



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ABC

Trabalho de Graduação 3

**Análise de Redes Ópticas Coerentes usando Técnica de Acesso
Múltiplo por Divisão de Código**

Alunos:

Nicolas Borges Achôa

1120172230

Sammuel Roberto Nunes Paes de Barros

11201722673

Orientador: Prof. Dr. Anderson Leonardo Sanches

Santo André
2023

Resumo

Neste trabalho, foram analisados os desempenhos de redes ópticas coerentes baseadas na técnica de acesso múltiplo por divisão de código óptico (Optical Code Division Multiple Access - OCDMA). Para tanto, diversos formalismos matemáticos relacionados à descrição das etapas de geração, propagação e recepção de sinais presentes nas topologias mais recentes de redes OCDMA coerentes empregando formatos de modulação avançados de amplitude em quadratura M -ário (M-QAM) foram modelados computacionalmente.

Neste contexto, verificou-se o funcionamento das redes OCDMA consideradas quanto à magnitude de um dos principais efeitos deletérios no desempenho de tais tipos de redes, nominalmente interferência de acesso múltiplo (Multiple Access Interference - MAI). Os valores quantitativos que se referem aos níveis de qualidade de serviços (QoS) associados às transmissões de dados dos usuários são apresentados por meio de uma figura de mérito comumente adotada para avaliar o desempenho das redes de comunicação, a saber: a taxa de erro em bits (Bit Error Rate - BER). Os mecanismos limitantes de desempenho a serem considerados englobam a interferência de acesso múltiplo (MAI), ocasionada pela coexistência dos usuários no canal de comunicação (fibra óptica), e os ruídos ocasionados pela aleatoriedade de geração de portadores nos receptores optoeletrônicos. As características relativas aos formatos de modulação associados aos sinais do usuário, por sua vez, serão incorporadas de maneira a permitir a implementação de configurações de redes OCDMA coerentes mais eficientes no uso do espectro e robustas contra os diversos efeitos deletérios atuantes nos sinais de informação transmitidos pelos usuários. Isso ocorre devido a utilização de técnicas robustas de modulação coerente de mais elevada ordem para a transmissão de múltiplos bits por símbolo. Tais técnicas permitem que diferentes taxas de transmissão de dados do usuário sejam especificadas independentemente da configuração de código OCDMA adotado.

Finalmente, é importante ser mencionado que os estudos a serem conduzidos durante a execução deste trabalho pretendem oferecer um prognóstico sobre a potencial utilização de redes OCDMA coerentes como arquiteturas inovadoras a serem utilizadas na próxima geração de redes ópticas passivas (Next Generation Passive Optic Network - NGPON-3).

Lista de Acrônimos

ACF	Autocorrelation Function	Função de Autocorrelação
APD	Avalanche Photodiode	Fotodetector Avalanche
ASK	Amplitude-shift keying	Modulação por Chaveamento Amplitude
BER	Bit Error Rate	Taxa de Erro de Bit
CCF	Cross Correlation Function	Função de Correlação Cruzada
CDMA	Code Division Multiple Access	Acesso Múltiplo por Divisão de Códigos
FDMA	Frequency Division Multiple Access	Acesso Múltiplo por Divisão de Frequência
GVD	Group Velocity Dispersion	Dispersão de Velocidade de Grupo
LAN	Local Area Network	Rede de Área Local
LED	Light Emitting Diode	Diodo Emissor de Luz
MAI	Multiple Access Interference	Interferência de Acesso Múltiplo
MAN	Metropolitan Area Network	Rede de Área metropolitana
MPR	Multipulse Per Row	Múltiplo Pulsos por Linha
PON	Passive Optic Network	Rede Óptica Passiva
NGPON	Next Generation PON	Próxima Geração de PON
OCDMA	Optical Code Division Multiple Access	Acesso Múltiplo por Divisão de Código Óptico
ODL	Optical Delay Line	Linha de Atraso Óptico
OOK	On-Off Keying	Chaveamento ON-OFF
PMD	Polarization Mode Dispersion	Dispersão dos Modos de Polarização
QoS	Quality of Service	Qualidade do Serviço
RIN	Relative Intensity Noise	Ruídos de Intensidade Relativa
SPR	Single Pulse Per Row	Pulsos Únicos por Linha
TDMA	Time Division Multiple Access	Acesso Múltiplo por Divisão de Tempo
WAN	Wide Area Network	Rede de Longa Distância
WDMA	Wavelength Division Multiple Access	Acesso Múltiplo por Divisão de Comprimento de Onda
W/T	Wavelength/Time	Comprimento de Onda/Tempo

Lista de Símbolos

T_b	Período de Bit
T_c	Período de Chip
W	Ponderação do código OCDMA
$E_{ac_BPSK_n}$	Sinal de Autocorrelação do Usuário
θ_s	Fase Associada ao Símbolo Transmitido
K	Número de Usuários Interferentes
E_{cc}	Sinal de Correção Cruzada Entre os Usuários
t_k	Atraso da Inserção do k-ésimo Usuário
E_{16-QAM}	Ajuste da Amplitude do Sinal BPSK para 16-QAM
θ_{16-QAM}	Ajuste da Fase do Sinal BPSK para 16-QAM
$\mu_{16-QAM_{ac}}^{I,Q}$	Contribuição Média de Autocorrelação
$\mu_{16-QAM_{MAI}}^{I,Q}$	Contribuição Média de Correlação Cruzada
$E_{LO_n}^{I,Q}$	Sinal do Oscilador Local
R	Responsividade do Fotodetector
$*$	Operador de Conjugado Complexo
$\sigma_{16-QAM_{MAI_{j,k}}}^2$	Variância de Interferência
K_l	Número de Usuários Interferentes Presentes na Classe do Usuário de Interesse
$\sigma_{16-QAM_{MAI_{l,l}}}^2$	Variância Média Entre Usuários Interferentes Ativos na Classe do Usuário de Interesse
K_m	Número de Usuários Interferentes Ativos nas Outras Classes que não do Usuário de Interesse
$\sigma_{16-QAM_{MAI_{l,m}}}^2$	Variância entre os Usuários Interferentes Ativos na Classe do Usuário de Interesse e os Usuários Interferentes Ativos nas Outras Classes que não do Usuário de Interesse.

Lista de Figuras

Figura 1.1: Demonstração de esquemas de acesso múltiplo para um 4 usuários simultâneos no sistema

Figura 1.2 Diagrama de constelação da modulação de amplitude em quadratura: a)QPSK, b)16-QAM, c)64-QAM.

Figura 2.1: Fluxo de bits em codificação temporal baseado no esquema DSSS

Figura 2.2: Codificação no domínio do tempo por meio de ODLs

Figura 2.3: Sistema de codificação de intensidade espectral incoerente em sistemas OCDMA

Figura 2.4: Codificador OCDMA baseado em saltos rápidos em frequência utilizando redes de Bragg

Figura 2.5: Contribuição da MAI sobre o usuário 1 em uma rede OCDMA contendo 4 usuários simultâneos

Figura 3: Representação temporal dos pulsos codificados desejados (curvas pretas) e resposta ao impulso do codificador desejado (curvas azuis)

Figura 4: Representação espectral dos pulsos codificados pelo usuário desejados (curvas pretas) e função de transferência do codificador desejado (curvas azuis)

Figura 5: Representação temporal da saída de demodulação mostrando a autocorrelação desejada do usuário

Figura 6: BER para o FFH-OCDMA com 17 comprimentos de onda disponíveis usando os seguintes formatos de modulação: QPSK (vermelho), 16-QAM(verde), 32-QAM (azul)

Figura 7: BER para o FFH-OCDMA com 19 comprimentos de onda disponíveis usando os seguintes formatos de modulação: QPSK (vermelho), 16-QAM(verde), 32-QAM (azul)

Figura 8: BER para o FFH-OCDMA com 23 comprimentos de onda disponíveis usando os seguintes formatos de modulação: QPSK (vermelho), 16-QAM(verde), 32-QAM (azul)

Figura 9: BER para o FFH-OCDMA com 25 comprimentos de onda disponíveis usando os seguintes formatos de modulação: QPSK (vermelho), 16-QAM(verde), 32-QAM (azul)

Figura 10: BER para o FFH-OCDMA com 27 comprimentos de onda disponíveis usando os seguintes formatos de modulação: QPSK (vermelho), 16-QAM(verde), 32-QAM (azul)

Figura 11. BER para o FFH-OCDMA com 29 comprimentos de onda disponíveis usando os seguintes formatos de modulação: QPSK (vermelho), 16-QAM(verde), 32-QAM (azul)

Lista de Tabelas

Tabela 1: BER para o FFH-OCDMA diferentes comprimentos de onda disponíveis usando os seguintes formatos de modulação: QPSK (vermelho), 16-QAM(verde), 32-QAM (azul)

Sumário

1. Introdução	9
1.1 Codificações utilizadas em OCDMA	13
1.1.1 Codificação no Domínio Do Tempo (1-D)	14
1.1.2 Codificação no Domínio da Frequência (1-D)	17
1.1.3 Codificação no Domínio Tempo e Frequência (2-D)	19
1.2 Interferência de Acesso Múltiplo (MAI)	22
1.3 Ruídos gerados no sistema	24
1.3.1 Ruído de Intensidade Relativa (RIN)	24
1.3.2 Ruído Balístico (shot noise)	25
1.3.3 Ruído de Batimento	25
1.3.4 Ruído Térmico	25
1.4 Efeitos dispersivos lineares	26
1.4.1 Dispersão de velocidade de grupo (GVD)	26
1.4.2 Dispersão dos modos de polarização (PMD)	26
1.5 Códigos corretores de erros (FEC) Reed-Solomon	27
2. Justificativa	28
3. Metodologia e Fundamentação Teórica	30
4. Resultados	35
5. Conclusão	45
6. Referências Bibliográficas	47

1. Introdução

Com o aumento expressivo na quantidade e distribuição de informações, com cada vez mais pessoas com acesso à internet, várias empresas que prestam serviços de telecomunicações buscam aprimorar suas redes de acesso para que a qualidade de seus produtos possa acompanhar esse crescimento constante. Em levantamento feito pelo Centro Regional de Estudos para o Desenvolvimento da Sociedade da Informação (Cetic.br), a pesquisa TIC Domicílios 2023 constatou que, no Brasil, houve um aumento de 3% da população com acesso à internet (81% para 84%) do período de 2022 à 2023, mostrando claro aumento e, com isso, necessidade de inovação das redes de telecomunicação. Porém, para aumentar a capacidade de transmissão de dados alinhado ao custo-benefício, é necessário um aumento considerável da taxa de transmissão. Nos últimos anos, o avanço tecnológico tornou possível a utilização de fibras ópticas, que vem dominando os métodos de comunicação modernos. A fibra óptica permite ao sistema, em relação à métodos convencionais como cabos de par trançado ou cabos coaxiais, vantagens como uma maior largura de banda, menor tendência à propagação de erros no sinal, menor peso e imunidade eletromagnética [1]-[3]. Uma das principais utilizações da fibra óptica atualmente é em meios de comunicação que exigem acesso múltiplo para transmissão de dados em alta velocidade. O termo acesso múltiplo é comumente utilizado para especificar o compartilhamento do meio de transmissão em um determinado domínio por diversos usuários. Neste sentido, o estabelecimento de canais únicos permite que os sinais provenientes de diferentes usuários ingressem e coexistem na rede por meio das técnicas de multiplexação e demultiplexação de sinais. Atualmente, os esquemas mais conhecidos e utilizados para aplicação desses métodos são: a multiplexação por divisão de tempo (Time Division Multiple Access - TDMA), a multiplexação por divisão de comprimento de onda (Wavelength Division Multiple Access - WDMA ou Frequency Division Multiple Access - FDMA) e a multiplexação por divisão de código (Code Division Multiple Access - CDMA).

No esquema TDMA, todos os codificadores operam no mesmo comprimento de onda, tornando simples a estrutura do receptor. Isso tem se mostrado bastante viável para redes de acesso metropolitanas (Metropolitan Area Network - MAN), porém não permite a obtenção de ganho de multiplexação estatística desejado no tráfego de dados em rajada [1]. O esquema WDMA, por sua vez, oferece topologia virtual ponto-a-ponto, roteamento óptico dinâmico e realocação da capacidade do tráfego. Tais características são eficazes quando vinculadas a redes de longa distância (Wide Area Network - WAN), contudo, torna-se necessário tanto o acompanhamento constante dos comprimentos de onda emitidos quanto o ajuste preciso do comprimento de onda central de cada filtro para a eliminação da interferência (*crosstalk*) entre comprimentos de onda distintos [2]. Já o esquema CDMA, quando comparado com as duas anteriores, oferece maior flexibilidade no acesso a largura de banda disponível com a capacidade de ocultar (por meio de codificação) os dados transmitidos. Na etapa de detecção dos usuários, o código do usuário de interesse é identificado por meio de pico de autocorrelação (amplitude significativa), já os demais usuários (interferentes) são classificados como ruídos. Portanto, sistemas CDMA aceitam uma degradação maior de acordo com a quantidade de usuários simultâneos no sistema, o que o caracteriza como sistema de multiplexação estática. Estes aspectos permitem ao sistema uma maior segurança dos dados [3], flexibilidade no projeto de códigos, capacidade sob demanda, baixa complexidade e custo para atribuição de novos usuários ao sistema, tornando-o ideal para o emprego em redes de acesso locais (Local Area Network - LAN). Devido às suas vantagens em comparação aos outros modelos, a técnica CDMA será utilizada para os experimentos neste trabalho. A Figura 1 a seguir demonstra a diferença de alocação dos dados dos usuários entre os sistemas FDMA, TDMA e CDMA.

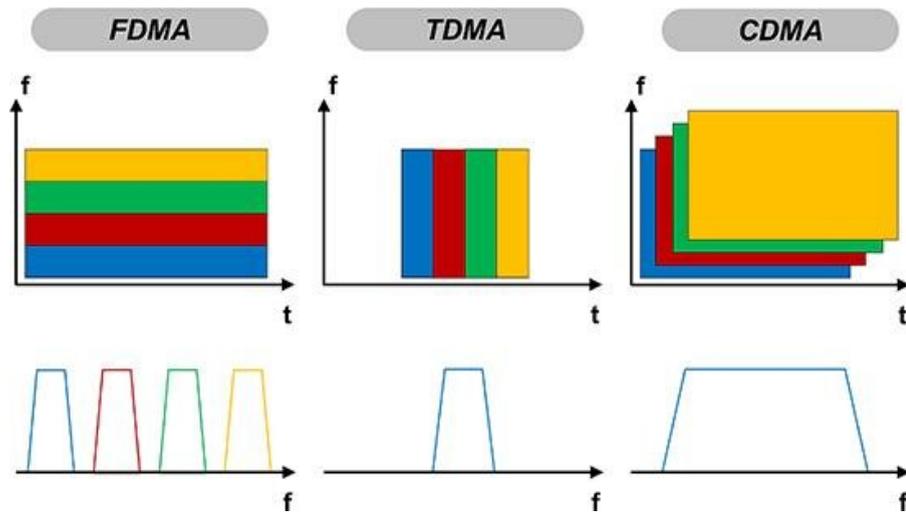


Figura .11: Demonstração de esquemas de acesso múltiplo para um 4 usuários simultâneos no sistema.

Além da escolha do esquema para o provimento do acesso múltiplo aos sinais dos usuários, é necessário escolher as técnicas de modulação mais conveniente para a rede em questão. Uma dessas técnicas, nominalmente modulação de amplitude em quadratura *M*-ária (*M*-QAM) transmite informações digitais alterando a amplitude dos sinais em fase e em quadratura, e que pode ser visto na Figura 1.2 seu diagrama de constelação. A QAM é amplamente utilizada em sistemas como televisão a cabo e Wi-Fi por permitir a transmissão de dados em altas taxas.

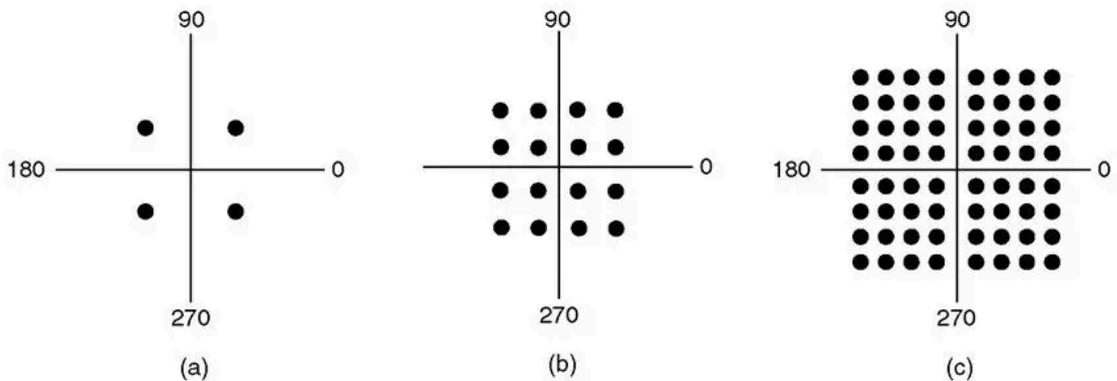


Figura 1.2 Diagrama de constelação da modulação de amplitude em quadratura: a)QPSK, b)16-QAM, c)64-QAM.

Um caso particular dessa técnica é obtido quando o fator de multiplicidade M é igual a 4 (4-QAM) também é conhecido como chaveamento por deslocamento de fase em quadratura (QPSK). Tal técnica utiliza quatro diferentes deslocamentos de fase (com amplitudes constantes e idênticas) para representar dois bits por símbolo. Essa técnica é mais robusta contra ruídos em comparação com modulações de ordem superior, tornando-a adequada para ambientes com baixos níveis de relação sinal-ruído-interferência (SINR).

Existem ainda os formatos de modulação de mais elevada ordem (maiores valores de M), como é o caso do esquema 16-QAM. Tal esquema utiliza 16 combinações de variações de amplitude e fase do sinal para representar quatro bits por símbolo. Essa técnica oferece maior capacidade de transmissão, mas é mais suscetível a ruídos e interferências em comparação com modulações de ordem inferior.

Ainda, é importante mencionar que os formatos de modulação empregando fatores mais elevados de M possuem maior capacidade de transmissão ao custo de uma maior suscetibilidade a ruídos e interferências.

O emprego dessas técnicas de modulação deve ser realizado considerando fatores como: eficiência espectral, robustez contra ruídos e capacidade de transmissão. Nesse sentido, é preciso identificar a técnica de modulação mais conveniente para atender às necessidades específicas de diferentes cenários de comunicação, pois as mesmas têm grande potencial para impulsionar a evolução tecnológica das redes ópticas passivas e proporcionar melhorias significativas na próxima geração de sistemas de comunicação (NGPON-3).

Como última preocupação, além de adequar a técnica de acesso múltiplo com o esquema de modulação, é preciso minimizar o efeito de um dos principais fatores de degradação do desempenho da rede, a interferência de acesso múltiplo (MAI) [20]-[28]. A MAI é dependente do número de usuários presentes simultaneamente na rede (quanto maior o número de usuários na rede, maior o nível da MAI), limita severamente o

desempenho do sistema e, portanto, precisa ser minimizada a todo custo.

Nesse contexto, existem diversas técnicas de modulação para tentar mitigar os problemas causados pela MAI [20]-[44]. Essencialmente, o esquema legado conhecido por modulação por chaveamento liga-desliga (On-Off Keying - OOK) foi inicialmente escolhido em sistemas de comunicação óptica. O motivo para tal escolha foi a praticidade de implementação por modulação de intensidade e facilidade de detecção pelo método direto (IM-DD) [45]. No entanto, com o incremento das taxas de transmissão, o OOK se tornou bastante suscetível aos efeitos deletérios de dispersão da fibra óptica, como por exemplo as ocasionadas por modos de polarização (Polarization Mode Dispersion - PMD) e velocidade de grupo (Group Velocity Dispersion - GVD).

A necessidade de substituição do esquema OOK para a recepção de taxas superiores a 10 Gbps fez essencial a projeção de moduladores de alto desempenho. Esses moduladores se provaram muito eficazes até mesmo em taxas da ordem de 40 Gbps, mas a grande limitação do alcance do sinal óptico pelo uso inevitável do esquema IM-DD fez com que fossem vislumbradas a implantação de tecnologias ópticas coerentes. As tecnologias ópticas coerentes, por sua vez, trazem grandes benefícios como maior eficiência espectral, capacidade de utilização do processamento digital de sinais (DSP) para tratamento da PMD e maior velocidade de transmissão de dados por meio do envio de múltiplos *bits* por símbolo [46]- [57].

Finalmente, com o panorama de possibilidades de aperfeiçoamento que podem ser encontradas no emprego dos formatos de modulação coerentes em redes OCDMA e pelas vantagens apresentadas sobre outras arquiteturas de redes ópticas, este trabalho visa estudar, projetar, e modelar computacionalmente diversas configurações inovadoras, quais sejam, de redes OCDMA coerentes potencialmente candidatas para a padronização NGPON-3.

1.1 Codificações utilizadas em OCDMA

Na discussão sobre as redes OCDMA, é essencial compreender a complexidade e a diversidade das codificações utilizadas para garantir tanto a integridade quanto a segurança das informações dos usuários. Essas redes empregam códigos únicos, atribuídos de forma exclusiva a cada usuário, o que é fundamental para a proteção e a eficácia da comunicação. A literatura atual apresenta uma vasta gama de opções de códigos, cada um com suas próprias exigências de implementação que necessitam ser meticulosamente observadas, levando em consideração os recursos disponíveis. Os códigos em redes OCDMA podem ser categorizados com base em várias dimensões, como o tempo, a frequência, o espaço e a fase, ou até mesmo uma combinação desses elementos. Os códigos que se baseiam em apenas uma dessas dimensões são conhecidos como unidimensionais (1-D), enquanto aqueles que incorporam duas ou mais dimensões são chamados de bi-dimensionais (2-D). Essa classificação e abordagem estratégica permitem uma compreensão mais clara e facilitada das técnicas de codificação em redes OCDMA, destacando sua importância para a segurança e eficiência da transmissão de dados.

1.1.1 Codificação no Domínio Do Tempo (1-D)

No contexto da transmissão de sinais em redes OCDMA, a codificação no domínio do tempo desempenha um papel crucial. Originalmente, essa codificação é unidimensional, com bits transmitidos forma retangular, possuindo uma duração específica, denominada T_b . Esta duração é então subdividida em N subintervalos ou "chips" durante o processo de codificação, através do método de espalhamento espectral. É importante notar que essa subdivisão resulta em um aumento na largura de banda necessária para a transmissão eficiente de cada bit.

Cada bit de informação é codificado em uma forma de onda específica, e os receptores correlacionam essa forma de onda com a máscara do código aplicado ao sinal recebido. O resultado no receptor é uma operação de correlação, que evidencia o grau de similaridade entre as sequências recebidas e as de interesse, facilitando assim a distinção e a interpretação correta dos dados transmitidos.

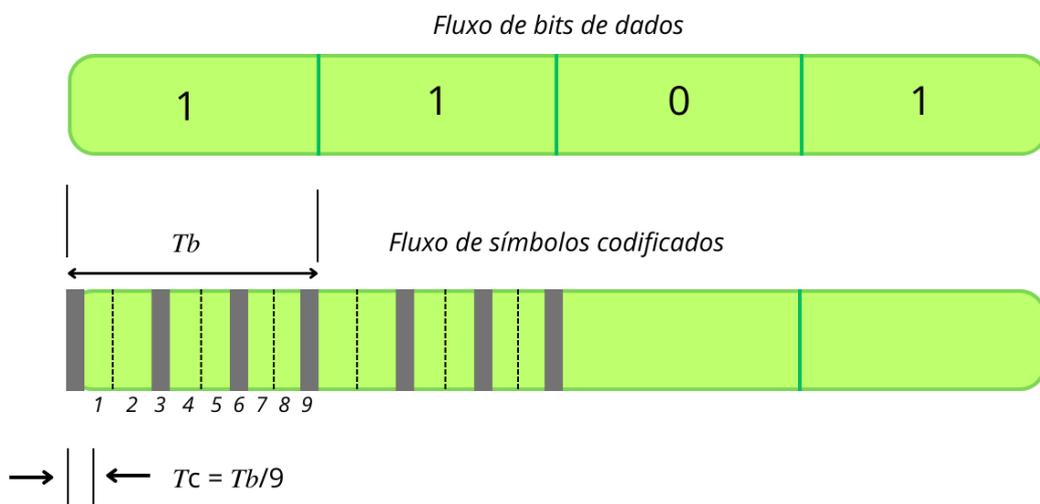


Figura 2.1 Fluxo de bits em codificação temporal.

Em sistemas de transmissão convencionais, um único bit corresponde a um pulso com uma duração de T_b . No entanto, o processo de codificação subdivide esse período em L chips, cada um com um período próprio, $T_c = T_b/N$. Esta subdivisão é ilustrada na Figura 2.1, que demonstra a transmissão de uma sequência de quatro bits {1 1 0 1}, tanto em sua forma não codificada quanto codificada.

As primeiras aplicações práticas dessa abordagem de codificação em sistemas OCDMA utilizavam redes de linhas de atraso óptico (Optical Delay Line - ODL) para a alocação temporal dos pulsos.

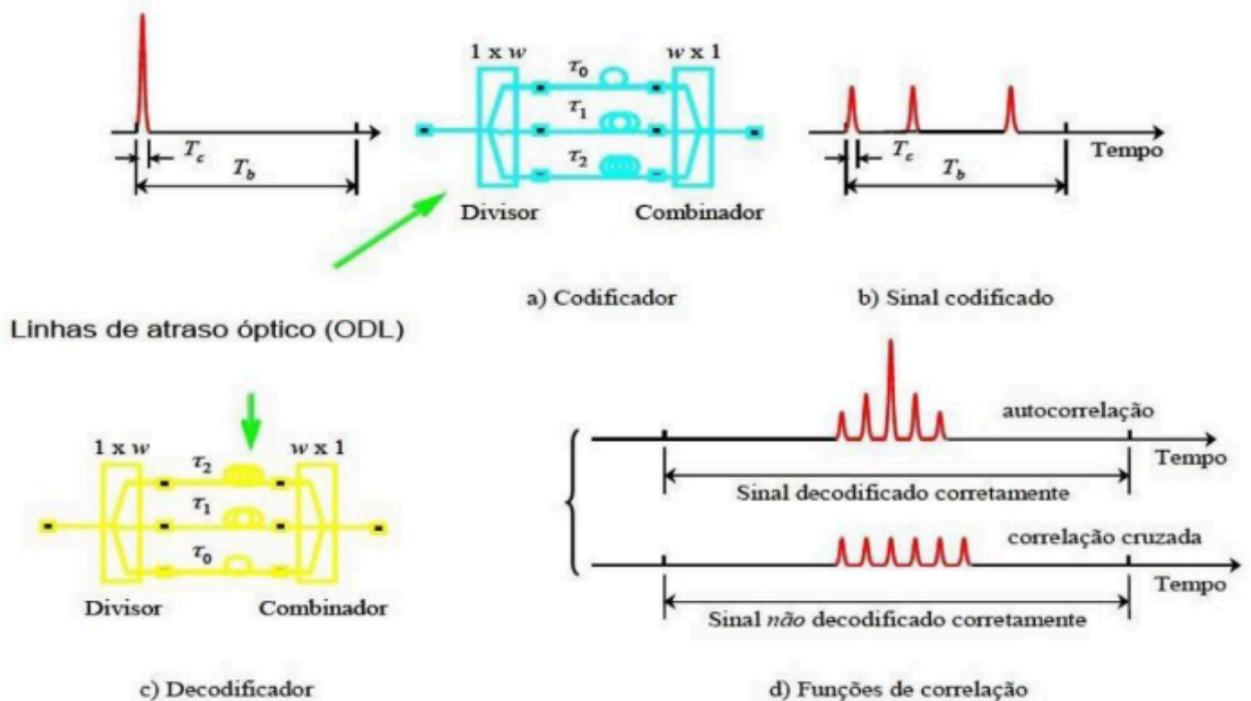


Figura 2.2. Codificação no domínio do tempo por meio de ODLs.

Essa técnica envolve a divisão de um pulso óptico de alta amplitude e duração T_c em vários pulsos menores, cada um sofrendo um atraso temporal distinto, conforme ilustrado na Figura 2.2(a). A codificação resulta em uma seqüência de pulsos curtos, que são proporcionais à ponderação w do código, como mostrado na Figura 2.2(b).

Para multiplicar os sinais de diferentes usuários, um acoplador do tipo estrela é utilizado, permitindo que os trens de pulsos de cada usuário sejam combinados de forma eficaz. No receptor, um conjunto de linhas de atraso, configuradas de maneira complementar às do codificador, é empregado para reconstruir o pulso original Figura 2.2(c), facilitando assim a operação de decodificação, que se baseia na correlação de intensidade. Pulsos corretamente

posicionados reconstituem o padrão definido pela propriedade de autocorrelação (Autocorrelation Function - ACF), enquanto os incorretamente posicionados resultam em sinais interferentes, caracterizados pela propriedade de correlação cruzada (Cross Correlation Function - CCF), como visualizado na Figura 2.2(d).

Além das linhas de atraso temporal tradicionais feitas de fibra óptica, inovações como o uso de cristais fotônicos e óptica integrada têm sido exploradas para aprimorar ainda mais a eficiência e a precisão desse processo de codificação e decodificação em sistemas OCDMA.

1.1.2 Codificação no Domínio da Frequência (1-D)

Desde a década de 1970, os esquemas de codificação no domínio da frequência têm sido uma área de intenso estudo e aplicação, devido à sua capacidade de manipular sinais tanto de fontes coerentes quanto incoerentes, ajustando suas fases ou amplitudes. Um aspecto particularmente atrativo desses esquemas unidimensionais é que a largura de banda espectral necessária para a transmissão não é influenciada pela faixa da fonte de sinal, o que representa uma grande vantagem em termos de flexibilidade e eficiência do sistema.

Esses esquemas de codificação se baseiam no princípio de que, independente da largura de banda da fonte - que pode variar de diodos emissores de luz (Light Emitting Diode - LEDs) não-coerentes a fontes ópticas mais sofisticadas - os parâmetros definidores do código permanecem constantes e não são afetados pela informação transmitida. Isso se traduz em uma robustez significativa no que diz respeito à qualidade e à integridade do sinal transmitido.

O mecanismo de codificação e decodificação emprega um receptor balanceado equipado com fotodetectores para a recepção e filtragem do sinal. Utiliza-se um filtro de amplitude espectral tanto no transmissor quanto no receptor, garantindo que o sinal recebido seja processado de maneira precisa. A Figura 2.3 esquematiza este processo, destacando a resolução inicial das componentes espectrais da fonte óptica e a subsequente manipulação de certas frequências por meio de um codificador de amplitude espectral.

A saída do sistema é determinada pela diferença entre as leituras dos dois fotodetectores, que são conectados de forma balanceada e recebem sinais filtrados pelo filtro direto e seu complemento. Em um cenário onde o transmissor está descasado, metade das componentes espectrais estará associada ao filtro direto e a outra metade ao filtro complementar. Essa configuração assegura que qualquer sinal descasado seja cancelado, enquanto o sinal casado é demodulado com sucesso. O sinal recuperado, que é modulado em amplitude (Amplitude-shift keying - ASK), é então avaliado por um dispositivo de decisão baseado em limiar para determinar o bit transmitido.

Essa abordagem de codificação no domínio espectral não apenas aumenta a eficácia da transmissão de dados em sistemas ópticos, mas também melhora a segurança e a confiabilidade da comunicação, fazendo com que essa técnica seja uma escolha preferencial em uma variedade de aplicações de comunicação óptica.

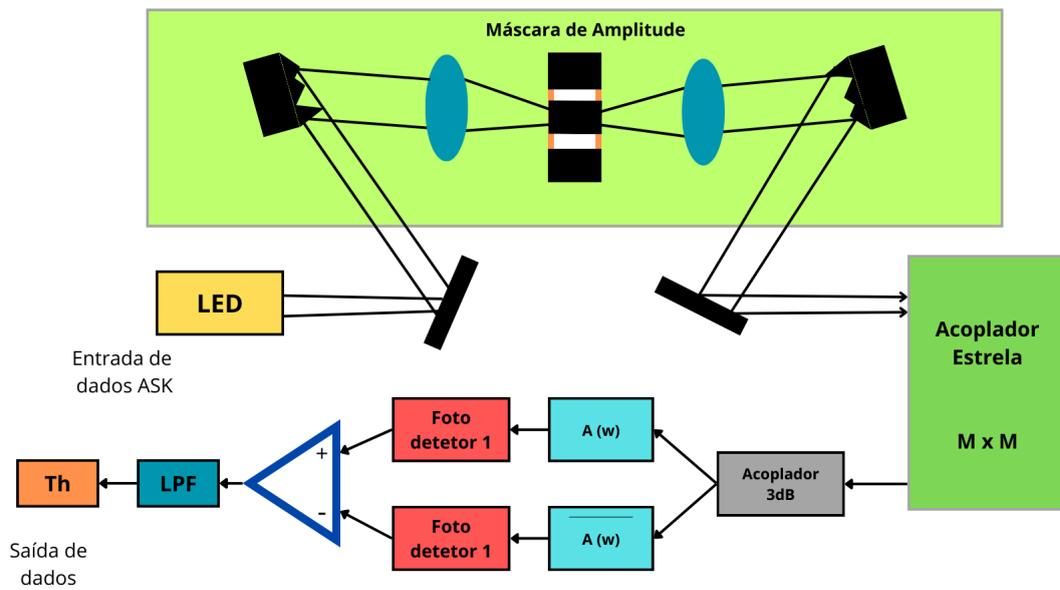


Figura 2.3. Sistema de codificação de intensidade espectral incoerente em sistemas OCDMA.

1.1.3 Codificação no Domínio Tempo e Frequência (2-D)

Diferentemente das codificações apresentadas anteriormente, a codificação bidimensional em ambos os domínios do tempo e frequência (Wavelength/Time - W/T) permite maior flexibilidade na elaboração dos códigos ópticos e, por consequência, menores níveis de interferência, mesmo com um número considerável de usuários simultâneos compartilhando o canal. Essas características ocorrem devido às elevadas ortogonalidades (grau de diferenciação entre os códigos) e cardinalidades (quantidade de códigos disponíveis) apresentadas quando comparados com os esquemas de codificação unidimensionais [27].

Os códigos W/T OCDMA unificam os conceitos de chips alocados em posições específicas no domínio de tempo e oscilando em diversos comprimentos de onda no domínio da frequência. Matematicamente, as

disposições dos pulsos podem ser descritas utilizando uma representação matricial onde as posições temporais de alocação e comprimentos de onda utilizados pelos chips são distribuídos em colunas e linhas, respectivamente. Para a organização dessas matrizes, os chips adjacentes são separados por saltos de frequência, termo que define a diferença entre as frequências atribuídas para cada chip. Quando esse salto possui um tempo menor que a duração do sinal, é denominado salto rápido em frequência (FFH) [60].

Alguns sistemas utilizam a técnica FFH pela sua resistência às interferências de fontes externas, além de aumentar sua capacidade de acomodar usuários simultâneos sem gerar ruído entre si. Essa técnica tem como base a convolução de um pulso curto não coerente, modulado pela fonte de dados com as respostas de cada rede Bragg que compõe o codificador.

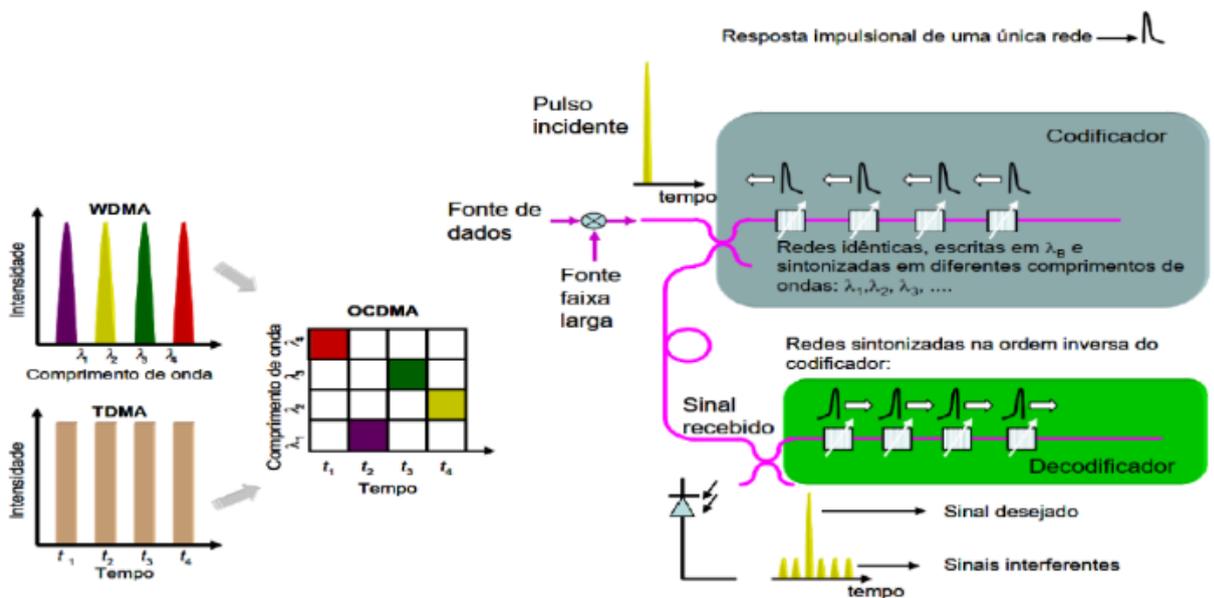


Figura 2.4. Codificador OCDMA baseado em saltos rápidos em frequência utilizando redes de Bragg.

Os códigos bidimensionais podem ser divididos em dois principais grupos [21]: pulsos únicos por linha (Single Pulse Per Row - SPR) e múltiplos

pulsos por linha (Multipulse Per Row - MPR). Para os SPR, todos os comprimentos de onda disponíveis são utilizados, porém são utilizados apenas uma vez na sequência, possuindo ponderação limitada quando poucos comprimentos de onda são apresentados. Um exemplo desse tipo de codificação é a formulação introduzida por Shurong et al. [24], na qual, considerando a MAI como único fator de interferência do sistema e sem sacrificar as propriedades ideais de correlação, foi possível um comprimento de onda ser escolhido independentemente do número de comprimentos disponíveis. No experimento observou-se que uma quantidade considerável de usuários (de 67 à 167 usuários) pôde acessar a rede sem erros (BER 10^{-12}) sem necessidade de meios alternativos de diminuir a influência da MAI.

Já nos códigos MPR, um comprimento de onda pode ser utilizado múltiplas vezes no mesmo código óptico, o que permite uma alta eficiência espectral, alta flexibilidade na escolha da ponderação, alinhada com as propriedades de correlação ideais. Um exemplo deste tipo de codificação é a formulação de Yang et al. [26], que, assim como o experimento de Shurong et. al., a MAI foi considerada como único fator de interferência. O experimento mostrou possuir ótima cardinalidade unificada com todos os pontos positivos acima listados, porém o sistema não suporta mais que 9 usuários simultâneos em regime livre de erros (BER 10^{-12}), devido à limitação do comprimento de código, sendo necessários mecanismos mitigadoras de MAI.

1.2 Interferência de Acesso Múltiplo (MAI)

A ortogonalidade entre os códigos utilizados em sistemas de acesso por divisão de código óptico incoerente (OCDMA) é um princípio fundamental para distinguir entre os

usuários. No entanto, essa ortogonalidade, por si só, não assegura uma diferenciação completa devido à natureza da manipulação dos pulsos ópticos, que ocorre principalmente na intensidade do sinal. Isso leva a desafios particulares na implementação de sistemas OCDMA, especialmente em configurações bidimensionais (2-D), onde se utilizam deslocamentos de pulsos ópticos no tempo e em diferentes comprimentos de onda. Esses sistemas são projetados seguindo algoritmos específicos que geram códigos únicos atribuídos a cada usuário, permitindo que as informações sejam codificadas em sequências de assinatura distintas.

As informações codificadas são então multiplexadas e transmitidas através do canal óptico, alcançando todos os receptores quase instantaneamente. Cada receptor, equipado com a réplica exata do código de assinatura do usuário, desempenha a tarefa crucial de extrair os dados enviados por meio de operações de correlação sofisticadas. Este processo é particularmente vulnerável durante a fase de decodificação no receptor de um usuário específico. Quando esse usuário envia informações, seus pulsos ópticos, caracterizados por diferentes comprimentos de onda, se sobrepõem, resultando na formação de picos de autocorrelação de alta intensidade. Em contraste, a ausência de transmissão de um usuário leva a pulsos isolados, gerando apenas sinais fracos de correlação cruzada.

O desafio torna-se mais pronunciado em redes densas, onde um grande número de usuários transmitem dados simultaneamente. Nesse cenário, os sinais de correlação cruzada tendem a se acumular no intervalo designado para os picos de autocorrelação, criando um ruído de fundo que pode ser tão intenso quanto os próprios picos. Essa interferência de acesso múltiplo (MAI) aumenta significativamente a taxa de erro de bits (BER), comprometendo a capacidade do sistema de atender a um número elevado de usuários eficientemente.

É importante destacar que a MAI tem um impacto diferenciado dependendo do tipo de bit transmitido. Durante a transmissão de bits "1", os pulsos interferentes podem até

beneficiar o sinal, reforçando a energia no canal e evitando falsas detecções de bits "0". No entanto, o verdadeiro desafio surge quando um bit "0" é transmitido pelo usuário de interesse. Neste caso, a presença de pelo menos W (a ponderação do código) usuários interferentes transmitindo bits "1" pode levar a sobreposições significativas, resultando em erros de detecção.

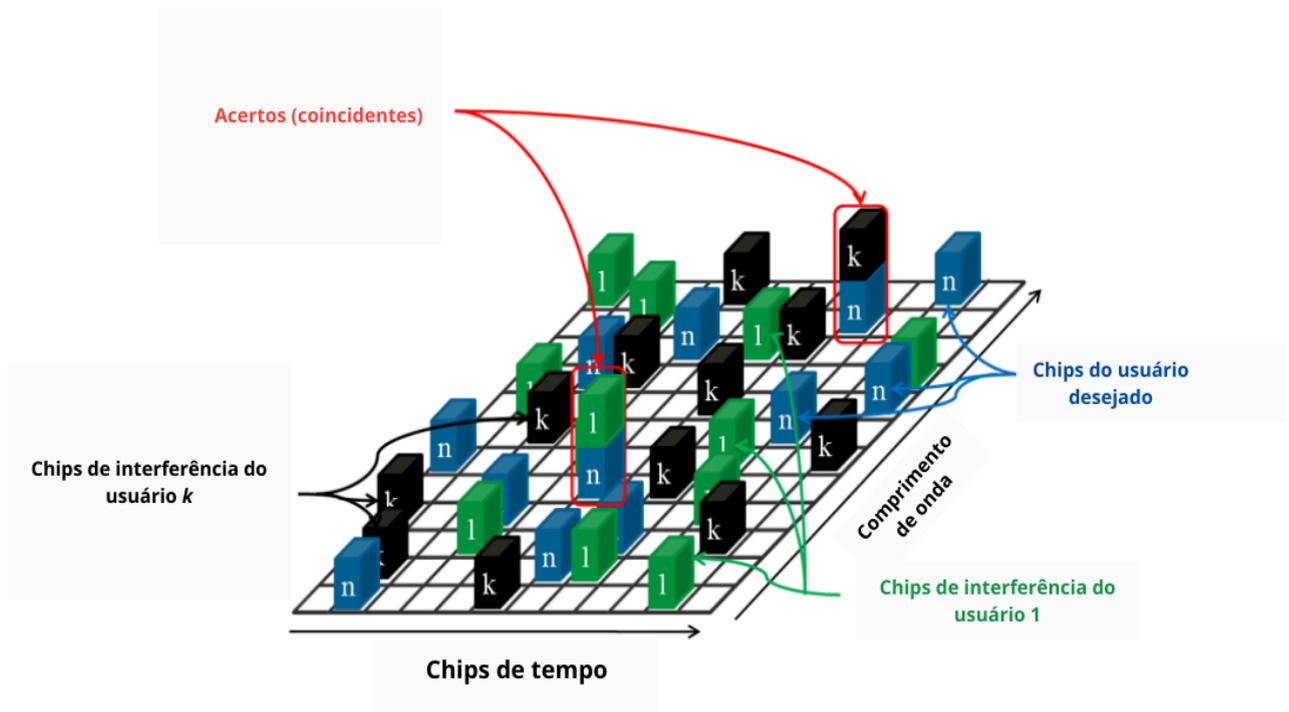


Figura 2.5: Contribuição da MAI sobre o usuário 1 em uma rede OCDMA contendo 3 usuários simultâneos.

A complexidade da MAI é visualizada na Figura 2.5, que mostra como a interferência de múltiplos usuários afeta um usuário de referência em uma rede OCDMA com quatro usuários ativos. A solução para mitigar os efeitos adversos da MAI envolve o uso de dispositivos limitadores ópticos abruptos, que atuam reduzindo a intensidade dos pulsos ópticos que ultrapassam um determinado limiar. Esses dispositivos são cruciais para manter a qualidade do sinal dentro de faixas aceitáveis, garantindo que os sistemas OCDMA

mantenham sua eficácia e confiabilidade mesmo sob condições de tráfego intenso.

1.3 Ruídos gerados no sistema

Os ruídos são elementos críticos que influenciam o desempenho dos sistemas, podendo, em determinadas circunstâncias, restringir a aplicabilidade prática de tecnologias avançadas. Diferentes componentes do sistema contribuem para a emergência desses ruídos, abrangendo desde a fase de transmissão até a detecção. A interferência de acesso múltiplo (MAI), por exemplo, surge com a adição de usuários na infraestrutura de fibra óptica, enquanto outros ruídos como o Relative Intensity Noise (RIN), ruídos de batimento, correntes de fuga do Avalanche Photodiode (APD), e ruídos térmicos são gerados em diferentes estágios do processo. Excluindo a MAI, cuja discussão foi abordada anteriormente, os demais ruídos são caracterizados da seguinte forma, seguindo a sequência solicitada:

1.3.1 Ruído de Intensidade Relativa (RIN)

Resulta das variações na emissão laser, tipicamente induzidas por alterações térmicas ou emissões espontâneas não desejadas. A quantificação do RIN é realizada através da relação entre a flutuação média quadrática da intensidade da emissão laser e o quadrado da intensidade média desta emissão, usualmente expressa em dB/Hz.

1.3.2 Ruído Balístico (shot noise)

Associado às inevitáveis correntes de fuga presentes no diodo de avalanche fotodetector (APD), este ruído está ligado tanto à corrente de escuro quanto à fotocorrente, e é causado pelas flutuações destas correntes devido à absorção de quantidades discretas de energia na forma de fótons.

1.3.3 Ruído de Batimento

Surge quando sinais ópticos de comprimentos de onda similares ou idênticos convergem em um único fotodetector. As propriedades de detecção quadrática do dispositivo fazem com que as fases de ruído dos lasers adicionem componentes de intensidade extras ao sinal detectado.

1.3.4 Ruído Térmico

Este ruído é produto do comportamento aleatório na geração e recombinação de portadores de carga devido à atividade térmica, o que resulta em variações na resistência interna do detector ou de qualquer resistência em série com ele. Conhecido também como ruído Johnson ou Nyquist, este fenômeno é uma consideração fundamental na análise de desempenho dos sistemas.

Para o sistema criado neste projeto, os ruídos citados acima foram ignorados na codificação por serem fatores de interferência bem menos expressivos que a MAI, porém são importantes de serem informados por estarem presentes na realidade.

1.4 Efeitos dispersivos lineares

Os efeitos dispersivos lineares são mecanismos de dispersão que alteram a propagação da forma de onda dos pulsos ópticos. Essas dispersões têm impacto na evolução temporal dos pulsos ocasionando a redução da potência óptica de pico.

1.4.1 Dispersão de velocidade de grupo (GVD)

O efeito GVD resulta no alargamento temporal do pulso óptico e pode

ser ocasionado devido a dois fatores:

- Dispersão de guia de onda: ocorre quando a fibra monomodo isola cerca de 80% da potência óptica no núcleo enquanto os 20% de luz restantes se propagam na casca com velocidade superior à do núcleo
- Dispersão cromática ou material: ocorre quando a velocidade de grupo associada ao modo fundamental é dependente do comprimento de onda, fazendo com que diferentes componentes espectrais se propaguem em velocidades distintas.

1.4.2 Dispersão dos modos de polarização (PMD)

PMD é o alongamento do pulso ocasionado pelo atraso de fase entre dois modos de polarização de uma fibra monomodo, o que gera um atraso temporal dos modos ao final da propagação. A PMD normalmente é ocasionada pela quebra de simetria da fibra óptica (mudanças no diâmetro, microcurvaturas, etc.).

Mesmo que ocorram na realidade, os efeitos dispersivos lineares não foram considerados na codificação do sistema dos resultados para facilitar a sua construção.

2. Justificativa

Este trabalho surge como uma resposta às necessidades contemporâneas no campo da pesquisa em sistemas de comunicações ópticas na Universidade Federal do ABC, buscando explorar e aprofundar os conhecimentos adquiridos ao longo do curso de

Engenharia da Informação. Conseqüentemente, o mesmo pretende adicionar uma trajetória de especialização aos estudantes envolvidos em uma linha de pesquisa de extrema relevância científica e tecnológica: as redes NGPON-3 de alto desempenho.

No âmbito dessa especialização, ocorreu uma significativa contribuição para validar e complementar os resultados obtidos a partir de diversas modelagens teóricas por meio da análise de trabalhos empíricos referentes às implementações práticas das redes OCDMA presentes na literatura. Essa integração entre teoria e prática é crucial para garantir a robustez e a aplicabilidade das soluções desenvolvidas.

Um ponto de destaque é o reconhecimento da complexidade crescente na modelagem numérica dos estágios de geração, transmissão e recepção de dados em redes de comunicações ópticas de acesso. Atualmente, as predições de desempenho dos usuários estão intrinsecamente ligadas a simulações computacionais, que por sua vez dependem de modelagens matemáticas precisas para descrever elementos determinantes das redes ópticas. Alguns desses casos podem ser exemplificados pelas equações diferenciais ordinárias que estão ligadas à amplificação de raios luminosos por emissão estimulada de radiação (lasers) das fontes ópticas, nos quais as alterações de fases são transformadas em alterações de intensidade do campo óptico nos interferômetros do tipo Mach-Zehnder; algoritmos de coincidência única que são utilizados para modulação/demodulação e que são responsáveis pela geração dos códigos de saltos rápidos em frequência (FFHs), operações necessárias para a contabilização dos efeitos dispersivos no canal (convoluções lineares e circulares), respostas impulsiais e suas correspondentes funções de transferências associadas a codificadores / decodificadores compostos por redes de Bragg, geração contingente de portadores e a conseqüente inibição da detecção dos feixes de luz causada pelas flutuações intrínsecas de intensidade (ruído) em fotodetectores positivo-intrínseco-negativo (PIN) e avalanche (APD), e processos estocásticos relacionados

à absorção discreta de fótons. Ainda, o método normalmente utilizado para a modelagem de propagação dos sinais dos usuários em fibras monomodo é o método split-step (passo alternado) operando no domínio do tempo (TDSS) ou frequência (FDSS) para resolver a equação não-linear de Schroedinger (NLSE). Mesmo sendo muito utilizado ao longo dos anos pela sua fácil implementação, o método FDSS possui uma baixa eficiência para sistemas de alta demanda de processamento computacional, limitando sua aplicação em diversos sistemas. Já o método TDSS consegue contornar esses problemas, se mostrando extremamente útil até em modelagens de problemas cuja conjectura de periodicidade não representa a realidade, como por exemplo sistemas operando em múltiplas taxas de transmissões, e em sistemas que exigem processamentos computacionais irrealistas, como por exemplo sistemas de transmissão de quantidades absurdas de bits.

Vale ressaltar que esse trabalho demonstra profunda integração entre diversas disciplinas da Engenharia da Informação, como sistemas de telecomunicações, eletrônica e fotônica. Essa abordagem multifacetada reflete a natureza convergente das tecnologias atuais e prepara o estudante para enfrentar desafios interdisciplinares no mundo real.

Por fim, esse trabalho de pesquisa aspira a contribuir significativamente para o avanço e a inovação nas áreas abordadas, deixando uma marca positiva tanto na pesquisa quanto na prática das comunicações ópticas. Sua importância é ainda reforçada pela potencial influência nas futuras padronizações da NGPON-3, projetando-se como um pilar fundamental no desenvolvimento e na evolução contínua dessas redes de alto desempenho.

3. Metodologia e Fundamentação Teórica

O projeto de redes OCDMA coerentes teve sua base no estudo de formalismos matemáticos essenciais para a caracterização de desempenho em sistemas de comunicação.

A análise das arquiteturas adotadas envolveu modelagem computacional e simulação, utilizando equacionamentos matemáticos e modelagem computacional. Este estudo, com foco na eficiência do fornecimento de qualidade de serviço (Quality of Service - QoS) aos usuários, objetivou preencher lacunas na predição e avaliação de desempenho em redes OCDMA, destacando-se a exploração de arquiteturas inovadoras e a implementação de formalismos matemáticos robustos.

Os objetivos específicos do projeto incluíram a investigação do desempenho de cenários realistas de redes OCDMA coerentes, abrangendo desde a incorporação de modulação coerente em redes convencionais até a análise de suporte a múltiplas taxas de transmissão. Isso incluiu a atribuição de taxas distintas aos usuários, visando proporcionar uma variedade de serviços diferenciados e contribuindo para uma compreensão mais abrangente do potencial dessas arquiteturas.

Nesta seção, é exposto o formalismo matemático empregado na avaliação do desempenho de redes OCDMA convencionais e de redes que incorporam suporte a múltiplas taxas de transmissões [64]. Este formalismo abrange os formatos de modulação de chaveamento por deslocamento de fase binário (BPSK), chaveamento por deslocamento de fase em quadratura (QPSK) e amplitude em quadratura utilizando 16 símbolos 16-QAM.

Com base nos resultados obtidos na literatura, com grande foco no efeito deletério da MAI, estaremos apresentando as expressões referentes ao desempenho de redes OCDMA operando em múltiplas taxas de transmissão. Entretanto, as redes OCDMA coerentes convencionais podem ser avaliadas ao considerar o cenário onde todos os usuários transmitem os dados utilizando o mesmo formato de modulação, sendo assim, serão agrupados em uma única classe.

Dessa forma, a rede OCDMA em questão pode admitir três diferentes classes de

usuários onde as informações podem ser enviadas em baixas e altas taxas de transmissão através das modulações BPSK e 16-QAM, respectivamente.

É necessário formalizar a expressão da variância nos cenários nos quais os usuários interferentes de uma classe específica são submetidos à demodulação pelo receptor do usuário desejado, ativo em outra classe. Nesse sentido, inicialmente, considera-se que os usuários interferentes transmitem bits de dados em taxas distintas da classe de alta taxa, e seus sinais são modulados no receptor do usuário desejado, o qual é concebido para operar em altas taxas. No âmbito do receptor, presume-se que os usuários interferentes ativos transmitem sinais na rede por meio de fibra óptica monomodo convencional, resultando no campo óptico recebido na saída do decodificador do usuário desejado.

$$E_{BPSK_n}(t, \theta_s) = E_{ac_BPSK_n}(t, \theta_s) + \sum_{k=1 (k \neq n)}^K E_{cc_BPSK_{n,k}}(t - \tau_k, \theta_s) \quad (1)$$

Sendo $E_{ac_BPSK_n}$, o sinal de autocorrelação do usuário n desejado, e θ_s a fase associada ao símbolo transmitido, K , representa o número de usuários interferentes, E_{cc} é o sinal de correção cruzada entre os usuários n e k , τ_k é o atraso associado a inserção o k -ésimo usuário. os valores foram obtidos através da modulação computacional QPSK,

Em seguida, é preciso ajustar as amplitudes e fases do sinal delineado na expressão (1) a fim de deduzir a intensidade do campo óptico no receptor do usuário de interesse, considerando a circunstância na qual os bits de informação estão submetidos à modulação 16-QAM. Consequentemente, a equação (1) pode ser reformulada da seguinte maneira:

$$E_{ac_16-QAM_n}(t, \theta_{s'}) = E_{ac_BPSK_n}(t, \theta_s) \times E_{16-QAM} e^{j\theta_{16-QAM}} \quad (2)$$

$$E_{cc_16-QAM_{n,k}}(t - \tau_k, \theta_{s'}) = E_{cc_16-QAM_{n,k}}(t - \tau_k, \theta_{s'}) \times E_{16-QAM} e^{j\theta_{16-QAM}} \quad (3)$$

Onde E_{16-QAM} e θ_{16-QAM} representam os parâmetros empregados para ajustar a amplitude e a fase dos sinais BPSK para o formato 16-QAM, respectivamente. Assim, a equação (1) pode ser reformulada para incorporar as amplitudes e fases pertinentes ao formato de modulação 16-QAM da seguinte maneira:

$$E_{16-QAM_n}(t, \theta_s) = E_{ac_16-QAM_n}(t, \theta_s) \times \sum_{k=1}^K (k \neq n) E_{cc_16-QAM_{n,k}}(t - \tau_k, \theta_s) \quad (4)$$

A formalização da Taxa de Erro de Bits (BER, do inglês Bit Error Rate) exige explicitamente que as variáveis de decisão do usuário desejado sejam definidas em termos de sinais de autocorrelação e cruzada. Conseqüentemente, o nível médio do sinal desejado pode ser expresso como:

$$\mu_{16-QAM_n}^{I,Q} = \mu_{16-QAM_{ac}}^{I,Q} + \mu_{16-QAM_{MAI}}^{I,Q} \quad (5)$$

Sendo $\mu_{16-QAM_{ac}}^{I,Q}$ e $\mu_{16-QAM_{MAI}}^{I,Q}$ As contribuições médias dos sinais de autocorrelação e correlação cruzada, respectivamente.

Considerando que os usuários interferentes são estatisticamente independentes, iremos expressar o nível dos sinais de correção cruzado para dois usuários interferentes na mesma rede. Assim, o valor instantâneo de MAI no j-ésimo receptor do usuário interferente quando k usuários transmitem dados:

$$\mu_{16-QAM_{MAI,j,k}}^{I,Q} = Re\left\{\frac{R}{2} \times \left[\int_{T_{ca}} (E_{cc_16-QAM_{j,k}})^*(t - \tau_k, \theta_b) E_{LO_n}^{I,Q}(t) \right]\right\} \quad (6)$$

Na expressão fornecida, $E_{LO_n}^{I,Q}$ representa o sinal do oscilador local, R denota a

responsividade do fotodetector, e o asterisco (*) indica o operador de conjugado complexo. É imperativo destacar que, devido à incerteza inerente sobre a ativação de símbolos codificados específicos em um determinado momento, torna-se necessário realizar um cálculo médio abrangente, denominado $\overline{\mu_{16-QAM_{MAI_{j,k}}^{I,Q}}}$. Esse cálculo envolve a consideração de todos os símbolos codificados possíveis e a incorporação de um parâmetro de atraso de acesso aleatório para cada usuário no sistema.

Consequentemente, a variância da interferência torna-se.

$$\sigma_{16-QAM_{MAI_{j,k}}^{I,Q}}^2 = \left(\overline{\mu_{16-QAM_{MAI_{j,k}}^{I,Q}}} - \mu_{16-QAM_{MAI_{j,k}}^{I,Q}} \right)^2. \quad (7)$$

Por fim, a taxa de erro de bit (BER) mínima para redes baseadas em 16-QAM pode ser aproximadamente relacionada à probabilidade de erro de um símbolo que não está no canto ou dentro do diagrama de constelação, conforme descrito em [62].

$$BER_{16-QAM} = 1 - \left[\left(1 - \frac{1}{2} BER_{16-QAM}^I \right) \left(1 - BER_{16-QAM}^Q \right) \right]. \quad (8)$$

$$BER_{16-QAM}^{I,Q} = Q \left(\sqrt{SIR_{16-QAM}^{I,Q}} \right). \quad (9)$$

$$SIR_{16-QAM_{MR_l}}^{I,Q} = \frac{\left(\overline{\mu_{16-QAM_{ac}}^{I,Q}} \right)^2}{K_l \sigma_{16-QAM_{MAI_{l,l}}^{I,Q}}^2 + \sum_{m=1, m \neq l}^M K_m \sigma_{16-QAM_{MAI_{l,m}}^{I,Q}}^2}, \quad (10)$$

onde K_l é o número de usuários interferentes presentes na classe do usuário de interesse, $\overline{\sigma_{16-QAM_{MAI_{l,l}}^{I,Q}}^2}$ é a variância média calculada entre os usuários interferentes que estão ativos na classe do usuário de interesse, M é o número de classes de serviços, K_m é o número

de usuários interferentes ativos nas outras que não do usuário de interesse e $\sigma_{16-QAM_{MAI,m}}^{2 \frac{I,Q}{}}$ é a variância entre os usuários interferentes ativos na classe do usuário de interesse e os usuários interferentes ativos nas outras classes que não do usuário de interesse.

4. Resultados

Iniciando-se os testes, é de extrema importância definir os parâmetros e o cenário a serem utilizados na codificação, e para isso foram definidas situações que facilitassem tanto a criação como a utilização do código. Um desses fatores é a responsividade do fotodetector que, apenas por comodidade, foi assumida como unitária, assim como a amplitude do campo óptico de cada chip normalizada para a unidade. Ainda, para contribuir na aquisição de filtragens precisas e com menor abrandamento do comprimento de onda, as redes de Bragg foram empregadas com um perfil de apodização do tipo sinc.

Para a obtenção do cenário mais adequado, os chips pulsados são distribuídos no domínio espectral e temporal perfeitamente espaçados entre si. Assim, quando comparados com o intervalo de tempo à disposição do código, os chips iluminados são compactados, tendo cada espectro de chip sendo suficientemente acomodado pelas redes de Bragg. Neste modelo são utilizados 12 dos 29 comprimentos de onda disponíveis, com espaçamento de 0,020 μm entre eles no intervalo de 1,530 μm - 2,090 μm . Esses 12 comprimentos de onda são alocados em 12 chips de tempo de acordo com o código FFH gerado. Pressupõe-se, ainda, que a forma do pulso dos chips seja gaussiana e dez vezes menor quando comparada ao período do chip, e, com isso, a taxa de transmissão efetiva é proporcional a este fator de compressão com transmissão de taxa de chip a 1200 Gc/s (Gigachips por segundo). Tal estrutura foi selecionada para que não ocorressem interferências entre chips de um mesmo usuário, possibilitando a saída de resultados ideais.

Já para o acesso dos usuários, mesmo que não seja verossímil das redes OCDMA práticas, foi considerado que os usuários transmitem os dados em configuração síncrona de chips para que a modelagem estocástica da MAI entre usuários fosse significativamente facilitada, além de poder demonstrar a pior circunstância de desempenho da rede. Com o intuito de se aproximar da realidade, os usuários transmitem a 10 Gbps, o que é compatível com taxas de transmissão utilizadas atualmente.

Além disso, todos nossos testes foram realizados mantendo a potência óptica transmitida constante, e os ruídos e dispersões mencionados nos itens 1.3 e 1.4 não foram considerados. Portanto somente a MAI foi utilizada como contraste do código.

O primeiro dos resultados obtidos é a resposta ao impulso do codificador (linhas azuis), sobrepostas pelo valor absoluto das amplitudes de pulso (linhas pretas), que pode ser visualizado na Figura 3

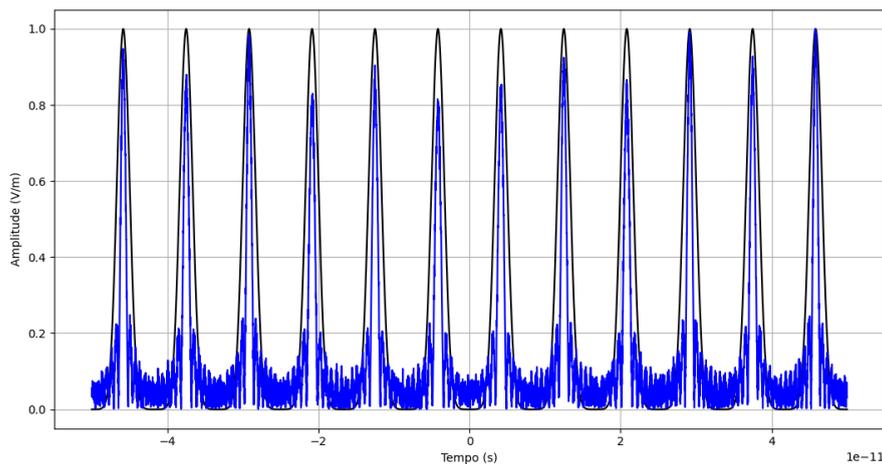


Figura 3. Representação temporal dos pulsos codificados desejados (curvas pretas) e resposta ao impulso do codificador desejado (curvas azuis).

O arranjo espectral da função de transferência delimita a largura de banda de pulso,

que faz com que a resposta da rede de Bragg se assemelhe com um filtro ideal. Esse fenômeno é ocasionado pela profundidade do índice de modulação adotada de $1,25 \times 10^{-2}$ e o comprimento da grade de 1 mm. Assim como mostrado na Figura 4 abaixo, o modelo ideal da literatura busca o valor absoluto da representação espectral codificada (curvas negras) sobreposta pela função de transferência (curvas azuis) do codificador de usuário desejado, com a amplitude sendo normalizada para 1.

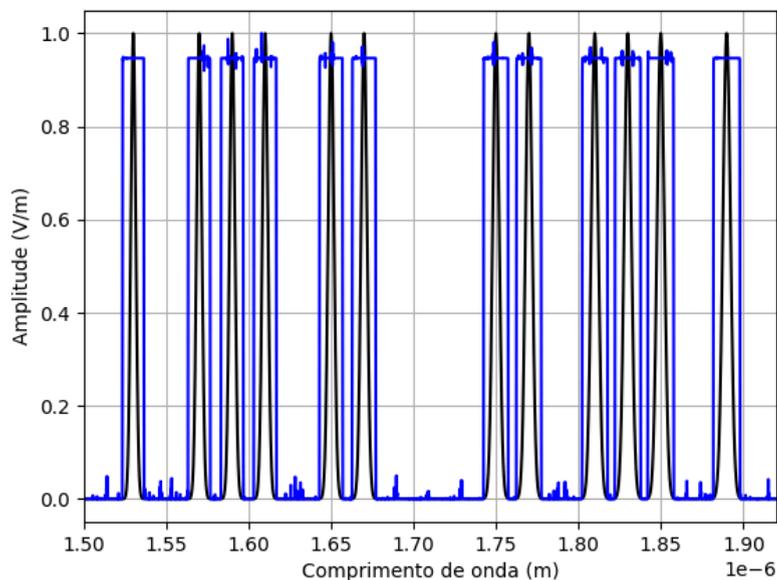


Figura 4. Representação espectral dos pulsos codificados pelo usuário desejados (curvas pretas) e função de transferência do codificador desejado (curvas azuis).

Os usuários, portanto, só enviam bits de dados quando desejados e quando coincidem no preciso momento e comprimento de onda no pico, impedindo que usuários indesejados impactem nos erros. Esse fenômeno ocorre devido os chips com mesmo comprimento de onda não coincidirem no mesmo espaço de tempo e, portanto, não são detectados na decisão da janela de autocorrelação.

Posteriormente os chips são agrupados seguindo o decodificador do usuário desejado, ocasionando, como apresentado na Figura 5 com amplitude normalizada, um pico de autocorrelação de alto nível quando o bit de dados é transmitido após a decodificação.

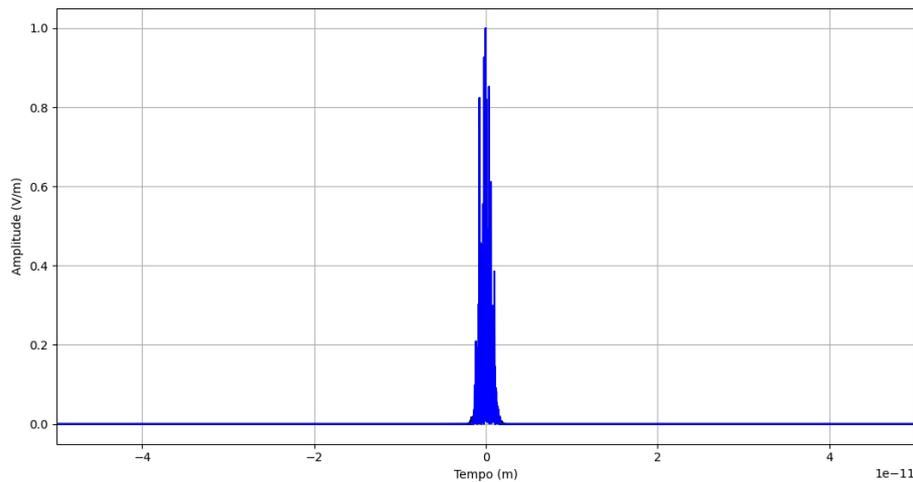


Figura 5. Representação temporal da saída de demodulação mostrando a autocorrelação desejada do usuário

A Figura 5 demonstra como é introduzido um atraso em cada elemento de comprimento de onda para que sejam complementares no decodificador do usuário de interesse, levando um único atraso cumulativo para todos os elementos (curva na cor azul).

Em seguida, assim como descrito em Metodologias e Fundamentação Teórica, deve-se analisar o desempenho dos resultados para diferentes formatos de modulação. Os resultados do BER são demonstrados nas Figuras a seguir, nas quais foram utilizados os modelos QPSK (linha vermelha), 16-QAM (linha verde) e 32-QAM (linha azul) para 17, 19, 23, 25, 27 e 29 usuários simultâneos. Como o número de chips utilizado em todos os testes foi 12, e, para as simulações de interferência, o número de usuários deve ser, no mínimo, um a mais que o número de chips, os gráficos têm 13 usuários simultâneos inicialmente.

A análise das medições de taxa de erro de bit (BER) para diferentes modulações em um cenário com um número crescente de usuários simultâneos revela tendências e comportamentos distintos entre as técnicas de modulação QPSK, 16-QAM e 32-QAM. Com o aumento do número de usuários, de 17 a 29, observa-se uma variação significativa nas taxas de erro, refletindo a eficiência e a robustez de cada modulação sob condições de carga

crescente.

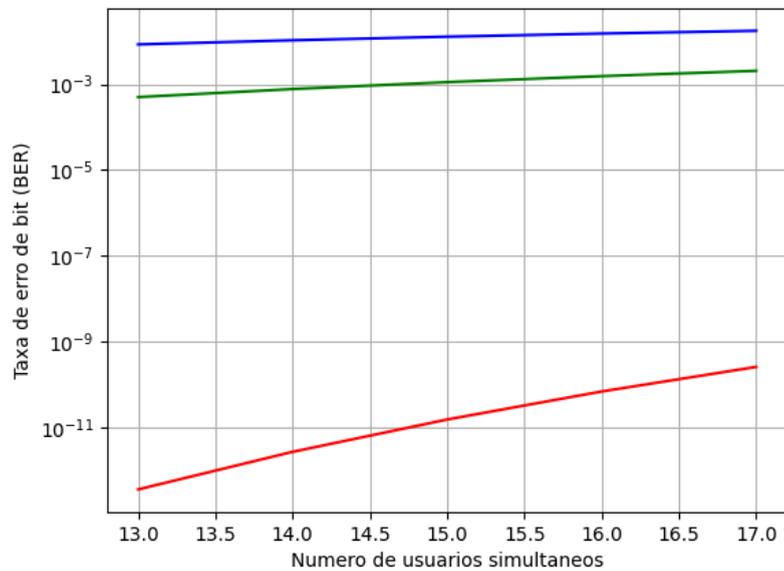


Figura 6. BER para o FFH-OCDMA com 17 comprimentos de onda disponíveis usando os seguintes formatos de modulação: QPSK (vermelho), 16-QAM(verde), 32-QAM (azul).

Inicialmente, para 17 usuários, a modulação 32-QAM apresentou a maior taxa de erro, com valores abaixo de 10^{-3} , enquanto a 16-QAM teve um desempenho similar. A QPSK se destacou por sua eficiência, mantendo uma BER próxima de 10^{-10} . Ao aumentar para 19 usuários, a QPSK manteve sua baixa taxa de erro, enquanto as modulações 16-QAM e 32-QAM registraram taxas de erro de 10^{-3} e 10^{-2} , respectivamente, indicando um aumento na taxa de erro com o acréscimo de usuários.

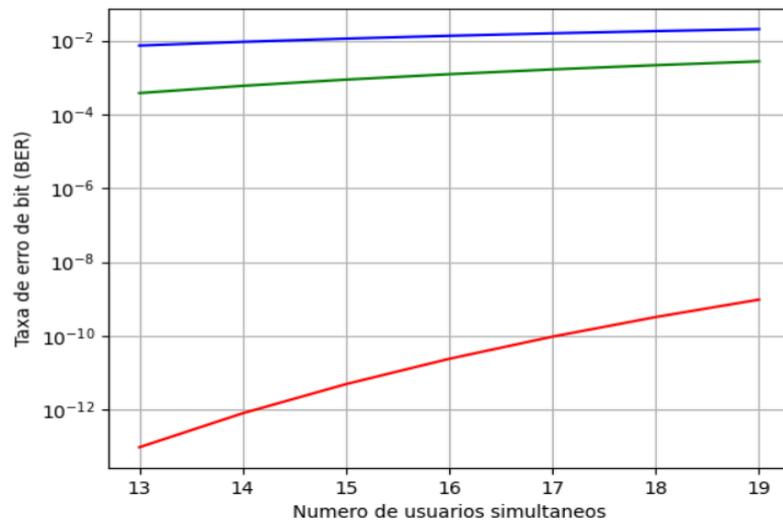


Figura 7. BER para o FFH-OCDMA com 19 comprimentos de onda disponíveis usando os seguintes formatos de modulação: QPSK (vermelho), 16-QAM(verde), 32-QAM (azul).

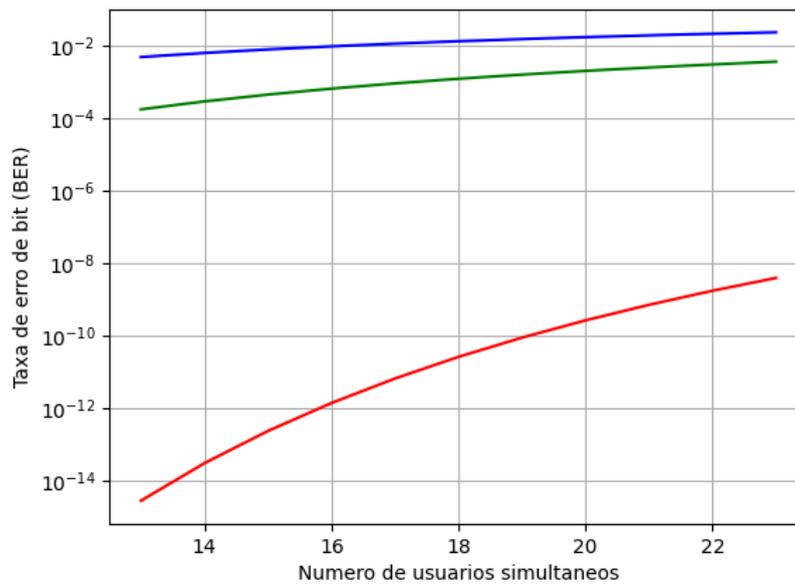


Figura 8. BER para o FFH-OCDMA com 23 comprimentos de onda disponíveis usando os seguintes formatos de modulação: QPSK (vermelho), 16-QAM(verde), 32-QAM (azul).

Com 19 e 23 usuários, as taxas de erro aumentaram de forma geral, mas mantendo uma tendência similar às observações anteriores. A QPSK demonstrou um aumento na BER para cerca de 10^{-9} e 10^{-8} respectivamente, enquanto a 16-QAM e a 32-QAM mantiveram taxas de erro em torno de 10^{-3} .

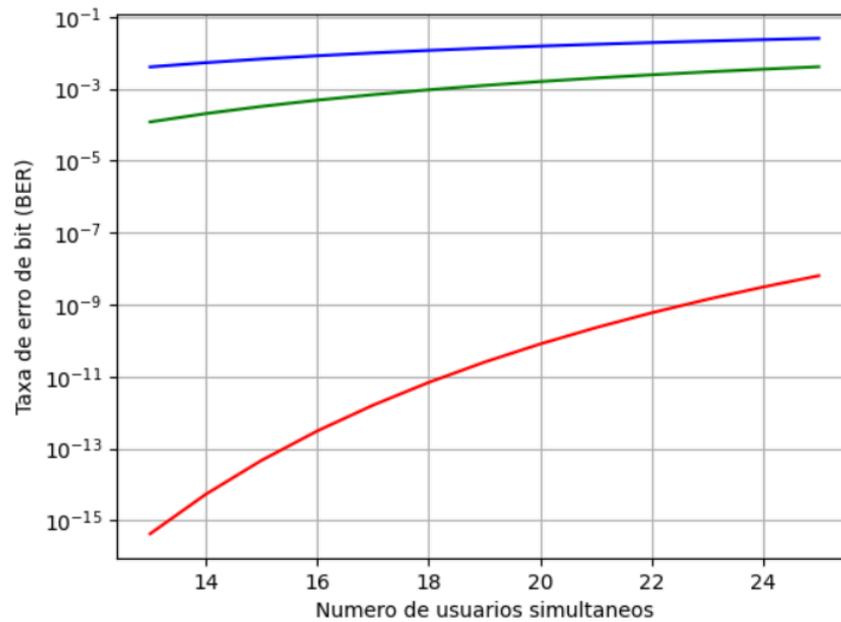


Figura 9. BER para o FFH-OCDMA com 25 comprimentos de onda disponíveis usando os seguintes formatos de modulação: QPSK (vermelho), 16-QAM (verde), 32-QAM (azul).

Para 25 usuários, houve um aumento significativo na taxa de erro da QPSK para 10^{-9} , enquanto as modulações 16-QAM e 32-QAM viram um aumento nas suas taxas de erro para 10^{-2} e 10^{-1} , respectivamente. Ao alcançar 27 usuários, a QPSK voltou a mostrar uma BER próxima de 10^{-10} , com a 16-QAM e a 32-QAM mantendo suas taxas de erro anteriores.

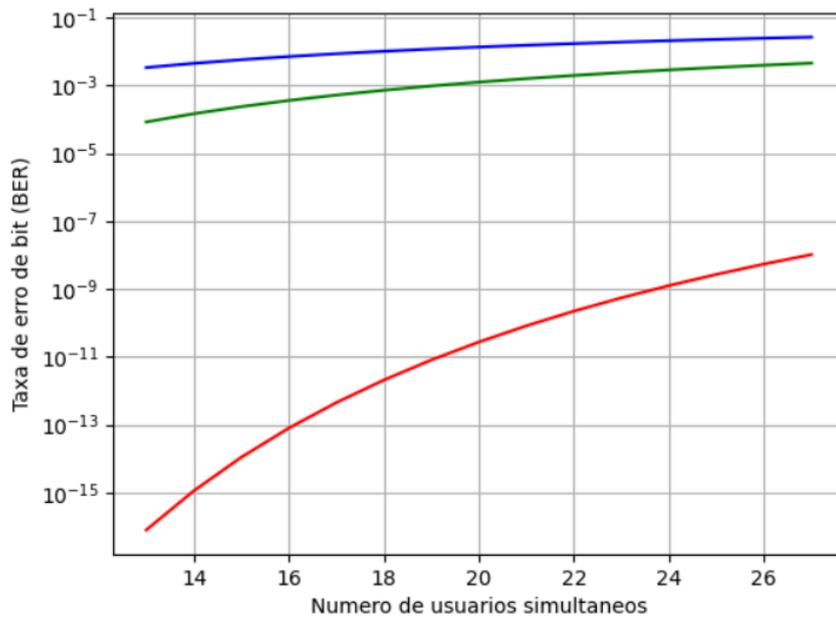


Figura 10. BER para o FFH-OCDMA com 27 comprimentos de onda disponíveis usando os seguintes formatos de modulação: QPSK (vermelho), 16-QAM (verde), 32-QAM (azul).

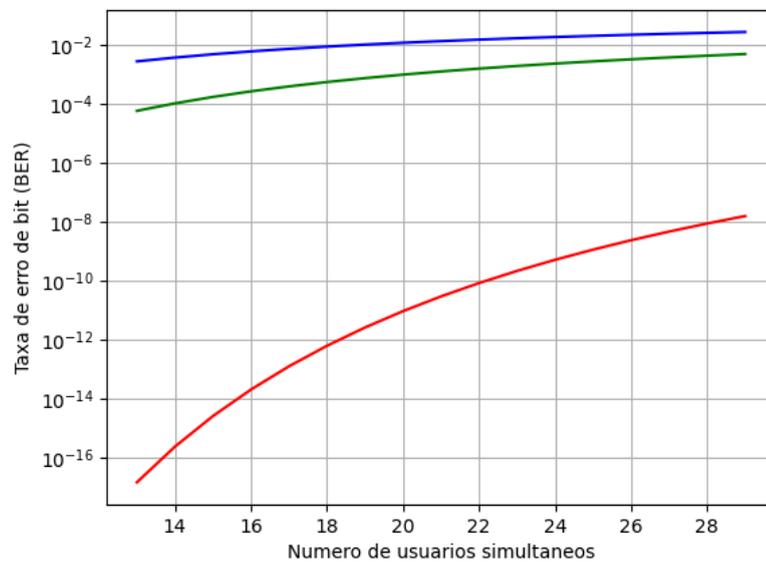


Figura 11. BER para o FFH-OCDMA com 29 comprimentos de onda disponíveis usando os seguintes formatos de modulação: QPSK (vermelho), 16-QAM (verde), 32-QAM (azul).

Por fim, com 27 e 29 usuários, a BER da QPSK mostrou uma melhora significativa, com valores variando de 10^{-16} a 10^{-8} , enquanto a 16-QAM e a 32-QAM exibiram taxas de erro mais altas e instáveis, porém com uma tendência de aumento leve.

A tabela abaixo resume as taxas de erro de bit (BER) observadas para as modulações QPSK, 16-QAM e 32-QAM à medida que o número de usuários simultâneos aumentou de 17 a 29:

Número de Usuários	QPSK	16-QAM	32-QAM
17	$\sim 10^{-10}$	$\sim 10^{-3}$	$< 10^{-3}$
19	$\sim 10^{-10}$	10^{-3}	10^{-2}
23	$\sim 10^{-8}$	$\sim 10^{-3}$	$\sim 10^{-2}$
25	$\sim 10^{-9}$	10^{-3}	10^{-2}
27	$\sim 10^{-10}$	10^{-3}	10^{-2}
29	10^{-16} a 10^{-8}	$\sim 10^{-3}$	$\sim 10^{-3}$

Tabela 1. BER para o FFH-OCDMA diferentes comprimentos de onda disponíveis usando os seguintes formatos de modulação: QPSK (vermelho), 16-QAM(verde), 32-QAM (azul).

Esta tabela ilustra a variabilidade das taxas de erro em função do número de usuários e destaca a superioridade relativa da modulação QPSK em termos de robustez e eficiência em ambientes de alta densidade de usuários.

Comparativamente, é evidente que o aumento no número de usuários influencia negativamente a BER em todos os formatos de modulação. A QPSK é consistentemente a que apresenta a menor BER, implicando em uma probabilidade menos elevada de erros. A 16-QAM e a 32-QAM, com suas taxas de erro significativamente mais altas, sugerem uma pior performance em ambientes com maior número de usuários considerando uma potência igual.

A modulação QPSK mantém uma taxa de erro de bit mais baixa e constante, evidenciando sua robustez em comparação às outras duas, principalmente quando o sistema é submetido a um número elevado de usuários simultâneos.

Ao analisar o BER de cada modelo, principalmente levando em consideração o que a literatura considera sobre redes livres de erro ($BER \sim 10^{-12}$), alguns modelos se mostram mais apropriados que outros.

5. Conclusão

Diante do panorama atual da comunicação óptica, este estudo representa uma análise abrangente das tecnologias e técnicas essenciais para o desenvolvimento de redes ópticas coerentes OCDMA (Acesso Múltiplo por Divisão de Código). Desde a exploração das diferentes formas de modulação, como a modulação de amplitude em quadratura M-ária (M-QAM) e suas variantes, até a investigação das diversas codificações existentes em redes OCDMA, este trabalho oferece uma visão holística das possibilidades e desafios encontrados nesse campo.

Uma das principais contribuições deste estudo é a identificação das técnicas mais adequadas de modulação e acesso múltiplo para diferentes cenários de comunicação óptica. Por exemplo, a modulação QPSK (Chaveamento por Deslocamento de Fase em Quadratura) é destacada como uma opção robusta para ambientes com baixos níveis de relação sinal-interferência, enquanto esquemas como 16-QAM oferecem maior capacidade de transmissão, embora sejam mais suscetíveis a ruídos e interferências. Além disso, as técnicas de acesso múltiplo no domínio óptico, como OTDMA, WDMA e OCDMA, são analisadas em termos de suas vantagens e limitações, dependendo do contexto de aplicação, seja em redes de acesso locais (LAN), metropolitanas (MAN) ou de longa distância (WAN).

Outro ponto relevante abordado neste estudo é a interferência de acesso múltiplo (MAI), um dos principais desafios enfrentados em sistemas OCDMA. A compreensão dos mecanismos subjacentes à MAI e das estratégias para minimizá-la é crucial para o projeto e

a operação eficaz desses sistemas. A análise detalhada das codificações no domínio do tempo e da frequência, bem como das técnicas de modulação coerente, destaca a importância de considerar uma abordagem integrada para mitigar os efeitos adversos da MAI e melhorar o desempenho do sistema.

Além disso, é importante ressaltar que o trabalho realizado neste estudo pode servir como base para pesquisas futuras em diversas áreas relacionadas à comunicação óptica. A metodologia desenvolvida e os resultados obtidos podem ser replicados e adaptados para investigar outros tipos de modulação, técnicas de acesso múltiplo e modelos de rede. Por exemplo, é possível explorar diferentes esquemas de modulação, como modulação de fase, modulação de amplitude ou até mesmo técnicas mais avançadas, como modulação coerente em sistemas não lineares.

Portanto, este estudo não apenas contribui para o avanço do conhecimento em comunicação óptica, mas também estabelece uma base sólida para investigações futuras. A continuidade deste trabalho pode levar a avanços significativos na concepção, modelagem e implementação de sistemas de comunicação óptica de próxima geração, proporcionando benefícios tanto para a academia quanto para a indústria.

6. Referências Bibliográficas

[1] P. R. Prucnal, *Optical Code Division Multiple Access: Fundamentals and Applications*. New York: Taylor & Francis, Dec. 2005.

[2] H. Yin and D. Richardson, *Optical code division multiple access communication networks: theory and applications*. Tsinghua University Press, Springer-Verlag, 2008.

[3] R. P. Scott, W. Cong, K. Li, V. J. Hernandez, B. H. Kolner, J. P. Heritage, and S. J. B. Yoo, "Demonstration of an error-free 4×10 Gbps multiuser SPECTS O-CDMA network testbed," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 16, no. 9, pp. 2186–2188, Sep. 2004.

[4] R. Matsumoto, T. Kodama, S. Shimizu, R. Nomura, K. Omichi, N. Wadaand, and K. Kitayama, "40G OCDMA-PON system with an asymmetric structure using a single multi-port and sampled SSFBG encoder/decoders," *IEEE Journal of Lightwave Technology*, vol.32, no. 6, pp. 1132–1143, March 2014.

[5] P. Chanclou, A. Cui, F. Geilhardt, H. Nakamura and D. Nessim, "Network operator requirements for the next generation of optical access networks," in *IEEE Network*, vol. 26, no. 2, pp. 8-14, March April 2012.

[6] "Introduction to a Special Topics Issue of the Fifth Fiber Optics in Access Network (FOAN) Workshop, Held in Brno, Czech Republic, October 2015." *Fiber and Integrated Optics*, 35(2), pp. 47–48.

[7] R. Sanchez, J. A. Hernandez and D. Larrabeiti, "Network planning for dual residential- business exploitation of next-generation passive optical networks to provide symmetrical 1 Gbps services," in *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 8, no. 4, pp. 249- 262, April 2016.

[8] D. Nessim, "PON roadmap [invited]," in *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 9, no. 1, pp. A71-A76, Jan. 2017.

[9] "Gigabit-capable passive optical networks (GPON)," *ITU-T Series Recommendation G.984*, 2008.

[10] M. Forzati et al., "Next-generation optical access seamless evolution: concluding results of the European FP7 Project OASE," in *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 7, no. 2, pp. 109-123, February 1 2015.

[11] Z. Songlin, G. Yong and Y. Yongjia, "ZTE's perspective on applying OFDM-PON in next converged optical and wireless networks," in *China Communications*, vol. 12, no. 4, pp. 50-57, April 2015.

[12] G. Kramer, M. D. Andrade, R. Roy, and P. Chowdhury, "Evolution of optical access networks: architectures and capacity upgrades," *Proc. of the IEEE*, vol. 100, no. 5, pp. 1188–1196, May 2012.

[13] L. G. Kazovsky, S.-W. Wong, V. Gudla, P.T. Afshar, S.-H. Yen, S. Yamashita, and Y.

Yan, "Challenges in next-generation optical access networks: addressing reach extension and security weaknesses," *IET Optoelectronics*, vol. 5, no. 4, pp. 133-143, August 2011.

[14] Kitayama, K., "Rationale of OCDMA/OFDMA for NG-PON," 2011 Int. Conf. on Inf. Photonics (ICO), vol., no., pp.1,2, 18-20 May 2011.

[15] A. L. Sanches, J. V. dos Reis, Jr., and B.-H. V. Borges, "Analysis of high-speed optical wavelength/time CDMA networks using pulse position modulation and forward error correction techniques," *IEEE J. Lightwave Technol.*, vol. 27, no. 22, pp. 5134–5144, Nov. 2009.

[16] K. Fouli and M. Maier, "OCDMA and Optical Coding: Principles, Applications, and Challenges," *IEEE Commun. Mag.*, vol 45, no. 8, pp. 27-34, Aug. 2007.

[17] A. Stok and E. H. Sargent, "The role of optical CDMA in access networks," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 40, no. 9, pp. 83–87, Sep. 2002.

[18] R. Davey, J. Kani, F. Bourgart, and K. McCammon, "Options for future optical access networks," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 44, no. 10, pp. 50–56, Oct. 2006.

[19] T. H. Shake, "Security performance of optical CDMA against eaves-dropping," *J. Lightwave Technol.*, vol. 23, no. 2, pp. 655–670, Feb. 2005.

[20] M. Y. Azizoglu, J. A. Salehi, and Y. Li, "Optical CDMA via temporal codes," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 40, no. 7, pp. 1162-1170, Jul. 1992.

[21] J. Salehi, "Code division multiple-access techniques in optical fiber networks - Part I: Fundamental principles," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 37, no. 8, pp. 824-833, Aug. 1989.

[22] J. Salehi and C. A. Brackett, "Code division multiple-access techniques in optical fiber networks - Part 2: Systems performance analysis," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 37, no. 8, pp. 834-842, Aug. 1989.

[23] W. Chung, J. Salehi, and V. Wei, "Optical orthogonal codes: Design, analysis, and applications," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 35, no. 3, pp. 595-604, May 1989.

[24] S. Maric, M. Hahm, and E. Titlebaum, "Construction and performance analysis of a new family of optical orthogonal codes for CDMA fiber-optic networks," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 43, no. 234, pp. 485-489, Feb. 1995.

[25] L. Tancevski and I. Andonovic, "Wavelength Hopping/Time Spreading Code Division Multiple Access Systems," *IEEE Electron. Lett.*, vol. 30, No. 17, pp. 1388-1390, Aug. 1994.

[26] L. Tancevski and I. Andonovic, "Hybrid wavelength hopping/time spreading schemes for use in massive optical networks with increased security," *J. Lightwave Technol.*, vol. 14, no. 12, pp. 2636-2647, Dec. 1996.

[27] G. C. Yang and W. C. Kwong, "Performance comparison of multiwavelength CDMA and WDMA+CDMA for fiber-optic networks," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 45, no. 11, pp. 1426-1434, Nov. 1997.

[28] W. C. Kwong, G. C. Yang, V. Baby, C. S. Bres and P. R. Prucnal, "Multiple-Wavelength Optical Orthogonal Codes Under Prime-Sequence Permutations for Optical CDMA", *IEEE Trans. Commun.*, vol. 53, no. 1, pp. 117–123, Jan. 2005.

[29] K. Yu and N. Park, "Design of new family of two-dimensional wavelength-time spreading codes for optical code division multiple access networks." *Electron. Lett.*, vol 35, no. 10, pp. 830–831, 1999.

[30] T.M. Bazan, D. Harle, and I. Andonovic, Performance analysis of 2-D time-wavelength OCDMA systems with coherent light sources: Code design considerations, *J. Lightwave Technol.*, vol. 24, no. 10, pp. 3583-3589, Oct. 2006.

[31] L. Tancevski, M. Tur, J. Budin and I. Andonovic "Hybrid wavelength hopping/time spreading code division multiple access systems," *Proc. Inst. Electr. Eng.—Optoelectronics*, vol. 143, pp. 161-166, Jun. 1996.

[32] Kwong, W.C., Yang, G.C., and Liu, Y.C.: "A new family of wavelength-time optical CDMA codes utilizing programmable arrayed waveguide gratings," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, 2005, 23, pp. 1564–1571.

[33] S. Shurong, H. Yin, Z. Wang, "A New Family of 2-D Optical Orthogonal Codes and Analysis of Its Performance in Optical CDMA Access Networks," *J. Lightwave Technol.*, vol. 24, no. 4, pp. 1646– 1652, Apr. 2006.

[34] E. S. Shivaleela, A. Selvarajan, and T. Srinivas, "Two-dimensional optical orthogonal codes for fiber-optic CDMA networks," *J. Lightwave Technol.*, vol. 23, no. 2, pp. 647–654, Feb. 2005.

[35] C. Yang, J. Huang and Y. Wang, "Multipulse-Per-Row Codes for High-Speed Optical Wavelength/Time CDMA Networks," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 19, no. 21, pp.1756- 1758, Nov. 2007.

[36] R. M. H. Yim, L. R. Chen, and J. Bajcsy, "Design and performance of 2-D codes for wavelength-time optical CDMA," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 14, no. 5, pp. 714–716, May 2002.

[37] C. C. Yang and J. F. Huang, "Two-dimensional m-matrices coding in spatial/frequency optical CDMA networks," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 15, no. 1, pp. 168–170, Jan. 2003.

[38] A. J. Mendez, R. M. Gagliardi, V. J. Hernandez, C. V. Bennett, and W. J. Lennon, "Design and performance analysis of wavelength/time (W/T) matrix codes for optical CDMA," *J. Lightwave Technol.*, vol. 21, no. 11, pp. 2524–2533, Nov. 2003.

[39] S. V. Maric, O. Moreno, and C. J. Corrada, "Multimedia transmission in fiber optical LANs using optical CDMA," *IEEE J. Lightwave Technol.*, vol. 14, no. 10, pp. 2149-2153, Oct. 1996.

[40] N. G. Tarhuni and T. O. Korhonen, "Multi-weight multi-length strict optical orthogonal codes," in *Proc. 6th Nordic Signal Processing Symp. (NORSIG)*, Espoo, Finland, Jun. 9-11, pp. 161–164, 2004.

[41] L. Bin, "One-Coincidence Sequences with Specified Distance Between Adjacent Symbols for Frequency-Hopping Multiple Access," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 45, no. 4, pp. 408-410, April 1997.

[42] H. Fathallah, L. A. Rusch, and S. LaRochelle, "Passive optical fast wavelength-hop CDMA communications network," *IEEE J. Lightwave Technol.*, vol. 17, no. 3, pp. 397-405, March 1999.

[43] E. Inaty, P. Fortier, and L. A. Rusch, "SIR performance evaluation of a multirate OFFH-CDMA system," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 5, no. 5, pp. 224-226, May 2001.

[44] E. Inaty, H. M. H. Shalaby, P. Fortier, and L. A. Rusch, "Multirate optical fast wavelength hopping CDMA system using power control," *IEEE J. Lightwave Technol.*, vol. 20, no. 2, pp. 166-177, Feb. 2002.

[45] Infinera. "Coherent DWDM Technologies". (Whitepaper). 2012. Disponível em: <www.infinera.com/pdfs/whitepapers/Infinera_Coherent_Tech.pdf>. Acesso em: 10 nov. 2023.

[46] Infinera. "Super-Channels: DWDM Transmission at 100 Gbps and Beyond". (Whitepaper). 2012. Disponível em: <www.infinera.com/pdfs/whitepapers/SuperChannel_WhitePaper.pdf>. Acesso em: 10 nov. 2023.

[47] G. Manzacca, A. M. Vegni, X. Wang, N. Wada, G. Cincotti, and K. Kitayama, "Performance Analysis of a Multiport Encoder/Decoder in OCDMA Scenario," *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 13, no. 5, pp. 1415-1421, Sept./Oct. 2007.

[48] R. Matsumoto, T. Kodama, S. Shimizu, R. Nomura, K. Omichi, N. Wada, and K. Kitayama. "40G OCDMA-PON Network with an Asymmetric Structure Using a Single Multi-Port and Sampled SSFBG Encoder/Decoders." *IEEE J. Lightwave Technol.*, vol. 32, no. 6, pp. 1132-1143, 2014.

[49] Y. Chen, R. Wang, T. Pu, P. Xiang, H. Zhu, T. Fang, and J. Zheng. "Novel Multiple Access Interference Elimination based on Mach-Zehnder Modulator for OCDMA Networks." *Asia Comm. and Photonics Conf.*. Optical Society of America, 2013.

[50] A. Srivastava, "Next generation PON evolution," In *SPIE OPTO*, International Society for Optics and Photonics, pp. 864509-864509, 2013.

[51] H. Choi, T. Tsuritani and I. Morita, "BER-adaptive flexible-format transmitter for elastic optical networks," *Opt. Express*, vol. 20, pp. 18652-18658, August 2002.

[52] G. Huang, Y. Miyoshi, A. Maruta, Y. Yoshida, and K. Kitayama, "All-Optical OOK to 16-QAM Modulation Format Conversion Employing Nonlinear Optical Loop Mirror," *IEEE J. Lightwave Technol.*, vol. 30, no. 9, pp. 1342-1350, May 2012.

[53] T. R. Raddo, A. L. Sanches, J. V. dos Reis, Jr., and B.-H. V. Borges, "A new approach for evaluating the BER of a multirate, multiclass OFFH-CDMA network," *IEEE Commun. Letters*, vol. 16, no. 2, pp. 259-261, February 2012.

[54] S. Zou, M.M. Karbassian and H. Ghafouri-Shiraz, "Extended 2D codes supporting multirate and QoS in optical CDMA networks with Poisson and binomial MAI models," *J. Opt. Commun. Netw.*, vol. 5, no. 5, pp. 524-531, 2013.

[55] T. R. Raddo, A. Sanches, J. V. dos Reis Jr., and B. V. Borges, "Influence of the MAI Distribution Over the BER Evaluation in a Multirate, Multiclass OOC-OCDMA System," in *Proc ANIC*, paper ATuB5, 2011.

[56] J. Jiang, D. Wu and P. Fan, "General constructions of optimal variable-weight optical orthogonal codes," *Trans. Inf. Theory*, vol. 57, pp. 4488-4496, July 2011.

[57] V. Baby, W.-C. Kwong, C.-Y. Chang, G.-C. Yang, and P. R. Prucnal, "Performance analysis of variable-weight multi length optical codes for wavelength-time O-CDMA multimedia systems," *Trans. Commun.*, vol. 55, no. 7, pp. 1325–1333, July 2007.

[58] A. L. Sanches, *Análise de Redes Ópticas de Alta Velocidade Baseadas na Tecnologia CDMA e Códigos Bidimensionais*. Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos – 2010.

[59] J. V. Reis Júnior, *Modelagem de Redes CDMA-PON Baseadas em Técnicas de Cancelamento Paralelo e Códigos Corretores de Erros*. Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos – 2009.

[60] R.V. Santos Filho, *Análise de Sistemas CDMA Ópticos*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

[61] A. Sanches, M. Abuhelala, T. R. Raddo, S. Haxha and I. Glesk, "Rate-Flexible Optical CDMA Networks Based on Coherent Modulation Formats," 2020 22nd International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), Bari, Italy, 2020, pp. 1-5.

[62] J. R. Barry, E. A. Lee, and D. G. Messerschmitt, *Digital Communication*, 3rd edition, Springer, 2004.

[63] Celtic.br, "TIC Domicílios - 2023", 2023. Disponível em: <<https://cetic.br/pt/arquivos/domicilios/2023/domicilios/>>. Acesso em: 10 nov. 2023.

[64] A. L. Sanches, T. R. Raddo, J. V. dos Reis, and B.-H. V. Borges, "Performance analysis of single and multirate FFH-OCDMA networks based on PSK modulation formats," *IEEE/OSA J. Opt. Commun. Netw.*, vol. 7, no. 11, pp. 1084-1097, Nov. 2015..