



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TELEINFORMÁTICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE TELECOMUNICAÇÕES

FRANCISCA JAIANE TAVARES FREITAS

ESTUDO DE TÉCNICAS DE APLICAÇÃO DE FIBRAS
COMPENSADORAS DE DISPERSÃO (DCF) EM UMA REDE WDM

FORTALEZA

2018

FRANCISCA JAIANE TAVARES FREITAS

ESTUDO DE TÉCNICAS DE APLICAÇÃO DE FIBRAS COMPENSADORAS DE
DISPERSÃO (DCF) EM UMA REDE WDM

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia de Telecomunicações da Universidade Federal do Ceará, como requisito à obtenção do título de Bacharela em Engenharia de Telecomunicações.

Orientador: Prof. Dr. João Batista Rosa Silva.

FORTALEZA

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- F936e Freitas, Francisca Jaiane Tavares.
Estudo de técnicas de aplicação de fibras compensadoras de dispersão (DCF) em uma rede WDM. /
Francisca Jaiane Tavares Freitas. – 2018.
53 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia,
Curso de Engenharia de Telecomunicações, Fortaleza, 2018.
Orientação: Prof. Dr. João Batista Rosa Silva.
1. Rede WDM. 2. Dispersão cromática. 3. Compensação de dispersão. 4. Fibra compensadora de
dispersão (DCF). I. Título.

CDD 621.382

FRANCISCA JAIANE TAVARES FREITAS

ESTUDO DE TÉCNICAS DE APLICAÇÃO DE FIBRAS COMPENSADORAS DE
DISPERSÃO (DCF) EM UMA REDE WDM

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia de Telecomunicações da Universidade Federal do Ceará, como requisito à obtenção do título de Bacharela em Engenharia de Telecomunicações.

Aprovada em: ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. João Batista Rosa Silva (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Antônio Geovan de Araújo Holanda Guerra
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Aminadabe Barbosa de Sousa
Centro Universitário Estácio do Ceará

À primeira mulher negra a se formar
engenheira no Brasil: Enedina Alves Marques.

AGRADECIMENTOS

É uma sensação estranha e maravilhosa poder escrever os agradecimentos da monografia. Primordialmente, meus maiores agradecimentos vão aos meus pais, Cristina e Jair. Tenho o privilégio de ser filha de dois seres humanos incríveis que sempre fizeram tudo o que estava ao alcance deles para me proporcionar amor, segurança e conforto. Sou muito grata pela dedicação dos meus pais aos meus estudos. Do Maternal à Universidade, sempre tive o apoio deles em todas as etapas de maneira incondicional e amorosa. Esse diploma é tão deles quanto meu.

Outras pessoas também foram fundamentais para a minha subsistência, educação e formação. Falo de meus avós, Raimunda (*in memorian*) e Assis, Lenir e Aderaldo, pessoas que são meu refúgio de amor e carinho, meu muito obrigada pelas orações e incentivos.

Agradeço também aos meus amados irmãos, Jailson e Júnior. A busca por ser um bom exemplo pra eles me dá muita força nos momentos de dificuldade.

Sou grata à minha família: tias, tios, primas e primos, que me encheram de conhecimento social e me proporcionaram grandes momentos de descontração. Agradeço às instituições Colégio Mirtes Soares, Centro Educacional Carvalho Barbosa e Colégio Jim Willson, pelo acolhimento ambiente de estudo e aprendizado. Aqui faço uma menção especial ao Centro Federal de Educação Tecnológica do Ceará (antigo Cefet atual IFCE), onde realizei meus estudos de nível médio, técnico e iniciei o superior, e que por muitas vezes não foi a segunda, mas a primeira casa. Lá para mim é solo sagrado da educação.

Tenho orgulho de fazer parte da maior empresa do Nordeste Brasileiro, a Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (Chesf), lugar onde nasci como profissional, atuando como técnica em Telecomunicações. Agradeço aos meus colegas pelo companheirismo e conhecimento partilhado, em especial a: Afonso Freire, Roberto Silva, Romualdo, Agenor, Sílvia Luzia, Sheyla Lins, Alexandre Jansen, Walter Gadelha, Saulo Caetano, Julio Christian, Gustavo Paredes, Mota, Luciano Freitas, Luciana Fonseca e Joseneide (*in memorian*).

Agradeço fortemente aos professores: Nena, Plínio, Ieda, Eudes, Nonato Estevão, Benedita, Janaína Cruz, Atslands, Alex Dourado, Uchôa, Yuri, Sobral (*in memorian*), Gardênia, Marcos e Guilherme, por todo o conhecimento compartilhado e pelo estímulo na busca insaciável do saber. Ao professor João Batista, meu orientador, meu muito obrigada pela paciência e estímulo na conclusão do trabalho.

Não é possível concluir um curso superior sem a ajuda de bons colegas de turma e aqui destaco: Matheus Lima, Ogeniz, Clarissa Arraes, Isac Lira, Thiago Duarte, Rodrigo Mesquita e Dario. Meu muito obrigada pelo compartilhamento de saberes e coleguismo.

Finalmente, um agradecimento especial aos meus amigos e fiéis escudeiros de caminhada. Aos amigos Marissa, Atália, Jack, André, Marciel, Leandro e Lucas, agradeço por todos os risos, confiança, cervejas e apoio durante os maus momentos. À minha grande amiga Juliana Chagas meu muito obrigada pelas horas de conversa, por me fazer acreditar em mim mesma, por me estimular a sempre pensar além e embarcar nas minhas idéias mais malucas. Às Interferômicas, Gabriela e Natália, meu agradecimento mais que especial pela bela amizade construída a partir do coleguismo de sala de aula e desenvolvida nos corredores e cantinas. Ao meu grande amigo Jonael, agradeço pelo apoio incondicional e correção atenciosa deste trabalho e cujo amor me fortalece a cada momento e me enche de alegria. As experiências de vida compartilhadas com as pessoas aqui citadas me tornaram a mulher que eu sou hoje e sou muito grata a todas e todos que fazem parte da minha história.

Nenhuma conquista é solitária e nenhuma vitória alcançada é alegre se não tiver com quem partilhar. Ainda bem que eu sou uma pessoa amada e amo bastante. Sigo no meu principal interesse da vida: amar e mudar as coisas.

“Você não sente nem vê
Mas eu não posso deixar de dizer, meu amigo
Que uma nova mudança em breve vai acontecer
E o que há algum tempo era jovem novo
Hoje é antigo
E precisamos todos rejuvenescer”, Belchior.

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo realizar o estudo de caso de uma rede óptica WDM com desempenho limitado pela dispersão cromática presente nas fibras ópticas G.652 que atuam como meio de transmissão dos dados. Através de simulações no *software OptiSystem*, criaram-se cenários de estudos de métodos de correção desse efeito dispersivo através da mudança da modulação do sinal e inserção de trechos de fibras compensadoras de dispersão (DCF) ao longo da linha de transmissão. Quatro condições de ensaio foram explorados: sem correção de dispersão, com agregação do trecho de DCF somente na transmissão (pré-compensação), parte na transmissão e parte na recepção (compensação simétrica) e integralmente na recepção do fluxo de dados (pós-compensação). Além disso, cada modo teve o comportamento da qualidade do sinal verificado ao se modular o bit de luz com codificação NRZ e RZ. Com o tamanho do trecho de DCF calculado para cada enlace da rede testada, as simulações ambientadas com compensação simétrica da dispersão e com modulação RZ demonstraram baixa taxa de erro de bit (BER), satisfazendo a condição requerida para a taxa de dados de 10 Gb/s. O estudo demonstra que o uso de técnicas de compensação da dispersão cromática com incorporação de trechos de DCF são bastante eficientes para a melhoria do desempenho de redes de alta velocidade, viabilizando o incremento da largura de banda em redes ópticas mesmo quando apresentam cabos antigos que não tenham sido fabricados com parâmetros constitutivos específicos para este fim.

Palavras-chave: Rede WDM. Dispersão Cromática. Compensação de Dispersão. Fibra Compensadora de Dispersão (DCF).

ABSTRACT

The purpose of this project to carry out a relevant study of the WDM optical network with limited performance by the chromatic dispersion present in the G.652 optical fibers which perform as means data transmissions. Through the simulations into the OptiSystem software, are created experiments set of methods of correction this dispersive effect through the exchange of modulation of the insert signal of stretch of the dispersion compensating fiber (DCF) along of the transmission line. Four conditions of test were explored: without correction, with agreement of the DCF trek only in transmission (pre-compensating), part in the transmission and part in the reception (symmetric compensation) and full in reception of the data flow (post-compensation). Moreover, each mode had its own behavior signal quality checked when the light bit was modulated with condition NRZ and RZ. With the size of the DCF stretch calculated to each part of the tested network, the practice test environment with symmetrical compensating of the dispersion and also with modulation RZ have shown bit error rate (BER), pleasing the condition required to the data rate of 10 Gb/s. These considerations have shown that the use of the technical of the dispersion chromatic compensating with DCF stretch entry are very efficient to the improvement of the high speed net performances and making viable the increasingly the width of the bandwidth in optical networks, even though when they have shown old cables which had not been manufactured in specific parameters constitutive to this purpose.

Keywords: WDM Network. Chromatic Dispersion. Dispersion Compensation. Dispersion Compensating Fiber (DCF).

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Confinamento da luz por reflexão interna total.....	18
Figura 2 – Constante de propagação normalizada b em função de V para alguns modos de baixa ordem.....	21
Figura 3 – Contribuição da Dispersão Material e da Dispersão de Guia de Onda para a Dispersão Total numa fibra monomodo padrão.	24
Figura 4 – Designação das bandas de espectrais utilizadas nas comunicações por fibras ópticas	26
Figura 5 – Implementação de uma rede WDM típica contendo vários amplificadores ópticos	27
Figura 6 – Padrões de código NRZ e RZ para a sequencia de dados 1010110.....	27
Figura 7 – Janelas de transmissão de baixa perda em fibras de sílica com detalhe de aplicação da técnica WDM na banda C.....	29
Figura 8 – Três configurações possíveis de um EDFA: (a) bombeio codirecional; (b) bombeio contradirecional; (c) bombeio duplo.....	300
Figura 9 – Espectro de absorção ou ganho de um EDFA cujo núcleo foi dopado com germânio.	31
Figura 10 – Diagramas de olho típico para sistemas com sinais modulados em (a) NRZ e (b) RZ.....	32
Figura 11 – Estrutura geral e funções do modelo de referência OSI de sete camadas.....	33
Figura 12 – Ilustração da diferença entre camada física e camada óptica.....	34
Figura 13 – Topologia física de ligação da rede óptica a ser projetada.....	35
Figura 14 – Caminhos ópticos principais (retas contínuas) e de proteção (retas pontilhadas) da rede simulada.....	36
Figura 15 – Esquemático do teste para os enlaces principais.....	38
Figura 16 – Configuração de teste para os enlaces de proteção.....	39
Figura 17 – Gráfico representativo da análise do valor de Q para diferentes tipos de modulação utilizada nos enlaces principais	42
Figura 18 – Gráfico da análise da BER para diferentes tipos de modulação utilizada nos enlaces direto.....	42
Figura 19 – Gráfico da influência da compensação de dispersão cromática no fator Q medido nos enlaces principais	44

Figura 20 – Gráfico da influência da compensação de dispersão cromática na BER medida nos enlaces principais.....	44
Figura 21 – Esquemático da simulação utilizada para teste dos enlaces de proteção.....	51
Figura 22 – Configuração interna do subsistema de RX.....	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros de SMF e DCF.....	37
Tabela 2 – Valores de comprimento das fibras utilizadas e seus respectivos valores de atenuação.....	37
Tabela 3 – Trajetórias dos caminhos ópticos de proteção testados.....	39
Tabela 5 – Média da BER dos canais, nos enlaces principais da rede óptica, de acordo com a configuração de compensação e modulação utilizada.....	41
Tabela 6 – Média dos valores do fator Q e BER aprovados para os enlaces de proteção A-B, B-C e C-D.....	45
Tabela 7 – Média dos valores do fator Q e BER aprovados para o enlace de proteção	45
Tabela 8 – Valores dos ganhos dos amplificadores EDFA e comprimentos de DCF e SMF utilizados na configuração dos testes.....	50
Tabela 9 – Média do fator Q dos canais, nos enlaces de proteção, de acordo com a configuração de compensação e modulação utilizada.....	52
Tabela A.1 – Valores dos ganhos dos amplificadores EDFA e comprimentos de DCF e SMF utilizados na configuração dos testes.....	50
Tabela 10 – Média da BER dos canais, nos enlaces de proteção, de acordo com a configuração de compensação e modulação utilizada.....	53

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ASE	Amplified spontaneous emission
BER	Bit Error Rate
DCF	Dispersion Compensating Fiber
DEMUX	Demultiplexador
DFA	Doped Fiber Amplifier
DWDM	Dense-Wavelength Division Multiplexing
EDFA	Erbium-Doped Fiber Amplifier
FEC	Forward Error Correction
FWM	Four Wave Mixing
GVD	Group Velocity Dispersion
ITU-T	Telecommunication Standardization Sector of International Telecommunications Union
ISI	Intersymbol Interference
MUX	Multiplexador
NRZ	Non-Return Zero
NZDSF	Non-Zero Dispersion-Shifted Fiber
OOK	On-Off Keying
PMD	Polarization Mode Dispersion
RZ	Return Zero
RX	Receptor
SMF	Single Mode Fiber
SOA	Semiconductor Optical Amplifier
SRS	Stimulated Raman Scattering
TX	Transmissor
WAN	Wide Area Network
WDM	Wavelength Division Multiplexing

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	CONCEITOS FUNDAMENTAIS.....	18
2.1	Fibras ópticas: efeitos lineares e dispersão	18
2.1.1	<i>Propagação de luz em uma fibra monomodo</i>	<i>19</i>
2.1.2	<i>Dispersão em uma fibra monomodo e técnicas de compensação.....</i>	<i>22</i>
2.2	Componentes de WDM.....	26
2.2.1	<i>Transmissor óptico.....</i>	<i>27</i>
2.2.2	<i>Multiplexador e demultiplexador de comprimento de ondas.....</i>	<i>28</i>
2.2.3	<i>Amplificador Óptico.....</i>	<i>29</i>
2.2.4	<i>Recepção óptica e análise do desempenho</i>	<i>31</i>
2.3	Rede WDM – Camada Óptica	33
3	SIMULAÇÃO DA REDE ÓPTICA	35
3.1	Topologia da rede WDM estudada e metodologia.....	35
3.2	Simulação dos enlaces principais	37
3.3	Simulação dos enlaces de proteção.....	39
4	ANÁLISE DOS RESULTADOS	40
4.1	Resultados dos testes nos enlaces diretos.....	40
4.1.1	<i>Modulação do sinal</i>	<i>41</i>
4.1.2	<i>Esquemas de compensação de dispersão com DCF.....</i>	<i>43</i>
4.2	Resultados dos testes dos enlaces de proteção	44
5	CONCLUSÕES.....	47
	REFERÊNCIAS	49
	APÊNDICE A – Valores dos componentes utilizados nos testes dos enlaces principais	50
	ANEXO B – Configuração do teste para os enlaces de proteção.....	51
	ANEXO C – Resultados dos testes dos enlaces de proteção.....	52

1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda por aumento na taxa de dados desafia o desenvolvimento de técnicas capazes de aumentar a eficiência da largura de banda proporcionada pela comunicação por fibras ópticas. Nesse sentido, a multiplexação por divisão de comprimento de onda (*Wavelength Division Multiplexing* – WDM) surgiu como possibilidade ao viabilizar que sinais oriundos de diferentes fontes ópticas e em diferentes comprimentos de onda sejam combinados e enviados simultaneamente numa mesma fibra. Entretanto, o sinal sofre distorções ao longo de sua propagação no meio vítreo capazes de comprometer sua inteligibilidade.

De forma geral, os principais fenômenos que modificam o sinal propagante numa fibra óptica são a atenuação e a dispersão: esta faz com que haja um alargamento no pulso que trafega em seu interior, causando uma limitação na quantidade de bits de informação transmitidos num período (SENIOR, 2009), enquanto aquela reduz o alcance do sinal. Também chamados de efeitos lineares, esses fatores dependem de aspectos de fabricação da fibra e podem ser mensurados através do coeficiente de atenuação e coeficiente de dispersão, parâmetros que precisam ser conhecidos no projeto de um sistema óptico. Os cabos normalmente utilizados seguem padronizações baseadas em recomendações do Setor de Normalização de Telecomunicações da União Internacional de Telecomunicações (*Telecommunication Standardization Sector of International Telecommunications Union* – ITU-T) e nesse trabalho será utilizado a recomendação G.652.

Na rede que será estudada ao longo dessa monografia, a janela de transmissão será em 1550 nm. A G.652 apresenta um valor de coeficiente de dispersão máximo da ordem de 17 ps/(nm·km) para esse comprimento de onda, o que pode vir a se tornar um limitante de acordo com o comprimento e taxa de dados do enlace. Para lidar com essa condição, uma alternativa seria a substituição do meio por fibras de dispersão deslocada não nula (*non-zero dispersion-shifted fiber* – NZDSF) G.655. Entretanto, o custo para substituição dos cabos é bem superior ao custo da realização de compensação da dispersão na fibra que se tem.

O objetivo geral do trabalho é realizar uma análise nos requisitos necessários para implantação de uma rede WDM de quatro estações, com tráfego de quatro canais a 2,5 Gb/s cada, interligada via cabo G.652 numa topologia física em anel. Serão feitos balanços das condições de atenuação e dispersão de cada enlace da trama de modo a atingir uma qualidade mínima especificada. A rede será simulada através do *software OptiSystem* e será averiguado o uso de fibras compensadoras de dispersão (*dispersion compensating fibers* – DCF) como

principal método para estabilizar a dispersão da fibra em uso.

Para realizar a escolha dos equipamentos que melhor se adequem ao atendimento dos requisitos solicitados no projeto de uma rede óptica, é necessário que se elenque os prováveis fatores limitantes. No caso de uma rede que atenda uma extensa área geométrica (*wide area network* – WAN), primeiramente deve-se garantir que o sinal chegue ao receptor com nível de potência adequado através do controle da atenuação e, caso necessário, utilização de amplificadores. Em se tratando de redes de alta velocidade, este não é o único fator e é importante que se observe quando o alargamento do pulso comprometerá a performance do sistema. Ao longo dos meus escritos, será mostrado que a qualidade do desempenho da rede pode ser melhorada ao utilizar técnicas de compensação da dispersão cromática inerente ao meio óptico.

O *software* simulador *OptiSystem* será o ambiente dos testes para confrontar o desempenho do sistema sem compensação ao do sistema usando DCF como método de compensação de dispersão em três configurações distintas: pré-compensação, pós-compensação e compensação simétrica ou mista. Além disso, também é verificada a qualidade do sinal quando se usa codificação não-retorno a zero (*non-return zero* – NRZ) e retorno a zero (*return zero* – RZ) com ciclo de atuação (*duty cycle*) de 50% e 33%. Cada esquema de simulação será avaliado pelos valores da taxa de erro de bits (*bit error rate* – BER) e fator Q (abertura do diagrama de olho). Os resultados serão confrontados de modo a se obter o melhor método para estruturação da rede óptica proposta.

O texto é dividido em cinco capítulos de forma a particionar as informações e facilitar o entendimento dos resultados alcançados. Na Seção 1, Introdução, é iniciado o assunto, com a apresentação dos objetivos gerais e específicos do trabalho. A Seção 2, Conceitos Fundamentais, apresenta a teoria que permite o entendimento do objeto de estudo como, por exemplo: o estudo das características dos efeitos lineares e dispersivos de fibras ópticas; componentes WDM, estudo das codificações do sinal e análise das figuras de mérito. É mostrado ao longo da Seção 3, Simulação da Rede Óptica, a metodologia utilizada para a construção dos cenários de teste no *software OptiSystem*, apontando os valores e características dos componentes no programa. Na Seção 4, Análise dos Resultados, são sintetizados os resultados das simulações e, finalmente, na Seção 5, Conclusões, são descritas as deduções e realizados apontamentos sobre a solução da problemática central do trabalho, além de feitas proposições para estudos futuros.

2 CONCEITOS FUNDAMENTAIS

Para garantir que um sinal óptico transmitido chegue de maneira inteligível ao destino, é necessário que haja mecanismos que assegurem sua integridade, ou seja, o canal deve fornecer características que possibilitem o sinal chegar com potência adequada e sem erros.

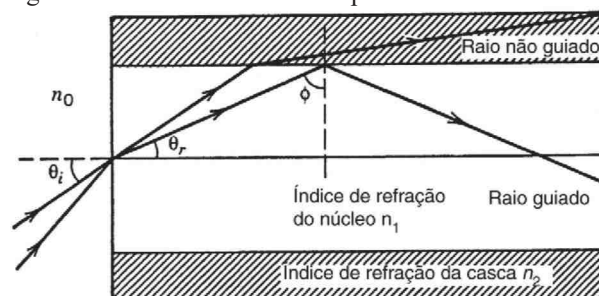
Na Seção 2.1 é feito um estudo sobre o meio de comunicação, suas características e limitações. Após a explicação matemática do confinamento da luz, é dada ênfase nas principais limitações estudadas no projeto em estudo: *atenuação e dispersão da fibra*.

Ao longo da Seção 2.2 são apresentados componentes que podem ser agregados à rede para melhorar as condições do sinal. Também é mencionado a relevância do formato da informação transmitida como fator utilizado na redução de erros. Serão apresentadas codificações do tipo NRZ e RZ, que são processos de *chaveamento do tipo liga e desliga (on-off keying – OOK)*. Finalmente, na Seção 2.3 é citada como, no geral, se organiza uma rede e apresentado o conceito de camada óptica.

2.1 Fibras ópticas: efeitos lineares e dispersão

A fibra óptica é uma estrutura cilíndrica, constituída por um material vítreo especialmente fabricado para guiar o sinal luminoso que se deseja transmitir. O fenômeno físico de *reflexão total* do sinal ocorre graças à diferença nos índices de refração do núcleo e da casca, conforme ilustrado na FIGURA 1, o que torna possível o aprisionamento da luz no guia.

Figura 1 – Confinamento da luz por reflexão interna total.



Fonte: (AGRAWAL, 2014, p. 30).

Fazendo uma análise de óptica geométrica, o raio incidente com ângulo θ_i na interface fibra-ar refrata gerando o raio com ângulo θ_r no interior do núcleo de acordo com a equação de Snell¹ (AGRAWAL, 2014):

¹ Mais detalhes sobre como a Teoria de Snell se aplica à óptica geométrica em fibras ópticas em (KEISER, 2014)

$$n_0 \sin \theta_i = n_1 \sin \theta_r, \quad (2.1)$$

sendo n_0 o índice de refração do espaço livre, n_1 o índice de refração do núcleo da fibra e θ_r o ângulo do raio refratado.

Como o índice de refração da casca n_2 é ligeiramente menor que o índice de refração do núcleo n_1 , substituindo os valores em (2.1), é possível calcular todos os raios emitidos com ângulos superiores a um ângulo crítico θ_c :

$$\theta_c = \sin^{-1} \left(\frac{n_2}{n_1} \right) \quad (2.2)$$

e darão origem a um raio que não refratará para a casca, ou seja, ficará confinado no interior do núcleo da fibra ao longo de todo o comprimento desta².

2.1.1 Propagação de luz em uma fibra monomodo

Ao longo do trajeto de um pulso óptico na fibra, o sinal é enfraquecido devido à atenuação e distorcido devido à dispersão. De uma maneira geral, o sinal emitido com uma potência $P(0)$ inicial regride exponencialmente ao longo de um comprimento z da fibra, de forma que:

$$P(z) = P(0) e^{-\alpha_p z}, \quad (2.3)$$

onde α_p é o coeficiente de atenuação da fibra, mensurado em km^{-1} . Para facilitar o cálculo da atenuação, torna-se melhor definir a atenuação em decibéis por quilômetro, de forma que (KEISER, 2014):

$$\alpha(dB/km) = \frac{10}{z} \log \left[\frac{P(0)}{P(z)} \right] = 3,343 \alpha_p (km^{-1}). \quad (2.4)$$

Portanto, α é o parâmetro chamado de *perda da fibra* ou *atenuação da fibra* e depende de diversos fatores³.

A propagação da luz através da fibra é bem mais complexa do que uma análise puramente geométrica e exige entendimento das equações de Maxwell que relacionam os campos elétricos e magnéticos⁴:

e (AGRAWAL, 2014).

² Exemplo dado para fibras índice degrau multimodo mas que pode ser expandido para fibras de índice gradual guardadas as devidas particularidades. Neste trabalho é dado ênfase para fibras de índice degrau monomodo.

³ Maiores informações em (KEISER, 2014).

⁴ Assumindo material dielétrico, linear e isotrópico, sem corrente ou cargas livres.

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}; \quad (2.5)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}; \quad (2.6)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = 0 \therefore \vec{D} = \epsilon \vec{E}; \quad (2.7)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \therefore \vec{B} = \mu \vec{H}. \quad (2.8)$$

Onde \vec{E} é o vetor de intensidade do campo elétrico, \vec{B} é o vetor de densidade de campo magnético, \vec{H} é o vetor de intensidade de campo magnético, \vec{D} é vetor de densidade de fluxo elétrico, ϵ e μ são, respectivamente, a permissividade e a permeabilidade do meio.

Um campo eletromagnético de luz monocromática de frequência angular ω pode ter sua trajetória ao longo do eixo z (seguindo o comprimento da fibra) descrito como $e^{j(\omega t - \beta z)}$, onde β é o principal parâmetro para descrição dos modos de propagação e relaciona-se à constante de propagação $k = 2\pi/\lambda$. De acordo com as condições de contorno entre a casca e o núcleo, respeitando a geometria da fibra, adota-se coordenadas cilíndricas para chegar nas equações (KEISER, 2014)

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 E_z}{\partial \phi^2} + q^2 E_z = 0, \quad (2.9)$$

$$\frac{\partial^2 H_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial H_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 H_z}{\partial \phi^2} + q^2 H_z = 0, \quad (2.10)$$

sendo $q^2 = k^2 - \beta^2$. Apesar de elas serem independentes, o acoplamento de E_z e H_z depende da satisfação das condições de contorno. O procedimento normalmente utilizado para resolução dessas equações é o uso das funções de Bessel e resulta num número finito de modos na faixa (KEISER, 2014):

$$n_2 k = k_2 \leq \beta \leq k_1 = n_1 k. \quad (2.11)$$

Surgem modos híbridos chamados de HE (campo magnético transversal predominante) ou EH (campo elétrico transversal predominante). Para cada modo, é visto que é comum nomear β_{mn} , onde para cada solução m existem $n = 1, 2, 3 \dots$ e os modos são chamados de HE_{mn} ou EH_{mn} . No caso de $m = 0$, chama-se TE_{0n} ou TM_{0n} .

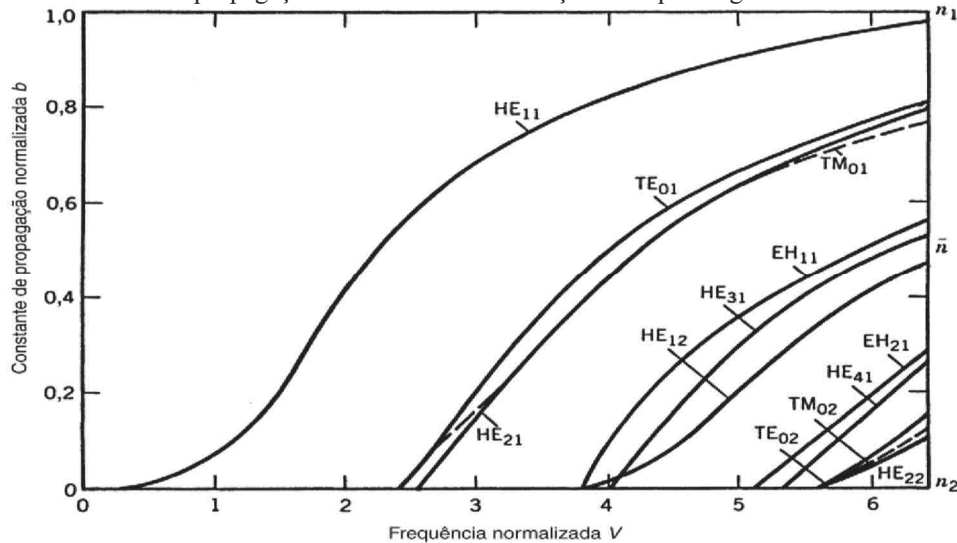
Outro parâmetro a ser observado na condição de contorno para definir a quantidade de modos que podem ser propagados em uma fibra é a frequência normalizada V , também chamada de parâmetro V , denotada como (KEISER, 2014):

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} (n_1^2 - n_2^2)^{1/2}, \quad (2.12)$$

em que a é o raio do núcleo da fibra. Essa quantidade é representada no gráfico mostrado na FIGURA 2, em função de uma constante de propagação normalizada b dada por (KEISER, 2014):

$$b = \frac{(\beta/k)^2 - n_2^2}{(n_1^2 - n_2^2)}. \quad (2.13)$$

Figura 2 – Constante de propagação normalizada b em função de V para alguns modos de baixa ordem.



Fonte: (AGRAWAL, 2014, p.42)

Quando uma fibra suporta diversos modos é chamada de *multimodo*, mas não será abordada neste trabalho. Quando a fibra suporta apenas o modo fundamental HE_{11} , é chamada de *monomodo*. Para tanto, ela precisa garantir que todos os demais modos sejam cortados. Verificando essas condições, escolhe-se os parâmetros de construção (a , n_1 e n_2) de modo que $V \leq 2,405$.

Numa fibra ideal, o modo HE_{11} propaga-se com os dois modos degenerados, ortogonalmente polarizados e com a mesma constante de propagação. Entretanto, nas fibras reais existem imperfeições que podem tornar o núcleo assimétrico e causar diferentes índices de refração entre os eixos de propagação, fazendo com que cada modo viaje numa velocidade de fase própria. A diferença entre os índices de refração é chamada de *birrefringência* da fibra e é dada por (KEISER, 2014):

$$B_f = n_x - n_y. \quad (2.14)$$

Esta característica comporta-se de maneira aleatória, variando direção e magnitude de acordo com as alterações sofridas pelo núcleo ao longo do comprimento da fibra, e causa alargamento temporal do pulso viajante. Esta situação “[...]recebe o nome de *dispersão de modo*

de polarização (*polarization mode dispersion* – PMD) e se torna um fator limitante para sistemas de comunicação óptica que operam em altas taxas de bits.” (AGRAWAL, 2014, p. 45). Contudo, esse fenômeno não entrará em uma discussão mais aprofundada neste trabalho.

2.1.2 Dispersão em uma fibra monomodo e técnicas de compensação

O principal efeito que causa distorção numa fibra monomodo é a *dispersão intramodal*, fenômeno que causa um alargamento no pulso óptico (modo único) ao longo da sua trajetória na fibra e é originado de dois principais fatores. Primeiramente, devido a variação no índice de refração do núcleo em função do comprimento de onda (*dispersão material*). Segundo, pelo fato de que parte da potência emitida se propaga pela casca, fazendo um trajeto mais rápido que a luz que se propaga no núcleo, gerando a *dispersão de guia de onda*.

Dada uma fibra de comprimento L , pode-se calcular o tempo T para propagação de um pulso ao longo da distância conhecendo a *velocidade de grupo* dada por (AGRAWAL, 2014):

$$v_g = \left(\frac{\partial \beta}{\partial \omega} \right)^{-1}. \quad (2.15)$$

Fazendo $T = L/v_g$, percebe-se que o tempo varia de acordo com a frequência angular, ou seja, cada modo particular da fibra leva um tempo diferente para percorrê-la. Indo mais a fundo, é possível fazer uma análise da variação do tempo, ΔT , com base na variação do comprimento de onda de uma fonte óptica, $\Delta \lambda$, para melhor compreender como o pulso se alarga no tempo. Sabendo que $\omega = 2\pi c/\lambda$ e $\Delta \omega = (-2\pi c/\lambda^2)\Delta \lambda$, tem-se (AGRAWAL, 2014):

$$\Delta T = \frac{\partial T}{\partial \omega} \Delta \omega = \left[\frac{\partial}{\partial \omega} \left(\frac{L}{v_g} \right) \right] \left[\left(\frac{-2\pi c}{\lambda^2} \right) \Delta \lambda \right] = L \left(\frac{\partial^2 \beta}{\partial \omega^2} \right) \left(\frac{-2\pi c}{\lambda^2} \right) \Delta \lambda, \quad (2.16)$$

em que c é a velocidade da luz no vácuo.

O fator $\left(\frac{\partial^2 \beta}{\partial \omega^2} \right)$ é chamado de β_2 e é conhecido como *parâmetro da velocidade de grupo* (*group velocity dispersion*, também chamado de parâmetro GVD) e seu significado físico determina “[...]o quanto de um pulso de luz se alarga à medida que atravessa uma fibra óptica” (KEISER, p.123). Reescrevendo a expressão anterior, o atraso de grupo fica:

$$\Delta T = L \beta_2 \left(\frac{-2\pi c}{\lambda^2} \right) \Delta \lambda. \quad (2.17)$$

É então determinado que a *dispersão*, D , é (AGRAWAL, 2014):

$$D = \beta_2 \left(\frac{-2\pi c}{\lambda^2} \right), \quad (2.18)$$

e quantifica o valor de espalhamento do pulso em função do comprimento de onda. Também chamado de *dispersão cromática* e dispersão de segunda ordem, este coeficiente é medido em picossegundos por nanômetro por quilômetro [ps/(nm·km)]. Este valor agrega as duas causas da dispersão, podendo ser descrito como a soma da dispersão material, D_M , com a dispersão de guia de onda, D_W (AGRAWAL, 2014):

$$D = D_M + D_W, \quad (2.19)$$

Nomeando o índice de refração de grupo do material de n_{2g} , D_M e D_W podem ser definidos como (AGRAWAL, 2014):

$$D_M = -\frac{2\pi}{\lambda^2} \frac{dn_{2g}}{d\omega} = \frac{1}{c} \frac{dn_{2g}}{d\lambda} \quad \text{e} \quad (2.20)$$

$$D_W = -\frac{2\pi\Delta}{\lambda^2} \left[\frac{n_{2g}^2}{n_2\omega} \frac{Vd^2(Vb)}{dV^2} + \frac{dn_{2g}}{d\omega} \frac{d(Vb)}{dV} \right], \quad (2.21)$$

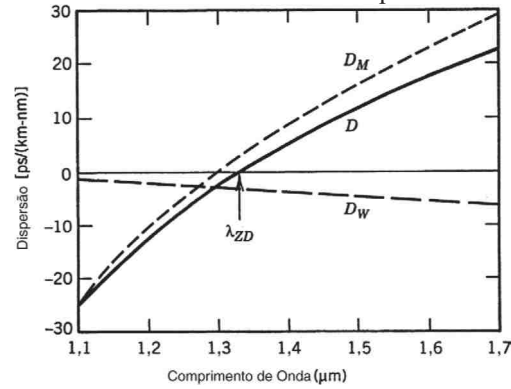
onde $\Delta = \frac{(n_1 - n_2)}{n_1}$ representa o índice de diferenças núcleo-casca. Analisando as equações dos coeficientes, conclui-se que a dispersão material depende do material que compõe o núcleo (valor do índice de refração em função do comprimento de onda) enquanto a dispersão de guia de onda é determinada por características como o raio do núcleo e da diferença de índices.

O comprimento de onda que proporciona $\frac{dn_{2g}}{d\lambda} = 0$ e conseqüente $D_M = 0$, é chamado de *comprimento de dispersão zero* (λ_{ZD}), sendo um marco para os valores de D_M , que serão positivos para ondas de comprimento maior e negativos para comprimentos de onda inferiores a λ_{ZD} .

Na FIGURA 3 vê-se o gráfico de magnitude das dispersões em função do comprimento de onda numa fibra com $V = 2,4$. Ao analisar os valores, verifica-se que a dispersão de guia de onda comporta-se de modo a realocar o valor de λ_{ZD} na dispersão total em relação à dispersão material. Dessa forma, verifica-se que no caso da necessidade de alterar o índice de dispersão é mais elementar modificar o D_W , podendo projetar *fibras com dispersão deslocada* (fibras com baixa dispersão em uma dada região de operação) e *compensadoras de dispersão* (fibras que possuem um coeficiente de dispersão negativo). Para o caso da fibra abordada no gráfico, a dispersão é nula em aproximadamente 1,31 μm e 17 ps/(nm·km) na janela de 1,55 μm . Quanto maior o valor do coeficiente de dispersão, mais o pulso é alargado

ao percorrer uma dada distancia na fibra óptica, podendo causar erro na inteligibilidade do sinal no receptor.

Figura 3 – Contribuição da Dispersão Material e da Dispersão de Guia de Onda para a Dispersão Total numa fibra monomodo padrão.



Fonte: (AGRAWAL, 2014, P. 51)

Todavia é importante salientar que os efeitos dispersivos não desaparecem completamente para pulsos centrados em λ_{ZD} , porque a dispersão não pode ser anulada em todos os comprimentos de onda nele contido. Os chamados *efeitos de ordem superior* podem ser mensurados a partir do cálculo da *inclinação da dispersão (dispersion slope)* S (AGRAWAL, 2014):

$$S = \frac{dD}{d\lambda} = \left(\frac{2\pi c}{\lambda^2} \right)^2 \beta_3 + \left(\frac{4\pi c}{\lambda^3} \right) \beta_2, \quad (2.22)$$

sendo $\beta_3 = d\beta_2/d\omega = d^3\beta/d\omega^3$ o parâmetro de terceira ordem. Portanto, quando $\beta_2 = 0$, ainda haverá contribuição da dispersão positiva de S na maioria das fibras.

Em projetos WDM, mensurar os valores de dispersão é de fundamental importância para buscar a melhor forma de compensar todos os canais que por ventura tenham a taxa de bits limitada por essa distorção. A taxa de bits, B , máxima alcançada em um comprimento L de fibra pode ser calculado de acordo com a equação (AGRAWAL, 2014):

$$BL|S|(\Delta\lambda)^2 < 1, \quad (2.23)$$

sendo $\Delta\lambda$ a largura espectral da fonte geradora do sinal.

Conforme (RAMASWAMI, SIVARAJAN e SASAKI, 2010, p. 314, tradução nossa) “Dispersão é um efeito cumulativo: quanto maior o enlace, maior a quantidade de dispersão”⁵. Uma técnica possível para abrandar esse efeito negativo de um enlace é a inserção de DCF no caminho da transmissão, de modo que sua dispersão anule a dispersão do enlace

⁵ Texto original: “Dispersion is a cumulative effect: the longer the link, the greater the amount of dispersion.”

total, apesar de cada ponto ao longo da fibra apresentar um valor diferente de zero (KEISER, 2014). Com isso, o comprimento de DCF, L_{DCF} , a ser agregado deve ser relacionado ao comprimento do enlace de transmissão, L_{TX} , de tal forma que:

$$L_{DCF} = \left| \frac{D_{TX}}{D_{DCF}} \right| \times L_{TX} , \quad (2.24)$$

em que D_{TX} e D_{DCF} são as dispersões da fibra de transmissão e da DCF, respectivamente.

A DCF é projetada de modo a apresentar dispersão negativa em 1550 nm, com valor de $V \approx 1$, com um diâmetro de núcleo menor que uma fibra monomodo convencional, de tal sorte que suporta um único modo fracamente confinado (BARBOZA, 2004). Para mitigar os efeitos de ordem superior, a inclinação de dispersão da DCF, S_{DCF} , precisa satisfazer (NEHEEDA, PRADEEP e SHAIJA, 2016):

$$S_{DCF} = S_{TX} \frac{D_{DCF}}{D_{TX}} , \quad (2.25)$$

onde S_{TX} é a inclinação de dispersão da fibra de transmissão.

Os principais arranjos de inserção da DCF são:

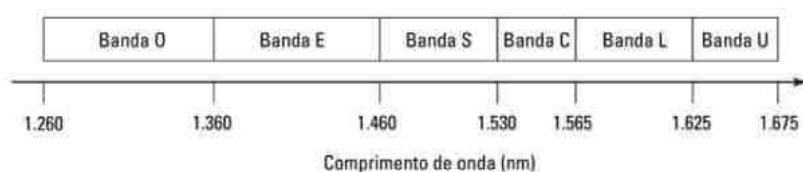
- a) pré-compensação, onde o comprimento de DCF calculado de acordo com (2.24) é posto antes da fibra de transmissão;
- b) compensação simétrica, onde a metade do comprimento de DCF é agregado antes da fibra de transmissão e a outra metade após o enlace;
- c) pós-compensação, onde o comprimento total de DCF é inserido logo após a linha.

Apesar de vantajosa devido a simplicidade de aplicação, é preciso atentar para o fato da DCF possuir uma atenuação mais elevada do que as fibras operacionais comerciais, o que precisa ser levado em consideração no balanço de potência dos enlaces. Com isso, quanto mais longos os trechos, mais amplificação terá que ser feita e, com isso, mais efeitos não-lineares atuarão no trajeto. O método de compensação simétrica tende a ser mais vantajosa por utilizar comprimentos de DCF menores e possibilitar uma distribuição mais equitativa dos efeitos não-lineares causados por altas amplificações. Ao longo dessa monografia, as três técnicas serão aplicadas e os resultados dos desempenhos, confrontados.

2.2 Componentes de WDM

As comunicações por fibras ópticas foram separadas por seis bandas espectrais distintas conforme designadas na FIGURA 4, tendo o intervalo entre 1450-1650 atenuação relativamente baixa e propícia ao tráfego de dados (BANDYOPADHYAY, 2007). A principal janela utilizada por redes WDM é a banda C, que apresenta como principal vantagem uma atuação mais eficiente do amplificador de fibra dopada com érbio (*erbium-doped fiber amplifier* – EDFA), principal elemento utilizado para vencer a atenuação do sinal, bem como de outros elementos de rede.

Figura 4 – Designação das bandas de espectrais utilizadas nas comunicações por fibras ópticas.

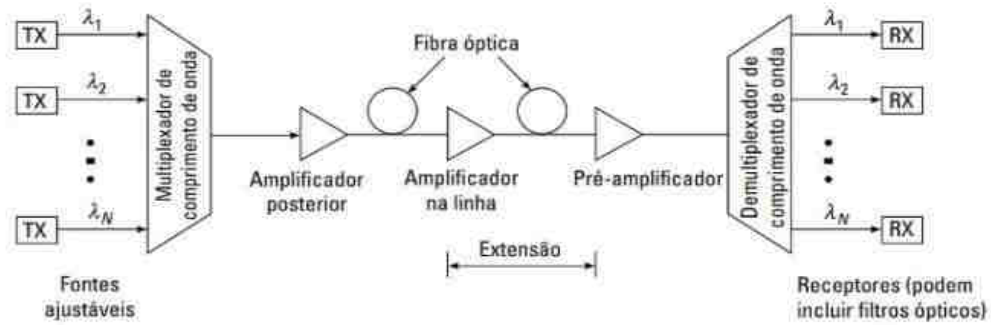


Fonte: (KEISER, 2014, p. 8)

Para entendimento da rede, pode-se verificar inicialmente os elementos que compoem um sistema ponto a ponto. Na FIGURA 5 é possível verificar a formatação típica de um enlace WDM. O primeiro elemento é o transmissor (TX), que é responsável por converter em sinal luminoso os sinais binários emitidos pela fonte. Todos os sinais gerados em comprimentos de onda distintos são então misturados no multiplexador (MUX) de modo que formem um sinal único finalmente emitido⁶. Os amplificadores (posterior, de linha e pré) são elementos capazes de aumentar, em várias etapas do percurso, a potencia do sinal para abrandar a atenuação causada pelo meio. O demultiplexador (DEMUX) funciona de maneira inversa do MUX, separando em várias portas distintas cada sinal de acordo com o valor de seu comprimento de onda. Finalmente, o receptor (RX), realiza a fotodeteção do sinal e gera uma saída elétrica. Adiante, cada um dos componentes será detalhado conforme a maneira que se aplica ao trabalho.

⁶ Os sinais oriundos dos transmissores, em diferentes comprimentos de onda, são comumente chamados de *sinais coloridos*, enquanto o sinal de saída do MUX é chamado de *sinal branco* por representar a mistura de todos os sinais coloridos.

Figura 5 – Implementação de uma rede WDM típica contendo vários amplificadores ópticos.



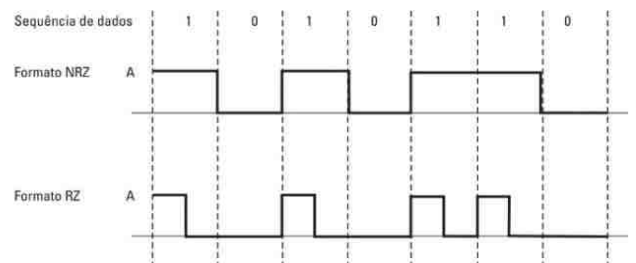
Fonte: (KEISER, 2014, p. 390)

2.2.1 Transmissor óptico

Como dito, o transmissor óptico tem a função de transformar em luz a informação que parte da origem da comunicação. A luz, portanto, é a portadora onde a informação elétrica será modulada. Entretanto, o sinal modulante precisa ter um formato que o codifique. Os códigos binários unipolares NRZ e RZ serão explorados nessa monografia. Esses códigos são ditos unipolares por representar um dos símbolos com pulsos em apenas uma polaridade (positiva ou negativa) e o outro símbolo na ausência de pulso.

O que diferencia o NRZ do RZ é a forma como o pulso ocupa o intervalo de tempo destinado ao símbolo. A FIGURA 6 ilustra como se dá a cifragem de uma mesma mensagem: enquanto no NRZ todo o período do símbolo 1 tem amplitude positiva, no RZ o símbolo 1 fica apenas parte do período, retornando à zero em seguida. Nesse estudo, quando utilizada a codificação RZ, o pulso ocupará metade (50%) ou um terço (33%) do período quando emitir o símbolo 1.

Figura 6 – Padrões de código NRZ e RZ para a sequência de dados 1010110.



Fonte: (KEISER, 2014, p. 203)

A portadora do transmissor é fornecida pela emissão de luz de um *laser* que emite apenas um único modo, numa dada frequência, oferecendo uma largura espectral muito estreita. A combinação da portadora com o sinal codificado pode ser feita de maneira direta, variando a

corrente de injeção do *laser* de acordo com o sinal modulante, ou por meio de modulação externa. Nesse trabalho, será usado o modulador Mach-Zehnder⁷.

2.2.2 Multiplexador e demultiplexador de comprimento de ondas

A recomendação ITU-T G.692 especifica o espaçamento entre frequências para os canais WDM. O estabelecimento da frequência como parâmetro para WDM vem do modo de operação do laser, o qual tem a frequência de emissão como determinante. A diferença de frequência entre os canais WDM foram inicialmente de 100 GHz a partir de 193,100 THz, o que gera uma largura de aproximadamente 0,8 nm para cada sinal independente, nesse trabalho essa será a regra utilizada para configuração dos MUX e DEMUX. Entretanto, a mesma norma também especifica espaçamentos de 50 GHz e 200 GHz⁸. Na FIGURA 7 é mostrado como se comporta a aplicação da técnica dentro do espectro de comprimento de onda.

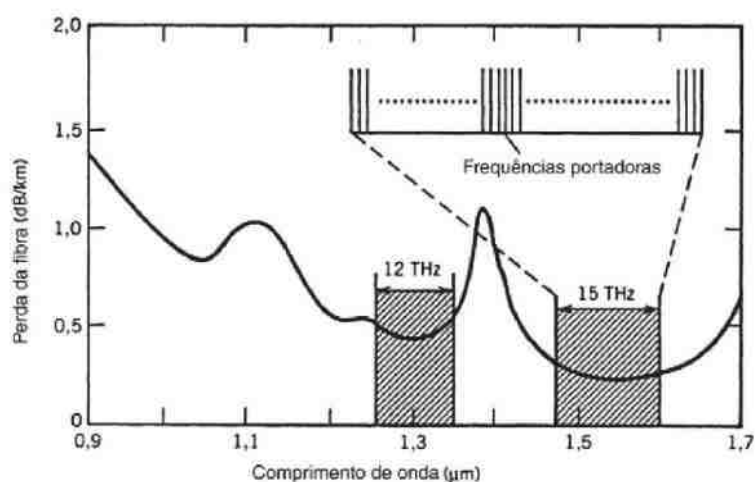
A seleção ou combinação dos canais feitas nos elementos aqui especificados são essencialmente formados por filtros ópticos. Esses filtros possuem basicamente três portas: uma por onde o sinal entra, outra onde o sinal filtrado de acordo com o comprimento de onda sai e outra porta onde o sinal rejeitado sai. No DEMUX, esses filtros são sintonizados em cada um dos canais e são postos em cascata, onde a saída rejeitada entra no filtro seguinte de modo a separar os canais que chegam combinados na entrada até que todos sejam extraídos. No MUX, os filtros agem de forma a combinar os diversos sinais de entrada numa única saída, já que “[...] é possível utilizar o mesmo dispositivo como multiplexador e demultiplexador, dependendo do sentido de propagação, devido à inerente reciprocidade de ondas ópticas em meios dielétricos” (AGRAWAL, 2014, p. 285).

Os filtros utilizados requerem inserção com baixa perda e independente da polarização do sinal. Além disso, suas bandas de passagem devem ser adequadamente largas e planas para acomodar pequenas alterações do comprimento de onda mas estreitas o suficiente para bloquear sinais vizinhos.

⁷ Mais informações em (SENIOR, 2009).

⁸ Atualmente, a recomendação G.694.1 especifica a multiplexação por divisão densa de comprimento de onda (*Dense Wavelength Division Multiplexing* – DWDM) com espaçamentos que variam de 12,5 GHz a 100 GHz.

Figura 7 – Janelas de transmissão de baixa perda em fibras de sílica com detalhe de aplicação da técnica WDM na banda C.



Fonte: (AGRAWAL, 2014, p. 266)

2.2.3 Amplificador Óptico

Para que seja possível percorrer grandes distancias e entregar ao receptor um sinal com potência suficiente para excitá-lo, é necessário aumentar a amplitude do sinal. Até o fim da década de 1980, isso se fazia realizando a regeneração do sinal, ou seja, o pulso óptico passava para o domínio elétrico, amplificado e passava novamente pelo processo de modulação para só então seguir adiante. Isso demandava tempo de processamento e o custo operacional para vários clientes limitava sistemas, tendo em vista que cada regenerador detectava somente uma portadora por vez. O advento dos amplificadores ópticos, tornou possível a regeneração do sinal óptico sem a necessidade de conversão.

São três os principais tipos de amplificadores ópticos:

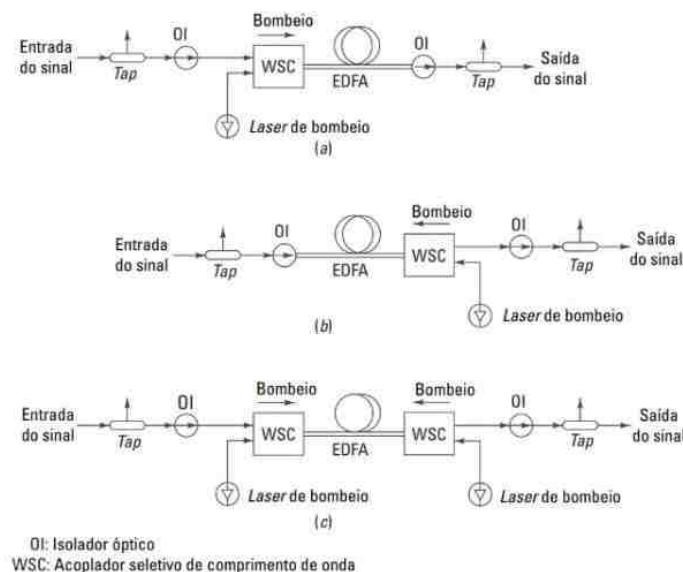
- a) amplificadores a semicondutor (*semiconductor optical amplifier – SOA*), construídos de maneira similar a um diodo *laser*, atua numa estreita faixa de comprimento de onda. Possui uma cavidade ressonante por onde o sinal de entrada passa uma única vez, recebe a energia a partir de uma fonte de corrente elétrica externa e então é amplificado através de emissão estimulada;
- b) amplificador Raman: baseado no *espalhamento Raman estimulado (stimulated Raman scattering – SRS)*, um efeito não-linear consequente da emissão de uma alta potência de bombeio lançada na fibra, a amplificação se dá quando o sinal recebe a transferência de energia do bombeio gerado em um comprimento de

onda ligeiramente inferior;

- c) amplificador de fibra ativa ou fibra dopada (*doped fiber amplifier* – DFA), que utiliza como meio ativo uma fibra óptica dopada com um elemento de terras raras e será melhor relatado adiante.

Ao longo do trabalho, será dada ênfase no amplificador DFA que utiliza érbio como elemento dopante e por isso é chamado de *amplificador a fibra de sílica dopada com érbio* (EDFA), que estará presente nas simulações realizadas. A estruturação interna desse componente de rede óptica pode ser verificada na FIGURA 8, e basicamente é formado por ao menos um laser de bombeio, um acoplador de onda passivo e isoladores ópticos. O laser de bombeio é o que efetivamente fornece a energia óptica para amplificação do sinal e dependendo do modo como esteja direcionado, promove o bombeio codirecional, quando está na mesma direção do sinal de entrada ou contradirecional, quando é inserido no sentido inverso ao do sinal de entrada. Nesse caso, gera-se amplificadores com maiores ganhos enquanto naquele, tem-se amplificadores que apresentam melhor performance de ruído (KEISER, 2014). O bombeio duplo⁹ é utilizado para se conseguir ganhos de potência ainda maiores, ao se combinar a energia de dois lasers. Os acopladores de onda passivo são responsáveis por inserir o sinal de entrada e o de bombeio simultaneamente na fibra dopada enquanto os isoladores ópticos promovem a estabilização do amplificador, suprimindo possíveis reflexões nos conectores.

Figura 8 – Três configurações possíveis de um EDFA: (a) bombeio codirecional; (b) bombeio contradirecional; (c) bombeio duplo.

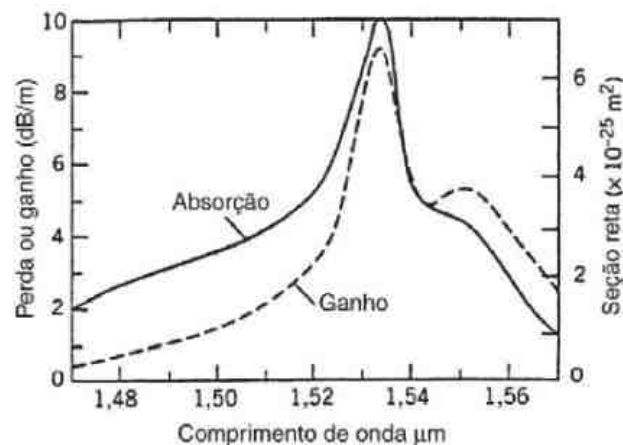


Fonte: (KEISER, 2014, p. 455)

⁹ Em (ROSOLEM, 2005), pode-se verificar a possibilidade de inserção de DCF na estrutura de um EDFA de bombeio duplo.

O processo de amplificação ocorre através de um processo chamado de emissão estimulada¹⁰, quando o sinal excitado pelo bombeio passa pelo meio dopado com érbio, os elétrons transitam para menores níveis de energia e emitem a luz coerente no comprimento de onda do sinal original. Ao mesmo tempo, ocorre a chamada emissão espontânea, em que parte dos elétrons ao decair para níveis de menor energia, geram fótons ruidosos que também são amplificados e se propagam ao longo da fibra. Esse fenômeno é chamado de ruído de emissão espontânea (*amplified spontaneous emission* – ASE). O ganho proporcionado pelo EDFA depende, dentre outros fatores, do nível de dopagem e comprimento da fibra utilizada como elemento ativo, da potência do laser de bombeio e do sinal. Na FIGURA 9 verifica-se o espectro de absorção (ASE) e ganho (emissão estimulada) de um EDFA, onde se vê a boa atuação na banda C.

Figura 9 – Espectro de absorção ou ganho de um EDFA cujo núcleo foi dopado com germânio.



Fonte: (AGRAWAL, 2014, p. 358)

2.2.4 Recepção óptica e análise do desempenho

Percorrido todo o trajeto, o sinal finalmente chega ao receptor e faz-se necessário a conversão do pulso luminoso em corrente elétrica, para que então os dados transmitidos sejam recuperados. Nesse trabalho, o principal elemento para realização da recepção é o fotodetector *pin*. Ele apresenta características que possibilitam essa detecção da potência óptica recebida como, por exemplo: sensibilidade de atuação no comprimento de onda emitido pela fonte; baixo ruído de inserção; tamanho compatível a núcleo da fibra acoplada e velocidade de resposta à taxa de dados desejada.

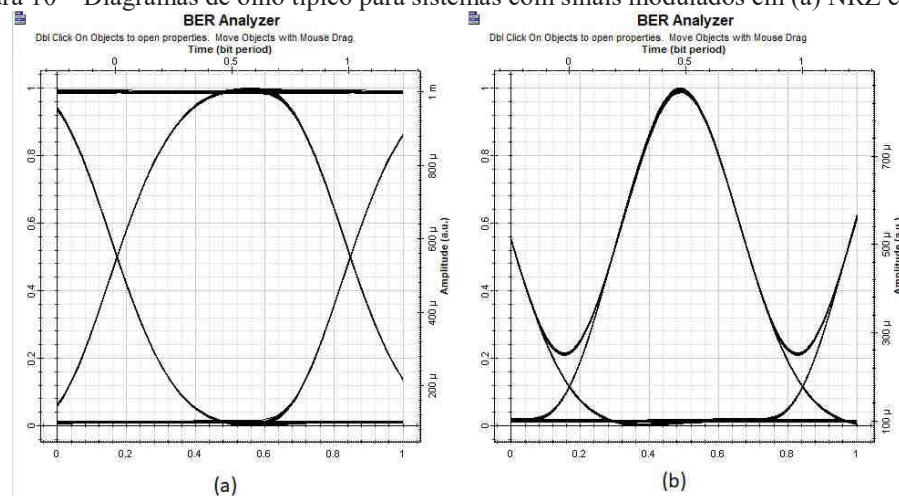
¹⁰ Maiores informações e detalhamento do fenômeno dos níveis de energia em: (AGRAWAL, 2014, cap. 7), (KEISER, 2014, cap. 11) (RAMASWAMI, SIVARAJAN e SASAKI, 2010, cap. 10).

O sinal resultante da saída do fotodetector passa por uma filtragem passa-baixa, de modo a eliminar espúrios de baixas frequências e então chega ao final, pronto para ser verificado. Uma das maneiras de aferir a qualidade de um canal é a medição da BER, que é a razão entre o número de bits recebidos com erro e o número de bits transmitidos. Essa medição é estatística e seu valor depende do tempo de observação necessário para percepção de 100 erros ocorridos. Um método válido para reduzir o tempo de observação é a técnica de medição do fator Q onde se aumenta a probabilidade de erros reduzindo o limite do receptor. A equação a seguir demonstra a relação entre o fator Q e a BER (KEISER, 2014):

$$BER = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{Q^2}{2}}. \quad (2.26)$$

O resultado é exibido sob a forma de um diagrama de olho, que apresenta um padrão que auxilia na análise das condições de desempenho do canal. As principais características são: a largura de abertura do olho, que indica o tempo em que o pulso analisado é amostrado sem a interposição de pulsos vizinhos, ou seja, sem interferência intersimbólica (*intersymbol interference* – ISI); a altura da abertura do olho, que indica a imunidade ao ruído e a simetria no padrão do olho, demonstrando a ausência de efeitos não-lineares. As linhas superior e inferior indicam os limites para os níveis lógicos 1 e 0. Para sinais modulados em NRZ, o símbolo 1 se mantém constante durante todo o período enquanto em RZ, esse valor varia. Com isso verifica-se diferença nos diagramas exibidos para sinais com codificações distintas, conforme ilustrado na FIGURA 10.

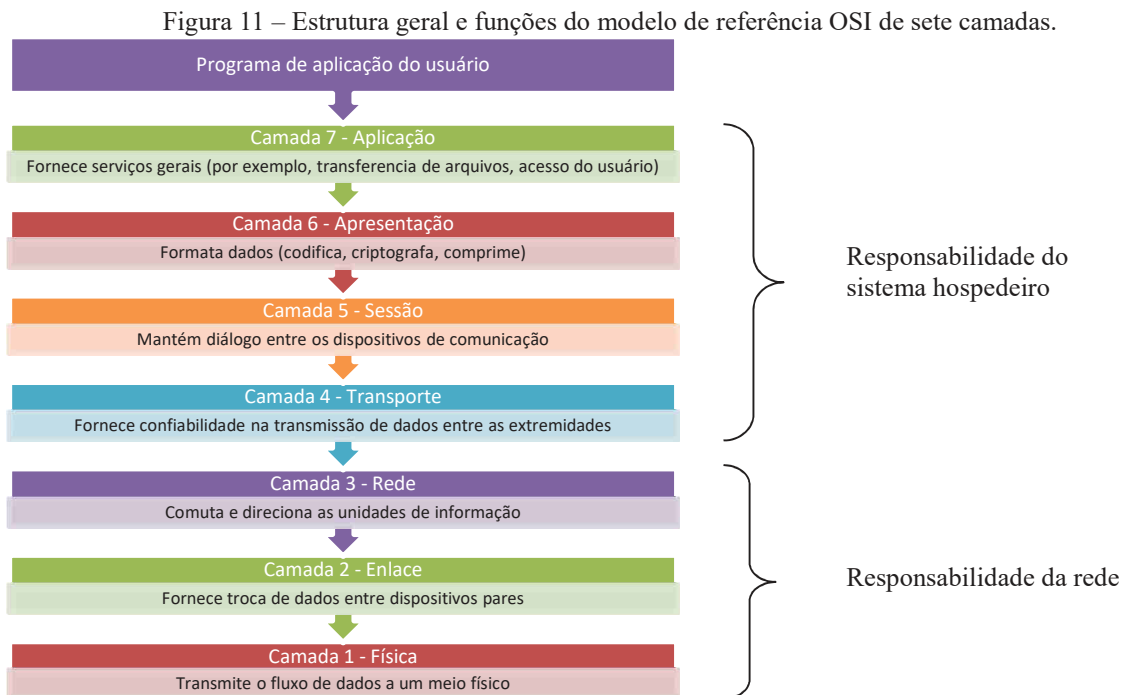
Figura 10 – Diagramas de olho típico para sistemas com sinais modulados em (a) NRZ e (b) RZ.



Fonte: Elaborada pela autora através do OptiSystem.

2.3 Rede WDM – Camada Óptica

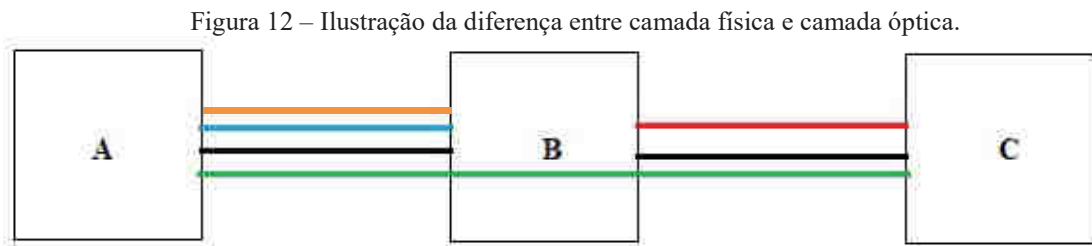
Para o melhor entendimento do funcionamento da transmissão de dados em uma dada rede, faz-se a divisão em etapas ou camadas. Essa maneira de enxergar a comunicação facilita a implementação de protocolos específicos e padronizados, o que possibilita a interoperabilidade de equipamentos de diferentes fabricantes e organizações. Os protocolos são conjuntos de regras pré-estabelecidas que auxiliam na eficiência da execução de determinada tarefa, garantindo a confiabilidade e detecção de erros. O modelo de referência de sistema aberto de interconexão (*Open System Interconnection – OSI*) é a divisão em camadas mais aceita e difundida. A FIGURA 11 ilustra as funções de cada camada bem como a maneira que elas se relacionam.



Fonte: Adaptado de (KEISER, 2014, p. 514)

O modelo OSI, não necessariamente precisa ser seguido em todas as implementações sendo um ponto de partida para o entendimento e formatação de uma rede. Para redes ópticas WDM, por exemplo, faz-se necessária a utilização de uma camada adicional: a camada óptica, que se baseia no comprimento de onda (KEISER, 2014). Esta camada indica o *caminho óptico* criado para a conexão entre duas estações, ou seja, a trajetória de um dado comprimento de onda que, para a camada óptica, é transparente à presença de nós

intermediários. Na FIGURA 12, ilustra-se a diferença entre camada física e camada óptica: esta é especificada pelos diferentes comprimentos de onda simbolizados pelas retas coloridas, enquanto aquela é configurada pelas fibras (retas pretas) de conexão entre as estações A, B e C. Logo, entre A e B tem-se apenas um caminho físico mas dois ópticos e entre A e C, apesar de não haver um caminho físico direto, há um caminho óptico.



Fonte: Elaborada pela autora.

A partir da ideia dos caminhos ópticos, é possível a projeção de múltiplos trajetos entre duas estações em uma rede, possibilitando caminhos alternativos que podem ser utilizados no caso de ocorrência de falhas no caminho principal¹¹. Nas simulações realizadas nesse trabalho, buscou-se fazer uso dessa possibilidade, apesar de não se ater ao funcionamento e configuração da proteção, para garantir uma maior gama de escolhas da gerência da rede.

¹¹ Para maiores informações sobre capacidade de sobrevivência de redes e redes de comprimento de ondas roteadas, consultar (KEISER, 2014) e (RAMASWAMI, SIVARAJAN e SASAKI, 2010).

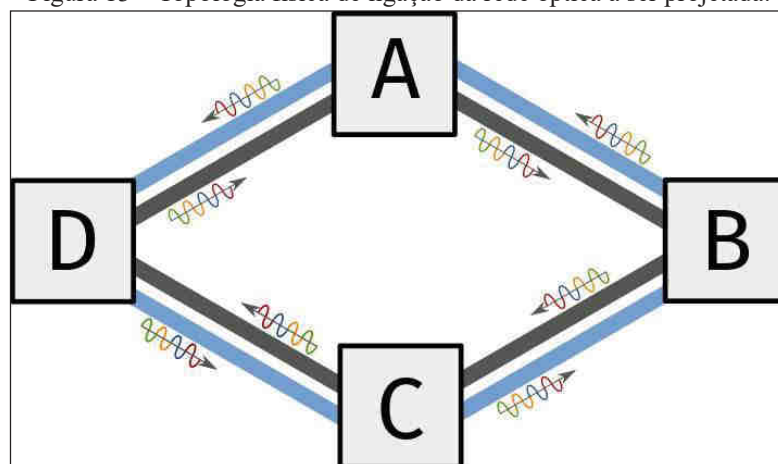
3 SIMULAÇÃO DA REDE ÓPTICA

Ao longo desse capítulo, será demonstrada a metodologia utilizada para realização dos ensaios. As simulações computacionais foram feitas no *software OptiSystem*, em sua versão de teste 15.0 disponibilizada durante 30 dias pelo desenvolvedor, que apresenta modelos de componentes de redes ópticas. É possível o ajuste dos parâmetros dos elementos utilizados na montagem da rede, de modo a realizar testes em diversas configurações. Dessa forma, os resultados verificados em testes auxiliam na tomada de decisões assertivas contribuindo nas implementações práticas. A simulação, portanto, torna-se um elemento importante no projeto de redes, pois reduz gasto em testes experimentais.

3.1 Topologia da rede WDM estudada e metodologia

Nesse estudo de caso, é feita a análise de uma rede WDM que interliga quatro nós aqui chamados de Estação A, Estação B, Estação C e Estação D. Cada enlace possui duas fibra monomodo (*single mode fiber – SMF*) G.652 que trafegam informação de maneira unidirecional. A capacidade total do sistema é de 10 Gb/s, sendo dividida igualmente em quatro canais de 2,5 Gb/s cada. A FIGURA 13 ilustra de maneira geral o encadeamento das estações.

Figura 13 – Topologia física de ligação da rede óptica a ser projetada.



Fonte: Elaborada pela autora.

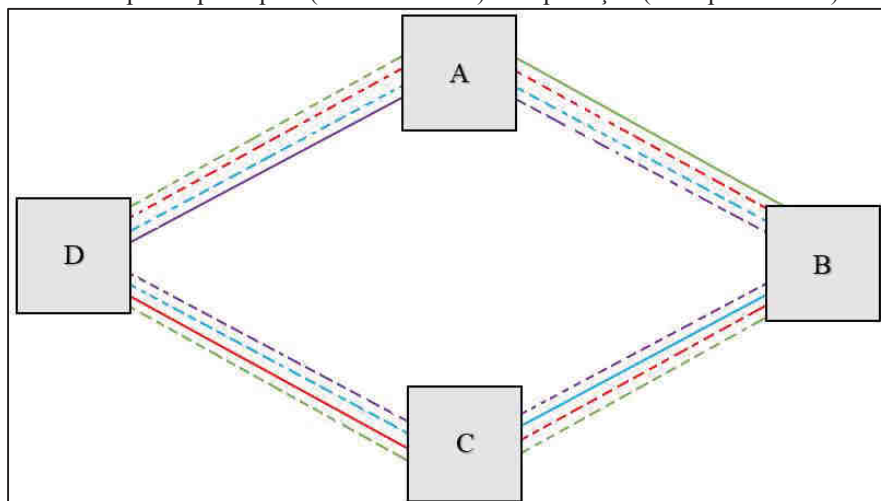
Uma das grandes vantagens de redes WDM é a sua transparência com relação ao conteúdo que trafega em seu interior. Assim sendo, serão testados três padrões de modulação: NRZ, RZ 50% e RZ 33%, em que cada canal utilize o máximo da largura de banda disponível (2,5 Gb/s). Inicialmente é feita a simulação sem nenhuma técnica de correção de dispersão e

em seguida os valores são confrontados com as três configurações que realizam compensação de dispersão utilizando DCF: pré, simétrica e pós.

As figuras de mérito que serão analisadas para determinar a aceitação de cada teste seguirão a norma ITU-T G.691, que afirma que a velocidade de transmissão utilizada requer uma taxa de erro de bit inferior a 10^{-12} . Para esta dada BER, de acordo com a equação 2.26, o fator Q é aproximadamente 7. Portanto, para ser aceito, o analisador de erro de bit (*BER Analyzer*) precisa apresentar como resultado um fator $Q > 7$ e $BER < 10^{-1}$, a partir da detecção de uma sequência de 4096 bits com 32 amostras por bit¹².

Os caminhos ópticos são exibidos na FIGURA 14, onde as retas contínuas indicam os enlaces principais enquanto as pontilhadas indicam os enlaces de proteção e as cores indicam as estações que interligam. Dessa forma, verde indica conexão das estações A e B; azul, B-C; vermelho, C-D e roxo D-A. Para que toda a rede funcione perfeitamente, é necessário que cada parte esteja de acordo com os parâmetros mínimos delimitados. Dessa forma, é realizada a simulação de cada enlace direto, conforme é mostrado ao longo da Seção 3.2, para só então ser analisado o desempenho do tráfego de dados ao longo de toda a extensão da rede, através da simulação dos enlaces de proteção que percorrem o trajeto mais longo, na Seção 3.3.

Figura 14 – Caminhos ópticos principais (retas contínuas) e de proteção (retas pontilhadas) da rede simulada.



Fonte: Elaborada pela autora.

Os parâmetros constituintes das fibras utilizadas, SMF e DCF, são exibidos na Tabela 1. Por uma questão de organização, os testes iniciam-se na Estação A, sendo os enlaces analisados: A-B, B-C, C-D e D-A. Os comprimentos de cada um são mostrados na Tabela 2.

¹² Para sistemas mais exigentes com relação à BER, pode-se utilizar códigos corretores de erro como o *corretor de erro adiante (forward error correction – FEC)*.

Tabela 1 – Parâmetros de SMF e DCF.

Parâmetro	SMF	DCF
Dispersão (ps/nm·km)	17	-80
Atenuação (dB/km)	0,2	0,6
Inclinação da dispersão – S (ps/nm ² ·km)	0,075	-0,35
Área efetiva (μm ²)	80	22

Fonte: (NEHEEDA, PRADEEP e SHAIJA, 2016)

Com isso, pode-se calcular o valor dos comprimentos da DCF necessários para cada enlace de acordo com a equação 2.24. Dessa forma, quando as configurações de pré e pós compensação são realizadas, o valor da DCF é exatamente o que consta na Tabela 2, quando é feita a compensação simétrica, as DCFs ligadas à transmissão e à recepção apresentam comprimentos de metade do valor calculado. Os valores de atenuação total das fibras utilizadas são determinados e sintetizados na Tabela 2.

Tabela 2 – Valores de comprimento das fibras utilizadas e seus respectivos valores de atenuação.

Enlace	SMF (km)	Atenuação SMF (dB)	DCF (km)	Atenuação DCF (dB)
A-B	33	6,6	7,000	4,20
B-C	140	28,0	29,750	17,85
C-D	50	10,0	10,620	6,37
D-A	180	36,0	38,250	22,95

Fonte: Elaborada pela autora.

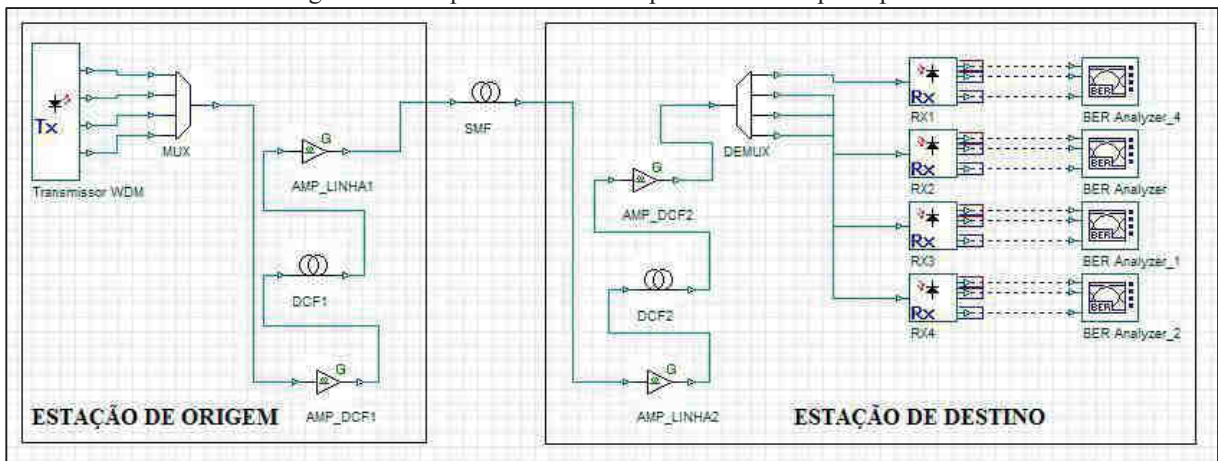
3.2 Simulação dos enlaces principais

Conforme já dito, as estações são ligadas por um par de SMF. O teste realizado é unidirecional e os resultados são tomados apenas no sentido horário, partindo do pressuposto de que as fibras apresentam as mesmas características e com os mesmos dados, tem-se resultados iguais.

O balanceamento de potência é feito apenas para compensar os valores das perdas de atenuação das fibras, de modo a permitir que a potência de recepção no DEMUX seja igual à potência de saída do MUX. A montagem do sistema de comunicação para teste segue a ordem da FIGURA 15. Apesar de a FIGURA 14 indicar apenas um canal (comprimento de onda) em cada enlace principal, serão testadas aqui a máxima capacidade, ou seja, os quatro canais trafegando na mesma fibra. Dessa forma, pode-se garantir que qualquer dos canais escolhidos para efetivamente trafegar o caminho óptico irá funcionar, tendo em vista que a dispersão atua diferentemente para cada comprimento de onda. São utilizados amplificadores EDFA e seus

valores de ganho variam de acordo com o enlace e as configurações utilizadas. Os amplificadores que se localizam imediatamente antes e imediatamente após a SMF têm valores iguais, cuja soma compensa o valor da atenuação causada pela fibra da linha enquanto os amplificadores localizados logo após o MUX e antes do DEMUX apresentam ganho igual à atenuação causada pela DCF ligadas a eles (KALER, SHARMA e KAMAL, 2002). Os valores de todos os componentes em cada configuração encontra-se no Anexo A.

Figura 15 – Esquemático do teste para os enlaces principais.



Fonte: elaborada pela autora através do *OptiSystem*.

Para efeito de facilitação na distribuição da potência nos amplificadores usados para compensar a atenuação causada pela inserção da DCF no enlace, os valores em B-C, C-D e D-A ficaram, respectivamente: 18 dB, 6,4 dB e 23 dB.

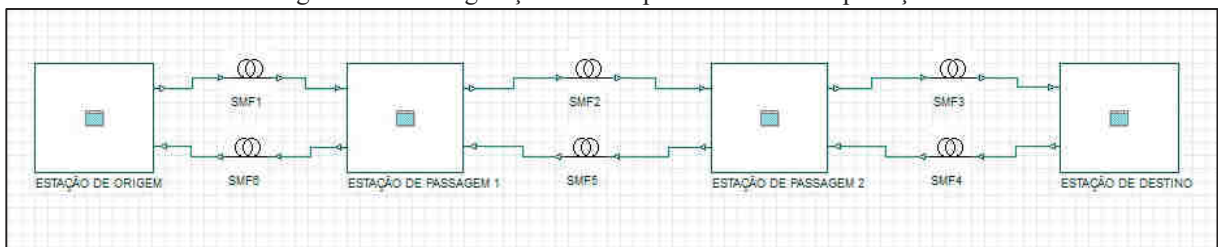
O Transmissor WDM emite sinais ópticos modulados em NRZ, RZ 50% e RZ 33% em quatro canais, espaçados em 100 GHz, com largura de banda de 10 MHz cada, com lasers de bombeio de 0 dBm de potência e sintonizados nas frequências: 193,1 THz, 193,2 THz, 193,3 THz e 193,4 THz. Os pulsos são então combinados no MUX com 10 GHz de largura de banda, sem perda de inserção. Após o tráfego através dos elementos presentes na linha, os pulsos são demultiplexados e após detecção e regeneração, são verificados pelo analisador de taxa de erro (*BER Analyzer*), que também fornece o diagrama de olho. Cada enlace foi testado em doze configurações diferentes: cada uma das três modulações foi testada em quatro maneiras de tratar (ou não) a dispersão cromática.

3.3 Simulação dos enlaces de proteção

Para garantir que a gerencia da rede tenha liberdade para se utilizar da versatilidade oferecida pela topologia física de caminho fechado (anel) desta rede, fez-se uso de enlaces de proteção, que seguem caminho físico alternativo à conexão direta entre as estações. Dessa forma, o caminho óptico para comunicação entre as estações A e B, por exemplo, pode ser feita também por um trajeto mais longo, passando pelas estações D e C. Como os sinais não são processados nas estações de passagem, são transparentes aos caminhos ópticos.

Cada um dos quatro enlaces foi verificado quando testado em sua máxima capacidade, medindo os quatro canais disponíveis de modo a garantir cada um, através da trajetória alternativa montada conforme FIGURA 16 (o Anexo B mostra a disposição interna dos subsistemas das Estações). Assim como na Seção 3.2, o teste é unidirecional. Entretanto, como o percurso não é exatamente igual nos dois sentidos, faz-se necessário a avaliação do sentido horário e do sentido anti-horário. A Tabela 3 mostra as combinações realizadas para elaboração dos caminhos alternativos testados nesse trabalho. Os valores dos componentes são os mesmos definidos para os testes nos enlaces principais (Seção 3.1).

Figura 16 – Configuração de teste para os enlaces de proteção.



Fonte: Elaborada pela autora através do *OptiSystem*.

Tabela 3 – Trajetórias dos caminhos ópticos de proteção testados.

Estação de Origem	Estação de Passagem 1	Estação de Passagem 2	Estação de Destino
A	D	C	B
B	A	D	C
C	B	A	D
D	C	B	A

Fonte: Elaborada pela autora.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

De acordo com a sequência estipulada para realização dos testes, nesse capítulo será inicialmente exibido o resultado dos testes para os enlaces principais, relatando as principais observações levantadas na Seção 4.1. Na Seção 4.2, é descrito a repercussão das simulações do tráfego de dados para os enlaces de proteção, tanto no sentido horário quanto no anti-horário.

4.1 Resultados dos testes nos enlaces diretos

Conforme dito, cada enlace foi testado na sua máxima capacidade e, por serem quatro canais verificados, optou-se por compor as tabelas de análise apenas com a média dos valores de fator Q (Tabela 4) e BER (Tabela 5) em cada configuração. Foram destacados com a cor vermelha os testes que foram reprovados. Conforme se pode observar, o enlace mais longo foi o que obteve os resultados mais restritos, sendo completamente reprovado o uso da modulação utilizando NRZ e, nas demais modulações, apenas quando a compensação simétrica foi aplicada.

Tabela 4 – Média do fator Q dos canais, nos enlaces principais da rede óptica, de acordo com a configuração de compensação e modulação utilizada.

MÉDIA FATOR Q				
ENLACE	ESQUEMA DE COMPENSAÇÃO	MODULAÇÃO		
		NRZ	RZ 50%	RZ 33%
A-B	NENHUM	9,00	18,82	11,75
	PRÉ	9,88	22,92	13,13
	SIMÉTRICO	9,73	22,15	12,75
	PÓS	9,60	21,55	12,40
B-C	NENHUM	4,45	6,61	10,29
	PRÉ	5,98	7,82	15,62
	SIMÉTRICO	9,86	16,71	17,11
	PÓS	7,51	12,81	8,07
C-D	NENHUM	8,38	16,14	10,89
	PRÉ	8,85	18,07	11,25
	SIMÉTRICO	9,84	21,71	12,74
	PÓS	8,38	16,17	10,93
D-A	NENHUM	1,24	5,03	7,39
	PRÉ	0,94	0,00	1,33
	SIMÉTRICO	4,73	12,40	25,26
	PÓS	4,20	2,99	6,30

Fonte: Elaborada pela autora

Tabela 5 – Média da BER dos canais, nos enlaces principais da rede óptica, de acordo com a configuração de compensação e modulação utilizada.

MÉDIA BER				
ENLACE	ESQUEMA DE COMPENSAÇÃO	MODULAÇÃO		
		NRZ	RZ 50%	RZ 33%
A-B	NENHUM	1,05E-19	2,05E-77	3,31E-32
	PRÉ	2,40E-23	2,20E-110	1,10E-39
	SIMÉTRICO	1,06E-22	7,00E-104	1,60E-37
	PÓS	3,89E-22	3,40E-98	1,25E-35
B-C	NENHUM	4,36E-06	5,35E-11	1,34E-23
	PRÉ	6,74E-09	1,81E-14	2,85E-43
	SIMÉTRICO	1,34E-22	1,83E-56	2,93E-62
	PÓS	2,93E-14	1,15E-36	7,92E-16
C-D	NENHUM	2,48E-17	1,19E-58	7,80E-28
	PRÉ	4,03E-19	8,26E-71	1,29E-29
	SIMÉTRICO	3,51E-23	1,46E-98	2,57E-37
	PÓS	2,39E-17	7,21E-59	5,07E-28
D-A	NENHUM	2,50E-01	2,67E-05	3,80E-10
	PRÉ	7,50E-01	1,00E+00	5,01E-01
	SIMÉTRICO	1,72E-06	4,42E-29	4,60E-104
	PÓS	1,35E-05	3,42E-03	1,04E-07

Fonte: Elaborada pela autora

Por apresentar valores médios, para a determinação de aprovação ou não dos testes é necessário que se observe as duas tabelas já que apenas a observação da Tabela 4 indicaria aprovação da configuração sem compensação para o enlace D-A modulado em RZ 33% enquanto a Tabela 5 indica sua reprovação. Como as duas tabelas apresentam muita informação, para melhorar o entendimento do significado dos valores, é feito dois estudos: um sob o ponto de vista da escolha da modulação e outro em relação ao esquema de compensação da dispersão. O cruzamento desses resultados ajudará na tomada de decisão.

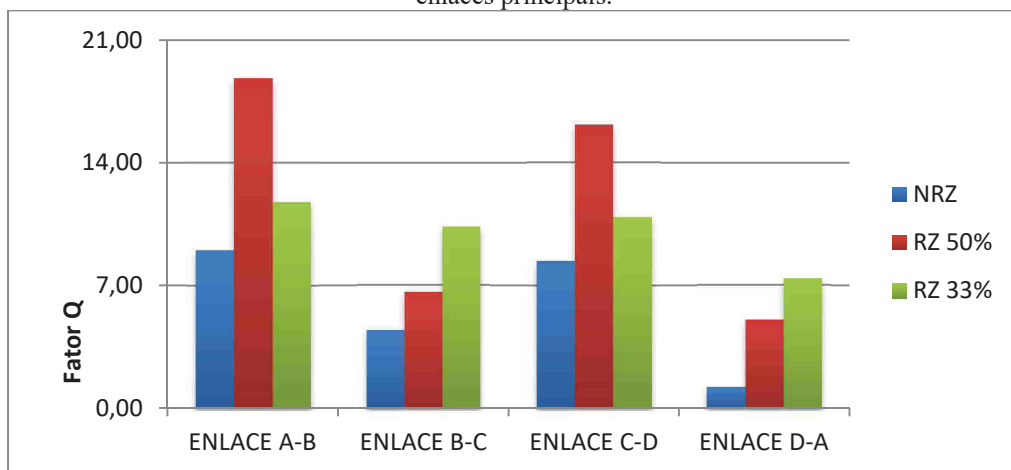
4.1.1 Modulação do sinal

Para realizar a análise da atuação do tipo de modulação na qualidade do sinal, foi fixada a observação nos resultados obtidos sem a compensação de dispersão. Dessa forma, constituíram-se os gráficos ilustrados na FIGURA 17 e FIGURA 18 adiante. É possível verificar que para todos os enlaces os sinais codificados em NRZ tem uma performance inferior aos sinais codificados em RZ. Isso ocorre porque “[...] se o pulso ocupa uma grande fração do

intervalo de bits, tem menos espaço para se espalhar”¹³ (RAMASWAMI, SIVARAJAN e SASAKI, 2010, p. 318, tradução nossa), o que torna o sinal NRZ menos tolerante à dispersão.

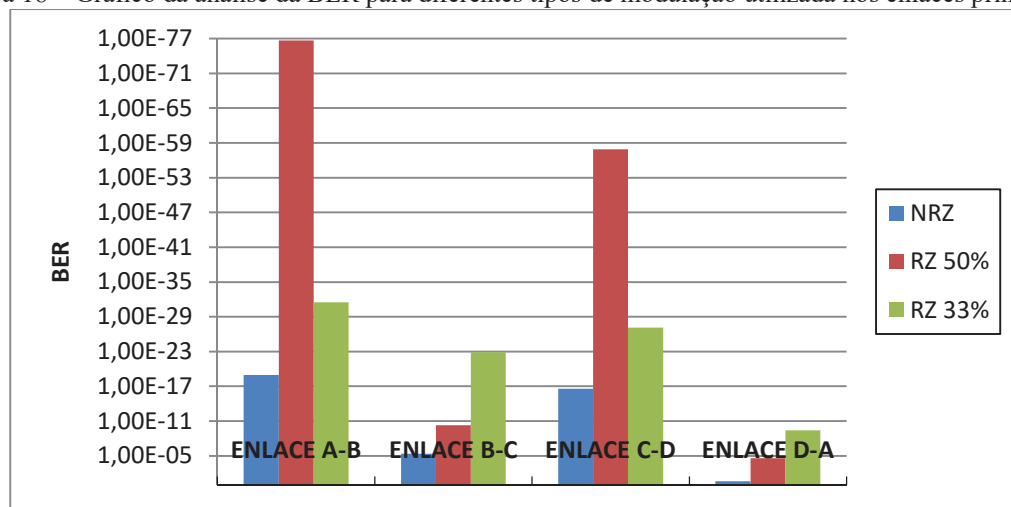
De fato, os enlaces mais curtos (A-B e C-D) apresentam melhores desempenhos com a RZ 50% enquanto os enlaces mais longos são mais bem avaliados com o RZ 33%. A explicação para tal fenômeno se dá pela análise da condição limitante do enlace. Utilizando a equação 2.23, pode-se calcular o máximo comprimento não limitado por dispersão sendo aproximadamente 80 km, mas que sofrem influência da potência. Como a potência emitida pelo transmissor RZ 33% é 1,3 dB menor do que a potência emitida pelo RZ 50%, esta apresenta um desempenho superior.

Figura 17 – Gráfico representativo da análise do valor de Q para diferentes tipos de modulação utilizada nos enlaces principais.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 18 – Gráfico da análise da BER para diferentes tipos de modulação utilizada nos enlaces principais.



Fonte: Elaborado pela autora.

¹³ Texto original: “[...]if the pulse occupies a large fraction of the bit interval, it has less room to spread.”

Para os enlaces mais longos, a dispersão é o fator limitante e o RZ 33% mostrou-se mais eficiente. Por ter um pulso de mais curta duração, ocupando apenas 1/3 do período do bit, é necessário um alargamento muito mais significativo para que se invada o período do bit seguinte e cause erro na recepção (ocorrência de ISI). No enlace B-C, inclusive, a codificação RZ 33% é a única que confere satisfação das figuras de mérito requeridas pelo sistema. Portanto, em alguns casos, apenas a escolha do tipo de modulação é suficiente para a melhoria do sistema.

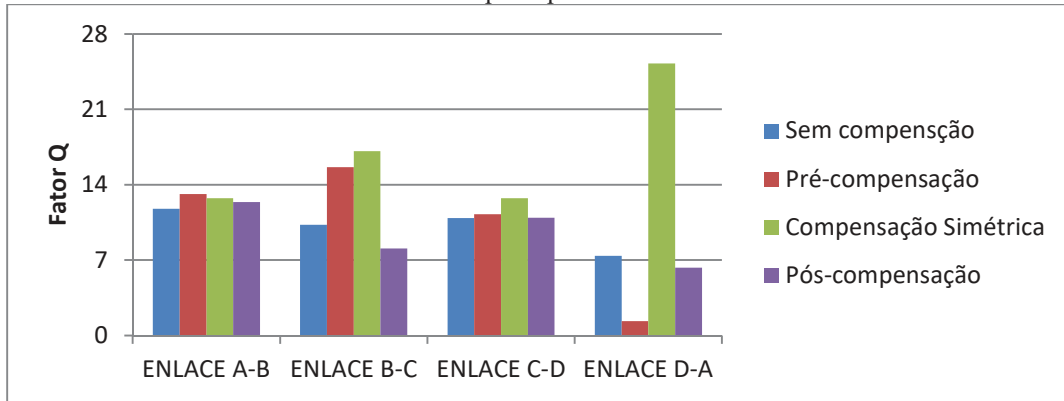
4.1.2 Esquemas de compensação de dispersão com DCF

Para deter-se somente na questão da influência da inclusão ou não da correção de dispersão, foi observado o comportamento das médias obtidas utilizando modulação RZ 33%. Os gráficos na FIGURA 19 e FIGURA 20 ilustram a maneira como a correção da dispersão influencia na melhoria dos sistemas.

Nos enlaces mais curtos, as melhorias alcançadas com qualquer das técnicas de compensação são irrisórias. Entretanto, nota-se que há uma melhoria mais do que significativa para os enlaces mais longos com destaque ao Enlace D-A que apresenta condições de aceitação apenas na situação em que há compensação de dispersão.

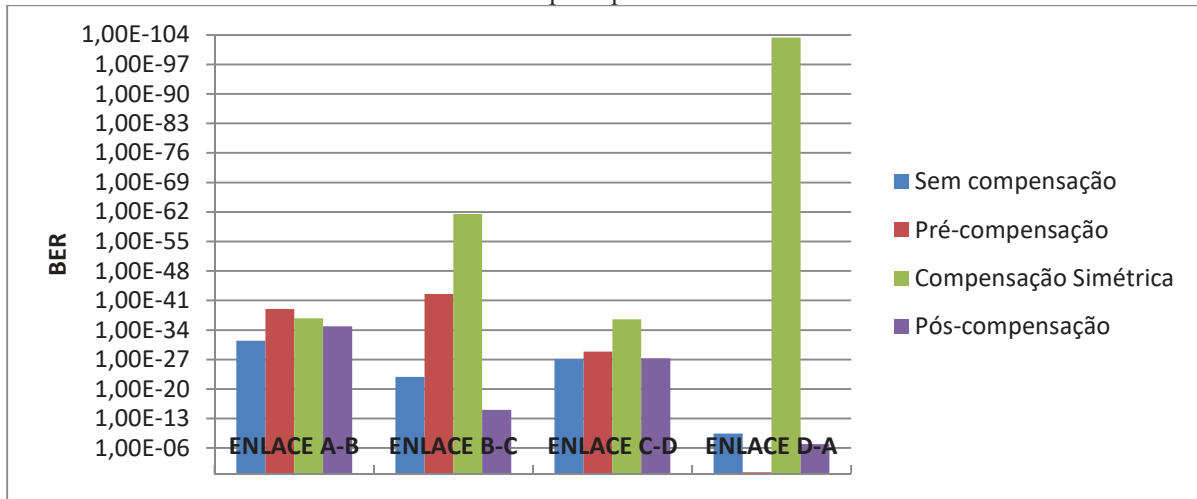
Das três técnicas em estudo neste trabalho, a compensação simétrica demonstrou ser eficaz em todos os enlaces, melhorando as condições de tráfego de dados em comparação a não utilização de qualquer configuração. Analisando os dados das Tabelas 4 e 5, percebe-se que nos enlaces mais longos a compensação foi capaz de tornar aceitável o uso de outras modulações além da RZ 33%, além de dar maior margem de segurança para a utilização dos canais. Nota-se que há uma melhoria considerável para os enlaces mais longos com destaque ao Enlace D-A que apresenta condições de aceitação apenas na situação em que há compensação de dispersão. Para os enlaces mais curtos, as melhorias alcançadas com qualquer das técnicas de compensação são irrisórias, mas terão a realização justificada no tópico a seguir.

Figura 19 – Gráfico da influência da compensação de dispersão cromática no fator Q medido nos enlaces principais.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 20 – Gráfico da influência da compensação de dispersão cromática na BER medida nos enlaces principais.



Fonte: Elaborado pela autora.

4.2 Resultados dos testes dos enlaces de proteção

As trajetórias alternativas criadas para os caminhos ópticos foram testadas e os resultados comprovaram as observações já feitas ao longo da Seção 4.1, no que diz respeito à modulação, e são ainda mais restritivos no quesito compensação de dispersão. Por ser muito extensa, a tabela com os valores médios dos testes de todos os enlaces encontra-se no Anexo C e decidiu-se exibir apenas os valores para os quais os testes tiveram aprovação. Para os enlaces A-B, B-C e C-D, apenas as configurações contendo modulação RZ (50% e 33%) e compensação simétrica foram aprovadas nos dois sentidos, conforme Tabela 6. A cor da fonte dos resultados segue a direção apresentada pela fibra de mesma cor da FIGURA 13: preto sentido horário e azul no sentido anti-horário.

Tabela 6 – Média dos valores do fator Q e BER aprovados para os enlaces de proteção A-B, B-C e C-D.

ENLACE	MÉDIAS EM AMBOS OS SENTIDOS			
	RZ 50%		RZ 33%	
	FATOR Q (MÉDIO)	BER (MÉDIO)	FATOR Q (MÉDIO)	BER (MÉDIO)
A-B	12,62	3,04E-29	21,56	2,41E-80
B-C	12,03	1,60E-27	25,22	6,60E-16
C-D	11,07	1,23E-17	13,97	2,70E-23
A-B	7,67	3,85E-16	13,95	4,85E-24
B-C	11,7	4,61E-26	24,6	1,00E-104
C-D	12,54	3,69E-28	21,57	6,25E-82

Fonte: Elaborada pela autora.

Para o enlace D-A, as configurações aprovadas foram: todas as RZ com algum tipo de esquema de compensação e os cenários com NRZ e compensação simétrica e pós (Tabela 7). Esse dado surpreende levando em consideração que o enlace direto D-A era o mais restritivo, segundo a Seção 4.1. Entretanto, levando-se em consideração o somatório das distâncias percorridas, a diferença é bem pequena: 180 km para o enlace direto e 223 km para o enlace alternativo. Apesar de uma distância maior, o enlace alternativo proporciona mais pontos de correção de dispersão, possibilitando uma melhor resistência do sinal à dispersão cromática que o limita. Os resultados com a fonte de cor vermelha foram reprovados.

Tabela 7 – Média dos valores do fator Q e BER aprovados para o enlace de proteção D-A.

COMPENSAÇÃO	ENLACE D-A – MÉDIA EM AMBOS OS SENTIDOS					
	NRZ – MÉDIAS		RZ 50% – MÉDIAS		RZ 33% – MÉDIAS	
	FATOR Q	BER	FATOR Q	BER	FATOR Q	BER
PRÉ	5,99	7,60E-9	8,17	3,96E-15	16,69	1,60E-47
SIMÉTRICA	9,92	2,10E-21	16,98	5,23E-55	17,19	2,18E-62
PÓS	7,35	1,16E-13	12,62	2,34E-36	8,07	1,14E-15
PRÉ	6,00	8,81E-09	8,12	3,89E-15	16,52	1,27E-47
SIMÉTRICA	9,78	3,92E-21	16,70	1,15E-56	17,15	5,85E-62
PÓS	7,42	1,22E-13	12,64	1,79E-34	7,97	5,51E-15

Fonte: Elaborada pela autora.

Conforme relatado na Seção 4.1.2, a aplicação da correção da dispersão em enlaces físicos de curto comprimento apresenta melhoras pequenas e que poderiam não justificar o custo de sua aplicação. Entretanto, ao analisar os caminhos alternativos, nota-se a importância de não permitir o acúmulo de dispersão, ou seja, a dispersão não corrigida em parte do trajeto alarga o sinal e o torna mais susceptível, o que afeta o desempenho de todo o sistema. Portanto,

para melhor otimização de uma rede WDM em altas velocidades, mesmo em enlaces curtos, é recomendável a utilização de métodos compensatórios da dispersão cromática.

Com todos os ensaios realizados, é possível garantir o pleno desempenho do sistema ao se utilizar modulação RZ, seja 50% ou 33%, e compensação simétrica da dispersão com DCF. Todos os trajetos foram verificados e aprovados nessas condições permitindo, assim, liberdade para a Gerência da Rede definir os caminhos ópticos solicitados.

5 CONCLUSÕES

Ao longo do presente trabalho, foi demonstrado através de um estudo de caso, como a dispersão cromática prejudica a propagação de sinais luminosos no interior das fibras ópticas e como a inserção de trechos de fibras compensadoras de dispersão (DCF) e mudança no tipo de modulação do sinal ajudam a sanar a problemática. O objeto exemplificado é uma rede WDM de quatro elementos (Estação A, B, C e D), contidos numa grande área de atuação e interligados entre si por um par de fibras do tipo G.652, que apresenta um alto coeficiente de dispersão na janela de 1550 nm. O cenário do teste foi o *software OptiSystem* onde foram averiguados diversos métodos de aplicação da DCF e tipos de codificação do pulso transmitido.

Foram analisados quatro cenários de implementação da rede: sem correção de dispersão; pré-compensação; compensação simétrica e pós compensação. Em cada cenário, foi testado três modulações distintas: NRZ, RZ 50% e RZ 33%. A rede inicialmente foi observada ponto a ponto e, posteriormente, testado o tráfego de dados percorrendo toda a sua extensão. Com isso, foram feitas experimentações de possíveis formas de projetar a rede e verificado o desempenho de acordo com as figuras de mérito do fator Q e da BER.

Os dados resultantes das simulações computacionais corroboraram para a percepção de que a modulação NRZ é mais afetada pelo alargamento do pulso causado pela dispersão do que a modulação RZ. Entretanto, nem sempre apenas a utilização de modulação RZ é suficiente para garantir uma boa performance do sistema de comunicação. Visto isso, os cenários em que a DCF foi inserida demonstrou uma significativa melhoria em seu funcionamento. Os cenários aprovados em todos os trechos foram aqueles que utilizavam modulação RZ e compensação simétrica.

A inserção de trechos de DCF com o comprimento ajustado de acordo com o tamanho do enlace a ser percorrido pelo sinal é de relativa simplicidade de execução e não requer grandes modificações numa rede mesmo que ela já esteja instalada. Contudo, deve-se considerar que a fibra especial agrega atenuação à linha e que, por isso, deve ser refeito o balanceamento de potência para garantir o pleno funcionamento dos demais elementos da rede. No trabalho, foram utilizados amplificadores EDFA para realizar esse ajuste e garantir que o nível do sinal fosse semelhante ao do teste ambientado sem o uso da DCF.

A rede simulada atingiu as condições de bom funcionamento para quaisquer trajetos de comunicação que a gerência do sistema determine como necessário, permitindo que a taxa requerida possa ser usufruída explorando ao máximo todas as possibilidades proporcionadas

pelo meio disponível.

Diante de um cenário onde os serviços de comunicação requerem cada vez mais banda, outros desafios surgirão num possível incremento da rede. Efeitos como PMD e *mistura de quatro ondas* (*four wave mixing* – FWM) podem atuar como limitantes para redes com tráfego superior a 10 Gb/s. O uso de técnicas mais modernas de modulação e multiplexação do sinal podem ser objeto de pesquisa para a solução de atendimento de uma possível expansão da rede analisada nessa monografia.

O trabalho foi concluído alcançando o objetivo central da melhoria do desempenho numa rede WDM limitada por dispersão apontando soluções rápidas e de baixo impacto. A solução de corrigir a limitação da fibra G.652 com alterações na modulação e inserção de trechos de DCF proporciona qualidade no serviço e tem um custo bem inferior à substituição do meio por cabo de fibras que não apresente valores relevantes de dispersão cromática (recomendação G.655, por exemplo) tendo em vista as longas distancias entre as estações.

REFERÊNCIAS

- AGRAWAL, G. P. **Sistemas de Comunicação por fibra óptica**. 4^a. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.
- BANDYOPADHYAY, S. **Dissemination of Information in Optical Networks: From Techonology to Algorithms**. Windsor: Springer Science & Business Media, 2007.
- BARBOZA, S. J. **Análise de Rede WDM com amplificação óptica, adição e derivação de canais**. Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, 2004. Dissertação de mestrado.
- KALER, R. S.; SHARMA, A. K.; KAMAL, T. S. Comparison of pre-, post- and symmetrical-dispersion compensation schemes for 10 Gb/s NRZ links using standard and dispersion compensated fibers. **Optics Communications**, v. 209, n. 1-3, p. 107-123, August 2002.
- KEISER, G. **Comunicações por fibras ópticas**. 4^a. ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.
- NEHEEDA, P.; PRADEEP, M.; SHAIJA, P. J. Analysis of WDM System With Dispersion Compensation Schemes. **Procedia Computer Science**, Cochin, v. 93, p. 647-654, September 2016.
- RAMASWAMI, R.; SIVARAJAN, K. N.; SASAKI, G. H. **Optical Networks A Practical Perspective**. 3th. ed. Burlington: Morgan Kaufmann, 2010.
- ROSOLEM, J. B. **Amplificadores ópticos de dupla passagem incorporando fibras compensadoras de dispersão**. [S.l.]: Universidade de São Paulo, 2005. Tese de doutorado.
- SENIOR, J. M. **Optical Fiber Communications Principles and Practice**. 3th. ed. Essex: Prentice Hall, 2009.
- TELECOMMUNICATION STANDARDIZATION SECTOR OF ITU. **Recommendation G.652: Characteristics of a single-mode optical fibre and cable**. International Telecommunication Union. [S.l.]. 2009.
- TELECOMMUNICATION STANDARDIZATION SECTOR OF ITU. **Recommendation ITU-T G.692: Optical Interfaces for Multichannel Systems with Optical Amplifiers**. Intercional Telecommunication Union - ITU. [S.l.]. 1998.
- TELECOMMUNICATION STANDARDIZATION SECTOR OF ITU. **Recommendation ITU-T G.691: Optical Interfaces for single channel STM-64 and other SDH systems with optical amplifiers**. Internation Telecommunication Union - ITU. [S.l.]. 2006.
- TELECOMMUNICATION STANDARDIZATION SECTOR OF ITU. **Recommendation G.655: Characteristics of a non-zero dispersion-shifted single-mode optical fibre and cable**. Internation Telecommunication Union - ITU. [S.l.]. 2009.
- TELECOMMUNICATION STANDARDIZATION SECTOR OF ITU. **Recommendation G.694.1: Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid**. International Telecommunication Union - ITU. [S.l.]. 2012.

APÊNDICE A – Valores dos componentes utilizados nos testes dos enlaces principais

Os valores listados na Tabela A.1 foram utilizados para realizar os testes para os enlaces principais. Estes mesmos valores foram aplicados aos testes para os enlaces de proteção.

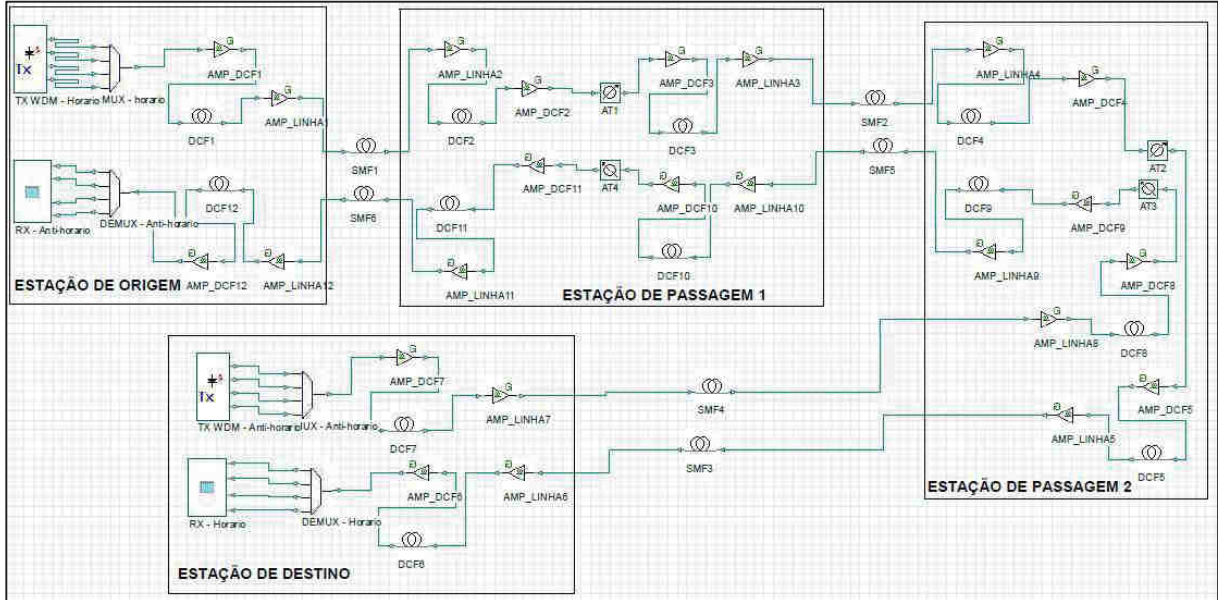
Tabela 8 – Valores dos ganhos dos amplificadores EDFA e comprimentos de DCF e SMF utilizados na configuração dos testes.

ENLACE	ESQUEMA DE COMPENSAÇÃO	AMP_DCF1 (dB)	DCF1 (Km)	AMP_LINHA1 (dB)	SMF (Km)	AMP_LINHA2 (dB)	DCF2 (Km)	AMP_DCF2 (dB)
A-B	NENHUM	0	0	3,3	33	3,3	0	0
	PRÉ	2,1	7	3,3	33	3,3	0	0
	SIMÉTRICO	4,2	3,5	3,3	33	3,3	3,5	2,1
	PÓS	0	0	3,3	33	3,3	7	4,2
B-C	NENHUM	0	0	14	140	14	0	0
	PRÉ	18	29,75	14	140	14	0	0
	SIMÉTRICO	9	14,875	14	140	14	14,875	9
	PÓS	0	0	14	140	14	29,75	18
C-D	NENHUM	0	0	5	50	5	0	0
	PRÉ	6,4	10,62	5	50	5	0	0
	SIMÉTRICO	3,2	5,31	5	50	5	5,31	3,2
	PÓS	0	0	5	50	5	10,62	6,4
D-A	NENHUM	0	0	18	180	18	0	0
	PRÉ	23	38,25	18	180	18	0	0
	SIMÉTRICO	11,5	19,125	18	180	18	19,125	11,5
	PÓS	0	0	18	180	18	38,25	23

Fonte: Elaborada pela autora.

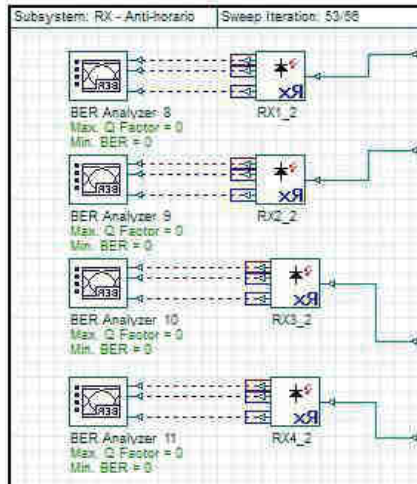
ANEXO B – Configuração do teste para os enlaces de proteção

Figura 21 – Esquemático da simulação utilizada para teste dos enlaces de proteção.



Fonte: Elaborada pela autora através do *OptiSystem*.

Figura 22 – Configuração interna do subsistema de RX.



Fonte: Elaborada pela autora através do *OptiSystem*.

ANEXO C – Resultados dos testes dos enlaces de proteção

Resultados grafados com a fonte vermelha foram reprovados.

Tabela 9 – Média do fator Q dos canais, nos enlaces de proteção, de acordo com a configuração de compensação e modulação utilizada.

MÉDIA DO FATOR Q							
ENLACE	ESQUEMA DE COMPENSAÇÃO	SENTIDO HORÁRIO			SENTIDO ANTI-HORÁRIO		
		NRZ	RZ 50%	RZ 33%	NRZ	RZ 50%	RZ 33%
A-B	NENHUM	1,65	5,2	4,79	2,54	3,57	0,73
	PRÉ	2,94	1,59	3,42	0	1,49	1,51
	SIMÉTRICO	4	12,62	21,56	5,25	7,67	13,95
	PÓS	4,17	3,21	4,47	4,12	2,91	4,37
B-C	NENHUM	1,36	13,22	10,74	1,8	3,53	4,18
	PRÉ	1,86	1,61	1,88	0,88	1,64	1,34
	SIMÉTRICO	5,02	12,03	25,22	5,1	11,7	24,6
	PÓS	4,37	3,32	6,13	4,3	3,35	6,16
C-D	NENHUM	2,53	3,39	1,74	1,34	4,12	6,8
	PRÉ	0	2,6	1,88	0	2,63	2,58
	SIMÉTRICO	5,66	11,07	13,97	5,4	12,54	21,57
	PÓS	4,11	3,14	4,37	4,2	3,29	4,64
D-A	NENHUM	4,06	5,43	9,46	3,81	6,8	5,89
	PRÉ	5,99	8,17	16,69	6	8,12	16,52
	SIMÉTRICO	9,92	16,98	17,19	9,78	16,7	17,15
	PÓS	7,35	12,62	8,07	7,42	12,64	7,97

Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 10 – Média da BER dos canais, nos enlaces de proteção, de acordo com a configuração de compensação e modulação utilizada.

MÉDIA DA BER							
ENLACE	ESQUEMA DE COMPENSAÇÃO	SENTIDO HORÁRIO			SENTIDO ANTI-HORÁRIO		
		NRZ	RZ 50%	RZ 33%	NRZ	RZ 50%	RZ 33%
A-B	NENHUM	0,5	9,23E-07	8,11E-07	0,25	1,57E-04	0,75
	PRÉ	0,25	0,5	1,85E-04	1	0,5	0,5
	SIMÉTRICO	0,25	3,04E-29	2,41E-80	1,61E-08	3,85E-16	4,85E-24
	PÓS	2,4E-5	1,92E-03	1,86E-05	3,15E-05	4,63E-03	3,12E-05
B-C	NENHUM	0,5	1,92E-32	8,02E-26	0,26	3,70E-04	1,17E-04
	PRÉ	0,5	0,5	0,25	0,75	0,5	0,5
	SIMÉTRICO	4,27E-07	1,60E-27	6,60E-16	2,92E-07	4,61E-26	1,00E-104
	PÓS	1,00E-05	1,51E-03	3,41E-08	1,12E-05	1,32E-03	1,63E-07
C-D	NENHUM	0,25	4,77E-04	0,5	0,5	1,41E-05	4,00E-11
	PRÉ	1	0,25	0,5	1	0,25	0,25
	SIMÉTRICO	2,37E-08	1,23E-17	2,70E-23	1,12E-07	3,69E-28	6,25E-82
	PÓS	3,16E-05	1,79E-03	4,15E-05	2,09E-05	1,83E-03	8,76E-06
D-A	NENHUM	2,38E-05	5,58E-08	1,12E-18	5,77E-05	8,93E-12	4,71E-09
	PRÉ	7,60E-09	3,96E-15	1,60E-47	8,81E-09	3,89E-15	1,27E-47
	SIMÉTRICO	2,10E-21	5,23E-55	2,18E-62	3,92E-21	1,15E-56	5,85E-62
	PÓS	1,16E-13	2,34E-36	1,14E-15	1,22E-13	1,79E-34	5,51E-15

Fonte: Elaborada pela autora.