

SISTEMAS ÓPTICOS DWDM ¹

SANTOS, Nathan Grego Thielmann²
Centro Universitário Academia – UniAcademia
COSTA, Luís Guilherme Silva³
Centro Universitário Academia - UniAcademia

Linha de pesquisa: Telecomunicações e Telemática

RESUMO

Com a crescente demanda por transmissão de dados em banda larga baseados em vídeos de alta resolução, voz sobre IP, dados de telefonia móvel e redes metro ethernet as operadoras de telecomunicações são impulsionadas a ofertarem cada vez mais larguras de banda para seus clientes, atendendo a necessidade desse mercado. Desde então, tecnologias que otimizam a transmissão de dados vêm sendo desenvolvidas e empregadas ao longo dos anos, resultando em constante evolução em termos de eficiência espectral. Por esse motivo, este trabalho tem por objetivo discutir e simular o funcionamento de uma dessas tecnologias, chamada de DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing). Essa tecnologia tem como princípio a multiplexação de comprimentos de onda, espaçadas em grades fixas ou flexíveis de acordo com a recomendação do ITU G.694.1 (International Telecommunication Union), que possibilita através de um mesmo meio físico, no caso a fibra óptica, multiplicar essa largura de banda pelos vários comprimentos de onda multiplexados, aumentando a capacidade do sistema.

Palavras-Chave: DWDM, Comunicações Ópticas, Projeto DWDM.

¹ Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro Universitário Academia - UniAcademia, como requisito parcial para a conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica.

² Graduando em Engenharia Elétrica pelo Centro Universitário Academia - UniAcademia.

³ Professor do curso de Engenharia Elétrica do Centro Universitário Academia - UniAcademia.

1 INTRODUÇÃO

A fibra óptica é uma tecnologia de transmissão que se tornou viável comercialmente somente na década de 1980 e desde então vem evoluindo para suprir a demanda de largura de banda [1] e a consequente da expansão de serviços de banda larga fixa e telefonia móvel. Tecnologias de multiplexação como, FDM (Frequency-division multiplexing), TDM (Time Division Multiplexing) e posteriormente o WDM (Wavelength Division Multiplexing), utilizado em comunicações por fibra óptica para transmissão de dados de alta capacidade e longas distâncias, são empregadas desde então como solução para o aumento da capacidade de transmissão (GILCHRIST, 2015).

A tecnologia WDM tem a capacidade de concentrar até 16 canais ópticos, multiplexados por divisão de comprimento de onda sendo transmitidos em uma única fibra. Cada comprimento de onda (λ) transporta um sinal de largura de banda limitada, que através da multiplexação pode ser multiplicado por “n” comprimentos de onda, aumentando em grande escala a largura de banda total transmitida (GUSMASTE, 2002). A evolução do WDM permitiu o aumento significativo no número de canais, tornando-os densamente compactados devido ao menor espaçamento entre eles e por isso, denominado de DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) (GILCHRIST, 2015).

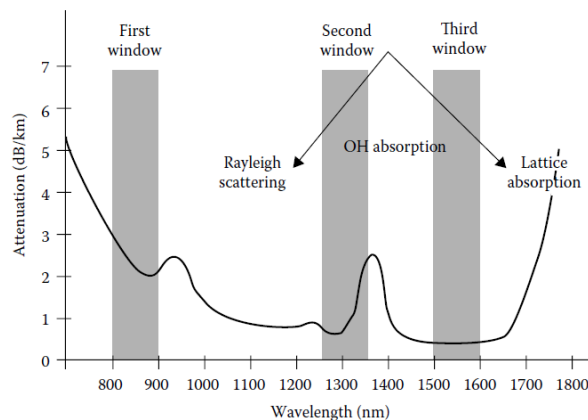
Devido à eficiência do DWDM na transmissão de dados e a crescente demanda por largura de banda, o objetivo geral deste trabalho é realizar uma análise e apresentar uma simulação de um enlace óptico de alta capacidade através de software computacional utilizando tecnologia DWDM. Este enlace será definido com uma distância de 150 km entre duas estações e contemplará todos os elementos de um sistema DWDM necessários para garantir a transmissão do sinal com baixa taxa de erro.

Para fundamentar a aplicação de todos os componentes desse sistema no Capítulo 2 serão abordados conceitos fundamentais sobre comunicações ópticas, princípios básicos de funcionamento de todos os elementos (ativos e passivos). No Capítulo 3 será analisado as principais limitações no uso da fibra óptica e no Capítulo 4 será realizado os cálculos de balanço de potência baseado nas características de cada componente do sistema, tipo de fibra óptica utilizado justificando os dados obtidos na simulação do enlace por software.

1.1 CONCEITOS FUNDAMENTAIS DAS FIBRAS ÓPTICAS

A transmissão de uma onda eletromagnética na fibra óptica só é considerada viável e eficiente em alguns comprimentos de onda, localizados em três janelas espectrais. Essas janelas espectrais são definidas onde ocorrem as menores atenuações, dada em dB/km, devido a fatores como absorção pelo material da onda eletromagnética que é dissipada em forma de calor, curvaturas e espalhamentos lineares e não lineares. A Figura 1 mostra as três janelas espectrais (retângulos cinzas) e a atenuação (linha contínua) em função do comprimento de onda em nm (nanômetros) com baixa atenuação para a transmissão (RIBEIRO, 2015).

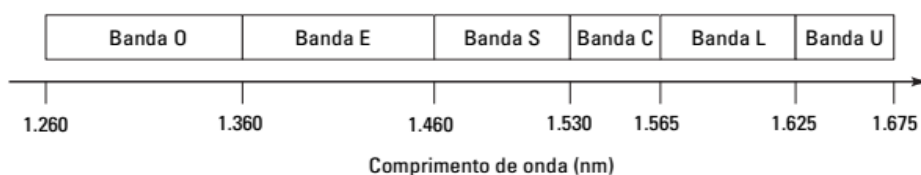
Figura 1: Atenuação em função do comprimento de onda.



Fonte: (BINH, 2015).

O espectro óptico, definido pelo ITU-T (International Telecommunications Union) é distribuído em seis bandas espectrais que variam de 1260 nm a 1675 nm como mostra a Figura 2, sendo elas, Banda O (Original), Banda E (Estendida), Banda S (Comprimento de onda Curto), Banda C (Convencional), Banda L (Comprimento de onda longo), Banda U (Comprimento de onda Ultralongo) (ITU-T G.694.1, 2021).

Figura 2: Larguras de banda do espectro óptico.



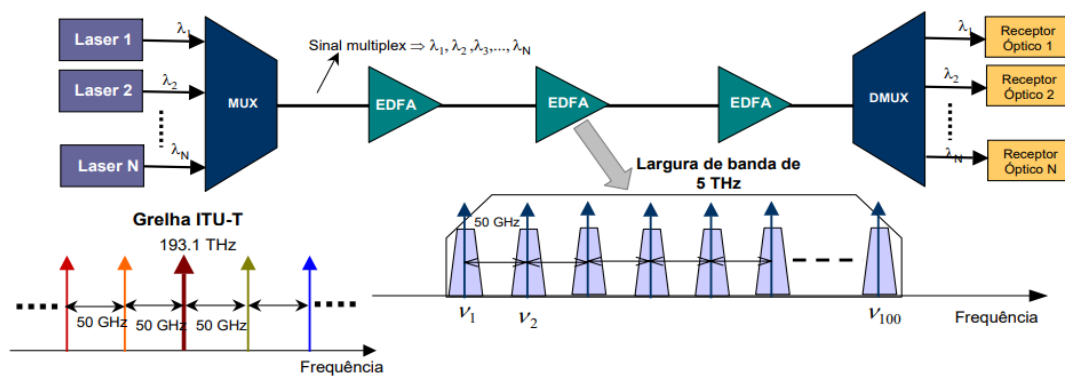
Fonte: (KEISER, 2014).

1.2 O QUE É UM SISTEMA DWDM?

O DWDM é uma tecnologia que transmite diferentes comprimentos de ondas ópticos combinados por um multiplexador óptico e transportados por um único par de fibras, aumentando a capacidade de transmissão (RAMAMURTHY, 2001). Como demonstrado na Figura 3, esse sinal multiplexado, com espaçamento de 50 GHz entre os diferentes λ e largura de banda de 5 THz, é transportado pela fibra óptica e sofre degradações ao longo do percurso, que são compensadas com a inserção de amplificadores ópticos como o EDFA (Erbium-doped Fiber Amplifiers) e Raman.

Ao chegar a estação de destino, esse sinal é demultiplexado e direcionado para seus respectivos receptores, na mesma ordem em que foram multiplexados. Atualmente a capacidade teórica é de até 96 canais ópticos de 10 Gbps na mesma fibra com espaçamento entre os canais de 50 GHz (HUAWEI, 2021).

Figura 3: Estrutura de um enlace óptico DWDM



Fonte: (PIRES,2013)

De acordo com o ITU-T através da recomendação ITU-T G.694.1 é estabelecido um conjunto de frequências que compreendem a banda C e banda L como referência para denotar frequências centrais nominais permitidas na aplicação do DWDM. Esse conjunto de comprimento de ondas é conhecido como grade de frequências, que possui uma variedade de espaçamentos de canais fixos variando de 12,5 GHz a 100 GHz e mais (múltiplos inteiros de 100 GHz), bem como uma grade flexível onde o espaçamento entre canais é definido de acordo com a largura de banda necessária (ITU-T G.694.1, 2021).

A Tabela 1 mostra uma parte da grade de frequência espaçada em 12.5 GHz, 25 GHz, 50 GHz e 100 GHz respectivamente e o comprimento de onda central nominal aproximado em nm. O mínimo espaçamento entre canais é limitado por interferência intersimbólica entre os canais.

Tabela 1: Grade fixa de frequência para DWDM – ITU-T G.694.1

Frequências Centrais Nominais (THz) para espaçamentos de:				Comprimento de Onda Central Nominal aproximado (nm)
12.5 GHz	25 GHz	50 GHz	100 GHz	
•	•	•	•	•
•	•	•	•	•
•	•	•	•	•
195.9375	–	–	–	1530.0413
195.9250	195.925	–	–	1530.1389
195.9125	–	–	–	1530.2365
195.9000	195.900	195.90	195.9	1530.3341
195.8875	–	–	–	1530.4318

Fonte: (ITU-T G.694.1, 2021).

É comum introduzir uma medida da *eficiência espectral* de um sistema DWDM conforme a Equação (1),

$$nS = \frac{\beta}{\Delta\nu_{ch}}, \quad (1)$$

em que β é a taxa de bits por canal e $\Delta\nu_{ch}$ é o espaçamento entre canais em unidades de frequência (AGRAWAL, 2014).

A grande vantagem associada a essa tecnologia é a possibilidade de aumento gradual da capacidade de tráfego com a inserção de transponders com diferentes comprimentos de onda aumentando a largura de banda no espectro de frequência óptico utilizando os mesmos equipamentos terminais (Multiplexadores e Demultiplexadores). Deve-se ressaltar que esses canais suportam transmitir de forma simultânea, vários sinais independentemente do formato como Gigabit Ethernet, ESCON e SDH (Synchronous Digital Hierarchy) em uma única fibra óptica integrando redes de dados, voz e imagem em altas taxas de transmissão (KEISER, 2014).

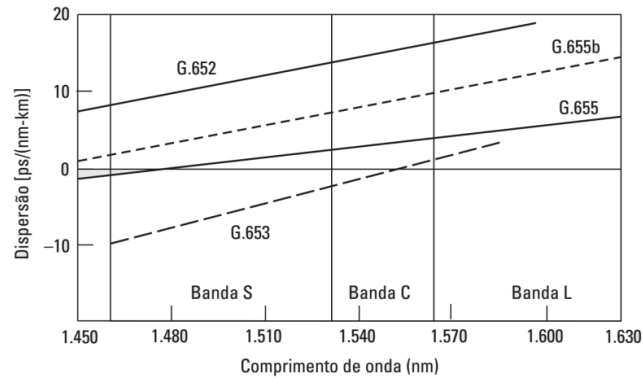
2 COMPONENTES DE UM SISTEMA DWDM

Neste capítulo serão abordados com mais detalhes os componentes ativos e passivos fundamentais que integram um sistema DWDM.

2.1 FIBRA ÓPTICA

Um dos problemas característicos em transmitir ondas eletromagnéticas em meios materiais como a fibra óptica é a ocorrência do fenômeno conhecido como dispersão, causado por diferentes atrasos de propagação dessas ondas. Dentre as dispersões modal, cromática e de polarização a dispersão cromática é a mais relevante que ocorre devido ao atraso diferencial que as várias componentes espectrais do pulso óptico propagante experimentam, que também é conhecida como dispersão da velocidade de grupo (GIOZZA, 1991). Para a compensação deste fenômeno foram desenvolvidos diversos tipos de fibra padronizados pelas recomendações do ITU-T diferenciadas pelo seu tipo de construção e diferentes aplicações, como no caso da fibra G.652 que é otimizada para uso em 1310 nm onde sua dispersão é nula, enquanto a fibra G.653 tem sua dispersão nula deslocada para 1550 nm reduzindo sua atenuação pela metade em relação a fibra G.652. Já para comunicações de longa distância operando em Banda C e L é recomendada pelo ITU-T a fibra G.655. Trata-se de uma fibra monomodo de dispersão deslocada não nula (NZDSF- Non-zero dispersion-shifted fiber), desenvolvida para baixos valores de dispersão ao longo de toda banda C e L, a fim de evitar efeitos não lineares, que serão abordados no Capítulo 3. A Figura 4 mostra a dispersão cromática característica das fibras G.652, G.653 e G.655 e em função do comprimento de onda (λ) (KEISER, 2014).

Figura 4: Dispersão cromática característica das fibras G.652, G.653 e G.655.



Fonte: (KEISER, 2014).

As informações e equações dos coeficientes de atenuação máximo e dispersão cromática deste tipo de fibra são encontradas na Tabela 2 do ITU-T recomendação G.655 e devem ser consideradas no dimensionamento do projeto.

Tabela 2: Atributos da fibra G.655 recomendações do ITU-T.

Coefficiente de Atenuação	Máximo em 1550 nm	0.35 dB/km
	Máximo em 1625 nm	0.4 dB/km
Coefficiente de Dispersão Cromática (ps/nm*km)	$D_{min}(\lambda)$: 1460-1550 nm	$\frac{7.00}{90}(\lambda - 1460) - 4.20$
	$D_{min}(\lambda)$: 1550-1625 nm	$\frac{2.97}{75}(\lambda - 1550) + 2.80$
	$D_{max}(\lambda)$: 1460-1550 nm	$\frac{2.91}{90}(\lambda - 1460) + 3.29$
	$D_{max}(\lambda)$: 1550-1625 nm	$\frac{5.06}{75}(\lambda - 1550) + 6.20$

Fonte: (ITU-T G.655).

2.2 TRANSCÉPTORES

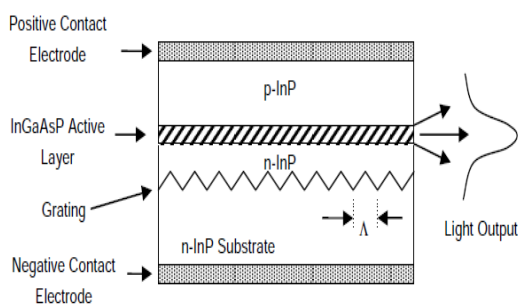
Nesta seção serão apresentados os transmissores e receptores ópticos utilizados em uma rede DWDM.

2.2.1 Emissor de Luz

No DWDM o sinal transmitido deve possuir uma estreita largura espectral e por isso o sistema opera com diodos lasers, pois são mais próximos de uma fonte óptica ideal. O diodo laser DFB (Distributed Feedback Laser) cumpre esse requisito e por essa razão é amplamente utilizado em sistemas ópticos multicanais. Como podemos ver na Figura 5, o DFB possui adjacente a sua região ativa uma grade de difração periódica, chamada de refletor de Bragg, que possui período igual ao comprimento de onda que deseja ser refletido, transmitindo somente um único modo longitudinal e suprimindo os outros modos que se encontram fora de fase, por interferência destrutiva (AZADEH, 2009).

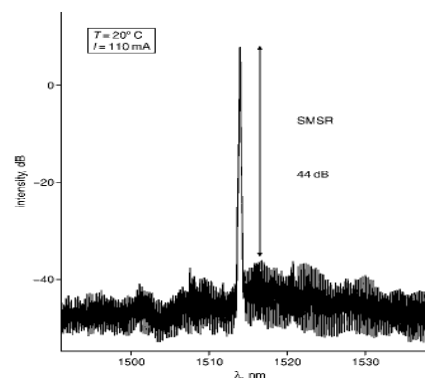
O espectro de saída do laser DFB é mostrado na Figura 6, onde existe uma relação de potência entre o pico do modo principal e o pico de maior ordem do modo suprimido (SMSR - Side Mode Suppression Ratio) (AZADEH, 2009).

Figura 5: Estrutura de um Diodo Laser DFB.



Fonte: (AZADEH, 2009).

Figura 6: Espectro de DFB.



Fonte: (KAISER, 2021).

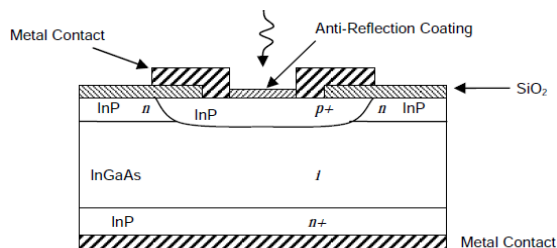
2.2.2 Fotodetector

O receptor óptico tem a função de converter o sinal óptico de volta à forma elétrica. Para isso é necessário que o receptor possua alta sensibilidade, resposta rápida, baixo ruído, baixo custo e principalmente alta confiabilidade, como no caso dos fotodetectores PIN e Avalanche (AGRAWAL, 2014).

2.2.2.1 Fotodetector PIN

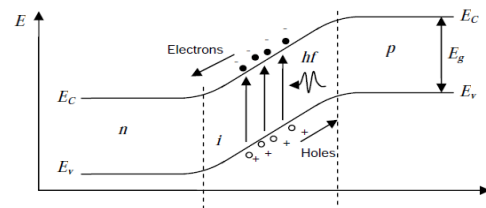
O fotodiodo PIN é um semiconductor com duas camadas dopadas de materiais tipo P e tipo N, ambas separadas por um material intrínseco, denominado Arsenieto de gálio e índio (InGaAs), como mostrado na Figura 7. Essa junção é polarizada reversamente por uma fonte externa, onde gera um forte campo elétrico na seção intrínseca. Quando os fótons atingem esta seção, conforme mostrado na Figura 8, os elétrons da banda de valência se movem para a banda de condução, deixando uma carga positiva ou um buraco, que se move para a região n e p respectivamente, promovendo o fluxo de corrente no fotodetector (KARTALOPOULOS, 2013).

Figura 7: Estrutura fotodetector PIN.



Fonte: (AZADEH, 2009).

Figura 8: Fluxo de fotocorrente no PIN.

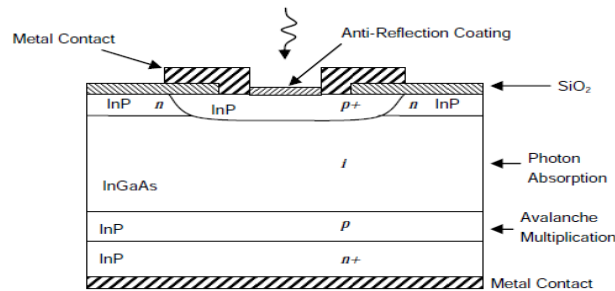


Fonte: (AZADEH, 2009).

2.2.2.2 Fotodetector Avalanche (APD - Avalanche photodiode)

O fotodetector APD utiliza o mesmo mecanismo do fotodetector PIN, porém neste caso uma camada adicional é acrescentada em sua estrutura, como mostra a Figura 9, resultando em um campo elétrico mais intenso na junção $p\ n+$, promovendo um aceleração nos pares de elétron-buraco gerados pelos fótons, que realizam ionização por impacto, ou seja, um elétron primário acelerado adquire energia suficiente para gerar outros pares de elétrons-buracos. Esse efeito multiplicativo potencializa o fluxo de fotocorrente e aumenta sua responsividade (AGRAWAL, 2014).

Figura 9: Estrutura fotodiodo APD



Fonte: (AZADEH, 2009).

2.3 MULTIPLEXADORES E DEMULTIPLEXADORES ÓPTICOS

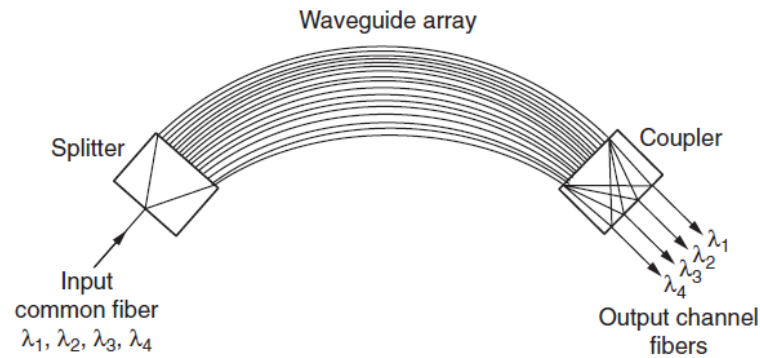
Um único equipamento é utilizado para multiplexar e demultiplexar os canais de acordo com o sentido de propagação. Os multiplexadores devem possuir uma baixa perda de inserção em cada canal, já os demultiplexadores devem garantir a separação de cada canal sem permitir interferência entre eles (AGRAWAL, 2014).

Em sistemas DWDM que operam com mais de 40 canais é comumente utilizada a tecnologia AWG (Arrayed Waveguide Grating), que significa grade de difração em arranjo de guia de onda, onde o acoplador de entrada divide os sinais ópticos multiplexados que chegam da fibra espaçados igualmente na saída do guia de onda. Na Figura 10, esses guias de onda possuem comprimentos ligeiramente diferentes, o que resulta em uma mudança de fase diferente para cada sinal óptico de saída, realizando assim a demultiplexação dos lambdas (CHOMYCZ, 2009).

2.4 AMPLIFICADORES ÓPTICOS

Para compensar as perdas acumuladas ao longo de todo o enlace, é necessário à implementação de amplificadores ópticos distribuídos e espaçados pelos segmentos da rede óptica. Citaremos a seguir dois amplificadores usados amplamente em projetos DWDM, discutindo suas aplicações e impactos.

Figura 10: AWG - Arrayed Waveguide Grating.



Fonte: (CHOMYCZ, 2009).

2.4.1 EDFA (Erbium-Doped Fiber Amplifier)

O princípio de funcionamento do amplificador óptico EDFA se dá por meio de uma emissão estimulada, onde um laser de bombeio emite fótons em uma fibra dopada com érbio, o que causa excitação de elétrons para bandas de maior energia. O sinal propagado na fibra colide com esses elétrons que retornam para a camada inferior liberando energia em forma de fótons, como mostra a Figura 11. Esses novos fótons serão somados ao sinal propagado por terem a mesma fase, frequência e polarização do sinal (CHOMYCZ, 2009).

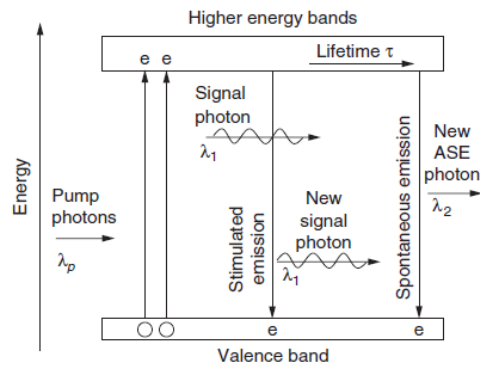
A desvantagem do amplificador EDFA é a inserção de ruído ao sinal amplificado, chamado de ASE (Amplified Spontaneous Emission), que deve ser controlado a fim de garantir uma boa relação sinal ruído (OSNR - Optical Signal-to-Noise Ratio) na recepção. Essa OSNR pode ser calculada em dB através da Equação (2),

$$OSNR_{(dB)} = \frac{P_{saída(dBm)}}{Ruído_{(dB)}} \quad (2).$$

Onde, $P_{saída(dBm)}$ é a potência óptica em dBm na saída do amplificador EDFA que é calculada pela Equação 3, sendo G o ganho do amplificador EDFA.

$$P_{saída} = GP_{entrada} \quad (3).$$

Figura 11: Esquema de funcionamento de do amplificador EDFA.



Fonte: (CHOMYCZ, 2009).

O Ruído é calculado pela Equação 4.

$$Ruído = NF' hv' (G - 1)B_o \quad (4).$$

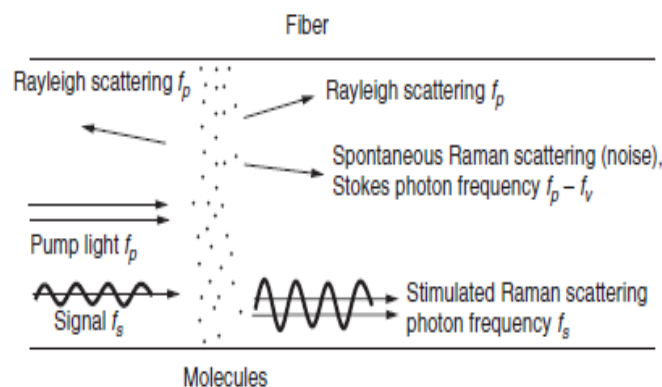
Onde, NF = é a figura de ruído do amplificador EDFA, hv = é a energia do fóton no comprimento de onda de interesse e B_o = largura de banda óptica para medição de ruído com valor típico de 0.1 nm.

2.4.2 Amplificador Raman

Diferentemente do amplificador óptico EDFA, o amplificador Raman não requer o uso de fibras especiais e se baseia em um efeito não linear chamado Espalhamento Raman Estimulado (SRS). Nesse tipo de amplificação ocorre a transferência induzida de potência óptica do laser de bombeio em um comprimento de onda inferior para um (λ) superior, que será o sinal amplificado. Como pode ser visto na Figura 12, esse sinal de bombeio interage com as moléculas de sílica da fibra, que absorvem parte da energia deste fóton provocando seu espalhamento. Esse fóton possui menor energia e menor frequência, resultando em um sinal de comprimento de onda maior que amplificará o sinal de mesmo lambda (KEISER, 2014).

O amplificador Raman, não possui tanto ganho quanto ao EDFA, porém sua principal vantagem se resume a figura de ruído que é muito baixa. Em casos onde ainda é necessário obter ganho do sinal sem exceder a OSNR já existente (normalmente na recepção do sinal), esse amplificador é adicionado junto ao EDFA, podendo chegar a ganhos adicionais na ordem de 20 dB (CHOMYCZ, 2009).

Figura 12: Espalhamento Raman estimulado.



Fonte: (CHOMYCZ, 2009).

3 FATORES LIMITANTES DAS FIBRAS ÓPTICAS

O Sinal óptico quando propagado na fibra sofre muitas formas de degradação, limitando sua capacidade de transmissão e alcance do enlace óptico. Essas degradações podem ser divididas em duas categorias, sendo elas: lineares e não lineares. Degradações lineares são aquelas que ocorrem independente do nível de potência do sinal transmitido, como a atenuação (redução da amplitude dos pulsos) e a dispersão cromática (alargamento dos pulsos). As degradações não lineares são percebidas quando se tem altos níveis de potência do sinal na fibra, tornando-se um fator limitante da transmissão como auto modulação de fase, modulação cruzada de fase, espalhamento Raman estimulado e espalhamento Brillouin estimulado (AZADEH, 2009).

Considerando que as degradações lineares sempre estarão presentes, pois independem da potência óptica transmitida, vamos ressaltar as duas principais que limitam o desempenho do sistema DWDM, como a atenuação e a dispersão cromática:

3.1 ATENUAÇÃO E DISPERSÃO CROMÁTICA

Nesta seção será analisado as equações para cálculo da dispersão cromática e atenuação do enlace óptico em função da distância entre transmissor e receptor óptico.

3.1.1 Atenuação

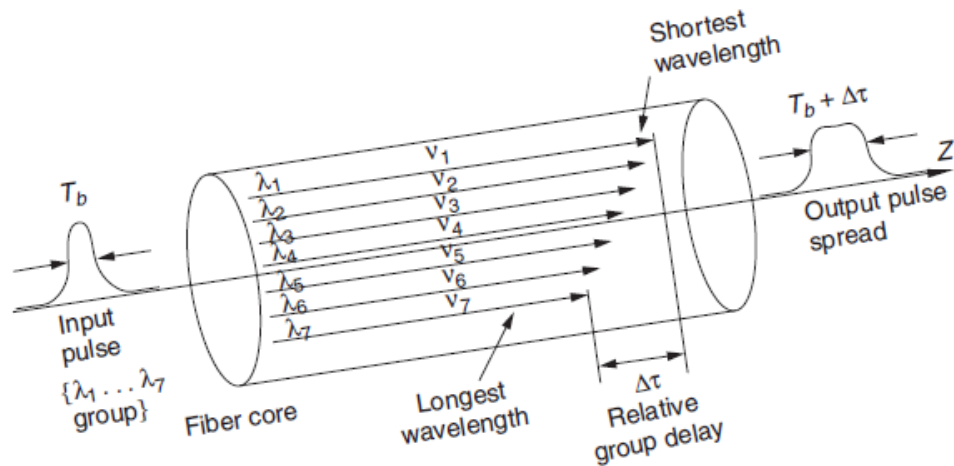
Sob condições gerais de atenuação de potência dentro de uma fibra óptica, o coeficiente de atenuação α inclui todos os efeitos de perda de potência quando os sinais são transmitidos através das fibras ópticas (BINH, 2004), podendo ser expresso em N_p/Km conforme Equação (5),

$$\alpha \left(\frac{dB}{Km} \right) = - \frac{10}{L} \log_{10} \left(\frac{P_{saída}}{P_{entrada}} \right) = 4.343\alpha \left(\frac{N_p}{km} \right). \quad (5)$$

3.1.2 Dispersão Cromática

O pulso óptico não é estreito o suficiente ao ponto de se ter apenas uma componente espectral, ou seja, existem diferentes frequências em um mesmo pulso. A dispersão cromática, também chamada de dispersão de velocidade de grupo ocorre devido ao alargamento do pulso óptico quando este percorre grandes distâncias dentro da fibra. Isso se deve ao fato de que cada componente espectral viaja em velocidades diferentes, e por isso não chegam simultaneamente ao final da fibra, resultando no alargamento temporal do pulso (GIOZZA, 1991). Esse efeito pode ser visto na Figura 13, que mostra o sinal na entrada de largura dada como T_b , que após ser transmitido na fibra óptica, sofre o efeito da dispersão cromática, caracterizando o sinal de saída $T_b + \Delta\tau$.

Figura 13: Dispersão cromática no pulso óptico.



Fonte: (CHOMYCZ, 2009).

Quanto maior a largura espectral da fonte óptica, como no caso dos lasers a LED, maior será esse espalhamento. Por essa razão se justifica o uso de diodo laser DFB, cuja largura espectral é menor que 1 nm, em enlaces ópticos (KEISER, 2014). Conhecendo o coeficiente de dispersão da fibra, podemos estimar o tempo de propagação de um determinado pulso conforme Equação (6),

$$\tau = DBL \quad (6).$$

Onde, D é o coeficiente de dispersão dado em ps (nm/Km), B é a largura espectral da fonte de luz em nm e L é a distância percorrida pelo pulso na fibra óptica.

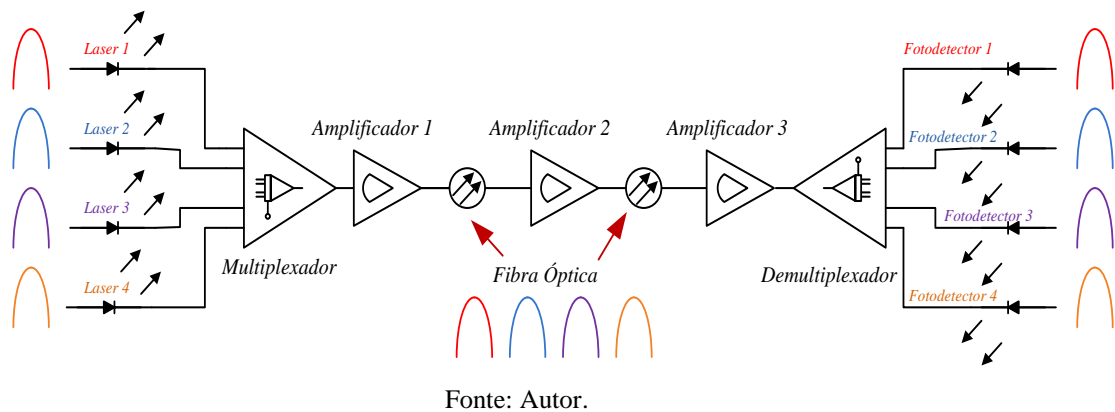
4 PROJETO DE UM ENLACE DWDM.

Neste capítulo será desenvolvido um cálculo de desempenho de um sistema óptico DWDM em conjunto com a simulação para validar o cálculo de desempenho e a performance do sistema através das medidas de BER (Bit Error Rate) e OSNR. O diagrama em blocos da topologia de simulação é mostrado na Figura 14.

4.1 DESENHO DA TOPOLOGIA.

O cálculo e a simulação serão baseados em 3 amplificadores ópticos com distância entre o Amplificador 1 e 3 de 150 Km dividindo o enlace óptico em dois lances de fibra óptica de 75 Km com o Amplificador 2 no meio do enlace para regeneração e amplificação óptica a fim de assegurar uma OSNR no fotodetector.

Figura 14: Topologia do enlace óptico DWDM.



4.2 CÁLCULOS DE BALANÇO DE POTÊNCIA

Os cálculos das perdas nas fibras ópticas, ganho dos amplificadores e sensibilidade de detecção de potência óptica nos fotodetectores devem ser estimados antes da implantação de um enlace óptico ou uma rede DWDM. Estes cálculos são conhecidos como balanço de potência que verificam se o projeto atenderá os requisitos mínimos de performance do enlace tais como, OSNR, taxa de erro e perdas de pacotes de dados. Para alcançar os valores mínimos de performance do projeto devemos estabelecer um limite mínimo de aceitação do enlace que seguirá os cálculos de balanço de potência. Neste trabalho vamos focar nos dois principais fatores que são dispersão cromática e atenuação que degradam a performance.

4.2.1 Cálculo da dispersão cromática

O cálculo de Dispersão Cromática para 4 comprimentos de onda individuais, de acordo com a Tabela 3, é baseada na recomendação 6.655 do ITU-T. Considerando o valor de 6.37 ps/nm*km, para a pior dispersão cromática mostrada na Tabela 3, podemos determinar o valor máximo total de dispersão cromática no enlace:

$$\text{Dis} = \text{Coeficiente de Dispersão} \times \text{Distância}$$

$$\text{Dis} = 6.37 \text{ ps/nm*km} \times 150 \text{ km} = 955,5 \text{ ps/nm}$$

Tabela 3: Valores máximos e mínimos de Dispersão Cromática para cada comprimento de onda.

Frequência Central	λ	Dispersão Mínima (λ) = 1550 nm a 1625 nm $D = (2.97/75) * (\lambda - 1550) + 2.80$	Dispersão Máxima (λ) = 1550 nm a 1625 nm $D = (5.06/75) * (\lambda - 1550) + 6.20$
193.1 THz	1552.52 nm	2.89	6.37
193.2 THz	1551.72 nm	2.86	6.31
193.3 THz	1550.91 nm	2.83	6.26
193.4 THz	1550.11 nm	2.80	6.20
Frequência Central	λ	Dispersão Mínima (λ) = 1460 nm a 1550 nm $D = (7/90) * (\lambda - 1460) - 4.20$	Dispersão Máxima (λ) = 1460 nm a 1550 nm $D = (2.91/90) * (\lambda - 1460) + 3.29$
193.5 THz	1549.31 nm	2.74	6.17
193.6 THz	1548.51 nm	2.68	6.15
193.7 THz	1547.71 nm	2.62	6.12
193.8 THz	1546.91 nm	2.55	6.10

Fonte: Autor.

O valor de dispersão cromática calculado é elevado para redes de dados com taxa de 10 Gbps com valor máximo de dispersão cromática de 738 ps/nm ou redes SDH STM 256 com taxas de 40 Gbps que suportam uma máxima dispersão cromática de 73.5 ps/nm (FOA, 2021). Para solucionarmos este problema pode-se utilizar um compensador de dispersão cromática DCM (Dispersion Cromatic Dispersion) ou criar uma estação de regeneração de sinais no meio do enlace dividindo o valor da dispersão cromática pela metade.

4.2.2 Perdas por atenuação

Como a distância total do enlace será dividido em dois lances de fibra óptica de 75 Km separados por um amplificador, para a fibra óptica G.655 (NZDSF) operando na janela de 1550 nm, podemos considerar uma atenuação média de 0,27 dB/km, portanto a atenuação na fibra óptica será,

$L_{fo} = \text{Coeficiente de Atenuação} \times \text{Distância}.$

$$L_{fo} 1 = 0,27 \text{ dB} \times 75 \text{ km} = 20,25 \text{ dB}.$$

$$L_{fo} 2 = 0,27 \text{ dB} \times 75 \text{ km} = 20,25 \text{ dB}.$$

No projeto do enlace óptico também deve-se ficar atento ao valor da figura de ruído de cada amplificador óptico do enlace, pois quanto maior o valor da figura de ruído menor será a OSNR entregue na recepção do fotodetector. Para este trabalho será considerado um valor de 5 dB por amplificador e o valor da OSNR é calculado pela Equação (7).

$$OSNR_{dB} = 58 + P_{TX} - L_{fo} - FN - G_{ripple} - OSNR_{penalidades} \quad (7),$$

onde P_{TX} é a potência entregue pelo amplificador óptico em dBm, L_{fo} é a atenuação da fibra óptica por Km no enlace em dB, FN é a figura de ruído em dB, G_{ripple} é o valor do ripple gerado pelo amplificador com valor típico de 1 dB e $OSNR_{penalidades}$ é devido a penalidades como dispersão cromática e polaridade com valor típico de 2 dB. Para o enlace proposto na Figura 14 foi adotado como premissa que cada EDFA vai injetar uma potência de +1 dBm na fibra óptica. Assim o ganho de cada EDFA será configurado de acordo com a potência entregue pelo Ideal Mux e pela atenuação de cada enlace Óptico. Após os cálculos de atenuação, podemos calcular a OSNR para cada enlace de fibra óptica divididos em 75 Km cada enlace utilizando a Equação (7).

$$OSNR_{dB} = 58 + 1 - 20.25 - 5 - 1 - 2 = 30.75 \text{ dB}.$$

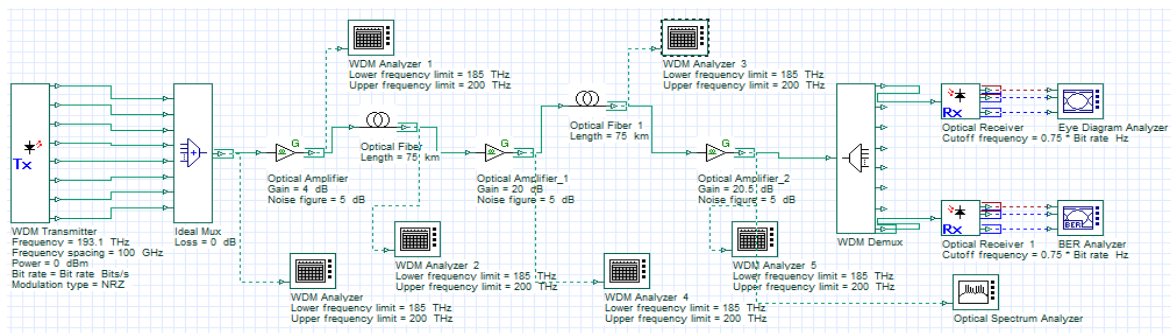
Na simulação realizada na próxima seção espera-se uma OSNR de pelo menos 30.75 dB em todos os oito canais da rede óptica DWDM.

4.3 SIMULAÇÃO POR SOFTWARE COMPUTACIONAL

A simulação apresentada na Figura 15 foi realizada utilizando uma versão de teste do Software Optisystem (OPTIWAVE, 2021). Seguindo a topologia de rede proposta (enlace ponto a ponto), foi simulado a transmissão de oito canais ópticos que são representados pelos blocos WDM Transmitter e Ideal Mux. Estes oito comprimentos de onda, espaçados de 100 GHz e com frequências centrais de 193.1 THz à 193.8 THz são introduzidos ao bloco Ideal Mux que são multiplexados na fibra óptica considerando uma dispersão cromática configurada nas fibras ópticas (Optical Fiber 1 e 2) na ordem de 6.37 ps/nm*km conforme pior valor de dispersão cromática da Tabela 3, transportados por 150 km até o final do enlace dividido em dois enlaces de 75 Km com um amplificador no meio do enlace óptico. Para mitigar as degradações impostas ao sinal, foi introduzido amplificadores ópticos EDFA (Erbium-dopped Fiber Amplifiers), com ganho configurado de acordo com a potência de entrada no amplificador.

Para validar a performance da rede DWDM proposta, o sistema conta com analisadores WDM (WDM Analyser) em seis pontos distintos entre o Ideal Mux e o WDM Demux. Na recepção, o sinal é demultiplexado através do bloco WDM Demux e encaminhado aos receptores ópticos, que através de analisadores de BER (Bit Error Rate) e Diagrama de Olho (Eye Diagram Analyzer), vão medir os parâmetros que definem a qualidade do sinal recebido.

Figura 15: Simulação do sistema DWDM através do software Optisystem.



Fonte: Retirado da simulação no OPTISYSTEM.

4.4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS DADOS

Esta seção analisa os dados obtidos na simulação da rede DWDM pelo software Optisystem.

4.4.1 Analisadores DWDM

Os analisadores WDM tem a finalidade apresentar dados que são relevantes a transmissão, tais como: potência do sinal óptico, potência do ruído (Noise Power) e a relação Sinal-Ruído óptica (OSNR) de todos os comprimentos de onda transmitidos ao longo do enlace. A Figura 16 mostra a primeira análise no ponto inicial do enlace, logo após a saída do multiplexador (Ideal Mux) onde podemos observar uma perda de inserção de 2.7 dB, pois conforme mostrado no WDM Transmitter os canais ópticos foram configurados com 0 dBm.

Na Figura 16 a medida em Signal Power mostra que na saída do Ideal Mux temos uma perda de inserção variando de -2.71 a -2.79 dB nos oito canais, um ruído (Noise Power) variando de -32.29 a -34.72 dB o que equivale a uma OSNR variando de 29.55 dB a 31.93 dB. O valor da OSNR é calculado pela diferença Signal Power (dBm) - (- Noise Power (dBm)).

Figura 16: Medidas Analisador WDM Analyser.

Frequency (THz)	Signal Power (dBm)	Noise Power (dBm)	OSNR (dB)
193.1	-2.7192699	-34.454764	31.735494
193.2	-2.7864492	-32.277146	29.490697
193.3	-2.734564	-32.346202	29.611638
193.4	-2.7900681	-32.483438	29.69337
193.5	-2.7338582	-32.398098	29.66424
193.6	-2.7405205	-32.315308	29.574787
193.7	-2.731901	-32.291233	29.559332
193.8	-2.7833659	-34.722501	31.939135

Fonte: Retirado da simulação no OPTISYSTEM.

No segundo ponto de análise no WDM Analyser 1, o ganho do amplificador EDFA (Optical Amplifier) foi ajustado de forma a injetar uma potência de +1 dBm no primeiro enlace de fibra óptica com distância de 75 Km. É importante notar que a Figura de Ruído (Noise figure) foi configurado em todos os amplificadores EDFA em 5 dB. A OSNR medida ficou em aproximadamente 50.8 dB devido à queda de ruído no amplificador e o ganho para +1 dBm configurado no EDFA. Estas medidas estão plotadas na Figura 17.

Figura 17: Medidas Analisador WDM Analyser 1.

Frequency (THz)	Signal Power (dBm)	Noise Power (dBm)	OSNR (dB)
193.1	1.2807301	-49.545146	50.825876
193.2	1.2135508	-49.542336	50.755886
193.3	1.265436	-49.539527	50.804963
193.4	1.2099319	-49.53672	50.746652
193.5	1.2661418	-49.53672	50.802862
193.6	1.2594795	-49.533915	50.793394
193.7	1.268099	-49.531111	50.79921
193.8	1.2166341	-49.52831	50.744944

Fonte: Retirado da simulação no OPTISYSTEM.

A Figura 18 mostra a potência óptica recebida medida pelo WDM Analyser 2 após o sinal óptico percorrer 75 Km onde observamos uma potência óptica recebida variando entre -18.9 e -19.9 dBm comprovando que o cálculo de atenuação desenvolvido na seção 4.2.2 está bem próximo do valor simulado. Observamos também que a OSNR se manteve no patamar de 50 dB nos oito canais.

Figura 18: Medidas Analisador WDM Analyser 2.

Frequency (THz)	Signal Power (dBm)	Noise Power (dBm)	OSNR (dB)
193.1	-18.968652	-69.795146	50.826494
193.2	-19.027746	-69.792336	50.76459
193.3	-18.988263	-69.789527	50.801264
193.4	-19.051316	-69.78672	50.735404
193.5	-18.974744	-69.78672	50.811976
193.6	-18.983651	-69.783915	50.800264
193.7	-18.988273	-69.781111	50.792838
193.8	-19.03027	-69.77831	50.74804

Fonte: Retirado da simulação no OPTISYSTEM.

No segundo enlace simulado após o amplificador EDFA (Optical Amplifier _1), o ganho do amplificador foi ajustado em função da potência óptica recebida plotada na Figura 18. Como a potência recebida foi de aproximadamente -19 dBm o ganho do amplificador (Optical Amplifier _1) foi ajustado com um ganho de 20 dB para uma potência transmitida na fibra óptica de +1 dBm medida pelo WDM Analyser 4 mostrado na Figura 19. Notamos que houve um aumento do ruído na saída do amplificador para aproximadamente -32.8 dBm e a OSNR foi para aproximadamente 33.8 dB nos canais 3 dB melhor do que a mínima relação sinal ruído calculado de 30.75 dB.

Figura 19: Medidas Analisador WDM Analyser 4.

Frequency (THz)	Signal Power (dBm)	Noise Power (dBm)	OSNR (dB)
193.1	1.0239545	-32.885168	33.909123
193.2	0.95673761	-32.882358	33.839095
193.3	1.0039126	-32.879549	33.883461
193.4	0.95775715	-32.876742	33.834499
193.5	1.0572867	-32.876742	33.934029
193.6	1.0395161	-32.873937	33.913453
193.7	1.0168238	-32.871133	33.887957
193.8	0.93110549	-32.868332	33.799437

Fonte: Retirado da simulação no OPTISYSTEM.

O analisador WDM Analyser 3 mede a potência recebida pelo amplificador EDFA Optical Amplifier_2 após o sinal óptico ser atenuado por 75 Km de distância. Essa medida está plotada na Figura 20. O valor medido também está próximo ao valor calculado em L_{fo} 2 na seção 4.2.2. de -20,25 dB. O valor da OSNR se manteve acima do mínimo valor da OSNR calculada de 30.75 dB.

Figura 20: Medidas Analisador WDM Analyser 3.

Frequency (THz)	Signal Power (dBm)	Noise Power (dBm)	OSNR (dB)
193.1	-19.207337	-53.135168	33.927831
193.2	-19.277013	-53.132358	33.855344
193.3	-19.243651	-53.129549	33.885898
193.4	-19.305085	-53.126742	33.821657
193.5	-19.228254	-53.126742	33.898488
193.6	-19.253629	-53.123937	33.870307
193.7	-19.215826	-53.121133	33.905307
193.8	-19.279604	-53.118332	33.838728

Fonte: Retirado da simulação no OPTISYSTEM.

Por fim, o último analisador WDM Analyser 5 mostra a potência óptica entregue ao WDM Demux. O ganho do amplificador EDFA (Optical Amplifier_2), configurado com 20.5 dB, também foi ajustado de forma a entregar uma potência óptica de +1 dBm ao WDM Demux. A Figura 21 mostra os valores finais de potência medido (Signal Power), Noise Power e OSNR que também ficou dentro do valor mínimo calculado. Na Figura 21, a OSNR final medida e entregue ao WDM Demux é a OSNR cumulativa de todo o enlace onde cada amplificador óptico EDFA foi configurado com uma figura de ruído de 5 dB além do ruído da fibra óptica nos dois enlaces. O valor da OSNR ficou no limiar do valor mínimo calculado de 30.75 dB, sendo o pior caso a OSNR do comprimento de onda 193.4 com um valor de 0.3 dB pior que o calculado.

Figura 21: Medidas Analisador WDM Analyser 5.

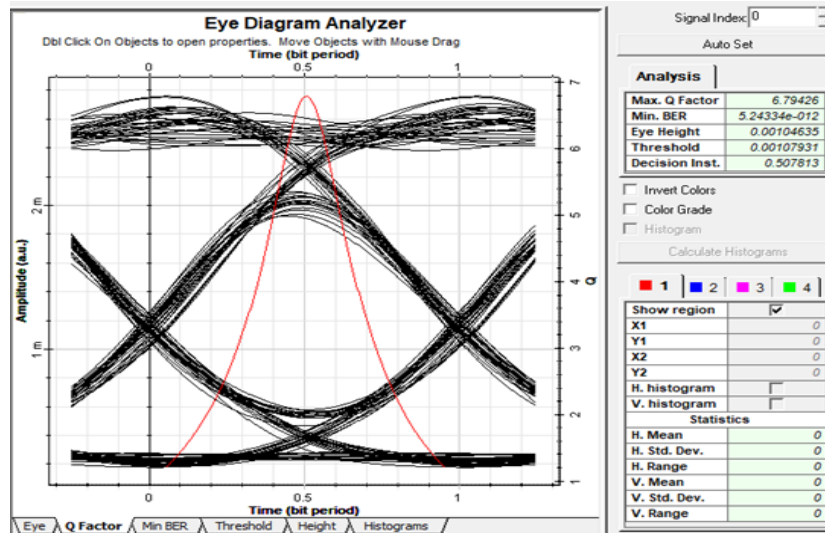
Frequency (THz)	Signal Power (dBm)	Noise Power (dBm)	OSNR (dB)
193.1	1.2926626	-29.543054	30.835716
193.2	1.2229867	-29.540243	30.76323
193.3	1.2563487	-29.537434	30.793783
193.4	1.1949151	-29.534627	30.729542
193.5	1.2717461	-29.534627	30.806373
193.6	1.2463706	-29.531822	30.778193
193.7	1.284174	-29.529019	30.813193
193.8	1.2203964	-29.526217	30.746614

Fonte: Retirado da simulação no OPTISYSTEM.

4.4.2 Diagrama de Olho

Através do diagrama de olho podemos observar a qualidade e a suscetibilidade do sinal óptico recebido (LATHI, 2015). No diagrama mostrado na Figura 21 pode-se extrair diversas informações importantes, como por exemplo, os pontos de máxima abertura do diagrama que mostra o grau de abertura no instante da amostragem e do circuito de decisão do receptor indicando na Figura 20 a boa qualidade do sinal recebido com relação sinal/ruído satisfatória e taxa de erro medida de $5.24e^{-12}$ e máximo fator Q igual a 6.79.

Figura 21: Diagrama de olho do enlace óptico simulado.

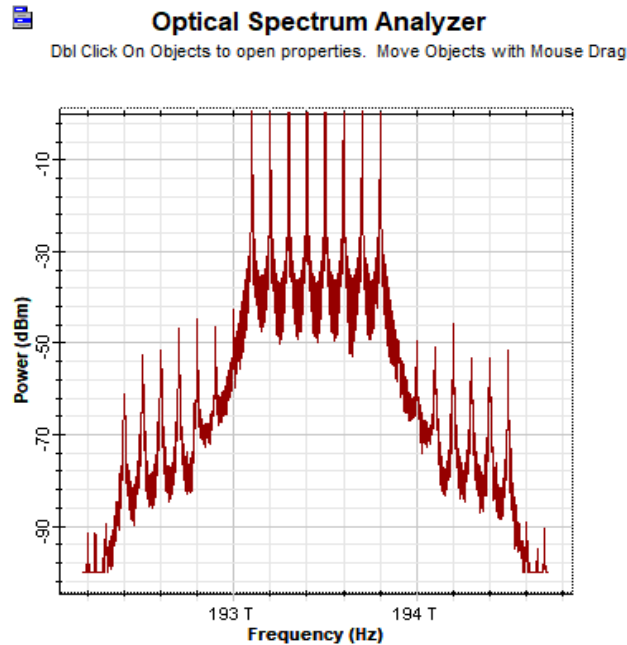


Fonte: Retirado da simulação no OPTISYSTEM.

4.4.3 Analisador de Espectro Óptico - OSA (Optical Spectrum Analyser).

A Figura 22 mostra a combinação dos 8 comprimentos de onda multiplexados na fibra óptica medido na recepção entregue ao WDM Demux. Nesta medida observa-se a potência do sinal e a potência do ruído próxima a -33 dBm e o nível de intensidade do sinal amplificado em +1 dBm e a largura de banda ocupada pelos 8 canais começando em 193.1 THz a 193.8 THz.

Figura 22: Espectro Óptico com 8 canais recebidos.



Fonte: Retirado da simulação no OPTISYSTEM.

5 CONCLUSÃO

No presente trabalho, foi apresentado um exemplo de projeto de rede DWDM mostrando os principais componentes que compõe este sistema de comunicação. O objetivo foi mostrar os principais componentes e como os mesmos fazem parte no contexto de um projeto da rede DWDM proposto a partir de uma distância definida calculando um enlace óptico com ênfase na atenuação e dispersão cromática. A rede exemplificada é uma rede WDM com 8 canais ópticos simulado em uma fibra óptica G.655 (NZDSF) operando na janela de 1550 nm com uma atenuação de 0,27 dB/km e dispersão cromática de 6.37 ps/nm*Km.

O cenário de simulação foi o software Optisystem onde foi analisado as potências ópticas e OSNR ponto a ponto na rede DWDM após os valores calculados no balanço de potência. Após a configuração do ganho nos amplificadores EDFA no enlace, foi feita uma análise de performance da rede DWDM medindo os valores de taxa de erro, diagrama de olho, figura de mérito do fator Q e análise espectral da potência óptica através de um OSA após passar por todos os componentes que compõe a rede DWDM.

ABSTRACT

With the growing demand for broadband data transmission based on high resolution videos, voice over IP, mobile phone data and metro Ethernet networks as telecommunications operators are driven to offer more and more bandwidth to their customers, serving the need of that market. Since then, technologies that optimize data transmission have been developed and used over the years, constantly evolving in terms of spectral efficiency. For this reason, this work aims to discuss and simulate the operation of one of these technologies, called DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing). This technology has as its principle the multiplexing of wavelengths, spaced in fixed or flexible notes, according to the recommendation of ITU G.694.1 (International Telecommunications Union), which makes it possible through the same physical medium, in this case optical fiber, multiplying this bandwidth by the multiple multiplexed wavelengths increases system capacity.

Keywords: DWDM, Optical Communications, DWDM Project.

REFERÊNCIAS

- AGRAWAL, Govind P.. **Sistemas de comunicação por fibra óptica**. 4. ed. Rio de Janeiro: Elsevier Editora Ltda, 2014.
- AZADEH, Mohammad. **Fiber Optics Engineering**. 1. ed. New York: Springer Science+Business Media, 2009.
- BINH, Le Nguyen. **Advanced Digital Optical Communications: Optics and Photonics**. 2. ed. Germany: CRC Press, 2015.
- CHOMYCZ, Bob. **Planning Fiber Optic Networks**. 1. ed. United States: The McGraw-Hill Companies, 2009.
- FOA. **Fiber Characterization Testing For Long Haul, High Speed Fiber Optic Networks**. Disponível em: <https://www.thefoa.org/tech/ref/testing/test/CD_PMD.html>. Acesso em: 29 nov. 2021.
- GILCHRIST, Alasdair. **A CONCISE GUIDE DWDM: Optical Transport Networks**. 1. ed. [S.l.]: RG Consulting, 2015.
- GIOZZA, William F, CONFORTI, Evandro, WALDMAN, Hélio. **FIBRAS ÓPTICAS TECNOLOGIA E PROJETO DE SISTEMAS**. 1. Ed. Makron Books, 1991.

GUSMASTE, Ashwin and ANTONY, Tony. **DWDM Network Designs and Engineering Solutions**. 1. Ed. Cisco Press, 2002.

HUAWEI. **Plataforma OTN OptiX OSN 9800**. Disponível em: <<https://e.huawei.com/br/products/enterprise-transmission-access/transmission/wdm/osn-9800>>. Acesso em: 29 nov. 2021.

INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION. **G.655 - ITU-T - Characteristics of a non-zero dispersion-shifted single-mode optical fibre and cable**. Disponível em: <<https://www.itu.int/rec/T-REC-G.655-200911-I/en>>. Acesso em: 22 maio 2021.

INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION. **Série – G - Supplement 42- ITU-T - Guide on the use of the ITU-T Recommendations related to optical fibres and systems technology**. Disponível em: <<https://www.itu.int/rec/T-REC-G.Sup42-201810-I>>. Acesso em: 15 maio 2021.

INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION. **G.694.1 - ITU-T - Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid**. Disponível em: <<https://www.itu.int/rec/T-REC-G.694.1-202010-I/en>>. Acesso em: 31 maio 2021.

KAISER, W. et al. Static and dynamic properties of laterally coupled DFB lasers based on InAs=InP QDash structures. **ELECTRONICS LETTERS**, Germany, v. 41, n. 14, p. 808-810, jul./2005. Disponível em: <https://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/el_20051160>. Acesso em: 1 jul. 2021.

KARTALOPOULOS, Stamatios V. **DWDM NETWORKS, DEVICES, AND TECHNOLOGY**, 1 Ed. John Wiley & Sons, 2003.

KEISER, Gerd. **Comunicações por fibra ópticas**. 4. ed. Porto Alegre: AMGH Editora Ltda, 2014.

LATHI, B. P., DING, Z. **SISTEMAS DE COMUNICAÇÕES ANALÓGICOS E DIGITAIS MODERNOS**. 4 Ed. LTC, 2015.

OPTIWAVE PHOTONIC SOFTWARE. **Optisystem**. Disponível em: <<https://optiwave.com/optisystem-overview/>>. Acesso em: 29 set. 2021.

PIRES, J. **Presente e Futuro das Redes de Transporte Ópticas**. ISCTE - ESCOLA DE TECNOLOGIAS E ARQUITECTURA - INSTITUTO UNIVERSITÁRIO DE LISBOA. Disponível em: <<http://optical-networks.iscte-iul.pt/presentations/ist-it.pdf>>. Acesso em: 31 ago. 2021.

RAMAMURTHY, Byrav. **DESIGN OF OPTICAL WDM NETWORKS LAN, MAN and WAN Architectures**. 1. Ed. Springer, 2001.

RIBEIRO, José Antônio Justino. **COMUNICAÇÕES ÓPTICAS**. 4. Ed. São Paulo, SP: Editora Érica, 2015.