pico de 20 Gbps, latência de 1 ms, taxa de dados experimentada pelo usuário de 100 Mbps, capacidade de tráfego por área de 10 Mbps/m², densidade de conexão de 10⁶ dispositivos/km², mobilidade de até 500 km/h, aumento da eficiência espectral da rede em 3 vezes, assim como melhoria da eficiência energética da rede em 100 vezes [5].

Figura 1.1 - Requisitos para a quinta geração de redes móveis (5G x LTE-A).



Fonte – Elaborada pelo autor, baseado em [5].

A comunicação M2M é possível desde que cada máquina tenha integrado em sua estrutura um dispositivo remoto (sensor) com acesso à rede. Desta maneira, o mesmo é capaz de mensurar diversas informações referentes ao desempenho do equipamento e enviar para um servidor central em tempo real para que essas informações sejam analisadas. Tal processo abre a possibilidade de automatização de serviços, fazendo com que a comunicação M2M tenha um potencial imenso, podendo ser utilizada em diversos cenários e aplicações [6].

Outro serviço que ganha força com a chegada da quinta geração é a comunicação D2D. Neste caso, os dispositivos que se encontram próximos uns dos outros trocam informações entre si, sem a necessidade da participação de uma ERB ou com pouca participação da mesma, podendo formar uma rede entre eles. Essa capacidade se mostra muito atrativa para a nova geração, visto que diminuiria o tráfego de dados e otimizaria a capacidade das redes móveis de comunicação. Outro fator que chama atenção é a facilidade de se estabelecer uma rede D2D em um curto intervalo de tempo, virtude que se mostra uma alternativa interessante em casos de desastres naturais, em que há perda de conexão devido à rede danificada [7].

No serviço conhecido como IOT, diversos tipos de dispositivos e objetos inteligentes são capazes de interagir entre si e com os seres humanos, fazendo com que várias atividades do nosso dia a dia se tornem muito mais fáceis. Por exemplo: uma geladeira será capaz de armazenar uma lista de alimentos previamente estabelecida pelo usuário; sendo assim, quando algum determinado produto estiver se esgotando, o dispositivo enviará um pedido ao supermercado para que ele seja repostado. Tudo isso de forma automatizada [8].

Dentro do conceito de IOT, tem-se a internet tátil, a qual permitirá a transmissão de instruções em tempo real. Para isso, alguns requisitos devem ser satisfeitos, sendo os principais: uma latência na casa de 1 ms e uma rede extremamente confiável que seja capaz de suportar um grande tráfego de dados, posto que vários dispositivos se comunicarão de forma autônoma uns com os outros simultaneamente. Alguns exemplos de aplicações da internet tátil são os jogos de realidade virtual, em que o usuário poderá ter uma experiência de interação jamais vista, e a cirurgia remota, na qual um médico será capaz de operar um paciente em outro país por meio de equipamentos de robótica [9].

O ano de 2020 foi definido por [5] como o ano em que o sistema de comunicação móvel de quinta geração estará em funcionamento. Assim, os jogos olímpicos no Japão nesse

ano ficarão marcados na história como sendo as primeiras olimpíadas com a utilização desta tecnologia. Não obstante, para que isso seja possível é preciso solucionar alguns problemas encontrados, principalmente no que diz respeito ao espectro, visto que o grande sucesso das redes sociais e algumas mudanças no perfil dos usuários fizeram com que um usuário comum se tornasse também gerador de tráfego, e não apenas consumidor; com isso, o tráfego e a demanda por taxas de transmissão mais elevadas nas redes sem fio aumentaram significativamente. Além disso, o número de usuários de dispositivos móveis cresceu exponencialmente nos últimos anos, de modo que o espectro atual para frequências abaixo de 3 GHz não será capaz de atender a demanda de tráfego prevista para os próximos anos [10].

Por outro lado, na faixa de 3-300 GHz, se encontra uma vasta gama de espectro subutilizado. O espectro nessa faixa se divide em duas categorias, sendo elas: a banda de alta frequência (SHF, *Super High Frequency*), que vai de 3-30 GHz e a banda de frequência extremamente alta (EHF, *Extremely High Frequency*), ou milimétrica, que varia de 30-300 GHz. Todo o espectro na faixa de 3-300 GHz é considerado banda de onda milimétrica, com comprimentos de onda no intervalo de 1 a 100 mm uma vez que as ondas de rádio nesta faixa possuem semelhanças em suas características de propagação [11].

Em consonância a estes fatos, a utilização de ondas milimétricas para a nova geração se mostra bastante viável, em razão da grande largura de banda disponível na faixa de 30-300 GHz. Em um estudo recente, Rappaport demonstrou que há 1 GHz de largura de banda disponível entre as frequências de 28 a 38 GHz [12]. Mesmo com o estudo anterior, a banda de 60 GHz e a banda E (71-76 e 81-86 GHz), são também apresentadas como adequadas para a transmissão de dados nas redes de comunicações móveis, uma vez que as mesmas apresentam, respectivamente, 9 e 10 GHz de largura de banda disponível [13].

Para a utilização de ondas milimétricas na quinta geração, diversos estudos e testes devem ser realizados com intenção de conhecer as características de propagação dessas ondas. Testes realizados em [12] e [14] mostram que os sinais de rádio nesta faixa de frequência se propagam por uma distância menor, além de apresentarem muitas perdas quando encontram alguma barreira pelo caminho, tais como: edifícios e casas. No entanto, uma maior segurança de comunicação e uma melhor utilização do espectro são possíveis usando ondas milimétricas [14]. Outro obstáculo importante que foi desmistificado nesses estudos se trata da impossibilidade da utilização de ondas milimétricas devido à chuva,

quando ficou provado que para distâncias menores que 200 metros, os efeitos da chuva podem ser superados, viabilizando assim a sua utilização [12] [14].

1.1 Problematização

A padronização das redes móveis de quinta geração, normatizada por [5], mostra as especificações técnicas que deverão ser seguidas pela nova geração, tais como: velocidade de transmissão na casa de 20 Gbps e latência inferior a 1 ms. Para que isso seja possível, uma rede de *backhaul* deve ser projetada de modo que o guia de onda adotado suporte as altas frequências utilizadas na faixa de ondas milimétricas, 60 GHz ou Banda W (75 a 110 GHz). Diante deste cenário, a fibra óptica surge como uma solução para tal projeto [12] [15].

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivos Gerais

Este trabalho de conclusão de curso tem como objetivo estudar a propagação das ondas milimétricas de rádio, na faixa de 90 GHz, sobre as fibras ópticas, em redes de acesso de rádio para a quinta geração dos sistemas de comunicações móveis.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Adquirir referenciais teóricos sobre o processo de padronização da quinta geração de redes móveis.
- Estudo da propagação de sinais multiplexados por divisão de frequências ortogonais (OFDM, *Orthogonal Frequency Division Multiplexing / Multiple Access*) sobre a fibra óptica.
- Investigar, por meio de simulações, as características de transmissão do sistema ROF para a faixa de ondas milimétricas e apresentar os resultados obtidos, mostrando sua viabilidade para o *backhaul* das redes móveis de quinta geração.
- Analisar, por meio de simulações, o impacto do efeito linear da dispersão cromática e dos efeitos não lineares da automodulação de fase e da mistura de quatro ondas, na propagação de uma onda milimétrica, a 90 GHz, em um sistema ROF.
- Determinar, por meio dos resultados encontrados, qual fibra óptica apresenta melhor desempenho para ser utilizada no *backhaul* das redes móveis de quinta geração.

1.3 Justificativa

O espectro de frequências utilizado atualmente para comunicações móveis se mostra um problema, uma vez que são esperados diversos novos serviços de telecomunicações para as redes móveis de quinta geração, aumentando significativamente a demanda por tráfego em um futuro próximo [10]. Uma alternativa para solucionar essa questão é a utilização da frequência da portadora na faixa de ondas milimétricas. Porém, os guias de ondas metálicos usados até a quarta geração de redes móveis não são viáveis para as altas frequências propostas para a quinta geração, dado que os mesmos apresentam grandes problemas de atenuação em função do seu comprimento, limitando a qualidade do sinal propagado. Neste contexto, mostra-se de extrema importância a realização de um estudo sobre as redes de *backhaul*, as quais conectarão todas essas pequenas células às centrais. Diante dos fatos apresentados, a solução encontrada é o emprego da fibra óptica para as redes de *backhaul*, criando assim redes heterogêneas utilizando ROF para a transmissão de um sinal de alta velocidade [10] [12] [15].

1.4 Proposta e organização do trabalho

Este trabalho de conclusão de curso tem como objetivo estudar a transmissão das ondas milimétricas em um sistema ROF e a apresentação dos resultados obtidos por meio de simulações, mostrando assim a viabilidade dessa solução para as redes de *backhaul* da quinta geração de redes móveis.

A organização do trabalho é proposta da seguinte maneira: o primeiro capítulo aborda a evolução das redes móveis e apresenta os desafios encontrados para a padronização da quinta geração, bem como os serviços que serão proporcionados por esta. O segundo capítulo apresenta o *backhaul* proposto para as redes móveis de quinta geração. O terceiro capítulo é composto pela descrição do sistema ROF. O quarto capítulo retrata a técnica de modulação OFDM. O quinto capítulo exhibe o cenário, simulações e resultados encontrados. Por fim, o sexto capítulo contém a conclusão e as sugestões para estudos futuros.

CAPÍTULO 2

BACKHAUL PARA REDES MÓVEIS DE QUINTA GERAÇÃO

O crescimento exponencial de usuários de dispositivos móveis fez com que o tráfego de dados nas redes móveis aumentasse consideravelmente. Em função disso, o espectro de frequências atual não será capaz de atender os serviços esperados para a próxima geração de redes móveis. Tendo em vista os fatos apresentados, a utilização da frequência da portadora na faixa de ondas milimétricas de rádio, promete ser uma solução chave para o aumento da capacidade do tráfego de dados para a quinta geração de redes móveis [10] [15].

A parte do espectro de frequências destinado às ondas milimétricas, 60 GHz ou banda W (75 a 110 GHz), apresenta grandes problemas de atenuação em função da distância. Em virtude disso, um grande número de ERBs se faz necessário para cobrir uma determinada área geográfica [1] [10] [14] [15].

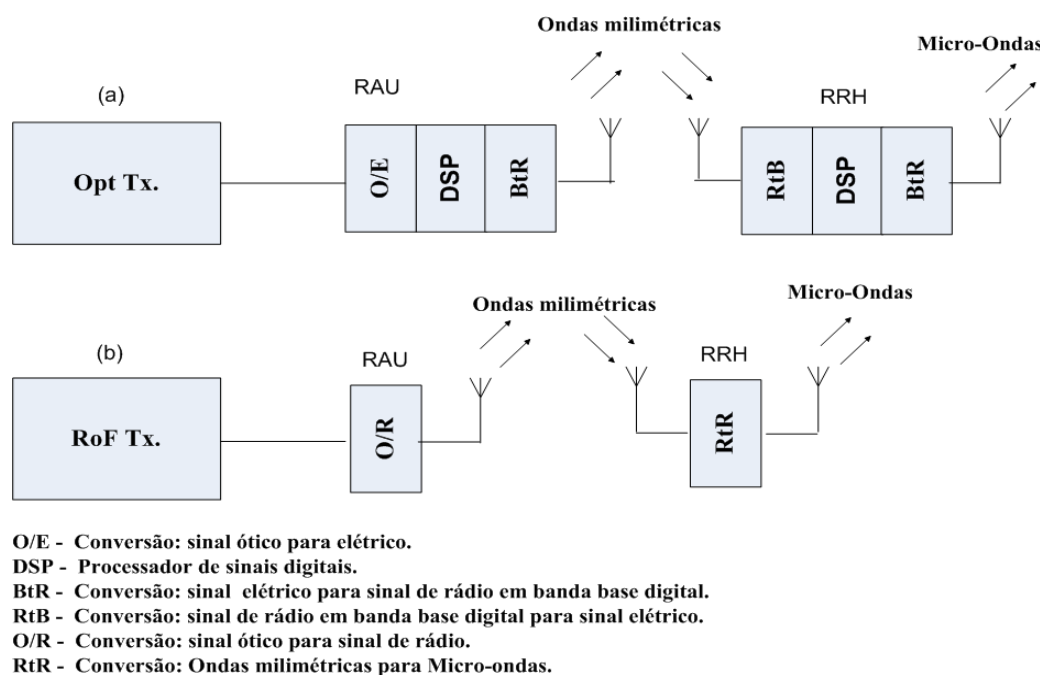
Por outro lado, as redes de acesso de rádio baseadas em nuvem (C-RANs, *Cloud Based Radio Access Networks*) apresentam-se como uma alternativa interessante para as futuras redes de acesso, uma vez que, por meio delas, é possível simplificar a administração da rede e a coordenação dos recursos de rádio. Além de tudo, como algumas de suas funções são realizadas na nuvem, os custos com *hardware* serão reduzidos, mostrando assim, ser uma escolha econômica, de alto desempenho e com uma boa eficiência energética [15].

Diante das soluções apresentadas, fica clara a necessidade de uma rede de *backhaul* com alta capacidade capaz de conectar um grande número de pequenas ERBs, além de suportar as futuras redes C-RANs. Para isso, a utilização de fibra óptica para conectar o elevado número de ERBs às centrais se mostra ideal. Desse modo, a melhor solução para uma rede de *backhaul* de alta capacidade, flexível e com boa eficiência energética, seria a convergência de um sistema de ondas milimétricas e fibra óptica [15].

Na Figura 2.1 são apresentados dois esquemas para a convergência de um sistema de ondas milimétricas sobre a fibra óptica para uma rede de *backhaul* sem fio móvel. Na Figura 2.1 (a), o sinal recebido do transmissor óptico é convertido em um sinal elétrico; em seguida, esse sinal é tratado por um processador de sinais digitais; após isso, o sinal elétrico é convertido em um sinal de rádio em banda base digital e é transmitido na faixa de ondas milimétricas pela unidade de antena remota (RAU, *Remote Antenna Unit*). Em um segundo

momento, o sinal é recebido em uma unidade de rádio remota, também chamada de cabeça de rádio remota (RRH, *Remote Radio Head*), no qual é convertido novamente para um sinal elétrico, processado, e, finalmente, convertido para um sinal de rádio na faixa de micro-ondas, para que seja propagado até os terminais móveis [15].

Figura 2.1 - Esquemas para convergência de um sinal de rádio sobre fibra utilizando ondas milimétricas.



Fonte – Elaborada pelo autor, baseado em [15].

O grande problema para uma rede de *backhaul* C-RAN encontrado nesta configuração é que as diversas conversões realizadas, tanto no RAU como no RRH, fazem com que o sistema não seja eficiente em termos energéticos, além de apresentar uma estrutura complexa e capaz de transportar apenas um único serviço por vez, em função da abordagem banda base digital adotada [15].

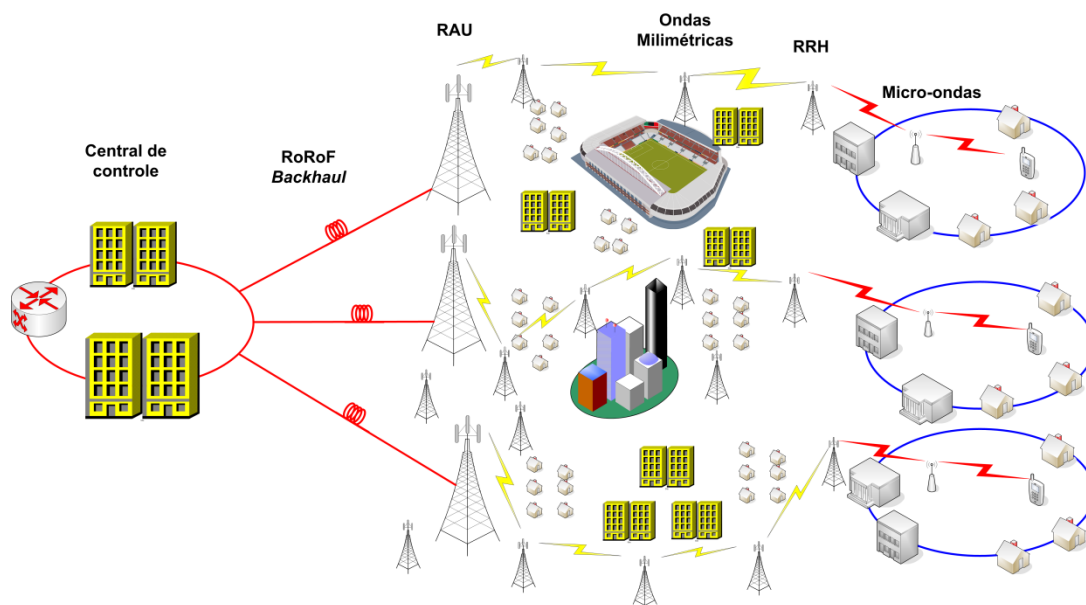
Em contrapartida, na Figura 2.1 (b) é apresentado um esquema em que é possível uma convergência contínua de redes de rádio e fibra óptica utilizando o sistema ROF. Neste caso, por meio da técnica de conversão fotônica direta, um sinal de ondas milimétricas é gerado diretamente de um sinal óptico, eliminando os diversos processamentos realizados na RAU e no RRH para conversão do sinal [15].

Dessa maneira, o processo de convergência do sinal tem sua eficiência energética aumentada e seu custo reduzido, dado que suas células remotas são mantidas simples. Além do mais, o sistema pode, neste formato, permitir a coexistência de diversos serviços, uma vez

que os sinais são transmitidos diretamente no formato de RF analógico, mostrando ser assim uma boa solução para uma rede de *backhaul* sem fio móvel [15].

A configuração apresentada na Figura 2.2 mostra uma solução flexível para as futuras redes de acesso C-RANs e para as redes móveis de alta velocidade. Neste modelo, por meio de um sistema convergente de rádio em rádio sobre fibra (RoRoF, *Radio On Radio Over Fiber*), torna-se possível obter um sistema de *backhaul* com alta capacidade para redes móveis heterogêneas de quinta geração. Para isso, as funções de processamento de sinais são centralizadas em uma nuvem, deixando assim apenas funcionalidades simples para os RRHs, como amplificação e conversão de ondas milimétricas e micro-ondas. Além do mais, as estações centrais propagam sinais sem fio padrão, tais como: sinais celulares e de rede de área local sem fio (WLAN, *Wireless Local Area Network*), diretamente para o RRH [15].

Figura 2.2 - Sistema RoRoF para um *backhauling* de alta capacidade em redes móveis heterogêneas.



Fonte – Elaborada pelo autor, baseado em [15].

A entrega de serviços de banda larga para usuários móveis em alta velocidade, como, por exemplo, passageiros de trens, torna-se possível com a adoção do modelo apresentado na Figura 2.2. Além do mais, tal modelo amplia a cobertura de serviços de banda larga para áreas remotas, antes não atendidas. No entanto, o sistema também apresenta pontos negativos, como o impacto de distorções e não linearidades relacionadas ao link ROF sobre o sinal de ondas milimétricas gerado, bem como a influência direta no sinal propagado das falhas na conversão do sinal para cima e para baixo [15].

Os fatos apresentados acima revelam a necessidade de um estudo aprofundado sobre a transmissão de sinais rádio em um sistema óptico. Também se faz necessário compreender as características de propagação do sinal em função do comprimento da fibra [15].

Neste capítulo foram apresentadas possíveis configurações para uma rede de acesso (*backhaul*) de quinta geração e abordado as características de cada uma delas. No próximo capítulo o sistema ROF proposto será apresentado, mostrando ao seu final, ser um recurso fundamental para alcançar redes de acesso com elevada capacidade de transmissão.

CAPÍTULO 3

RÁDIO SOBRE FIBRA

Diversos estudos vêm sendo realizados nos últimos anos a fim de encontrar uma solução para aumentar a capacidade das redes de acesso (*backhaul*) e atender aos requisitos de mobilidade previstos para a quinta geração das redes móveis. Nesse contexto, a criação de uma rede híbrida (redes ópticas e redes sem fio) é proposta, dado que as redes ópticas são capazes de prover grande largura de banda, além de entregar altas taxas de dados. Já as redes sem fio oferecem a mobilidade e flexibilidade necessária. Desse modo, o sistema ROF surge como alternativa para desfrutar do melhor das tecnologias óptica e sem fio [16] [17].

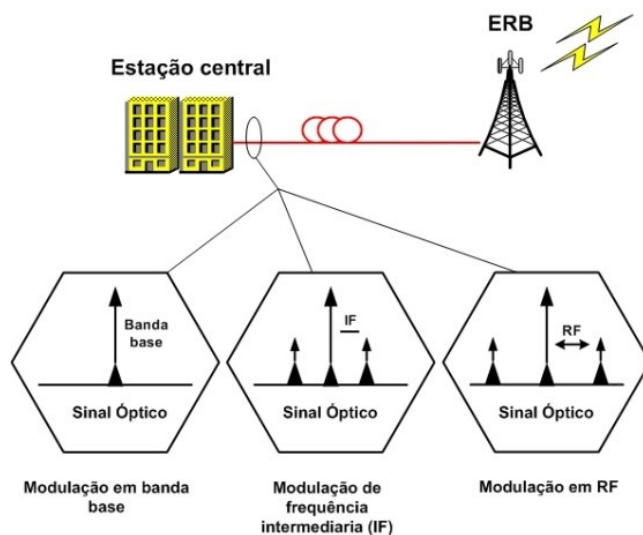
3.1 O sistema ROF

A transmissão de sinais de RF sobre uma portadora óptica da origem ao conceito de ROF [18] [19]. Em 1980, Brenci e Checcacci [17] [20] realizaram o primeiro transporte de um sinal em RF sobre uma fibra óptica. No entanto, apenas em 1990, Cooper demonstrou a primeira aplicação de um sistema ROF ligado às redes móveis, fazendo um telefone sem fio de curto alcance (CT2), por meio de técnicas de multiplexagem de subportadora (SCM, *Subcarrier Multiplexing*), operar sobre um enlace de fibra óptica [17] [21] [22]. A empresa *Allen Telecom*, criou e instalou nos jogos olímpicos de Sydney nos anos 2000, um sistema ROF denominado de “*Tekmar Sistemi’s*”, o qual era baseado em pico-células de redes móveis e foi capaz de suportar com grande sucesso uma elevada concentração de tráfego de dados gerados durante a realização dos jogos [17] [18] [23]. Atualmente, o sistema ROF está sendo padronizado pela ITU de acordo com a recomendação [24].

A Figura 3.1 apresenta um esquema ROF típico, conectando, por meio de fibra óptica, uma estação central (CS, *Central Station*) a uma ERB [18] [19]. Conforme ilustrado, a propagação do sinal na fibra pode ser realizada de diferentes formas dependendo de sua aplicação. Na transmissão em banda base, uma portadora óptica é modulada diretamente por um sinal elétrico em banda base e transmitida pela fibra. Essa modulação pode ocorrer tanto de maneira direta, utilizando um diodo laser, ou ainda, empregando um modulador óptico externo (EOM, *External Optical Modulator*). Na ERB, o sinal óptico detectado pelo

fotodetector é transmitido diretamente na faixa de micro-ondas, ou além, por uma antena [18] [19].

Figura 3.1 - Três maneiras de transporte de um sinal sobre uma fibra óptica.



Fonte – Elaborada pelo autor, baseado em [18].

Outra maneira de propagação do sinal sobre a fibra óptica é a transmissão do sinal em RF. Nesse caso, uma portadora óptica é modulada por um sinal elétrico em RF na estação central e transmitida até uma ERB. Na ERB, uma fotocorrente proporcional ao sinal óptico detectado pelo fotodetector é gerada. O sinal elétrico resultante do processo de fotodetecção é amplificado e então propagado por uma antena. O tamanho máximo do enlace óptico para esse tipo de transmissão é limitado devido à dispersão cromática da fibra [18] [19].

A transmissão em frequência intermediária (IF, *Intermediate Frequency*) se diferencia da transmissão em RF devido à frequência da portadora utilizada. Neste tipo de transmissão, o sinal de IF é convertido de óptico para elétrico na ERB e elevado para a faixa de micro-ondas antes de ser propagado por uma antena [18] [19]. Entretanto, o efeito da dispersão cromática nesse caso é menos significativo, permitindo assim, aumentar o tamanho do enlace óptico e, por meio de técnicas de modulação de subportadora, transmitir diversos serviços em um único canal [18] [19].

A técnica mais empregada no transporte de sinais de RF sobre fibras ópticas é a modulação de intensidade com detecção direta (IM-DD, *Intensity Modulation with Direct Detection*). Na IM-DD o sinal de RF modula diretamente, em intensidade, um díodo laser ou um modulador externo [17], convertendo tal sinal do domínio elétrico para o óptico. O sinal

óptico modulado é propagado pela fibra e convertido no receptor novamente para o domínio elétrico [16] [17] [18] [19].

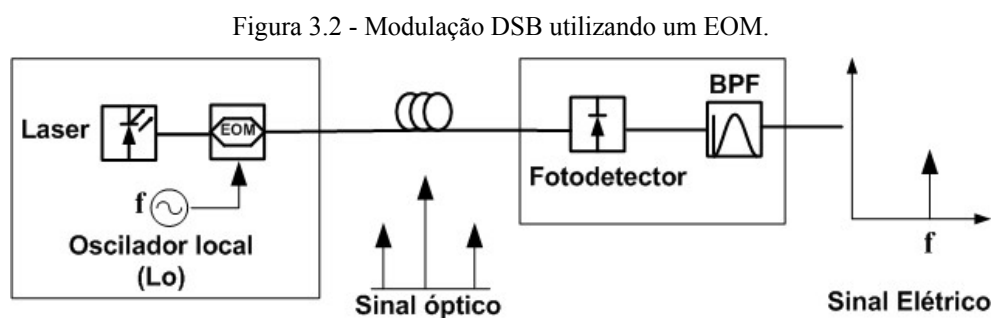
As altas frequências de transmissão propostas para a quinta geração de redes móveis faz com que seja benéfico trabalhar com o sistema no domínio óptico e não no elétrico, dado que os guias de ondas metálicos apresentam forte atenuação nessa faixa do espectro. Além disso, as fibras ópticas apresentam uma enorme largura de banda em comparação à apresentada pelos guias de onda metálicos. No entanto, na faixa de ondas milimétricas, os sistemas ópticos enfrentam grandes problemas com a dispersão cromática, uma vez que esta cresce proporcionalmente com a frequência. Desta maneira, a solução técnica adotada dependerá da distância de transmissão e da frequência da portadora [18].

Na banda W, ou além, para o transporte ROF é necessária uma fotodetecção de alta velocidade, bem como técnicas adequadas para a geração de ondas milimétricas [18], as quais serão descritas em detalhes nas próximas seções.

3.2 Geração fotônica de ondas milimétricas

3.2.1 Geração de sinal com banda lateral dupla

A geração de um sinal óptico de onda milimétrica é possível utilizando o esquema ilustrado na Figura 3.2 [18].



Fonte – Elaborada pelo autor, baseado em [18].

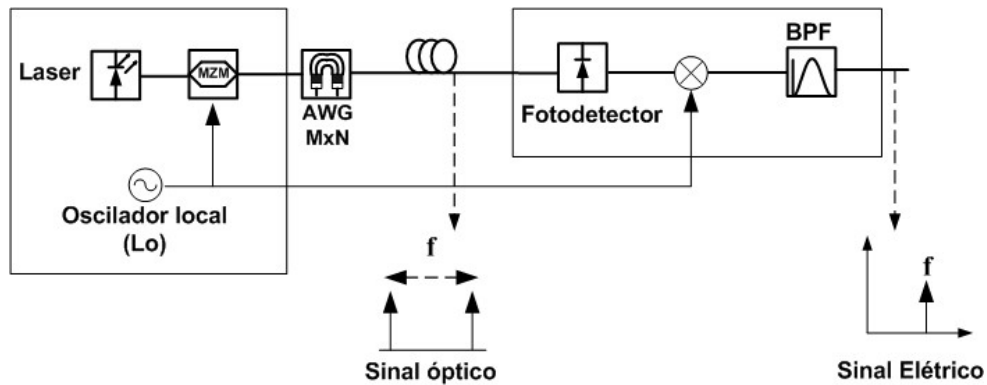
Nesta configuração, um oscilador local modula, em intensidade, uma portadora óptica por meio de um EOM [18] [19]. O sinal óptico modulado na saída do EOM apresentará uma frequência igual à da portadora e também uma banda lateral dupla (DSB, *Double SideBand*) correspondente ao sinal modulado. Após a propagação do sinal sobre a fibra óptica, um fotodetector com alta largura de banda, por meio de detecção direta, gera uma corrente elétrica proporcional à luz incidente, convertendo, assim, o sinal do domínio óptico

para o domínio elétrico [18]. Além disso, um filtro passa banda (BPF, *Band Pass Filter*) é utilizado para retirar ruídos do processo de fotodetecção. O sinal de RF resultante apresentará a mesma frequência inserida no oscilador local. O grande problema desse tipo de transmissão é o desperdício de potência causado pela transmissão da portadora [18].

3.2.2 Geração de sinal com banda lateral dupla e portadora suprimida

A geração de um sinal óptico de onda milimétrica com banda lateral dupla e portadora suprimida (DSB-SC, *Double Sideband Suppressed Carrier*) é semelhante ao processo descrito na seção 3.2.1. Porém, a partir da configuração de polarização do modulador Mach-Zehnder (MZM, *Mach-Zehnder Modulator*), torna-se possível suprimir a portadora óptica [25] [26] [27] [28]. Do ponto de vista da transmissão, esse recurso se mostra muito atrativo, posto que a variação de fase causada pela dispersão cromática entre os componentes principais não causará perda de potência do sinal detectado, mas apenas uma mudança de fase constante para o sinal detectado [18] [19]. Após o MZM, um pente de frequências harmônicas é criado, sendo possível, por meio de um conjunto de grades de guias de onda (AWG, *Arrayed Waveguide Grating*), selecionar uma determinada frequência para a propagação do sinal óptico de ondas milimétricas na fibra, conforme ilustrado pela Figura 3.3.

Figura 3.3 - Modulação DSB-SC utilizando um MZM.



Fonte – Elaborada pelo autor, baseado em [15] [29].

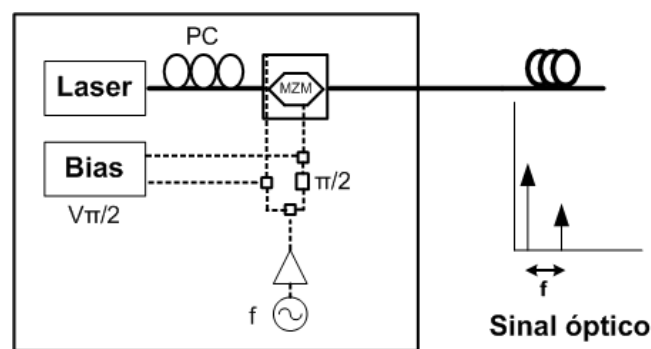
Devido à supressão da portadora na transmissão, no receptor, é necessário realizar uma demodulação síncrona [29]. Para isso, após o sinal óptico propagado ser convertido do domínio óptico para o domínio elétrico por um fotodetector com alta largura de banda, um oscilador local com a mesma frequência e mesma fase ao inserido no processo de modulação

é utilizado para demodular o sinal. A frequência após o BPF corresponderá à separação das bandas laterais do sinal óptico transmitido [18].

3.2.3 Geração de sinal com banda lateral única

A geração de um sinal óptico de banda lateral única (SSB, *Single Sideband*) na faixa de ondas milimétricas é possível adotando a configuração ilustrada na Figura 3.4. Para isso, um MZM de condução dupla [30] é alimentado com um sinal modulante com uma diferença de fase de $(\pi/2)$ entre seus braços, conseguindo, assim, uma saída óptica de SSB [18]. Outra forma de se conseguir uma modulação SSB é por meio da modulação DSB, em que um filtro de entalhe óptico como, por exemplo, uma grade de fibra de Bragg (FBG, *Fiber Bragg Grating*) é utilizado para retirar uma das bandas laterais [18].

Figura 3.4 - Modulação SSB utilizando um MZM.



Fonte – Elaborada pelo autor, baseado em [18].

O desvanecimento do sinal causado pela dispersão cromática na transmissão DSB, pode ser superado utilizando a técnica de modulação SSB. Porém, a modulação SSB possui uma baixa eficiência de modulação, resultando em um sinal fracamente modulado sobre a portadora óptica, além de demandar uma grande largura de banda do modulador (na casa de ondas milimétricas) [18].

3.2.4 Geração de frequências harmônicas

Existem diversas técnicas para a geração de um sinal fotônico e, em sua grande maioria, um oscilador elétrico é utilizado para fornecer a frequência fundamental [18]. Uma alternativa proposta para a geração de ondas milimétricas é a utilização das frequências harmônicas [18]. As frequências harmônicas podem ser obtidas, por exemplo, utilizando um

modulador MZM, um modulador de fase ou ainda se beneficiando dos efeitos não lineares das fibras ópticas como a mistura de quatro ondas (FWM) [18].

Devido à função de transferência não linear do MZM, dependendo da amplitude e da polarização da modulação, frequências harmônicas podem ser geradas. Essa técnica pode ser adotada para conseguir frequências superiores à largura de banda do modulador. Tal fato pode diminuir os requisitos de largura de banda do sistema, que habitualmente é sinônimo de alto custo [18] [19].

3.2.5 Geração heteródina

Ao incidir em um fotodetector com polarização comum duas ondas de luz separadas por uma determinada frequência, a fotocorrente resultante apresentará uma modulação com frequência igual à separação das duas ondas ópticas. Tal fato se deve à fotocorrente ser proporcional à potência óptica e ao quadrado do campo óptico [18]. Essa técnica de geração apresenta uma profundidade de modulação completa para os casos em que as fontes de luz exibem amplitudes iguais, não cria harmônicas, e é tolerante a dispersão. Representando, assim, uma vantagem em comparação com as técnicas que utilizam moduladores [18]. Por outro lado, a relativa estabilidade entre os lasers representam uma desvantagem [18].

3.2.6 Oscilador optoeletrônico

As técnicas de geração de sinais mencionadas até aqui são fundamentadas em um sinal eletricamente sintetizado. Entretanto, é possível gerar um sinal de onda milimétrica utilizando um oscilador optoeletrônico (OEO, *Opto-Electronic Oscillator*), o qual possui em uma de suas saídas um sinal elétrico e na outra um sinal óptico [18].

O princípio de funcionamento de um OEO é ilustrado na Figura 3.5. Nessa representação, um laser é inserido em um MZM e transmitido pela fibra [18]. Após a fotodetecção, o sinal é amplificado eletricamente e tem sua frequência fundamental filtrada, antes de ser conectada a porta elétrica do MZM [18].

$$I(t) = (E_1 \cos(\omega_1 t + \phi_1) + E_2 \cos(\omega_2 t + \phi_2))^2 \quad (3.3)$$

$$I(t) = E_1^2 \frac{1}{2} (1 + \cos(2\omega_1 t + 2\phi_1)) + E_2^2 \frac{1}{2} (1 + \cos(2\omega_2 t + 2\phi_2)) + \\ + E_1 E_2 [\cos((\omega_1 + \omega_2)t + \phi_1 + \phi_2) + \cos((\omega_1 - \omega_2)t + \phi_1 - \phi_2)] \quad (3.4)$$

Conforme expresso pela Equação 3.4, a saída do fotodetector apresenta componentes de alta frequência ($2\omega_1, 2\omega_2$ e $(\omega_1 + \omega_2)$) e também componentes de baixa frequência ($\omega_1 - \omega_2$) [31]. O fotodetector é incapaz de produzir em sua saída um sinal elétrico correspondente a essas altas frequências, e com isso os componentes de alta frequência são filtrados [31]. Em virtude desta operação não linear, a frequência detectada na saída do fotodetector corresponde a $\omega_{RF} = (\omega_1 - \omega_2)$ e pode ser descrita pela Equação 3.5 [31]

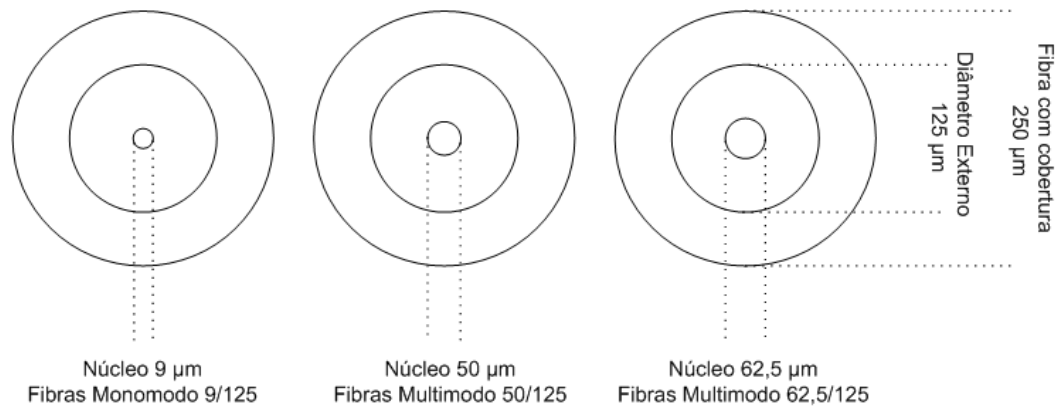
$$I_{HET}(t) = E_1 E_2 \cos(\omega_{RF} t + \phi_1 - \phi_2) \quad (3.5)$$

Para os casos em que o campo $E_1(t)$ ou $E_2(t)$ é modulado, a informação pode ser detectada colocando um demodulador após o fotodetector [31].

3.4 Classificação das fibras ópticas

As fibras ópticas são classificadas de acordo com o diâmetro do seu núcleo, como sendo monomodo e multimodo. As fibras monomodo possuem um diâmetro em torno de 8 μm ou 9 μm , capaz de transportar apenas um único feixe de luz, isto é, um modo de propagação [32]. Por outro lado, as fibras multimodo são encontradas comercialmente com diâmetros de 50 μm ou 62,5 μm , e tem como principal característica a capacidade de propagação de vários feixes de luz, ou seja, diversos modos de propagação [32]. As fibras ópticas monomodo e multimodo tem como padrão um diâmetro externo de 125 μm e contam com uma proteção plástica adicional que envolve o vidro com um diâmetro de 250 μm , conforme apresentado na Figura 3.6 [32].

Figura 3.6 - Tipos de fibras ópticas.



Fonte – Elaborada pelo autor, baseado em [32].

A escolha do tipo de fibra óptica a ser adotada em uma arquitetura deve levar em consideração duas características importantes das fibras: a atenuação e a dispersão [32]. A atenuação, expressa em dB/km, é ocasionada por possíveis emendas existentes na fibra ou ainda pelo seu próprio material, sendo responsável pela perda de intensidade da luz de acordo com a distância de propagação [32]. Já a dispersão, expressa em ps/nm.km, é responsável pelo espalhamento da luz por toda extensão da fibra em virtude da existência de múltiplos comprimentos de onda no feixe de luz [32].

3.5 Vantagens e limitações do sistema ROF

Devido à utilização da fibra óptica na transmissão, as vantagens e limitações do sistema ROF estão ligadas às características dos sistemas ópticos. Dentre as vantagens se destacam: (1) baixa atenuação do sinal propagado, na casa de 0,2 dB/km para sinais na faixa de 1550 nm; (2) Elevada largura de banda, provida graças às altas frequências das portadoras utilizadas no processo de transmissão [19]; (3) Imunidade ao ruído elétrico, dado que o sistema óptico trabalha com a propagação da luz [16] [17] [19] [33]. Além disso, na transmissão de sinais na faixa de ondas milimétricas, o sistema ROF apresenta grande vantagem em comparação aos guias de ondas metálicos, posto que a potência necessária no processo é reduzida consideravelmente e torna-se possível alcançar distâncias maiores [19] [33].

Na geração fotônica de ondas milimétricas, a utilização de moduladores ópticos externos, como o MZM ou moduladores de eletro-absorção (EAM, *Electro-Absorption Modulator*), tem como vantagem uma maior largura de banda disponível. Para a geração de

frequências na banda W, ou além, os moduladores EAMs se mostram promissores, uma vez que a largura de banda estimada [34] para esses foi de 95 GHz, mostrando potencial de crescimento [18].

Utilizando o sistema ROF é possível a transmissão de sinais de diferentes serviços em uma mesma ligação, possibilitando assim uma operação flexível [17]. Além disso, os sistemas ROF são capazes de transmitir sinais digitais. Porém, por se tratar de um sistema fundamentalmente analógico é importante cuidar da distorção e do ruído típico desses sistemas, dado que esses fatores podem limitar a capacidade de transmissão óptica [17].

Dentre as limitações de um sistema ROF estão: o ruído de fase do laser, o ruído do fotodíodo, o efeito linear da dispersão cromática e os efeitos não lineares da automodulação de fase (SPM), mistura de quatro ondas (FWM), dentre outros [16] [17] [33].

Em uma fibra óptica dispersiva, uma desvantagem clara da modulação que gera bandas laterais duplas é o grande efeito da dispersão cromática, podendo esta ser controlada com a utilização de uma fibra compensadora de dispersão (DCF, *Dispersion Compensating Fiber*), ou ainda, com a utilização de uma rede de Bragg, as quais capazes de cancelar a dispersão para uma distância específica [18].

A utilização do sistema ROF no *backhaul* das futuras redes móveis de quinta geração é bastante atrativa, visto que o sistema conta com as altas taxas e a robustez dos sistemas ópticos. Além disso, como todo o processamento de dados será feito na estação central, as ERBs se tornaram consideravelmente mais simples, fornecendo assim uma altíssima qualidade de serviço (QoS, *Quality of Service*) e confiabilidade [16] [17]. Diante desses fatos, o sistema ROF é proposto para o *backhaul* da quinta geração de redes móveis. No próximo capítulo, será descrito um recurso fundamental para maximizar a capacidade de transmissão dos sistemas ROF: a multiplexação por divisão de frequências ortogonais (OFDM).

CAPÍTULO 4

MULTIPLEXAÇÃO POR DIVISÃO DE FREQUÊNCIAS ORTOGONAIS

A constante evolução das redes de telecomunicações tem, nos últimos anos, presenciado a substituição dos guias de ondas metálicos por fibras ópticas nos sistemas de transmissão. As fibras ópticas são capazes de fornecer um sistema robusto no que desrespeito a segurança, além de entregar elevadas taxas de tráfego de dados [35] [36]. No entanto, com o crescente aumento na demanda por taxas de transmissão cada vez mais altas, se faz necessário encontrar uma alternativa para melhorar a eficiência espectral dos sistemas de comunicações ópticas [35] [36] [37]. Dito isso, a utilização da modulação OFDM é uma solução atrativa para tal problema, dado que a mesma, por meio da sobreposição espectral das subportadoras transmitidas, aumenta a capacidade de transmissão nas fibras ópticas [35] [36] [37].

4.1 Desenvolvimento do OFDM

No ano de 1966, Robert W. Chang apresentou ao mundo a técnica de multiplexação por divisão de frequências ortogonais, o OFDM [35] [36]. Três anos mais tarde, em 1969, a transformada inversa de Fourier (IFFT, *Inverse fast Fourier Transform*) foi apresentada como solução para aumentar a velocidade de processamento dos sinais [35] [36] [38].

Bell Labs patenteou a técnica OFDM em 1970 [35] [36]. No entanto, a utilização da técnica OFDM em sistemas de múltiplas entradas e múltiplas saídas (MIMO, *Multiple Input Multiple Output*) foi apresentada somente no ano de 1995, nas publicações de Telatar e Foschini [35] [36] [39] [40].

4.2 O OFDM

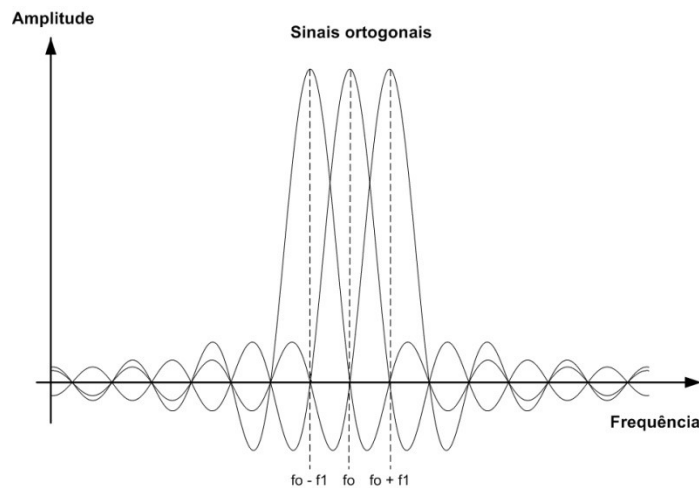
A aplicação da técnica OFDM em sistemas de comunicações ópticas foi apresentada como solução para aumentar a eficiência espectral das redes e começou a ser estudada a partir do ano de 2005 [35] [36]. Essa capacidade se deve ao fato de que em um sistema OFDM a informação de um sinal a ser enviada é dividida em N subportadoras ortogonais.

A ortogonalidade entre as subportadoras é fundamental para que o sistema OFDM funcione corretamente sem perdas de informações, uma vez que é realizada uma sobreposição espectral das N subportadoras no processo de transmissão [35] [36]. A taxa de dados enviada é distribuída entre as subportadoras, fazendo com que cada uma trabalhe a uma taxa mais baixa, diminuindo o efeito de interferência intersimbólica (ISI, *Intersymbol Interference*) [35] [36] [41].

A Equação 4.1 configura a condição necessária para que cada subportadora seja modulada ortogonalmente como apresentado na Figura 4.1 [41]

$$\int_0^T \cos(2\pi f_k t) (\cos 2\pi f_{j \neq k} t) dt = 0 \text{ para todo } j, k, j \neq k \quad (4.1)$$

Figura 4.1 - Subportadoras OFDM no domínio da frequência.



Fonte – Elaborada pelo autor, baseado em [35].

A largura de banda total do canal (W) é dividida em (K) slots. Para cada subportadora é atribuído uma frequência específica (f_k) com uma taxa de símbolos (r) dada por [41]

$$\Delta f = f_{k+1} - f_k \quad (4.2)$$

$$f_k = k \left(\frac{W}{K} \right) \quad (4.3)$$

$$r = \frac{1}{T} = \Delta f \quad (4.4)$$

no qual, T é a duração do símbolo de modo que as subportadoras moduladas sejam mutuamente ortogonais.

A eficiência espectral (J) obtida devido ao uso do OFDM é definida como sendo [41]

$$J = \frac{Rb}{W} \quad (4.5)$$

no qual, Rb é a taxa de bit.

No domínio do tempo a multiplexação e a demultiplexação de um sinal OFDM, respectivamente, é representada pelas Equações 4.6 e 4.7 [35]

$$s(t) = \sum_{i=-\infty}^{+\infty} \sum_{k=1}^{N_{sc}} c_{ki} s_k(t - iTs) \quad (4.6)$$

$$c'_{ki} = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} r(t - iTs) s_k^* dt = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} r(t - iTs) e^{-j2\pi f_k t} dt \quad (4.7)$$

no qual, c_{ki} é o i -ésimo símbolo da subportadora k , s_k é a forma de onda para a k -ésima subportadora, N_{sc} é o número de subportadoras e T_s é o período do símbolo.

4.3 Transformada discreta de Fourier

Nos primeiros sistemas OFDM, o processo de multiplexação das subportadoras era muito complexo devido à utilização de inúmeros filtros e osciladores locais, tanto no transmissor, quanto no receptor [35]. Porém, com o passar do tempo, estudos realizados por Weinstein e Ebert [42], mostraram ao mundo que a complexidade de processamento dos sistemas OFDM poderia ser reduzida migrando o sistema analógico para digital [35]. Com isso, a transformada inversa discreta de Fourier (IDFT, *Inverse Discrete Fourier Transform*) e a transformada discreta de Fourier (DFT, *Discrete Fourier Transform*), poderiam ser usadas, respectivamente, para os processos de multiplexação e demultiplexação de um sistema OFDM [35].

Modificando as Equações 4.6 e 4.7, é possível analisar apenas o símbolo de índice (m) de uma amostra $s(t)$, de acordo com a Equação 4.8 [35] [41]

$$s_m = \sum_{k=1}^N c_k e^{j2\pi f_k \frac{(m-1)T_s}{N}} \quad (4.8)$$

em que: $f_k = \frac{k-1}{T_s}$ (4.9)

Então, substituindo a Equação 4.9 na Equação 4.8 temos [35] [41]:

$$s_m = \sum_{k=1}^N c_k e^{j2\pi f_k \frac{(m-1)T_s}{N}} = \sum_{k=1}^N c_k e^{j2\pi \frac{(k-1)(m-1)}{N}} = \mathfrak{F}^{-1}\{c_k\} \quad (4.10)$$

em que, $\mathfrak{F}^{-1}$ é a transformada da inversa de Fourier e $m \in [1, N]$.

Sendo assim, no processo de recuperação do sinal transmitido, a demultiplexação pode ser realizada de acordo com a DFT como mostrado pela Equação 4.11 [35] [41]

$$c'_k = \mathfrak{F}\{rm\} \quad (4.11)$$

no qual, rm é a amostra recebida em cada intervalo de tempo $\frac{T_s}{N}$ [35] [37] [41].

4.4 Filtro cosseno levantado - (RCF, *Raised Cosine Filter*)

A utilização do filtro cosseno levantado (RCF) no domínio elétrico é uma alternativa para combater a ISI, dado que, fisicamente, é impossível implementar um filtro passa baixa (LPF, *Low Pass Filter*) ideal. [35] [36]. O RCF é inserido logo após o componente OFDM e utiliza-se da inserção de zeros uniformemente espaçados no tempo, para atender ao requisito da resposta ao impulso [35]. Com isso, é possível ajustar o grau de suavidade da resposta em frequência do filtro, conhecido como fator de *roll-off* (β), fazendo com que os seus lóbulos laterais sejam atenuados rapidamente, diminuindo a ISI.

A Equação 4.12 representa a resposta em frequência do RCF [35] [43]

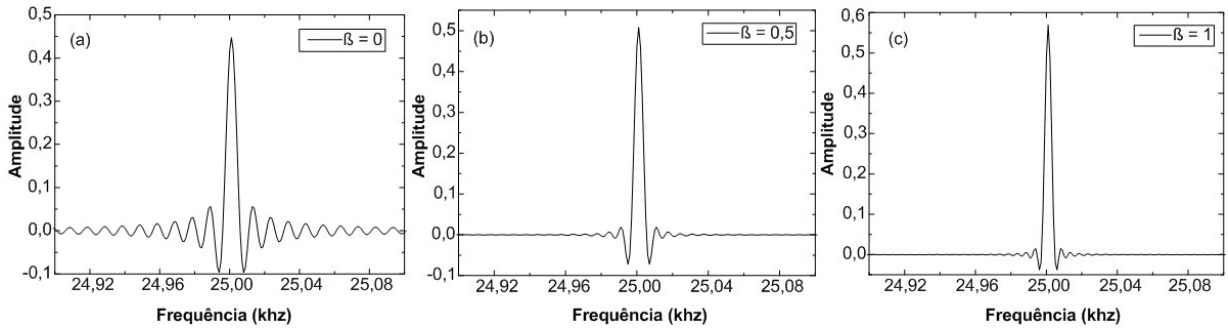
$$P(f) = \begin{cases} \frac{1}{2W}, 0 \leq |f| < f_1 \\ \frac{1}{4W} \left\{ 1 - \sin \left[\frac{\pi(|f| - W)}{2W - 2f_1} \right] \right\}, f_1 \leq |f| < 2W - f_1 \\ 0, |f| \geq 2W - f_1 \end{cases} \quad (4.12)$$

O fator de *roll-off* (β) de um RCF é definido como sendo [35] [43]

$$\beta = 1 - \frac{f1}{W} \quad (4.13)$$

Conforme apresentado na Figura 4.2, o decaimento dos lóbulos laterais varia de acordo com β , quanto maior for essa atenuação, menos sensível será o sinal a ISI [35].

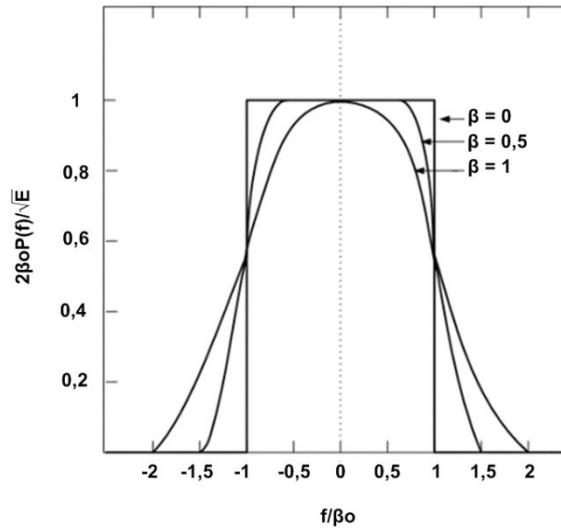
Figura 4.2 - Resposta impulsiva do RCF para diferentes valores de β .



Fonte – Elaborada pelo autor, baseado em [35].

A resposta espectral para diferentes β é apresentada pela Figura 4.3.

Figura 4.3 - Espectro do RCF para diferentes valores de β .



Fonte – Elaborada pelo autor, baseado em [35].

4.5 Tons Piloto

A principal desvantagem OFDM é o efeito de deslocamento da frequência da portadora (CFO, *Carrier Frequency offset*) gerado pelo oscilador local ou pelo deslocamento *Doppler*. O CFO quebra a ortogonalidade entre as subportadora e, portanto, degrada o desempenho geral do sistema [44].

Em [45], Classen propôs que tons piloto podem ser inseridos no domínio da frequência e propagados em cada símbolo OFDM para o rastreamento do CFO [44] [46]. Para evitar problemas em canais com desvanecimento seletivo de frequência, é recomendável distribuir todos os elementos da sequência de treinamento uniformemente por todo domínio da frequência [45].

Em uma sincronização de dois estágios, existem dois modos de operação dentro do processo de estimação do CFO: modo de aquisição e o modo de rastreamento. No modo de aquisição, uma estimativa grosseira da frequência é gerada. Já no modo de rastreamento, com a ajuda da estimativa gerada no modo de aquisição, apenas pequenas variações de frequência são tratadas. A estimação do CFO é obtida de acordo com a diferença de fase entre dois tons piloto consecutivos [46]. Esse processo de sincronização em dois estágios permite uma grande liberdade no projeto da estrutura de sincronização completa, visto que cada estágio trabalha com uma tarefa específica [44] [45] [46].

O receptor interpola o canal com as informações fornecidas pelos tons piloto para obter uma referência de amplitude e fase na detecção [46].

4.6 Vantagens e limitações OFDM

Dentre as vantagens da utilização dos sistemas de transmissão OFDM, destacam-se a possibilidade de utilização do prefixo cíclico (CP, *Cyclic Prefix*) e da equalização adaptativa contra a degradação da resposta impulsiva do canal [35].

O prefixo cíclico é realizado no domínio do tempo e tem como principal função a diminuição da ISI. Para isso, um fragmento da parte final de um símbolo OFDM é copiado em seu início [35]. Já a equalização adaptativa ocorre no domínio da frequência e pode ser realizada de duas maneiras: supervisionada, na qual uma sequência previamente conhecida pelo receptor é enviada servindo como aprendizagem para o receptor [35], ou autodidata, em que são utilizados algoritmos no receptor que permanecem em constante aprendizagem [35].

Ao utilizar a multiplexação por divisão de frequências ortogonais, torna-se possível controlar o deslocamento de fase nos símbolos, por meio da técnica de equalização adaptativa, inserindo subportadoras pilotos no sistema [35] [36] [37]. Além disso, a técnica OFDM abre a possibilidade de adaptação na taxa de dados enviada pelo transmissor, ou seja, caso ocorra uma diminuição do desempenho do sistema em virtude do aumento da demanda

por dados em cada subportadora, o sistema pode, automaticamente, adicionar códigos corretores de erros e diminuir a taxa de dados para cada subportadora [35] [36] [37] [47].

Em contrapartida, dentre as limitações do sistema OFDM se destacam a sensibilidade aos ruídos de fase do laser e do oscilador local, que podem degradar sensivelmente à recepção e rotacionar as constelações do sinal [35] [36] [48].

Neste capítulo foi apresentada a técnica de multiplexação por divisão de frequências ortogonais, vista como recurso fundamental para a construção de uma rede de acesso de alta capacidade. No próximo capítulo é apresentado o cenário proposto para esse trabalho, no qual, por meio de simulações, é analisada qual fibra óptica apresenta melhor desempenho para a transmissão de uma onda milimétrica, na faixa de 90 GHz, em um sistema ROF empregando a técnica OFDM.

CAPÍTULO 5

SIMULAÇÕES E RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os cenários, simulações e seus resultados para a análise da propagação de ondas milimétricas, a 90 GHz, em um sistema ROF empregando diferentes tipos de fibras ópticas. Inicialmente serão apresentadas as características deste sistema por meio da transmissão *back-to-back*. Em seguida, são apresentados os resultados das simulações realizadas para análise do efeito linear da dispersão cromática. E por fim, são analisados os efeitos não lineares da automodulação de fase (SPM) e da mistura de quatro ondas (FWM).

5.1 Simulações

5.1.1 Descrição do cenário

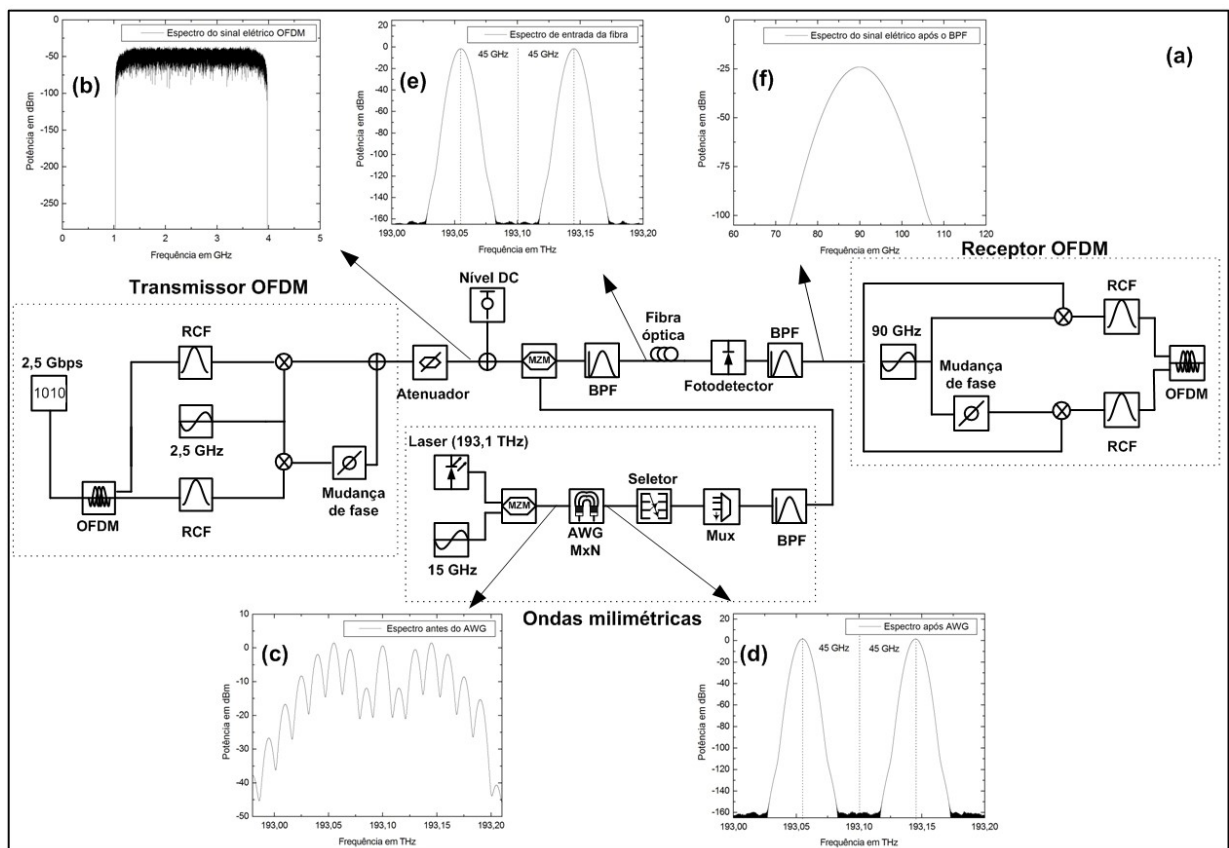
O *software VPI transmission maker* conta com uma interface gráfica robusta e oferece ao usuário a possibilidade de realizar uma modelagem de alta qualidade para qualquer sistema de transmissão óptica. Por isso, no *software VPI* utilizando o cenário ilustrado pela Figura 5.1 (a) [15], foi possível analisar a viabilidade do *backhaul* proposto para as redes móveis de quinta geração.

O transmissor OFDM conta com um bloco de dados responsável por gerar uma sequência binária a 2,5 Gbps com a informação a ser transmitida. Essa informação passa por um codificador OFDM responsável por converter a informação serial provida pelo gerador em paralela, realizar o mapeamento em constelações QAM de tal informação em dezesseis subportadoras, realizar a transformada inversa de Fourier, e, por fim, converter a informação digital em analógica [15]. O sinal analógico alimentará por sua vez um modulador IQ, o qual apresenta um oscilador local centrado em 2,5 GHz responsável pela conversão do sinal transmitido para alta frequência. A Figura 5.1 (b) ilustra o espectro na saída do transmissor.

Na parte inferior da Figura 5.1 (a) é possível verificar a geração das ondas milimétricas, em 90 GHz, por meio de um MZM. Em um dos braços do MZM é inserido uma portadora óptica, gerada por um laser na frequência de 193,1 THz e com uma potência de 11,8 dBm. Já no segundo braço do modulador está conectado um oscilador local na frequência de 15 GHz, que é usado como sinal modulante. O resultado do processo de modulação é a

geração de um sinal modulado em intensidade e suas harmônicas, como pode ser visto na Figura 5.1 (c). Por meio de um filtro AWG, a terceira harmônica na frequência de 45 GHz, é selecionada. Dessa forma, o espectro do sinal após o AWG, ilustrado na Figura 5.1 (d), apresenta uma banda lateral superior na frequência de 193,145 THz e uma banda lateral inferior na frequência de 193,055 THz. O sinal de onda milimétrica na frequência de 90 GHz é obtido devido à separação das bandas laterais. Feito isso, o sinal é filtrado por um BPF para retirada de ruído gerado no processo de modulação.

Figura 5.1 - Esquema proposto para a transmissão de uma onda milimétrica a 90 GHz em um sistema ROF.



Fonte – Elaborada pelo autor, baseado em [15].

O sinal elétrico OFDM e o sinal óptico de ondas milimétricas a 90 GHz são inseridos em um segundo MZM. O sinal OFDM modula, por meio do MZM, em intensidade, o sinal de ondas milimétricas a 90 GHz, criando um sinal RoRoF [15]. O sinal óptico na saída do modulador passa por um BPF e é propagado pela fibra óptica, como ilustrado na Figura 5.1 (e). Após a propagação pela fibra o sinal é convertido do domínio óptico para o domínio elétrico por um fotodetector com alta largura de banda, e em seguida o sinal elétrico é filtrado

por um BPF. Conforme ilustrado pela Figura 5.1 (f), o sinal elétrico apresenta uma frequência igual à separação das bandas laterais ópticas transmitidas, ou seja, 90 GHz.

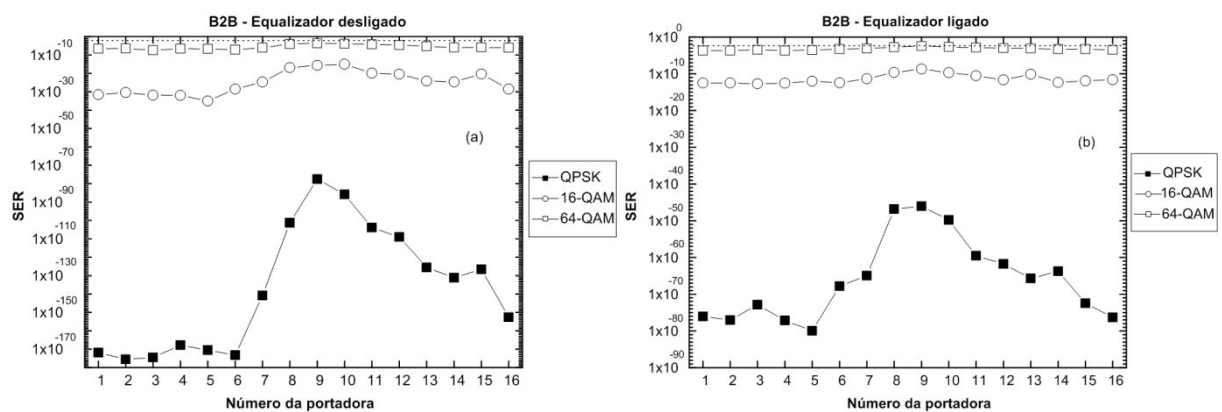
No receptor OFDM é necessário utilizar um demodulador síncrono devido à supressão da portadora no processo de transmissão. Para isso, um oscilador local na frequência de 90 GHz e com mesma fase é utilizado para detecção do sinal OFDM transmitido. O sinal elétrico gerado no processo de fotodetecção é misturado em duas partes, sendo a parte real multiplicada diretamente pelo oscilador local e a parte imaginária multiplicada pelo oscilador local defasado de noventa graus. Após isso, os sinais passam por um RCF para retirada de ruídos e modelagem dos pulsos. As partes real e imaginária são inseridas em um decodificador OFDM convertendo, o sinal analógico para digital, recuperando assim a informação transmitida.

5.2 Resultados

5.2.1 Back to Back (B2B)

Para análise do desempenho das modulações QPSK, 16-QAM e 64-QAM em cada uma das dezesseis subportadoras OFDM, criou-se um cenário *back-to-back* retirando a fibra óptica da configuração ilustrada pela Figura 5.1 (a). As Figuras 5.2 (a) e (b) ilustram, respectivamente, o desempenho das modulações QPSK, 16-QAM e 64-QAM sem equalização e com equalização.

Figura 5.2 - Desempenho das modulações QPSK, 16-QAM e 64-QAM em um cenário B2B.



Fonte – Elaborada pelo autor.

A Figura 5.2 (a) ilustra uma piora na taxa de erro de símbolo (SER, *Symbol Error Rate*) da décima portadora, devido a maior interferência causada pelos lóbulos laterais das

subportadoras transmitidas nas subportadoras centrais, conforme apresentado no quarto capítulo desse trabalho pela Figura 4.1. Por isso, a taxa de erro de símbolos das modulações utilizadas nas subportadoras centrais será maior. Na Figura 5.2 (b), foi realizada a equalização do sistema inserindo tons piloto no processo de transmissão. Dessa forma, foi possível notar que houve uma melhora quanto à distribuição da SER em cada subportadora. Por outro lado, a inserção dos tons piloto no processo de transmissão modifica o padrão das interferências entre as subportadoras, causando um aumento geral da SER do sistema. Assim, a inserção de tons piloto no processo de transmissão requer uma relação de compromisso entre equalização das subportadoras e SER. Vale ressaltar que, na prática, valores de SER abaixo de 10^{-20} são considerados zero.

Os resultados apresentados nas Figuras 5.2 (a) e (b) comprovam que a SER das modulações empregues em cada subportadora aumenta à medida que aumentamos o número de bits por símbolo transportado em cada modulação. Porém, ao empregar um número maior de bits no processo de modulação é possível aumentar a taxa de transmissão do sistema. Com isso, as taxas de transmissão alcançadas pelo sistema ilustrado pela Figura 5.1 (a), utilizando as modulações QPSK, 16-QAM e 64-QAM, foram, respectivamente, 80 Gbps, 160 Gbps e 240 Gbps.

Mesmo com um desempenho inferior ao das modulações QPSK e 16-QAM, a modulação 64-QAM ainda permite uma transmissão eficaz com uma SER de 10^{-2} , ou seja, no limite da capacidade de correção antecipada de erros (FEC, *Forward Error Correction*) [49].

5.2.2 Análise da dispersão cromática nas fibras ópticas

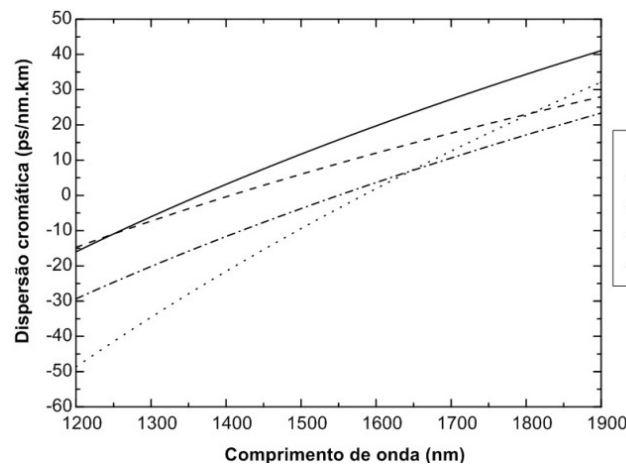
A diferença de velocidade na propagação entre os componentes espectrais do modo fundamental, também conhecida como dispersão cromática [50], é um dos fatores limitantes na transmissão óptica. A dispersão cromática da fibra óptica causará alargamento temporal dos pulsos transmitidos [50] fazendo com que ocorra ISI e consequentemente erros na recepção da informação transmitida.

No mercado atual, existem vários modelos de fibras ópticas, com diferentes características. Nesse contexto, é necessária a realização de um estudo sobre os efeitos da dispersão cromática nas fibras ópticas para determinar qual fibra óptica apresentará melhor desempenho em um sistema ROF. Dito isso, será analisado o desempenho de quatro tipos de

fibras ópticas monomodo, sendo elas: a fibra óptica padrão, descrita pela recomendação (G.652) [51]. A fibra óptica de dispersão deslocada (DS), descrita pela recomendação (G.653) [52]. Assim como a fibra óptica anômala (G.655+) e a fibra óptica normal (G.655-), descritas pela recomendação (G.655) [53].

Os valores de dispersão cromática, na faixa de 1550 nm, para cada fibra óptica utilizada nas simulações foram retirados de acordo com a Figura 5.3.

Figura 5.3 - Curvas de dispersão.



Fonte – Elaborada pelo autor.

A Tabela 5.1 apresenta os dados das fibras ópticas que foram utilizadas nas simulações deste trabalho.

Tabela 5.1 - Dados das fibras ópticas utilizados para as simulações.

Fibra óptica	Área efetiva (μm^2)	Comprimento de onda (nm)	Dispersão cromática (ps/nm.km)	Inclinação da dispersão (ps/nm ² .km)	Atenuação (dB/km)
Padrão	80	1550	15,98	0,8	0,25
DS	50	1550	0,19	0,08	0,2
Anômala	75	1550	9,21	0,059	0,2
Normal	75	1550	-3,36	0,113	0,2

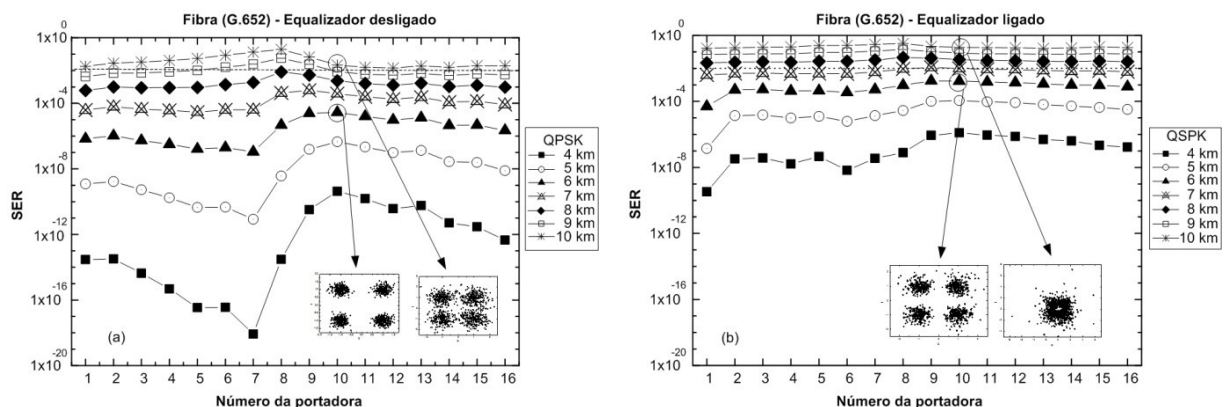
A dispersão cromática nas fibras ópticas limita o comprimento máximo de um enlace óptico e aumenta a SER em cada subportadora OFDM. Por isso, a análise do efeito da dispersão cromática nas fibras ópticas terá como parâmetros fundamentais o tamanho máximo do enlace óptico e a SER em cada subportadora. O tamanho máximo do enlace será determinado de acordo com a capacidade de FEC [49], ou seja de 10^{-2} , dado que para comprimentos superiores uma QoS não pode ser garantida.

5.2.2.1. Fibra óptica padrão

Em um primeiro momento, empregando a fibra óptica padrão na configuração ilustrada pela Figura 5.1 (a) e variando o seu comprimento, foi possível investigar por meio de simulações, o efeito da dispersão cromática em função do comprimento da fibra, determinando assim, o tamanho máximo do enlace óptico para um sistema ROF empregando as modulações QPSK, 16-QAM e 64-QAM.

Utilizando a modulação QPSK no processo de transmissão, em um sistema sem equalização, Figura 5.4 (a), o tamanho máximo do enlace de fibra óptica padrão foi de 8 km. Por outro lado, equalizando o sistema, Figura 5.4 (b), o tamanho máximo do enlace cai para 7 km. A redução do tamanho máximo do enlace para um sistema equalizado é considerada pequena, visto que equalizando o sistema é possível melhorar a QoS. As constelações ilustradas nas Figuras 5.4 (a) e (b), da décima portadora, em 10 km, comprovam que para valores acima da capacidade de FEC, ocorrerá perda da informação transmitida.

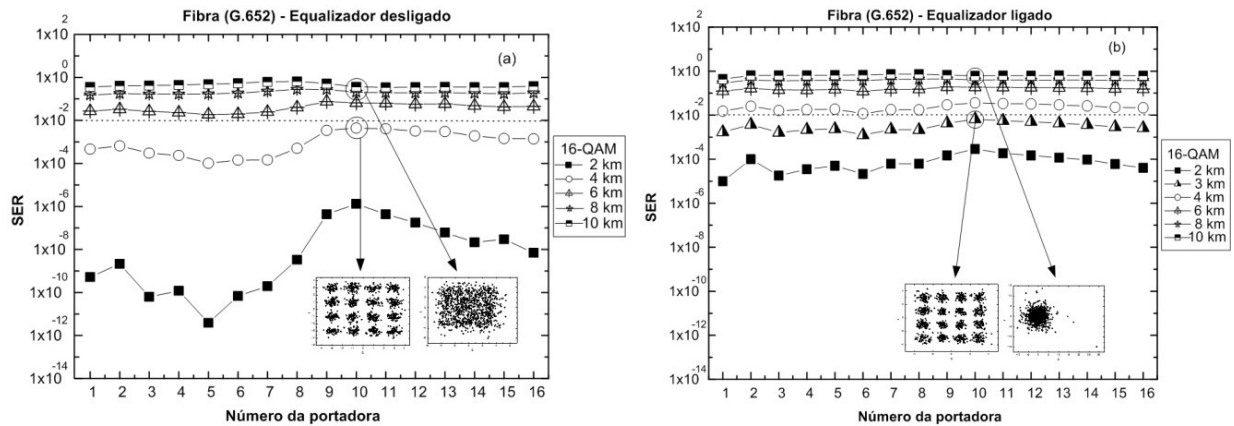
Figura 5.4 - Propagação de uma onda milimétrica a 90 GHz na fibra (G.652) usando modulação QPSK.



Fonte – Elaborada pelo autor.

Empregando a modulação 16-QAM no processo de transmissão sem equalização, conforme ilustrado na Figura 5.5 (a), o tamanho máximo do enlace de fibra óptica padrão deve ser de 4 km. Entretanto, com o equalizador ligado, Figura 5.5 (b), o tamanho máximo do enlace passa a ser de 3 km. As constelações ilustradas nas Figuras 5.5 (a) e (b) demonstram que para uma SER acima da capacidade de FEC, haverá perda da informação transmitida. Tal fato se deve a dificuldade de interpretação do receptor no processo de detecção de um símbolo transmitido.

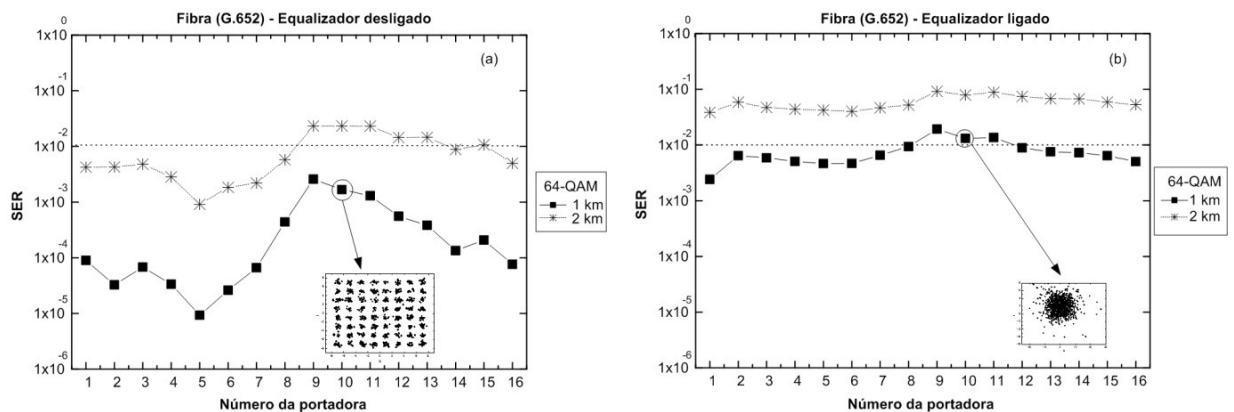
Figura 5.5 - Propagação de uma onda milimétrica a 90 GHz na fibra (G.652) usando modulação 16-QAM.



Fonte – Elaborada pelo autor.

Por fim, aplicando a modulação 64-QAM, o tamanho máximo do enlace de fibra óptica padrão deve ser de 1 km para um sistema sem equalização. Porém, com o equalizador ligado, a SER em 1 km supera o limite máximo da capacidade de FEC [49]. A constelação da décima portadora, ilustrada pela Figura 5.6 (b), comprova a perda da informação transmitida. Tal fato era esperado, visto que devido ao número de bits empregue nesse tipo de modulação o sistema já operava no limite da capacidade de FEC e o efeito linear da dispersão cromática aumenta a SER do sistema, fazendo com que os símbolos sejam recebidos fora da sua região de decisão.

Figura 5.6 - Propagação de uma onda milimétrica a 90 GHz na fibra (G.652) usando modulação 64-QAM.



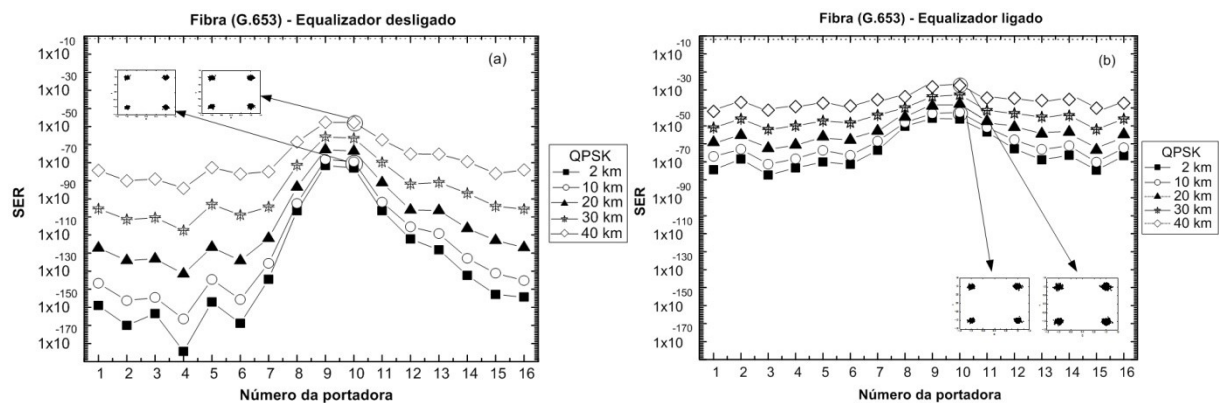
Fonte – Elaborada pelo autor.

5.2.2.2. Fibra óptica de dispersão deslocada

A fibra óptica de dispersão deslocada tem como principal característica possuir uma dispersão cromática aproximadamente nula na região de 1550 nm, permitindo, assim, que uma alta taxa de dados seja enviada em um único canal.

As Figuras 5.7 (a) e (b) apresentam os resultados obtidos na propagação de uma onda milimétrica a 90 GHz em um sistema ROF utilizando a modulação QPSK. Na Figura 5.7 (a) sem o recurso da equalização, foi possível verificar que o sistema é capaz de operar em um enlace de fibra óptica DS de 40 km com uma SER de 10^{-45} , ou seja, muito abaixo da capacidade de FEC estipulado em [49]. Equalizando o sistema, Figura 5.7 (b), em 40 km o sistema apresentou uma SER de 10^{-30} , ainda bem abaixo da capacidade de FEC [49]. As constelações da décima portadora ilustradas nas Figuras 5.7 (a) e (b) demonstram a qualidade de transmissão empregando a modulação QPSK em um sistema ROF utilizando a fibra DS.

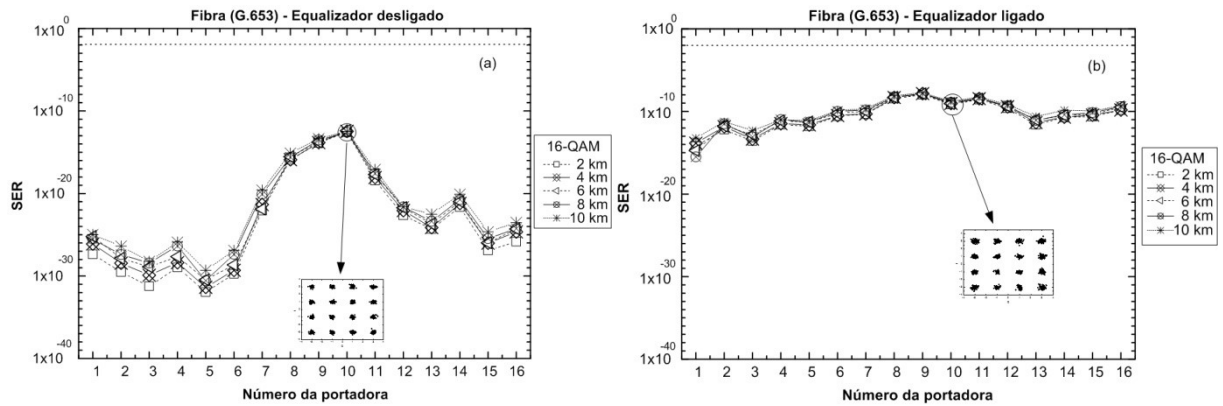
Figura 5.7 - Propagação de uma onda milimétrica a 90 GHz na fibra (G.653) usando modulação QPSK.



Fonte – Elaborada pelo autor.

Empregando a modulação 16-QAM no processo de transmissão, foi verificado que com o equalizador desligado, em 10 km, Figura 5.8 (a), o sistema apresentou uma SER de 10^{-13} . Porém, com o equalizador ligado, Figura 5.8 (b), uma SER de 10^{-8} foi alcançada em 10 km. Em ambos os casos, seria possível garantir uma QoS, dado que os valores de SER encontrados estão abaixo da capacidade de FEC [49].

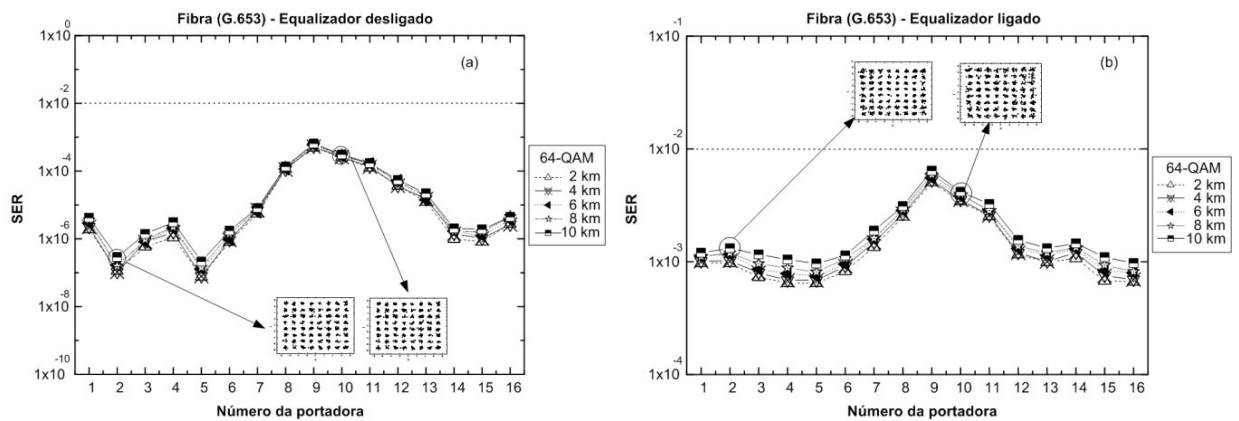
Figura 5.8 - Propagação de uma onda milimétrica a 90 GHz na fibra (G.653) usando modulação 16-QAM.



Fonte – Elaborada pelo autor.

Por fim, as Figuras 5.9 (a) e (b) apresentam os resultados obtidos utilizando a modulação 64-QAM na transmissão. Para um sistema sem equalização, em 10 km, Figura 5.9 (a), uma SER de 10^{-3} foi verificada. Porém, equalizando o sistema, Figura 5.9 (b), foi constatado uma SER menor que 10^{-2} em 10 km. Em ambos os casos, é verificado uma alta SER, no entanto, os valores encontrados estão abaixo da capacidade de FEC [49], permitindo assim, a utilização da modulação 64-QAM nesse tipo de transmissão com uma QoS aceitável.

Figura 5.9 - Propagação de uma onda milimétrica a 90 GHz na fibra (G.653) usando modulação 64-QAM.



Fonte – Elaborada pelo autor.

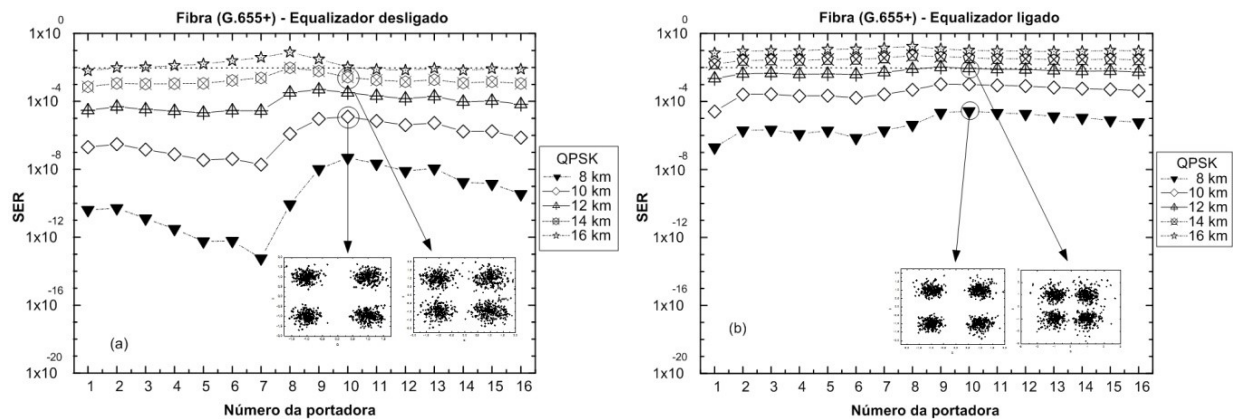
5.2.2.3. Fibra óptica anômala

A fibra óptica anômala apresenta uma dispersão positiva, porém menor em valor absoluto em relação à fibra padrão; desse modo, na propagação, as frequências menores viajam mais devagar do que as frequências maiores [54]. Dito isso, variando o tamanho do enlace e empregado diferentes modulações no processo de transmissão, foi analisado o efeito

da dispersão cromática na propagação de um sinal de ondas milimétricas em um sistema ROF utilizando a fibra óptica anômala.

As Figuras 5.10 (a) e (b) apresentam os resultados encontrados para a transmissão utilizando a modulação QPSK. Na Figura 5.10 (a), em um sistema sem equalização, o tamanho máximo do enlace permitido é de 14 km. Já para um sistema equalizado, Figura 5.10 (b), o comprimento máximo do enlace cai para 12 km. Em ambos os casos, conforme ilustrado pelas constelações da décima portadora, Figuras 5.10 (a) e (b), a SER verificada é considerada alta, operando no limite da capacidade de FEC [49]. Porém, ainda capaz de garantir uma QoS.

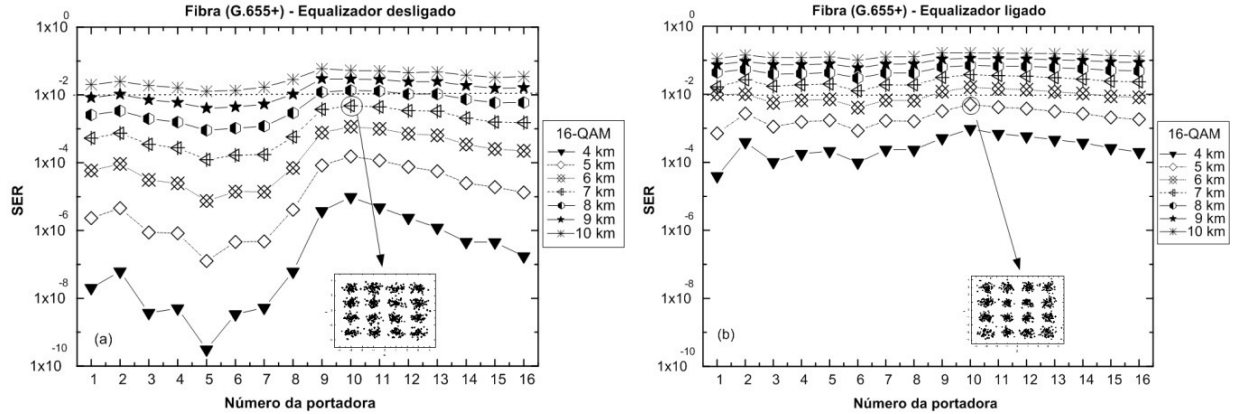
Figura 5.10 - Propagação de uma onda milimétrica a 90 GHz na fibra (G.655+) usando modulação QPSK.



Fonte – Elaborada pelo autor.

Aplicando a modulação 16-QAM no processo de transmissão, foi verificado que para um sistema sem equalização, Figura 5.11 (a), o tamanho máximo do enlace de fibra óptica anômala é de 7 km. Já em um sistema equalizado, Figura 5.11 (b), a distância máxima alcançada foi de 5 km.

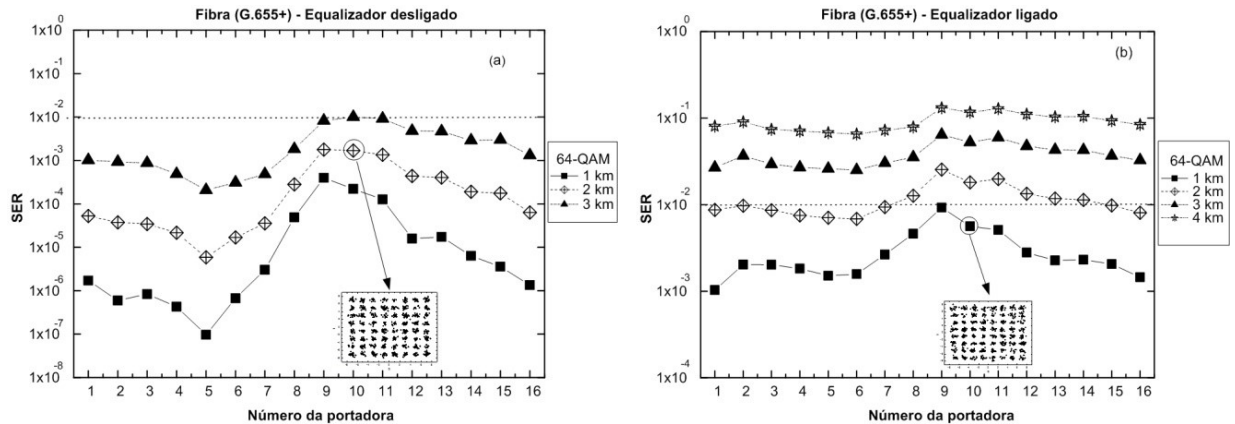
Figura 5.11 - Propagação de uma onda milimétrica a 90 GHz na fibra (G.655+) usando modulação 16-QAM.



Fonte – Elaborada pelo autor.

Empregando a modulação 64-QAM na transmissão, foi verificado que o tamanho máximo do enlace utilizando uma fibra óptica anômala para um sistema sem equalização é de 3 km, conforme ilustrado pela Figura 5.12 (a). No entanto, equalizando o sistema, de acordo com a Figura 5.12 (b), o tamanho máximo do enlace cai para 1 km.

Figura 5.12 - Propagação de uma onda milimétrica a 90 GHz na fibra (G.655+) usando modulação 64-QAM.



Fonte – Elaborada pelo autor.

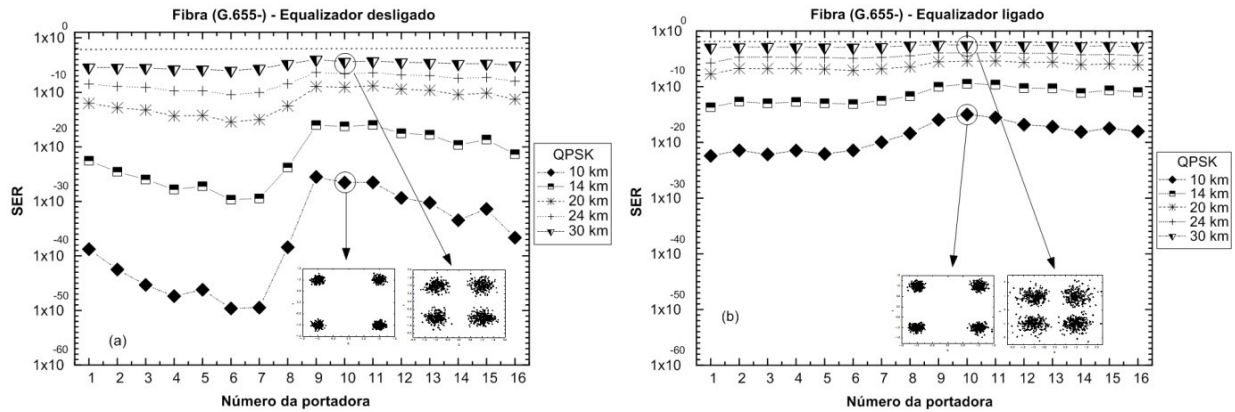
5.2.2.4. Fibra óptica normal

A fibra óptica normal apresenta uma dispersão negativa, fazendo com que as frequências menores viagem mais rápido do que as frequências maiores [54]. Sendo assim, foi analisado o efeito da dispersão cromática na fibra óptica normal, variando o tamanho do enlace e alterando o tipo de modulação empregada na transmissão do sinal.

Aplicando a modulação QPSK em uma transmissão sem equalização, conforme ilustrado pela Figura 5.13 (a), foi verificado uma SER de 10^{-4} para um enlace de fibra óptica

normal de 30 km. Equalizado o sistema, Figura 5.13 (b), em 30 km é verificada uma SER de 10^{-2} , representando o limite da capacidade de FEC estipulado em [49].

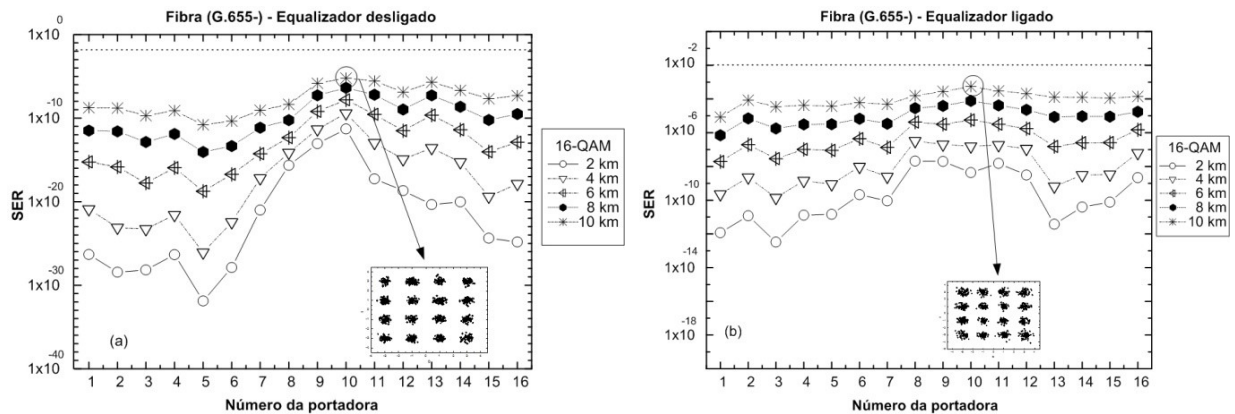
Figura 5.13 - Propagação de uma onda milimétrica a 90 GHz na fibra (G.655-) usando modulação QPSK.



Fonte – Elaborada pelo autor.

Utilizando a modulação 16-QAM, Figuras 5.14 (a) e (b), em um enlace de fibra óptica normal de 10 km, sem equalização, o sistema apresentou uma SER de 10^{-5} , conforme ilustrado pela Figura 5.14 (a). No entanto, equalizando o sistema, Figura 5.14 (b), em 10 km a SER passa a ser de 10^{-3} .

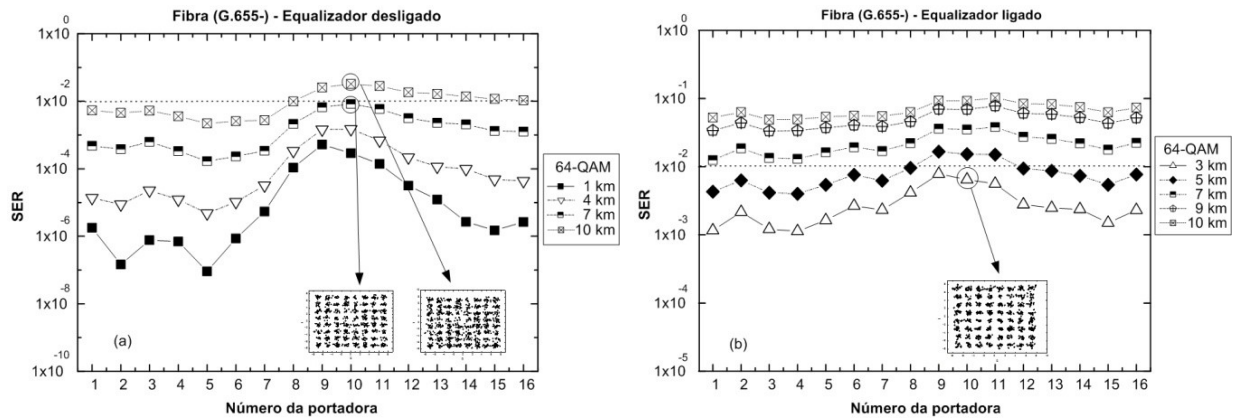
Figura 5.14 - Propagação de uma onda milimétrica a 90 GHz na fibra (G.655-) usando modulação 16-QAM.



Fonte – Elaborada pelo autor.

As Figuras 5.15 (a) e (b) apresentam os resultados encontrados nas simulações quando empregue a modulação 64-QAM no processo de transmissão. Com o equalizador desligado, Figura 5.15 (a), uma distância de 7 km foi alcançada. Já para o sistema equalizado, Figura 5.15 (b), o tamanho máximo do enlace é de 3 km.

Figura 5.15 - Propagação de uma onda milimétrica a 90 GHz na fibra (G.655-) usando modulação 64-QAM.



Fonte – Elaborada pelo autor.

5.2.2.5. Análise dos resultados da dispersão cromática

Os resultados encontrados mostram que a fibra óptica DS apresenta os melhores resultados, dado que a mesma apresenta dispersão cromática aproximadamente nula na faixa de 1550 nm. Apesar disso, a fibra óptica DS sofre com os efeitos não lineares da SPM e do FWM devido a sua pequena área efetiva ($50 \mu\text{m}^2$). Por outro lado, apesar de a fibra óptica padrão enfrentar grandes problemas com a dispersão cromática, na faixa de 1550 nm, a mesma apresenta a maior área efetiva entre as fibras ópticas analisadas ($80 \mu\text{m}^2$). Por isso, será realizada nas próximas seções deste trabalho uma análise da influência dos efeitos não lineares da automodulação de fase (SPM) e da mistura de quatro ondas (FWM), na transmissão de uma onda milimétrica a 90 GHz utilizando as fibras ópticas DS e padrão.

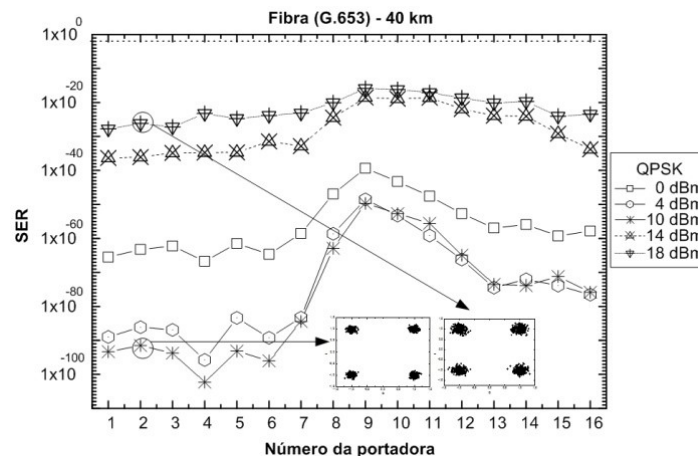
5.2.3 Automodulação de Fase

O índice de refração de uma fibra óptica é constituído por uma componente linear, dependente da frequência e do campo óptico propagante, e por uma componente não linear, dependente da frequência, campo óptico e da potência do campo [50]. Dito isso, o efeito da automodulação de fase (SPM) ocorre quando um campo óptico com elevada intensidade, modula o índice de refração de uma fibra óptica, que por sua vez produz em cada componente espectral do campo óptico um desvio de fase [50]. O desvio de fase provocado pela fibra óptica faz com que ocorra um agrupamento de frequências em um pulso óptico modulado em amplitude, conhecido como *chirp* [50].

5.2.3.1. Efeito da automodulação de fase na fibra óptica de dispersão deslocada

Para a análise dos efeitos da SPM, foi utilizado o esquema da Figura 5.1 (a). Em um primeiro momento, lidando com uma fibra óptica de dispersão deslocada em um enlace de 40 km, foi possível comparar os efeitos da SPM nas modulações QPSK, 16-QAM e 64-QAM. Para a modulação QPSK, Figura 5.16, a SER diminui de acordo com a potência inserida no sistema até a potência de 10 dBm. A partir disso, foi verificado o efeito da SPM, fazendo com que para potências superiores a 10 dBm ocorresse um aumento drástico na SER. Para as simulações realizadas, empregando uma potência de 18 dBm foi verificado uma SER de 10^{-20} , bem abaixo da capacidade de FEC [49].

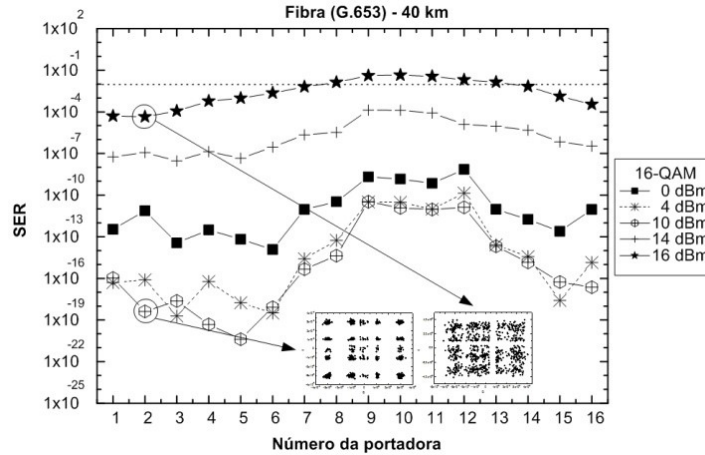
Figura 5.16 - Análise do efeito da SPM em 40 km para modulação QPSK.



Fonte – Elaborada pelo autor.

Na modulação 16-QAM o efeito da SPM ocorreu a partir da potência de 4 dBm, de acordo com a Figura 5.17. Para potências superiores, a SER do sistema aumenta consideravelmente. Desse modo, foi verificado que a máxima potência a ser inserida no sistema, de modo a produzir uma SER dentro do limite da capacidade de FEC [49], é de 14 dBm.

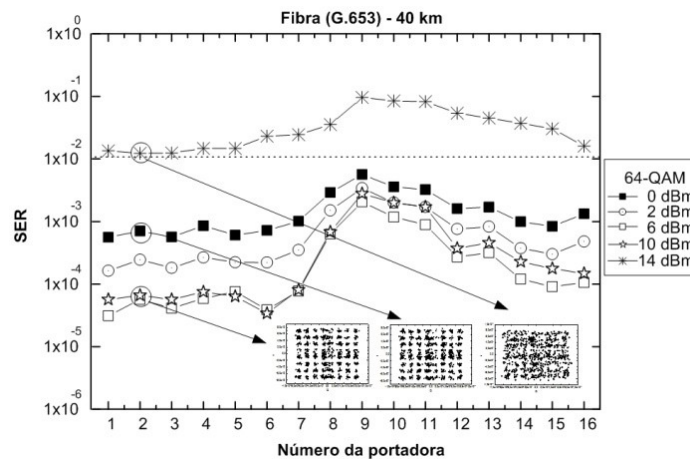
Figura 5.17 - Análise do efeito da SPM em 40 km para modulação 16-QAM.



Fonte – Elaborada pelo autor.

Os efeitos da SPM na modulação 64-QAM foram verificados de acordo com a Figura 5.18. Até a potência de 6 dBm, a SER diminuiu a medida que a potência aumentou. No entanto, para potências superiores a 6 dBm, foi verificado o efeito da SPM no sistema. A máxima potência permitida nas simulações, de modo a produzir uma SER dentro do limite da capacidade de FEC [49], foi de 10 dBm.

Figura 5.18 - Análise do efeito da SPM em 40 km para modulação 64-QAM.



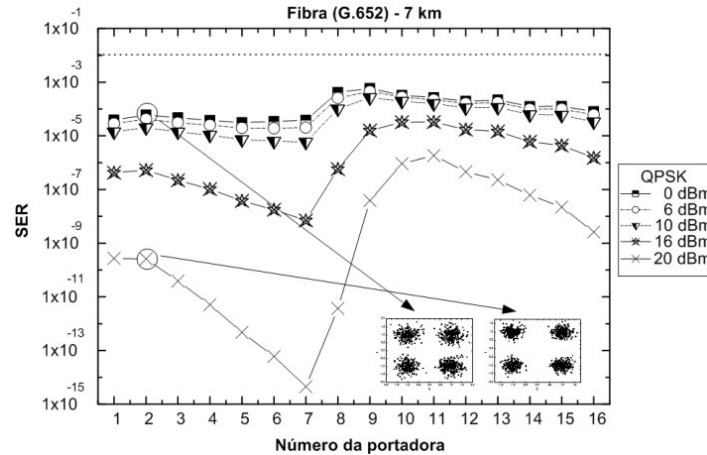
Fonte – Elaborada pelo autor.

5.2.3.2. Efeito da automodulação de fase na fibra óptica padrão

Empregando uma fibra padrão no esquema ilustrado pela Figura 5.1 (a), foi verificado o efeito da SPM no sistema de acordo com o tamanho do enlace e da modulação utilizada. Conforme apresentado pela Figura 5.19, em um enlace de fibra óptica padrão de 7

km, utilizando a modulação QPSK na transmissão de uma onda milimétrica a 90 GHz, devido a maior área efetiva da fibra padrão ($80 \mu\text{m}^2$), o sistema apresentou um comportamento linear, ou seja, a SER diminuiu à medida que a potência de entrada aumentou. Tal fato se deve a maior área efetiva da fibra padrão, a qual faz com que o efeito da automodulação de fase seja muito pequeno, não sendo capaz de retirar um símbolo de sua região de decisão no receptor.

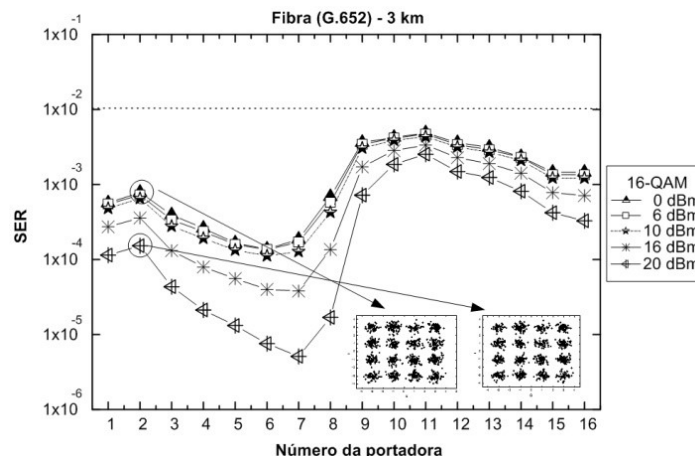
Figura 5.19 - Análise do efeito da SPM em 7 km para modulação QPSK.



Fonte – Elaborada pelo autor.

O mesmo ocorre na Figura 5.20, na qual é ilustrado o comportamento de um enlace de fibra óptica padrão de 3 km, empregando a modulação 16-QAM no processo de transmissão. Nesse caso, foi verificado que o sistema é capaz de lidar com uma potência de 20 dBm apresentado uma SER abaixo do limite aceitável da capacidade de FEC [49].

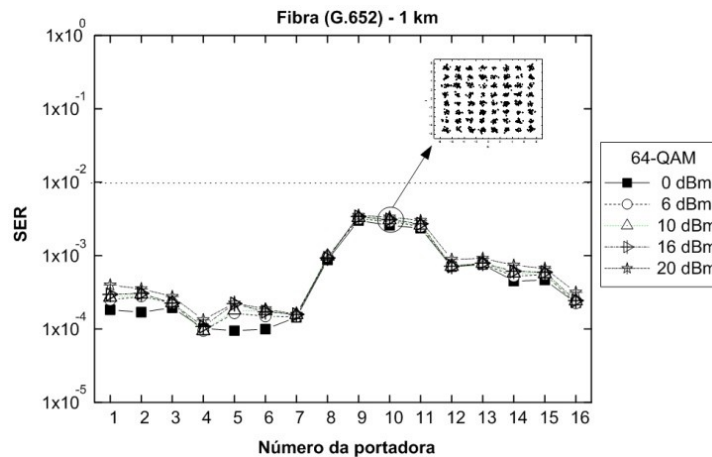
Figura 5.20 - Análise do efeito da SPM em 3 km para modulação 16-QAM.



Fonte – Elaborada pelo autor.

Finalmente, utilizando a modulação 64-QAM no processo de transmissão de uma onda milimétrica a 90 GHz e variando a potência de entrada do sistema, em um enlace de 1 km, foi verificado um pequeno efeito da automodulação de fase para potências superiores a 0 dBm. Isso acontece devido ao maior número de bits empregue na modulação 64-QAM, fazendo com que no receptor, no processo de detecção dos símbolos transmitidos, a região de decisão seja menor. Entretanto, como a SER das subportadoras transmitidas estão abaixo da capacidade de FEC, o sistema é capaz de operar com uma QoS garantida até a potência de 20 dBm.

Figura 5.21- Análise do efeito da SPM em 1 km para modulação 64-QAM.



Fonte – Elaborada pelo autor.

5.2.3.3. Análise dos resultados do efeito não linear da automodulação de fase

Os resultados encontrados nas simulações mostram que os efeitos da SPM são verificados a partir de um determinado comprimento da fibra óptica. Apesar de a fibra óptica de dispersão deslocada apresentar uma área efetiva de $(50 \mu\text{m}^2)$ e enfrentar os efeitos da SPM, foi possível alcançar um enlace de 40 km para as modulações QPSK, 16-QAM e 64-QAM. Ficando claro que, dependendo da potência inserida em uma fibra óptica de dispersão deslocada, o efeito da SPM pode ser controlado.

Apesar de a fibra óptica padrão apresentar melhores resultados no que diz respeito ao efeito da automodulação de fase, foi verificado que para alcançar uma SER abaixo do limite da capacidade de FEC, o tamanho máximo do enlace permitido, devido aos efeitos da dispersão cromática, é muito abaixo ao esperado para o *backhaul* das redes móveis de quinta

geração. Com isso, foi descartado o uso da fibra óptica padrão no *backhaul* das futuras redes móveis de quinta geração.

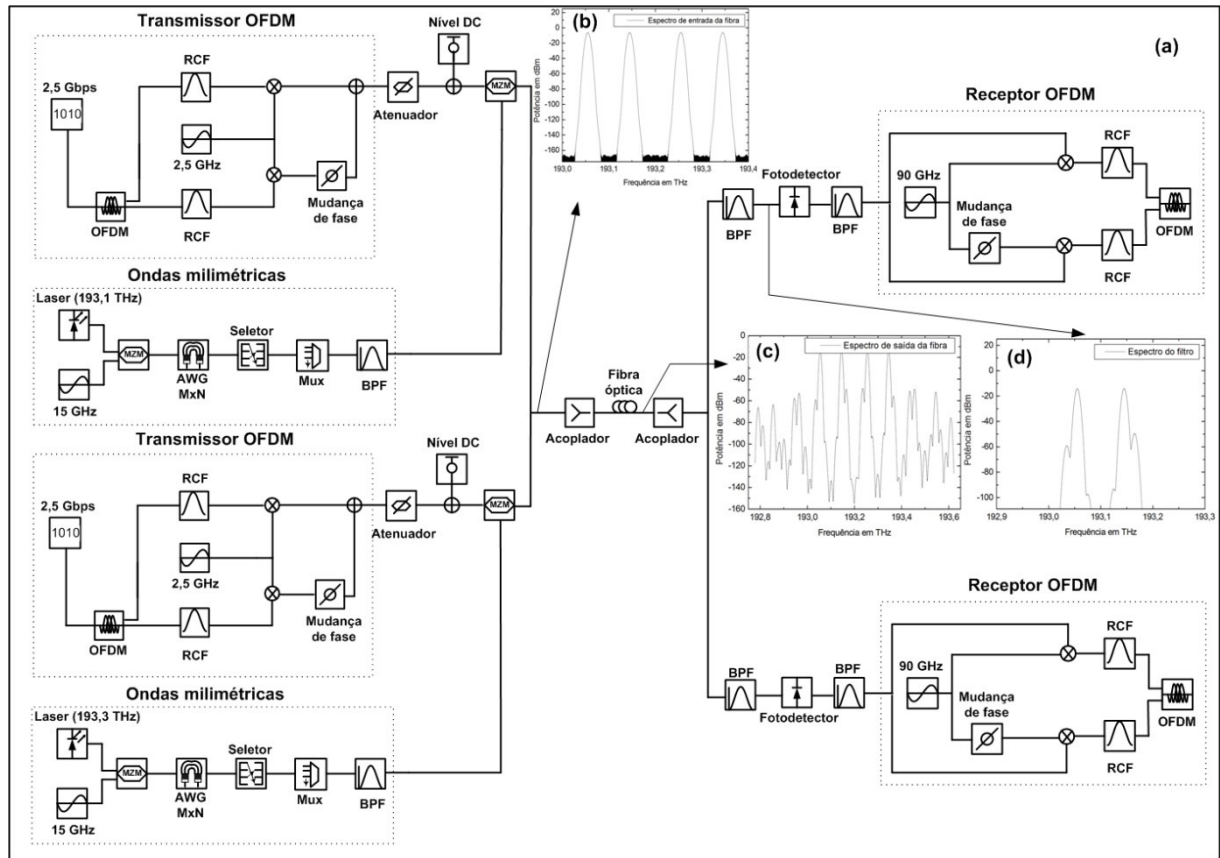
5.2.4 Mistura de quatro ondas

O efeito não linear da mistura de quatro ondas (FWM) é independente da taxa de transmissão e acontece quando dois ou mais sinais, nas frequências $f_1, f_2, \dots, f_n$, são propagados em uma fibra óptica [50]. Nesta situação, ocorre um casamento de fase entre os canais transmitidos devido à dependência entre o índice de refração da fibra óptica e do campo óptico, resultando em uma interferência indesejada entre eles [50]. Com isso, novos componentes espectrais são encontrados em $2f_i - f_j$ (caso degenerado) e $f_i + f_j - f_k$ (caso não degenerado) [50].

A fibra óptica DS foi considerada até aqui a fibra óptica ideal para as futuras redes de acesso de quinta geração. No entanto, para que seja possível a transmissão de dois ou mais comprimentos de onda nesse tipo de fibra, é necessário utilizar recursos de multiplexagem. Dito isso, uma análise detalhada sobre o efeito do FWM na propagação de um sinal de ondas milimétricas a 90 GHz é realizada agora de modo a verificar se esse efeito não linear restringe o uso da fibra óptica DS no *backhaul* das redes móveis de quinta geração.

Para análise do efeito do FWM na transmissão foi utilizado o esquema ilustrado na Figura 5.22 (a), no qual dois sinais de ondas milimétricas são acoplados em um acoplador direcional e propagados pela fibra óptica. O espectro antes de o sinal ser propagado pela fibra óptica DS, ilustrado pela Figura 5.22 (b), apresenta um sinal centralizado na frequência de 193,1 THz e outro na frequência de 193,3 THz. Após a propagação do sinal na fibra óptica, o efeito do FWM pode ser observado, conforme ilustrado pela Figura 5.22 (c). Um BPF com uma frequência central de acordo com a portadora óptica de cada sinal foi utilizado em cada receptor para separação do sinal propagado. De acordo com o espectro após o BPF, Figura 5.22 (d), mesmo com a separação do sinal na recepção, o espectro ainda apresenta em suas bandas laterais uma deformação referente ao efeito do FWM. Tal fato é corrigido após a fotodetecção do sinal e sua passagem por outro BPF. Após isso, um oscilador local na frequência de 90 GHz é utilizado nos receptores OFDM para a realização de uma demodulação síncrona do sinal, recuperando assim a informação transmitida.

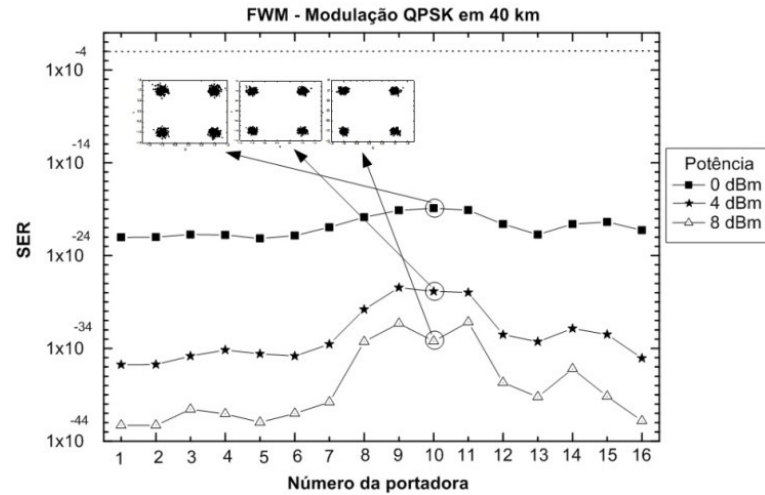
Figura 5.22 - Esquema proposto para análise do efeito FWM.



Fonte – Elaborada pelo autor.

Em um primeiro momento, utilizando a modulação QPSK, foi analisado o efeito do FWM na transmissão do sinal óptico em um enlace de 40 km para diferentes potências de entrada. Inserindo potências de 0 dBm, 4 dBm e 8 dBm, conforme ilustrado pela Figura 5.23, foi possível verificar que devido à ortogonalidade entre as subportadoras OFDM, o efeito do FWM não será um problema na transmissão do sinal óptico em um enlace de 40 km, dado que a SER diminuiu a medida que a potência de entrada aumentou.

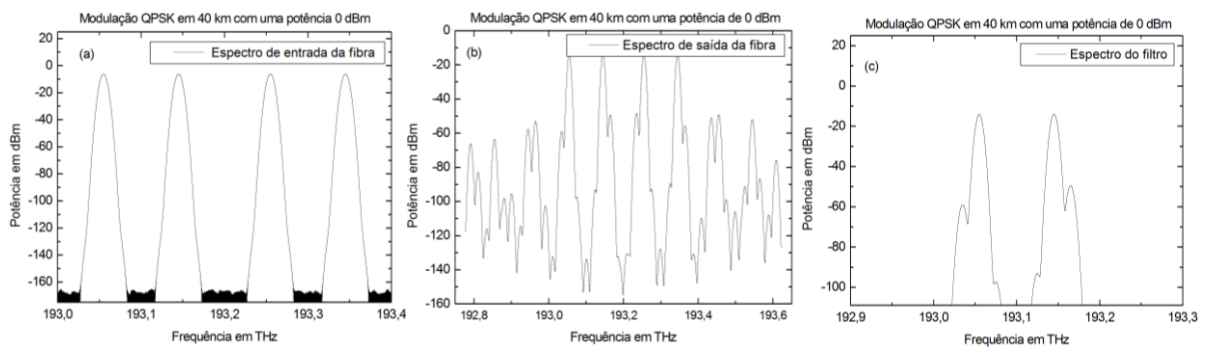
Figura 5.23 - Análise do efeito do FWM na modulação QPSK para diferentes potências de entrada.



Fonte – Elaborada pelo autor.

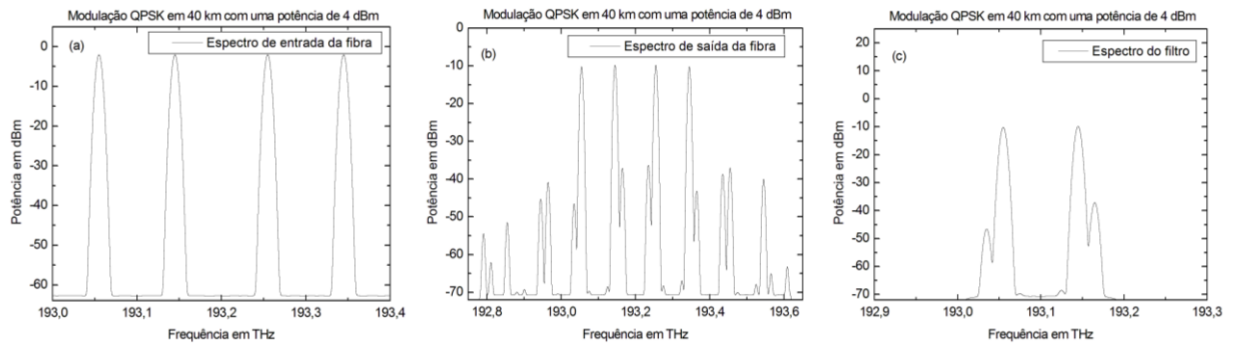
Os espectros de entrada utilizando as potências médias de 0 dBm, 4 dBm e 8 dBm, são ilustrados, respectivamente, pelas Figuras 5.24 (a), 5.25 (a) e 5.26 (a). O FWM está presente na saída da fibra óptica em todos os casos, conforme ilustrado nas Figuras 5.24 (b), 5.25 (b) e 5.26 (b). Por fim, após a transmissão do sinal e a sua filtragem, Figuras 5.24 (c), 5.25 (c) e 5.26 (c), foi verificado que quanto maior a potência inserida na fibra óptica, maior será o efeito do FWM.

Figura 5.24 - Análise espectral da modulação QPSK para uma potência média de entrada de 0 dBm.



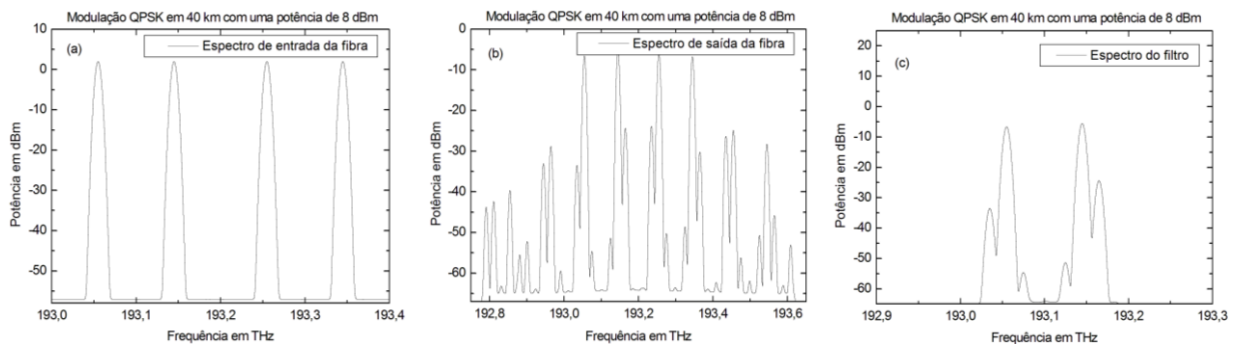
Fonte – Elaborada pelo autor.

Figura 5.25 - Análise espectral da modulação QPSK para uma potência média de entrada de 4 dBm.



Fonte – Elaborada pelo autor.

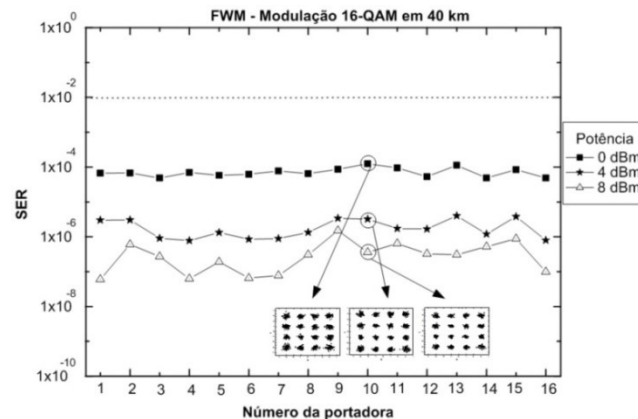
Figura 5.26 - Análise espectral da modulação QPSK para uma potência média de entrada de 8 dBm.



Fonte – Elaborada pelo autor.

Mudando o tipo de modulação empregada no processo para 16-QAM, foi possível analisar um aumento da SER em cada subportadora OFDM quando aplicado diferentes potências de entrada na fibra óptica, conforme ilustrado pela Figura 5.27. Tal fato se deve ao espaçamento entre os canais que são reduzidos devido ao maior número de bits empregue no processo de modulação.

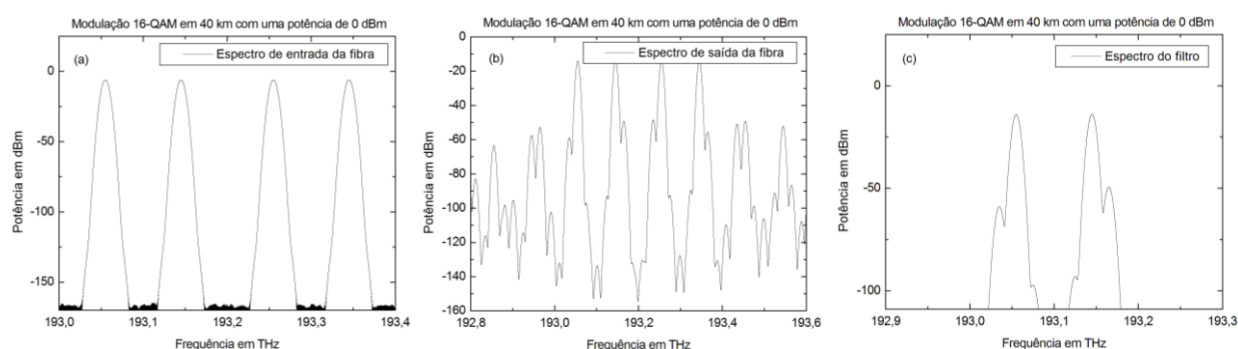
Figura 5.27 - Análise do efeito do FWM na modulação 16-QAM para diferentes potências de entrada.



Fonte – Elaborada pelo autor.

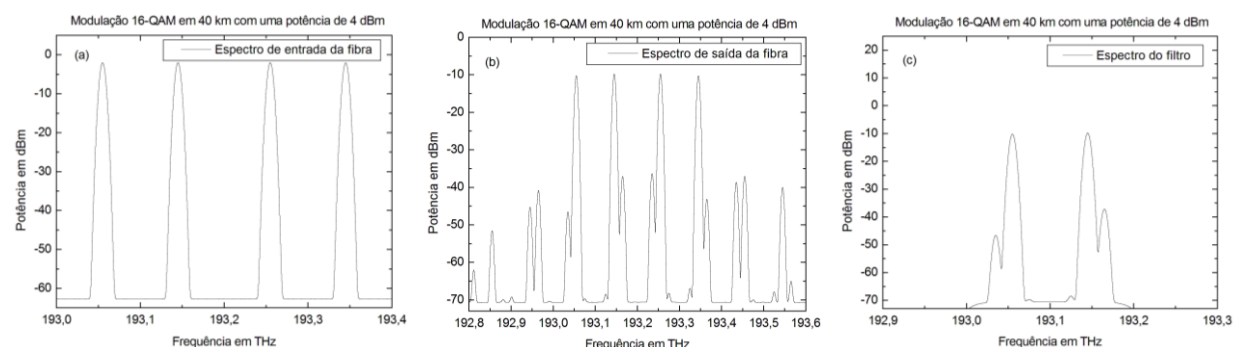
Os espectros dos sinais de entrada na fibra óptica para diferentes potências inseridas no processo de transmissão são ilustrados abaixo pelas Figuras 5.28 (a), 5.29 (a) e 5.30 (a). Após a propagação dos sinais pela fibra óptica é possível verificar o efeito do FWM, de acordo com as Figuras 5.28 (b), 5.29 (b) e 5.30 (b). Por fim, as Figuras 5.28 (c), 5.29 (c) e 5.30 (c) ilustram o sinal óptico separado por um BPF de acordo com a portadora óptica adotada no processo de transmissão.

Figura 5.28 - Análise espectral da modulação 16-QAM para uma potência média de entrada de 0 dBm.



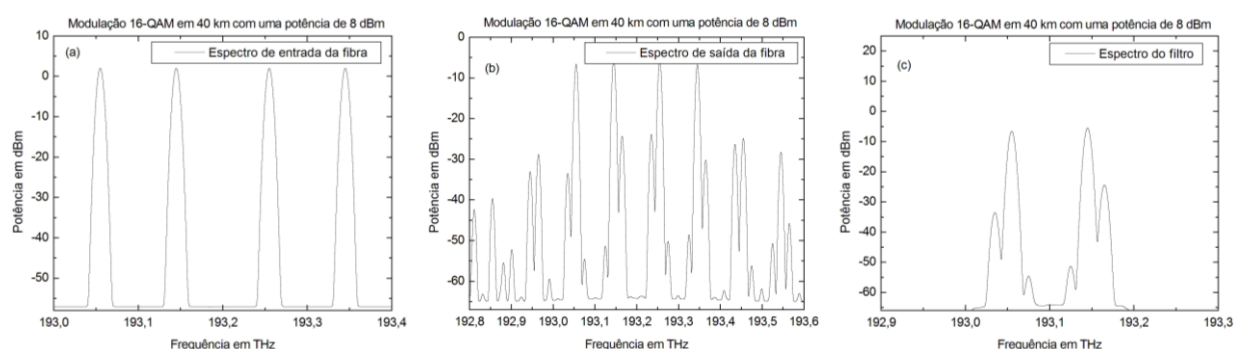
Fonte – Elaborada pelo autor.

Figura 5.29 - Análise espectral da modulação 16-QAM para uma potência média de entrada de 4 dBm.



Fonte – Elaborada pelo autor.

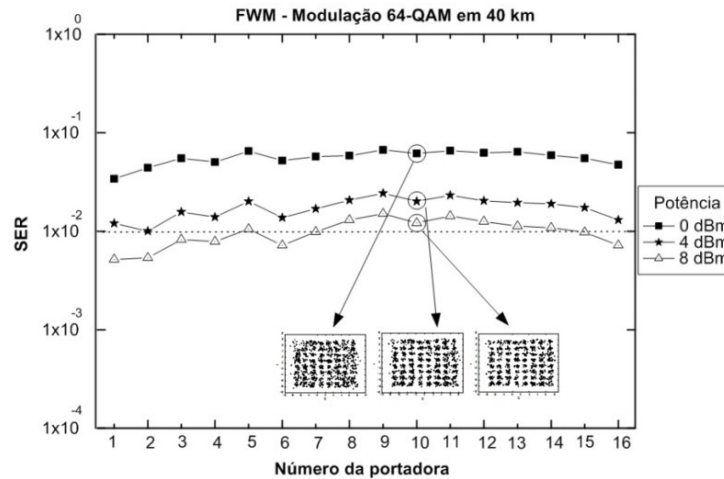
Figura 5.30 - Análise espectral da modulação 16-QAM para uma potência média de entrada de 8 dBm.



Fonte – Elaborada pelo autor.

Por último, aplicando a modulação 64-QAM no processo de transmissão de uma onda milimétrica a 90 GHz em um enlace de fibra óptica DS de 40 km, analisou-se que, para uma transmissão com uma QoS aceitável, seria necessário uma potência de entrada superior a 8 dBm, dado que para as potências de entrada de 0 dBm, 4 dBm e 8 dBm o sistema apresentou uma SER acima da capacidade de FEC [49], conforme apresentado na Figura 5.31.

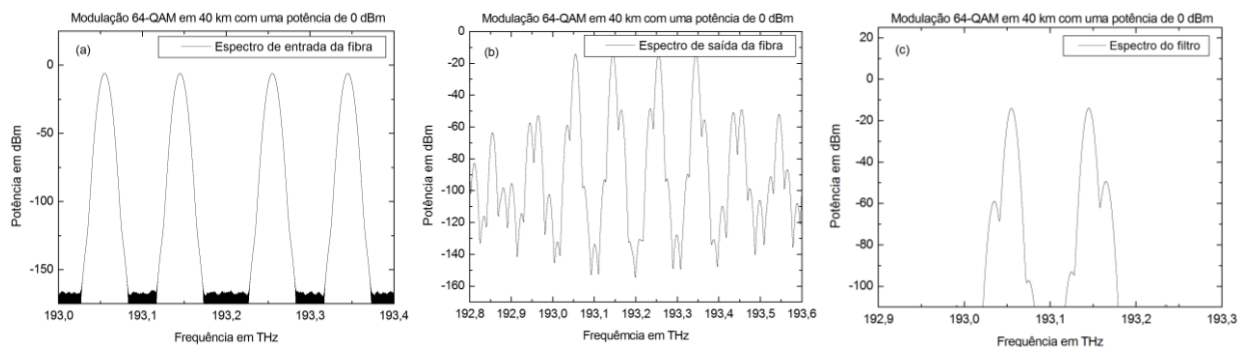
Figura 5.31 - Análise do efeito do FWM na modulação 64-QAM para diferentes potências de entrada.



Fonte – Elaborada pelo autor.

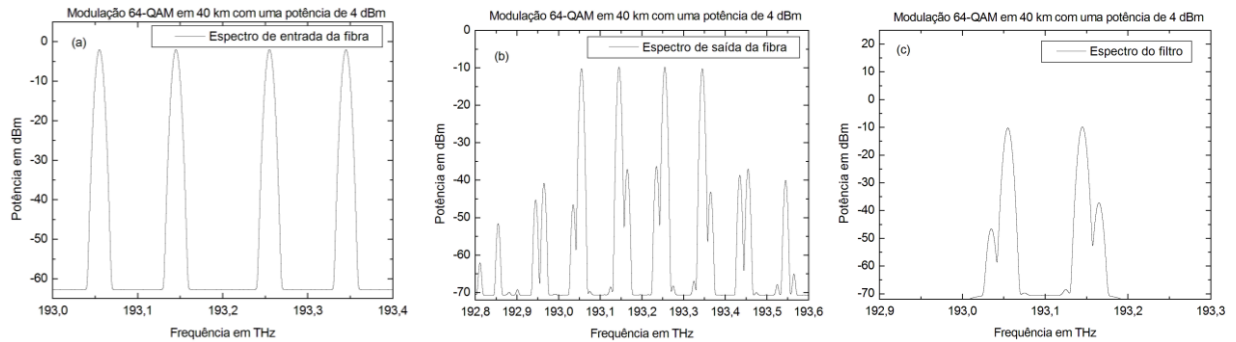
Os espectros do sinal óptico transmitido em diferentes pontos e para diferentes potências de entrada, são ilustrados de acordo com as Figuras 5.32, 5.33 e 5.34.

Figura 5.32 - Análise espectral da modulação 64-QAM para uma potência média de entrada de 0 dBm.



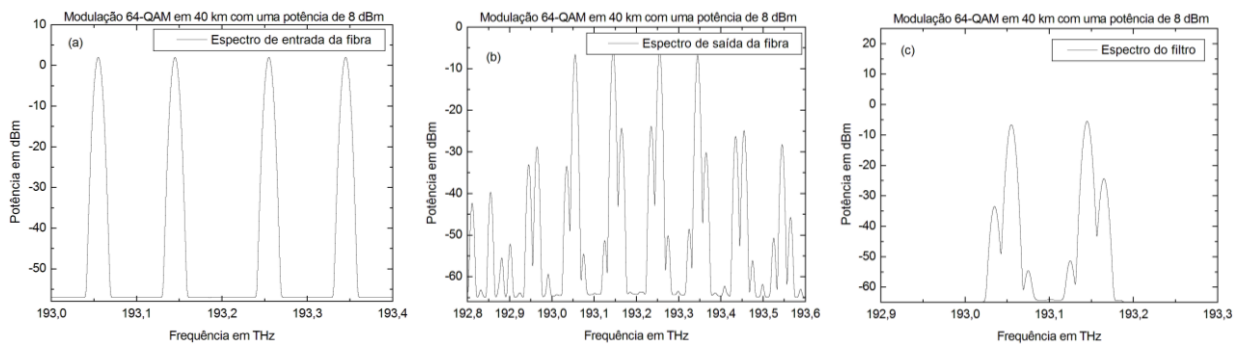
Fonte – Elaborada pelo autor.

Figura 5.33 - Análise espectral da modulação 64-QAM para uma potência média de entrada de 4 dBm.



Fonte – Elaborada pelo autor.

Figura 5.34 - Análise espectral da modulação 64-QAM para uma potência média de entrada de 8 dBm.



Fonte – Elaborada pelo autor.

Os resultados encontrados nas simulações comprovam que devido à ortogonalidade entre as subportadoras, obtida devido ao uso do OFDM no processo de transmissão, o efeito do FWM apesar de estar presente nos sinais após a separação dos mesmos nos receptores, não causará perda da informação transmitida em uma fibra óptica DS.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÃO E ESTUDOS FUTUROS

Neste capítulo será apresentada a conclusão deste trabalho, com base na análise dos resultados encontrados nas simulações, assim como a sugestões para o desenvolvimento de estudos futuros.

6.1 Conclusão

Mediante aos estudos e resultados encontrados no decorrer deste trabalho de conclusão de curso, foi possível analisar e compreender o *backhaul* proposto para as redes móveis de quinta geração. A princípio, foi realizado um estudo da evolução das gerações de redes móveis até a presente padronização da quinta geração. Posteriormente, foi apresentado o *backhaul* proposto e todas suas características. Em seguida, o sistema ROF e o OFDM foram estudados, deixando clara a importância desses recursos para fornecer uma alta capacidade de transmissão e alocar o grande número de dispositivos móveis esperados nas futuras redes de acesso.

Com o intuito de determinar qual fibra óptica apresentaria melhor desempenho para o *backhaul* das redes móveis de quinta geração, foram analisados o efeito linear da dispersão cromática e os efeitos não lineares da automodulação de fase e da mistura de quatro ondas.

A Tabela 6.1 apresenta os resultados obtidos nas simulações realizadas para analisar os efeitos da dispersão cromática, em diferentes fibras ópticas, na transmissão de uma onda milimétrica a 90 GHz em um sistema ROF.

Tabela 6.1 - Resultados das simulações para análise da dispersão.

Fibra Óptica	Comprimento do enlace (km)					
	QPSK 80 Gbps		16-QAM 160 Gbps		64-QAM 240 Gbps	
	Equalizador desligado	Equalizador ligado	Equalizador desligado	Equalizador ligado	Equalizador desligado	Equalizador ligado
Padrão	8	7	4	3	1	0
DS	40	40	10	10	10	10
Anômala	14	12	7	5	3	1
Normal	30	30	10	10	7	3

Diante dos resultados encontrados na análise da dispersão cromática, a fibra óptica DS apresentou melhor desempenho, dado que a mesma apresenta dispersão cromática aproximadamente nula, na faixa de 1550 nm.

O efeito não linear da automodulação de fase foi estudado para a fibra óptica DS e a fibra óptica padrão, dado que a fibra óptica DS apresenta uma área efetiva de $(50 \mu\text{m}^2)$ e a fibra óptica padrão de $(80 \mu\text{m}^2)$. Os resultados encontrados comprovaram que apesar de a fibra óptica DS enfrentar os efeitos da automodulação de fase, esse efeito pode ser controlado de acordo com a potência inserida na fibra. Por outro lado, na fibra óptica padrão o efeito da automodulação de fase é muito pequeno, devido a sua maior área efetiva. Entretanto, utilizando a fibra óptica padrão, devido aos efeitos da dispersão cromática, o tamanho máximo do enlace permitido, de modo a produzir uma SER abaixo do limite da capacidade de FEC, é considerado muito pequeno. Em consonância a esses fatos, a utilização da fibra óptica padrão no *backhaul* de quinta geração foi descartada.

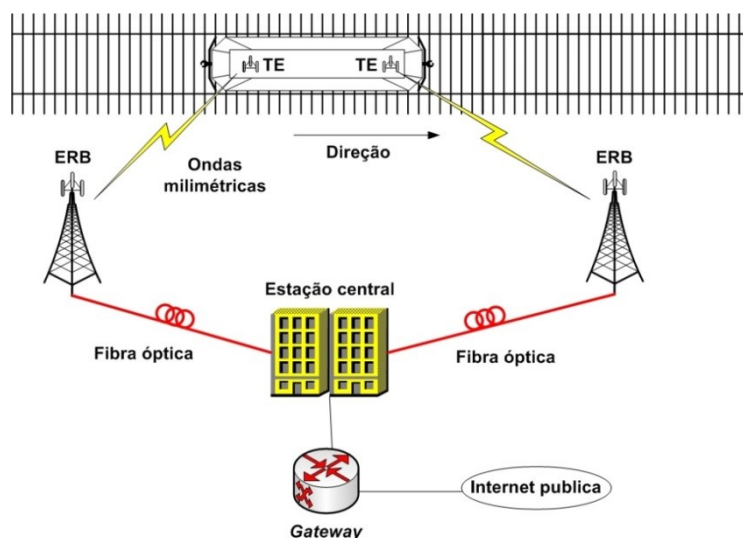
Por fim, foi analisado o efeito da mistura de quatro ondas para a fibra óptica DS, no qual foi comprovado que devido à ortogonalidade entre as subportadoras OFDM, o efeito do FWM não causará perda da informação transmitida.

Diante de todos os resultados obtidos por meio das simulações realizadas nesse trabalho, foi possível verificar que a fibra óptica DS é a fibra óptica que melhor irá atender o *backhaul* das futuras redes móveis de quinta geração, visto que a fibra óptica DS apresenta dispersão aproximadamente nula, na faixa de 1550 nm, e apesar dos efeitos não lineares enfrentados como a SPM e o FWM, a mesma apresentou um ótimo desempenho. Além disso, as taxas de transmissão de dados alcançadas ao empregar as modulações QPSK (80 Gbps), 16-QAM (160 Gbps) e 64-QAM (240 Gbps), são consideradas muito satisfatórias, visto que a padronização das redes móveis de quinta geração [5] estabeleceu que as mesmas deverão apresentar uma taxa de transmissão de pico de 20 Gbps.

Como prova de conceito, a arquitetura ilustrada pela Figura 6.1 [55] foi utilizada na estação oito do metrô de Seul, capital da Coreia do sul, para análise do desempenho de um sistema *Wi-Fi*, capaz de fornecer altas taxas de dados aos passageiros dos trens. Para isso, foram distribuídas ERBs ao longo da linha percorrida pelo trem, de modo a cobrir todo o seu itinerário. As ERBs são conectadas a uma estação central por um enlace de fibra óptica. Além disso, as ERBs se conectam aos trens por meio da transmissão e recepção de ondas

milimétricas. Nas estações centrais é realizado todo o processamento dos sinais. As estações centrais são conectadas por meio de um *gateway* a internet pública [55].

Figura 6.1- Arquitetura de uma rede móvel para trens de alta velocidade.



Fonte – Elaborada pelo autor, baseado em [55].

Para um trem deslocando a uma velocidade de 400 km/h, utilizando uma largura de banda de 250 MHz, foram alcançadas taxas entre 200 Mbps e 500 Mbps, dependendo da SNR (*Signal to Noise Ratio*) durante o deslocamento do trem [55]. Como um único trem pode contar com dois equipamentos terminais (TE) independentes, foi possível alcançar uma taxa de transferência de dados de 1 Gbps para um único trem [55]. Desse modo, a fibra óptica foi capaz de suportar o elevado tráfego de dados gerado pelos passageiros dos trens em alta velocidade, além de garantir uma boa QoS.

6.2 Estudos Futuros

Fica como proposta para a realização de estudos futuros a variação do número de subportadoras OFDM adotadas na transmissão e a inserção de mais tons pilotos no processo de equalização. Outro estudo interessante é a aplicação de modulações como, 128-QAM e 256-QAM, na propagação de uma onda milimétrica, em femtocélulas, para as futuras redes móveis de quinta geração.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] T. S. RAPPAPORT, **Wireless Communications: Principles and Practice**, Prentice hall communications engineering and emerging technologies series , 1996.
- [2] M. F. RAMOS, **A Evolução da Telefonia Celular**, Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), 2012.
- [3] “Olhar Digital,” 19 Maio 2013. [Online]. Disponível em: <<https://olhardigital.com.br/video/a-tecnologia-por-tras-da-telefoniamovel/34603>>. [Acesso em 17 setembro 2017].
- [4] G. F. GRASEL, “oficinadanet,” 01 abril 2014. [Online]. Disponível em: <<https://www.oficinadanet.com.br/post/12569-o-que-e-e-como-funciona-4g>>. [Acesso em 18 setembro 2017].
- [5] **Recommendation ITU-R M.2083-0 - IMT Vision – Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond**. M Series Mobile, radiodetermination, amateur and related satellite services, International Telecommunication Union, 09/2015.
- [6] P. K. VERMA, R. VERMA, A. PRAKASH, A. AGRAWAL, K. NAIK, R. TRIPATHI, M. ALSABAAN, T. KHALIFA, T. ABDELKADER e A. ABOGHARAF, **Machine-to-Machine (M2M) communications: A survey**, Elsevier. Journal of Network and Computer Applications, 2016.
- [7] M. N. TEHRANI, M. UYSAL e H. YANIKOMEROGLU, **Device-to-Device Communication in 5G Cellular Networks: Challenges, Solutions, and Future Directions**, IEEE Communications Magazine., 2014.
- [8] M. R. ., M. I. PALATTELLA, M. ., F. I. DOHLER, A. ., S. M. I. GRIECO, G. M. I. RIZZO, J. TORSNER, T. ENGEL e L. LADID, **Internet of Things in the 5G Era: Enablers, Architecture, and Business Models**, IEEE JOURNAL ON SELECTED AREAS IN COMMUNICATIONS,, 2016.

- [9] M. SIMSEK, A. ., M. I. AIJAZ, M. ., F. I. DOHLER, J. SACHS e G. ., F. I. FETTWEIS, **5G-Enabled Tactile Internet**, IEEE JOURNAL ON SELECTED AREAS IN COMMUNICATIONS, 2016.
- [10] L. WEI, R. Q. HU, Y. QIAN e G. WU, **Key Elements To Enable Millimeter Wave Communications For 5G Wireless Systems**, IEEE Wireless Communications, 2014.
- [11] Z. PI, F. KHAN e S. ELECTRONICS, **An Introduction to Millimeter-Wave Mobile Broadband Systems**, IEEE Communications Magazine, 2011.
- [12] T. S. RAPPAPORT, S. SUN, R. MAYZUS, H. ZHAO, Y. AZAR, K. WANG, G. N. WONG, J. K. SCHULZ, M. SAMIMI e F. GUTIERREZ, **Millimeter Wave Mobile Communications for 5G Cellular: It Will Work!**, ieee access practical innovations open solutions, 2013.
- [13] C. DEHOS, J. L. GONZÁLEZ, A. DOMENICO, D. KTÉNAS e L. DUSSOPT, **Millimeter-Wave Access and Backhauling: The Solution to the Exponential Data Traffic Increase in 5G Mobile Communications Systems?**, IEEE Communications Magazine, 2014.
- [14] Z. QINGLING e J. LI, **Rain Attenuation in Millimeter Wave Ranges**, IEEE Int. Symp. Antennas, Propag. EM Theory, 2006.
- [15] P. DAT, A. KANNO, K. INAGAKI e T. KAWANISHI, **High-Capacity Wireless Backhaul Network Using Seamless Convergence of Radio-over-Fiber and 90-GHz Millimeter-Wave**, JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, VOL. 32, NO. 20., 2014.
- [16] T. S. P. MONTEIRO, J. P. F. EWERTON e Í. A. LIMA, **Arquiteturas e Aplicações de Rádio sobre Fibra**, Brasília: XXX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES, 2012.
- [17] M. R. S. A. JOSÉ, **Geração e propagação de sinais rádio sobre fibra (ROF)**, LISBOA: INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA, 2011.
- [18] A. WIBERG, **Generation, Modulation, and Detection of Signals in Microwave**

- Photonic Systems**, Gotemburgo, Suécia: Department of Microtechnology and Nanoscience CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, 2008.
- [19] SILVA, J., **Desenvolvimento de um sistema para distribuição de sinais rádio sobre fibra óptica**, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2010.
- [20] M. BRENCI e P. F. CHECCACCI, **RF Reference Signal Transport by Optical Fibers**, IEEE - Transactions on Communications, 1980.
- [21] A. J. COOPER, **Fibre/Radio For The Provision of Cordless/Mobile Telephony Services in The Access Network**. Electronics Letters, Electronics Letters, 1990.
- [22] R. M. N. EMANUEL, **Desenvolvimento e teste de sistemas rádio sobre fibra ótica usando sinais SC-FDMA e OFDM**, Faculdade de engenharia da universidade do porto, 2014.
- [23] **Allen Telecom's Radio-over-Fiber Technology Powers Mobile Communications at Sydney 2000 Olympics**. Fiber Optics Business, Novembro 2000.
- [24] **ITU-T- Series G Supplement 55 - SERIES G: TRANSMISSION SYSTEMS AND MEDIA, DIGITAL SYSTEMS AND NETWORKS. Radio-over-fibre (RoF) technologies and their applications**, International Telecommunication Union, 07/2015.
- [25] WIBERG, A. , PERÉZ, P. M., ANDRÉS, M. V. e HEDEKVIST, P.O, “**Microwave-Photonic Frequency Multiplication Utilizing Optical Four-Wave Mixing and Fiber Bragg Gratings**”, J. Lightwave Technol., Vol. 24, No. 1, pp. 329-334, 2006.
- [26] WIBERG, A., PERÉZ, P. M., ANDRÉS, M. V., ANDREKSON, P. A. e HEDEKVIST, P. O., “**Fiber Optic 40 GHz mm-Wave Link with 2.5 Gb/s Data Transmission**”, IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. 17, No. 9, pp. 1938–1940, 2005.
- [27] PERÉZ, P. M. , WIBERG, A. , ANDRÉS, M. V. e HEDEKVIST, P. O., “**Optical Demultiplexing of Millimeter-Wave Subcarriers for Wireless Channel Distribution Employing Dual Wavelength FBGs**”, Optics Communications, Vol. 275, No. 2, pp. 335-343, 2007.
- [28] WIBERG, A. , OLSSON, B-E., HEDEKVIST, P.O e ANDREKSON, P. A.,

- “Dispersion-Tolerant Millimeter-Wave Photonic Link Using Polarization-Dependent Modulation”**, J. Lightwave Technol., Vol. 25, No. 10, pp. 2984-2991, 2007.
- [29] FRIZON, G. G. , **MODULAÇÃO AM E DEMODULADOR DE ENVELOPE**, 2014.
- [30] G. H. SMITH, D. NOVAK e Z. AHMED, **“Overcoming chromatic-dispersion effects in fiber-wireless systems incorporating external modulators”** IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 45, no. 8, pp. 1410–1415., 1997.
- [31] JUNKER, M., **Investigation of Millimetre Wave Generation by stimulated Brillouin scattering for Radio Over Fibre Applications**, Dublin Institute of Technology, 2008.
- [32] J. S. P. MAURÍCIO, **“Recomendações G.652 e G.657 em Redes Ópticas Passivas”** Artigo, Revista ISPMAIS, 24 05 2017. [Online]. Disponível em: <https://www.ispblog.com.br/2017/05/24/recomendacoes-g-652-e-g-657-em-redes-opticas-passivas/>. [Acesso em 12 04 2018].
- [33] PEDRO, S. C. M. , **Redes de Bragg para Compensação de Dispersão e Selecção de Comprimento de Onda em Sistemas WDM Fibra-Rádio**, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2008.
- [34] R. LÉWEN, S. IRMSCHER, U. WESTERGREN, L. THYLÉN e U. ERICSSON, **“Ultra high-speed segmented travelling-wave electroabsorbtion modulators”** in Conf. Optical Fiber Communication (OFC’03), Atlanta: paper post deadline PD38., 2003.
- [35] W. C. CÂMARA, **Estudo de sistemas OFDM para comunicações ópticas**, São Carlos: Universidade de são paulo, 2012.
- [36] R. J. L. FERREIRA, **Estudo de sistemas com multiportadoras ópticas ortogonais e coerentes**, São Carlos, 2013.
- [37] SHIEH, W. e DJORDJEVIC, I., **OFDM for optical communication**, Amsterdam: ELSEVIER, 2009.
- [38] SALZ, J. e WEINSTEIN, S. B., **Fourier transform communication system**. In: ACM SYMPOSIUM ON PROBLEMS IN THE OPTIMIZATION OF DATA COMMUNICATIONS SYSTEMS, New York, 1969.

- [39] TELATAR, E. , **Capacity of Multi-Antenna Gaussian Channels**, New York: European Transactions on Telecommunications, 1999.
- [40] FOSCHINI, G. J. e GANS, M. J., **On limits of wireless communication in a fading environment when using multiple antennas**, New York: Wireless Personal Communication, 1998.
- [41] BRUCE, A. C. e PAUL, B. C., **Communication System - An Introduction to signals and Noise in Electrical Communication**.
- [42] ARMSTRONG, J., **OFDM for optical communications**, Washington: Journal of Lightware Technology, 2009.
- [43] SIMON, H., **Communication System**, New York: John Wiley, 2000.
- [44] S. KAUR, H. SINGH e A. S. SINGH, **Carrier Frequency Offset Estimation for OFDM Systems Using Time/Frequency-Domain Techniques**, IJARCSSE: International Journal of Advanced Research in Computer Science and Electronics Engineering Volume 1, 2012.
- [45] F. CLASSEN e H. MEYR, **Frequency Synchronization Algorithms for OFDM Systems suitable for Communication over Frequency Selective Fading Channels**, Aachen, Germany: Aachen University of Technology; ISS; Templergraben 55, 1994.
- [46] Y. C. SOO, J. KIM, W. Y. YOUNG e C. KANG, **MIMO-OFDM Wireless Communications with MATLAB**, Singapura: John Wiley & Sons (Asia) Pte.Ltd, 2010.
- [47] LUCENA, A. M. P., **Estudos sobre sistemas de comunicação com sinais não-ortogonais superpostos em frequência**, Tese (Doutorado em Engenharia de Teleinformática), Universidade Federal do Ceará, 2006.
- [48] HUSSIN, S., PUNTSRI, K. e NOE, R., **Performance analysis of optical OFDM systems**. In: INTERNATIONAL CONGRESS ULTRA MODERN TELECOMMUNICATIONS, New York: IEEE, 2011.
- [49] F. LI, X. LI, J. ZHANG, J. YU e Z. CAO, **Fiber-Wireless-Fiber Link for DFT-Spread OFDM Signal Transmission at W-Band**, IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY

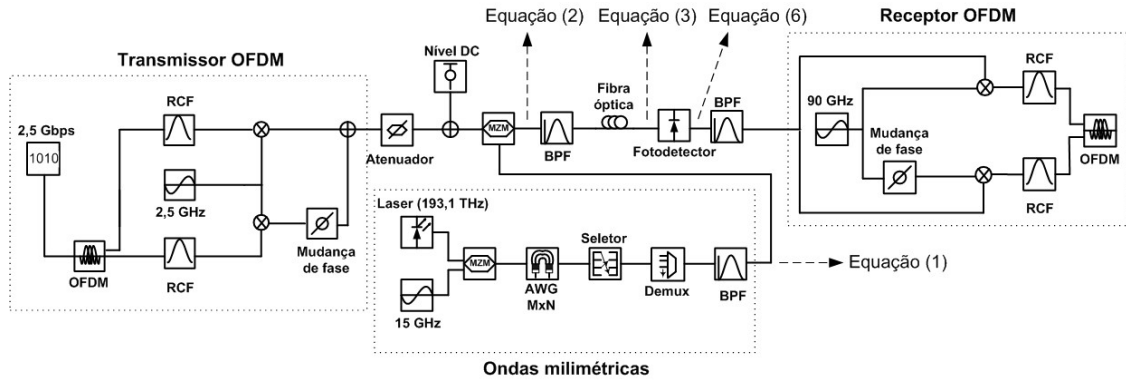
LETTERS, VOL. 27, NO. 12, JUNHO 2015.

- [50] LUIZ, A. A. C, **GERAÇÃO DE SINAIS ÓPTICOS MULTI-NÍVEIS A PARTIR DE AMPLIFICAÇÃO PARAMÉTRICA EM FIBRAS ÓPTICAS**, Campinas – SP: Universidade Estadual de Campinas Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação Departamento de Semicondutores, Instrumentos e Fotônica, 2011.
- [51] ITU - **G.652** - SERIES G: TRANSMISSION SYSTEMS AND MEDIA, DIGITAL SYSTEMS AND NETWORKS. Transmission media characteristics - Optical fibre cables. **Characteristics of a single-mode optical fibre cable**, INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION, 10/2000.
- [52] ITU-T- **G.653** - SERIES G: TRANSMISSION SYSTEMS AND MEDIA, DIGITAL SYSTEMS AND NETWORKS. Transmission media and optical systems characteristics - Optical fibre cables. **Characteristics of a dispersion-shifted, single-mode optical fibre and cable**, International Telecommunication Union, 07/2010.
- [53] ITU-T- **G.655** - SERIES G: TRANSMISSION SYSTEMS AND MEDIA, DIGITAL SYSTEMS AND NETWORKS. Transmission media and optical systems characteristics - Optical fibre cables. **Characteristics of a non-zero dispersion-shifted single-mode optical fibre and cable**, International Telecommunication Union, 11/2009.
- [54] FIGUEIREDO, M. M. , **DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE UM SISTEMA LASER DE CRISTAL LÍQUIDO COLESTÉRICO ACOPLADO À FIBRA ÓPTICA**, Pontífica Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2004.
- [55] Sung-Woo Choi, Heesang Chung, Junhyeong Kim, Jaemin Ahn e Ilgyu Kim, **Mobile Hotspot Network System for High-Speed Railway Communications Using Millimeter Waves**, ETRI Journal, Volume 38, Número 6, 2016.

APÊNDICE A - CENÁRIO ROF

A Figura A.1 ilustra o cenário utilizado no *software VPI* para as simulações do presente trabalho.

Figura A.1 - Análise matemática do esquema proposto para a transmissão de uma onda milimétrica a 90 GHz em um sistema ROF.



Fonte – Elaborada pelo autor, baseado em [15].

O sinal óptico de ondas milimétricas pode ser expresso de acordo com a Equação A.1 [15]

$$E(t) = A_+ \cos[(\omega_0 + 3\omega_{L0})(t + t_d) + \phi_+(t + t_d)] + A_- \cos[(\omega_0 - 3\omega_{L0})t + \phi_-(t)] \quad (\text{A.1})$$

em que: $\phi_+(t) = \phi_0(t) + 3\phi_1(t)$, $\phi_-(t) = \phi_0(t) - 3\phi_1(t)$

A_+ e A_- representam, por essa ordem, os valores de amplitude para as bandas laterais, superior e inferior, de terceira ordem. ω_0 e $\phi_0(t)$ se referem, respectivamente, a frequência angular e a fase do sinal óptico do laser. Já ω_{L0} e $\phi_1(t)$ indicam, nessa ordem, a frequência angular e a fase do sinal elétrico do oscilador local. O atraso de tempo equivalente à diferença de caminho óptico percorrido pelas duas bandas laterais é representado por t_d .

O sinal óptico OFDM modulado pelo segundo MZM, pode ser escrito de acordo com a Equação A.2 [15]

$$\begin{aligned}
E_1(t) &= IL \cdot E(t) \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2V_\pi} S(t) - \frac{\pi}{4}\right) = \\
&= ILA_+ \cos\left(\frac{\pi}{2V_\pi} S(t) - \frac{\pi}{4}\right) \cos[(\omega_0 + 3\omega_{L0})(t + t_d) + \phi_+(t + t_d)] + \\
&\quad + ILA_- \cos\left(\frac{\pi}{2V_\pi} S(t) - \frac{\pi}{4}\right) \cos[(\omega_0 - 3\omega_{L0})t + \phi_-(t)]
\end{aligned} \tag{A.2}$$

no qual: IL é a perda por inserção, V_π é a tensão de comutação do modulador óptico e $S(t)$ é o sinal elétrico OFDM aplicado no modulador.

A Equação A.3 representa o sinal óptico OFDM na saída da fibra [15]

$$\begin{aligned}
E_2(z, t) &= ILA_+ \cos\left(\frac{\pi}{2V_\pi} S(t - (\omega_0 + 3\omega_{L0})^{-1}\beta(\omega_0 + 3\omega_{L0})z) - \frac{\pi}{4}\right) x \\
&\quad x e^{-\gamma z} \cdot \cos[(\omega_0 + 3\omega_{L0})(t + t_d) - \beta(\omega_0 + 3\omega_{L0})z + \phi_+(t + t_d)] + \\
&\quad + ILA_- \cos\left(\frac{\pi}{2V_\pi} S(t - (\omega_0 - 3\omega_{L0})^{-1}\beta(\omega_0 - 3\omega_{L0})z) - \frac{\pi}{4}\right) x \\
&\quad x e^{-\gamma z} \cdot \cos[(\omega_0 - 3\omega_{L0})t - \beta(\omega_0 - 3\omega_{L0})z + \phi_-(t)]
\end{aligned} \tag{A.3}$$

Reescrevendo a Equação A.3, temos:

$$\begin{aligned}
E_2(z, t) &= B_+ \cos\left[(\omega_0 + 3\omega_{L0})(t + t_d) - \beta(\omega_0 + 3\omega_{L0})z + \phi_+(t + t_d)\right] + \\
&\quad + B_- \cos[(\omega_0 - 3\omega_{L0})t - \beta(\omega_0 - 3\omega_{L0})z + \phi_-(t)]
\end{aligned} \tag{A.4}$$

em que: $B_\pm = ILA_\pm \cos\left(\frac{\pi}{2V_\pi} S(t - (\omega_0 \pm 3\omega_{L0})^{-1}\beta(\omega_0 \pm 3\omega_{L0})z) - \frac{\pi}{4}\right) e^{-\gamma z}$

O sinal elétrico criado pelo fotodetector é representado pela Equação A.5 [15]

$$\begin{aligned}
I(t) &= \mu |E_2(z, t)|^2 = \\
&= \mu B_+ B_- \cos\left[\frac{6\omega_{L0}t + 3\omega_{L0}td - \beta(\omega_0 + 3\omega_{L0})z + \phi_+(t + t_d) - \phi_-(t)}{\beta(\omega_0 - 3\omega_{L0})z + \phi_+(t + t_d) - \phi_-(t)}\right]
\end{aligned} \tag{A.5}$$

Utilizando a relação: $\beta(\omega_0 \pm 3\omega_{L0}) = \beta(\omega_0) \pm 3\omega_{L0}\beta'(\omega_0) + \frac{1}{2}(3\omega_{L0})^2\beta''(\omega_0)$, a Equação A.5 pode ser reescrita como

$$I(t) = \mu B_+ B_- \cos\left[\frac{6\omega_{L0}t + 3\omega_{L0}td + \phi_+(t + t_d) - \phi_-(t) - 6\omega_{L0}\beta'(\omega_0)z}{\beta(\omega_0 - 3\omega_{L0})z + \phi_+(t + t_d) - \phi_-(t)}\right] \tag{A.6}$$

em que a eficiência do fotodetector é representada por μ .