

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica

Arthur Guimarães Bueno

**Múltiplo acesso em fronthaul óptico  
para arquiteturas híbridas C-RAN  
visando aplicação em Redes Móveis 5G**

Belo Horizonte

2023

Arthur Guimarães Bueno

## Múltiplo acesso em fronthaul óptico para arquiteturas híbridas C-RAN visando aplicação em Redes Móveis 5G

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Sistemas de Computação e Telecomunicações.

Linha de Pesquisa: Antenas, Propagação de Ondas de Rádio e Eletromagnetismo Aplicado.

Orientador: Andrea Chiuchiarelli

Belo Horizonte

2023

B928m	<p>Bueno, Arthur Guimarães.  Múltiplo acesso em fronthaul óptico para arquiteturas híbridas C-RAN visando aplicação em Redes Móveis 5G [recurso eletrônico] / Arthur Guimarães Bueno. - 2023.  1 recurso online (95 f. : il., color.) : pdf.</p> <p>Orientador: Andrea Chiuchiarelli.</p> <p>Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.</p> <p>Apêndices: f. 84-95.</p> <p>Bibliografia: f. 80-83.</p> <p>Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.</p> <p>1. Engenharia elétrica - Teses. 2. Sistemas de computação - Teses. 3. Telefonia móvel - Teses. 4. Telecomunicações - Teses. 5. Antenas - Teses. 6. Ondas de rádio - Propagação - Teses. I. Chiuchiarelli, Andrea. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.</p>
	CDU: 621.3(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

## FOLHA DE APROVAÇÃO

### "MÚLTIPLO ACESSO EM FRONTHAUL ÓPTICO PARA ARQUITETURAS HÍBRIDAS C-RAN VISANDO APLICAÇÃO EM REDES MÓVEIS 5G"

**ARTHUR GUIMARÃES BUENO**

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica. Aprovada em 27 de janeiro de 2023. Por:

Prof. Dr. Andrea Chiuchiarelli - DELT (UFMG) - Orientador

Prof. Dr. Alexandre de Almeida Prado Pohl - (UTFPR)

Dr. Tiago Sutili - (CPqD)



Documento assinado eletronicamente por **Andrea Chiuchiarelli, Professor do Magistério Superior**, em 01/02/2023, às 16:58, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Alexandre de Almeida Prado Pohl, Usuário Externo**, em 02/02/2023, às 10:17, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Tiago Sutili, Usuário Externo**, em 02/02/2023, às 15:23, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufmg.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **2040019** e o código CRC **852146EA**.

*Dedico este trabalho a minha família, que sempre me deu o suporte necessário para que meus sonhos se tornassem realidade.*

# Agradecimentos

Primeiramente, agradeço aos meus pais, Rogéria e Rogério, pelo suporte financeiro e emocional nestes anos de estudo, mesmo antes da pós-graduação. Agradeço aos meus tios, Ana Rosa, Giovane e Luiz Fernando, que, desde cedo, patrocinaram meus estudos e fizeram isto ser possível. Aos meus amigos de Sabará e do CEFET: meus conselheiros, companheiros e referências de onde eu queria chegar e como eu poderia passar pelos momentos mais difíceis. Agradeço também ao PPGEE pela oportunidade concedida, em especial aos professores Andrea, Cássio e Fernando pelos ensinamentos e lições aprendidas.

*“Se eu vi mais longe, foi por estar sobre ombros de gigantes.” — Isaac Newton*

# Resumo

*C-RAN (Centralized Radio Access Network)* é uma topologia de rede de acesso para telefonia móvel que centraliza o processamento de sinais de banda base em um só local e possui diversas vantagens para a aplicação no 5G (*NR*) e futuras gerações de redes móveis, dentre elas a redução dos custos *OPEX* e *CAPEX* para as operadoras. Com o advento das Redes de Quinta Geração, haverá uma demanda muito grande de novas estações rádio-base, devido ao uso de portadoras de frequência mais alta voltadas a atender um número expressivo de novos usuários impulsionados pela Internet das Coisas (*IoT*). O presente trabalho revisa as tecnologias atuais e mostra como o *C-RAN* pode ser vantajoso para as novas implantações na infraestrutura de rádio das operadoras de redes móveis. Para que o *C-RAN* seja viável, é necessário um estudo de viabilidade dos links de *fronthaul*. O trabalho explora cenários de comunicação em fibra, analisando o desempenho da rede óptica no *fronthaul* pela variação de parâmetros cruciais, como número de canais, potência dos lasers, comprimento da fibra e atenuação na fibra, sempre observando os impactos na taxa de erro de *bit*. Será proposto o estudo de caso de três topologias de rede óptica de acesso, comparando seus requisitos e desempenho. Adicionalmente, um modelo alternativo é proposto para a mitigação de interferência de múltiplo acesso, apresentando-se como uma alternativa viável para cenários futuros. Para o estudo dos modelos em análise, será utilizado o software *Optisystem*<sup>®</sup>, exportando os dados e analisando graficamente as curvas de desempenho.

Palavras-chave: *5G. Fronthaul. WDM. OFDMA. OCDMA.*

# Abstract

C-RAN is a network topology that centralizes the baseband processing signals at a single place and has several advantages for the application in 5G (NR) and future generations of mobile networks, among them being able to reduce the OPEX and CAPEX cost for mobile operators. With the advent of Fifth Generation Networks, there will be a very large demand for new sites due to higher frequency carriers and a significant number of new users due to the Internet of Things (IoT). This dissertation reviews current technologies and shows how C-RAN can be advantageous for new deployments in the radio infrastructure of mobile network operators. For C-RAN to be viable, a feasibility study of fronthaul links is necessary. The paper explores fiber communication scenarios, analyzing the performance of the optical network in the fronthaul by varying crucial parameters such as the number of channels, laser power, fiber length and fiber attenuation, always observing the impact on the bit error rate. A case study of three optical access network topologies will be proposed, comparing their requirements and performance. Additionally, an alternative model is proposed for the mitigation of multiple access interference, presenting itself as a viable alternative for future scenarios. For the study of the models under analysis, the Optisystem<sup>®</sup> software will be used, exporting the data and graphically analyzing the performance curves.

*Keywords: 5G. Fronthaul. WDM. OFDMA. OCDMA.*

# Lista de Ilustrações

Figura 1 – Arquitetura de Rede do <i>WCDMA</i> . . . . .	26
Figura 2 – Arquitetura de Rede do <i>LTE</i> . . . . .	27
Figura 3 – Comparação <i>D-RAN</i> (a) e <i>C-RAN</i> (b) . . . . .	31
Figura 4 – Funções principais de <i>BBU</i> . . . . .	32
Figura 5 – Diagrama para um sistema <i>PON</i> de três usuários . . . . .	33
Figura 6 – Simulação <i>TDM</i> utilizando modulação <i>OOK</i> baseada em <i>NRZ</i> . . . . .	46
Figura 7 – Diagrama de Olho (a) e Sinal no domínio elétrico <i>OOK NRZ</i> (b) . . . . .	47
Figura 8 – Simulação <i>TDM</i> utilizando modulação <i>PAM-4</i> . . . . .	47
Figura 9 – Diagrama de Olho (a) e Sinal no domínio elétrico <i>PAM-4</i> (b) . . . . .	48
Figura 10 – Simulação <i>TDM</i> comparando a escalabilidade <i>OOK x PAM-4</i> . . . . .	48
Figura 11 – Simulação <i>WDM</i> com modulação <i>RZ</i> para 4 canais . . . . .	50
Figura 12 – Visualizadores no Sistema <i>WDM-PON</i> . . . . .	50
Figura 13 – Gráfico de Log <i>BER</i> ( ) por Comprimento da Fibra (km) - Modulação <i>RZ</i> . . . . .	51
Figura 14 – Gráfico de Log <i>BER</i> ( ) por Comprimento da Fibra (km) - Modulação <i>NRZ</i> . . . . .	52
Figura 15 – Gráfico de Log <i>BER</i> ( ) por potência dos lasers de TX (dBm) - Modulação <i>RZ</i> . . . . .	52
Figura 16 – Gráfico de Log <i>BER</i> ( ) por potência dos lasers de TX (dBm) - Modulação <i>NRZ</i> . . . . .	53
Figura 17 – Esquema <i>CO-OFDM</i> com modulação <i>N-QAM</i> . . . . .	54
Figura 18 – Esquema transmissor coerente I-Q . . . . .	55
Figura 19 – Diagrama de Constelação do sinal <i>OFDM</i> . . . . .	55
Figura 20 – Diagramas de Constelação <i>QPSK</i> (a) e <i>16-QAM</i> (b) . . . . .	56
Figura 21 – Analisadores de Espectro na entrada da fibra (a) e na recepção (b) . . . . .	56
Figura 22 – Gráfico de <i>EVM</i> (%) por comprimento da fibra para as modulações <i>QPSK</i> e <i>16-QAM</i> . . . . .	57
Figura 23 – Gráfico de Log <i>BER</i> por comprimento da fibra para as modulações <i>QPSK</i> e <i>16-QAM</i> . . . . .	58
Figura 24 – Processo de codificação e decodificação no domínio do tempo . . . . .	60
Figura 25 – Processo de codificação e decodificação no domínio da frequência . . . . .	60
Figura 26 – Bloco Simulador de <i>Crosstalk</i> . . . . .	63

Figura 27 – Esquema para simular o <i>Crosstalk</i> em um Sistema <i>OOK-NRZ</i> não codificado . . . . .	64
Figura 28 – Esquema para simular o <i>Crosstalk</i> em no sistema <i>FE-OCDMA</i> proposto	64
Figura 29 – Comparação resiliência ao <i>Crosstalk</i> para sistemas <i>OCDMA</i> . . . . .	65
Figura 30 – Simulação de um sistema <i>FE-OCDMA</i> de 7 canais . . . . .	68
Figura 31 – <i>Encoder/Decoder</i> baseado em <i>FBG</i> . . . . .	68
Figura 32 – Diagrama de Olho e <i>Encoder</i> para o canal 1 . . . . .	69
Figura 33 – Gráfico de Log <i>BER</i> por largura de banda da frequência de corte dos <i>FBG's</i> para 7 canais de 200 Mbps . . . . .	70
Figura 34 – Gráfico de Log <i>BER</i> por largura de banda da frequência de corte dos <i>FBG's</i> para 7 canais de 400 Mbps . . . . .	70
Figura 35 – Gráfico de Log <i>BER</i> por comprimento de fibra em km variando de 1 a 7 canais de 200 Mbps para código <i>Walsh-Hadamard</i> . . . . .	71
Figura 36 – Gráfico de Log <i>BER</i> por comprimento de fibra em km variando de 1 a 7 canais de 400 Mbps para código <i>Walsh-Hadamard</i> . . . . .	72
Figura 37 – Gráfico de Log <i>BER</i> por Largura de banda da frequência de corte dos <i>FBG's</i> para 5 canais de 200 Mbps . . . . .	73
Figura 38 – Gráfico de Log <i>BER</i> por Largura de banda da frequência de corte dos <i>FBG's</i> para 5 canais de 200 Mbps . . . . .	74
Figura 39 – Diagrama de Olho e <i>Encoder</i> para o canal 1 . . . . .	74
Figura 40 – Gráfico de Log <i>BER</i> por Comprimento de Fibra em km variando de 1 a 7 canais de 200 Mbps para código M-Sequence . . . . .	75
Figura 41 – Gráfico de Log <i>BER</i> por Comprimento de Fibra em km variando de 1 a 7 canais de 400 Mbps para código M-Sequence . . . . .	76

# Lista de Tabelas

Tabela 1 – Tabela de Características das Redes PON . . . . .	36
Tabela 2 – Tabela de Códigos <i>Walsh-Hadamard</i> para 7 usuários com espaçamento de 0,5 nm . . . . .	67
Tabela 3 – Tabela de Comprimento de Onda de Corte dos <i>FBGs</i> . . . . .	67
Tabela 4 – Tabela de Códigos <i>LFSR</i> para 7 usuários com espaçamento de 0,5 nm .	73
Tabela 5 – Tabela de Parâmetros das Simulações . . . . .	84

# Lista de Algoritmos

1	Exportar datos . . . . .	44
---	--------------------------	----

# Lista de Abreviaturas e Siglas

AAU	<i>Active Antenna Unit</i>
AMPS	<i>Advanced Mobile Phone System</i>
APD	<i>Avalanche Photodiode</i>
BBU	<i>Baseband Unit</i>
BER	<i>Bit Error Rate</i>
BPON	<i>Broadband Passive Optical Network</i>
BTS	<i>Base Transceiver Station</i>
CAPEX	<i>Capital Expenditure</i>
CPRI	<i>Common Public Radio Interface</i>
C-RAN	<i>Centralized and Cloud Radio Acces Network</i>
CWDM	<i>Course Wavelength Division Multiplexing</i>
DBA	<i>Dynamic Bandwidth Allocation</i>
DEMUX	<i>Demultiplexer</i>
DL	<i>Downlink</i>
D-RAN	<i>Distributed Radio Access Network</i>
DWDM	<i>Dense Wavelength Division Multiplexing</i>
EDGE	<i>Enhanced Data for Global Evolution</i>
EPON	<i>Ethernet passive optical network</i>
FBA	<i>Fixed Bandwidth Allocation</i>
FBG	<i>Fiber Bragg Grating</i>
FDD	<i>Frequency Division Duplex</i>

FEC	<i>Forward Error Correction</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
FM	<i>Frequency Modulation</i>
FTTx	<i>Fiber to the x</i>
GCSN	<i>Gateway for General Packet Radio Services Support Node</i>
GMSC	<i>Gateway for Mobile Services Switching Centre</i>
GMSK	<i>Gaussian Modulation Shift Keying</i>
GPRS	<i>General Packet Radio Services</i>
GSM	<i>Global System for Mobile Communications</i>
HSS	<i>Home Subscriber Server</i>
IFFT	<i>Inverse Fast Fourier Transform</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
IMEI	<i>International Mobile Equipment Identity</i>
IMS	<i>Internet Protocol Multimedia Subsystem</i>
IMSI	<i>International Mobile Subscriber Identity</i>
LSFR	<i>Linear-feedback shift register</i>
MBH	<i>Mobile Backhaul</i>
MIMO	<i>Multiple-input and Multiple-output</i>
MFH	<i>Mobile Fronthaul</i>
MME	<i>Mobility Management Entity</i>
MSC	<i>Mobile Services Switching Centre</i>
MUX	<i>Multiplexer</i>
MZM	<i>Mach-Zehnder Modulator</i>
NRZ	<i>Non-return-to-zero</i>
OFDMA	<i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i>
OOC	<i>Optical Orthogonal Code</i>

OPEX	<i>Operational Expenditure</i>
OSNR	<i>Optical Signal-Noise Ratio</i>
OTN	<i>Optical Transport Network</i>
PAM	<i>Pulse Amplitude Modulation</i>
PAPR	<i>Peak-to-Average Power Ratio</i>
PC	<i>Prime Code</i>
PCRF	<i>Policy Control and Charging Rules Function</i>
PGW	<i>Packet Data Network Gateway</i>
PSK	<i>Phase Shift Keying</i>
PSTN	<i>Public Switched Telephone Network</i>
QCC	<i>Quadratic Congruence Code</i>
RAN	<i>Radio Access Network</i>
RBS	<i>Rayleigh Backscattering</i>
RF	<i>Radio Frequency</i>
RNC	<i>Radio Network Controller</i>
RoF	<i>Radio Over Fiber</i>
RRH	<i>Remote Radio Head</i>
RRU	<i>Remote Radio Unit</i>
RZ	<i>Return-to-zero</i>
SCR	<i>Signal-Crosstalk Ratio</i>
SGSN	<i>Serving General Packet Radio Services Support Node</i>
SGW	<i>Serving Gateway</i>
SIM	<i>Subscriber Identity Module</i>
SMF	<i>Single Mode Fiber</i>
SMS	<i>Short Message Service</i>
TCO	<i>Total Cost Ownership</i>

TDD	<i>Time Division Duplex</i>
TDMA	<i>Time Division Multiple Access</i>
TDM	<i>Time Division Multiplex</i>
TWDM	<i>Time and Wavelength Division Multiplexing</i>
UL	<i>Uplink</i>
UTRAN	<i>UMTS Terrestrial Radio Access Network</i>
VOA	<i>Variable Optical Attenuator</i>
WCDMA	<i>Wide-Band Code-Division Multiple Access</i>
WDM	<i>Wavelength Division Multiplexing</i>

# Lista de Símbolos

$\tau$	Atraso temporal
$\gamma$	Coefficiente de sensibilidade de fase do efeito Kerr
$\beta$	Constante de Propagação
$\lambda$	Comprimento de Onda
$\Delta_i$	Desvio de frequência do laser do usuário $i$
$n$	Índice de refração
$k$	Número de onda

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>20</b>
1.1	Relevância	20
1.2	Motivação, Problema e Soluções	21
1.3	Objetivos e Metas	22
1.4	Escopo da Pesquisa	22
1.5	Contribuições do Trabalho	23
1.6	Organização do Trabalho	23
<b>2</b>	<b>Fundamentos e Revisão Bibliográfica</b>	<b>24</b>
2.1	Estado da Arte: Redes móveis	24
2.1.1	Sistemas de Primeira Geração - 1G	24
2.1.2	Sistemas de Segunda Geração - 2G	25
2.1.3	Sistemas de Terceira Geração - 3G	25
2.1.4	Sistemas de Quarta Geração - 4G	27
2.1.5	Sistemas de Quinta Geração - 5G	28
2.2	Topologias de Rede de Acesso ( <i>RAN</i> )	29
2.2.1	<i>Distributed Radio Access Network (D-RAN)</i>	29
2.2.2	<i>Cloud/Centralized Radio Access Network (C-RAN)</i>	30
2.2.3	<i>Open Radio Access Network (O-RAN)</i>	33
2.3	Estado da Arte: <i>Passive Optical Network</i>	33
2.3.1	<i>BPON (Broadband Passive Optical Network)</i>	34
2.3.2	<i>EPON (Ethernet passive optical network)</i>	34
2.3.3	<i>GPON (Gigabit Passive Optical Network)</i>	34
2.3.4	<i>XGSPON</i>	35
2.3.5	<i>NG-PON2</i>	35
2.3.6	Tabela comparativa de Redes PON	35
2.4	Esquemas de múltiplo acesso em redes ópticas	36
2.4.1	<i>TDM (Time Division Multiplexing)</i>	36
2.4.2	<i>WDM (Wavelength Division Multiplexing)</i>	37
2.4.3	<i>TWDM (Time and Wavelength Division Multiplexing Passive Optical Network)</i>	39
2.4.4	<i>OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)</i>	40
2.5	Requisitos e desafios para os sistemas futuros	41
2.5.1	Exemplo de estrutura física e composição	41
2.5.2	<i>RAN</i> : requisitos, desafios e tecnologias	42
2.5.3	<i>Mobile Fronthaul (MFH)</i> : requisitos, desafios e tecnologias	42
<b>3</b>	<b>Modelos e Simulações de Fronthaul</b>	<b>44</b>

3.1	Modelo 1: <i>TDM-PON</i> . . . . .	45
3.1.1	Simulações . . . . .	45
3.1.2	Resultados . . . . .	47
3.2	Modelo 2: <i>WDM-PON</i> . . . . .	49
3.2.1	Simulação . . . . .	49
3.2.2	Resultados . . . . .	49
3.3	Modelo 3: <i>CO-OFDM-PON</i> . . . . .	53
3.3.1	Simulações . . . . .	53
3.3.2	Resultados . . . . .	56
<b>4</b>	<b>Desenvolvimento de sistema baseado em <i>OCDMA</i></b> . . . . .	<b>59</b>
4.1	Avanço da tecnologia <i>OCDMA</i> em fibra . . . . .	61
4.2	Benefícios do <i>OCDMA</i> em sistemas ópticos com reutilização de comprimento de onda . . . . .	61
4.3	Sistema <i>FE-OCDMA</i> baseado em códigos <i>Walsh-Hadamard</i> . . . . .	65
4.3.1	Simulações . . . . .	66
4.3.2	Resultados . . . . .	69
4.4	Sistema <i>FE-OCDMA</i> baseado em códigos <i>LFSR</i> . . . . .	72
4.4.1	Simulações . . . . .	72
4.4.2	Resultados . . . . .	72
<b>5</b>	<b>Conclusão</b> . . . . .	<b>77</b>
5.1	Trabalhos Futuros . . . . .	79
	<b>Referências</b> . . . . .	<b>80</b>
	<b>Apêndice A Parâmetros Exportados do Simulador</b> . . . . .	<b>84</b>

# Capítulo 1

## Introdução

Este capítulo foca na visão geral do trabalho, com destaque na importância do estudo levantado para a área de telecomunicações, em especial o ramo de redes de telefonia móvel. Apresenta-se também o propósito e escopo da pesquisa, bem como a organização do texto.

### 1.1 Relevância

As redes de telefonia celular estão em crescimento contínuo desde seu surgimento na década de 80. O primeiro sistema foi o *AMPS (Advanced Mobile Phone System)*, chamado 1G ou sistema de primeira geração. Desde então, o que se tratava de um serviço de transmissão e recepção de voz, passou por avanços significativos com o ingresso de novas funcionalidades. Com o advento da Internet, na palma da mão, os usuários conseguem acessar suas contas bancárias, fazer compras, assistir filmes e muito mais, tudo com um clique e em frações de segundo.

A evolução da demanda de dados móveis cresce de forma muito rápida. Em um contexto global, o tráfego de dados cresceu mais de 200 vezes de 2010 a 2020 e espera-se que até 2030 haja um crescimento de mais de 20000 vezes [Xiang et al., 2016]. Além do uso mais intenso dos usuários — com uma necessidade maior de banda e menor latência — é previsto para os próximos anos um aumento considerável de dispositivos conectados, em aplicações revolucionárias tais como carros autônomos que comunicam entre si em microssegundos, redes de energia elétrica inteligentes (*Smart Grids*), sistemas de monitoramento e controle em tempo real, entre outras. É previsto que se atinja a marca de 100 bilhões de dispositivos em rede em 2030, entre usuários móveis e dispositivos *IoT* [Xiang et al., 2016].

Para ir de encontro às demandas crescentes e para a sustentabilidade de novas aplicações em rede, será necessária a implantação de um grande número de estações de rádio para redes de acesso móveis 5G. As novas aplicações necessitam de parâmetros de desempenho superiores às tecnologias anteriores: maior capacidade de tráfego (chamado

*throughput*), menor latência, menor variação de atraso (chamado *jitter*), maior confiabilidade e disponibilidade de serviço e mais. Para que as futuras implantações de redes de acesso sejam viáveis, é necessário o estudo de técnicas que permitam otimizar o custo de *CAPEX* (*Capital Expenditure*) e *OPEX* (*Operational Expenditure*), dado que um número elevado de novas estações necessita ser implementado.

No tema específico sobre aumento do *throughput*, a estratégia padrão nas técnicas de rádio propagação é de trabalhar com faixas de frequência ainda inocupadas, sendo sempre frequências mais elevadas do que as de sistemas atuais. Um espectro inocupado oferece menor interferência entre serviços e permite um uso de largura de banda maior por serviço, permitindo assim o aumento da capacidade deste canal. O problema central é que frequências maiores sofrem maiores atenuações no espaço livre, o que se traduz em um menor alcance. Portanto, para que a operadora de telefonia móvel possa oferecer uma mesma área de cobertura, mais estações de rádio devem ser implantadas em uma mesma região. Este fato traz um custo elevado para as operadoras, dado que as antenas são usualmente interconectadas por redes ópticas, demandando um aumento na sua capilaridade e capacidade e, conseqüentemente, maiores custos de instalação e operação para tais redes.

Existem algumas estratégias para superar o desafio exposto anteriormente. Uma delas, que será descrita no Cap. 2, a chamada topologia *C-RAN*. Esta topologia de rede de acesso visa centralizar os recursos de banda base (*BBUs*) em um escritório principal (*Central Office*) para serem compartilhadas para várias estruturas de rádio, permitindo que diferentes serviços utilizem um mesmo enlace de fibra, chamado de *fronthaul*. Estes diferentes serviços de diferentes operadoras podem ser gerenciados pelos times de Operação e Manutenção (OEM) por virtualização das *BBUs* em ambiente em nuvem.

A viabilização do *C-RAN* não é trivial e até o momento não foi padronizada pelos órgãos normativos como o ITU-T e o 3GPP. Para que múltiplos serviços possam compartilhar um mesmo sistema óptico, é necessário implementar técnicas de múltiplo acesso em fibra no *fronthaul*, analisando cada cenário.

## 1.2 Motivação, Problema e Soluções

Tendo em vista a constante e rápida evolução do mundo digital, em especial os sistemas de telecomunicação, existe uma necessidade de revisar, viabilizar e implementar tecnologias de rede de comunicação que possam acompanhar a grande demanda de dados e aplicações da sociedade moderna.

Os sistemas de rede de comunicações móveis não são diferentes. Os sistemas *5G NR* (*New Radio*) já estão sendo implantados no mundo todo e, no Brasil, a ANATEL licenciou e leiloou as bandas para uso das operadoras. Várias frentes buscam normatizar

as tecnologias, como o ITU-T e o 3GPP. Entretanto, há muito o que ser desenvolvido.

Acerca dos sistemas *C-RAN*, que serão descritos com mais detalhes no Cap. 2, existem uma série de soluções ainda indefinidas pelos órgãos normativos, portanto, sem produtos definidos na indústria de telecomunicações.

Este trabalho visa um levantamento do estado da arte e propõe soluções tangendo os links de *Fronthaul* dos sistemas 5G e futuros sistemas, visando a topologia *C-RAN* e sempre considerando os requisitos previstos pela academia, normativo e indústria.

### 1.3 Objetivos e Metas

O trabalho em questão visa modelar e analisar o desempenho de diversos sistemas de múltiplo acesso em fibra óptica, considerando a variação de diversos parâmetros do sistema como: taxa de *bits*, comprimento da fibra, atenuação causada pelos divisores ópticos que alimentam os sistemas de *RF*, potência de transmissão dos *lasers*, entre outros parâmetros.

A análise de viabilidade se dá pelo compromisso de cada uma dessas técnicas. Cada uma delas tem vantagens e desvantagens que devem ser consideradas em projeto. Neste trabalho serão considerados os principais esquemas de múltiplo acesso em fibra para (*PON (Passive Optical Network)*): *TDM (Time Division Multiplexing)*, *WDM (Wavelength Division Multiplexing)* e *OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)*. Todos os modelos são simulados através do *Optisystem*<sup>®</sup>, um software capaz de simular sistemas de comunicação óptica com certa versatilidade e, de forma completa, permite emular parâmetros reais de componentes e visualizar os sinais transmitidos e recebidos.

Em adição aos sistemas clássicos modelados, será proposto também um sistema de caráter inovador, pouco explorado em sistemas ópticos de comunicação até então. O sistema se baseia em *OCDMA*, uma técnica muito utilizada em sistemas de comunicação sem fio, porém pouco usual em enlaces ópticos. Será descrito e analisado como os demais e demonstra ir de encontro aos critérios futuros, com grande eficiência espectral, baixo consumo energético, bem como baixo custo econômico e computacional.

### 1.4 Escopo da Pesquisa

Os modelos foram elaborados através do programa *Optisystem*<sup>®</sup>, considerando parâmetros comerciais de *lasers*, fibras ópticas, detectores, multiplexadores, entre outros.

Para uma análise mais completa, foi construído um código em *Vbscript* capaz de variar diversos parâmetros simultaneamente e exportar todos os dados para uma planilha. Assim, pode-se observar como o desempenho (*BER*, *OSNR*) se altera com a variação dos

parâmetros como comprimento da fibra, potência dos lasers e atenuação de sinal no enlace.

## 1.5 Contribuições do Trabalho

Tem-se como principal contribuição deste trabalho:

- Revisão bibliográfica acompanhando a evolução dos sistemas de rede de acesso móvel e de redes ópticas passivas;
- Revisão bibliográfica de técnicas de múltiplo acesso em fibra;
- Construção de modelos na plataforma *Optisystem*<sup>®</sup>, com parâmetros reais e mediadores semelhantes aos encontrados em laboratório;
- Análise de desempenho e compromisso dos sistemas simulados, por *Script* em *VBScript*;
- Idealização, modelagem e análise de desempenho de um sistema baseado em *OCDMA*;
- Publicação de artigo ao Congresso Internacional de Óptica e Fotônica — SBPhoton, publicado no *IEEE*, apresentando o sistema *OCDMA* proposto [Bueno and Chiuchiarelli, 2022].

## 1.6 Organização do Trabalho

Este trabalho foi dividido em cinco capítulos, conforme a descrição abaixo:

1. Introdução;
2. Revisão bibliográfica e Estado da Arte;
3. Simulação através do software *Optisystem*<sup>®</sup>, do *Mobile Fronthaul (MFH)* a partir de três topologias de rede de acesso passivas em domínio óptico (*Passive Optical Network — PON*): *TDM-PON*, *OFDM-PON* e *WDM-PON*;
4. Proposta de um sistema inovador baseado em *OCDMA* que apresenta vantagens aos sistemas propostos anteriormente e analisando seu desempenho em ambiente simulado;
5. Considerações finais e trabalhos futuros.

# Capítulo 2

## Fundamentos e Revisão Bibliográfica

Este capítulo é dedicado a revisar os fundamentos utilizados nesta dissertação, bem como descrever a evolução das tecnologias de redes de acesso sem fio e em fibra. Além disso, uma breve revisão sobre técnicas de múltiplo acesso é apresentada.

### 2.1 Estado da Arte: Redes móveis

Nas próximas seções serão revisados os aspectos de evolução das gerações de tecnologia móvel, desde a primeira geração (*AMPS*) até a quarta geração - *LTE* (*Long Term Evolution*), com foco na rede de acesso sem fio. Em seguida, será mostrado como os sistemas de quinta geração trarão uma grande revolução, requerendo técnicas inovadoras em um cenário de altíssima demanda. Será mostrado como essas redes são formadas e os elementos principais, mostrando a evolução tecnológica ao longo das gerações.

#### 2.1.1 Sistemas de Primeira Geração - 1G

Os sistemas de primeira geração foram denominados como *AMPS* (*Advanced Mobile Phone System*). Lançado em 1980, o sistema utilizava modulação analógica *FM*, juntamente com a técnica *FDMA* (*Frequency Division Multiple Access*) na rede de acesso tanto no *downlink* (DL) quanto no *uplink* (UL), em *FDD* (*Frequency Division Duplex*), trabalhando na faixa de 820 MHz com largura de banda de 30 kHz [Lopa and Vora, 2015]. Era um sistema totalmente analógico que permitia apenas comunicação de voz em *full-duplex*.

Neste sistema foram evidenciados problemas de segurança da informação. As portadoras desta tecnologia trabalhavam em espectro aberto, sem qualquer tipo de codificação ou criptografia. Portanto, para escutar as ligações telefônicas de um dado usuário, bastaria sintonizar um receptor na frequência de portadora desejada.

A rede de acesso deste sistema era diretamente integrada à *PSTN* (*Public Switched*

*Telephone Network*), a conhecida rede telefônica cabeada.

### 2.1.2 Sistemas de Segunda Geração - 2G

Este sistema de telefonia celular, denominado *GSM (Global System Mobile)*, foi disponibilizado comercialmente em 1991. Foi o primeiro sistema a permitir o uso de Internet, com capacidade de enviar e receber mensagens de texto e imagens, a uma taxa de até 144 kbps [Lopa and Vora, 2015].

O *GSM* solucionou algumas limitações do seu antecessor. Foi o primeiro sistema que utilizava modulações digitais. Além disso, sanou os problemas iniciais de segurança, oferecendo encriptação digital no sinal de rádio. Neste marco, houve a implantação do *SMS (Short Message Service)*, que permite mensagens de texto através da rede telefônica.

Neste sistema, os canais de voz são digitais e sinalizam o começo da transição de circuitos virtuais para comutação de pacotes. O *GSM* passou também por alguns marcos importantes desde sua primeira versão. Inicialmente, o múltiplo acesso de usuários se dava por *TDMA (Time Division Multiple Access)*, porém com sua versão melhorada, o *GPRS (General Packet Radio Service)*, taxas de até 160 kbps poderiam ser atingidas, além do primeiro marco de uso de *CDMA (Code Division Multiple Access)* na rede de acesso e modulação *GMSK (Gaussian Minimum Shift Keying)*.

Além do *GPRS*, este sistema recebeu uma segunda melhoria, chamado de *EDGE (Enhanced Data Rates For GSM Evolution)*. O *EDGE* pode melhorar as taxas de download do *GPRS*, chegando a 500 kbps, através de modulação *8-PSK (Phase-shift Keying)*. A modulação de 3 bits por símbolo é um marco que mostra como modulações de ordem mais alta permitem um aumento de taxa de bit utilizando uma mesma banda, o que otimiza a utilização do canal [Bhandari et al., 2017]. Ao utilizar taxas simbólicas mais altas, é possível obter maior eficiência espectral, ou seja, transmitir mais dados utilizando a mesma banda.

### 2.1.3 Sistemas de Terceira Geração - 3G

Este marco foi chamado de *UMTS (Universal Mobile Telecommunication System)*. A tecnologia surgiu no ano 2000 e conta com taxas de até 3 Mbps, baseado em comutação de circuitos virtuais e também de pacotes. Ela utiliza a técnica *WCDMA (WideBand Code Divison Multiple Access)* para o múltiplo acesso na rede sem fio [Bhandari et al., 2017].

Com o surgimento desta tecnologia, houve uma viabilização para envio e recebimento de fotos, vídeos e músicas pela rede móvel. Neste marco a estação de rádio é chamada de *NodeB*, que se comunica com o elemento controlador da rede de *Core* denominado *RNC (Radio Network Controller)*. O *RNC* é responsável pelo controle de fluxo de dados das

*NodeB*'s, admissão de novos usuários na rede e controle de códigos no *uplink* do *WCDMA* [Holma and Toskala, 2004].

A Figura 1 exibe, de forma simplificada, a arquitetura de rede de acesso do *UMTS* desde o usuário final (*UE (User End)*) até a rede de *Core* e integração com a rede telefônica chaveada (*PSTN*) e Internet.

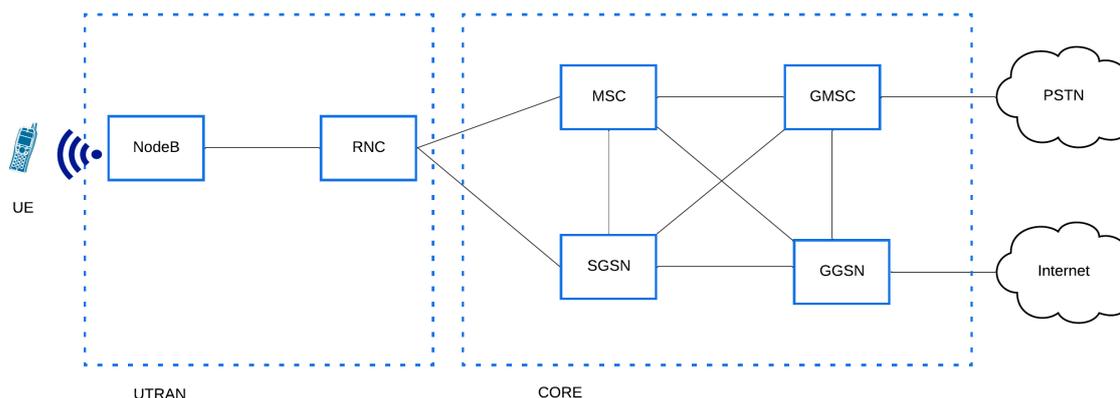


Figura 1 – Arquitetura de Rede do *WCDMA*

Fonte: Adaptado de Holma and Toskala [2004]

Abaixo será listado cada um dos blocos e suas funções básicas na rede, conforme aponta Holma and Toskala [2004]:

- *UE (User End)*: O usuário final é aquele que utiliza a rede da operadora de telefonia móvel, geralmente por aparelhos celulares com um cartão *SIM (Subscriber Identity Module)*. Sua entidade possui dois registros na rede: o *IMEI (International Mobile Equipment Identity)* e o *IMSI (International Mobile Subscriber Identity)*. Cada *UE* é conectada à interface sem fio da *NodeB* mais próxima através do indicador de potência recebida (*RSSI (Received Signal Strength Indication)*);
- *NodeB*: é a estação rádio-base do *UMTS*. Estabelece a conexão do *UE* através da rede sem fio e comunica com o *RNC* e a rede de *Core*;
- *RNC (Radio Network Controller)*: o *RNC* gere todos os recursos de rádio, além de controlar o acesso dos *UE* e das *NodeB*'s à rede de *Core*;
- *MSC (Mobile Services Switching Centre)*: *Switch* e servidor de base de dados que armazena e gere as localidades dos *UE*'s para gestão de *handover*, além de gerir a comutação de circuitos virtuais;
- *GMSC (Gateway MSC)*: *Switch* que faz a interface com a *PSTN* para interface de circuitos virtuais;

- *SGSN (Serving GPRS Support Node)*: semelhante ao *MSC*, porém para a aplicação de rede de comutação de pacotes;
- *GGSN (Gateway GPRS Support Node)*: *Switch* que faz a interface com a internet para a interface de comutação de pacotes;
- *PSTN (Public Switched Telephone Network)*: Rede chaveada de telefonia fixa.

### 2.1.4 Sistemas de Quarta Geração - 4G

Sistema conhecido como *LTE (Long Term Evolution)*, é amplamente utilizado nos smartphones. Conta com taxas de download de até 300 Mbps com largura de banda de até 20 MHz, viabilizando assim o uso de serviços de maior consumo de dados como serviços de *streaming* de vídeo e videochamadas. Os canais podem ser *TDD* ou *FDD* dependendo da configuração desejada.

Ao contrário de seu predecessor *WCDMA*, o *LTE* utiliza *OFDM* para o múltiplo acesso no *downlink* nas redes de acesso *RAN*, contando com até 1200 subportadoras com 15 kHz de espaçamento. O *LTE* também introduziu a aplicação de *MIMO*, utilizando arranjo de antenas e rádios, a fim de maximizar o *throughput* para o usuário [Bjerke, 2011].

A Figura 2 mostra a estrutura de Rede de Acesso e Core para o *LTE*. A seguir será exibido as funções básicas de cada bloco conforme Sesia et al. [2009] :

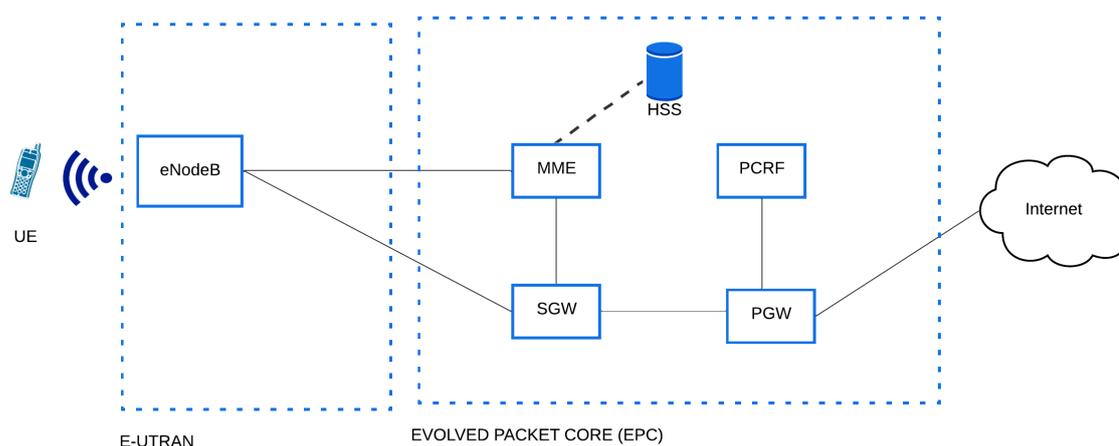


Figura 2 – Arquitetura de Rede do *LTE*

Fonte: Adaptado de Sesia et al. [2009]

- *eNodeB*: De forma semelhante ao seu predecessor, o *eNodeB* tem como função estabelecer a conexão sem fio entre o *UE* e o *Core EPC*;

- *MME (Mobility Management Entity)*: o *MME* é responsável pelo controle e sinalização entre o *UE* e a rede de Core. O *MME* estabelece a conexão segura do usuário e faz o controle de mobilidade deste usuário para efetuação de *Handover* entre *eNodeB's*;
- *HSS (Home Subscriber Server)*: O *HSS* é a base de dados que suporta as entidades do *IMS* para a tratativa de chamadas e sessões. Ele contém perfis de usuários, realiza a autenticação e autorização do *UE*, além de fornecer informações sobre a localização física deles;
- *SGW (Serving Gateway)*: o *SGW* gere toda a parte de comunicação *IP*, além de servir de *buffer* para o *downlink* ao *MME*, detecção de usuários inativos e funções administrativas como taxaço de consumo do *UE* e gerir interceptações legais;
- *PGW (Packet Data Network Gateway)*: o *PGW* é responsável pelo endereçamento de *IP's* das *UE's*, aplicação de políticas de *QoS* e governança aplicada pelo *PCRF*;
- *PCRF (Policy Control and Charging Rules Function)*: o *PCRF* é responsável pela política de controle e tomada de decisão da rede no que diz respeito a *QoS*. Este servidor trata de controlar o fluxo de dados para garantir a qualidade da rede a todos.

### 2.1.5 Sistemas de Quinta Geração - 5G

5G NR (New Radio) é um padrão de comunicação sem fio para a quinta geração, com o objetivo de fornecer velocidades de dados mais rápidas, latência reduzida, maior confiabilidade e maior densidade de dispositivos do que os padrões anteriores de comunicação sem fio. É um componente da arquitetura de rede móvel 5G, operando em ambas as faixas de frequência sub-6 GHz e mmWave. O 5G tem algumas premissas, como:

- **Taxas de Dados Multi-Gbps**: Quando comparado aos padrões de comunicação sem fio anteriores, o 5G NR permite velocidades de transferência de dados muito mais altas, com taxas de pico de dados de até 20 Gbps nas faixas de frequências milimétricas (mmWave).
- **Baixa latência**: o 5G NR visa trabalhar em um sistema de baixa latência, com atrasos de menos de 4 ms, viabilizando aplicações como jogos em tempo real, veículos autônomos, cirurgia remota, controle industrial online, sistemas de realidade virtual e aumentada, entre outros.
- **Aumento Conectividade de dispositivos simultâneos**: O padrão 5G NR fornece conectividade maciça de dispositivos, permitindo que até 1 milhão de dispositivos por  $km^2$  sejam conectados, sendo crítico para cenários futurísticos com cidades

inteligentes, residências inteligentes e aplicações industriais de Internet de alta velocidade.

- Segurança aprimorada: O 5G NR contém recursos de ciber-segurança aprimorados como separação do plano do usuário (U-PLANE) do plano de controle (C-PLANE), redes virtualizadas, e aplicação de protocolos de criptografia e autenticação.
- Conformação de feixe: As tecnologias avançadas de formação de feixe são usadas em 5G NR para aumentar a qualidade do sinal, eliminar interferências e ampliar a cobertura, direcionando o feixe em direção ao usuário móvel.

Entretanto, para se atingir estas premissas, um grande desafio tecnológico precisa ser superado em toda a rede, desde a camada física até a camada de aplicação.

Para superar esses desafios, diversas frentes de pesquisa foram criadas. Órgãos normatizadores, iniciativas público-privadas e pesquisadores da academia e da indústria têm trabalhado ano após ano para que os objetivos iniciais sejam alcançados, dentre eles o ITU-R , 3GPP, Ministério da Ciência e Tecnologia da China, o núcleo de pesquisa China Mobile e os principais fabricantes do mercado de telecomunicações (Huawei, Ericsson e Nokia) [Xiang et al., 2016, Jaffer et al., 2020].

## 2.2 Topologias de Rede de Acesso (*RAN*)

Esta seção mostra o comparativo entre as duas topologias de rede de antenas de rádio, exibindo prós e contras de cada uma. *D-RAN* é a topologia tradicionalmente utilizada atualmente, com o processamento de banda-base no site. *C-RAN* é uma idealização inovadora, que propõe a utilização de um conjunto de *BBUs* , chamado de *BBU Pool* em um *datacenter*, geralmente chamado de *Central Office*.

### 2.2.1 *Distributed Radio Access Network (D-RAN)*

Na topologia *D-RAN* , as estações de rádio são chamadas de *Node-b (3G)* ou *eNode-b (4G)* ou *gNode-b (5G)*, compostas por uma ou mais *BBU* dedicada para cada conjunto de *RRUs* e antenas. O consumo de energia elétrica é alto, por manter energizado todo o sistema de banda base e de RF. Além disso, há o custo associado à instalação e manutenção destes ativos que se encontram no *site*. Um grande espaço físico é necessário para instalar quadros de energia, gabinetes externos, bases de concreto, esteiramento, caixas de passagem, entre outras complicações de infraestrutura.

No *C-RAN*, as *BBUs* são concentradas em um *Central Office*, em conjunto (também chamado de *Cluster* ou *Pool*). O site é composto apenas pelos elementos de RF, consumindo menos energia elétrica por site e ocupando um espaço físico menor, o

que também reduz custos, pois os espaços são geridos por empresas específicas, chamadas detentoras.

A adoção da topologia *C-RAN* possui vantagens significativas que justificam sua adoção, dentre as principais:

- Menor custo *CAPEX* e *OPEX* para as operadoras;
- Menor consumo de energia por *site*;
- Virtualização permite vários serviços para uma mesma *RAN*, permite uma infraestrutura de RF unificada e simplificada.

A arquitetura *C-RAN* é padronizada conforme regulação do 3GPP TR 38.801 - *Release 14*. Conforme a Figura 3 (b), observam-se duas unidades distintas chamadas de *Centralized Unit (CU)* e *Distributed Unit (DU)*. A norma ainda sugere algumas opções de funções lógicas entre as unidades, o que ainda não foi totalmente definido pelo 3GPP. Com a implementação da *DU*, surge o enlace óptico intermediário entre *CU* e *DU* chamado de *midhaul*.

Como mostra a rede na totalidade na Figura 3, as topologias *RAN* são compatíveis entre si e podem ser integradas à mesma rede de *Core*, ou seja, utilizar os links de *backhaul* existentes. Contudo, para a conexão do *BBU pool* até o *backbone*, é necessário um enlace óptico de maior robustez, devido ao intenso tráfego processado pelo *pool*.

A Fig. 4 exibe, de forma sintética, as funções exercidas em um site tradicional, com a *BBU* na estação para o *D-RAN*. Já para o caso do *C-RAN*, a norma do 3GPP TR 38.801 R14 permite opções de flexibilização dessas funções lógicas entre ao *DU* e o *CU*.

### 2.2.2 *Cloud/Centralized Radio Access Network (C-RAN)*

*C-RAN*, também chamado de *Cloud RAN* ou *Centralized RAN*, é uma topologia de rede que vem sendo cotada para o uso nas redes 5G devido à sua capacidade de compartilhar recursos de uma *BBU* para um conjunto de sistemas irradiantes em localidades distintas dentro de um raio de até 20 km. A ideia é utilizar a alocação de vários canais em domínio óptico no *fronthaul*, o que permite que serviços distintos compartilhem o mesmo sistema de *RF*.

Tipicamente, nos dias atuais, este sistema irradiante é composto por uma *RRU* (*Remote Radio Unit*) juntamente com uma antena do tipo painel. As soluções de *RF* em redes de acesso para o 5G incluem um novo conceito de dispositivo, chamada *AAU* (*Active Antenna Unit*), que possui integrada em um só hardware um conjunto de antenas planas (8x8, 16x16, 32x32, etc) juntamente com o processamento de *RF*, que permite, em um

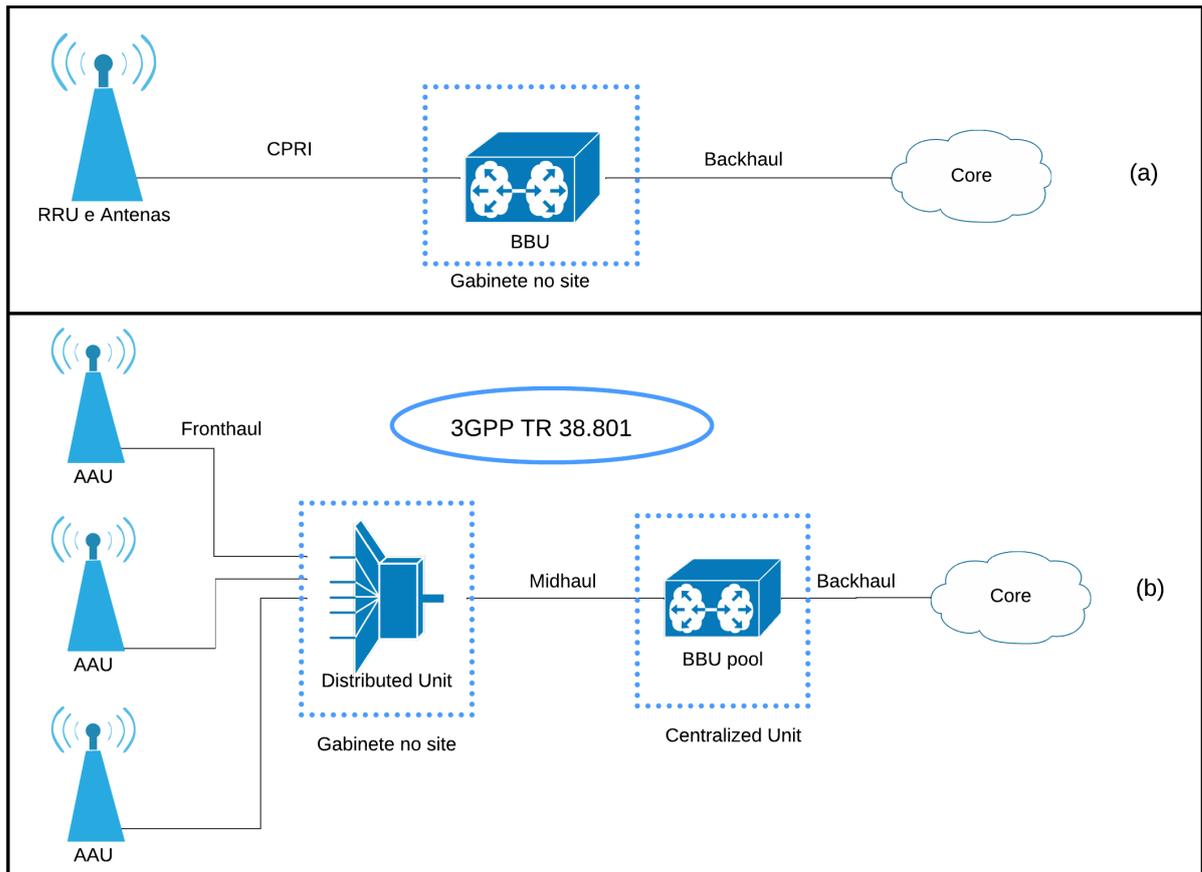


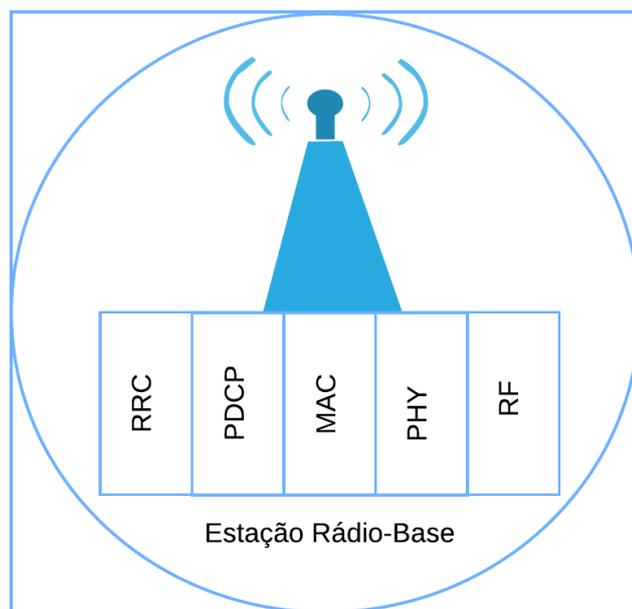
Figura 3 – Comparação *D-RAN* (a) e *C-RAN* (b)

produto simples e compacto, um sistema *MIMO* mais robusto e que maximiza a eficiência espectral. Este sistema *MIMO* com muitos elementos é chamado de *Massive MIMO*.

Além das altas taxas de *UL* e *DL*, é possível direcionar feixes para usuários específicos, com a técnica chamado de conformação de feixe. Para a simplificação da análise, o sistema irradiante como um todo será denominado como *RRH*. A bibliografia sugere que a adoção de *C-RAN* pode reduzir de 50 a 70 % do *TCO*, custo total que envolve o *CAPEX* e *OPEX* para as operadoras [Xiang et al., 2016, Jaffer et al., 2020].

A Fig. 3 (b) mostra, de forma simplificada, como é a arquitetura *C-RAN*, mostrando as funções em blocos. Nesta topologia, o tratamento de banda-base é concatenado em um conjunto de *BBUs*, onde os recursos podem ser compartilhados entre elas de forma inteligente. Esta comutação e reaproveitamento de recursos não é trivial, o que faz este desafio ser explorado por diversos autores [Sahu et al., 2017, Mo et al., 2018, Li et al., 2018]. Conforme sugere Mo et al. [2018], o modelamento de realocação de recursos pode ser feito através de uma rede neural profunda, o que demonstra o nível de complexidade nesta tarefa.

Conforme as funções lógicas indicadas na Figura 4, descreve-se abaixo algumas funções principais segundo padronizações do 3GPP:



*RRC: Radio Resource Control; PDCP: Packet Data Convergence Protocol; MAC: Medium Access Control; PHY: Physical Layer; RF: Radio Frequency*

Figura 4 – Funções principais de *BBU*

- *RRC (Radio Resource Control)*: *RRC* é um protocolo de controle de recursos de rádio na interface de conexão sem fio com o *UE*. As mensagens *RRC* são transportadas pelo protocolo *PDCP*. O protocolo *RRC* tem como função principal estabelecer a conexão com o usuário, transmitir informações do sistema, e controlar a potência do sistema de RF. Para o *UMTS* o padrão 3GPP é o TS 36.331, para o *LTE* e para o *NR* o padrão é o TS 38.331.
- *PDCP (Packet Data Convergence Protocol)*: o *PDCP* carrega as mensagens *RRC* além de transferir os dados do usuário e de controle, inserir compressão, encriptação e aplicação de proteção dos dados enviados. O padrão do 3GPP deste protocolo é o TS 25.323 para o *UMTS*, TS 36.323 para o *LTE* e TS 38.323 para o *NR*.
- *MAC (Medium Access Control)*: é a subcamada de rede responsável por controlar o hardware para a transmissão de dados via sinais ópticos ou sem fio;
- *PHY (Physical Layer)*: Camada física de transmissão de dados;
- *RF (Radio Frequency)*: Sinais de rádio-frequência e tratamento de processamento de sinais analógico-digitais.

### 2.2.3 Open Radio Access Network (O-RAN)

O *Open RAN* é um movimento que visa democratizar as redes de acesso para novos fabricantes, operando em plataforma aberta. A ideia é eliminar a dependência com os grandes fabricantes que dominam o mercado, dado que o número de estações deve crescer fortemente no futuro, pois os sistemas 5G e futuros sistemas operam sempre em frequências mais altas. Como frequências mais altas tem menor alcance de propagação, mais estações seriam necessárias para uma mesma área de cobertura.

## 2.3 Estado da Arte: *Passive Optical Network*

Esta seção irá revisar de forma breve os marcos da evolução da tecnologia de acesso óptico passivo *PON*. Os sistemas *PON* são amplamente usados por provedores de internet *FTTx* (*Fiber to the X*) e por operadoras de telefonia móvel e grandes empresas nas redes *MAN* (*Metropolitan Area Network*).

Os sistemas *PON* são compostos por alguns elementos principais, conforme exemplo ilustrado pela Fig. 5. O elemento central da rede, que fica em um *Central Office* chama-se *OLT* (*Optical Line Terminal*). Na transmissão temos elementos fibras monomodo e divisores ópticos. O cliente final utiliza o equipamento de usuário final chamado de *ONU* (*Optical Network Unit*).

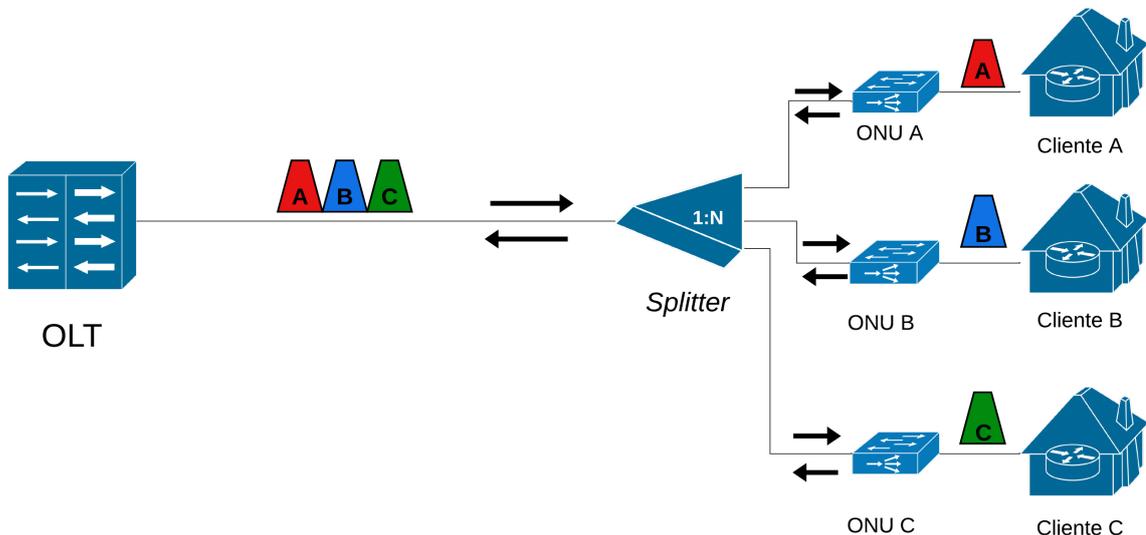


Figura 5 – Diagrama para um sistema *PON* de três usuários

Existem duas variantes comuns de *PON*: *PON* baseado em arquitetura ponto-multiponto (*P2MP*) e baseado em arquitetura ponto-a-ponto (*P2P*). As *PONs* *P2MP* são a versão mais comum, nas quais um único *OLT* fornece serviços de banda larga para vários usuários através de um divisor óptico passivo. Essa arquitetura é adequada para

serviços de acesso residencial e empresarial, onde o tráfego de retorno é limitado. Já as *PONs P2P*, como a *XG-PON* e *NG-PON2*, usam um par dedicado de fibras para cada assinante e proporcionam maiores capacidades de largura de banda simétrica, tornando-as adequadas para aplicações que exigem alta capacidade de tráfego, como serviços de dados em nuvem, vídeo em alta definição, e telemedicina.

As Redes PON oferecem diversas vantagens, como:

- Baixo custo de implantação e manutenção;
- Baixa complexidade, com menos componentes ativos, reduzindo a chance de falhas;
- Maior capacidade de largura de banda compartilhada, possibilitando uma melhor alocação de recursos de rede em relação a outras tecnologias de acesso.

### 2.3.1 *BPON (Broadband Passive Optical Network)*

Primeiro sistema de redes ópticas passivas que surgiu na década de 1990. Este sistema foi baseado no *ATM* para que assim fosse integrado às redes *ADSL*.

O padrão *BPON* foi padronizado pelo ITU-T G.983, trabalhando com velocidades de 622 Mbps no *DS* e 155 Mbps no *US*. O sistema suporta distâncias de até 20 km e 32 divisões [Keiser, 2013]. Em uma rede *BPON*, um único comprimento de onda é utilizado para transmitir os dados de *US* e *DS*. Isso significa que a largura de banda é compartilhada entre todos os usuários conectados à rede. Cada usuário recebe um intervalo de tempo para transmitir seus dados de *US*, multiplexados em um único canal óptico e transmitidos ao servidor central.

### 2.3.2 *EPON (Ethernet passive optical network)*

Surge nos anos 2000 com o propósito de desvincular o serviço do protocolo *ATM*. Neste marco, o sistema *EPON* passa a comunicação via protocolo *Ethernet*, o que formou o nome de *EPON - Ethernet Passive Optical Network*. Foi também o primeiro sistema a trabalhar com o conceito ponto-multiponto em fibra [Jr, 2006].

O padrão de recomendações é normatizado pelo *IEEE 802.3av*. Conta com 1 Gbps tanto no *US* quanto no *DS*. Possui alcance de 20 km e pode trabalhar com 32 divisões [Keiser, 2013].

### 2.3.3 *GPON (Gigabit Passive Optical Network)*

Com a necessidade crescente de maiores taxas em fibra, surgiu o *GPON - Gigabit Passive Optical Network* em 2004. O *GPON* trabalha com taxas de até 2,5 Gbps no *DS* e até 1,25 Gbps no *US*.

O padrão recomendado é o ITU-T G.984 e pode alcançar até 20 km para 64 divisões possíveis. Tipicamente, utiliza os comprimentos de onda na faixa de 1550 nm para o *DS* e 1310 nm para o *US*.

Em uma rede GPON, cada usuário é identificado por um identificador de usuário GPON (GEM Port ID) exclusivo e tem sua própria largura de banda dedicada para upstream e downstream. Isso permite que os usuários acessem a rede de forma independente, sem compartilhar largura de banda com outros usuários. Além disso, a largura de banda total de uma rede GPON é compartilhada dinamicamente entre os usuários, de acordo com suas necessidades. Este marco torna a tecnologia adequada para implantações em áreas urbanas e rurais. Além disso, o GPON suporta a transmissão de serviços de voz, vídeo e dados em uma única conexão, o que reduz a necessidade de diferentes redes para diferentes serviços.

#### 2.3.4 *XGSPON*

Este novo marco é uma evolução do seu antecessor, o *GPON*, devido às demandas crescentes no mercado de redes ópticas. O sistema surgiu em 2016, uma evolução do *XG-PON* que suportava taxas assimétricas de 10 Gbps no *DS* e 2,5 Gbps no *US*, marco atingido em 2012.

Este sistema é normatizado pelo ITU-T G.987, suportando taxas simétricas de *US* e *DS* de 10 Gbps, com alcance máximo de 40 km e 128 divisões [Nashiruddin and Solihah, 2020].

#### 2.3.5 *NG-PON2*

Este é o sistema mais atual e com maior capacidade, normatizado pelo ITU-T G.989 em 2019. O sistema consegue atingir taxas simétricas de 80 Gbps e trabalha com esquema de múltiplo acesso *TWDM* (*Time and Wavelength Division Multiplexing*).

Este sistema opera com 8 canais de *US* e *DS*, o que permite a capacidade 8 vezes maior de seu antecessor, o *XGS-PON*. Além disso, o *NG-PON2* é capaz de trabalhar com enlaces de 40 km em até 128 divisões [Nesset, 2015].

#### 2.3.6 Tabela comparativa de Redes PON

A Tabela 1 mostra de forma sumarizada as principais características de cada sistema *PON* exibido anteriormente.

Tecnologia	Taxa de DS	Taxa de US	Alcance	Divisões	Norma	Protocolo
BPON	622 Mbps	155 Mbps	20 km	1:32	ITU-T G.983	ATM
EPON	1 Gbps	1 Gbps	20 km	1:64	ITU-T G.984	ATM/Ethernet
GPON	2,5 Gbps	1,25 Gbps	20 km	1:128	IEEE 802.3av	Ethernet
XGSPON	10 Gbps	2,5 Gbps	40 km	1:128	ITU-TG.987	Ethernet
NGPON2	80 Gbps	20 Gbps	40 km	1:128	ITU-T G.989.2	Ethernet

Tabela 1 – Tabela de Características das Redes PON

## 2.4 Esquemas de múltiplo acesso em redes ópticas

Nesta seção serão revisados as principais características de esquemas de múltiplo acesso em fibra óptica, discutindo como funciona cada tipo e suas vantagens e desvantagens.

### 2.4.1 TDM (*Time Division Multiplexing*)

*TDM-PON* é uma tecnologia de Rede *PON* que usa a multiplexação por divisão de tempo para permitir a transmissão de dados por meio de uma única fibra óptica compartilhada por múltiplos usuários.

No *TDM-PON*, o tráfego de dados de vários usuários é dividido em quadros transmitidos em sequência em uma única fibra óptica. Cada quadro é dividido em *slots* de tempo, e cada *slot* é atribuído a um usuário específico. O número de *slots* de tempo em um quadro é determinado pelo número de usuários na rede. Durante o tempo de transmissão de cada *slot*, o transmissor do usuário envia seus dados para o sistema *PON*. Quando o *slot* de tempo do usuário termina, outro usuário envia seus dados, e assim por diante [Zhou et al., 2018].

O *TDM-PON* consegue suportar várias taxas de transferência de dados, dependendo do número de usuários e do tamanho dos *slots* de tempo. No entanto, sua capacidade é limitada, já que apenas um usuário pode transmitir dados por vez, e a largura de banda total da rede é compartilhada por todos os usuários.

Uma das principais vantagens da *TDM-PON* é que ela é relativamente simples e econômica de implementar, já que não requer componentes complexos de rede

No entanto, a *TDM-PON* tem algumas desvantagens, como a capacidade limitada em termos de largura de banda e a dificuldade de atualizar a rede para suportar taxas de transmissão de dados mais altas. Além disso, o *TDM-PON* não consegue oferecer as mesmas taxas de transmissão de dados ou a flexibilidade de serviços de outras tecnologias *PON*, como *GPON* ou *EPON*. Outra desvantagem é a inserção de latência alta devido à alocação dinâmica de banda (*DBA*) [Tashiro et al., 2014].

A Equação 2.1 descreve no domínio do tempo o sinal transmitido em uma rede TDM-PON, segundo Han [2014]:

$$TDM_{OUT}(t) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M s_n(t - mT_s)u(t - mT_s - nT_f) \quad (2.1)$$

onde:

- $TDM_{OUT}(t)$  é o sinal *TDM* no tempo;
- $s_n(t)$  é o sinal transmitido pelo usuário  $n$ ;
- $u(t)$  é a função degrau unitário;
- $T_s$  é o período de *slot* de tempo;
- $T_f$  é o período de *frame*;
- $N$  é o número total de usuários;
- $M$  é o número de *slots* de tempo.

Essa equação representa a modulação dos sinais dos usuários em uma rede PON utilizando a técnica TDM. O sinal transmitido pelo usuário  $n$  é amostrado em intervalos de  $T_s$  e deslocado no tempo por  $mT_s$ . A função degrau  $u(t)$  garante que apenas o sinal do usuário no slot de tempo correspondente seja transmitido. A soma total dos sinais de todos os usuários é então utilizada para modular a portadora óptica.

#### 2.4.2 WDM (*Wavelength Division Multiplexing*)

*WDM-PON* é uma tecnologia de Rede *PON* que usa a multiplexação por divisão de comprimento de onda para permitir a transmissão de dados por meio de uma única fibra óptica compartilhada por múltiplos usuários. Ao contrário da *TDM-PON*, que usa a multiplexação por divisão de tempo, o *WDM-PON* permite que vários usuários transmitam dados simultaneamente em comprimentos de onda diferentes.

Na *WDM-PON*, cada usuário é atribuído a um comprimento de onda específico, usado para transmitir seus dados. A fibra óptica é dividida em comprimentos de onda, cada um transportando os dados de um usuário específico. Cada comprimento de onda é atribuído a um único usuário, permitindo a transmissão simultânea de dados de vários usuários na mesma fibra óptica.

o *WDM-PON* oferece várias vantagens em relação a outras tecnologias de *PON*, como a capacidade de suportar altas taxas de transmissão de dados, maior largura de banda, menor latência e maior flexibilidade na atribuição de largura de banda aos usuários. Além disso, o *WDM-PON* pode suportar serviços de voz, dados e vídeo simultaneamente,

o que o torna uma opção ideal para provedores de serviços que oferecem serviços de comunicação integrados [Orphanoudakis et al., 2013].

No entanto, o *WDM-PON* é mais complexa e cara de implementar do que a *TDM-PON*, já que requer componentes ópticos de alta qualidade, como divisores de comprimento de onda e filtros ópticos, para separar e combinar os comprimentos de onda dos diferentes usuários. Além disso, a *WDM-PON* é mais sensível a problemas de alinhamento e polarização, o que pode afetar sua capacidade de transmissão de dados em ambientes com muita interferência eletromagnética.

Sistemas *WDM* são amplamente utilizados em redes ópticas de transporte, rede metropolitana e provedores de internet em sistemas *FTTx*. A multiplexação no domínio óptico se dá por canais de comprimentos de onda diferentes, com sua determinada largura de banda e bandas de guarda para evitar interferências com o canal vizinho [Gupta et al., 2018].

Os tipos mais comuns são o *DWDM*, normatizado pelo padrão ITU-T G.694.1 e o *CWDM* pelo padrão ITU-T G.694.2.

Sistemas *DWDM* suportam de 16 a 128 canais, que podem ter taxas de até 10 Gbps e espaçamentos de 25 a 100 GHz. A letra “*D*” simboliza “*denso*”, devido ao curto espaçamento entre canais. Sistemas *CWDM* suportam de 4 a 16 canais, que podem ter taxas de até 2,5 Gbps e espaçamentos de 200 GHz.

A Equação 2.2 mostra um sinal *WDM* no domínio da frequência aplicado a Redes *PON*, segundo O’Mahony et al. [2018]:

$$WDM_{out}(f) = \sum_{i=1}^N S_i(f) e^{j2\pi f \Delta_i \tau} \quad (2.2)$$

Onde:

- $S_{out}(f)$  é a saída do sinal *WDM* no domínio da frequência;
- $S_i(f)$  é o sinal de entrada do usuário  $i$  no domínio da frequência;
- $\Delta_i$  é o desvio de frequência do laser do usuário  $i$  em relação ao comprimento de onda central do *WDM*;
- $\tau$  é o atraso de propagação do sinal na fibra óptica.

Essa equação representa a combinação de múltiplos sinais em uma única fibra óptica usando a técnica de multiplexação por divisão de comprimento de onda (*WDM*). A variação do comprimento de onda dos sinais é compensada pelo atraso de propagação do sinal na fibra óptica e pela aplicação de uma fase adicional para cada sinal.

### 2.4.3 TWDM (Time and Wavelength Division Multiplexing Passive Optical Network)

*TWDM-PON* é uma tecnologia de Rede *PON* que combina a multiplexação por divisão de tempo (*TDM*) e a multiplexação por divisão de comprimento de onda (*WDM*) para permitir a transmissão de dados de alta velocidade por meio de uma única fibra óptica compartilhada por múltiplos usuários. Essa tecnologia oferece um alto nível de flexibilidade e escalabilidade para as operadoras de rede, permitindo-lhes fornecer serviços de alta velocidade a um número maior de usuários.

No *TWDM-PON*, vários usuários compartilham a mesma fibra óptica, mas cada um tem seu próprio comprimento de onda e intervalo de tempo dedicado para transmitir seus dados. Isso permite que os usuários transmitam dados simultaneamente, em taxas de transmissão de dados muito mais altas do que as oferecidas pelas Redes *PON* convencionais.

O *TWDM-PON* pode suportar até 16 comprimentos de onda diferentes, com cada comprimento de onda suportando uma taxa de transmissão de dados de até 10 Gbps. Isso significa que a *TWDM-PON* pode oferecer uma largura de banda total de até 160 Gbps, o que é suficiente para suportar aplicações de banda larga de alta velocidade, como vídeo em alta definição e *streaming* de jogos [Luo et al., 2013].

Uma das principais vantagens do *TWDM-PON* é a sua alta flexibilidade e escalabilidade, o que permite que as operadoras de rede atribuam larguras de banda diferentes para cada usuário. Isso permite que as operadoras de rede ofereçam serviços personalizados e aumentem a satisfação do cliente.

No entanto, o *TWDM-PON* é mais complexo e caro de implementar do que as redes *PON* convencionais, já que requer componentes ópticos sofisticados, como multiplexadores e demultiplexadores de comprimento de onda, e filtros ópticos de alta qualidade para separar e combinar os comprimentos de onda dos diferentes usuários. Além disso, a *TWDM-PON* é mais sensível a problemas de alinhamento e polarização, o que pode afetar sua capacidade de transmissão de dados em ambientes com muita interferência eletromagnética.

A Equação 2.3 representa um sinal TWDM no domínio da frequência, segundo O'Mahony et al. [2018]:

$$S_k(f) = \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^I a_{n,i,k} e^{-j2\pi f \tau_{n,i,k}} + N(f) \quad (2.3)$$

Onde:

- $S_k(f)$  é o sinal no domínio da frequência no canal  $k$ ;
- $N$  é o número total de usuários;

- $I$  é o número de comprimentos de onda por usuário;
- $a_{n,i,k}$  é a amplitude do  $i$ -ésimo comprimento de onda do usuário  $n$  no canal  $k$ ;
- $\tau_{n,i,k}$  é o atraso do  $i$ -ésimo comprimento de onda do usuário  $n$  no canal  $k$ ;
- $N(f)$  é o ruído aditivo branco gaussiano.

#### 2.4.4 OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*)

OFDM é uma técnica amplamente utilizada em sistemas sem fio e vem sendo explorada também em domínio óptico nos últimos anos. Esta técnica utiliza de subportadoras, ou seja, uma subdivisão do canal original para a alocação dinâmica de recursos. Cada subportadora é ortogonal às outras em frequência, ou seja, o pico espectral de cada subportadora coincide com o valor nulo das subportadoras adjacentes, minimizando interferências.

No OFDM-PON, o sinal é transmitido por subportadoras ópticas, em vez de subportadoras elétricas. A informação é então modulada no domínio óptico, antes de ser transmitida pela fibra óptica. O OFDM-PON usa o WDM (Multiplexação por Divisão de Comprimento de Onda) para transmitir várias subportadoras em uma única fibra. Isso permite a transmissão de grandes quantidades de dados de forma eficiente.

Uma vantagem do OFDM-PON é permitir alocar diferentes taxas de dados e serviços, como voz, dados e vídeo, com diferentes requisitos de largura de banda. Além disso, o OFDM-PON pode acomodar transmissão em DS e US simultaneamente.

No entanto, o OFDM-PON também tem algumas desvantagens. A técnica requer um alto processamento digital, o que pode aumentar a complexidade do sistema e aumentar os custos. Além disso, o OFDM-PON é mais sensível a ruídos e interferências do que outras tecnologias de PON.

A formação dos sinais OFDM utiliza algumas técnicas específicas. Os dados a serem gerados são modulados primeiramente em modulações analógicas multinível I-Q, como M-QAM ou M-PSK.

Para a geração de subportadoras, o sinal é primeiramente convertido em um conversor série-paralelo. Nesta etapa gera-se também os símbolos de treinamento, chamados de preâmbulo, e também os símbolos piloto. Estes símbolos auxiliam na melhoria da demodulação OFDM [Liu and Buchali, 2009].

Na sequência, os dados em paralelo passam por uma transformada inversa rápida de Fourier (IFFT) para que sejam convertidas para o domínio do tempo.

A etapa seguinte insere o chamado prefixo cíclico para a mitigação de interferência intersimbólica e interportadora devido às características dispersivas da fibra.

A última etapa da modulação *OFDM* consiste na conversão inversa paralelo-série, conversão Digital-Analógica e filtragem. Cada símbolo *OFDM* de domínio temporal é inserido em um fluxo em série. Diferentes técnicas de interpolação (passo, linear ou cúbica) podem ser utilizadas para a conversão digital para analógico. Ao final, há um filtro para eliminar os ruídos de alta frequência.

Na etapa de demodulação *OFDM*, basicamente todas as etapas são executadas a fim de inverter o fluxo estabelecido na modulação.

Portanto, tem-se uma conversão analógica-digital e um filtro digital aplicado para compensar a dispersão cromática da fibra. Então, o sinal tem o prefixo cíclico removido e passa por uma transformação *FFT* para retornar ao domínio da frequência. A partir daí, o sinal no domínio da frequência já pode ser demodulado conforme a modulação escolhida (*M-QAM* ou *M-PSK*) [Liu et al., 2009].

A Equação 2.4 representa um sinal *OFDM* no domínio do tempo, segundo Koonen [2007].

$$OFDM_{OUT}(t) = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{k=0}^{K-1} a_{n,k} e^{j(2\pi k f_0 t + 2\pi k \Delta f n t)} \quad (2.4)$$

Onde:

- $OFDM_{OUT}(t)$  é o sinal OFDM no domínio do tempo;
- $a_{n,k}$  é o símbolo transmitido no subportadora  $k$  do símbolo  $n$ ;
- $N$  é o número total de símbolos transmitidos;
- $K$  é o número total de subportadoras utilizadas;
- $f_0$  é a frequência da primeira subportadora;
- $\Delta f$  é a distância de frequência entre as subportadoras.

## 2.5 Requisitos e desafios para os sistemas futuros

Nesta seção será apresentado alguns requisitos e desafios para os sistemas de rede de acesso móvel futuros, para que seja observado os pré requisitos das novas tecnologias.

### 2.5.1 Exemplo de estrutura física e composição

Conforme Xiang et al. [2016], para um modelo de cobertura em ambiente urbano movimentado, deve-se implementar estações rádio-base em modelo de *macro-cell* juntamente com *small-cells*. O modelo propõe que a distância entre sites seja de 200 m,

contendo três *small-cells* e uma *macro-cell*. A *macro-cell* teria a função de prover uma cobertura mais ampla. A antena se posiciona em uma altura em torno de 25 m, operando com portadoras da faixa de 4 GHz e 200 MHz de banda. As *small-cells* têm a função de prover a cobertura nos ambientes de mais alta rotatividade de usuários e também em ambientes internos, operando em faixa de frequência e banda bem maiores, na faixa de 30 e 70/80 GHz e operando com 1 GHz de banda. As antenas destes sites ficam em torno de 10 m de altura.

### 2.5.2 RAN: requisitos, desafios e tecnologias

De acordo com Xiang et al. [2016] existem diversos pontos a serem enfrentados na RAN em redes 5G. Dentre eles os principais focos para este trabalho são:

- A arquitetura deve prover suporte de compartilhamento de múltiplos serviços (ou operadoras) em uma mesma estrutura de rádio;
- O custo CAPEX e OPEX deve ser reduzido e ainda assim, atingir o mesmo nível de performance;
- Separação de plano de usuário (*U-PLANE*) de plano de controle (*C-PLANE*). É uma maneira de prover altas taxas em *small-cells* com alta densidade, sem promover degradação da conectividade e mobilidade para o usuário.

### 2.5.3 Mobile Fronthaul (MFH): requisitos, desafios e tecnologias

Para atingir as metas e cumprir os requisitos previstos para o MFH no 5G, a academia e a indústria propõem diversas técnicas para suportar o alto tráfego. Tradicionalmente, o protocolo CPRI é utilizado no fronthaul, contudo, espera-se que este recurso seja inutilizado para as próximas gerações, devido à exclusividade de um par de fibra óptica por RRH e às altas taxas necessárias. De acordo com Jaffer et al. [2020] estima-se que um link CPRI no 5G seja de em média 147,5 Gbps, o que torna seu uso inviável.

Tendo em vista esse desafio, algumas alternativas foram tomadas para RoF, dentre elas: compressão dos dados contidos no CPRI, técnicas de modulação analógica (não padronizadas) e técnicas de modulação digital de alta robustez (padronizadas), como NRZ aplicados à rede óptica passiva ponto-multiponto (*P2MP - PON*). No presente trabalho, serão exploradas técnicas de modulação digital dentro de Redes PON, utilizando três técnicas de multiplexação distintas, comparando as respectivas performances: PON com multiplexação por divisão de tempo (*TDM-PON*), multiplexação por divisão de comprimento de onda (*WDM-PON*) e multiplexação por divisão de frequência ortogonal (*OFDM-PON*).

Dentre as principais metas para o fronthaul no 5G tem-se:

- Compatibilidade com as tecnologias de gerações anteriores;
- Multiplexação de serviços diversos em uma mesma fibra óptica, ainda atendendo os requisitos de atraso, ruído e *jitter*;
- Em um ambiente centralizado, é necessário ter alta eficiência e escalabilidade, além da alocação de recursos em ambiente virtual (*cloud*).

## Capítulo 3

# Modelos e Simulações de Fronthaul

Para a elaboração das análises de desempenho dos modelos a serem exibidos neste capítulo, foi montado um *script* em *VB* para variar os múltiplos parâmetros no software Optisystem<sup>®</sup>. O algoritmo segue conforme abaixo:

---

### Algoritmo 1: Exportar dados

---

- 1: *ComponentName1* ← Nome do *Component1*
  - 2: *ParameterName1* ← Parâmetro do *Component1*
  - 3: *ComponentName2* ← Nome do *Component2*
  - 4: *ParameterName2* ← Parâmetro do *Component2*
  - 5: *VisualizerName1* ← Nome do *Visualizer1*
  - 6: *ResultName1* ← Resultado do *Visualizer1*
  - 7: *i* ← Numero de interações 1
  - 8: *Start1* ← Valor Inicial 1
  - 9: *End1* ← Valor Final 1
  - 10: *Step1* ←  $(End1 - Start1)/(i - 1)$
  - 11: *j* ← Numero de interações 2
  - 12: *Start2* ← Valor Inicial 2
  - 13: *End2* ← Valor Final 2
  - 14: *Step2* ←  $(End2 - Start2)/(j - 1)$
  - 15: Criar Excel
  - 16: Setar ambiente OS
  - 17: *loop i*:
  - 18: *loop j*:
  - 19: *ParameterValue1* ←  $Start1 + Step1 * i$
  - 20: *ParameterValue2* ←  $Start2 + Step2 * j$
  - 21: Setar Parâmetros
  - 22: Calcular projeto OS
  - 23: *ResultValue1* ← Resultado do *Visualizer1*
  - 24: *ResultValue2* ← Resultado do *Visualizer2*
  - 25: Escrever na linha do Excel
  - 26: Próxima linha
  - 27: **goto** *loop j*.
  - 28: **goto** *loop i*.
-

Os parâmetros adotados nas simulações estão descritos extensivamente no Apêndice A.

## 3.1 Modelo 1: *TDM-PON*

A técnica *TDM* é baseada em multiplexação de tempo, ou seja, para o mesmo comprimento de onda, canais diferentes são alocados em quadros de tempo diferentes (*time slots*). Os canais utilizam modulação digital de alta robustez em portadoras digitais, como as técnicas *NRZ* ou *PAM-4*, aliado a *FECs* complexos que permitem correção de erro mesmo com uma *BER* alta [Jaffer et al., 2020, Tashiro et al., 2014]. As limitações desta técnica são, segundo os autores:

- o uso de *DBA* gera alta latência no *uplink*. Para alcançar o objetivo de baixa latência (menor que 4 ms), deve-se adotar alocação de banda fixa (*FBA*);
- A bibliografia sugere alternativamente um *DBA* modificado para a alocação de banda;
- Devido à comutação de canais no tempo, é necessário um sincronismo efetivo no serviço, aumentando a complexidade do sistema e reduz a confiabilidade.

### 3.1.1 Simulações

Nesta seção são apresentadas as simulações usando dois tipos de modulação para o esquema *TDM*. O *OOK* é baseado em modulação *NRZ*. A modulação *PAM-4* é utilizada para fins de comparação e para ver a resposta do sistema a uma modulação multinível. Cada tipo de modulação possui vantagens e desvantagens. A modulação *OOK* tem maior robustez e uma detecção mais simples no receptor, tornando o *hardware* menos complexo, além de uma detecção com maior imunidade a ruído por não se tratar de uma modulação multinível. A modulação *PAM-4* possui *hardware* mais complexo para transmissão e recepção, além de estar mais sujeita a desvios de *bit* devido a erros de decisão no receptor. Contudo, o *PAM-4* possui maior eficiência espectral por se tratar de uma modulação de 2 símbolos por *bit*.

A Fig. 6 mostra a simulação no Optisystem<sup>®</sup> referente a um sistema baseado em *OOK* com modulação *NRZ*.

O sistema funciona da seguinte forma: as sequências binárias pseudo-randômicas são geradas pelo bloco *BER Test Set*, responsável por enviar e receber os *bits* a fim de compará-los. O bloco *NRZ* formata, em domínio elétrico, o sinal digital a ser modulado no *MZM*, em modulação elétrica externa, que modula o sinal óptico laser de comprimento de onda contínuo. O sinal óptico trafega pela fibra e, para fins de teste de robustez quanto a

divisões deste sinal, um *VOA* é inserido na saída da fibra. O sinal óptico então é detectado por um fotodiodo PIN, passando assim para o domínio elétrico.

Após a detecção, um filtro passa-baixas, cuja frequência de corte é 75% da taxa de *bit*, remove ruídos de alta frequência do sinal. Antes da comparação de *BER*, um elemento de sincronismo é inserido para uma comparação mais fidedigna entre os sinais de entrada e saída. Para a visualização do diagrama de olho, regenerador 3R juntamente com um analisador de diagrama de olho é inserido no esquema.

O fotodiodo PIN (Junção P-Intrínseca-N) foi adotado por ser uma opção comum para aplicações ópticas de curta distância e redes de fibra óptica passiva. Em contrapartida, o fotodiodo *APD* (*Avalanche photodiode*) é uma opção mais adequada para aplicações que exigem alta sensibilidade e uma faixa dinâmica maior, como em sistemas de longa distância e em aplicações de alta velocidade. Devido à aplicabilidade do trabalho se restringir a sistemas de acesso, foi considerado o fotodiodo PIN.

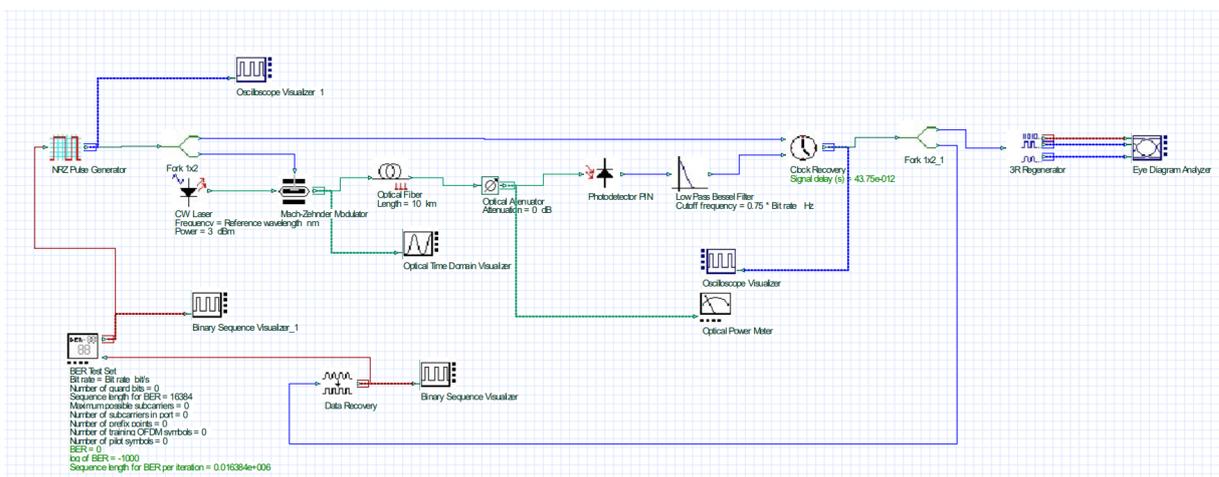


Figura 6 – Simulação *TDM* utilizando modulação *OOK* baseada em *NRZ*

As Figuras 7 (a) e (b) exibem o diagrama de olho e o sinal elétrico detectado pelo fotodiodo. Pode-se perceber nas duas imagens que há clareza quanto aos níveis elétricos estabelecidos. Para este exemplo, é transmitido um sinal em 10 Gbps, com um enlace de fibra de 10 km e laser de 3 dBm.

A Fig. 8 mostra o esquema simulado no Optisystem<sup>®</sup> para a modulação *PAM-4*. Neste sistema, o pulso multinível é gerado a partir de 3 limiares de tensão no domínio elétrico modulados no domínio óptico através de um *MZM*. Para analisar a escalabilidade do sistema, um *VOA* é inserido na saída da fibra óptica a fim de verificar os limites de atenuação e calcular indiretamente em qual razão o sinal pode ser dividido no limite de *BER* estabelecido. Neste esquema, o modulador *PAM* gera o sinal elétrico de 4 níveis. Estes limiares são então configurados no decisor no final da fibra, que irá decodificar o sinal conforme configuração.

As Figuras 9 (a) e (b) exibem o diagrama de olho e o sinal elétrico detectado pelo

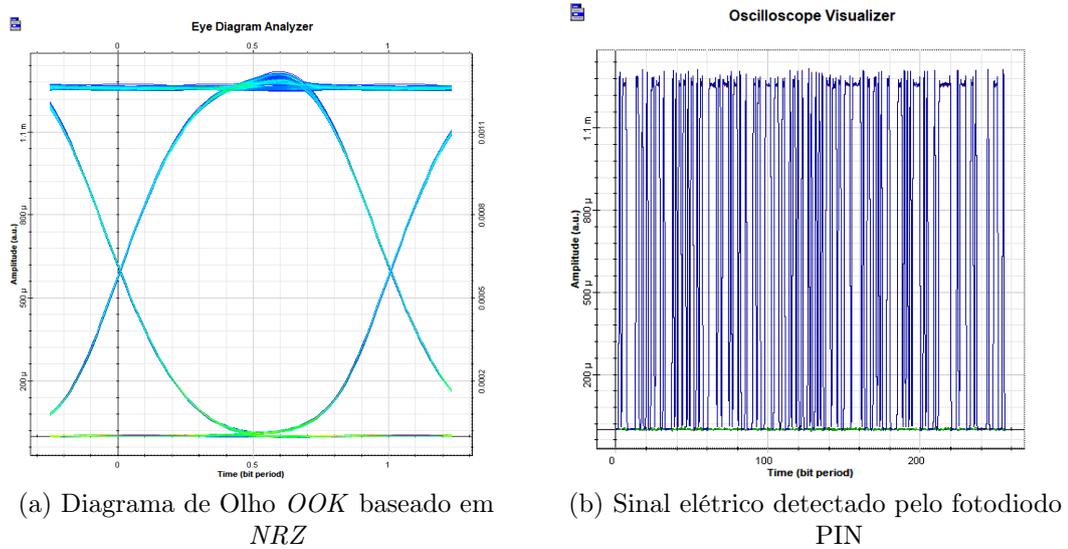


Figura 7 – Diagrama de Olho (a) e Sinal no domínio elétrico *OOK NRZ* (b)

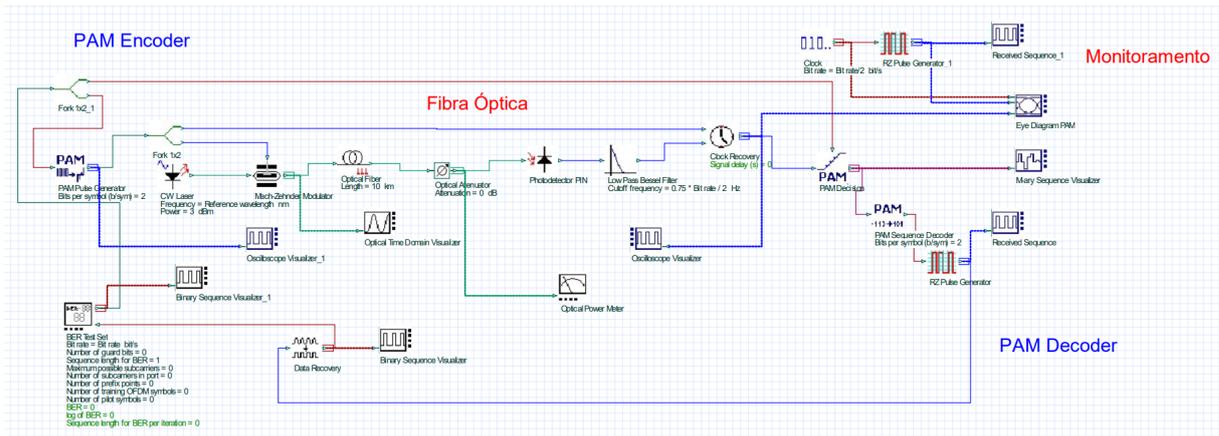


Figura 8 – Simulação *TDM* utilizando modulação *PAM-4*

fotodiodo *PIN*. Pode-se perceber nas duas imagens que há clareza quanto aos níveis elétricos estabelecidos. Para este exemplo, é transmitido um sinal em 10 GBaud, correspondendo a 20 Gbps, com um lance de fibra de 10 km e laser de 3 dBm.

### 3.1.2 Resultados

Para avaliar a escalabilidade do sistema, um *VOA* foi inserido na saída da fibra, simulando um *splitter*. Assim é possível verificar até quantas *RRU*'s o sistema consegue prover conectividade dentro do limiar de *BER* considerado.

A Fig. 10 mostra as curvas comparativas entre os dois esquemas de modulação operando a 20 Gbps no caso do *OOK* e 10 GBaud para o *PAM-4*, resultando em uma taxa igual ao *OOK*. É possível perceber que o *PAM-4* é um pouco mais limitado quanto a sensibilidade, por ser um esquema multinível em fibra. Para a taxa de bit de 20 Gbps, o *PAM-4* pode operar com um *splitter* de 1:32 (perda de inserção de 17,52 dB) enquanto o

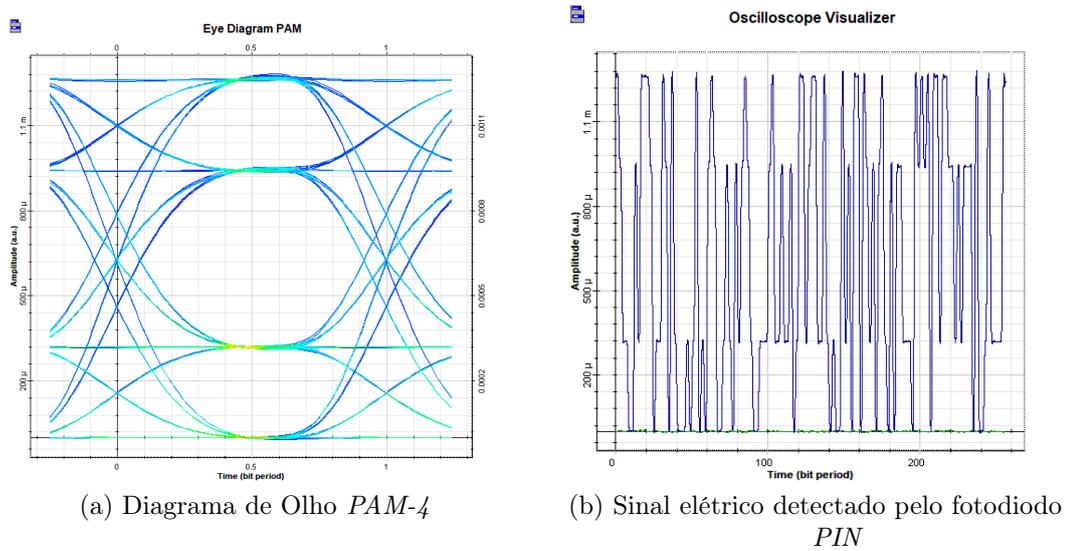


Figura 9 – Diagrama de Olho (a) e Sinal no domínio elétrico *PAM-4* (b)

*OOK* pode trabalhar com *splitter* de 1:64 (perda de inserção de 20,90 dB), considerando o limiar de BER como  $10^{-3}$ . Para atenuações menores que os valores exibidos, não foi apresentado erro de bit.

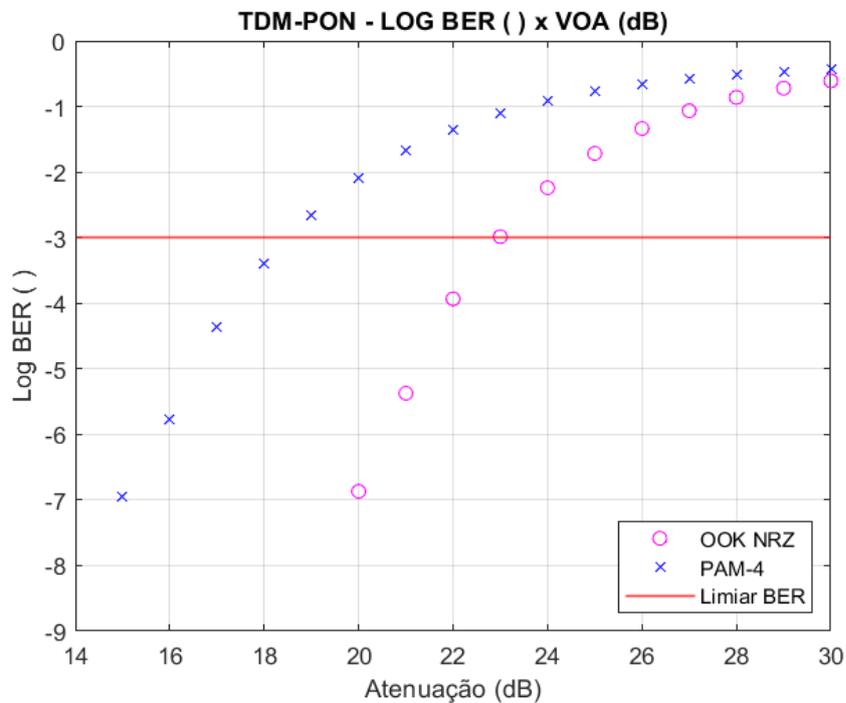


Figura 10 – Simulação *TDM* comparando a escalabilidade *OOK* x *PAM-4*

## 3.2 Modelo 2: *WDM-PON*

Em comparação ao *TDM*, o *WDM* é mais confiável e possui menor latência. Esta técnica permite que os canais sejam transmitidos simultaneamente em comprimentos de onda (frequências) diferentes, com uma banda de guarda entre os canais. O *WDM* já é amplamente utilizado em sistemas de rede metropolitana, *backbones* e provedores de internet *FTTx*, em técnicas como: *CWDM*, *DWDM* e *OTN* [Jaffer et al., 2020].

Conforme sugerido por Jaffer et al. [2020], sugere-se que o *WDM* é uma das técnicas de múltiplo acesso mais promissoras, devido à fibra óptica possuir uma grande largura de banda, permitindo a implementação de múltiplos canais. Os autores sugerem ainda combinar as duas técnicas de multiplexação no domínio do tempo e da frequência, chegando a uma configuração de tipo *TWDM*, conforme proposto para redes *NGPON2*.

As limitações da implementação de *WDM* se restringem à otimização da alocação de largura de banda no *upstream*, que pode ser um desafio para o projetista, além de um maior custo de implementação e de manutenção da rede [Jaffer et al., 2020].

Em adição ao dito anteriormente, as técnicas tradicionais de *WDM* utilizam comprimentos de onda distintos para o *US* e *DS*. No Cap. 4 será exibido uma técnica vantajosa que permite o reuso deste comprimento de onda nas duas direções de transmissão, o que pode otimizar a eficiência espectral em sistemas futuros no *fronthaul*. A alocação de canais no *WDM* com reuso de frequência é complexo em sistemas bidirecionais devido ao *Rayleigh Backscattering (RBS)*, um fenômeno de reflexão distribuída na fibra, decorrente de imperfeições no processo de fabricação [Simatupang, 2016].

### 3.2.1 Simulação

A Figura 11 mostra a simulação de um sistema com 4 canais a exemplo de um sistema *WDM*. Neste esquema, 4 sinais distintos são multiplexados na fibra e então demultiplexados para detecção. Os comprimentos de onda precisam ser diferentes para cada canal e definidos por porta no *MUX* e no *DEMUX*.

Para a comparação de diferentes modulações e seus impactos, foi simulado no mesmo esquema dois tipos de modulação digital *OOK* em dois formatos de pulso: *NRZ* e *RZ*. As Figuras 12 (a) e (b) mostram o diagrama de olho para as modulações *NRZ* e *RZ*, respectivamente. A figura (c) exibe o sinal óptico na saída da fibra em domínio espectral, comum aos dois cenários.

### 3.2.2 Resultados

Abaixo alguns resultados obtidos variando parâmetros com o *script* apresentado. Foram variados os parâmetros: comprimento da fibra, potência dos lasers e *bitrate*.

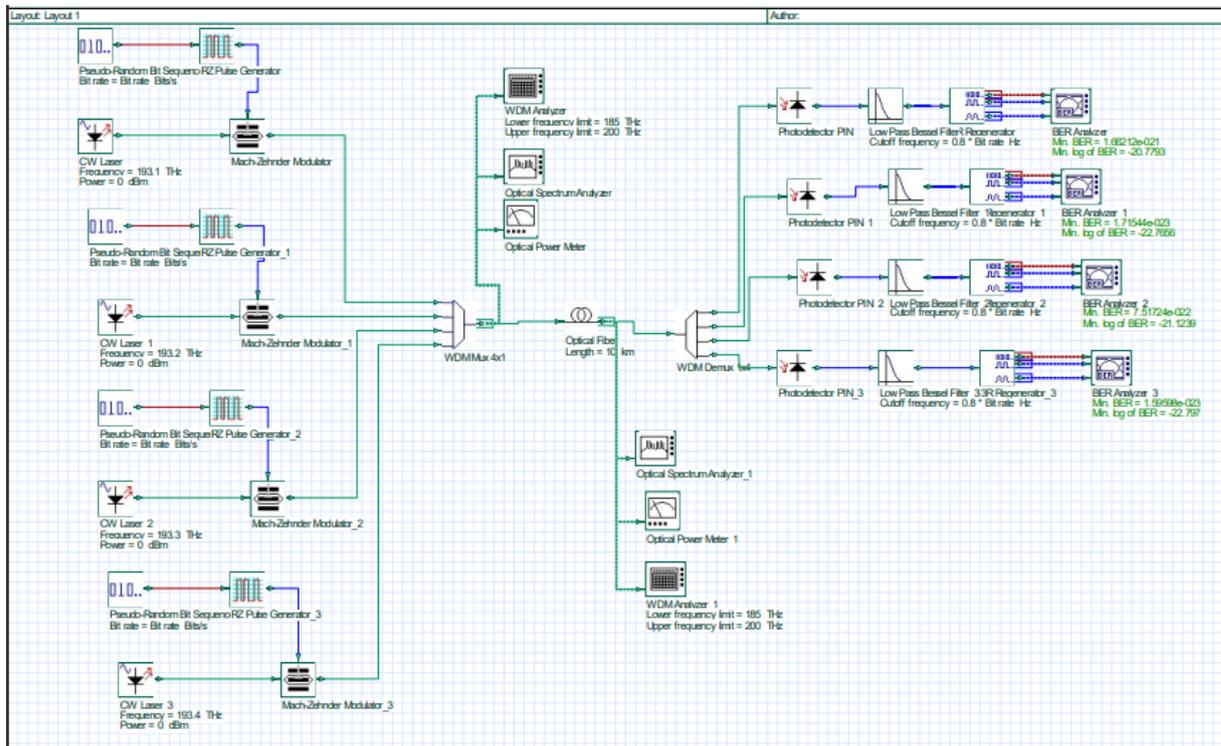
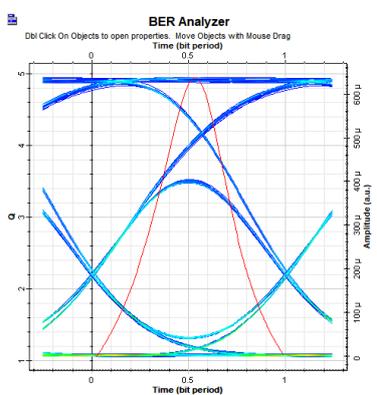
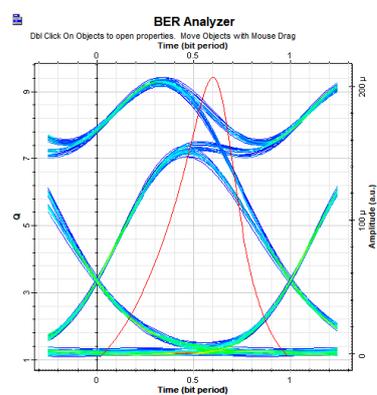


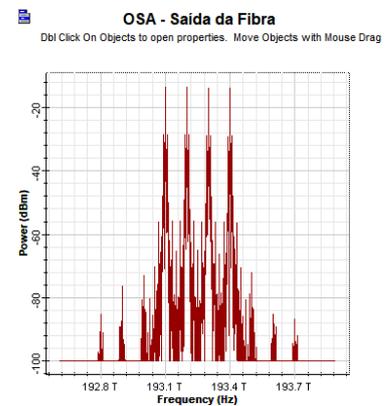
Figura 11 – Simulação WDM com modulação RZ para 4 canais



(a) Diagrama de Olho Canal 1 - NRZ



(b) Diagrama de Olho Canal 1 - RZ



(c) Espectro na Saída da Fibra Óptica

Figura 12 – Visualizadores no Sistema WDM-PON

As Figuras 13 e 14 mostram um gráfico dos 4 canais da simulação, onde o eixo das abcissas representa o comprimento da fibra óptica variando de 10 a 100 km para lasers de potência de 0 dBm, para os formatos de pulso *RZ* e *NRZ*, respectivamente. A linha vermelha indica o limiar de correção de erro, considerado  $10^{-3}$ . É possível observar que o sistema tem performance comprometida com distâncias a partir de 70 km neste esquema de múltiplo acesso para taxas de 10 Gbps por canal.

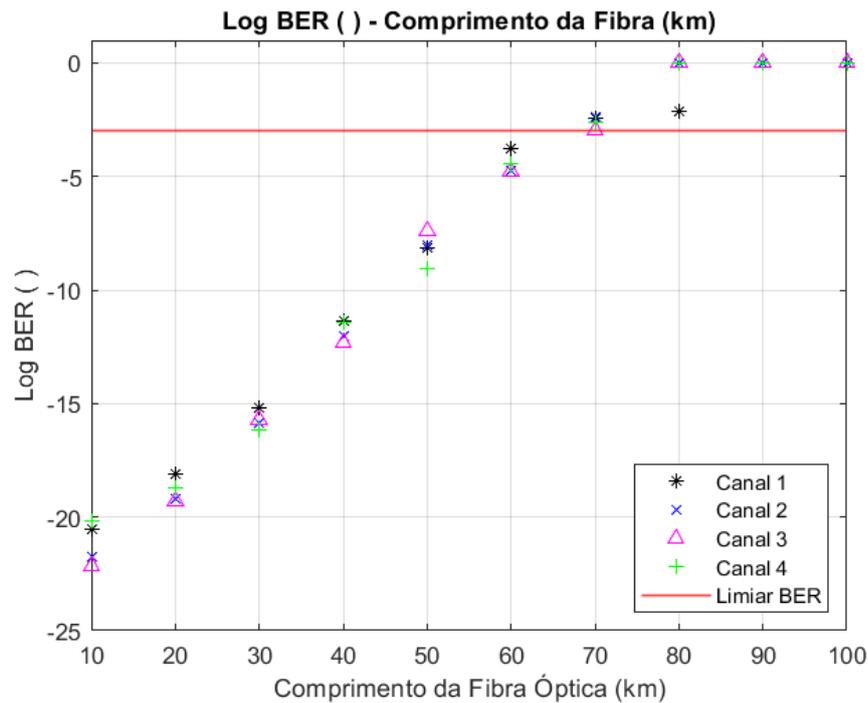


Figura 13 – Gráfico de Log  $BER$  ( ) por Comprimento da Fibra (km) - Modulação RZ

As Figuras 15 e 16 mostram um gráfico dos 4 canais da simulação, onde o eixo das abcissas representa a potência dos lasers de -20 a +10 dBm para comprimento de fibra de 30 km, para os formatos de pulso *RZ* e *NRZ*, respectivamente. Novamente, foi considerado o fator de  $10^{-3}$  como limiar de  $BER$  viável para recuperação do sinal por *FEC*. Pode-se analisar que, para a taxa adotada de 10 Gbps por canal e com o comprimento de 30km de fibra, é necessário trabalhar com uma potência de TX de ao menos -11 dBm. Portanto, conforme norma do ITU-T G.984-2, pode-ser trabalhar com lasers B+ neste caso, que possuem potência de 0,5 a 5 dBm e os fotodetectores *PIN* com sensibilidade de -27 dBm.

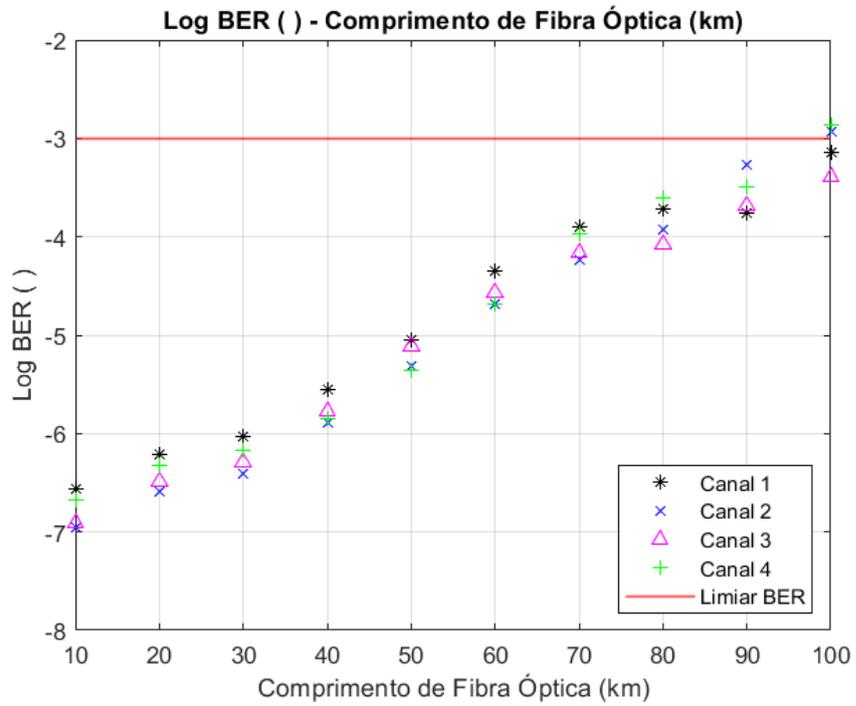


Figura 14 – Gráfico de Log BER ( ) por Comprimento da Fibra (km) - Modulação NRZ

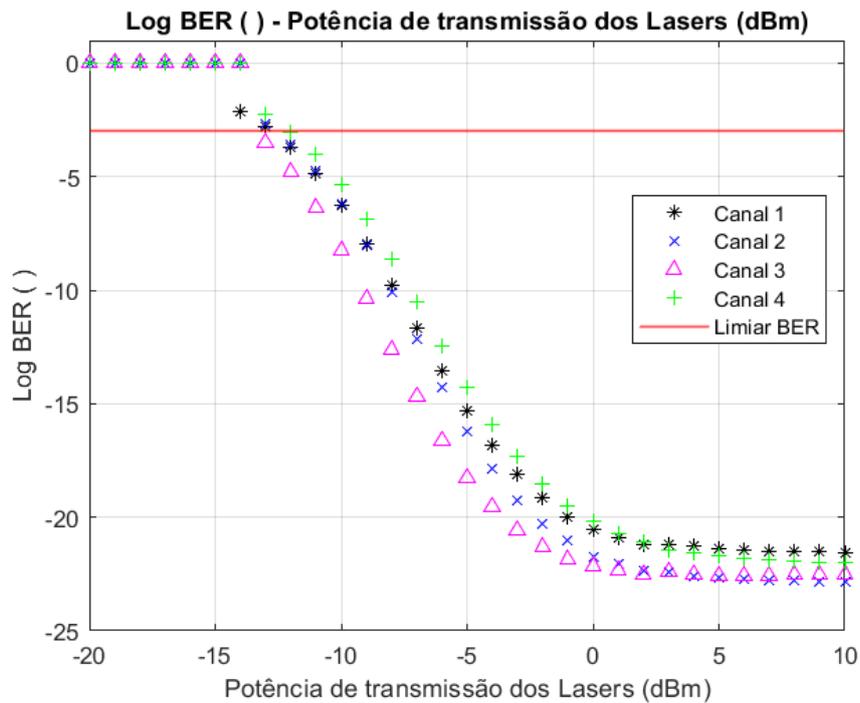


Figura 15 – Gráfico de Log BER ( ) por potência dos lasers de TX (dBm) - Modulação RZ

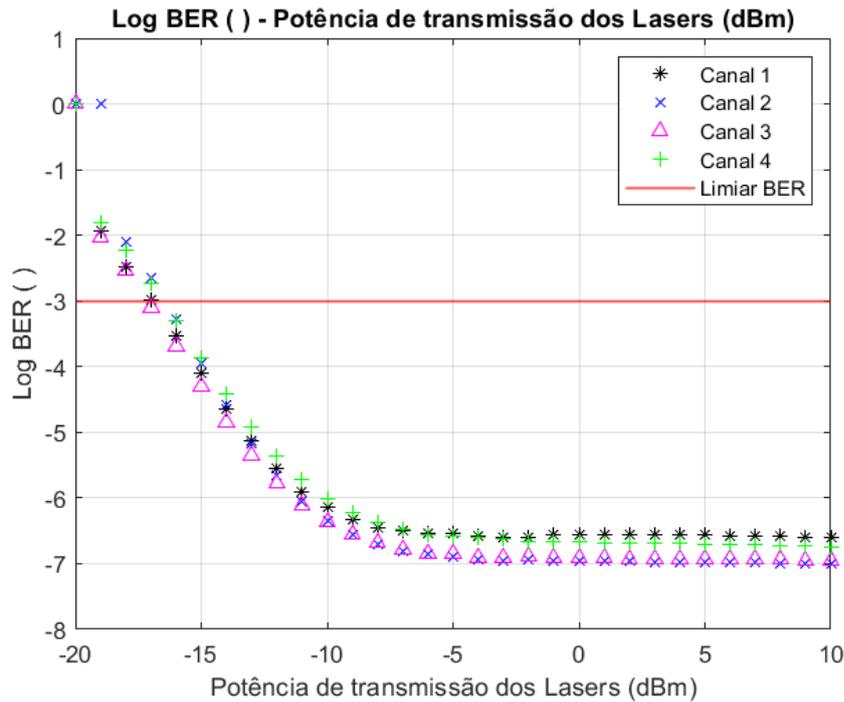


Figura 16 – Gráfico de Log  $BER$  ( ) por potência dos lasers de TX (dBm) - Modulação NRZ

### 3.3 Modelo 3: CO-OFDM-PON

O *OFDM*, de maneira semelhante ao *WDM*, trabalha com multiplexação de canais em frequência (ou comprimento de onda), contudo, esta técnica utiliza, nos canais principais, subportadoras de largura de banda menor ortogonais aos canais adjacentes. A ortogonalidade permite que um subcanal não interfira com os outros, pois o valor máximo de uma subportadora coincide com o valor mínimo do canal vizinho, não causando interferência entre eles, idealmente [Wang et al., 2016, Chen et al., 2019].

As limitações desta técnica se resumem ao perfil fortemente variável de um sinal *OFDM* no domínio do tempo, que pode apresentar uma relação muito alta entre valor de pico e valor médio (*PAPR*) de potência, dificultando sua transmissão, e à dificuldade em manter a ortogonalidade entre os canais durante todo o percurso da fibra, especialmente caso a rota possua distâncias superiores a 20 km [Zhu et al., 2019].

#### 3.3.1 Simulações

A Fig. 17 exibe um esquema *OFDM* Coerente baseado em modulações *M-QAM*. Para este sistema foram elaborados, dentro das análises de viabilidade, dois esquemas de modulação. O primeiro, em *QPSK* (ou *4-QAM*) utiliza 2 bits por símbolo. O segundo baseado em *16-QAM*, possui 4 bits por símbolo.

O sistema possui algumas etapas importantes a serem comentadas. O bloco *BER*

*test set* gera a sequência pseudo-binária para, neste caso, uma palavra de 131072 bits. Então o sinal digital é modulado em quadratura, utilizando *QPSK* em uma das simulações e *16-QAM* na seguinte. Para alterar este parâmetro, basta alterar o número de bits por símbolo de 2 para 4.

Com os sinais I e Q gerados, gera-se então os blocos *OFDM*. Os sinais I-Q *QAM* passam pelas etapas: conversão série-paralela, *IFFT*, adição do prefixo cíclico para checagem, conversão série paralela, *DAC* e filtragem. O bloco *OFDM* ainda envia ao demodulador onde estão mapeados os bits de treinamento, para a otimização da transmissão. Para ambas simulações, foram utilizadas 80 das 124 subportadoras disponíveis, alocadas entre as subportadoras 25 e 104. Pode-se ver o diagrama de constelação gerado em *OFDM* na Fig. 19 e o sinal na fibra no domínio espectral, através de um *OSA*, exibido na Fig. 20

O sinal *OFDM* é então enviado a um transmissor coerente, exibido pelo subsistema da Figura 18. Os bits I e Q são modulados separadamente por *MZM*'s de  $\text{LiNbO}_3$ . Daí o sinal é modulado na fibra.

Após o lance de fibra, o sinal passa por um filtro gaussiano cuja frequência central é a mesma do laser o Oscilador Local (192,1 THz). A partir daí se dá o processo reverso: detecção coerente, demodulação *OFDM* e decodificação *QAM*.

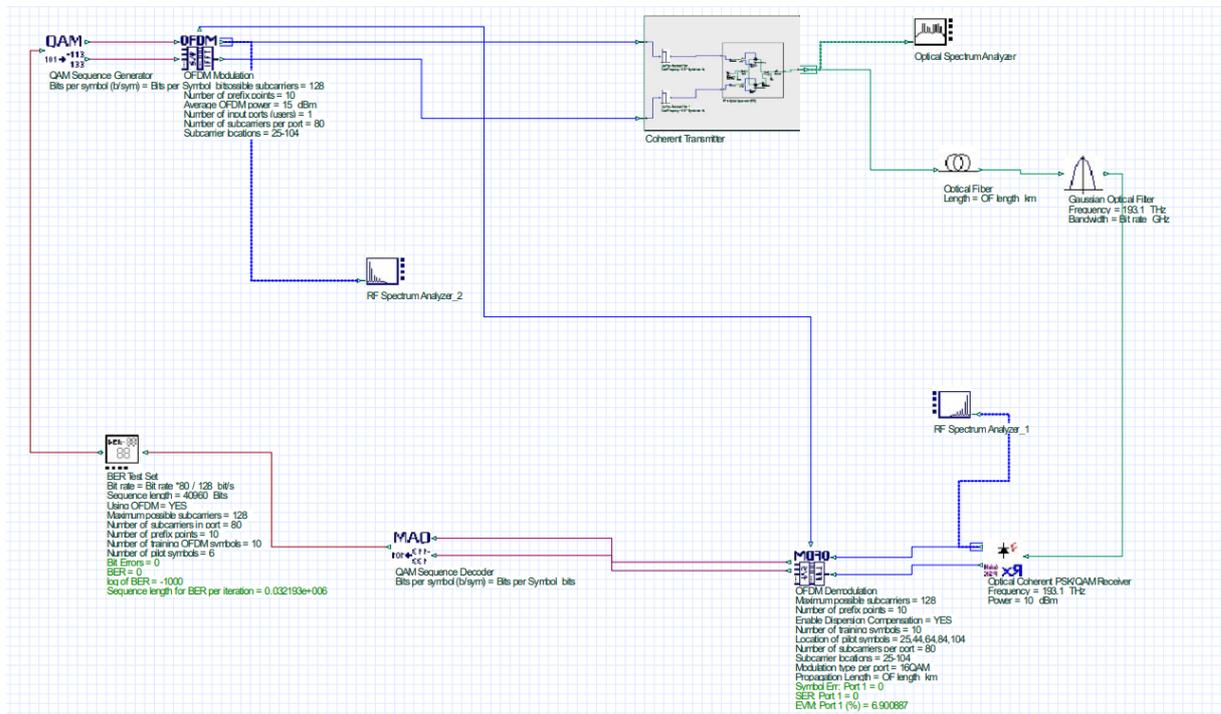


Figura 17 – Esquema *CO-OFDM* com modulação *N-QAM*

A Fig. 18 mostra o subsistema dentro da Fig. 17. Pode-se perceber que os sinais I e Q são modulados separadamente com defasagem de  $90^\circ$ .

As Figuras 20 (a) e (b) mostram as constelações formadas a partir dos sinais I e Q recebidos para a modulação *QPSK* e *16-QAM*, respectivamente para uma transmissão

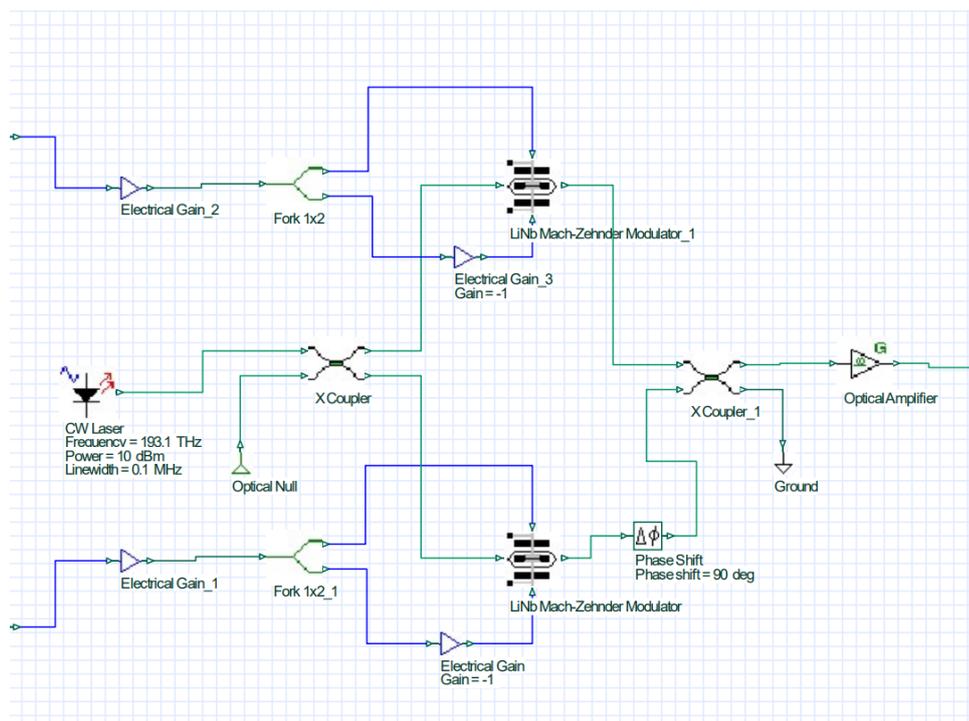


Figura 18 – Esquema transmissor coerente I-Q

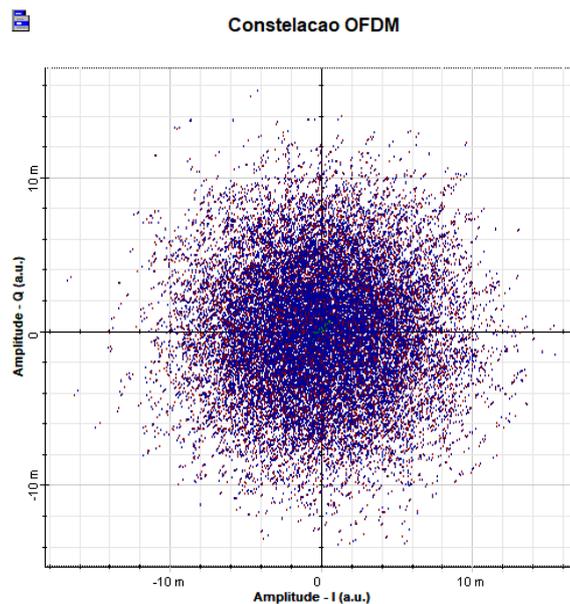


Figura 19 – Diagrama de Constelação do sinal OFDM

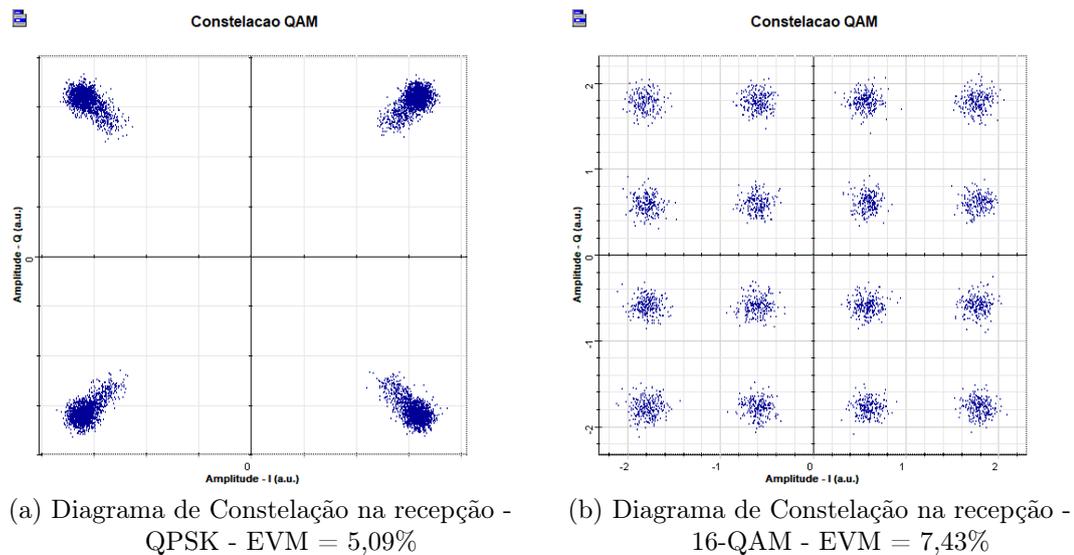


Figura 20 – Diagramas de Constelação *QPSK* (a) e *16-QAM* (b)

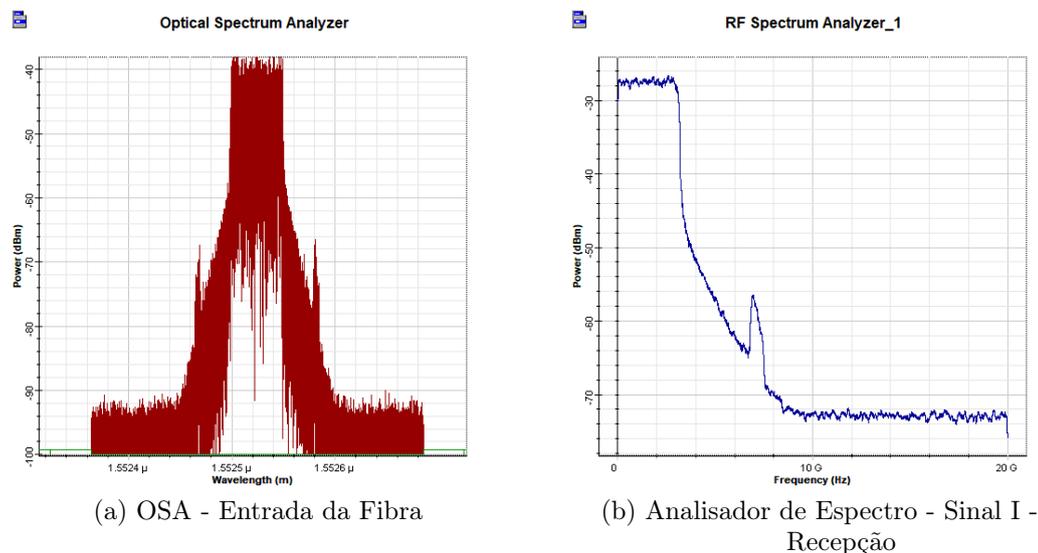


Figura 21 – Analisadores de Espectro na entrada da fibra (a) e na recepção (b)

de 20 Gbps em um enlace de fibra óptica de 10 km. Percebe-se que no caso da modulação *QPSK* temos uma maior robustez evidenciada pelo menor  $EVM$  de 5,09%. Já na modulação *16-QAM* houve um  $EVM$  de 7,43%, ainda aceitável conforme recomendações do 3GPP TS 36.104.

### 3.3.2 Resultados

A Fig. 22 mostra um gráfico de  $EVM$  com relação ao comprimento da fibra variando de 10 a 100 km para comparar a performance entre os dois esquemas de modulação para um sinal de 20 Gbps. Conforme esperado, a modulação *16-QAM* apresenta maior erro, contudo em ambos os casos, os limites de  $EVM$  são aceitáveis conforme indicação do

3GPP TS 36.104. Os limites são de 17,5% para o *QPSK* e 12,5% para o *16-QAM*.

A Fig. 23 mostra a comparação de *BER* por comprimento da fibra variando de 10 a 100 km com canal de 20 Gbps. Para esta taxa, o esquema *QPSK* não apresentou erros. Já para a modulação *16-QAM*, o sistema apresenta inviabilidade a partir de 90 km.

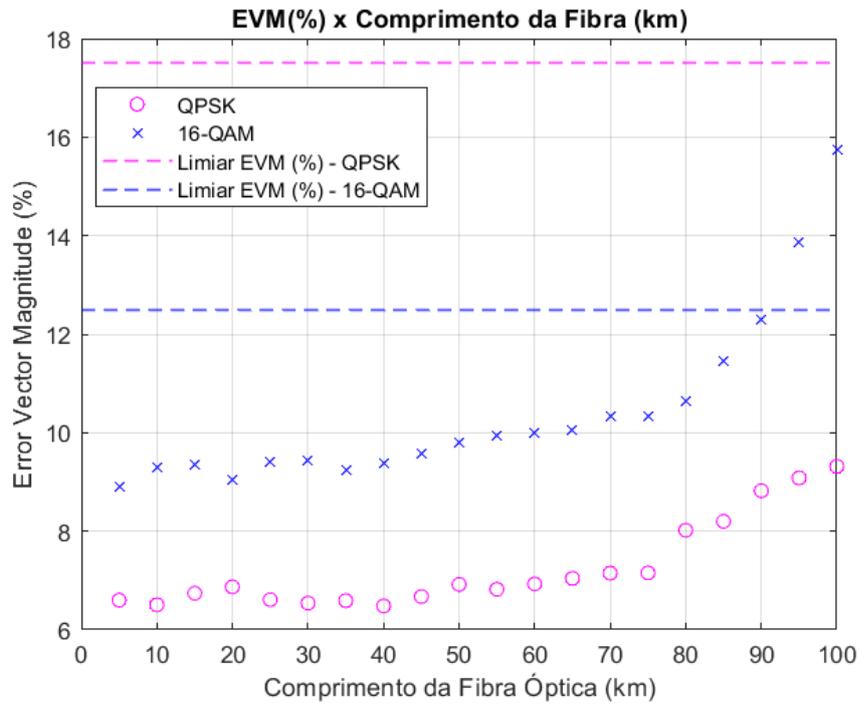


Figura 22 – Gráfico de *EVM* (%) por comprimento da fibra para as modulações *QPSK* e *16-QAM*

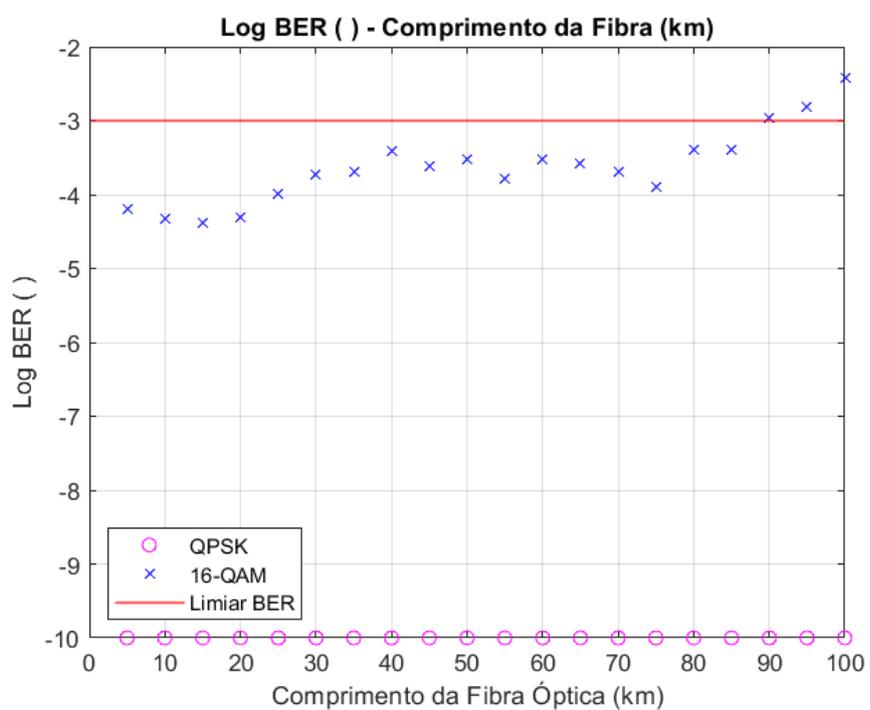


Figura 23 – Gráfico de Log  $BER$  por comprimento da fibra para as modulações  $QPSK$  e  $16-QAM$

## Capítulo 4

# Desenvolvimento de sistema baseado em *OCDMA*

Este capítulo é dedicado para a fundamentação, modelagem e simulação de um sistema inovador baseado em *OCDMA* em domínio óptico. Acredita-se que esta técnica pode ser promissora quando comparada com as demais devido ao reuso de comprimentos de onda no *US* e *DS*, sem a necessidade de multiplexação no domínio do tempo.

A técnica de codificação consiste em atribuir um código ortogonal ao sinal original que é transmitido em *broadcast* simultaneamente para todos os canais em uma única fibra. Cada código é único e pode ser gerado de formas diferentes, seja a partir de codificação temporal, espectral, em fase ou técnicas como saltos em frequência [Yin and Richardson, 2007].

Os códigos devem ser ortogonais entre si, possuindo uma boa autocorrelação e baixa correlação cruzada. Através desta correlação, os receptores são capazes de decodificar seus respectivos canais com eficiência. Nesta técnica, o sinal de cada canal é multiplicado por uma sequência binária de um conjunto ortogonal.

As técnicas de *CDMA* são baseadas em um espalhamento espectral em sequência direta. Para isso, o sinal de origem precisa ter uma banda muito larga para que todas as sequências de codificação sejam incluídas na banda transmitida [Yin and Richardson, 2007].

As Figuras 24 e 25 mostram, em exemplo didático, como funciona o processo de codificação no domínio temporal e espectral, respectivamente. A Figura 24 mostra como os dados podem ser obtidos para um canal 1 arbitrário. Ao aplicar o código do *encoder* do canal 1 ao sinal espalhado e executar integração a este sinal, é possível obter o sinal original. Na Figura 25 é possível notar o processo de transmissão, combinação e recepção dos sinais no domínio da frequência.

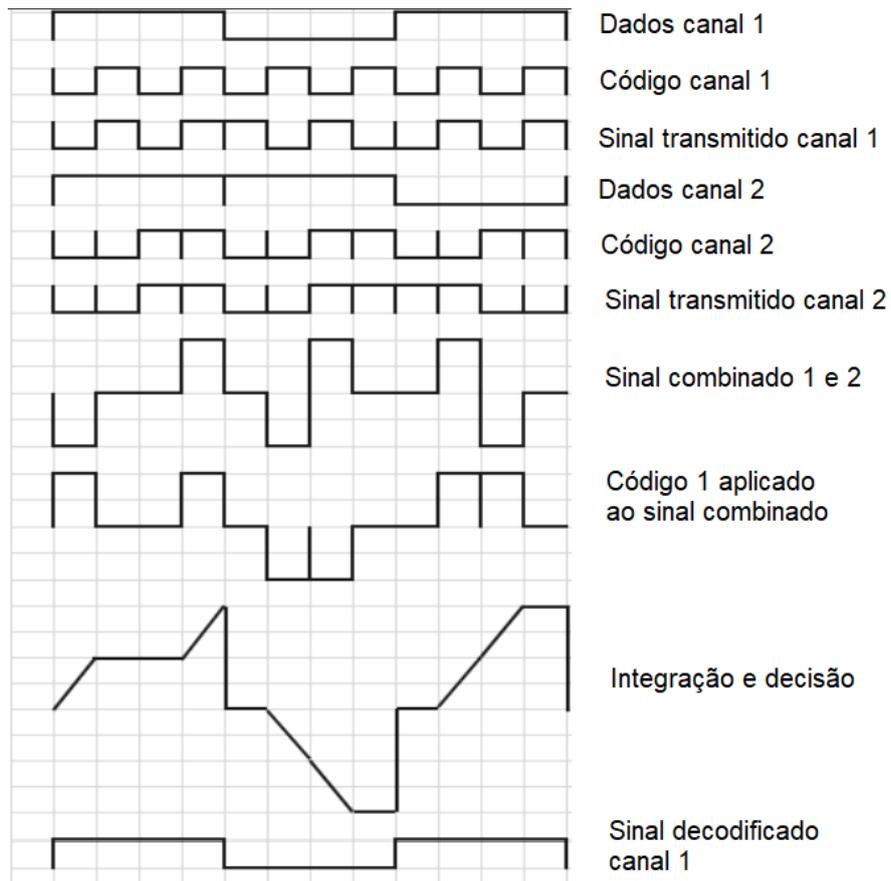


Figura 24 – Processo de codificação e decodificação no domínio do tempo

Adaptado de: [Mello and Rodrigues \[2002\]](#)

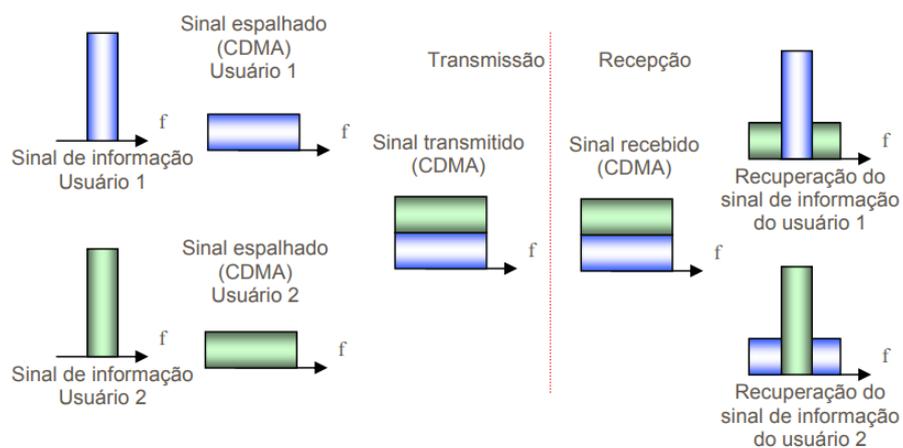


Figura 25 – Processo de codificação e decodificação no domínio da frequência

Adaptado de: [Mello and Rodrigues \[2002\]](#)

## 4.1 Avanço da tecnologia *OCDMA* em fibra

*OCDMA* é uma tecnologia de múltiplo acesso em fibra óptica capaz de realizar transmissões simultâneas no mesmo intervalo de tempo e utilizando o mesmo comprimento de onda. O *CDMA* é amplamente utilizado nas redes de acesso sem fio para o *UMTS* e *LTE*. Para um contexto em fibra, são consideradas algumas configurações possíveis. A detecção do sinal pode ser dada por um sistema coerente ou incoerente. Outro cenário de variação é o tipo de código. Existem sistemas de código unipolar e bipolar, além de possibilitar o trabalho com mais de uma dimensão (2D, 3D e além). O *OCDMA* incoerente tipicamente utiliza códigos unipolares, já que os códigos bipolares utilizados no *CDMA* para redes sem fio não têm desempenho aceitável no sistema *OCDMA* e não podem ser utilizados. Uma das principais limitações dos códigos bipolares é que eles apresentam um alto nível de autocorrelação, o que pode levar a interferências significativas entre diferentes usuários do sistema. Além disso, os códigos bipolares apresentam uma baixa eficiência espectral, o que significa que eles usam uma alta largura de banda para transmitir uma quantidade relativamente pequena de informações[Yin and Richardson, 2007].

O *OCDMA* pode trabalhar com códigos unipolares com boa autocorrelação e baixa correlação cruzada, tais como *OOC* (*Optical Orthogonal Code*), *PC* (*Prime Code*), *QCC* (*Quadratic Congruence Code*), entre outros. Entre estes códigos unidimensionais, o *OOC* tem o melhor desempenho, mas a sua construção é complicada, em comparação com os de outros códigos. Contudo, a aplicação de códigos unidimensionais a sistemas *OCDMA* incoerentes é limitada, pois, apesar de ter boa autocorrelação, o número de usuários na rede é inversamente proporcional à taxa de dados para um único usuário [Yin and Richardson, 2007].

Devido à aplicabilidade limitada de códigos unidimensionais a sistemas *OCDMA* incoerentes, a partir de 1990, pesquisadores exploraram códigos bidimensionais (2D), aumentando enormemente a capacidade do sistema e melhorando o desempenho.

Sistemas incoerentes em *OCDMA* tipicamente utilizam códigos bipolares como *M-Sequence*, *Gold Codes* e *Walsh-Hadamard Codes*. Nas próximas seções, será explorado o *OCDMA* incoerente com códigos bipolares, analisando a performance em cada caso.

## 4.2 Benefícios do *OCDMA* em sistemas ópticos com reutilização de comprimento de onda

Os sistemas baseados em *OCDMA* tem uma função importante se tratando de transmissão bidirecional em fibra. Os efeitos do *RBS* tem forte influência em sistemas bidirecionais usando *WDM*, o que impede o reuso de comprimentos de onda no *US* e *DS*. Ao utilizar técnicas de códigos ortogonais em fibra tem-se a mitigação destes efeitos.

*Rayleigh backscattering* é um fenômeno óptico que ocorre quando a luz é dispersa por partículas pequenas, como as encontradas em fibras ópticas. A Equação 4.1 que descreve a intensidade da luz retroespalhada pode ser escrita como, segundo Agrawal [2010]:

$$P_{bs} = \frac{8\pi^3 n^2 k^4 \lambda^4}{3N_{eff} A_{eff}^2} |\gamma(\Delta\beta)|^2 L P_{in} \quad (4.1)$$

onde:

- $P_{bs}$  é a potência do sinal retroespalhado;
- $n$  é o índice de refração do núcleo da fibra óptica;
- $k$  é o número de onda;
- $\lambda$  é o comprimento de onda;
- $N_{eff}$  é o índice de refração efetivo;
- $A_{eff}$  é a área efetiva da seção transversal do núcleo;
- $\gamma(\Delta\beta)$  é o coeficiente de sensibilidade de fase do efeito Kerr;
- $\Delta\beta$  é a diferença de constantes de propagação entre a portadora e as componentes espalhadas;
- $L$  é o comprimento da fibra óptica;
- $P_{in}$  é a potência de entrada no sistema.

Para avaliar a resiliência do sistema *FE-OCDMA*, foi criado um bloco personalizado para simular o *Crosstalk (Crosstalk Simulator - CTS)*, utilizando o software Optisystem<sup>®</sup>. O intuito é simular os efeitos de propagação de crosstalk gerado pelos efeitos de *RBS*, a fim de explorar uma das principais fontes de deficiência na óptica bidirecional em sistemas com reutilização do comprimento de onda. A Figura 26 mostra a estrutura do sistema simulado.

Para emular os efeitos de propagação de *RBS*, 8 fontes de luz são modulados com réplicas atrasadas de um sinal pseudorandômico sequencial (*PRBS*) com modulação sem retorno a zero (*NRZ*) no domínio elétrico, utilizando o modulador Mach-Zehnder (*MZM*). Para cada fonte de luz  $S_i$ , o sinal *NRZ* é atrasado por  $1/(2 * \text{Bitrate})$  em relação à fonte anterior  $S_{i-1}$ , com  $i$  variando de 1 a 7. O as fontes moduladas são então acopladas usando um combinador de 8 canais e depois acomplado à saída da fibra óptica.

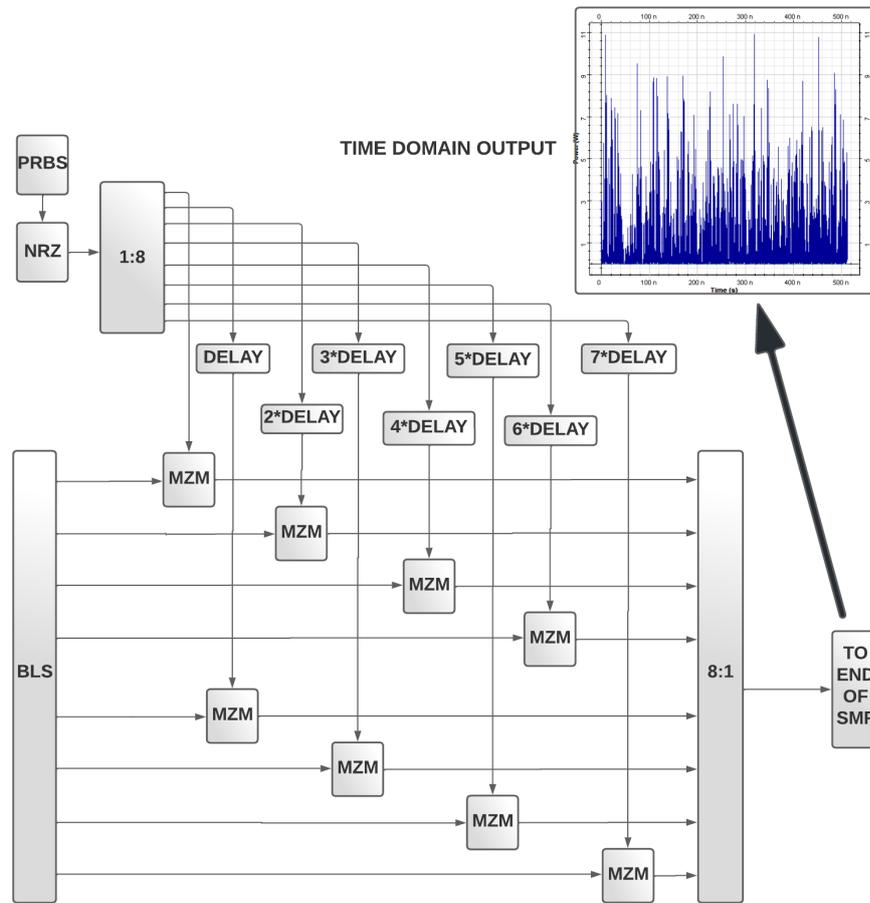


Figura 26 – Bloco Simulador de *Crosstalk*

Ainda na Figura 26 é possível observar o sinal de saída no domínio do tempo referente a uma taxa de bits de 1 Gbps com uma sequência comprimento de palavra de 1024 bits. Para ajustar o nível de potência do simulador de Crosstalk (*CTS*), foi utilizado um Atenuador Óptico Variável (*VOA*) na saída da fibra. Assim, o *SCR* pode ser simplesmente calculado por subtraindo a potência do sinal modulado original através do Nível de potência de saída *CTS*, em dBm.

As Fig. 27 e Fig. 28 mostram os esquemas para uma simulação em *OOK NRZ* sem codificação e o sistema proposto *FE-OCDMA*, respectivamente. Para o cenário *FE-OCDMA*, o sinal de saída do *CTS* também foi codificado, utilizando um código ortogonal diferente em relação ao canal principal, como mostrado na Fig. 28.

Para o sistema *FE-OCDMA* da Fig. 28, foram utilizados 4 *FBGs* para o sinal codificação, com base no código *Walsh-Hadamard*, simbolizado pelos blocos em azul. Uma segunda sequência *NRZ* é codificada com uma código no *CTS*, representada pelos blocos em vermelho. O sinal de *Crosstalk* é então combinado na extremidade da fibra. De forma semelhante, o sistema *NRZ-OOOK* não codificado combina o canal não codificado do usuário com um sinal modulado por outra sequência binária, combinando ambos na saída da mesma fibra, como mostra a Figura 27.

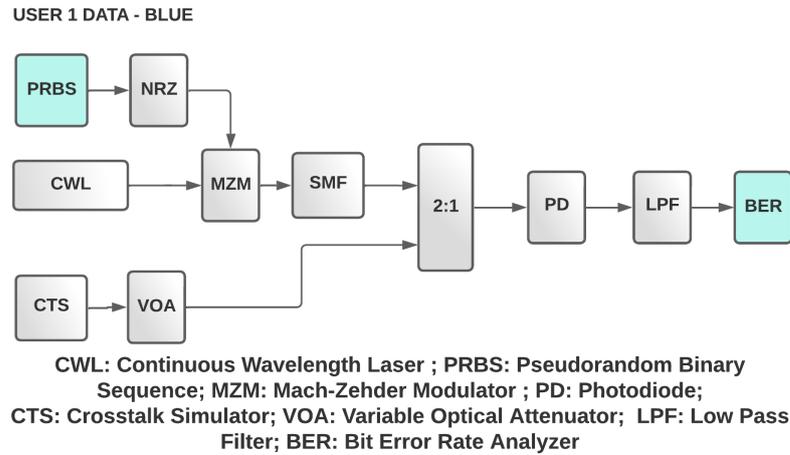


Figura 27 – Esquema para simular o *Crosstalk* em um Sistema *OOK-NRZ* não codificado

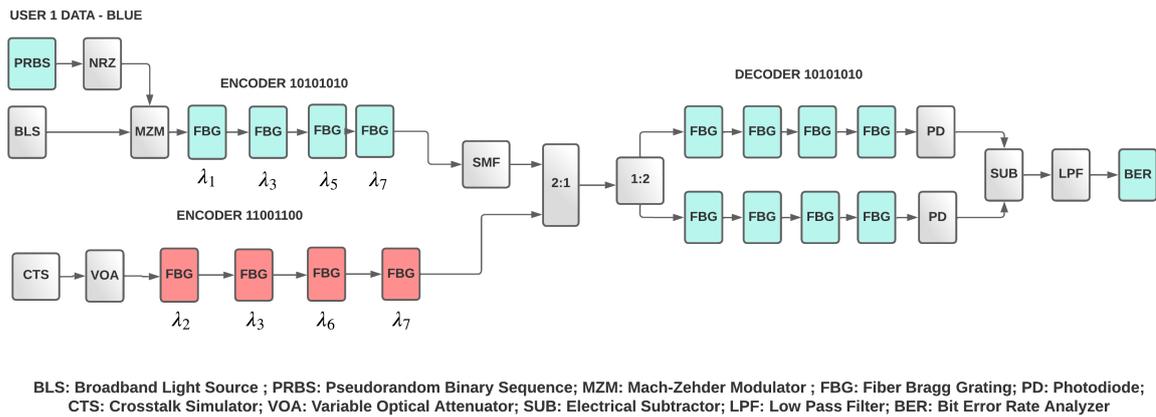


Figura 28 – Esquema para simular o *Crosstalk* em no sistema *FE-OCDMA* proposto

Para demonstrar a mitigação de interferência entre canais, foi simulado uma comparação entre um sistema de detecção direta baseado em modulação *OOK* com pulsos *NRZ* e o mesmo sistema utilizando a codificação *OCDMA*. A Figura 29 mostra que o sistema *FE-OCDMA* possui melhor desempenho com os mesmos valores de *SCR* (*Signal-Crosstalk Ratio*), em comparação com o sistema *OOK* não codificado. Ao usar códigos ortogonais para sinal e *crosstalk*, é possível obter níveis de *BER* de cerca de  $10^{-3}$ , mesmo com valores de *SCR* baixo, como 5 dB. Comparando-se com o sistema *OOK* não codificado, o *SCR* mínimo necessário para atingir o mesmo limiar de *BER* é de 16 dB. Dessa forma, o esquema em *OCDMA* permite alcançar um ganho de 11 dB em relação a um sinal sem codificação. Para a simulação de *crosstalk*, foi elaborado um bloco personalizado no Optisystem<sup>®</sup> baseado no fenômeno de *RBS* e, ao modular a potência do *crosstalk* através de um *VOA*, foi possível calcular indiretamente o *SCR* subtraindo a potência recebida da potência emitida pelo gerador de *crosstalk* [Bueno and Chiuchiarelli, 2022].

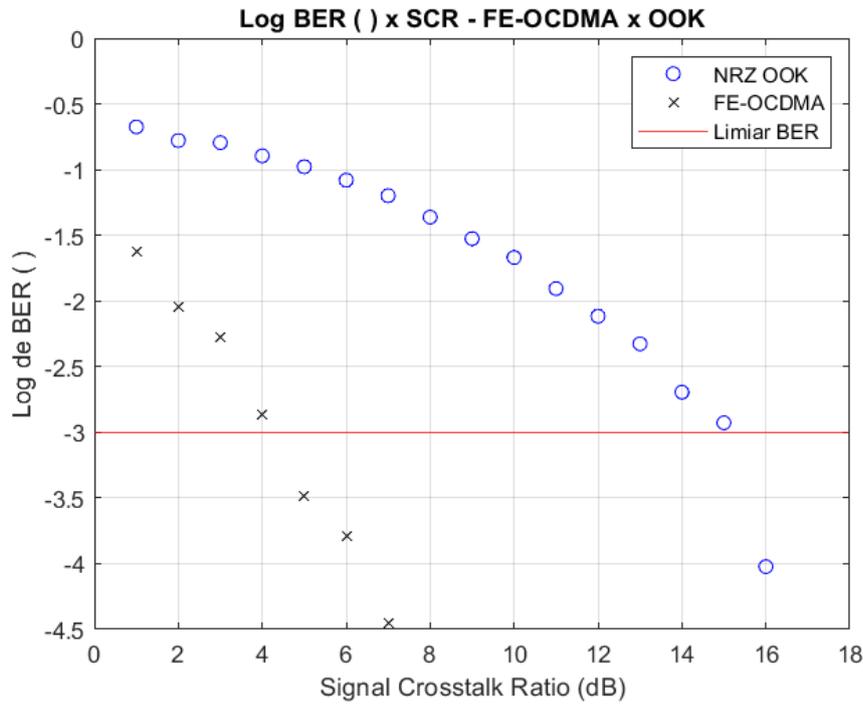


Figura 29 – Comparação resiliência ao *Crosstalk* para sistemas *OCDMA*

### 4.3 Sistema *FE-OCDMA* baseado em códigos *Walsh-Hadamard*

Os códigos *Walsh-Hadamard* consistem em códigos ortogonais bipolares em arranjos matriciais. Os elementos  $H(i)$  podem assumir valores  $\pm 1$  [Huang et al., 2004]. A matriz é elaborada através de recursividade, conforme a Equação 4.2 abaixo:

$$H(i+1) = \begin{bmatrix} H(i) & H(i) \\ H(i) & -H(i) \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Nesta seção, apresentamos uma técnica eficiente para transmitir múltiplos canais em uma fibra bidirecional de modo único, usando a *Frequency Encoding Orthogonal Code Division Multiple Access (FE-OCDMA)* no domínio óptico, baseada em Redes de Bragg em Fibra (*FBG*). O esquema completo de multiplexação óptica proposto permite a transmissão bidirecional de canais ópticos independentes compartilhando o mesmo comprimento de onda tanto na direção *downstream (DS)* como *upstream (US)*, sendo cada canal associado a um código ortogonal diferente.

*Frequency-encoded orthogonal code division multiple access (FE-OCDMA)* é uma técnica que utiliza um código ortogonal para definir de forma única um usuário na rede. Usando matrizes de *FBGs*, é possível definir um mecanismo de codificação baseado na frequência refletida do *FBG* e, usando uma combinação de diferentes frequências refletidas, o código do usuário é definido no codificador. Neste trabalho, utilizamos a codificação

Walsh-Hadamard.

O sistema *FE-OCDMA* precisa de uma fonte de luz de amplo espectro para funcionar corretamente, pois requer uma largura de banda de fonte de luz que englobe todas as frequências refletidas pelo *FBG*. Os dados são então modulados por um *Mach Zehnder Modulator (MZM)* antes de serem passados através do codificador óptico baseado em *FBG*. O sinal óptico codificado propaga-se através da fibra monomodo (*SMF*) e passa por um decodificador baseado em *FBG* seguido por um fotodiodo balanceado. O processo de decodificação faz uso de subtração de correlação e detecção direta.

### 4.3.1 Simulações

A implementação prática do *OCDMA* pode ser mais complexa do que outras topologias de redes *PON*, como a *TDM* ou a *WDM-PON*. Isso ocorre devido às características específicas do *OCDMA*, que exigem uma série de equipamentos e processos adicionais.

Por outro lado, as topologias de redes *PON* baseadas em *TDM* ou *WDM-PON* geralmente exigem menos equipamentos e processos adicionais, o que pode tornar sua implementação mais simples e econômica. No entanto, cada topologia de rede tem suas próprias vantagens e desvantagens, e a escolha entre elas depende das necessidades específicas do sistema e das limitações de recursos.

Isso se deve ao fato de que, em *OCDMA*, cada usuário é atribuído um código de espalhamento exclusivo que permite que vários usuários transmitam simultaneamente sem interferir entre si.

No entanto, é importante notar que o número de usuários que podem ser suportados em um sistema *OCDMA* depende do número de códigos de espalhamento exclusivos disponíveis. Se houver um número limitado de códigos disponíveis, o número máximo de usuários que podem ser suportados também será limitado.

A Fig. 30 mostra, como exemplo, um sistema *FE-OCDMA* de 7 usuários. O processo de codificação é por pulsos bipolares utilizando códigos ortogonais de *Walsh-Hadamard*. O sistema *FE-OCDMA* precisa de uma fonte de luz ampla para funcionar corretamente, pois requer uma largura de banda de fonte de luz que englobe todas as frequências refletidas dos *FBGs*. Os dados são então modulados por um *MZM* antes de passarem pelos *encoders*. O sinal óptico codificado propaga-se através da fibra monomodo e passa por um decodificador baseado em *FBG* seguido por um fotodiodo balanceado. O processo de decodificação se dá através de subtração de correlação e detecção direta. A filtragem passa-baixas na detecção tem a frequência de corte de 65% da taxa de bit adotada, para uma maior efetividade na filtragem de ruídos de alta frequência.

Para 7 usuários, é necessária uma matriz de terceira ordem  $H(3)$  conforme abaixo:

$$H(3) = \begin{bmatrix} +1 & +1 & +1 & +1 & +1 & +1 & +1 & +1 \\ +1 & -1 & +1 & -1 & +1 & -1 & +1 & -1 \\ +1 & +1 & -1 & -1 & +1 & +1 & -1 & -1 \\ +1 & -1 & -1 & +1 & +1 & -1 & -1 & +1 \\ +1 & +1 & +1 & +1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ +1 & -1 & +1 & -1 & -1 & +1 & -1 & +1 \\ +1 & +1 & -1 & -1 & -1 & -1 & +1 & +1 \\ +1 & -1 & -1 & +1 & -1 & +1 & +1 & -1 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

Para a elaboração dos *encoders*, cada linha da matriz representa um código binário, assumindo +1 como “1” e -1 como “0”. A primeira linha é ignorada, pois só possui elementos “1”.

Sendo assim, a Tabela 2 demonstra os valores das frequências de corte dos *FBG's* que se encontram em série. Cada “0” representa a frequência de corte adotada para aquele código em série.

Para a simulação em questão, foi adotado um espaçamento de 0,5 nm entre os comprimentos de onda conforme mostra a Tabela 3, com uma fonte de luz de espectro amplo cujo comprimento de onda central é de 1550,75 nm.

Usuário	Código Walsh-Hadamard	Comprimento de onda
1	10101010	$\lambda_1 \lambda_3 \lambda_5 \lambda_7$
2	11001100	$\lambda_2 \lambda_3 \lambda_6 \lambda_7$
3	10011001	$\lambda_1 \lambda_2 \lambda_5 \lambda_6$
4	11110000	$\lambda_4 \lambda_5 \lambda_6 \lambda_7$
5	10100101	$\lambda_1 \lambda_3 \lambda_4 \lambda_6$
6	11000011	$\lambda_1 \lambda_3 \lambda_4 \lambda_5$
7	10010110	$\lambda_1 \lambda_2 \lambda_4 \lambda_7$

Tabela 2 – Tabela de Códigos *Walsh-Hadamard* para 7 usuários com espaçamento de 0,5 nm

Lambda	Comprimento de Onda
$\lambda_0$	1549,0
$\lambda_1$	1549,5
$\lambda_2$	1550,0
$\lambda_3$	1550,5
$\lambda_4$	1551,0
$\lambda_5$	1551,5
$\lambda_6$	1552,0
$\lambda_7$	1552,5

Tabela 3 – Tabela de Comprimento de Onda de Corte dos *FBG's*

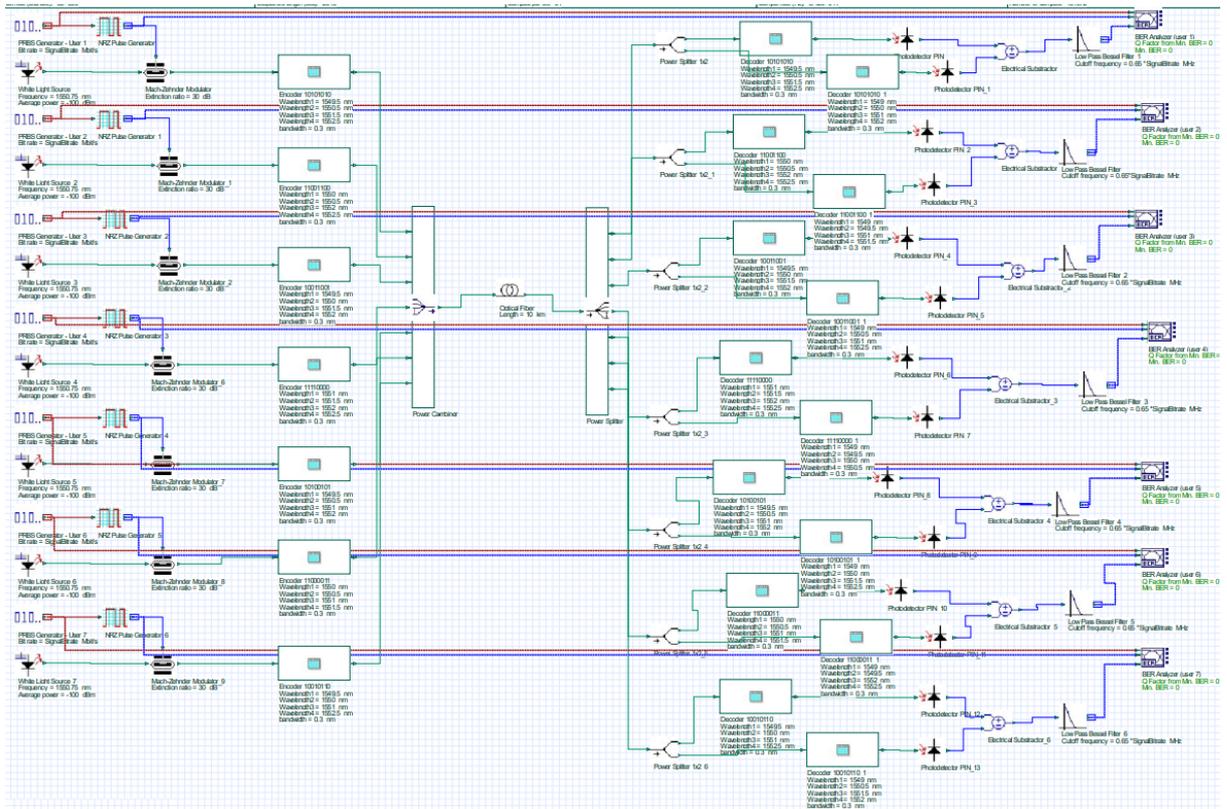


Figura 30 – Simulação de um sistema *FE-OCDMA* de 7 canais

A Figura 31 mostra o subsistema dos *Encoders* e *Decoders* baseado em *FBG's*, exibido na Figura 30. A codificação ortogonal é gerada em domínio espectral, inserindo os *FBG's* em série. Cada *FBG* possui um comprimento de onda de reflexão distinto, formando assim um código único para cada usuário. A Figura 32 (b) exhibe, a exemplo, o sinal codificado para um dos canais.

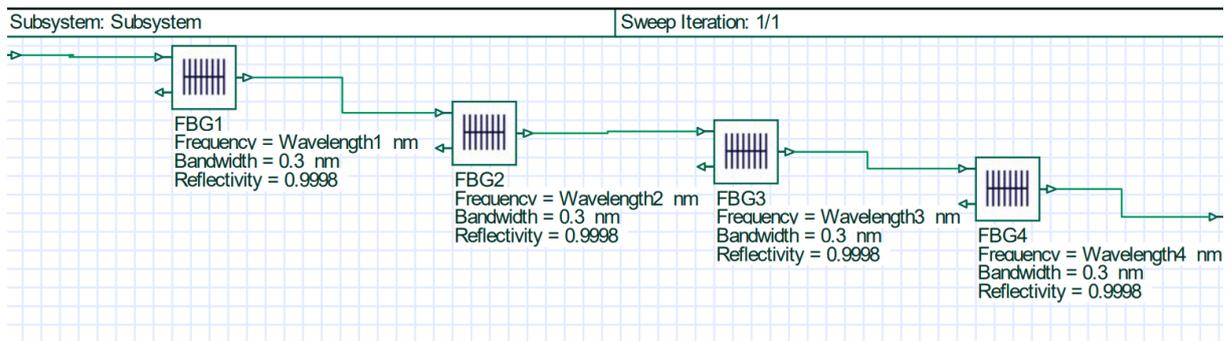


Figura 31 – *Encoder/Decoder* baseado em *FBG*

As figuras 32 (a) e (b) mostram, respectivamente, o diagrama de olho e o espectro na recepção do sinal do usuário 1 para o sistema mostrado na Fig. 30. Para o sinal espectral recebido, pode-se observar como funciona o mecanismo de codificação baseado em *FBG's*. Os comprimentos de onda de corte  $\lambda_n$  são refletidos e combinados em série, gerando um código ortogonal único para cada usuário.

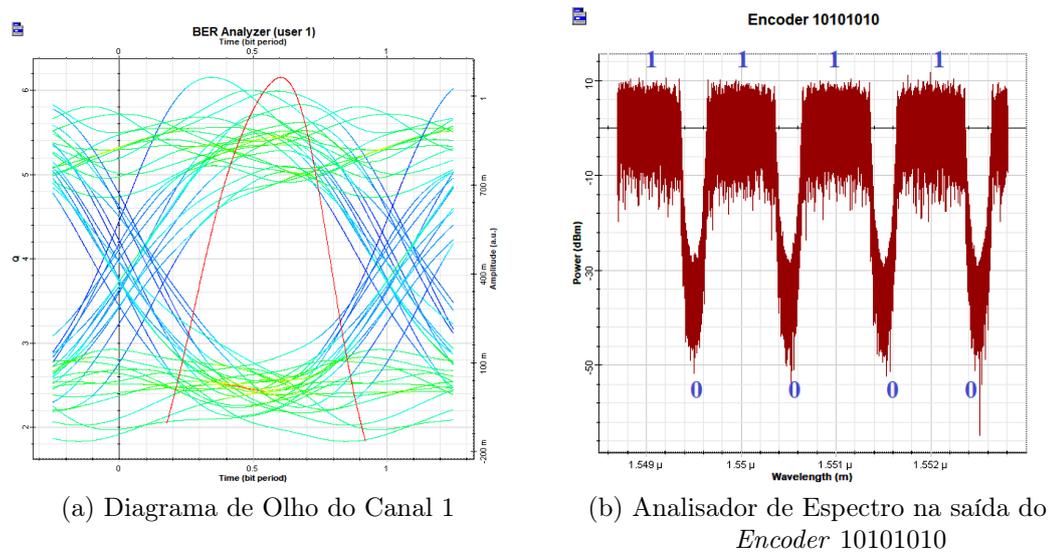


Figura 32 – Diagrama de Olho e *Encoder* para o canal 1

### 4.3.2 Resultados

Para analisar o desempenho do sistema em relação aos *encoders*, foi analisado como a largura de banda do comprimento de onda refletido pelos *FBG's* afeta a *BER* para o sistema *FE-OCDMA*. A Figura 33 mostra este comportamento para 7 canais de 200 Mbps e espaçamento de 0,5 nm entre cada  $\lambda_n$  dos *encoders*. Percebe-se que, para os critérios adotados, se tem uma melhor performance adotando uma largura de banda de 0,3 a 0,4 nm para os *FBG's*.

Pode-se observar também que larguras de banda superiores ao espaçamento dos comprimentos de onda de corte dos *FBG's* (0,5 nm) possuem rápido decaimento de desempenho por gerar interferência entre os *encoders*, afetando assim a correlação dos códigos. Já larguras de banda muito curtas, como abaixo de 0,3 nm, são estreitas demais e não permitem que o receptor balanceado as decodifique.

A Figura 34 mostra a análise de erro de bit em relação a largura de banda dos *FBG's* para canais de 400 Mbps. Percebe-se uma redução da performance em comparação a Figura 33, contudo a faixa ótima se mantém entre 0,3 e 0,4 nm.

A análise de performance de erro de bit por comprimento do enlace é demonstrada na Figura 35 para canais de 200 Mbps e largura de banda de 0,3 nm dos *FBG's*. Em cada uma das curvas foi aumentado gradualmente o número de usuários. Nota-se que é possível atingir a BER necessária mesmo no pior caso, com 7 usuários e lance de fibra de 50 km.

A Figura 36 mostra como a inserção de usuários na rede afeta a performance dos usuários para uma taxa de bit maior. Para complementar a análise, variou-se também o comprimento da fibra óptica, para a verificação da robustez do sistema utilizando canais de 400 Mbps. Verifica-se que em todos os casos, de 1 a 7 usuários na rede, é possível adotar

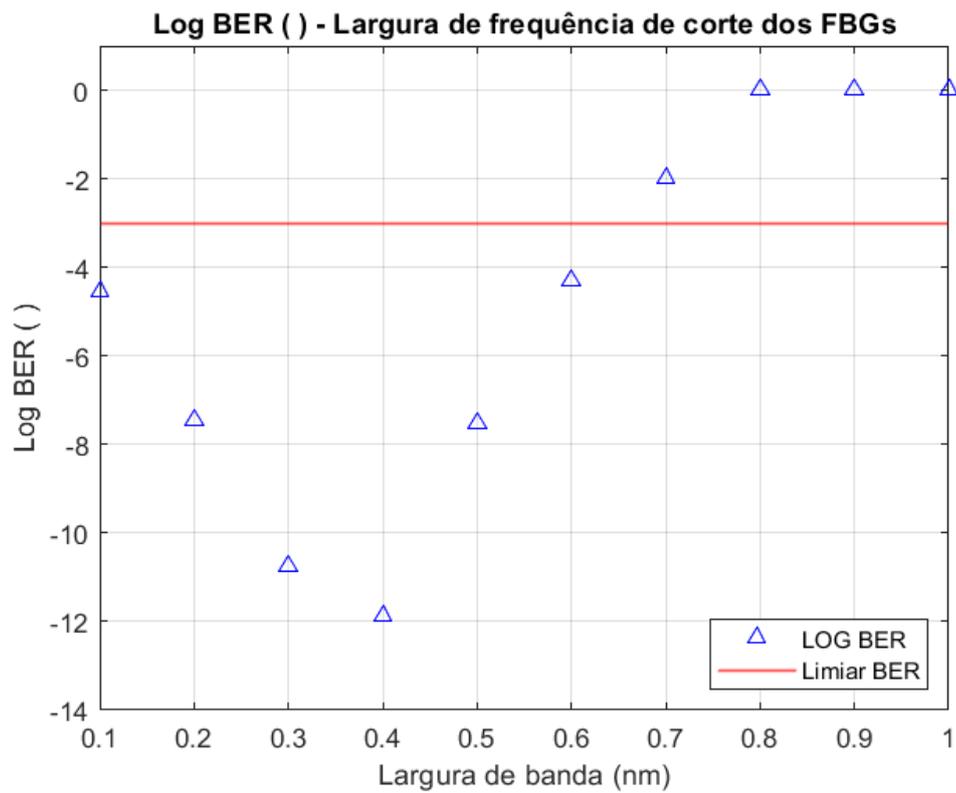


Figura 33 – Gráfico de Log *BER* por largura de banda da frequência de corte dos *FBG's* para 7 canais de 200 Mbps

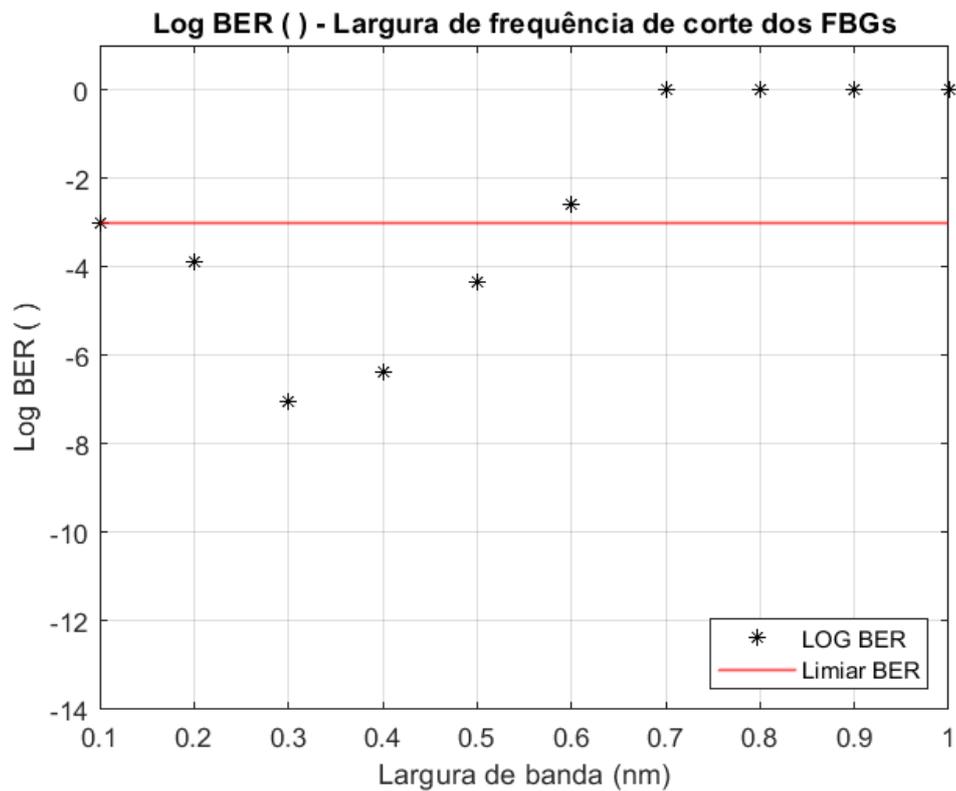


Figura 34 – Gráfico de Log *BER* por largura de banda da frequência de corte dos *FBG's* para 7 canais de 400 Mbps

enlaces de fibra de até 25 km. Nota-se que a performance decai com o aumento do número de canais na rede, principalmente a partir de 4 usuários.

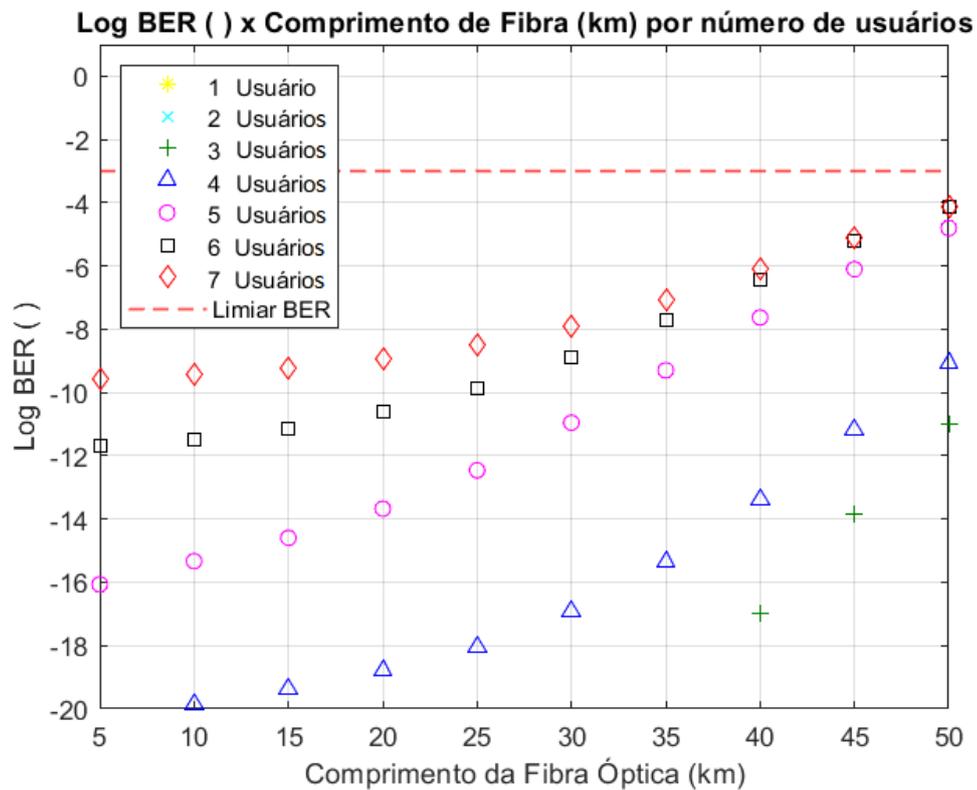


Figura 35 – Gráfico de Log  $BER$  por comprimento de fibra em km variando de 1 a 7 canais de 200 Mbps para código *Walsh-Hadamard*

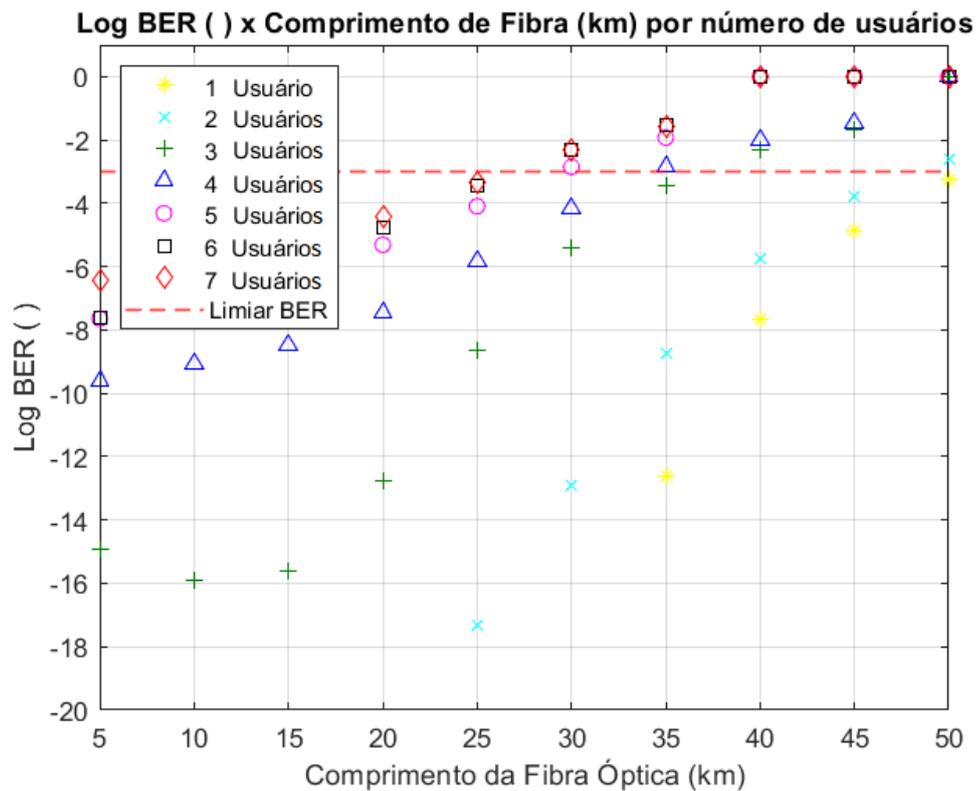


Figura 36 – Gráfico de Log  $BER$  por comprimento de fibra em km variando de 1 a 7 canais de 400 Mbps para código *Walsh-Hadamard*

## 4.4 Sistema *FE-OCDMA* baseado em códigos *LFSR*

Códigos *LFSR* (*Linear Feedback Shift Register*) são sequências pseudo randômicas geradas por registradores de deslocamento lineares realimentados. Registradores *LFSR* são amplamente utilizados em computação e telecomunicações, em aplicações diversas como criptografia e embaralhamento de sinais de *broadcasting*, além de processamento de sinais digitais em diversos protocolos e tecnologias como *Wi-fi IEEE 802.11*, *HDMI 2.0*, *PCI Express*, *SATA*, entre outros [Klein, 2013].

### 4.4.1 Simulações

A Tabela 4 mostra a relação de códigos adotados para cada usuário na rede. Foi adotado um espaçamento de 0,5 nm com os mesmos  $\lambda_n$  exibidos na Tabela 3.

Para a simulação foi utilizada a mesma simulação mostrada na Figura 30 porém com a alteração dos códigos conforme mostra a Tabela 4.

### 4.4.2 Resultados

A Figura 37 mostra como muda o comportamento da  $BER$  quando se altera a largura de banda do comprimento de onda de corte dos *FBG's* para códigos *M-Sequence*.

Usuário	Código LFSR	Comprimento de onda
1	1110100	$\lambda_3\lambda_5\lambda_6$
2	0111010	$\lambda_0\lambda_4\lambda_6$
3	0011101	$\lambda_0\lambda_1\lambda_5$
4	1001110	$\lambda_1\lambda_2\lambda_6$
5	0100111	$\lambda_0\lambda_2\lambda_3$
6	1010011	$\lambda_1\lambda_3\lambda_4$
7	1101001	$\lambda_2\lambda_4\lambda_5$

Tabela 4 – Tabela de Códigos *LFSR* para 7 usuários com espaçamento de 0,5 nm

Nota-se que a faixa ótima é de 0,2 a 0,4 nm, para o caso analisado de 0,5 nm entre  $\lambda_n$ .

Para o caso da Figura 38 nota-se uma diminuição na performance quando se aumenta a taxa de bit para 400 Mbps. Ainda sim, pode-se considerar a faixa de 0,2 a 0,4 nm a mais otimizada para os *encoders*, considerando espaçamento de 0,5 entre  $\lambda_n$ .

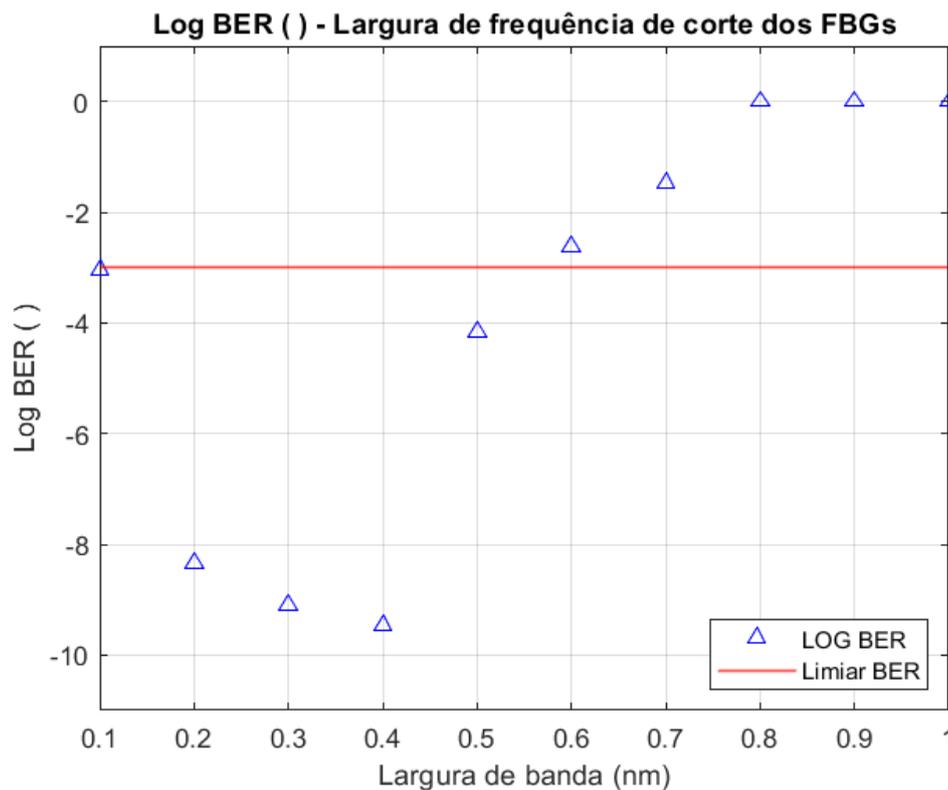


Figura 37 – Gráfico de Log *BER* por Largura de banda da frequência de corte dos *FBG's* para 5 canais de 200 Mbps

As Figuras 39 (a) e (b) mostram como exemplo o diagrama de olho na recepção do sinal para o Canal 1, cujo *encoder* é mostrado na Figura (b) através de um *OSA*. Para ambos os casos foram adotados 5 usuários utilizando códigos *M-Sequence* em 200 Mbps e 10 km de fibra óptica.

A Figura 40 mostra os resultados da simulação do sistema *FE-OCDMA* baseado

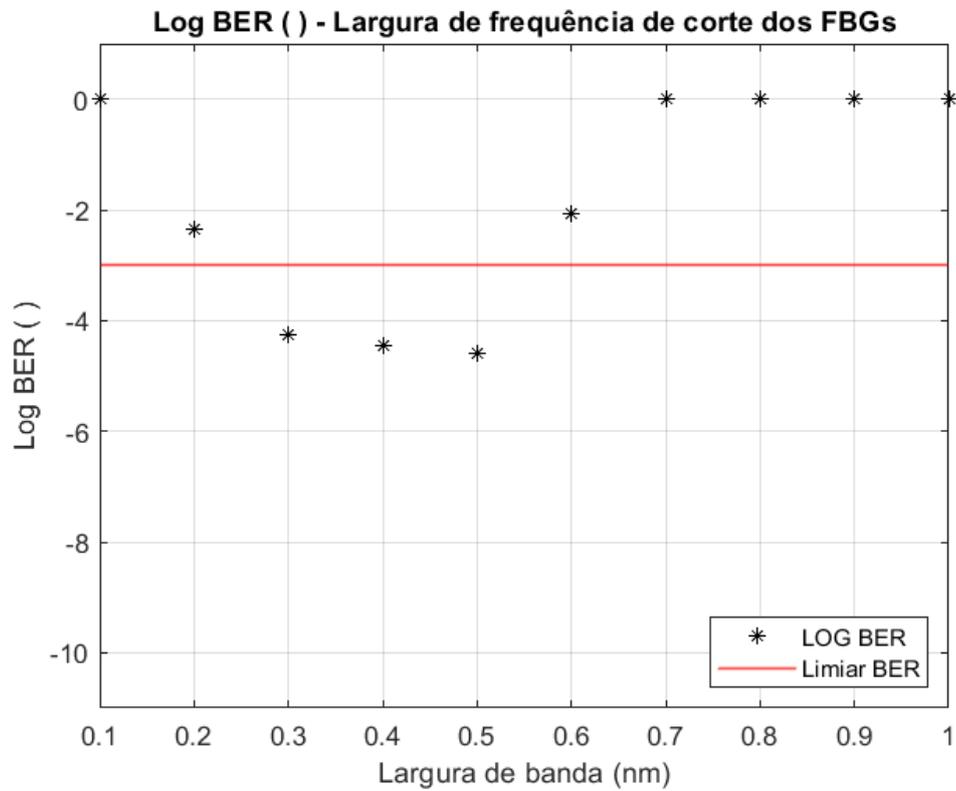


Figura 38 – Gráfico de Log BER por Largura de banda da frequência de corte dos FBG's para 5 canais de 200 Mbps

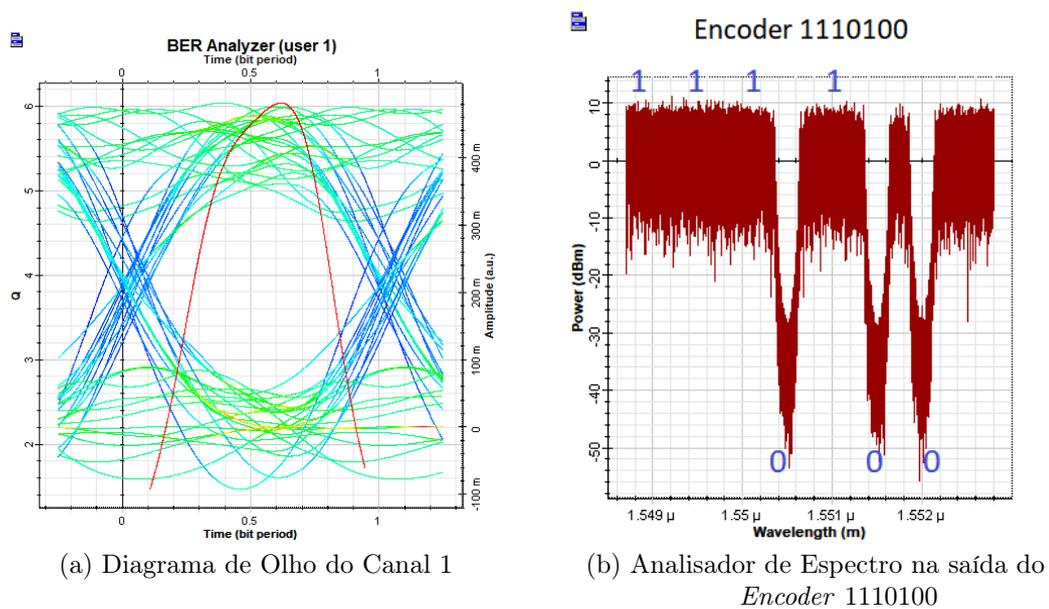


Figura 39 – Diagrama de Olho e Encoder para o canal 1

nos códigos *LFSR* da Tabela 4. O espaçamento entre os comprimentos de onda de corte dos *FBG's* é de 0,5 nm, conforme Tabela 3, adotando também canais de 200 Mbps. Cada usuário é inserido na rede gradualmente para uma análise de desempenho dos usuários em cada caso. É notável que há uma grande ocorrência de erro de bit acima de 3 usuários da rede, tanto para 200 Mbps quanto para 400 Mbps. Contudo, com o uso de códigos *LFSR*, o sistema tem maior resiliência para o aumento de lances de fibra óptica, chegando em até 40 km para 4 usuários com *BER* no limite aceitável, para canais de 200 Mbps.

A mesma análise foi estendida para canais de 400 Mbps na Figura 41. Nota-se uma diminuição da performance, sendo inviável a partir de 4 canais.

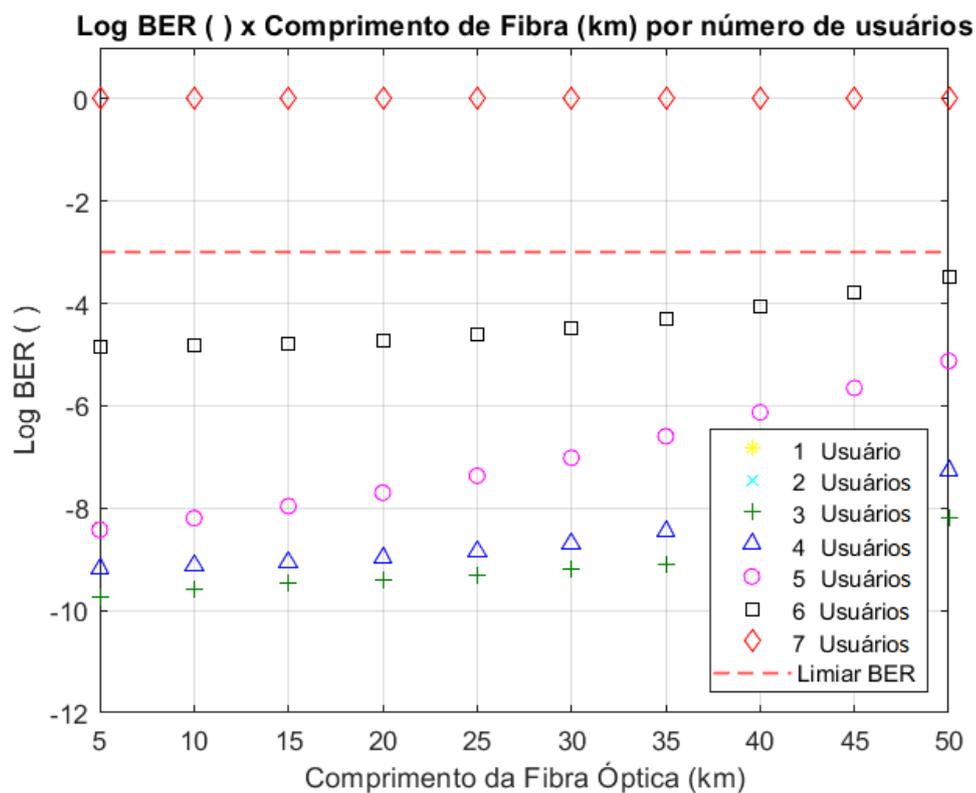


Figura 40 – Gráfico de Log *BER* por Comprimento de Fibra em km variando de 1 a 7 canais de 200 Mbps para código M-Sequence

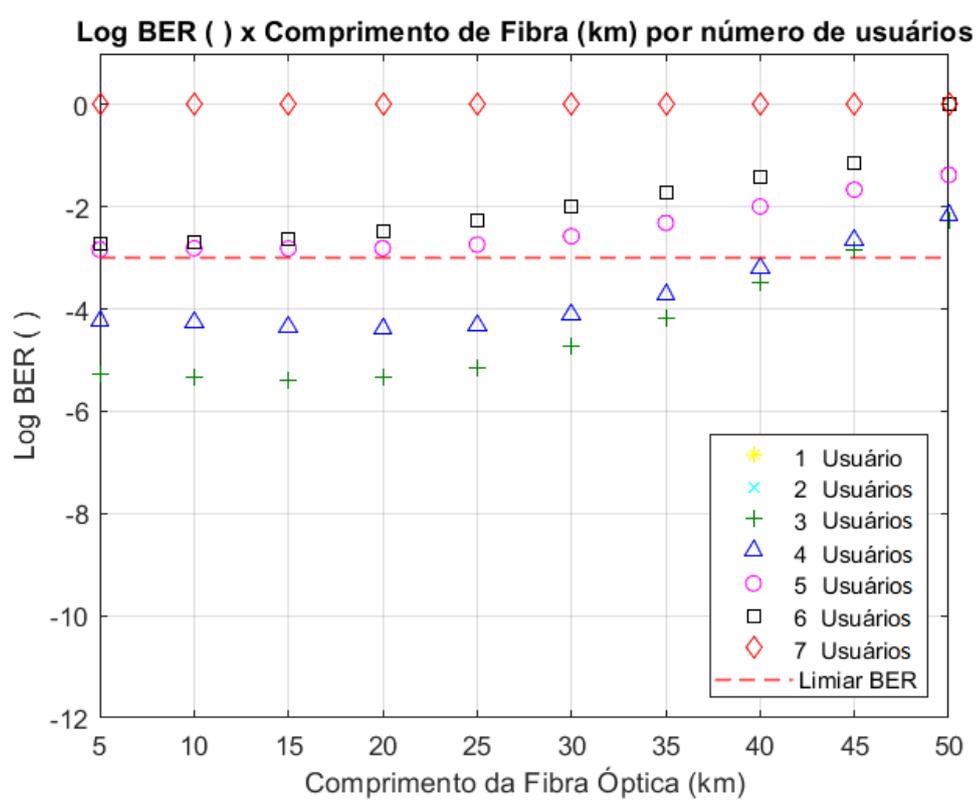


Figura 41 – Gráfico de Log BER por Comprimento de Fibra em km variando de 1 a 7 canais de 400 Mbps para código M-Sequence

# Capítulo 5

## Conclusão

O trabalho apresentado vai de encontro aos objetivos propostos. Foram apresentados modelos de *fronthaul* óptico utilizando quatro técnicas de múltiplo acesso: *TDM*, *WDM*, *OFDM* e *OCDMA*.

Conforme esperado, cada uma das técnicas possui vantagens e desvantagens que podem ser levantadas e analisadas caso a caso.

Para o modelo *TDM*, foi apresentado dois tipos de modulação conforme indicado pela bibliografia: pulsos *OOK* baseados em modulação *NRZ* e também modulação multinível em amplitude, no caso, *PAM-4*. O *NRZ* apresenta uma maior robustez por trabalhar com apenas dois níveis de amplitude. Verifica-se que, para o caso em exemplo, com enlace de 10 km de fibra trabalhando com canais de 20 Gbps, foi possível trabalhar com 64 divisões com BER menor do que o limiar aceitável de  $10^{-3}$ .

No caso da modulação *PAM-4*, alcançou-se um número possível de divisões de 32 trabalhando com 10 GBaud. Espera-se que o *PAM-4* tenha uma performance um pouco inferior por trabalhar com modulação multinível, dado que ruídos em amplitude implicam em erros simbólicos na recepção.

No modelo *WDM*, comparou-se dois tipos de modulação *OOK*, com *NRZ* e *RZ*. A performance de ambas é semelhante, contudo no caso *NRZ* houve uma ligeira melhoria de performance para longas distâncias de fibra. Sistemas *WDM* têm uma grande versatilidade devido à largura de banda passante nas fibras ópticas, que é muito alta. Sistemas *PON* mais atuais mostrados no Capítulo 2 utilizam uma combinação de *WDM* e *TDM*, o que gera uma grande versatilidade destas técnicas para diversas aplicações.

O modelo *OFDM* coerente ainda é pouco explorado em fibra pela indústria de telecomunicações. Para os modelos propostos, de detecção coerente, foi possível simular baseado em dois tipos de modulação em amplitude e quadratura: *4-QAM* (2 bits por símbolo) e *16-QAM* (4 bits por símbolo). Modulações de ordem mais elevada como 32, 64 ou até *256-QAM* não obtiveram performance aceitável nos ensaios e, portanto, não foram

inseridos neste trabalho.

Para as simulações de sistemas *OFDM*, nos dois cenários foi possível alcançar distâncias de até 80km, ao menos em ambiente simulado. Outro resultado animador é referente à métrica de *EVM* na recepção, que atingiu o limite demandado em todos os casos simulados, conforme recomendação do 3GPP TS 36.104, para as modulações *QPSK* e *16-QAM*.

A modulação *4-QAM*, por ser mais robusta, não apresentou erro de bit significativo nas simulações para canais de 20 Gbps ou, neste caso, 10 GBaud. Já para o caso da modulação de ordem mais elevada, a *16-QAM*, em todos os casos a BER se encontrava pouco abaixo do limiar estabelecido.

No Capítulo 4 foram exibidos dois modelos baseados em *OCDMA* com codificação espectral. Para ambos os casos foi adotada detecção incoerente e uso de códigos ortogonais bipolares.

O primeiro caso teve o código baseado em códigos ortogonais de *Walsh-Hadamard*. Estes são códigos gerados através de uma matriz cujos elementos são alimentados por recursividade. Neste caso obteve-se uma melhor performance, alcançando *BER* dentro do limiar estabelecido para 7 usuários trabalhando em 400 Mbps para um lance de fibra de até 25 km.

O segundo caso foi baseado em códigos *M-Sequence*. São códigos gerados através de registradores de deslocamento realimentados. Estes atingiram uma performance inferior ao primeiro caso, com um limite máximo de 5 usuários com *BER* aceitável. Contudo, o uso deste código apresentou uma menor limitação quanto a variações de comprimento da fibra, atingindo até 40 km.

O *OCDMA* é ainda pouco adotado para comunicação em fibra óptica e, para os casos simulados, não foi possível atingir altas taxas de bit como nos casos clássicos apresentados no Capítulo 3. Contudo o *OCDMA* apresenta vantagens a estes sistemas, por ter uma demanda computacional reduzida, poder trabalhar com uma mesma faixa de frequência e transmissão simultânea, sem a necessidade de sincronismo e múltiplo acesso temporal. Esta técnica também pode ser combinada com uma das outras três, ampliando ainda as possibilidades de implantação de sistemas ópticos. As limitações, além das baixas taxas de transmissão, se dão pelo uso de *FBG's* nos *encoders*, que, em larga escala, necessitam ser compostos por arranjos reprogramáveis através de piezoelectricidade embutida no dispositivo ou um controle refinado de calor para deslocar os comprimentos de onda de corte.

## 5.1 Trabalhos Futuros

Para os trabalhos futuros pretende-se:

- Validar os resultados experimentalmente dos esquemas mostrados nos Capítulos 3 e 4;
- Comparar os resultados obtidos experimentalmente e verificar vantagens e desvantagens de implantação para cada tipo de sistema;
- Validar experimentalmente a implementação de um sistema *OCDMA* cujo código é gerado em domínio elétrico para maior escalabilidade e versatilidade na geração de códigos.
- Testar combinações dos esquemas de múltiplo acesso como *WDM* e *TDM* ou *WDM* e *OCDMA*.

# Referências

- G. P. Agrawal. Fiber-optic communication systems. *John Wiley and Sons*, 4(1):1–32, 2010.
- N. Bhandari, S. Devra, and K. Singh. Evolution of cellular network : From 1g to 5g abstract :. *International Journal of Engineering and Techniques*, 3:98–105, 2017.
- B. A. Bjerke. Lte-advanced and the evolution of lte deployments. *IEEE Wireless Communications*, 18(5):4–5, 2011. doi: 10.1109/MWC.2011.6056684.
- A. G. Bueno and A. Chiuchiarelli. Fe-ocdma applied to c-ran fronthaul in future mobile networks. In *2022 SBFoton International Optics and Photonics Conference (SBFoton IOPC)*, pages 1–4, 2022. doi: 10.1109/SBFotonIOPC54450.2022.9993398.
- Y. W. Chen, S. Shen, Q. Zhou, S. Yao, R. Zhang, S. Omar, and G. K. Chang. A reliable ofdm-based mmw mobile fronthaul with dsp-aided sub-band spreading and time-confined windowing. *Journal of Lightwave Technology*, 37, 2019. ISSN 15582213. doi: 10.1109/JLT.2019.2913273.
- H. Gupta, P. Gupta, P. Kumar, A. K. Gupta, and P. Kumar Mathur. Passive optical networks: Review and road ahead. In *TENCON 2018 - 2018 IEEE Region 10 Conference*, pages 0919–0924, 2018. doi: 10.1109/TENCON.2018.8650204.
- S.-K. Han. Time division multiplexing passive optical network: a review of the technology and development. *Optical Fiber Technology*, 20(6):650–662, 2014.
- H. Holma and A. Toskala. *WCDMA FOR UMTS Third Edition*. John Wiley and Sons Ltd, 2004.
- J.-F. Huang, C.-C. Yang, and S.-P. Tseng. Complementary walsh-hadamard coded optical cdma coder/decoders structured over arrayed-waveguide grating routers. *Optics Communications*, 229(1):241–248, 2004. ISSN 0030-4018. doi: <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2003.11.007>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030401803022168>.

- S. S. Jaffer, A. Hussain, M. A. Qureshi, and W. S. Khawaja. Towards the shifting of 5g front haul traffic on passive optical network. *Wireless Personal Communications*, 112: 1549–1568, 2020. ISSN 1572834X. doi: 10.1007/s11277-020-07115-6.
- P. G. Jr. *Fiber to the Home: The New Empowerment*. John Wiley and Sons, Inc., 10 2006. ISBN 9780471742470. doi: 10.1002/0471755648.
- G. Keiser. *Optical Fiber Communication*. McGraw-Hill Education International, 2013.
- A. Klein. *Linear Feedback Shift Registers*. Springer Berlin Heidelberg New York, 2013. doi: 10.1007/978-1-4471-5079-4\_2.
- T. Koonen. *Passive Optical Networks: Principles and Practice*. Elsevier, 2007.
- Y. Li, M. Bhopalwala, S. Das, J. Yu, W. Mo, M. Ruffini, and D. C. Kilper. Joint optimization of bbu pool allocation and selection for c-ran networks. *2018 Optical Fiber Communications Conference and Exposition, OFC 2018 - Proceedings*, pages 1–3, 2018.
- X. Liu and F. Buchali. A novel channel estimation method for pdm-ofdm enabling improved tolerance to wdm nonlinearity. In *2009 Conference on Optical Fiber Communication*, pages 1–3, 2009.
- X. Liu, F. Buchali, and R. W. Tkach. Improving the nonlinear tolerance of polarization-division-multiplexed co-ofdm in long-haul fiber transmission. *Journal of Lightwave Technology*, 27(16):3632–3640, 2009. doi: 10.1109/JLT.2009.2022767.
- M. Lopa and J. Vora. Evolution of mobile generation technology: 1g to 5g and review of upcoming wireless technology 5g. *International journal of modern trends in engineering and research*, 2:281–290, 2015.
- Y. Luo, X. Zhou, F. Effenberger, X. Yan, G. Peng, Y. Qian, and Y. Ma. Time- and wavelength-division multiplexed passive optical network (twdm-pon) for next-generation pon stage 2 (ng-pon2). *Journal of Lightwave Technology*, 31(4):587–593, 2013. doi: 10.1109/JLT.2012.2215841.
- L. A. R. S. Mello and M. E. C. Rodrigues. *Introdução aos Sistemas Móveis Celulares*. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2002.
- W. Mo, C. L. Gutterman, Y. Li, G. Zussman, and D. C. Kilper. Deep neural network based dynamic resource reallocation of bbu pools in 5g c-ran roadm networks. *2018 Optical Fiber Communications Conference and Exposition, OFC 2018 - Proceedings*, pages 1–3, 2018.
- M. I. Nashiruddin and N. Solihah. Performance evaluation of xgs-pon optical network termination for enterprise customer. In *2020 3rd International Seminar on Research of*

- Information Technology and Intelligent Systems (ISRITI)*, pages 251–256, 2020. doi: 10.1109/ISRITI51436.2020.9315450.
- D. Nasset. Ng-pon2 technology and standards. *Journal of Lightwave Technology*, 33:1–1, 03 2015. doi: 10.1109/JLT.2015.2389115.
- M. J. O’Mahony, A. D. Ellis, and D. K. Hunter. *Optical Networks: A Practical Perspective*. Academic Press, Boston, MA, 3 edition, 2018.
- T. G. Orphanoudakis, C. Matrakidis, A. Stavdas, and H.-C. Leligou. Exploiting state of the art wdm-pon technologies for building efficient fttc networks. In *2013 15th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, pages 1–4, 2013. doi: 10.1109/ICTON.2013.6602742.
- B. J. Sahu, S. Dash, N. Saxena, and A. Roy. Energy-efficient bbu allocation for green c-ran. *IEEE Communications Letters*, 21:1637–1640, 2017. ISSN 10897798. doi: 10.1109/LCOMM.2017.2695545.
- S. Sesia, I. Toufik, and M. Baker. *LTE - The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice*. John Wiley and Sons Ltd, 2009. doi: 10.1002/9780470742891.
- J. W. Simatupang. A study on rayleigh backscattering noise in single fiber transmission pon. *International Journal of Innovative Research in Technology and Science*, 2016.
- T. Tashiro, S. Kuwano, J. Terada, T. Kawamura, N. Tanaka, S. Shigematsu, and N. Yoshimoto. A novel dba scheme for tdm-pon based mobile fronthaul. In *Optical Fiber Communication Conference*, page Tu3F.3. Optica Publishing Group, 2014. doi: 10.1364/OFC.2014.Tu3F.3.
- J. Wang, C. Liu, J. Zhang, M. Zhu, M. Xu, F. Lu, L. Cheng, and G. K. Chang. Nonlinear inter-band subcarrier intermodulations of multi-rat ofdm wireless services in 5g heterogeneous mobile fronthaul networks. *Journal of Lightwave Technology*, 34, 2016. ISSN 07338724. doi: 10.1109/JLT.2016.2584621.
- W. Xiang, K. Zheng, and X. S. Shen. *5G mobile communications*. Springer International Publishing Switzerland, 2016. ISBN 9783319342085. doi: 10.1007/978-3-319-34208-5.
- H. Yin and D. J. Richardson. *Optical Code Division Multiple Access Communication Networks Theory and Applications*. Springer Berlin Heidelberg New York, 2007. ISBN 9783540684459.
- S. Zhou, X. Liu, F. Effenberger, and J. Chao. Low-latency high-efficiency mobile fronthaul with tdm-pon (mobile-pon). *Journal of Optical Communications and Networking*, 10(1): A20–A26, 2018. doi: 10.1364/JOCN.10.000A20.

- 
- Y. Zhu, Y. Wu, H. Xu, C. Browning, L. P. Barry, and Y. Yu. Experimental demonstration of a wdm-rof based mobile fronthaul with f-ofdm signals by using directly modulated 3s-dbr laser. *Journal of Lightwave Technology*, 37, 2019. ISSN 15582213. doi: 10.1109/JLT.2019.2923245.

# Apêndice A

## Parâmetros Exportados do Simulador

Tabela 5 – Tabela de Parâmetros das Simulações

<b>Parameter</b>	<b>Value</b>
Layout 1	
<i>/* Layout 1 Parameters */</i>	
Simulation window	Set bit rate
Reference bit rate	YES
Bit rate	2,00E+09
Time window	4,10E-03
Sample rate	2,56E+11
Sequence length	8192
Samples per bit	128
Guard Bits	0
Symbol rate	2,00E+09
Number of samples	1048576
Reference wavelength	1550
Export results to file	NO
Cuda GPU	NO
Iterations	1
Initial delay	NO
Parameterized	NO
Synchronize	NO
Space width X	50
Space width Y	50
Grid spacing X	0.5
Grid spacing Y	0.5

Continua na próxima página

Tabela 5 Continuação da página anterior

Parameter	Value
Convert noise bins	YES
Calculate signal tracing	YES
Power unit	dBm
Frequency unit	THz
Decimal places	4
Sensitivity	-100
Resolution	0.1
Calculate noise floor	NO
Interpolation offset	0.5
Delay	0.05
Low Pass Bessel Filter	
/* Low Pass Bessel Filter Parameters */	
Cutoff frequency	1.5e+009
Insertion loss	0
Depth	100
Order	4
Enabled	YES
Cost	0
Order number	
Description	
Include in bill of sale	YES
Clock Recovery	
/* Clock Recovery Parameters */	
Enabled	YES
Cost	0
Order number	
Description	
Include in bill of sale	YES
/* Clock Recovery Results */	
Signal delay (s)	0.000000
Signal delay (samples)	0.000000
BER Test Set	

Continua na próxima página

Tabela 5 Continuação da página anterior

Parameter	Value
/* BER Test Set Parameters */	
Polarization Type	Single
Bit rate	2,00E+09
Number of guard bits	0
Number of leading zeros	0
Number of trailing zeros	0
Sequence length	8192
Sequence length for BER	1
Using OFDM	NO
Maximum possible subcarriers	0
Number of subcarriers in port	0
Number of prefix points	0
Number of training OFDM symbols	0
Number of pilot symbols	0
Operation mode	PRBS: type Order
Order	13
Bit sequence	0
External bit sequence source	
External parameter for BER averaging	
Generating Seq. Filename	Sequence.dat
Export sequence to file	NO
Output sequence filename	Sequence Out.dat
Input sequence filename	Sequence In.dat
Rebuild project browser tree	NO
Generate random seed	YES
Random seed index	0
Cost	0
Order number	
Description	
Include in bill of sale	NO
/* BER Test Set Results */	
Bit Errors	0.000000
BER	0.000000
log of BER	0.000000
BER: X Polarization	0.000000

Continua na próxima página

Tabela 5 Continuação da página anterior

Parameter	Value
log of BER: X Polarization	0.000000
BER: Y Polarization	0.000000
log of BER: Y Polarization	0.000000
Bit Errors: X Polarization	0.000000
Bit Errors: Y Polarization	0.000000
Sequence length per iteration	0.000000
Sequence length for BER per iteration	0.000000
Photodetector PIN	
/* Photodetector PIN Parameters */	
Responsivity type	Constant
Responsivity	1
Responsivity vs. wavelength	Responsivity.dat
Dark current	10
Noise calculation type	Numerical
Noise bandwidth source	Use sample rate
Add signal-ASE noise	YES
Add ASE-ASE noise	YES
Add thermal noise	YES
Bandwidth (Thermal)	2,00E+09
Thermal noise calculation	Defined
Thermal power density	1,00E-22
Absolute temperature	298
Load resistance	50
Add shot noise	YES
Bandwidth (Shot)	2,00E+09
Shot noise distribution	Gaussian
Time interval points	None
Transfer function model	Ideal
Junction capacitance	3
Modulation bandwidth	2
Centered at max power	YES
Center frequency	193.1
Sample rate	1.28e+012

Continua na próxima página

Tabela 5 Continuação da página anterior

Parameter	Value
Generate random seed	YES
Random seed index	0
Cost	0
Order number	
Description	
Include in bill of sale	YES
Mach-Zehnder Modulator	
<i>/* Mach-Zehnder Modulator Parameters */</i>	
Extinction ratio	38
Negative signal chirp	NO
Symmetry factor	-1
Enabled	YES
Cost	0
Order number	
Description	
Include in bill of sale	YES
CW Laser	
<i>/* CW Laser Parameters */</i>	
Frequency	1550
Power	3
Linewidth	5
Initial phase	0
Azimuth	0
Ellipticity	0
Enabled	YES
Iterations	1
Parameterized	NO
Sample rate	2,56E+11
Noise bandwidth	0
Noise threshold	-100
Noise dynamic	3
Generate random seed	YES
Random seed index	0

Continua na próxima página

Tabela 5 Continuação da página anterior

Parameter	Value
Cost	0
Order number	
Description	
Include in bill of sale	YES
<i>/* CW Laser Results */</i>	
Laser FWHM linewidth (nm)	0.000000
TX Meas	
<i>/* TX Meas Parameters */</i>	
Minimum value	-100
Enabled	YES
Signal access option	Index
<i>/* TX Meas Results */</i>	
Total Power (dBm)	0.000000
Total Power (W)	0.000000
Signal Power (dBm)	0.000000
Signal Power (W)	0.000000
Sampled Signal Power (dBm)	0.000000
Sampled Signal Power (W)	0.000000
Sampled Signal Power (Photons)	0.000000
Parameterized Signal Power (dBm)	0.000000
Parameterized Signal Power (W)	0.000000
Noise Power (dBm)	0.000000
Noise Power (W)	0.000000
Total Power X (dBm)	0.000000
Total Power X (W)	0.000000
Signal Power X (dBm)	0.000000
Signal Power X (W)	0.000000
Sampled Signal Power X (dBm)	0.000000
Sampled Signal Power X (W)	0.000000
Sampled Signal Power X (Photons)	0.000000
Parameterized Signal Power X (dBm)	0.000000
Parameterized Signal Power X (W)	0.000000
Noise Power X (dBm)	0.000000
Noise Power X (W)	0.000000

Continua na próxima página

Tabela 5 Continuação da página anterior

Parameter	Value
Total Power Y (dBm)	0.000000
Total Power Y (W)	0.000000
Signal Power Y (dBm)	0.000000
Signal Power Y (W)	0.000000
Sampled Signal Power Y (dBm)	0.000000
Sampled Signal Power Y (W)	0.000000
Sampled Signal Power Y (Photons)	0.000000
Parameterized Signal Power Y (dBm)	0.000000
Parameterized Signal Power Y (W)	0.000000
Noise Power Y (dBm)	0.000000
Noise Power Y (W)	0.000000
NRZ Pulse Generator_1	
/* NRZ Pulse Generator_1 Parameters */	
Rectangle shape	Exponential
Format for pulse range	Min/Max
Maximum	1
Minimum	0
Amplitude (wrt DC)	1
DC bias	0
Position	0
Rise time	0.05
Fall time	0.05
Enabled	YES
Sample rate	2,56E+11
Cost	0
Order number	
Description	
Include in bill of sale	YES
Optical Attenuator	
/* Optical Attenuator Parameters */	
Attenuation	30
Enabled	YES
Cost	0

Continua na próxima página

Tabela 5 Continuação da página anterior

Parameter	Value
Order number	
Description	
Include in bill of sale	YES
Pseudo-Random Bit Sequence Generator	
<i>/* Pseudo-Random Bit Sequence Generator Parameters */</i>	
Bit rate	2,00E+09
Operation mode	Order
Order	13
Mark probability	0.5
Number of leading zeros	245
Number of trailing zeros	245
Enabled	YES
Iterations	1
Generate random seed	YES
Random seed index	0
Different each iteration	NO
Cost	0
Order number	
Description	
Include in bill of sale	YES
NRZ Pulse Generator	
<i>/* NRZ Pulse Generator Parameters */</i>	
Rectangle shape	Exponential
Format for pulse range	Min/Max
Maximum	1
Minimum	0
Amplitude (wrt DC)	1
DC bias	0
Position	0
Rise time	0.05
Fall time	0.05
Enabled	YES
Sample rate	2,56E+11

Continua na próxima página

Tabela 5 Continuação da página anterior

Parameter	Value
Cost	0
Order number	
Description	
Include in bill of sale	YES
Optical Fiber	
/* Optical Fiber Parameters */	
User defined reference wavelength	YES
Reference wavelength	1550
Length	10
Attenuation effect	YES
Attenuation data type	Constant
Attenuation	0.2
Attenuation vs. wavelength	Attenuation.dat
Group velocity dispersion	YES
Third-order dispersion	YES
Dispersion data type	Constant
Frequency domain parameters	NO
Dispersion	16.75
Dispersion slope	0.075
Beta 2	-20
Beta 3	0
Dispersion file format	Dispersion vs. wavelength
Dispersion file name	Dispersion.dat
Birefringence type	Deterministic
Differential group delay	0.2
PMD coefficient	0.5
Mean scattering section length	500
Scattering section dispersion	100
Self-phase modulation	NO
Effective area data type	Constant
Effective area	80
Effective area vs. wavelength	EffectiveAra.dat
n2 data type	Constant
n2	2,60E-20

Continua na próxima página

**Tabela 5** Continuação da página anterior

<b>Parameter</b>	<b>Value</b>
n2 vs. wavelength	n2.dat
Self-steepening	NO
Full Raman Response	NO
Intrapulse Raman Scatt.	NO
Raman self-shift time1	14.2
Raman self-shift time2	3
Fract. Raman contribution	0.18
Orthogonal Raman factor	0.75
Model type	Scalar
Propagator type	Exponential
Calculation type	Noniterative
Number of iterations	2
Step size	Variable
Max. nonlinear phase shift	3
Boundary conditions	Periodic
Filter steepness	0.05
Lower calculation limit	1200
Upper calculation limit	1700
Calculate graphs	NO
Number of distance steps	200
Number of wavelength/time steps	200
Linear scale	YES
Minimum value	-100
Spectrum (total power) graph	NO
Spectrum (X component) graph	NO
Spectrum (Y component) graph	NO
Waveform (total power) graph	NO
Waveform (X component) graph	NO
Waveform (Y component) graph	NO
Enabled	YES
Convert noise bins	NO
Generate random seed	YES
Random seed index	0
Cost	0
Order number	

Continua na próxima página

Tabela 5 Continuação da página anterior

Parameter	Value
Description	
Include in bill of sale	YES
FBG	
/* FBG Parameters */	
Bandwidth	0.3
Reflectivity	0.9998
PAM Sequence Decoder	
/* PAM Sequence Decoder Parameters */	
Bits per symbol	2
Gray code	NO
User-defined PAM map	NO
PAM amplitudes (a.u.)	
PAM amplitudes file name	PAM_IQ.dat
Enabled	YES
Cost	0
Order number	
Description	
Include in bill of sale	YES
PAM Pulse Generator	
/* PAM Pulse Generator Parameters */	
Bits per symbol	2
Duty cycle	1
Position	0
Gray code	NO
User-defined PAM map	NO
PAM amplitudes (a.u.)	
PAM amplitudes file name	PAM_IQ.dat
Enabled	YES
Sample rate	5,12E+24
Cost	0
Order number	
Description	

Continua na próxima página

**Tabela 5** Continuação da página anterior

<b>Parameter</b>	<b>Value</b>
Include in bill of sale	YES
PAM Decision	
/ * PAM Decision Parameters * /	
Reference bit rate	4,00E+09
Symbol Rate	2,00E+09
DC Blocking	YES
Normalize	YES
Gray code	NO
Include noise	YES
Use symmetric eye	NO
Cost	0
Order number	
Description	
Include in bill of sale	YES