

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELETRICA – FEELT
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELETRÔNICA E DE TELECOMUNICAÇÕES
PATOS DE MINAS – MG

Tadeu Silva Lima

Análise de escalabilidade de sistemas TS-OCDMA

Patos De Minas - MG

2017

Tadeu Silva Lima

Análise de escalabilidade de sistemas TS-OCDMA

Trabalho de conclusão de curso apresentado como requisito final para obtenção do Bacharelado em Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações. Submetido a faculdade de engenharia elétrica (FEELT) da universidade federal de Uberlândia (UFU).

Orientador: Prof. Dr. Pedro Luiz Lima Bertarini.

Patos De Minas - MG

2017

Análise de escalabilidade de sistemas TS-OCDMA

Trabalho de conclusão de curso aprovado para obtenção do título de Bacharelado em Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações da Universidade Federal de Uberlândia (MG) pela banca examinadora formada por:

Patos de Minas, 15 de dezembro de 2017.

Prof. Dr. Pedro Luiz Lima Bertarini

Prof. Dr. André Luiz Aguiar da Costa

Prof. Ms. Gustavo Nozella Rocha

À minha Mãe e exemplo de pessoa,

Maria Aparecida

“São as nossas escolhas, mais do que as nossas capacidades, que mostram quem realmente somos.”

JK. Rowling

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me ajudado a superar todas as minhas dificuldades.

Agradeço à minha mãe, Maria Aparecida, que se mostrou a principal responsável por esta conquista. Um exemplo de mãe, que sempre esteve ao meu lado, se preocupando e se sacrificando por mim. Agradeço ao meu pai, Geraldo, que se tornou minha referência de pessoa honesta e trabalhadora, mesmo não estando mais conosco. Agradeço aos meus irmãos Edson e Alexandre, que sempre me apoiaram e me deram suporte em todas as minhas conquistas.

Agradeço aos meus colegas e amigos que compartilharam seu tempo e alegrias comigo, sempre me incentivando e me ajudando em diversas situações.

Agradeço ao Prof. Dr. Pedro Luiz Lima Bertarini pela sua orientação e seus ensinamentos, que possibilitaram realizar minha pesquisa e este trabalho. Agradeço também a grande colaboração do Prof. Dr. André Luiz Aguiar da Costa na minha pesquisa e neste trabalho.

Agradeço à Universidade Federal de Uberlândia e a todos meus professores por terem me dado essa grande oportunidade e me preparado para essa conquista.

Agradeço ao laboratório LAPSE (Laboratório de Processamento de Sinais e Sistemas Embarcados) pela disponibilização da estrutura e pelo apoio na realização de minha pesquisa.

Resumo

A sociedade atual demanda cada vez mais de sistemas de comunicações mais eficientes e que possibilitem maiores taxas de tráfego. Devido a isso, muitas pesquisas são desenvolvidas com intuito de criar novos sistemas ou aperfeiçoar os já existentes. Este trabalho estuda a escalabilidade do sistema OCDMA aplicado via técnica de espalhamento temporal de fase (TS-OCDMA), com o objetivo de verificar a influência de diversos componentes ópticos no desempenho desse sistema. A sua implementação contempla diversos conceitos importantes de comunicações ópticas e visa otimizar o seu funcionamento para que este seja possível obter altas taxas de transmissão com um maior número de usuários simultâneos. Durante o trabalho, são testadas diversas variações na implementação e na configuração do sistema, sempre considerando situações próximas a realidade, possibilitando testar a influência de cada uma dessas variações no desempenho do sistema. São investigados os parâmetros taxa de transmissão, número de usuários, extensão do código, o comprimento do enlace, uso de amplificadores e dispositivos de rejeição de MAI. A principal figura de mérito empregada neste trabalho é a BER, que mede a taxa de erros de bits cometidos em uma transmissão. Além disso, outros parâmetros observados são o orçamento de potência e o diagrama do olho, que mostram informações relevantes ao funcionamento do sistema.

Palavras-chave: Codificação temporal de fase (TS), Acesso Múltiplo por Divisão de Código Óptico (OCDMA), Códigos ópticos, Sistemas de comunicações ópticas, Fibra óptica.

Abstract

Today's society demanding more efficient communications systems that enable higher traffic rates. In this context, many researches are designed to create new systems or to improve existing ones. This work studies the scalability of the OCDMA system applied by phase-temporal scattering (TS-OCDMA) technique, in order to verify the influence of several optical components in the system's performance. Its implementation contemplates several important concepts of optical communications and aims to optimize its operation so that it provides high rates with a greater number of simultaneous users. During the work, several scenarios are tested in the implementation and in the configuration of the system, always considering situations close to reality, making it possible to test the influence of each one of these variations and to find relevant characteristics that allow to improve the functioning of the system. The parameters of transmission rate, number of users, code extension, link length, use of amplifiers, MAI rejection devices, among others influence the performance of the system are investigated. The main figure of merit is the BER, which measures the number of errors committed in a transmission. Also, other parameters, like power budget and eye diagram are observed in order to show information relevant to the operation of the system.

Key words: Phase temporal coding (TS), Optical Code Division Multiple Access (OCDMA), optical codes, optical communications systems, optical fiber.

Lista de figuras

Figura 1: Representação das técnicas de múltiplo acesso a) FDMA b) TDMA e c) CDMA nas dimensões de tempo e frequência [5].....	18
Figura 2: Sistema OCDMA.....	19
Figura 3: Fluxo de bits em codificação temporal com base no esquema DSSS [7].	21
Figura 4: Codificação no domínio do tempo utilizando ODL [7].	21
Figura 5: Sistema de codificação de intensidade espectral (não-coerente) [7].	22
Figura 6: Esquema proposto para CDMA óptico baseado em codificação espectral e decodificação de pulsos ultracurtos de luz [16].....	24
Figura 7: Forma de onda no domínio do tempo e frequência para um sistema codificado em fase espectral coerente: a) Espectro do pulso estreito; b) sequencia pseudoaleatória (PN) no domínio da frequência, cuja multiplicação por (-1,1) em amplitude, neste domínio, , correspondente ao deslocamento de fase (0, π) no tempo; c) pulso espalhado, codificado em fase; d) Recuperação correta e incorreta do pulso [5][7].	25
Figura 8: Diagrama de blocos de um sistema OCDMA com codificação de fase temporal [10].	26
Figura 9: Tipos de modulações.....	28
Figura 10: Formas de onda dos formatos, a) Unipolar NRZ, b) Polar NRZ e c) Unipolar RZ.	28
Figura 11: Esquema de um modulador Mach-Zehnder	33
Figura 12: Sistema TS-OCDMA implementado.	35
Figura 13: Transmissor TS-OCDMA.	36
Figura 14: Parâmetros do codificador.....	38
Figura 15: Receptor TS-OCDMA	39
Figura 16: Sistema TS-OCDMA com 2 usuários.....	41
Figura 17: Sinal do usuário sem codificação.....	42
Figura 18: Sinal do usuário codificado.	42
Figura 19: Sinal do usuário decodificado.....	43
Figura 20: Sinal do usuário incorretamente decodificado.....	43
Figura 21: Influência na adição de interferentes na BER, a) Diagrama de olho com 0 interferentes, b) Diagrama de olho com 3 interferentes e c) Diagrama de olho com 7 interferentes.	44

Figura 22: Teste de interferência na taxa de 0,5 Gbit/s.	45
Figura 23: Teste de interferência na taxa de 1 Gbit/s.	45
Figura 24: Teste de interferência na taxa de 10 Gbit/s.	46
Figura 25: Teste de interferência na taxa de 20 Gbit/s.	46
Figura 26: Teste de influência da largura temporal do chip.....	48
Figura 27: Teste de influência do NOLM.	50
Figura 28: Teste de influência do NOLM para tamanho de chip constante.....	51
Figura 29: Teste de influência da compensação.	52
Figura 30: Compensação da dispersão com uso de DCF.....	53
Figura 31: Teste da influência da compensação da atenuação e da MAI quando a dispersão é compensada.	54
Figura 32: Compensação de dispersão e atenuação, a) Diagrama de olho utilizando-se apenas DCF e b) Diagrama de olho utilizando-se DCF e amplificador.....	55

Lista de siglas

BER Bit Error Rate	Taxa de erro de bit
CDMA Code Division Multiple Access	Acesso múltiplo por divisão de código
DCF Dispersion Compensating Fiber	Fibra compensadora de dispersão
DFA Doped Fiber amplifier	Amplificador de fibra dopada
DSSS Direct Sequence Spectral Spreading	Espalhamento espectral por sequência direta
EDFA Erbium Doped Fiber Amplifier	Amplificador de fibra dopada com érbio
FDMA Frequency Division Multiple Access	Acesso múltiplo por divisão de frequência
GPS Global Positioning System	Sistema de posicionamento global
ISI Inter-Symbolic Interference	Interferência inter-simbólica
LASER Light Amplification by Stimulated of Radiation	Amplificação da luz por estimulação da radiação
LCD Liquid Crystal Device	Dispositivo de cristal líquido
LED Light Emitting Diode	Diodo emissor de luz
MAI Multiple Access Interference	Interferência de múltiplo acesso
NOLM Nonlinear Optical Loop Mirror	Espelho de loop óptico não linear
NRZ Not Return to Zero	Não retorna ao zero
OCDMA Optical Code Division Multiple Access	Acesso múltiplo por divisão de código óptico
ODL Networks of Optical Delay Lines	Redes de linhas de atraso óptico
OOC Optical Orthogonal Codes	Códigos ortogonais ópticos
OOK On-Off Keying	Chaveamento on-off
OFDM Orthogonal Frequency Division Multiplexing	Multiplexação por divisão de frequências ortogonais
PON Passive Optical Network	Redes ópticas passivas
QAM Quadrature Amplitude Modulation	Modulação de amplitude em quadratura
QPSK Quadrature Phase Shift Keying	Chaveamento por deslocamento de fase e quadratura
RZ Return to Zero	Retorna ao zero
SOA Semiconductor Optical Amplifier	Amplificador semiconductor óptico

SPECTS Spectral Phase-Encoded – Time Spreading	Codificação espectral de fase com espalhamento temporal
TS Time Spreading	Espalhamento temporal
TDMA Time Division Multiple Access	Acesso múltiplo por divisão de tempo

Sumário

1	Introdução	15
1.1	Objetivos	16
1.2	Organização do texto	17
2	Revisão teórica	18
2.1	Sistemas de múltiplo acesso	18
2.2	Sistemas OCDMA	19
2.2.1	Codificação de intensidade no domínio temporal	20
2.2.2	Codificação de intensidade espectral.....	22
2.2.3	Codificação de fase espectral (SPECTS).....	23
2.2.4	Codificação Temporal de fase (TS-OCDMA)	26
2.3	Outros conceitos importantes	27
2.3.1	Técnicas de codificação e modulação.....	27
2.3.1.1	Formatos de modulação digital	27
2.3.1.2	Códigos Wash-Hadamard	29
2.3.2	Técnicas de melhoramento do sinal.....	30
2.3.2.1	Remoção de MAI	30
2.3.2.2	Compensação de dispersão	30
2.4	Componentes ópticos	31
2.4.1	Fontes chaveadas de luz.....	31
2.4.2	Fotodetectores	31
2.4.3	Modulador Mach-Zehnder	32
2.4.4	Amplificadores	33
3	Metodologia	35
3.1	Implementação do transmissor	36
3.1.1	Geração do sinal	36
3.1.2	Modulação óptica	37
3.1.3	Codificador TS-OCDMA.....	37
3.2	Implementação do receptor TS-OCDMA	39
3.2.1	Decodificador TS-OCDMA	39
3.2.2	Tratamento e regeneração do sinal	40
4	Análises e resultados	41
4.1	Influência de interferentes.....	44
4.2	Influência da extensão do código e do período do chip.....	47

4.3	Influência do NOLM para sistema sem fibra	49
4.4	Influência da compensação e do comprimento do enlace.....	51
4.5	Influência da compensação da atenuação e da MAI quando a dispersão é compensada 54	
5	Conclusão geral.....	56
	Referências	57

1 Introdução

É evidente o crescimento no uso de sistemas de telecomunicações nas últimas décadas, sendo necessária a implementação de sistemas que possibilitem maiores taxas, maiores transmissões de dados e aproveitem melhor a largura de banda do canal, permitindo assim melhor escalabilidade ao sistema. Esta última pode ser visualizada em três dimensões: (i) quanto ao tamanho (quantidade de usuários e recursos que se pode adicionar ao sistema), (ii) distância geográfica e (iii) à facilidade de administração [1].

Nesse contexto, sistemas ópticos surgem como solução para aplicações que exigem alto tráfego de dados e alto grau de confiabilidade. Dentre eles destacam-se as tecnologias PON (*Passive Optical Network*), que são redes ópticas de múltiplo acesso caracterizadas por possuir elementos ativos apenas nas pontas da rede. Contudo, apesar de estas tecnologias terem contribuído bastante para resolver o problema de excesso de tráfego de dados nas redes das operadoras de telecomunicações, hoje estuda-se novas tecnologias que podem contribuir ainda mais para a melhora da rede. Dentre elas, encontram-se os sistemas OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) e OCDMA (*Optical Code Division Multiplexing Access*) [2]-[3]. Apesar de o sistema OFDM se mostrar bastante promissor, este trabalho investiga apenas o sistema OCDMA.

O sistema OCDMA é uma adaptação do sistema CDMA (*Code Division Multiple Access*) para o domínio óptico, em que se faz uso de técnicas de codificação para otimizar a banda disponível. O CDMA surgiu na segunda guerra mundial, com o objetivo de estabelecer comunicações seguras entre aliados, contudo, novos interesses surgiram sobre ele por volta da década de 1980, incentivando diversos estudos direcionados inicialmente para a rede de telefonia móvel. Essa nova tecnologia também foi usada no desenvolvimento do sistema de posicionamento (GPS), na indústria, na medicina e em diversas áreas da ciência [4]. A evolução dos processadores digitais de sinais, executando funções como codificação, regeneração, multiplexação, filtragem, entre outros [5]-[6] tornou viável a implementação prática desse sistema [7].

A adaptação do sistema CDMA para o domínio óptico foi sugerido por dois trabalhos na década de 80: Prucnal em 1986 [8] e Weiner em 1988 [9]. Weiner mostrou que pulsos ultracurtos e com grande largura espectral poderiam ser produzidos e manipulados, possibilitando que os estudos aplicados em comunicação por radiofrequência também pusessem

ser aplicados em sistemas de comunicações ópticas. Diferentemente de Weiner, Prucnal havia mostrado que os mecanismos de codificação e de decodificação dos dados poderiam funcionar em “redes totalmente ópticas” (sem a utilização de processos eletrônicos), possibilitando que os processos acontecessem na velocidade da luz e, desta forma, proporcione uma alta taxa de transmissão de dados [10].

O estudo dos dois trabalhos [8] [9] também possibilitou a divisão das configurações de sistemas OCDMA. Em termos da natureza da sobreposição do sinal óptico, eles podem ser divididos em sistemas coerentes e incoerentes. Sistemas coerentes se baseiam nas propriedades coerentes da luz e utilizam codificação bipolar no sinal óptico, ou seja, um dado é aplicado geralmente via codificação de fase do sinal óptico. Os sistemas incoerentes por sua vez utilizam a presença ou ausência de luz incoerente, como os LED's (*Light Emitting Diode*), para representar símbolos (1 e 0), caracterizando uma codificação unipolar [10]. Com o desenvolvimento de novos dispositivos de codificação e decodificação, os sistemas coerentes se tornaram a tecnologia mais viável para implementação de sistemas OCDMA [11].

Dependendo da maneira de como a codificação de fase é dada ao sinal óptico, tem-se diferentes classificações para os sistemas OCDMA coerentes. Se a alteração da fase óptica é dada no domínio do tempo, temos uma codificação temporal de fase (TS-OCDMA). Caso a codificação seja dada no domínio da frequência, temos uma codificação espectral de fase (SPECTS-OCDMA) [10]. Levando em consideração o sistema TS-OCDMA, o número de usuários, o comprimento da fibra de enlace, o tipo de modulação a ser utilizado, o uso de amplificadores, os tipos de fotodetectores e moduladores, dentre outros, são parâmetros importantes que podem alterar o funcionamento deste sistema, e, portanto, merecedores de estudo.

1.1 Objetivos

Este trabalho tem por objetivo estudar a escalabilidade de redes ópticas coerentes baseadas na tecnologia de acesso múltiplo por divisão de código (OCDMA), modeladas e desenvolvidas em software. Em particular, é dada ênfase à codificação temporal de fase (TS), com o intuito no desenvolvimento de um sistema OCDMA que tenha um bom desempenho e que com isso permita o acesso assíncrono dos usuários à rede. Serão investigados parâmetros de taxa de transmissão, número de usuários, extensão do código, comprimento do enlace, uso de amplificadores, dispositivos de rejeição de MAI (*Multiple Access Interference*), entre outros

que influenciam o desempenho do sistema. Isso permite que políticas de otimização de desempenho sejam sugeridas, tais como técnicas de correção de erros e de seleção ótima do conjunto de códigos.

1.2 Organização do texto

Para que um trabalho seja bem compreendido é importante que ele esteja organizado de forma adequada. Este trabalho foi organizado e dividido em algumas seções, que são: Introdução, Revisão teórica, Metodologia, Análises e resultados e Conclusão geral.

A seção de Introdução, é utilizada para situar o leitor ao ambiente do trabalho, bem como apontar algumas motivações e objetivos.

A seção de Revisão teórica, é utilizada para preparar o leitor para que este possa compreender os termos técnicos e científicos do trabalho. Nesta parte é dada uma breve explicação sobre o funcionamento de um sistema OCDMA, bem como suas variações. Também é abordado alguns outros conceitos importantes de comunicações ópticas.

Na Metodologia é detalhado os métodos utilizados para implementar o sistema TS-OCDMA, explicando em partes o funcionamento do sistema implementado. Também são feitas algumas observações sobre detalhes de configurações do sistema implementado.

A seção de Análises e resultados apresenta todos os resultados obtidos através das simulações. Todos os resultados coletados são analisados e avaliados nesta seção, afim de obter as conclusões necessárias para fundamentar o trabalho.

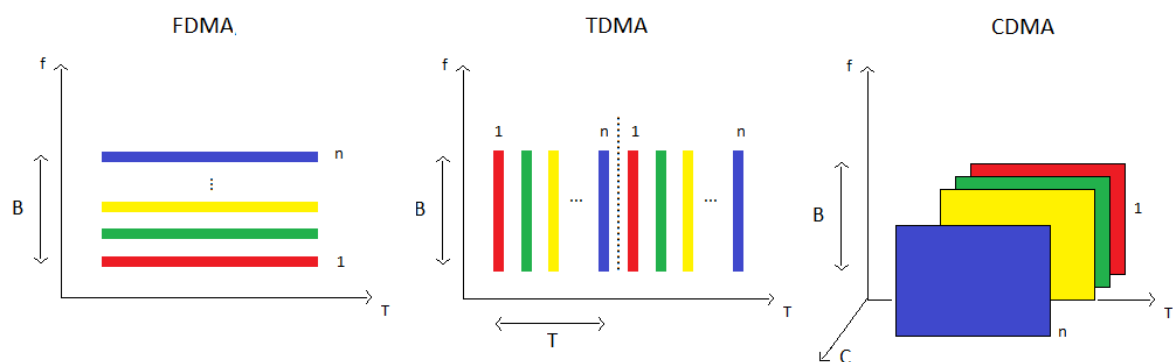
A seção de Conclusão geral é a última do trabalho. Basicamente ela apresenta um resumo das conclusões obtidas, de forma que o leitor possa ter um aparato geral sobre as conclusões do trabalho.

2 Revisão teórica

2.1 Sistemas de múltiplo acesso

O Sistema CDMA surgiu como alternativa para aplicações que possuem janelas de tempo e espectro limitadas para alocar o seu grande número de usuários. Algumas dessas aplicações se deram em sistemas de comunicações móveis, onde esse sistema foi implementado comercialmente [4]. Outros sistemas que são comumente utilizados em comunicações móveis são os sistemas FDMA (Acesso Múltiplo por Divisão de Frequência) e TDMA (Acesso Múltiplo por Divisão de Tempo). Como pode ser visto na Figura 1, o FDMA divide a banda disponível entre os usuários de forma que cada usuário transmita a todo tempo, porém utilizando apenas parte da banda atribuída a ele; já no TDMA o usuário pode utilizar toda a banda disponível, contudo, cada usuário pode transmitir apenas no tempo atribuído a ele, por último, o CDMA permite que o usuário utilize toda a banda disponível a todo tempo, para isso, ele atribui a cada usuário um código ortogonal que permite que ele seja diferenciado dos demais [7]. A ortogonalidade do código utilizado é o que permite que o sinal de um usuário não interfira no sinal de outro usuário [10].

Figura 1: Representação das técnicas de múltiplo acesso a) FDMA b) TDMA e c) CDMA nas dimensões de tempo e frequência [5].



Fonte: Adaptado de [5].

Analisando a Figura 1, percebe-se que o sistema CDMA teoricamente apresenta uma maior eficiência na transmissão de dados do que os sistemas FDMA e TDMA, contudo, ele apresenta algumas limitações impostas por diversos efeitos que podem degradar o sinal, como

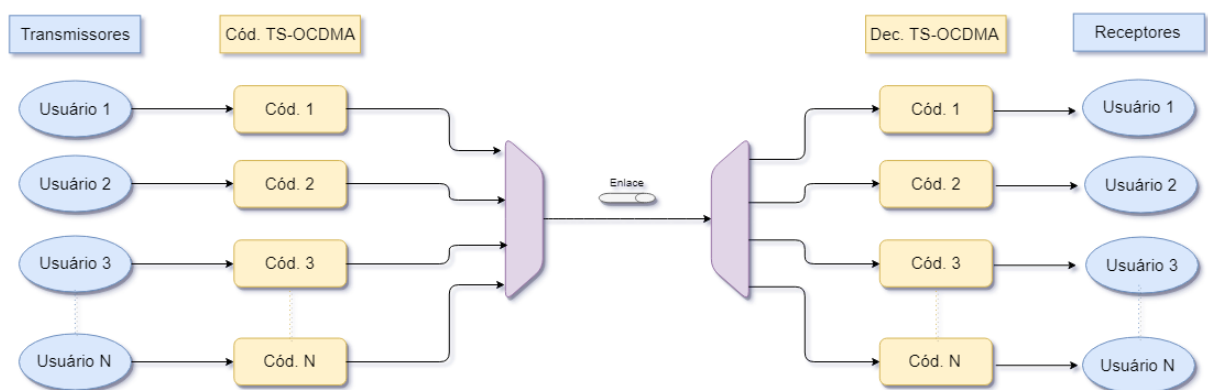
a MAI. Esses efeitos ocorrem geralmente devido a algumas particularidades dos códigos utilizados, quando a ortogonalidade pode não ser perfeita como desejado [10].

2.2 Sistemas OCDMA

Os sistemas ópticos, diferentemente dos sistemas móveis, proporcionam altas taxa de dados e possuem imunidade a interferências eletromagnéticas. Por outro lado, o sistema CDMA possibilita acessos simultâneos e flexíveis com baixa degradação, principalmente com a utilização de códigos mais otimizados. Essas características e os diversos estudos realizados sobre a técnica CDMA, possibilitaram que o sistema OCDMA pudesse ser desenvolvido [7] [9]. Para diversas aplicações comerciais e residenciais, onde é necessária uma grande taxa de dados para realização das atividades requeridas, esse sistema se tornou ideal, devido às suas características de transmissão.

Em geral, os sistemas OCDMA apresentam a configuração da Figura 2, onde codificadores passivos são utilizados para permitir que os sinais de múltiplos usuários sejam combinados em um mesmo enlace de fibra óptica, utilizando a mesma banda de transmissão, e decodificadores passivos permitem que o sinal seja recuperado de forma eficiente.

Figura 2: Sistema OCDMA.



Contudo, como citado, os sistemas OCDMA possuem algumas variações que podem ser classificadas em incoerentes e coerentes [8] [9]. Os sistemas incoerentes realizam codificações de intensidade e os coerentes utilizam as propriedades coerentes da luz e a codificação bipolar (aplicado geralmente via codificação de fase do sinal óptico) [10].

Os sistemas incoerentes são basicamente:

- Codificação de intensidade no domínio temporal (não-coerente);
- Codificação de intensidade espectral (não-coerente)

Os sistemas coerentes são basicamente:

- Codificação de fase espectral (SPECTS)
- Codificação de fase temporal (TS-OCDMA)

A seguir, cada um desses esquemas é descrito com mais detalhes.

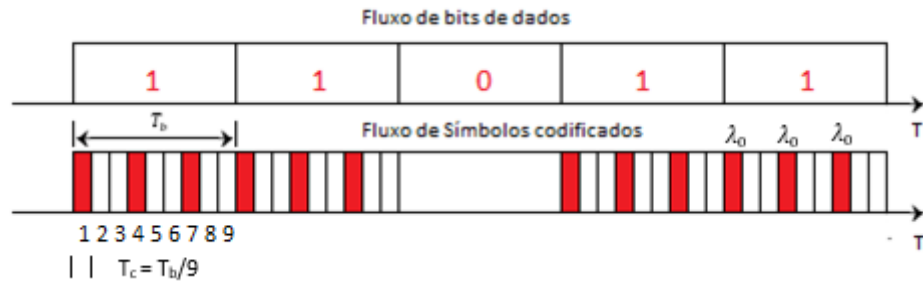
2.2.1 Codificação de intensidade no domínio temporal

Nesse sistema com codificação de intensidade no domínio temporal, similarmente aos demais sistemas OCDMA, os bits são codificados em uma forma de onda que corresponde à sequência de assinatura do código. Cada receptor correlaciona a máscara do seu código com o sinal enviado mostrando o grau de similaridade entre o sinal e a máscara.

Os algoritmos de codificação buscam aumentar a autocorrelação e diminuir a correlação cruzada entre os códigos, dessa forma o máximo de ortogonalidade e cardinalidade (quantidade de códigos disponíveis) são extraídos. Diversos algoritmos de codificação temporal foram desenvolvidos afim de melhorar a eficiência do sistema. Dentre eles destacam-se os algoritmos por códigos de sequências primas e algoritmos por códigos ortogonais ópticos (OOC) [7].

A Figura 3 mostra como esse processo de codificação acontece, ou seja, um intervalo de tempo t_b , que corresponde ao tempo de um pulso, é representado por uma sequência de pulsos ópticos denominados *chips* de intervalos t_c e comprimento de onda λ_0 . A quantidade de *chips* iluminados dentro de uma sequência de intervalo t_b , denominada w , depende do algoritmo de formação do código. Como são necessários vários pulsos para representar um símbolo, é normal que ocorra um espalhamento espectral por sequência direta (DSSS), pois a largura de faixa necessária para transmissão da mesma informação aumentou [7].

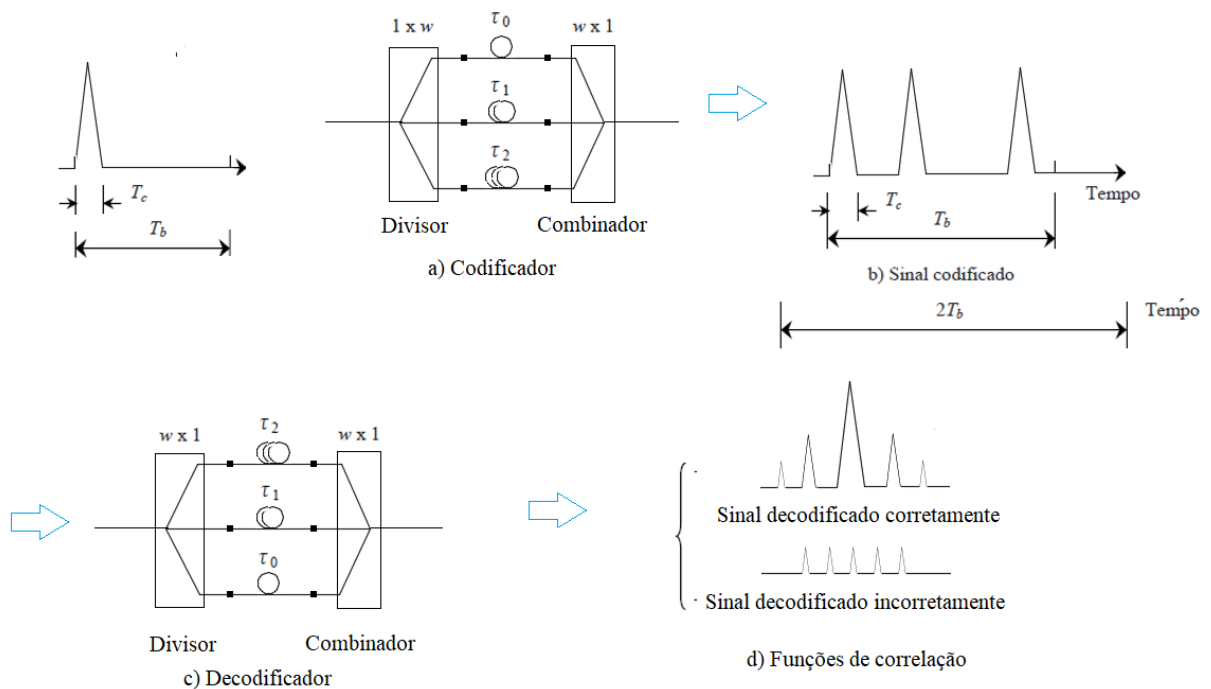
Figura 3: Fluxo de bits em codificação temporal com base no esquema DSSS [7].



Fonte: Adaptado de [7].

Inicialmente, utilizavam-se redes de linhas de atraso óptico (ODL) para realizar a alocação temporal de pulsos, como pode ser visto na Figura 4. Basicamente, um pulso óptico com valor de pico alto e tempo de pulso t_c mais curto que t_b do usuário, ao passar pelo codificador é fragmentado em uma sequência de pulso menores, proporcionais à ponderação w do código. Outras sequências correspondentes a outros usuários são multiplexadas em um acoplador em estrela. No receptor é usado um conjunto de linhas de atraso da mesma forma que é usado no transmissor, reconstruindo o pulso estreito por meio de elementos de atraso conjugados. Em uma última etapa o sinal passa por um processo de correlação de intensidade. O sinal inalterado irá recuperar os pulsos de forma distinguível, caso contrário os pulsos recuperados serão indistinguíveis [7].

Figura 4: Codificação no domínio do tempo utilizando ODL [7].

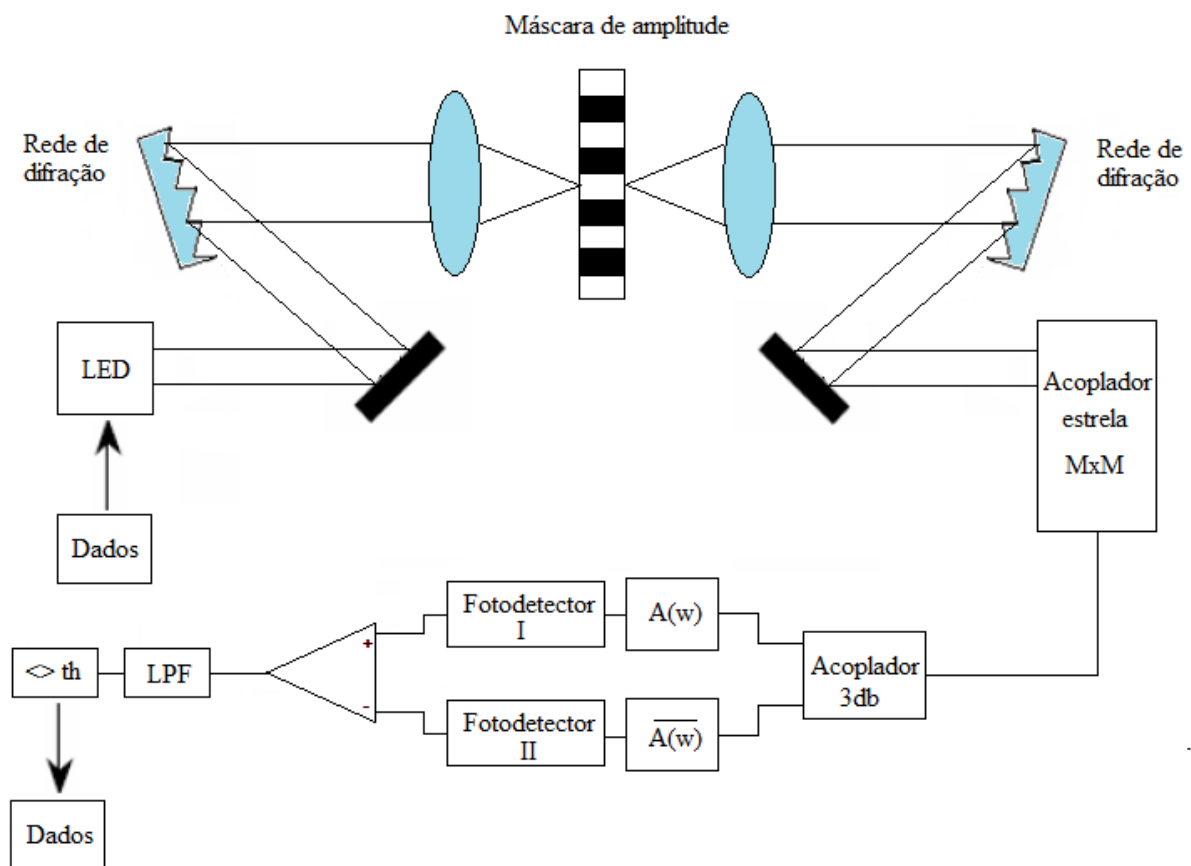


Fonte: Adaptada de [7].

2.2.2 Codificação de intensidade espectral

Nesse sistema, a largura de faixa do sinal não depende da largura de faixa da fonte (pode ser um LED não coerente), tornando a informação a ser transmitida independente dos parâmetros que definem esses códigos. A Figura 5 exemplifica esse processo. Diferentemente da codificação de fase coerente, nesse processo as componentes espectrais da fonte óptica de faixa larga são inicialmente resolvidas. Para cada canal é usado um codificador de amplitude espectral próprio, com o objetivo de bloquear ou transmitir componentes de frequências específicas [7].

Figura 5: Sistema de codificação de intensidade espectral (não-coerente) [7].



Fonte: Adaptado de [7].

No receptor, o sinal recebido é filtrado com o mesmo filtro $A(w)$ de amplitude espectral do transmissor e seu filtro $\bar{A}(w)$ complementar. Na sequência, as saídas dos filtros são conectadas em dois fotodetectores, de forma a balancear a saída. Quando o transmissor está descasado, as componentes espectrais transmitidas se dividem entre os dois filtros. Basicamente

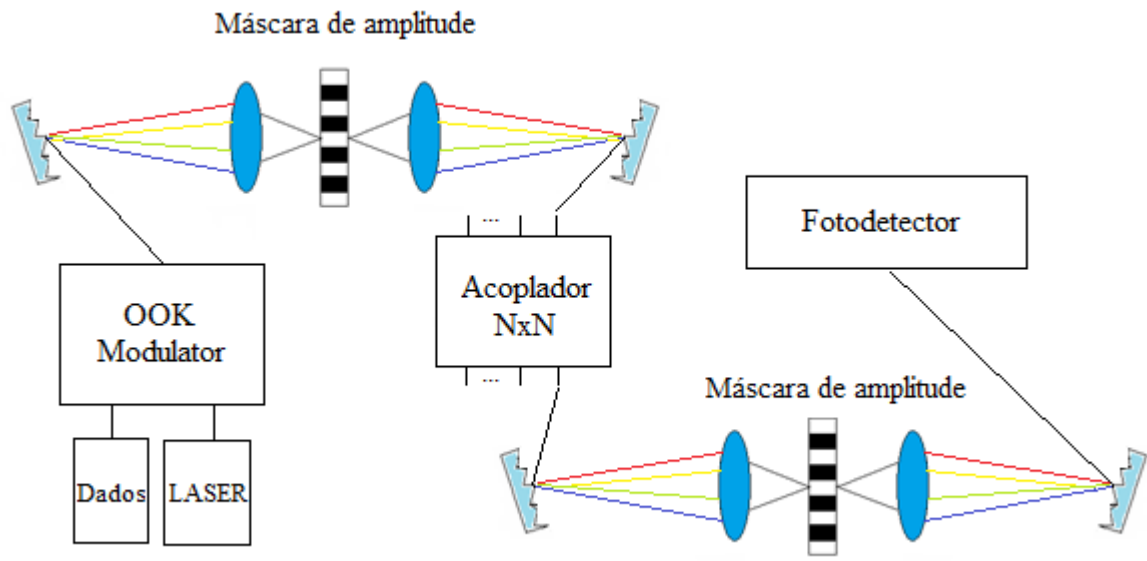
o receptor realiza a diferença entre a saída dos dois fotodetectores, nesse processo os sinais descasados são cancelados e os sinais casados são demodulados de acordo com seu tipo de modulação [7].

O número de usuários disponíveis para esse sistema depende do número de faixas do espectro do LED. Como o LED não apresenta um espectro plano, podendo apresentar formas gaussianas por exemplo, alguns usuários podem ser vistos com valores diferentes, de acordo com sua posição no espectro. Esse fenômeno pode acarretar em perda de ortogonalidade entre os usuários, por isso, foram desenvolvidas três técnicas para resolver esse problema. A primeira é o uso de um modulador espacial de luz programável, com dispositivos de cristal líquido (LCD) [13] de modo a obter amplitude de transmissão não binária. A segunda técnica equaliza o espectro do LED utilizando filtros ou moduladores acústicos-ópticos [14]. A terceira técnica consiste em reduzir o comprimento da faixa de frequência total para a região mais plana do espectro [15].

2.2.3 Codificação de fase espectral (SPECTS)

Este tipo de codificação utiliza pulsos de luz ultracurtos de fonte coerente para modular a fase das componentes espectrais, pois quanto mais curto for o pulso temporal, maior será a faixa espectral em que ele se estenderá. Salehi e seus colaboradores propuseram a utilização de máscaras de fase que codificam os dados a serem transmitidos [16]-[17]. A aplicação das máscaras é ilustrada na Figura 6.

Figura 6: Esquema proposto para CDMA óptico baseado em codificação espectral e decodificação de pulsos ultracurtos de luz [16].



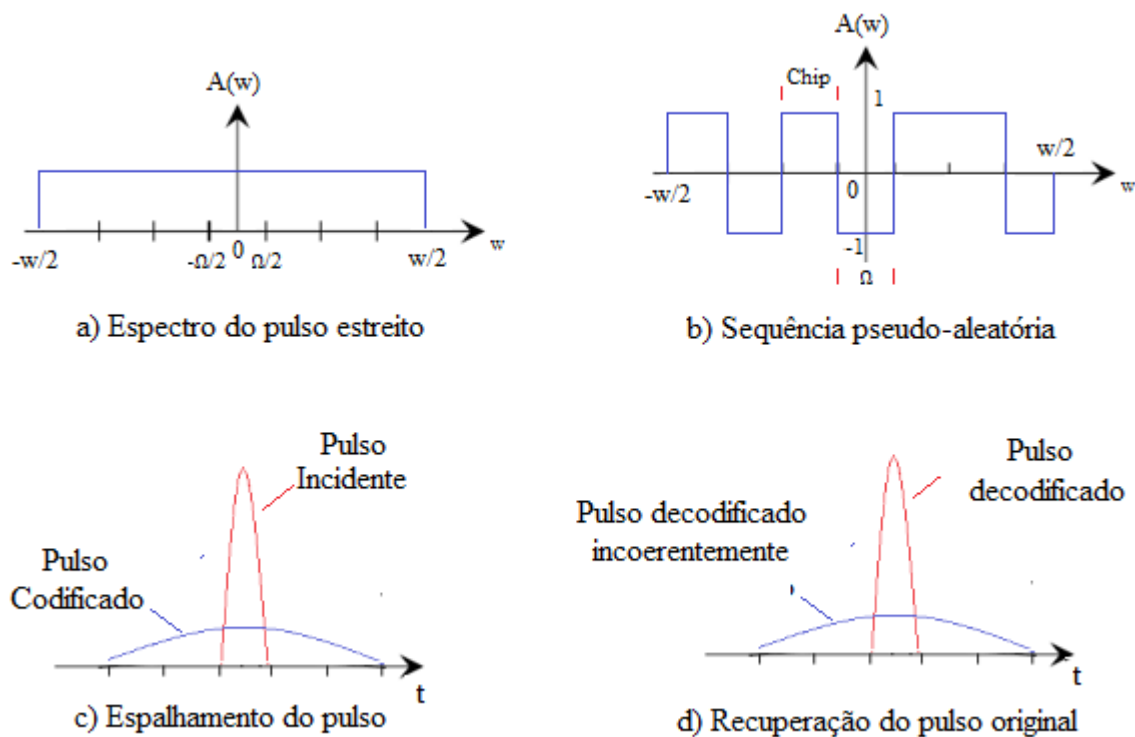
Fonte: Adaptado de [17].

Cada bit de informação eletrônica modula diretamente um LASER (*Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) *mode-locked* que produzirá um pulso de luz muito estreito. A largura do pulso óptico é da ordem de alguns pico-segundos (ou mesmo femto-segundos). Os pulsos ultracurtos passam então por um codificador que consiste em duas redes de difração, um par de lentes e uma máscara de fase (Figura 6). A primeira grade decompõe espacialmente a componente espectral que constitui o pulso de entrada ultracurto. Uma máscara de fase padronizada de forma pseudoaleatória espacialmente é inserida no meio do caminho entre as lentes no ponto em que os componentes espectrais ópticos experimentam a separação espacial máxima. Assim, a máscara introduz desvios de fase pseudoaleatórios entre as diferentes componentes espectrais. Esta mudança de fase aleatória representa o código de um determinado usuário [16].

Depois da máscara de fase as componentes espectrais são remontadas pela segunda lente e segunda grade em um único feixe óptico. Depois de sair da grade e do aparelho de lente, o perfil temporal do pulso codificado é dado pela transformada de Fourier do padrão transferido pela máscara para o espectro. Uma máscara de fase transforma os pulsos pseudoaleatórios ultracurtos incidentes em um ruído de baixa intensidade [16].

Nesta rede, cada transmissor tem uma máscara de fase distinta e transmite os seus pulsos codificados para todos aqueles receptores que partilham o mesmo canal óptico [7]-[16]. Isso pode ser visto na Figura 7.

Figura 7: Forma de onda no domínio do tempo e frequência para um sistema codificado em fase espectral coerente: a) Espectro do pulso estreito; b) sequência pseudoaleatória (PN) no domínio da frequência, cuja multiplicação por $(-1,1)$ em amplitude, neste domínio, corresponde ao deslocamento de fase $(0, \pi)$ no tempo; c) pulso espalhado, codificado em fase; d) Recuperação correta e incorreta do pulso [5][7].



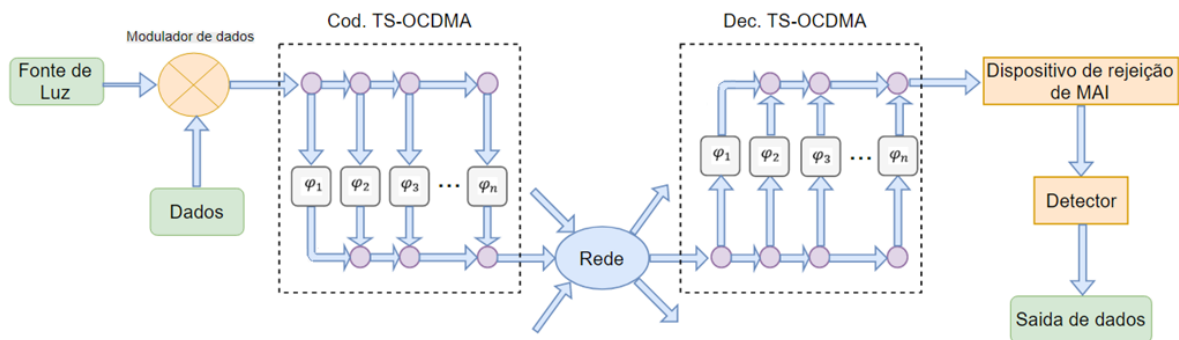
Fonte: Adaptado de [5][7].

O receptor é constituído por um decodificador semelhante e um dispositivo de limiar. A unidade de decodificação tem uma máscara de fase que é o conjugado da máscara utilizada para a codificação. Assim, um pulso é corretamente decodificado quando a codificação e decodificação de máscaras formam um par conjugado complexo. Neste caso, os deslocamentos de fase espectrais são removidos e o impulso inicial ultracurto é reconstruído [7]-[16]. Por outro lado, quando a codificação e decodificação das máscaras não coincidirem, os desvios de fase são rearranjados, mas não removidos, e o pulso na saída do decodificador permanece com uma baixa intensidade de ruído [7]-[16].

2.2.4 Codificação Temporal de fase (TS-OCDMA)

Esse sistema faz uso das propriedades de coerência da luz para manipular a fase óptica no domínio do tempo e assim realizar a codificação, contudo ele caracteriza-se por necessitar de fontes de luzes que produzem pulsos ultracurtos, podendo ser *LASER Mode-locked* [10]. A Figura 8 demonstra o diagrama de blocos para este sistema:

Figura 8: Diagrama de blocos de um sistema OCDMA com codificação de fase temporal [10].



Fonte: Adaptado de [10].

Primeiramente os dados são modulados no domínio elétrico, utilizando-se codificadores OOK (*On-Off Keying*), QPSK (*Binary Phase Shift Keying*) ou outro. Depois essa informação é modulada no domínio óptico utilizando-se um modulador óptico (pode ser um Mach-Zehnder, por exemplo). Já no domínio óptico, o sinal passa por um codificador temporal de fase, que é uma rede de linha de atraso tempo-fase onde um pulso de um sinal é dividido em N cópias criadas a partir do tamanho da janela de pulso disponível e o tamanho do código utilizado. Ou seja, um pulso simples passa agora a ser representado por N pulsos atrasados e defasados de tal forma a ocupar o tempo de uma janela temporal e obedecer às características do código do usuário. O tamanho da janela de pulso é definido pela taxa de transmissão na qual se deseja transmitir [10].

Após a codificação temporal de fase, os sinais de vários usuários são combinados em uma mesma rede, ou enlace. Pela Figura 8, percebe-se que no lado do receptor, cada usuário possui um decodificador que conhece o código ao qual o sinal de interesse foi codificado, de forma que esse sinal possa ser recuperado por meio do sinal combinado [10].

O processo de recuperação consiste na correlação do sinal combinado com o conjugado do código de codificação. O decodificador desloca novamente o sinal temporalmente e atribui um atraso de fase conjugado a cada pulso criado. Dessa forma, o sinal desejado é identificado

pelo forte pico de auto-correlação que é observado na saída. Os demais sinais combinados apresentam um fraco pico de auto-correlação, de forma que são identificados como ruídos. Para eliminar esses ruídos é necessário utilizar técnicas de remoção de MAI [10]. O último passo é realizar a conversão do sinal no domínio óptico para o domínio elétrico, para isso são utilizados fotodetectores e filtros.

2.3 Outros conceitos importantes

Afim de esclarecer algumas questões acerca do funcionamento desse sistema, alguns conceitos devem ser entendidos. Dentre esses conceitos apresentados nesta seção estão as técnicas de codificação e modulação, técnicas de melhoramento do sinal e definições relevantes acerca de diversos componentes ópticos usados neste trabalho.

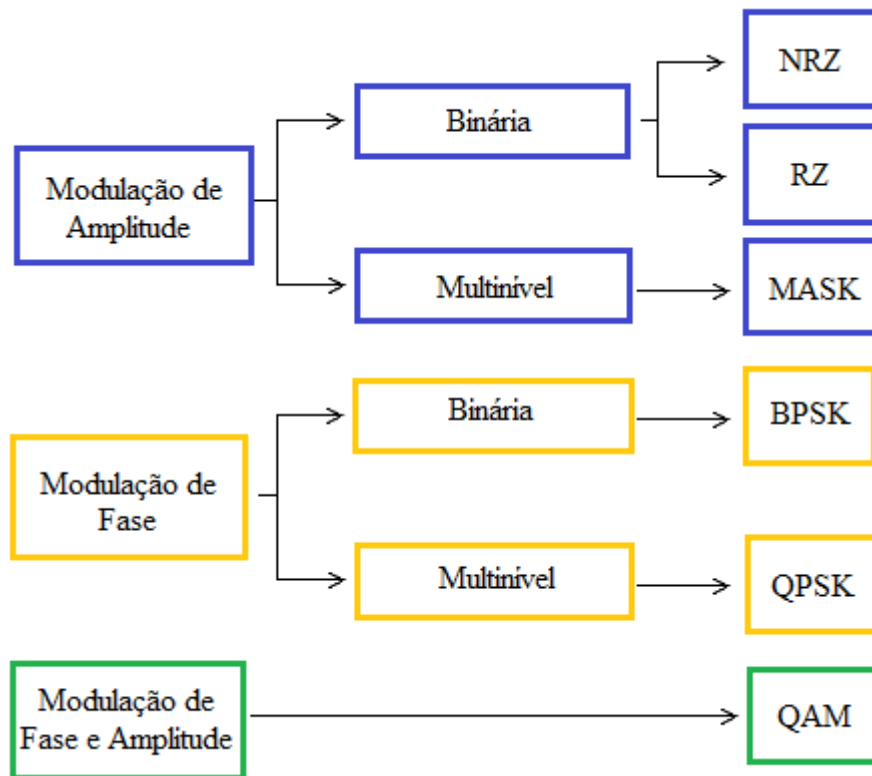
2.3.1 Técnicas de codificação e modulação

A codificação e a modulação são recursos bastante úteis em sistemas de telecomunicações. A seguir são apresentados alguns conceitos importantes relacionados aos processos de codificação e modulação utilizados neste trabalho.

2.3.1.1 Formatos de modulação digital

Um sinal digital é formado por pulsos de tensão ou corrente que representam símbolos digitais. Esse sinal pode ser transmitido em uma portadora ou pode ser transmitido em banda base, ou seja, em sua frequência original [20] [21]. Os formatos de modulação determinam como os pulsos são criados e dispostos, sendo basicamente divididos em modulação de amplitude e modulação de fase [20]. A Figura 9 mostra alguns dos formatos de modulação mais utilizados.

Figura 9: Tipos de modulações.

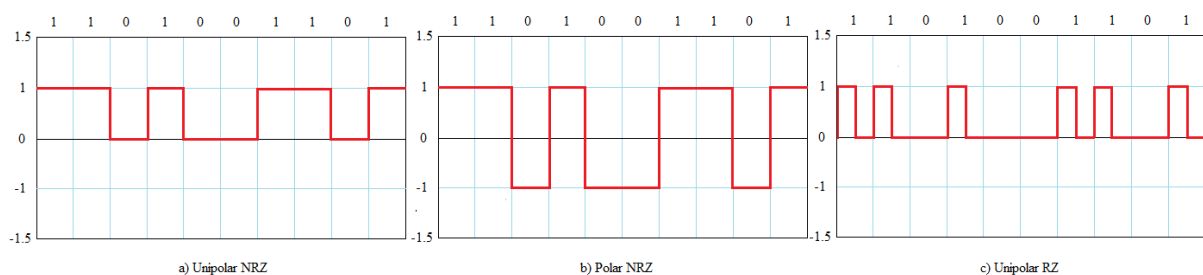


Fonte: Adaptado de [21].

O sinal em banda base também pode ser classificado em termos de polarização e largura de pulso. Em termos de polarização, o sinal pode ser polar ou unipolar, onde o sinal polar varia entre $+1$ e -1 e o unipolar varia entre 0 e $+1$ (ou 0 e -1) [21].

Em termos de largura de pulso o sinal pode ser NRZ (não retorna ao zero) ou RZ (retorna ao zero). Enquanto no formato NRZ o sinal utiliza todo tempo de pulso para representar o símbolo, no formato RZ o sinal retorna ao 0 antes de terminar seu tempo de pulso. A Figura 10 exemplifica esse fato. Os sinais RZ e NRZ unipolar são denominados OOK, pois utilizam a presença e ausência de pulso para representar um símbolo por vez [18].

Figura 10: Formas de onda dos formatos, a) Unipolar NRZ, b) Polar NRZ e c) Unipolar RZ.



Fonte: Adaptado de [21].

Os formatos de modulação BPSK e QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*) utilizam a variação de fase do sinal para representar símbolos. Já o QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*) utiliza além da variação de fase a variação de amplitude para representar símbolos. Apesar de serem mais eficientes na transmissão de informação, essas codificações possuem limitações que inviabilizam seu uso. Geralmente eles são mais sensíveis a presença de interferentes e necessitam de componentes mais complexos para a geração do sinal [20].

Os sinais RZ e NRZ modulados em amplitude se tornam extremamente interessantes para sistemas de comunicações ópticas, devido à sua simplicidade na geração e no tratamento do sinal. Contudo, é fato que não são codificações muito eficientes, pois necessitam de um ciclo inteiro para representar um símbolo [20].

2.3.1.2 Códigos Wash-Hadamard

Uma parte muito importante de um processo de codificação é o código utilizado. Existem diversos conjuntos de códigos desenvolvidos para cada tipo de aplicação, e nesse sistema será utilizado os códigos Wash-Hadamard para implementar o codificador óptico, por se tratar de um conjunto de códigos eficiente e simples de se implementar.

Os códigos Wash-hadamard são códigos ortogonais definidos pela Equação 1 [8]:

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

Como pode ser observado na Equação 1, o próximo conjunto de códigos de ordem maior $H(k+1)$ é definido recursivamente utilizando-se o conjunto de códigos de ordem menor $H(k)$. Essa matriz é composta apenas por ± 1 , onde $+1$ representa deslocamento de fase 0 e -1 representa deslocamento de fase de π . Cada linha dessa matriz corresponde a um código que pode ser utilizado por um usuário [7].

Os códigos Hadamard são teoricamente ortogonais, mas na prática essa ortogonalidade nem sempre é perfeita. Em [8] é mostrado o efeito da interferência entre os usuários utilizando-se esses códigos e pode-se perceber que o sinal de um usuário interfere destrutivamente no sinal de outros usuários, apesar da ortogonalidade do mesmo. Em [8] também é mostrado que alguns conjuntos de códigos chamados de conjuntos ótimos possuem melhor eficiência quando utilizados, possibilitando que o sistema comporte um maior número de usuários.

2.3.2 Técnicas de melhoramento do sinal

Em um sistema de telecomunicações o sinal está sempre sujeito a processos que deterioram o sinal, portanto é importante adotar técnicas de melhoramento do sinal para garantir a qualidade e a eficiência da transmissão. Dentre essas técnicas se destacam as técnicas de rejeição de MAI e de compensação de dispersão cromática.

2.3.2.1 Remoção de MAI

Sistemas ópticos são conhecidos por não sofrerem interferências eletromagnéticas externas, contudo, como todo sistema, eles possuem seus próprios problemas. Um dos problemas mais comuns nos sistemas ópticos é a MAI, que ocorre quando sinais de diferentes usuários interferem um no outro [8]. Diversos métodos de correção de MAI são estudados e aplicados em diferentes sistemas de comunicações ópticas. Este trabalho estuda o uso do NOLM (*Nonlinear Optical Loop Mirror*) como método de correção de MAI, pois se trata de um sistema simples e eficiente.

Basicamente o NOLM usa um sinal de referência para eliminar as partes indesejáveis do sinal, como um “recorte” temporal do sinal óptico, realizado a uma determinada frequência equivalente à taxa de transmissão de bits. Dessa forma os sinais interferentes provenientes de processos de espalhamento e interferência de MAI podem ser eliminados e dependendo da largura do recorte, a eficiência pode ser otimizada [8].

2.3.2.2 Compensação de dispersão

Um dos grandes problemas evidenciados nos sistemas de comunicações ópticos é a dispersão cromática que ocorre nas fibras ópticas. Essa dispersão pode se acumular ao longo do enlace e deteriorar o sinal significativamente, portanto, para evitar isso, foram desenvolvidos diversos métodos de compensação [18].

O método abordado neste trabalho é a inserção de uma fibra compensadora de dispersão (DCF), que corrige no próprio enlace essa dispersão. Basicamente, essa fibra possui um parâmetro de dispersão oposto ao da dispersão acumulado no enlace de transmissão, dessa forma a dispersão acumulada é anulada [18]. De acordo com Keiser, o comprimento da DCF deverá ser tão curto quanto possível, uma vez que a fibra especial usada tem uma perda maior

do que a fibra de transmissão [18]. Portanto o comprimento ideal da DCF pode ser calculado pela seguinte equação:

$$L_{DCF} = \left| \frac{D_{TX}}{D_{DCF}} \right| \times L \quad [18] \quad (2)$$

Na qual L é o comprimento operacional da fibra; D_{TX} é a dispersão operacional; e D_{DCF} , a dispersão da DCF.

2.4 Componentes ópticos

Como se trata de um sistema de comunicações ópticas, o estudo dos componentes ópticos básicos do sistema se torna relevante. A seguir, esses componentes são brevemente apresentados, mostrando suas características mais relevantes.

2.4.1 Fontes chaveadas de luz

O LASER e o LED são as principais tecnologias utilizadas nos sistemas de comunicações ópticas como fonte chaveada de luz. A constituição das duas tecnologias baseia-se no comportamento das emissões espontâneas e estimuladas de um material do tipo PN ou similar. O LED utiliza uma combinação de heteroestruturas que confinam a emissão de luz em uma região de interesse, enquanto o LASER utiliza uma cavidade ressonante que proporciona ganho aos fótons de luz gerados por meio de uma emissão estimulada, gerando uma luz monocromática e bastante direcional [18].

O LASER possui particularidades que o torna mais atrativo perante ao LED, como [18]:

- Alto grau de Monocromaticidade;
- Alto grau de Coerência;
- Alto grau de Direcionalidade;
- Alto brilho.

2.4.2 Fotodetectores

Os fotodetectores possuem a finalidade de converter sinais ópticos em sinais elétricos fazendo uso das propriedades ópticas e elétricas. Essas propriedades são determinadas pelas estruturas de bandas de energia do material e pela ocupação destas bandas por elétrons [18]. Os

fotodetectores baseados em semicondutores são os mais utilizados, pois possuem características interessantes, como [18]:

- Alta sensibilidade;
- Resposta rápida;
- Baixo ruído;
- Baixo custo;
- Alta confiabilidade.

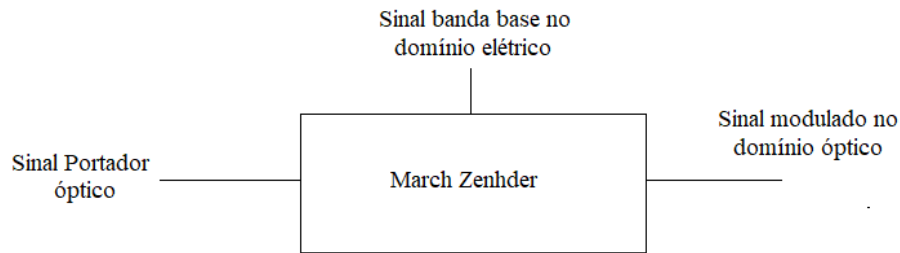
Os fotodetectores são construídos com intuito de criar uma região fotossensível que proporciona o efeito de absorção de fótons, de forma semelhante aos efeitos de emissão estimulada e espontânea. O efeito de absorção ocorre quando um fóton incide sobre uma camada sensível e proporciona a movimentação de um elétron entre níveis inferior e superior de energia, gerando uma movimentação elétrica [18].

Os dois tipos de fotodetectores semicondutores mais utilizados em sistema de comunicações ópticas são o PIN e o APD. O fotodetector PIN possui uma camada intrínseca (I) entre as camadas P e N, que proporciona um aumento na região de depleção com intuito de aumentar o processo de absorção e, portanto, sua eficiência. Já o fotodetector APD é um PIN com mais uma camada adicionada entre as camadas P e I que provoca um efeito avalanche de elétrons. Essa avalanche provoca um ganho interno, contudo, também provoca ruídos [18].

2.4.3 Modulador Mach-Zehnder

O modulador Mach-Zehnder é um modulador óptico criado a partir de um interferômetro Mach-Zehnder. Este é um acoplador óptico que acopla o sinal em banda base, ainda no domínio elétrico em uma portadora óptica, gerando um sinal modulado no domínio óptico [17].

Figura 11: Esquema de um modulador Mach-Zehnder



O interferômetro Mach-Zehnder é construído de forma que os sinais combinados irão interferir de forma construtiva em uma saída e de modo destrutivo na outra, de forma que os sinais combinados saiam em apenas uma saída. Apesar de o interferômetro Mach-Zehnder ser utilizado geralmente em domínio óptico, ele também pode ser utilizado para modular sinais elétricos em ópticos [18].

2.4.4 Amplificadores

Devido as perdas de potência provenientes dos diversos processos ao qual o sinal é submetido no sistema, é notória a necessidade de amplificar esse sinal. Para isso foram desenvolvidos diversos tipos de amplificadores, com diferentes características [16]. Geralmente os amplificadores ópticos utilizam processos de emissão estimulada ou processos de transferência óptica. Os SOAs (*Semiconductor Optical Amplifiers*) e DFAs (*Doped fiber amplifiers*) necessitam de um mecanismo de inversão de população para que a emissão estimulada ocorra. Basicamente o dispositivo absorve energia fornecida por uma fonte externa por meio de um bombeio para intensificar os fótons da luz do sinal [18].

Os DFAs utilizam bombeio óptico para promover a emissão estimulada, enquanto que os SOAs utilizam de bombeio elétrico para promover a emissão estimulada. Os SOAs, da mesma forma que nos LASERs possuem uma cavidade ressonante aonde a injeção de corrente externa provoca a inversão de população necessária para provocar a emissão estimulada e assim atribuir ganho ao sinal [18].

Os DFAs são formados por uma fibra óptica dopada com um elemento químico, de forma que o processo de inversão de população é facilitado quando uma luz de bombeio é injetada na fibra, provocando a emissão estimulada que se prolonga pelo comprimento da fibra dopada. Dentre os DFAs, o EDFA (*Erbium Doped Fiber Amplifier*) se destaca por ser um

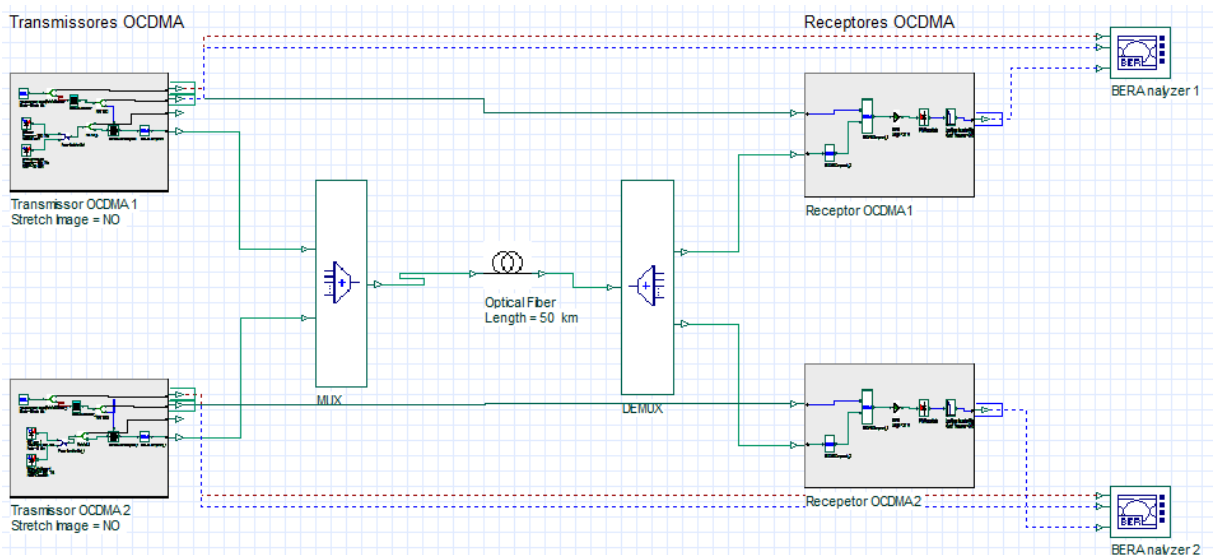
amplificador bastante eficiente para aplicações de longas distâncias. Sua dopagem é realizada com o elemento érbio e sua faixa de operação geralmente está limitada à região de 1530-1565 nm [18].

O amplificador Raman, por sua vez, utiliza a transferência da potência óptica do comprimento de onda de bombeio de alta potência para sinais luminosos em comprimentos de onda maiores. Ou seja, sinais transmitidos em outros comprimentos de onda, que devido ao efeito não-linear de Espalhamento Raman, transferem sua energia para o sinal de interesse [18]. Cada tipo de amplificador descrito acima possui suas particularidades, de forma que cada um seja ideal para certos tipos de aplicação.

3 Metodologia

Uma rede OCDMA básica é dotada dos processos de modulação, codificação, transmissão e recepção. Dependendo do tipo de técnica de codificação a ser utilizada o sistema sofre variações, neste estudo é abordada a arquitetura de uma rede TS-OCDMA. O sistema TS-OCDMA implementado possui configuração bastante simples, como pode ser observado na Figura 12. O sinal óptico modulado no transmissor é multiplexado com o sinal dos demais usuários, logo após é transmitido na fibra de enlace que pode ou não ter ou não dispositivos de compensação. No outro lado da rede, um receptor semelhante ao transmissor recebe o sinal unificado, decodifica o sinal óptico de cada usuário, trata o sinal e detecta o sinal óptico convertendo-o em elétrico.

Figura 12: Sistema TS-OCDMA implementado.



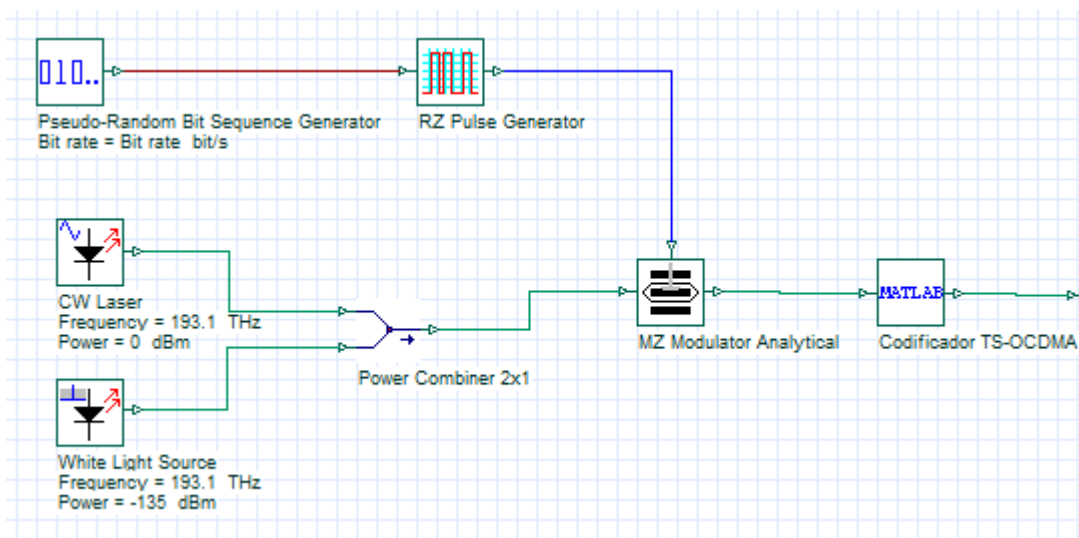
Todas as análises desenvolvidas são baseadas em testes efetuados sobre a implementação da rede TS-OCDMA representada na Figura 12. Para implementá-la, é utilizado um software simulador, uma vez que sua implementação em equipamentos físicos seria bastante complexa. O software a ser utilizado na implementação do sistema é o OptSystem 14.2, um software bastante robusto de estudos em comunicações ópticas da empresa Optiwave [22]. Nele é possível implementar praticamente quase todo o sistema, com exceção de alguns componentes que serão simulados pelo software Matlab (Mathworks [23]) utilizando um recurso do próprio OptSystem. A grande vantagem da implantação desse sistema em software, é que ela possibilita uma maior variedade de tipos de estudos e de análises, pois a alteração de parâmetros de configuração pode ser realizada por um simples ato computacional.

O sistema representado na Figura 12 não é muito diferente de outros sistemas OCDMA, com a exceção da presença do codificador TS-OCDMA. Este codificador é o que caracteriza esse sistema, sendo responsável por codificar o sinal de cada usuário de forma que este possa ser recuperado corretamente no receptor, sem a necessidade de alocação de canal ou janela temporal. A forma encontrada para representar esse sistema em software é descrita posteriormente.

3.1 Implementação do transmissor

O transmissor implementado nesse sistema é composto por processos de geração modulação e codificação do sinal. Esse transmissor, representado na Figura 13, mostra um subsistema do OptiSystem, que foi criado para simplificar as análises. Afim de melhor compreendê-lo devemos estudar separadamente cada parte desse subsistema.

Figura 13: Transmissor TS-OCDMA.



3.1.1 Geração do sinal

Como pode ser observado na Figura 13, o sinal elétrico é gerado pelo gerador de pulsos RZ, que recebe uma sequência lógica aleatória gerada por um componente específico e gera um sinal codificado em RZ. O gerador de pulsos RZ realiza uma codificação OOK, onde o pulso em alto (tensão em alto) representa o valor lógico 1 e o nível em baixo (tensão em zero) representa o valor lógico 0. Neste caso o RZ se torna bastante interessante, pois ele não utiliza toda janela temporal de pulso para representar o pulso 1, de forma que o restante da janela fique disponível para realizar a codificação do pulso.

O tempo de pulso em alto dentro da janela é definido pelo *Duty Cycle*, que pode ser reduzido ou aumentado de acordo com a necessidade da aplicação. No codificador TS-OCDMA implementado, o *Duty Cycle* é ajustado de tal forma que possibilite alocar todas as cópias do pulso criadas no processo de codificação. Desta forma ao se alterar a extensão do código, é necessário alterar o *Duty Cycle*. Outra questão relevante no funcionamento dessa simulação computacional é a taxa de amostragem por bit. Esta deve ser devidamente configurada para garantir que a amostragem seja suficiente de forma que os pulsos tenham o formato correto. Esse aspecto é um tanto crítico pois os pulsos podem ser bastante curtos nesse sistema.

3.1.2 Modulação óptica

Para modular o sinal elétrico no domínio óptico foi utilizado um modulador March-Zehnder (Figura 13). Como citado anteriormente, este modulador acopla a informação do sinal elétrico no sinal portador óptico. O sinal portador óptico é gerado por um LASER ajustado para operar em um comprimento de onda específico. O LASER se mostrou atrativo devido a sua capacidade de gerar pulsos ultracurtos, uma característica muito importante para esse sistema. Nesse sistema o comprimento de onda a ser utilizado para modular o sinal é o mesmo para todos os usuários, pois esse sistema não realiza multiplexação de frequência, e sim atribui códigos a cada usuário, permitindo que estes utilizem o mesmo comprimento de onda.

Como pode ser observado na Figura 13, além do LASER óptico, foi utilizado um gerador de ruído branco. Essa foi a alternativa encontrada para reproduzir o ruído de fase de um LASER real. Dessa forma, o sinal do LASER somado ao ruído branco forma um sinal óptico condizente com a prática, o que torna esse sistema mais real.

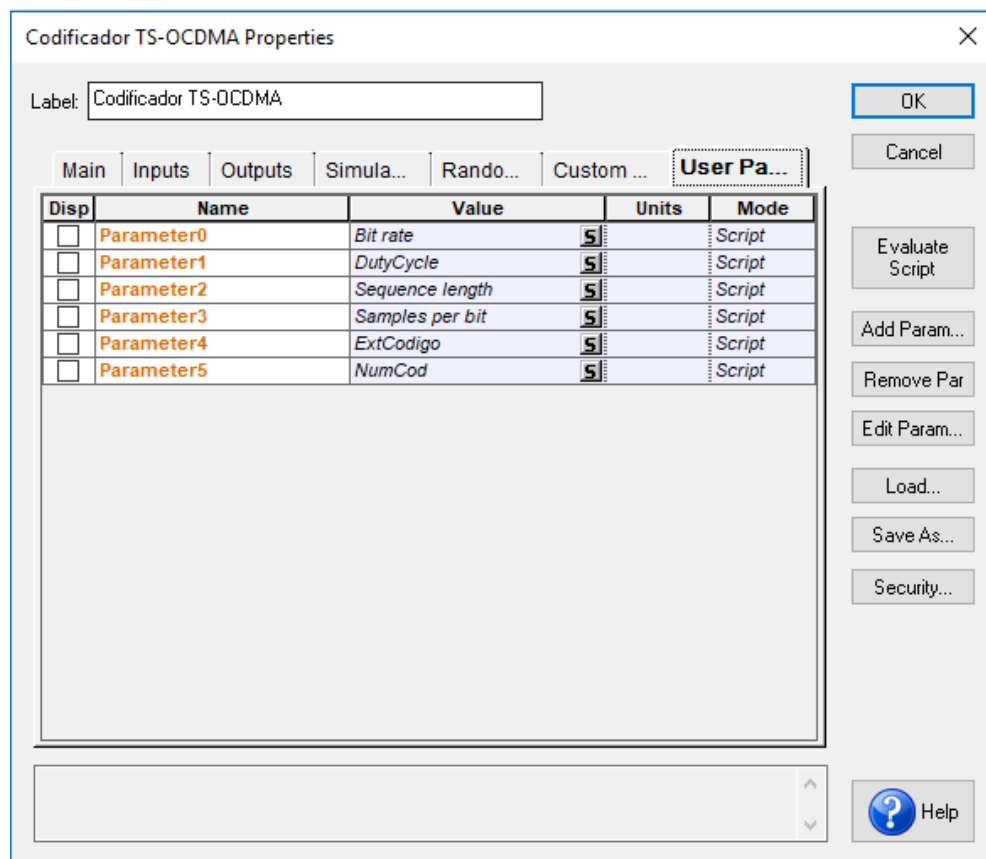
3.1.3 Codificador TS-OCDMA

O codificador TS-CDMA é representado na Figura 13, pelo componente do Matlab, pois este foi implementado via algoritmo no Matlab. Ao executar o Matlab, o OptiSystem repassa as informações do sinal para o Matlab que, de posse dessas informações, recria o sinal que agora é trabalhado inteiramente em seu ambiente. O algoritmo implementado utiliza as informações repassadas para criar cópias do mesmo sinal em quantidade equivalente à extensão do código utilizado. Essas cópias são deslocadas de acordo com o tamanho do *chip*, e recebem um deslocamento de fase condizente com o código atribuído a ele. Logo após, o algoritmo atribui esse sinal à saída do componente, devolvendo o sinal codificado ao OptiSystem. A codificação

temporal acontece quando são criadas cópias deslocadas do mesmo sinal, já a codificação de fase acontece quando cada cópia recebe um deslocamento de fase.

Como descrito anteriormente, é importante repassar algumas informações para o Matlab, para isso é necessário criar parâmetros no componente do OptiSystem que passam ser alterados a todo momento. A Figura 14 mostra os parâmetros que foram criados.

Figura 14: Parâmetros do codificador

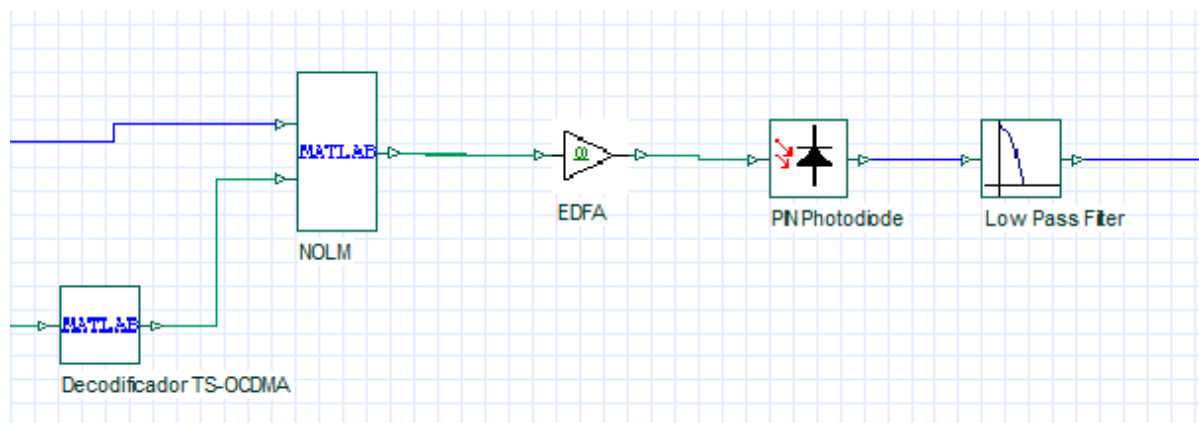


Como pode ser observado na Figura 14, os parâmetros criados utilizam informações disponíveis dentro do próprio OptiSystem, de forma que não seja necessária intervenção interna. Esta mesma abordagem foi utilizada em alguns outros parâmetros, tornando o sistema mais dinâmico e simplificado. Da forma como foi implementada, a única informação que deve ser atribuída a cada usuário, modificado no seu subsistema (e não diretamente no componente do codificador) é o número do código atribuído a ele. Os demais parâmetros são tratados como universais, e são alterados uma única vez juntamente com os demais parâmetros de simulação do sistema no todo.

3.2 Implementação do receptor TS-OCDMA

O receptor TS-OCDMA como mostrado na Figura 15, foi reduzido a um único subsistema, afim de facilitar as análises. A Figura 15 mostra esse subsistema maximizado, onde é possível visualizar os componentes que são responsáveis por realizar processos de decodificação, tratamento e a conversão óptica-eletrô.

Figura 15: Receptor TS-OCDMA



3.2.1 Decodificador TS-OCDMA

O decodificador TS-OCDMA, da mesma forma que o codificador, foi implementado via algoritmo do Matlab, e também necessita receber os mesmos parâmetros. Portanto, sua montagem é bem similar ao codificador. A construção do algoritmo é simples: o sinal combinado na entrada do componente é analisado a cada janela temporal, e para cada janela são realizados dois procedimentos, um deslocamento de fase e uma correlação. O deslocamento de fase aplicado no decodificador é igual ao aplicado no codificador, de forma que para o sinal do usuário de interesse, a fase volte ao estágio inicial antes da codificação. Já para os demais sinais (usuários interferentes), a fase não voltará ao normal.

Depois de receber um deslocamento de fase, o próximo passo é realizar uma correlação do sinal. Esse processo consiste em deslocar temporalmente todos os pulsos de *chip* dentro da janela de pulso para a posição correspondente ao pulso original (posição inicial). Esse processo implica em uma soma em amplitude dos pulsos, contudo, como estamos realizando uma soma entre valores complexos, é importante que a fase esteja casada, caso contrário o sinal ira ser subtraído ao invés de somado. Dessa forma apenas o sinal de interesse é recuperado, os demais

sinais são drasticamente atenuados, tornando-se ruído. Depois de realizar estes dois procedimentos, o sinal é devolvido ao OptiSystem.

3.2.2 Tratamento e regeneração do sinal

O sinal decodificado apresenta ruído e atenuação, proveniente dos diversos processos ao qual é submetido. Devido a isso, é importante adotar métodos de tratamento do sinal. A primeira técnica é o NOLM, que como já mencionado, utiliza um sinal de sinalização para realizar um recorte do sinal dentro da região de interesse, eliminando os eventuais ruídos e a MAI. Da mesma forma que o codificador e o decodificador, este componente foi implementado via algoritmo, portanto, utiliza-se um componente Matlab para realizar a comunicação com o Matlab.

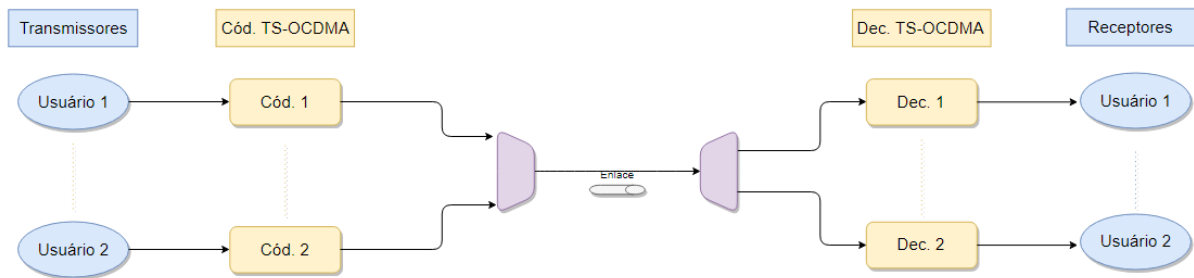
A outra técnica utilizada objetiva compensar a atenuação que prejudica a detecção do sinal, para isso foi utilizado um amplificador EDFA. Esse amplificador atribui um ganho ao sinal, elevando-o ao nível de amplitude desejado, que no caso é o nível de tensão original do sinal. Para garantir isso, os dois sinais foram comparados.

Depois de o sinal ser tratado em domínio óptico, a conversão óptico-elétrica é realizada devolvendo o sinal ao domínio elétrico. O último passo é filtrar as altas frequências do sinal elétrico, suavizando a forma de onda do sinal, para isso foi utilizado um filtro passa baixa disponível no OptiSystem.

4 Análises e resultados

Antes de realizar testes específicos, foi necessário verificar o funcionamento básico do sistema para garantir a qualidade dos resultados. Para esta análise, foi utilizada a configuração de 2 usuários, apresentada de forma simplificada na Figura 16.

Figura 16: Sistema TS-OCDMA com 2 usuários.



Afim de garantir a compreensão do leitor, o sinal do segundo usuário foi desconsiderado nesta análise.

As Figuras 17, 18, 19 e 20 representam o sinal gerado pelo usuário, o sinal codificado, o sinal decodificado corretamente e o sinal decodificado incorretamente, respectivamente. Analizando as Figuras 17 e 18, percebe-se o efeito de codificação temporal criado pelo codificador TS-OCDMA, ou seja, um pulso se torna uma sequência de pulsos menores (*chips*) em número proporcional à extensão do código utilizado. Também percebe-se que esse processo causa atenuação no sinal. A Figura 19 apresenta o sinal corretamente decodificado, ou seja, o código utilizado no decodificador é o mesmo do utilizado no codificador. Já a Figura 20 apresenta o sinal incorretamente decodificado, ou seja, o código utilizado no decodificar é diferente do código utilizado no codificador.

O sinal corretamente decodificado se assemelha muito ao sinal original, com exceção de alguns baixos pulsos resultantes do processo de correlação do sinal. Nesse processo o sinal é combinado ponto a ponto, reconstruindo o sinal. Teoricamente, a correlação de um sinal em baixo formaria outro sinal em baixo, contudo na prática o sinal apesar de baixo apresenta um nível de sinal, que no processo de correlação forma um pulso pequeno. Este se torna um ruído ao qual pode ser eliminado em processos futuros.

O sinal incorretamente decodificado é praticamente nulo, comprovando a teoria citada anteriormente, que diz que o sinal codificado utilizando um código ortogonal só é

consideravelmente decodificado utilizando-se o mesmo código, caso contrário, no processo de correlação o sinal seria reduzido a ruído. Neste caso, o sinal se mostrou nulo, pois está sendo considerado apenas um usuário, caso contrário, é normal a presença de ruído.

Figura 17: Sinal do usuário sem codificação.

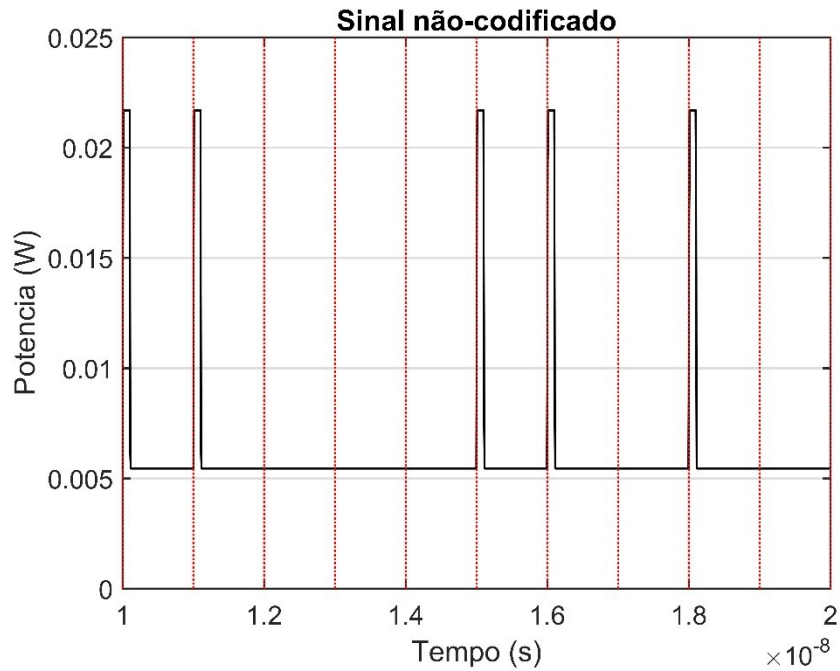


Figura 18: Sinal do usuário codificado.

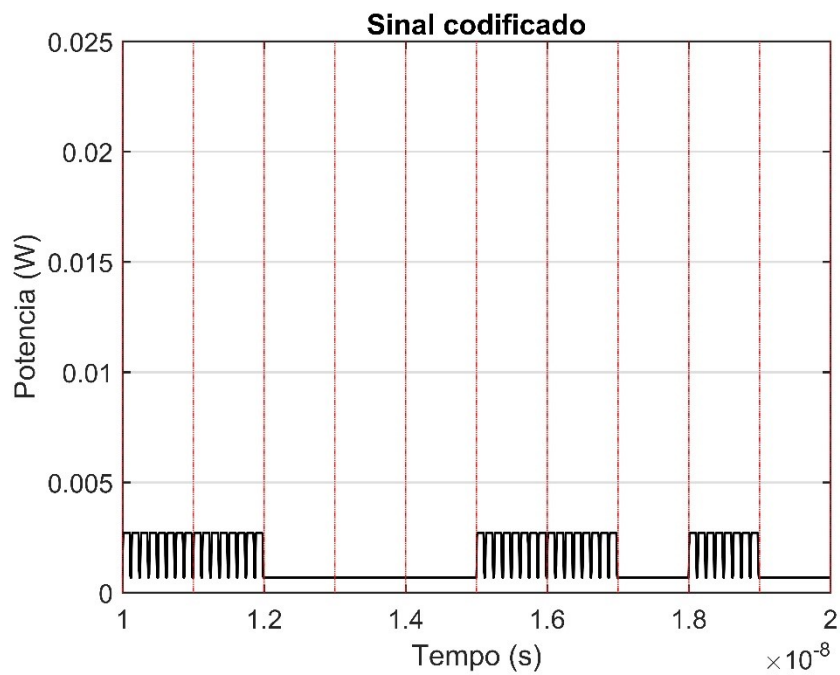


Figura 19: Sinal do usuário decodificado.

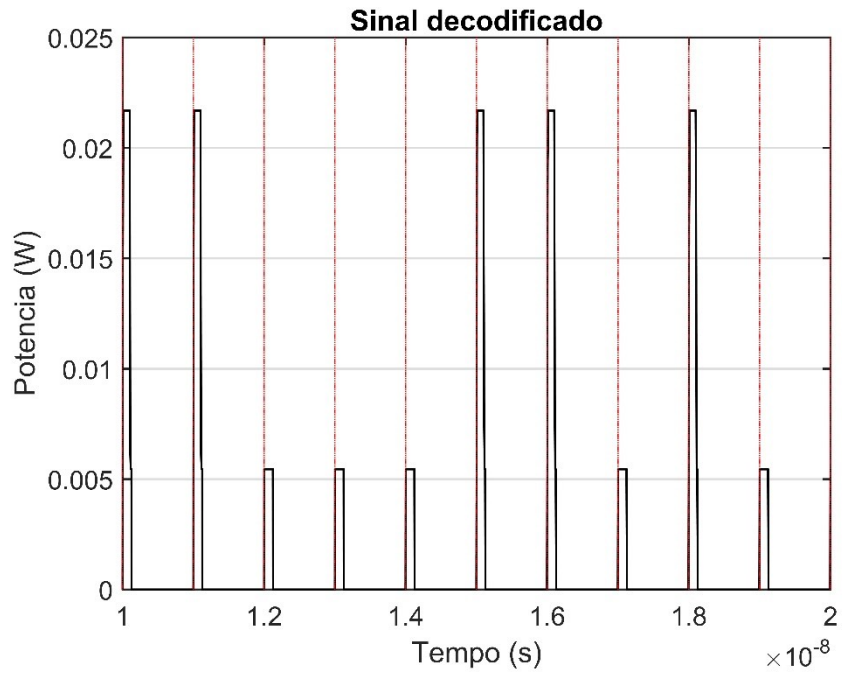
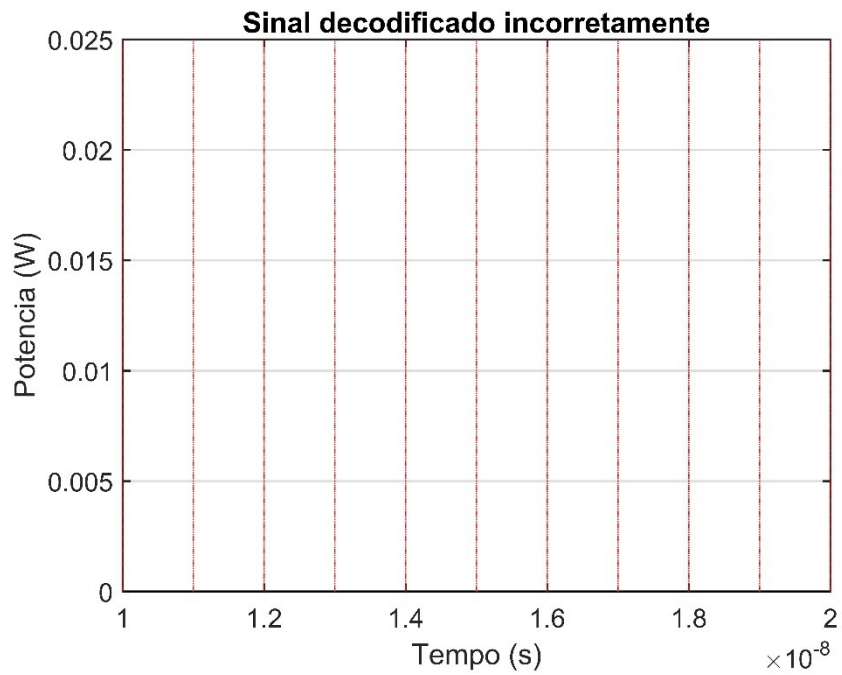


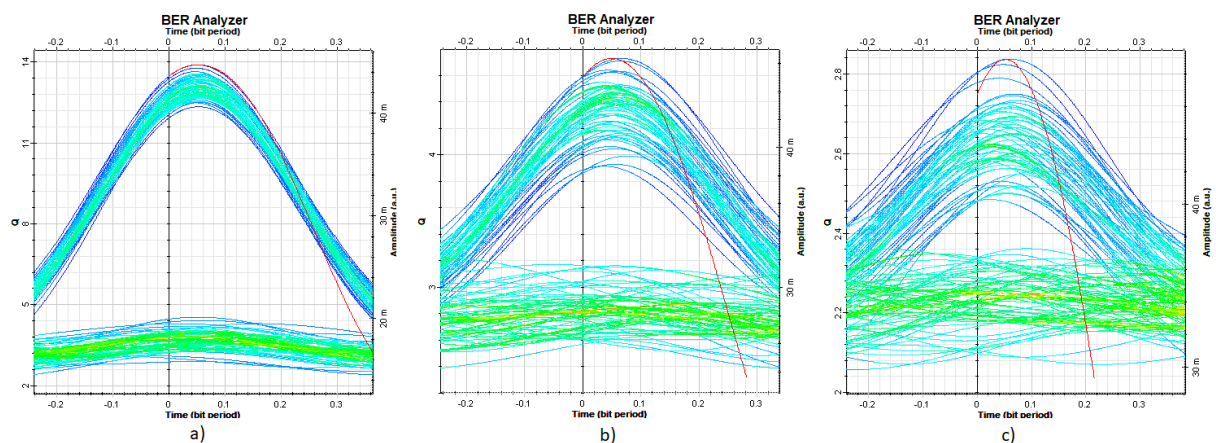
Figura 20: Sinal do usuário incorretamente decodificado.



4.1 Influência de interferentes

Um dos parâmetros mais importantes de um sistema de múltiplo acesso é o nível de sensibilidade a interferentes. Pensando nisso foram realizados alguns testes para verificar essa sensibilidade. A Figura 21 apresenta um simples teste com o sistema configurado com Hadamard extensão 8 e taxa de bit de 10 Gbit/s. Ela mostra o diagrama de olho do sistema com 0, 3 e 7 interferentes em (a), (b) e (c) respectivamente. O diagrama de olho do sistema sem interferentes apresenta uma melhor resposta do que o os diagramas do sistema com 4 e 8 interferentes. Já o diagrama do sistema com 4 interferentes apresenta uma melhor resposta do que o diagrama do sistema com 8 interferentes.

Figura 21: Influência na adição de interferentes na BER, a) Diagrama de olho com 0 interferentes, b) Diagrama de olho com 3 interferentes e c) Diagrama de olho com 7 interferentes.



Os gráficos das Figuras 22 a 25 apresentam o comportamento do sistema para diferentes taxas e extensões de código Hadamard. Foram realizados testes com as taxas de 0.5, 1, 10 e 20 Gbits/s com códigos de extensão de 8, 16, 32 e 64.

Figura 22: Teste de interferência na taxa de 0,5 Gbit/s.

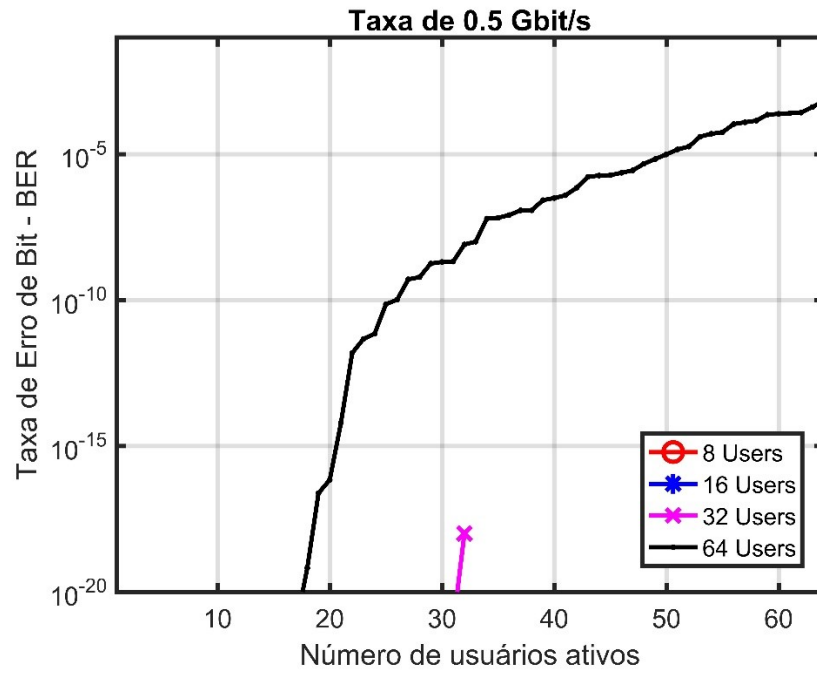


Figura 23: Teste de interferência na taxa de 1 Gbit/s.

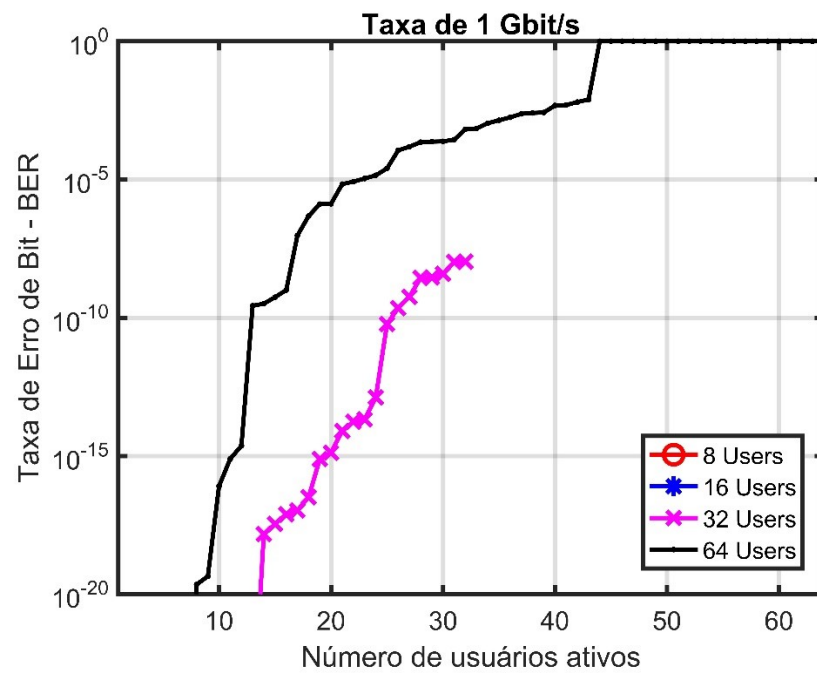


Figura 24: Teste de interferência na taxa de 10 Gbit/s.

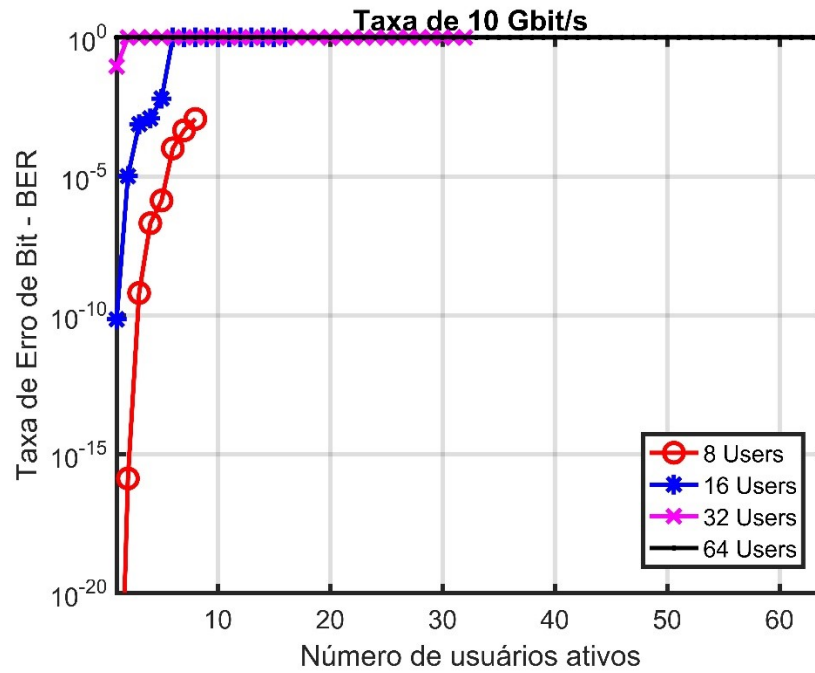
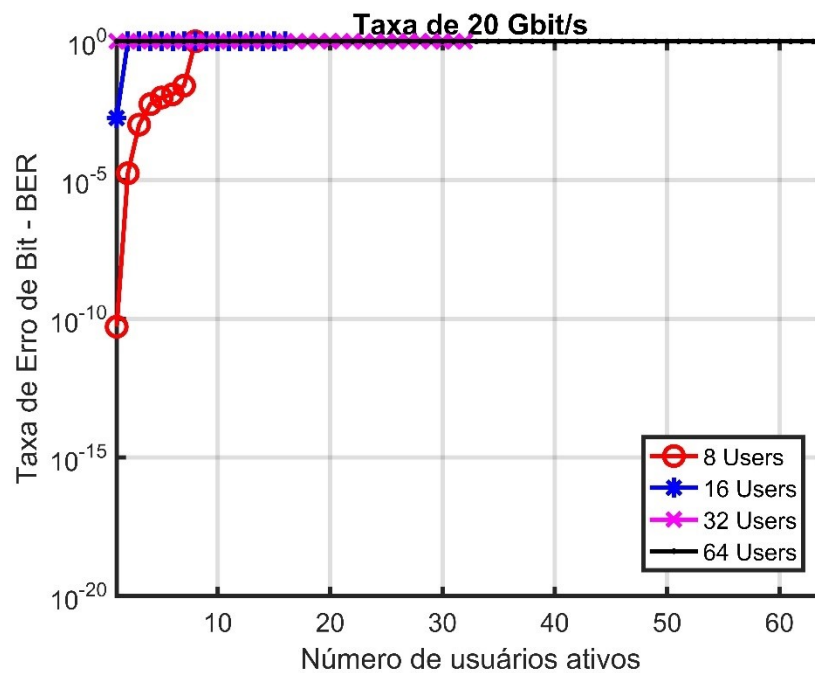


Figura 25: Teste de interferência na taxa de 20 Gbit/s.



Os valores abaixo de $1e^{-20}$ não são considerados nos gráficos das Figuras de 22 a 25, pois são muito baixos para influenciar no funcionamento do sistema, portanto as curvas que não aparecem nos gráficos correspondem a valores inferiores a esse valor. Ao analisar os gráficos das Figura 22 a 25, percebe-se que o aumento da taxa e da extensão do código

influencia expressivamente na quantidade de interferentes que o sistema suporta. Ao aumentar a taxa, a quantidade de interferentes suportada diminui bastante, principalmente para códigos de extensão maior, ou seja, os códigos de extensão maior são os mais afetados com o aumento da taxa. Uma possível explicação para isso é a influência da largura temporal de cada *chip* no desempenho do sistema. Isso acontece porque quando se aumenta o comprimento do código mantendo a taxa de bit constante, a duração de cada *chip* diminui. Isso significa ter pulsos mais estreitos, o que pode influenciar o desempenho do sistema. Na próxima seção é investigada a influência da largura de *chip* no desempenho do sistema.

Diante dos resultados, conclui-se que para altas taxas não é possível adicionar muitos usuários, pois a interferência entre os usuários é um dos fatores limitantes desse sistema. Contudo, percebe-se que para taxas menores esse fator é minimizado, possibilitando um aumento no número de interferentes. Esse fato mostra que esse sistema pode ser configurado de duas formas: um sistema que funciona em alta taxa com poucos usuários e um sistema que trabalha em baixa taxa e com muitos usuários. Isso aumentando o número de aplicações possíveis para esse sistema.

4.2 Influência da extensão do código e do período do *chip*.

Os resultados do teste anterior mostram que o aumento da extensão do código afeta significativamente o desempenho do sistema. Contudo, os resultados não foram como o esperado. Aparentemente, os testes utilizando códigos de extensão menor apresentam melhores valores de BER do que os testes utilizando códigos de extensão maior. Na teoria, os códigos de extensão maior devem apresentar resultados melhores, uma vez que a codificação é mais complexa. Isso nos leva pensar que existe outro fator limitante nesse sistema que inviabilizou a análise de influência da extensão do código da forma como foi dada.

Um dos possíveis fatores que podem ter afetado a análise anterior é a largura temporal do *chip*. Acredita-se que a diminuição do tempo do *chip* implica na limitação do funcionamento do sistema, pois os processos de codificação, decodificação e tratamento se tornam mais complexos. Dois fatores determinam o período do *chip*, a extensão do código e a taxa de bits. Considerando estes dois parâmetros, no sistema implementado, o período de *chip* é reduzido quando:

- A taxa de bits e a extensão do código são aumentadas;

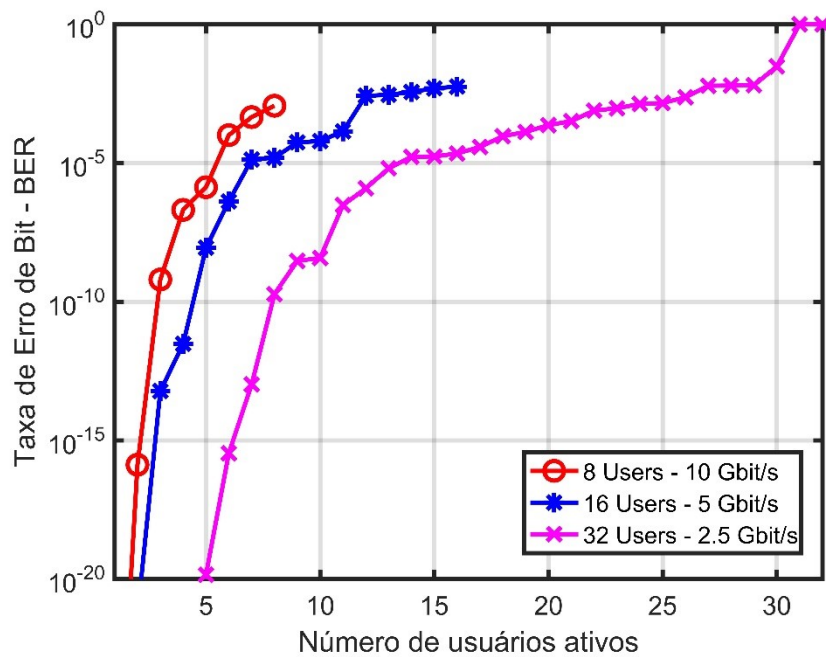
- A extensão do código é aumentada enquanto que a taxa de bits é mantida constante;
- A extensão do código é mantida constante enquanto a taxa de bits é aumentada;

Nos testes da seção anterior a taxa de bits foi mantida constante enquanto a extensão do código foi aumentada. Neste caso ocorreu a diminuição do tamanho do *chip* com o aumento da extensão do código.

Com o objetivo de eliminar a influência do período do *chip*, os testes desta seção foram configurados afim de garantir que o período de *chip* se mantivesse constante com o aumento do tamanho da extensão do código. Para isso foi necessário variar a taxa de bits de forma que o aumento do tempo de pulso compensasse o aumento do número de *chips* de cada extensão. Assim, manter o período de *chip* constante implica em eliminar a influência deste no sistema, caso exista, e permitir verificar a influência da extensão do código na eficiência do sistema.

A Figura 26 apresenta os resultados para os testes desta seção. Como observado, foi utilizado as taxas de 10, 5 e 2,5 Gbit/s para as extensões de 8, 16 e 32 respectivamente. Os valores inferiores a $1e^{-20}$ foram desconsiderados.

Figura 26: Teste de influência da largura temporal do chip.



Ao se analisar os valores de BER para cada extensão de código, percebe-se que o sistema teve um melhor desempenho com o aumento do tamanho das extensões de código,

comprovando a teoria. Contudo, percebe-se que realmente existe uma influência do período de *chip* no seu desempenho, e apesar de ele se mostrar mais eficiente para códigos de extensão maior, o fator tamanho do *chip* também se mostra como um fator limitante.

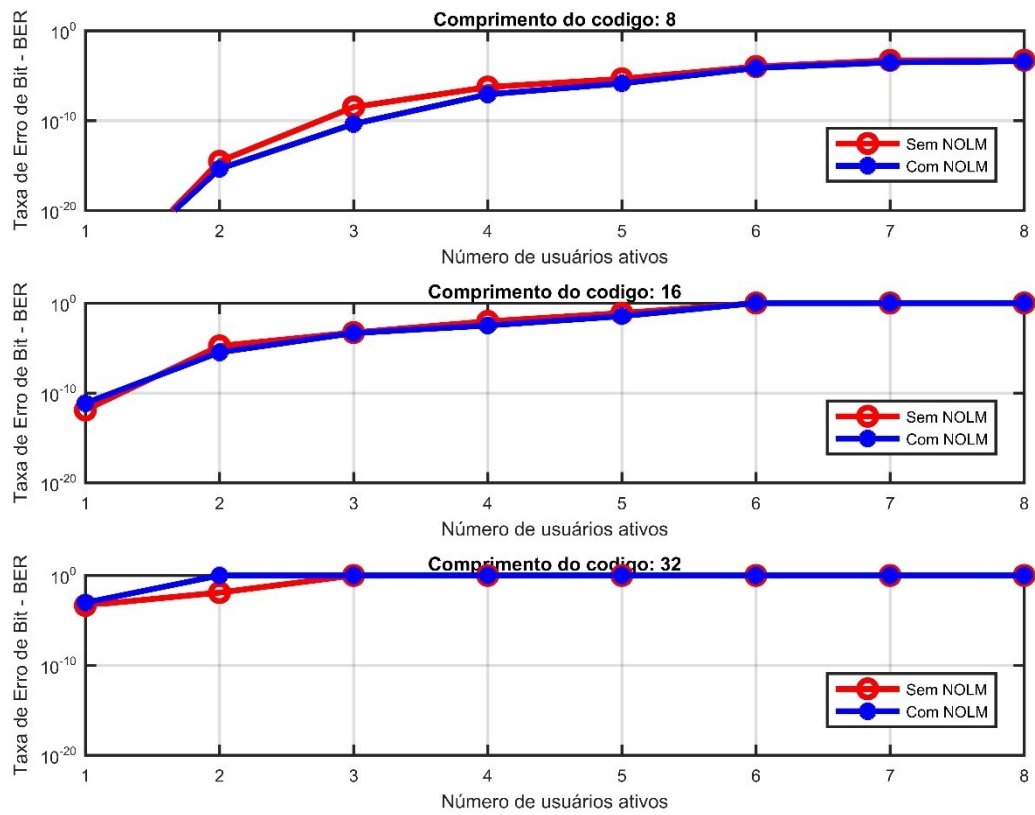
Apesar de tudo, é possível dizer que desde que se considere o período do *chip*, os códigos de extensão maior proporcionam melhores valores de BER e possibilitam adicionar um maior número de interferentes, ou seja, de usuários. Contudo, utilizar códigos de extensão maior em altas taxas implica em reduzir consideravelmente o período do *chip*. Isso não é muito interessante, pois como visto nos gráficos das Figuras 22 a 25 (da seção anterior), o sistema não se comporta muito bem quando isso acontece. Além disso, o número de interferentes suportados pelo sistema reduz bastante.

4.3 Influência do NOLM para sistema sem fibra

A MAI é um grande problema que ocorre em sistemas de múltiplo acesso por divisão de código. Isso motivou o interesse em verificar a influência deste fenômeno nesse sistema. Para isso, foi verificada a influência na utilização do NOLM, que é um dispositivo de rejeição de MAI.

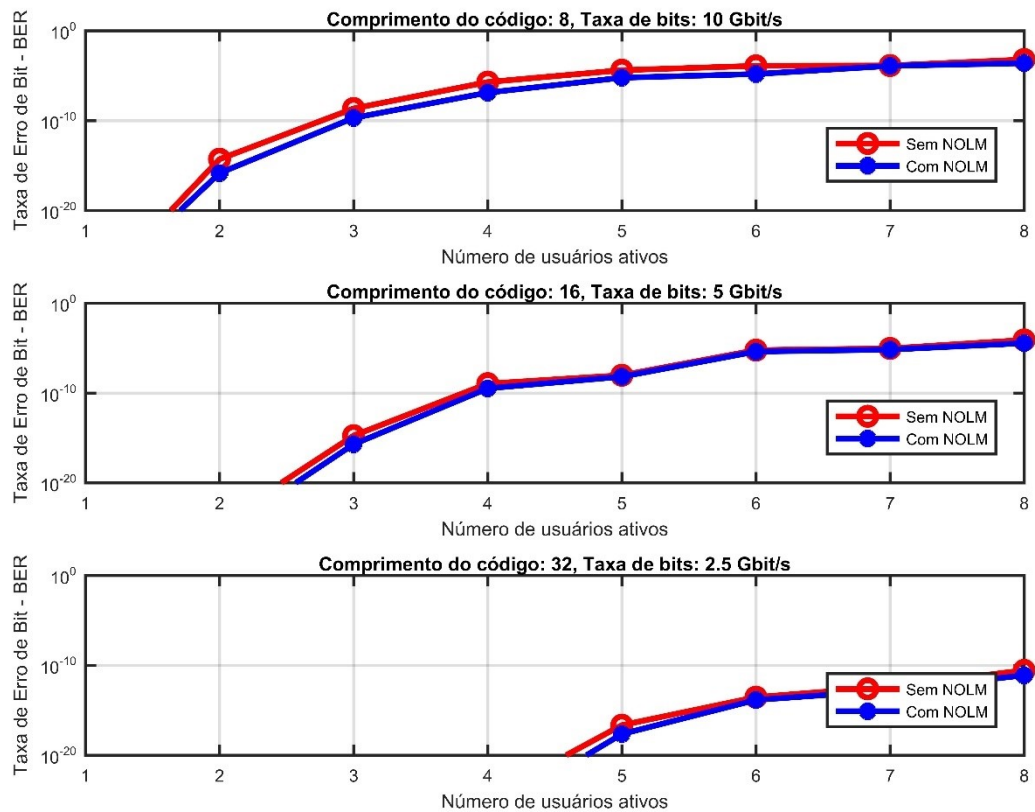
Foram realizadas duas análises nesta seção: a primeira está representada na Figura 27 e consiste em um sistema sem fibra, taxa de bit de 10 Gbit/s e código Hadamard de extensão 8. Foram coletados valores com a influência de até 7 interferentes para um sistema utilizando NOLM e um sistema que não utiliza NOLM. Os valores inferiores a $1e^{-20}$ foram desconsiderados do gráfico.

Figura 27: Teste de influência do NOLM.



A segunda análise está representada na Figura 28, que tem como objetivo observar a influência do NOLM quando o tamanho do *chip* é mantido constante. A configuração é mesma do primeiro teste, com exceção da taxa de bit que foi variada em 10, 5 e 2,5 Gbit/s para as extensões de 8, 16 e 32 respectivamente. Os valores inferiores a $1e^{-20}$ foram desconsiderados do gráfico.

Figura 28: Teste de influência do NOLM para tamanho de *chip* constante.



Analisando os resultados obtidos nos testes desta seção, pode-se observar que o NOLM não influencia consideravelmente no sistema, portanto, acredita-se que ele não apresenta uma MAI suficiente para interferir na qualidade do sinal. Uma possível explicação para isso é que o codificador e o decodificador, da forma como foram implementados, tenham compensado por si só a presença da MAI, eliminando qualquer influência deste efeito no sistema.

4.4 Influência da compensação e do comprimento do enlace

Em um sistema óptico, quando um sinal é submetido a um enlace de fibra óptica, ele está sujeito a presença de diversos efeitos que podem deteriorar o sinal ou até impossibilitar a comunicação. Portanto é importante a utilização de técnicas de compensação desses efeitos. Nesta seção é testada a influência dos efeitos de atenuação, dispersão e MAI, que são alguns dos principais problemas presentes em sistemas ópticos. Apesar de já ter sido testada a influência da MAI na seção anterior, acredita-se que a utilização da fibra possa afetar a sua

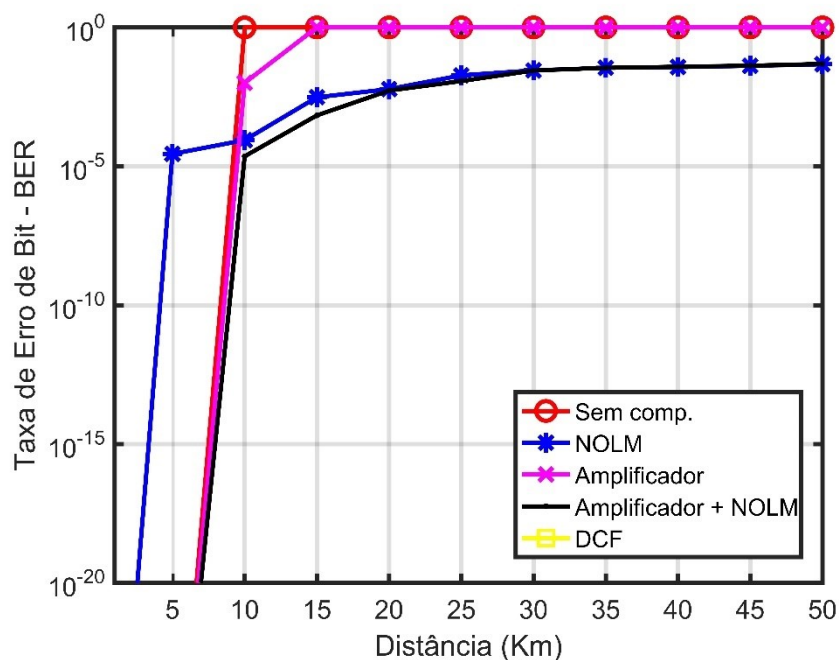
influência no sistema, desta forma também é importante testar a sua influência nestas condições, afim de confirmar as suspeitas anteriores.

O gráfico da Figura 29 apresenta o teste realizado, onde foi utilizado um sistema com 8 usuários, código Hadamard de extensão 8 e taxa de bit de 0.5 Gbit/s. O gráfico apresenta 5 curvas de BER em função da distância do enlace (que varia de 1 a 50km). As curvas representam:

- Teste do sistema sem nenhuma compensação;
- Teste do sistema utilizando-se apenas o NOLM como ferramenta de compensação da MAI.
- Teste do sistema utilizando-se apenas um amplificador configurado com ganho de 20dB e figura de ruído de 6dB, como ferramenta de compensação da atenuação.
- Teste do sistema utilizando-se amplificador e NOLM, com objetivo de verificar a influência da combinação dos efeitos de atenuação e MAI.
- Teste do sistema utilizando-se apenas DCF, como ferramenta de compensação da dispersão.

Os valores inferiores a $1e^{-20}$ foram desconsiderados do gráfico da Figura 29.

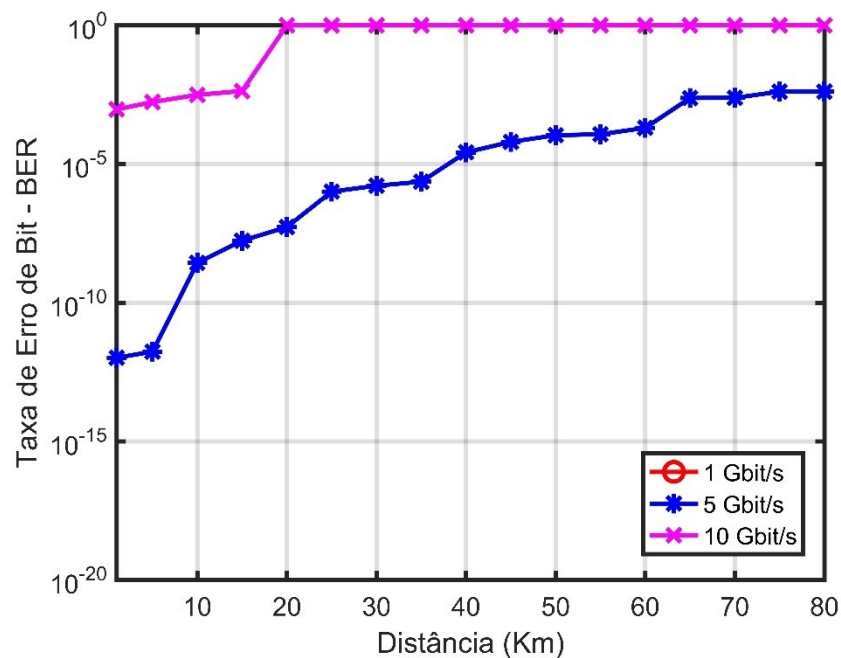
Figura 29: Teste de influência da compensação.



Como observado na Figura 29, a qualidade do sinal deteriora drasticamente com o aumento do tamanho da fibra de enlace, portanto é imprescindível a utilização de métodos de compensação dos efeitos deteriorantes. Percebe-se que o principal efeito degradante do sistema é a dispersão, e que a DCF se mostrou muito eficiente para a compensação deste efeito, proporcionando um grande aumento de capacidade para este sistema. Os testes de compensação da atenuação e da MAI se mostraram inconclusivos, pois não proporcionaram resultados satisfatórios. Suspeita-se que o efeito de dispersão tenha suprimido a compensação da atenuação e da MAI.

Para melhor visualizar o efeito da compensação da dispersão foi realizado um segundo teste para verificar a compensação em função do aumento da taxa de bit. A Figura 30 apresenta o resultado do teste de compensação, quando o sistema encontra-se configurado com tamanho do código Hadamard de extensão 8, com 8 usuários e com DCF. As taxas de bit foram variadas em 1, 5 e 10 Gbit/s e a distância de 1 a 80 Km. Os valores inferiores a $1e^{-20}$ foram desconsiderados do gráfico da Figura 30.

Figura 30: Compensação da dispersão com uso de DCF.



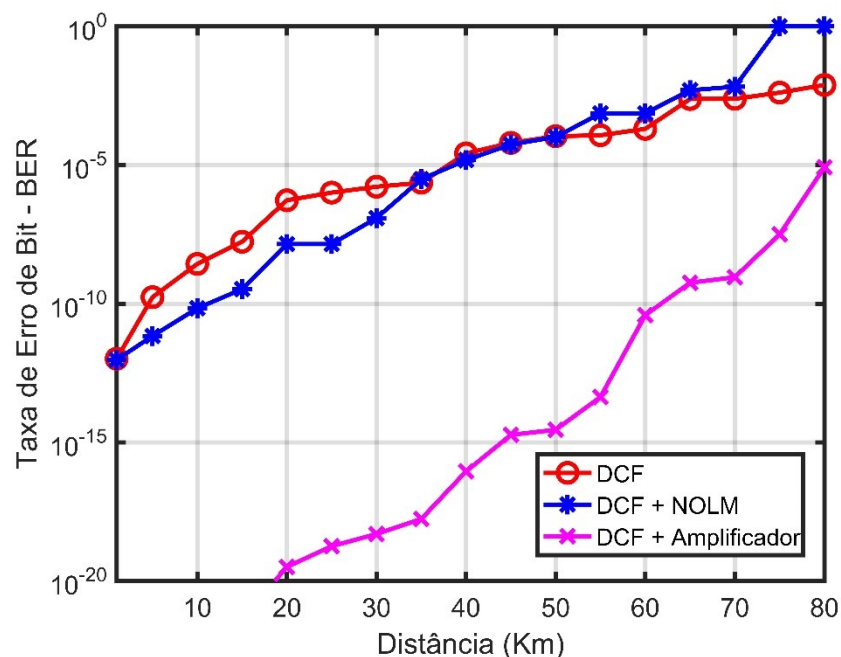
Como observado, o uso da DCF permite expandir o uso do sistema em termos de taxa de bit e distância, se mostrando uma ferramenta importante para o sistema. Mas apesar de sua eficiência, ele apresenta algumas limitações, o que na verdade era esperado, pois podem haver outros fenômenos influenciando nos resultados.

4.5 Influência da compensação da atenuação e da MAI quando a dispersão é compensada

Como visto no teste da Figura 29, da seção anterior, os testes de compensação da atenuação e da MAI se mostraram inconclusivos. Suspeita-se que o efeito da dispersão tenha influenciado nos resultados, portanto, nesta seção foi realizado um novo teste de compensação da atenuação e da MAI. Este teste, representado na Figura 31, da mesma forma que o teste da Figura 29, utilizou um sistema com 8 usuários e código Hadamard de extensão 8, contudo a taxa de bit utilizada foi de 5 Gbit/s, possibilitando uma melhor visualização dos resultados. As curvas do gráfico da Figura 31 representam:

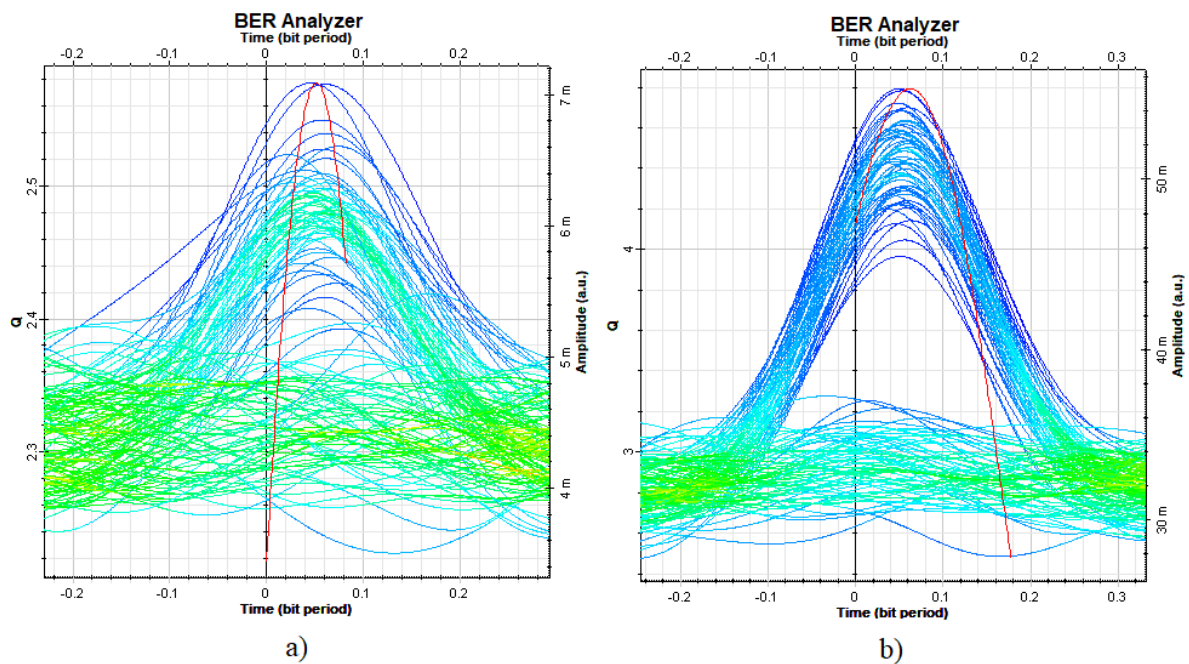
- O sistema utilizando-se apenas a DCF como ferramenta de compensação da dispersão;
- O sistema utilizando-se a DCF e o NOLM para verificar a influência da MAI quando a dispersão é compensada;
- O sistema utilizando-se a DCF e Amplificador configurado com ganho de 20 dB e figura de ruído de 6 dB para verificar a influência da atenuação quando a dispersão é compensada.

Figura 31: Teste da influência da compensação da atenuação e da MAI quando a dispersão é compensada.



Como observado, a MAI realmente não é um problema para o sistema como foi implementado. Contudo a atenuação, assim como a dispersão é um fator determinante, necessitando de ferramentas adequadas de compensação. Percebe-se que a combinação de DCF e amplificador possibilita aumentar a gama de aplicações para este sistema, tanto em termos de comprimento do enlace, quanto em termos de taxa de bit. Na Figura 32 também é possível verificar o efeito da combinação DCF e amplificador. As Figuras 32 (a) e (b) representam os diagramas de olho do teste realizado nesta seção, para a fibra de enlace de tamanho 80 Km. A imagem (a) representa o teste com apenas DCF e a imagem (b) representa o teste com DCF e amplificador. É visível a melhora do sinal quando é inserido a o amplificador em um sistema com dispersão compensada. Essa melhora explica os melhores valores de BER obtidos.

Figura 32: Compensação de dispersão e atenuação, a) Diagrama de olho utilizando-se apenas DCF e b) Diagrama de olho utilizando-se DCF e amplificador.



5 Conclusão geral

Este trabalho apresentou resultados satisfatórios que possibilitam prever o comportamento do sistema TS-OCDMA diante de grandezas importantes para um sistema de telecomunicações. Os resultados mostraram que a interferência de usuários, o período do *chip* e a dispersão que ocorre no enlace, são os principais fatores que limitam esse sistema. Além disso, o aumento no número de interferentes provoca uma degradação no sinal, diminuindo sua qualidade. Portanto esse aumento implica na diminuição da capacidade do sistema. Apesar disso os testes mostraram que dependendo da configuração utilizada, o sistema pode comportar um grande número de usuários interferentes.

Outro cenário analisado mostrou que a diminuição do período do *chip* implica na limitação da utilização de altas taxas de bit e na inserção de muitos usuários. Essa diminuição pode ocorrer devido a dois fatores: o tamanho da extensão do código e a taxa de bit. Aumentar o tamanho da extensão do código e o tamanho da taxa de bit implica na diminuição do tamanho do *chip*. Portanto, não é possível aumentar a proporção das duas variáveis, o que torna possível um sistema de alta capacidade de tráfego de dados e de poucos usuários ou um sistema com muitos usuários e baixo tráfego de dados.

Já para um sistema com enlace, a sua capacidade tanto em termos de taxa, quanto de número de usuários é reduzida com o aumento do comprimento de enlace. Isso se deve a presença de fatores como a atenuação e a dispersão. A dispersão se mostrou o fator que mais limita este sistema no enlace, contudo a atenuação é um fator que também reduz a capacidade. A compensação dos dois fatores proporciona utilizar esse sistema com grande capacidade em um enlace de comprimento considerável.

Diante de todos os resultados obtidos, pode-se dizer que esse é um sistema de alta capacidade e altamente dinâmico, proporcionando soluções para uma grande gama de aplicações em telecomunicações.

Referências

- [1] Neuman, W.L. **Social research methods (second edition)**. Boston: Allyn & Bacon. 1994.
- [2] Hoshino, F. G., **Estudo e simulação da modulação OFDM aplicada em redes ópticas de nova geração**, Limeira, SP. 2013
- 2013.
- [3] Haji M., **Optical code division multiple access systems in AlGaInAs/InP**, University of Glasgow, Escócia. 2012.
- [4] Jonathan P. Heritage, Andrew M. Weiner, **Advances in Spectral Optical Code-Division Multiple-Access Communications** *iee journal of selected topics in quantum electronics*, vol. 13, no. 5, september/october 2007.
- [5] D. R. Hughes and D. Hendrcks, **Spread-Spectrum Radio**, Scientific America, pp. 94-96, Apr. 1998.
- [6] H.V. Poor and L.A. Rush, **A promising multiplexing technology for cellular telecommunications: Narrowband Interference Suppression in Spread Spectrum CDMA**, IEEE Personal Commun., Rhird Quarter, pp. 14-27, 1994.
- [7] FILHO, R. V. B., **Análise de sistemas CDMA ópticos**, USP, São Carlos, 2006.
- [8] Prucnal. Optical Access Seamless Evolution (OASE), **Survey of next-generation optical access system concepts**, FP7/2007-2013, deliv. D4.1; <http://www.ict-oase.eu/>.
- [9] A. M. Weiner, J. P. Heritage and J. A. Salehi, **Encoding and Decoding Femtosecond Pulses**, Optics Letters, Vol. 13, No. 4, pp 300-302, 1988.
- [10] BERTARINI, P. L. L., **Sistemas CDMA ópticos coerentes baseados em codificação de fase espectral**, USP, São Carlos, 2012.
- [11] D. J. Richardson, J. M. Fini and L. E. Nelson, **Space-division multiplexing in optical fibres**, Nature Photonics. vol. 7, 354-362, May 2013.
- [12] G. Jacobsen, **Noise in digital Optical Systems**, Artech House, Norwood, 1994
- [13] A. M. Weiner et al., **Programmable Shaping of Femtosecond Optical Pulses by Use of 128-Element Liquid Crystal Modulator**, J. Lightwave Technol., Vol. 28, No. 4 pp. 908-920, Apr. 1992.
- [14] K. Iversen and O Ziemann, **An All-Optical CDMA Communication Network By Spectral Encoding of Led Using Acoustically Tunable Optical Filters**, Proc; 1995 Int. Symposium on Signals, Systems and Electronics (ISSSE'95), San Francisco, pp. 529-532, 1995.
- [15] A. M Weiner, **Femtosecond pulse shaping using spatial light modulators**, Review of Scientific Instruments, Vol. 71, No. 5, pp. 1929-1960, May. 2000.

- [16] Jawad A. Salehi, **Emerging OCDMA communication systems and data networks [Invited]**, *journal of optical networking*, Vol. 6, No. 9 / September 2007.
- [17] N. KARAFOLAS, D UTTAMCHANDANI, **Optical Fiber Code Division Multiple Access Networks: A Review**, Department of Electronic and Electrical Engineering, Telecommunications Group, University College London, Torrington Place, London WC1E 7JE, United Kindom, November 27, 1995
- [18] Keiser, **G. Comunicações por fibras ópticas**, revisão técnica: Antonio Pertence Junior. 4º edição, Porto alegre: AMGH E, 2014, 670 p.
- [19] Rice M. **Digital communications: A discrete – time approach**, New Jersey: PEARSON, 2009.
- [20] Correa W. **Estudo de sistemas OFDMA para comunicações ópticas**, USP, São Carlos, 2012
- [21] Machado R. **Comunicação de dados**, UFSM, DELC - Departamento de Eletrônica e Computação, Santa Maria, 2012.
- [22] disponível em: < optiwave.com>, acessado em: Dezembro de 2017.
- [23] disponível em: < www.mathworks.com>, acessado em: Dezembro de 2017.

