

## 4 Experimentos e Resultados

Neste capítulo, dando sequência ao recorrido nos capítulos anteriores, serão apresentadas as configurações experimentais dos testes conduzidos no laboratório do Grupo de Optoeletrônica do CETUC e os resultados obtidos. A ordem de apresentação segue a evolução dos testes, conforme a sequência do trabalho realizado durante essa dissertação.

### 4.1. Curva de Referência: Configuração *Back-to-back*

Entende-se como ligação *back-to-back* a conexão direta entre o transmissor e o receptor da sequência de bits pseudoaleatória. Nesta seção, é abordado o método para o traçado da curva de taxa média de erro de bits em função da potência recebida por meio da configuração de referência (*back-to-back*). Na prática, a construção da curva foi realizada com o uso de um Analisador de taxa de erro de 10 Gbit/s, no qual está contido um módulo transmissor gerador PRBS (BER TX), que nesta dissertação, sempre foi configurado com taxa de transmissão de 10 Gbit/s sem estrutura de *frame* e com comprimento de  $2^{31}-1$  bits que serviu como sinal modulante, e um módulo receptor óptico (BER RX) para a medição da taxa de erro de bits média. Um laser DFB, um controlador manual de polarização, um modulador externo, um atenuador óptico variável, cabo de RF para conexão do BER TX com a entrada de sinal elétrico do modulador e cabos de fibra óptica para conexão entre os componentes ópticos deste primeiro esquema montado, também constituem parte da montagem, como ilustrado pela Figura 9.

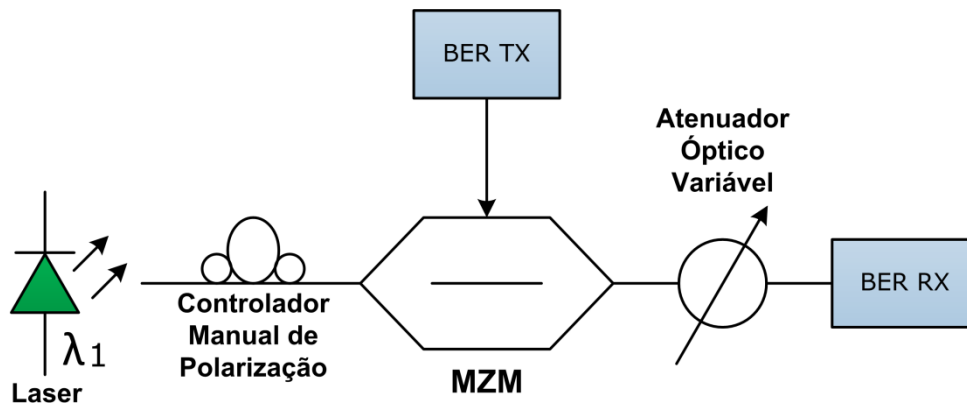


Figura 9 - Configuração Experimental para determinação da Curva de Referência

A função do laser é fornecer a portadora óptica CW a ser modulada, no comprimento de onda  $\lambda_1$ , sendo que em todos os experimentos a escolha do comprimento de onda sempre ocorreu dentro da janela da banda C de operação de sistemas ópticos, pois é a faixa de funcionamento dos outros dispositivos ópticos usados na presente dissertação. O processo de modulação foi realizado pelo modulador Mach-Zehnder (MZM *Mach-Zehnder Modulator*) que foi apresentado no capítulo 3, seção 3.3.1. Uma vez que a entrada do modulador é sensível à polarização, um controlador de polarização manual foi utilizado antes da entrada do modulador com o objetivo de alinhar o eixo de polarização do sinal óptico de entrada com o eixo de polarização ótimo do modulador, a fim de minimizar a perda dependente da polarização. Voltando à Figura 9, um atenuador óptico variável foi utilizado após o modulador para permitir a variação da potência de entrada do receptor por meio de uma perda controlada para a construção do gráfico.

A curva *back-to-back* representa a potência necessária na entrada do receptor para o alcance de uma dada taxa de erro de bit média com o uso do esquema de envio de dado mais simples possível. Assim, todas as fontes de alteração do sinal do transmissor tais como: meio de propagação extenso e adição de componentes para melhoramento da capacidade do sistema não foram utilizados. O gráfico da Figura 10 ilustra o resultado desta configuração inicial que foi utilizada como referência para comparação dos resultados obtidos pelos

outros sistemas de comunicação óptica mais complexa realizada no decorrer do trabalho.

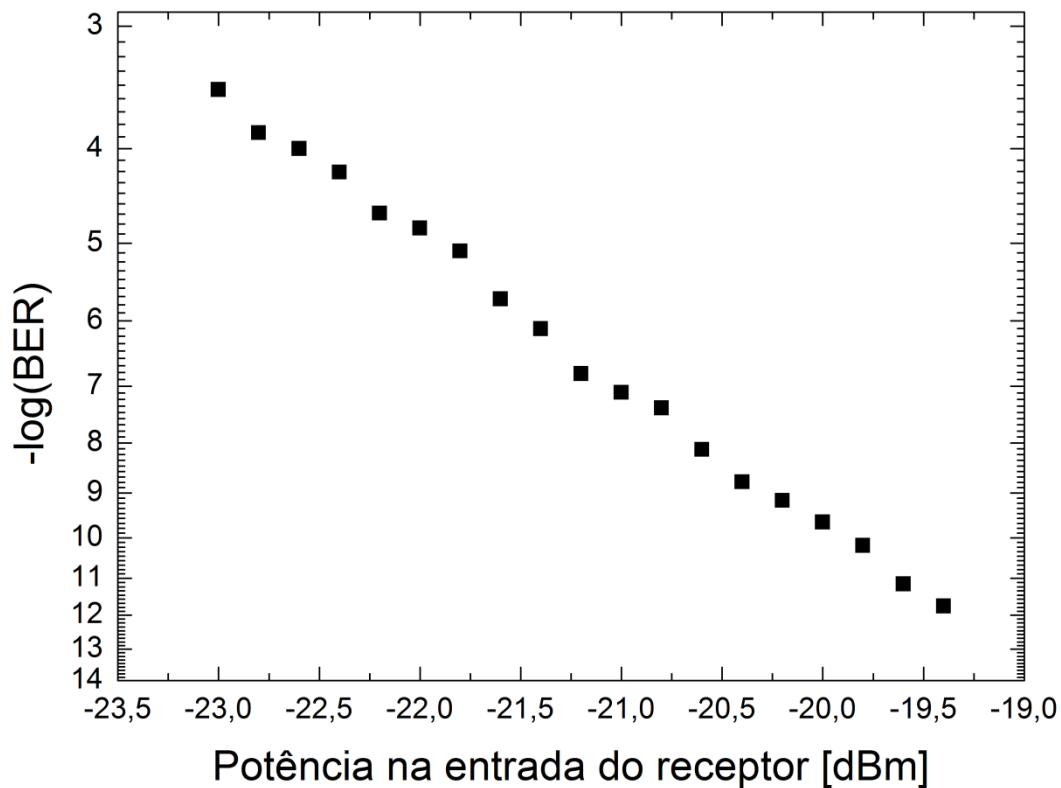


Figura 10 - Curva BER x Potência de entrada do receptor [dBm] na configuração *back-to-back*

#### 4.2. Análise do Desempenho do Sistema sob Filtragem em DWDM

O objetivo deste experimento foi avaliar o efeito da largura de banda do filtro sobre o comportamento na transmissão de dados. No caso do MUX/DEMUX utilizado nos experimentos, a largura de banda de cada canal do dispositivo é proporcional ao espaçamento entre as portadoras dos sistemas DWDM. Esta avaliação quantifica um parâmetro importante, uma vez que, a largura de banda do filtro, a partir de um ponto, adiciona grande penalidade ao sistema de transmissão de dados. Desta forma, foi determinada a penalidade da transferência de dados em função do espaçamento entre canais configurado no MUX/DEMUX. A Figura 11 ilustra a configuração experimental para essa finalidade.

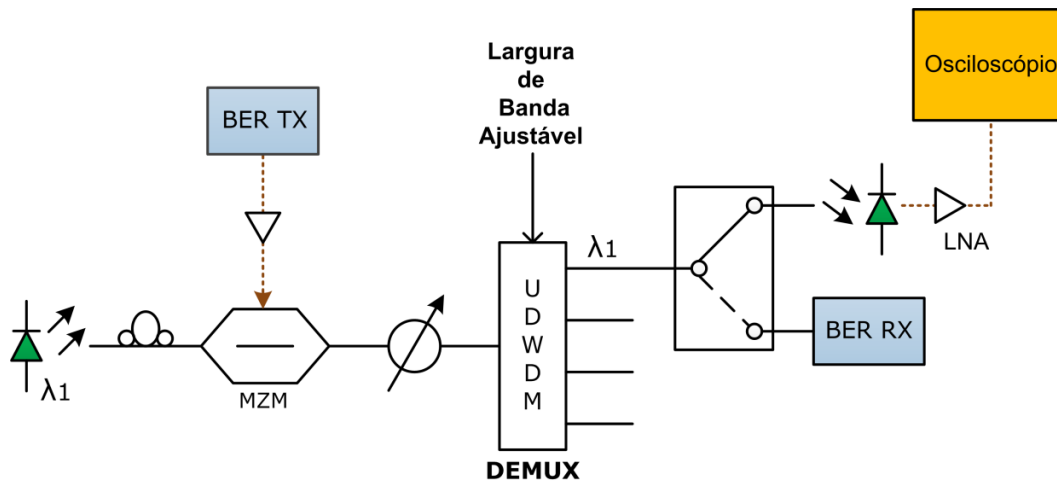


Figura 11 - Configuração Experimental para análise da filtragem para técnica DWDM

A transmissão de dados foi realizada por uma portadora óptica via modulação NRZ-ASK com taxa de 10 Gbit/s, utilizando praticamente os mesmos componentes usados na configuração experimental para a determinação da curva *back-to-back*. A mudança ocorreu a partir do atenuador óptico variável, onde o dispositivo óptico MUX/DEMUX sintonizável foi adicionado para executar a filtragem do sinal. Esse dispositivo pode ser utilizado tanto como um multiplexador ou como um demultiplexador dos sinais ópticos. O modelo usado nesta configuração experimental foi o T-mics/M/10/12.5-25GHz/FC/APC da Kyla. Os parâmetros do espaçamento entre as portadoras e a frequência central dos canais podem ser ajustados de duas maneiras, manualmente ou automaticamente, onde o M indica que as configurações do MUX/DEMUX são realizadas manualmente por meio de parafusos no painel frontal do dispositivo, e o 10 indica que o dispositivo possui 10 canais. O espaçamento entre os canais do sistema pode ser ajustado entre 12,5 GHz e 25 GHz, que caracteriza o espaçamento entre canais do sistema e as últimas informações indicam o tipo de conectorização do dispositivo. Uma chave óptica foi utilizada para o sinal PRBS ser analisado de duas formas distintas: utilizando o receptor PRBS (BER RX) do analisador de taxa de erro média e por meio do diagrama de olho. Utilizando o BER RX, a penalidade de canal  $\lambda_1$  foi determinada para diferentes espaçamentos entre canais de um sistema DWDM, conforme ilustrado na Figura 12. Embora

houvesse apenas um canal no experimento, o espaçamento entre canais foi representado pelo MUX/DEMUX, dispositivo que contém o filtro óptico interno.

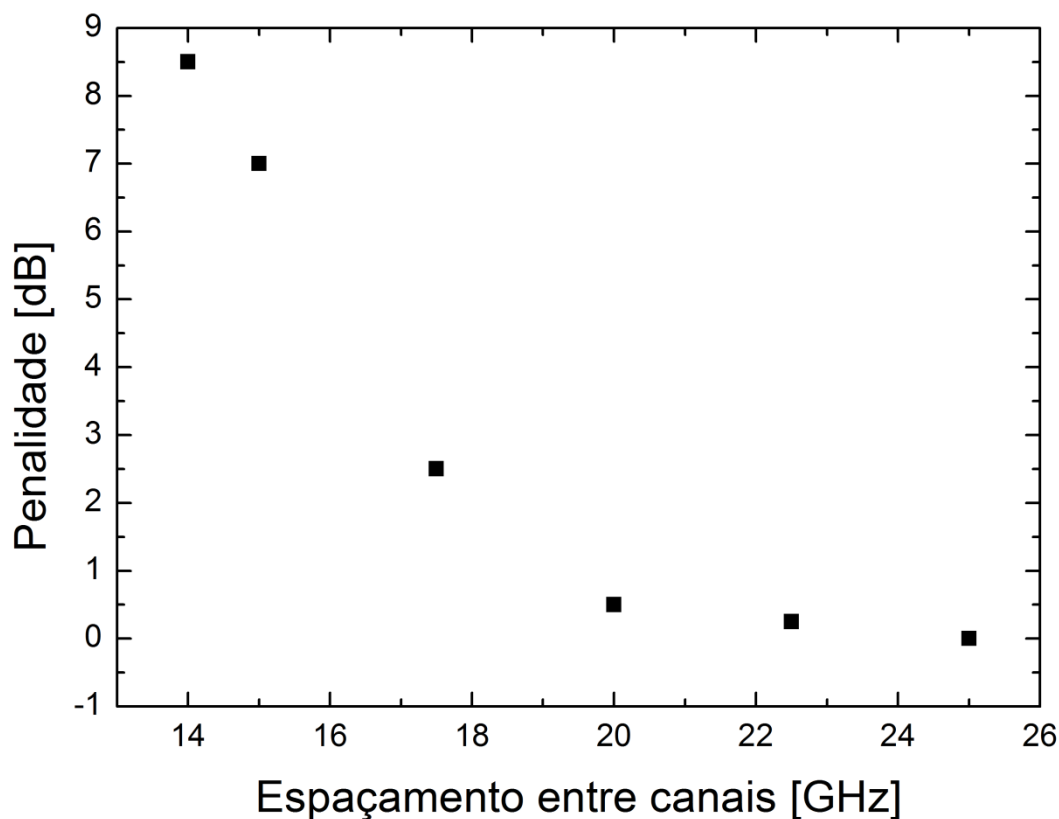
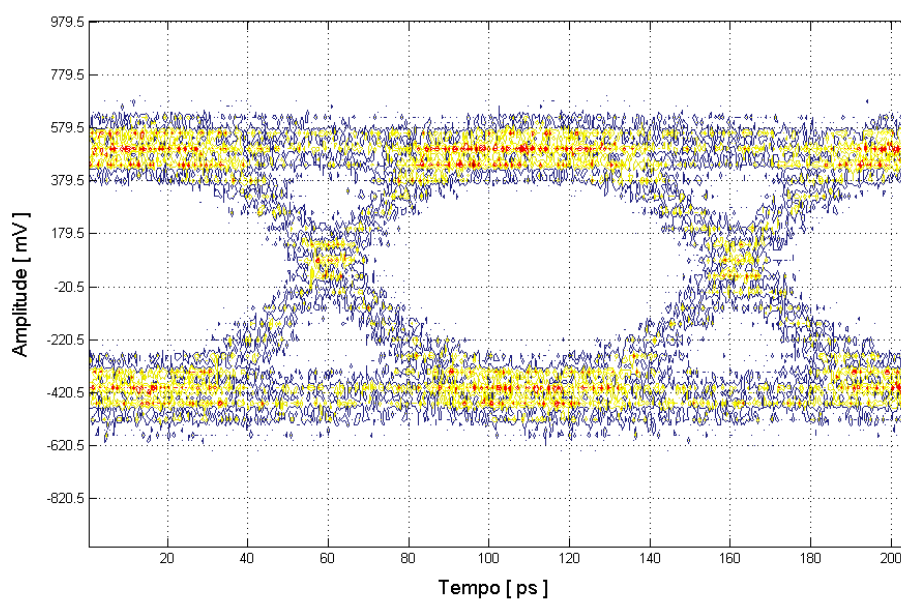


Figura 12 - Penalidade [dB] x Espaçamento entre canais [GHz] com filtro centrado na portadora

Os resultados apresentados são referentes apenas ao desempenho da transmissão de um único canal em função da largura de banda e do espaçamento entre canais sintonizáveis que o demultiplexador pode proporcionar. Até um espaçamento entre canais de 20 GHz, que representa uma largura de banda do filtro óptico de 9 GHz, o sistema funcionou bem, entretanto, a penalidade aumentou rapidamente com a diminuição da largura de banda do filtro. Isso acontece porque, a partir deste ponto, o filtro começa a cortar frequências importantes do espectro do sinal, degradando o desempenho da transmissão de dados.

A outra forma de analisar o comportamento da transmissão de um sinal de 10 Gbit/s em função do filtro do demultiplexador foi através da construção do diagrama de olho. Essa forma de avaliação da qualidade de sistemas digitais, incluindo sistemas de comunicações ópticas, foi realizada neste experimento por

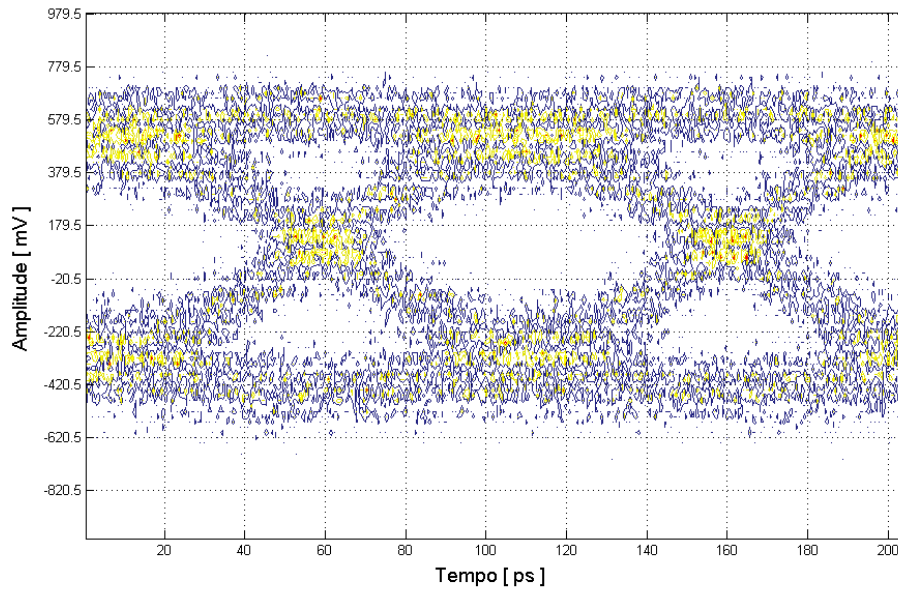
meio da troca de posição da chave óptica para a entrada do fotodetector da configuração experimental apresentado acima. Note que o sinal elétrico na saída do LNA, correspondente à sequência de bit enviada pelo transmissor, no qual foi direcionado para um osciloscópio apropriado. Um *notebook*, via protocolo GPIB, realizou o protocolo de comunicação com o osciloscópio para capturar as informações referentes ao diagrama de olho contido na tela do mesmo. Para realização da aquisição de dados, o *notebook* utilizou um instrumento virtual implementado na plataforma do programa Labview. O programa desenvolvido em Labview, utilizando o protocolo de comunicação GPIB com o osciloscópio, coletava uma centena de varreduras de telas do osciloscópio salvando-as em arquivos.txt. Com esse banco de dados, o processamento dos dados adquiridos foi realizado usando o programa MATLAB. Basicamente, o programa exportava todos os arquivos gerados na aquisição de dados, utilizando-os para criação de um histograma para cada ponto do eixo horizontal de tempo. Nas Figuras 13 e 14, podem ser observados as ilustrações de dois exemplos de diagrama de olho obtidos; para espaçamento entre canais de 15GHz e 25GHz respectivamente.



### **Espaçamento entre Canais 25 GHz**

**Penalidade = 0 dB**

Figura 13 - Diagrama de Olho para espaçamento entre Canais de 25 GHz na configuração apresentada na Figura 11



## Espaçamento entre Canais de 15 GHz

### Penalidade = 7,5 dB

Figura 14 - Digrama de Olho para espaçamento entre canais de 15 GHz

Os pontos na cor azul escuro representam uma frequência de menor incidência do sinal na tela do osciloscópio. Os pontos na cor amarela representam grande incidência do sinal. Já os pontos na cor vermelha representam a maior incidência de sinal. Como pode ser observado, com espaçamento entre portadores de 25 GHz, o diagrama de olho representa a configuração experimental com penalidade de 0 dB, conforme ao resultado da Figura 10, vislumbrando uma ilustração do olho totalmente aberto como esperado. No caso para o espaçamento entre portadores ser igual 15 GHz, a configuração experimental apresenta uma penalidade de 7,5 dB, segundo dados da Figura 10 e, por consequência, um diagrama de olho mais fechado. Utilizando apenas o módulo receptor do analisador de taxa de erro (BER RX) já seria obtida uma análise satisfatória do desempenho, mas a captura do diagrama de olho desta configuração experimental foi realizada para a criação da ferramenta de aquisição de dados via protocolo GPIB, fundamental para análise de sistemas de modulação mais complexas que, por ventura, poderiam ser realizadas posteriormente neste trabalho ou em trabalhos futuros.

Todos os resultados mostrados até o momento foram realizados com o filtro centrado na frequência da portadora óptica. Um estudo, apresentado a seguir, mostra que se o filtro sofrer um deslocamento na frequência, melhores resultados podem ser alcançados.

#### 4.2.1

##### **Análise de desempenho com o centro do filtro deslocado da frequência da portadora óptica**

A configuração experimental utilizada na Figura 11 foi aproveitada para a realização da investigação do desempenho do sistema efetuando o deslocamento da frequência da portadora óptica em relação ao centro do filtro. O gráfico da Figura 15 apresenta os espectros dos sinais modulados na entrada do receptor utilizando um espaçamento entre canais de 16 GHz no demultiplexador para uma taxa média de erro (BER) =  $1E-9$ . O procedimento para a construção do gráfico foi realizado mantendo a frequência central do filtro do canal utilizado do demultiplexador fixo, enquanto a frequência do sinal da portadora sofreu deslocamento em relação à frequência central do filtro no intervalo de 0 GHz até 5,5 GHz, com passo de 0,5 GHz. Para o deslocamento de 4 GHz, a transmissão de dados exibiu o melhor resultado, pois o receptor apresentou a menor potência de entrada necessária para a taxa de erro de bit média usado como referência. Com o deslocamento da portadora óptica do sinal em relação à frequência central do filtro, deu-se origem a um novo formato de modulação conhecido como ASK-VSB, o qual apresentou um desempenho superior à modulação ASK. O espaçamento entre canais utilizado define o número total de canais que podem ser alocados em um sistema DWDM de transmissão de dados. O trabalho adotou a grade regulamentada na ITU-T de 50 GHz. Com isso, o espaçamento entre canais para alocação de 3 canais na grade de 50 GHz não deve passar de 16,66 GHz. A largura do filtro do MUX/DEMUX utilizado em torno desta condição limite, possui uma frequência de corte abaixo do necessário para não degradar o sinal recebido de um canal com taxa de transmissão de 10 Gbit/s com modulação ASK. O filtro corta componentes de frequência do sinal. No caso da modulação ASK-VSB, há um deslocamento do filtro do MUX/DEMUX em relação à frequência da portadora do canal para suprimir umas das bandas laterais e para melhor alocação



do espectro da outra banda lateral do sinal em relação ao filtro. A supressão de uma banda não causa penalidade pois trata-se apenas de informação redundante e o deslocamento garante menos corte no espectro da banda alocada dentro da largura de banda do filtro.

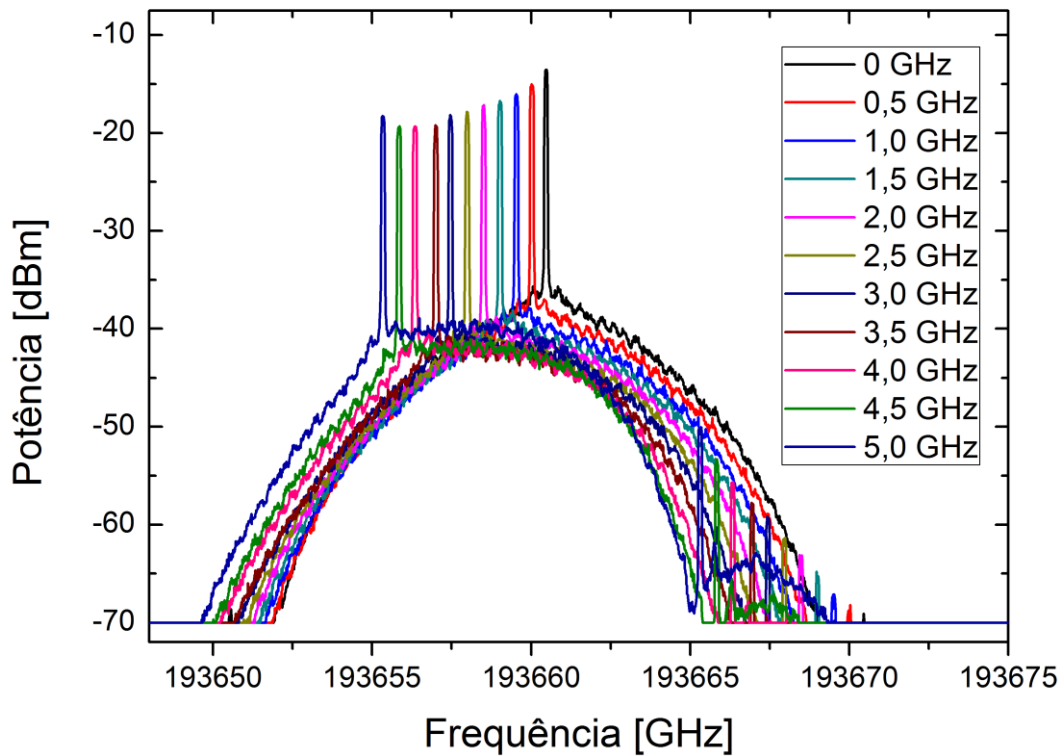


Figura 15 - Diversos espectros do sinal na entrada do receptor para uma taxa de erro de bit de  $1E-9$  deslocando a portadora em relação ao centro do filtro

A título de comparação, foi realizada a simulação da configuração experimental utilizando o programa Photoss. O parâmetro de penalidade foi utilizado para análise do comportamento do sistema. Como objetivo era a realização de uma comparação com uma configuração experimental realizada, os dispositivos e parâmetros do experimento foram reproduzidos com a maior fidelidade possível na simulação.

Os pontos no formato de triângulos representam os pontos obtidos na simulação. Os pontos quadrados representam os pontos coletados experimentalmente, conforme Figura 16.

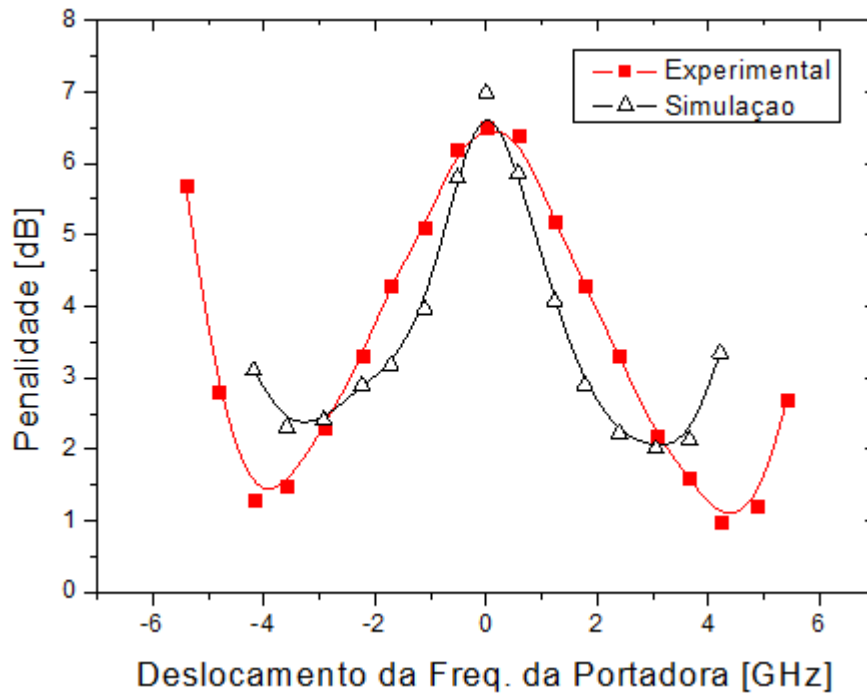


Figura 16 - Resultado da simulação da penalidade em função do deslocamento da frequência da portadora para uma BER =  $10^{-9}$

O gráfico ilustra os resultados realizando o deslocamento da portadora óptica do sinal, sempre utilizando a frequência central do filtro como referência, na faixa de aproximadamente  $\pm 5,5$  GHz. Primeiro, é notável a semelhança das duas curvas, o que valida o resultado experimental. A penalidade da configuração experimental atingiu o patamar de quase 6 dB, utilizando como extremos de comparação os pontos de deslocamento de 0 GHz e -4 GHz, conforme pode ser observado no eixo de frequências do gráfico. Esse número quantifica a diferença de desempenho de um sistema de modulação ASK-VSB, utilizando um deslocamento na frequência de -4 GHz, comparado ao sistema sem deslocamento, conforme a modulação ASK. Na simulação, realizando a mesma comparação, chega-se à diferença de penalidade de 5,5 dB. A conclusão deste experimento é a observação, mais uma vez, da superioridade de desempenho utilizando uma modulação ASK-VSB em comparação à modulação ASK. A diferença entre o experimento e a simulação encontra-se no fato de haver variáveis no experimento não reproduzidas com total exatidão na simulação, entre os quais a diferença entre o formato do filtro utilizado na simulação e no experimento.

### 4.3. Avaliação do efeito da Multiplexação Densa por Divisão de Comprimento de Onda

A técnica de multiplexação por divisão de comprimento de onda, conforme apresentado no capítulo 3 seção 3.1, é uma forma consagrada do aumento da capacidade da transmissão de dados de um sistema de comunicação óptica. Nesta seção, é apresentada uma configuração experimental para avaliação da aplicação desta técnica. A Figura 17 apresenta a configuração experimental realizada para o estudo da multiplexação por divisão de comprimento de onda.

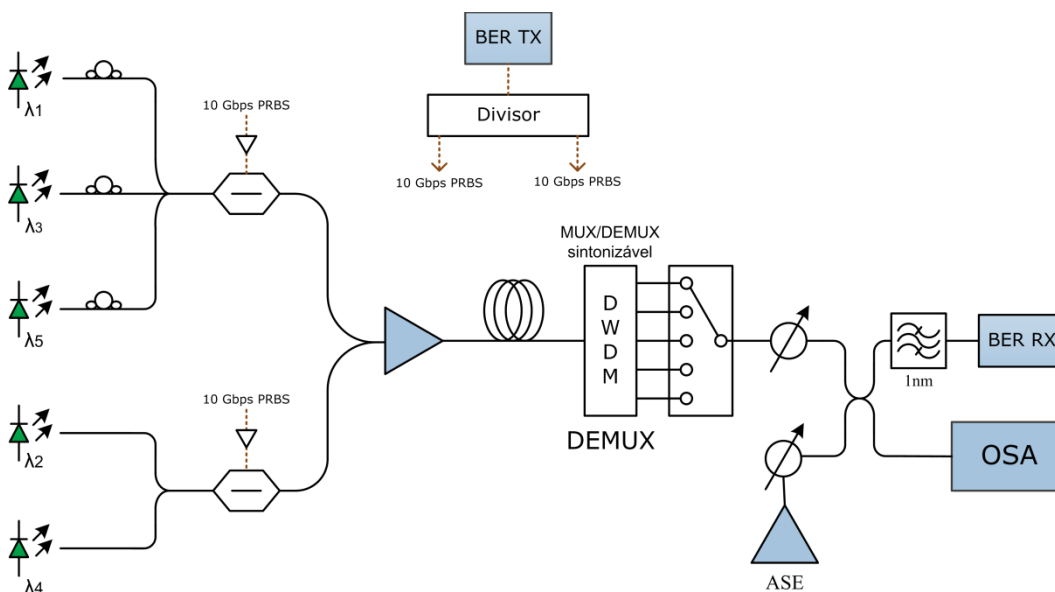


Figura 17 - Configuração Experimental para análise da técnica de Multiplexação em Comprimento de Onda em sistema DWDM

O número de canais multiplexados foi cinco, sendo que foram utilizados cinco lasers: um para cada sinal da portadora. No processo de multiplexação dos canais, um conjunto de acopladores 50x50 foi utilizado. Os canais  $\lambda_1$ ,  $\lambda_3$  e  $\lambda_5$ , fazendo uso de 2 acopladores, foram direcionados para o modulador 1. Situação semelhante ocorreu com os canais  $\lambda_2$  e  $\lambda_4$ , onde foi preciso o uso de apenas um acoplador para direcionar os dois sinais de portadoras para o modulador 2. Os cinco canais modulados foram multiplexados com uso de mais um acoplador 50x50 e, antes de se propagarem no enlace de fibra óptica com extensão de alguns quilômetros, foram amplificadas por um amplificador óptico EDFA para compensação das perdas de potência dos sinais que sofreram bastante atenuação

com o uso dos acopladores. A capacidade total de transmissão de dados do sistema analisado foi multiplicada por cinco comparado a um sistema monocanal com taxa de 10Gbit/s. Os comprimentos de onda das portadoras ópticas, o espaçamento entre canais e a largura de banda do sistema DWDM são ilustrados apresentados na Figura 18.

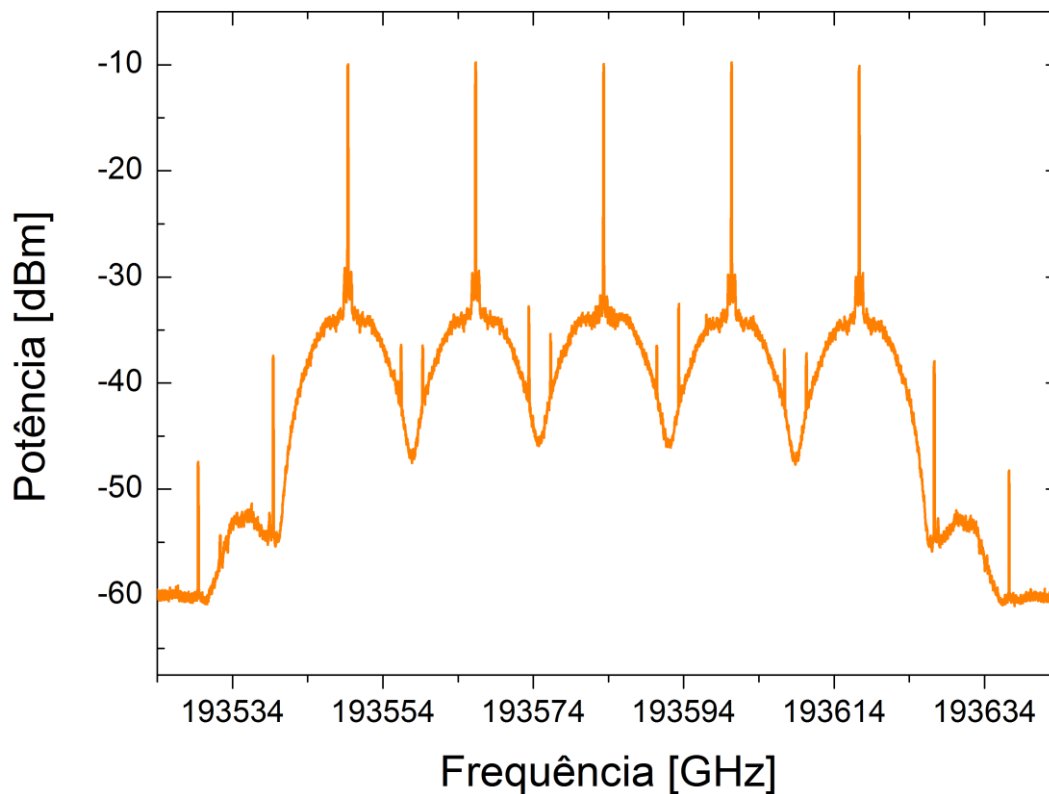


Figura 18 - Espectro dos cinco canais na entrada do amplificador óptico EDFA

Conforme a Figura 18, alguns parâmetros importantes podem ser observados. Pode ser notada a presença das cinco portadoras com espaçamento de 16,5 GHz entre canais e a potência máxima dos canais individualmente encontra-se em torno de -10 dBm. O nivelamento dos cinco canais foi alcançado usando técnicas como aumento da perda por aumento da curvatura da fibra óptica e aumento da perda nos conectores das fibras ópticas nos caminhos por onde existissem canais com excesso de energia, de forma que os níveis de potência dos canais fossem o mesmo na entrada do enlace. A largura de banda necessária para a transmissão de 50 Gbit/s utilizando esta configuração experimental foi 82,5 GHz. Deste modo, a eficiência espectral foi de  $\sim 0,61$  (bit/s)/Hz. No fim do enlace óptico, um demultiplexador com filtro gaussiano de 3dB em 8 GHz com espaço entre

canais de 16,5 GHz foi utilizado para separar os cinco canais. Cada canal foi analisado separadamente de duas formas distintas: a primeira levando em consideração a taxa de erro de bit média em função da potência na entrada do receptor e a segunda levando em consideração a taxa de erro de bit média do sistema óptico de transmissão de dados em função da relação sinal-ruído óptica (OSNR) encontrada no receptor utilizando uma potência de -19,5 dBm no receptor como referência. Para melhor entendimento do procedimento para obtenção dos resultados referentes à configuração experimental utilizada nesta seção, faz-se necessária menção novamente à Figura , onde são ilustrados os componentes após o demultiplexador para a aquisição dos resultados. Um atenuador óptico variável foi alocado na saída do canal sob análise para permitir a variação da potência de entrada no receptor para a realização da avaliação da taxa de erro de bit média de acordo com a potência de referência. Todos os componentes após o demultiplexador foram conectados nas saídas relativas a cada um dos cinco canais para a obtenção dos resultados sem a realização de ajustes na configuração experimental de forma que maximizasse o desempenho global do sistema e não o melhor desempenho individual de cada canal. O procedimento inicial para a realização da aquisição dos resultados foi maximizar o desempenho de cada canal do sistema sem degradar os seus vizinhos. Ao final deste procedimento inicial, o desempenho dos canais eram os mais equilibrados possíveis e melhores em um contexto mais amplo. Esse foi o procedimento escolhido porque representa um cenário real de um enlace de fibra óptica.

Na Figura 19, pode ser observado o gráfico da taxa de erro de bit média em função da potência na entrada do receptor.

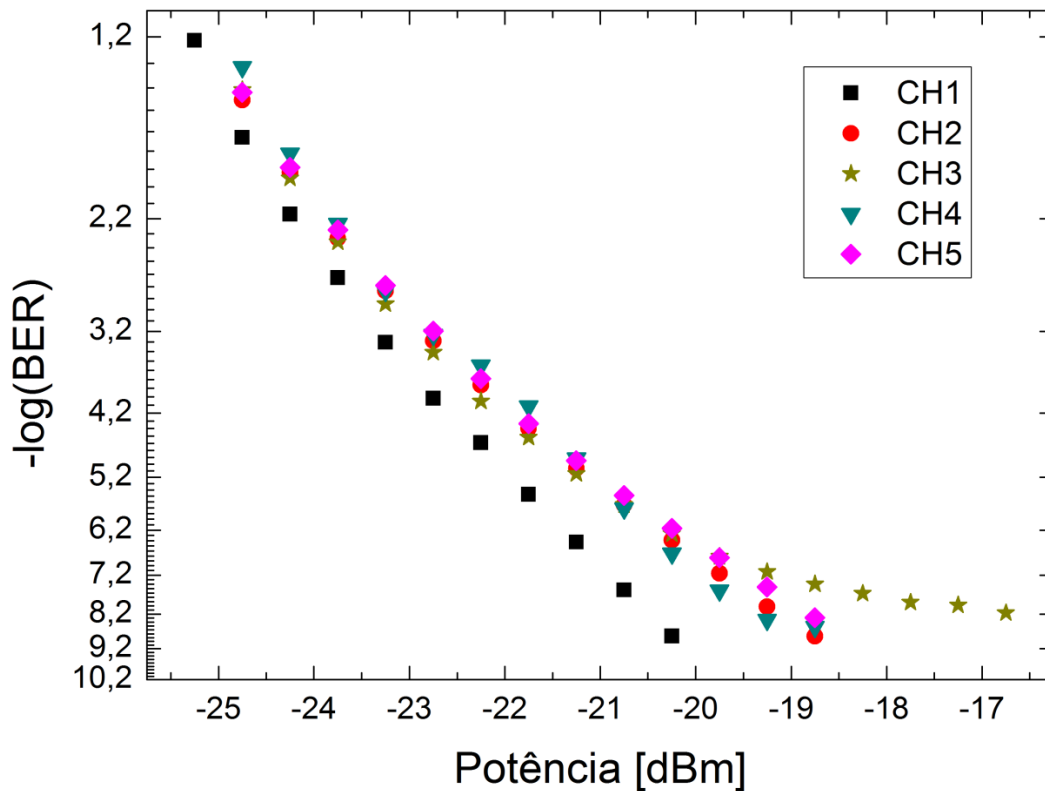


Figura 19 - BER x Potência na entrada do receptor [dBm]

Voltando a Figura 18, é possível notar a presença de diafonia em cada canal analisado devido a proximidade dos canais adjacentes. Esse problema é mais evidente no canal central que apresenta mais dois canais do sistema de cada lado. Já os canais da extremidade,  $\lambda_1$  e  $\lambda_5$ , não possuem um fator degradante de desempenho em um dos lados de utilização da banda. Isso pode explicar o melhor desempenho do canal 1 e o pior desempenho entre todos os canais, justamente do canal central. A modulação realizada foi a ASK-VSB. A banda lateral esquerda foi escolhida para não ser suprimida, assim o canal 1 foi ainda mais beneficiado, pois é o único canal com menos efeito de diafonia pela ausência de uma banda lateral direita de um canal adjacente. Na presença de pouca potência, todos os canais apresentam uma BER similar, pois o ruído dominante nesta faixa é a do próprio receptor que é igual para todos os canais. Os efeitos de diafonia devido a imperfeições do MUX/DEMUX e ao fenômeno de mistura de quatro ondas (FWM – *Four Wave Mixing*) ganham relevância com a adição de potência de sinal no receptor. Esses efeitos podem ser claramente observados principalmente entre os canais 1 e 3.

Como mencionado antes, o processo para aquisição de dados para a construção do gráfico da Figura 19 procurou maximizar o desempenho global do sistema e não a busca dos melhores resultados individuais. Já para a construção do próximo gráfico apresentado, o deslocamento do filtro do MUX/DEMUX da configuração experimental, entre outros parâmetros foram modificados a fim de realizar a aquisição da melhor BER em função da OSNR para cada canal do sistema.

Desta forma, para análise em função da OSNR, após o demultiplexador, um acoplador óptico 50x50, dois atenuadores ópticos variáveis, um amplificador EDFA e o equipamento analisador de espectro óptico foram utilizados exclusivamente para a realização da obtenção da taxa de erro de bit média do sistema de transmissão de dados em função da relação sinal-ruído óptico. A potência de sinal do canal sob análise foi fixada em -19,5 dBm, pois esse valor representada uma BER próxima de  $10^{-9}$  no receptor na ausência de adição de ruído. Para adição de ruído, um amplificador EDFA foi utilizado sem nenhum sinal óptico na entrada em série com um atenuador óptico variável para possibilitar o controle da potência do ruído de emissão espontânea (ASE) oriunda da saída do amplificador. O acoplador foi utilizado nesta configuração experimental para unir o sinal óptico do canal e a fonte de ruído óptico para a construção do gráfico da Figura 20.

A primeira observação é o fato das curvas dos cinco canais estarem com um desempenho mais próximo comparado ao resultado em função da potência no receptor. A forma da realização da aquisição dos resultados tornou os canais mais externos com condições iguais de fontes de ruído. Os canais 1 e 5 apresentaram um resultado bastante similar e superior comparado aos outros canais. Os canais 2,3 e 4, por sua vez, apresentaram um resultado bastante similar. Com a OSNR pequena, o ruído de ASE era o predominante e igual para todos os canais. Por isso, pode ser notado que o desempenho dos canais para uma OSNR pequena, por volta de 16 dB, é praticamente o mesmo. Com a diminuição da parcela de ruído procedente do gerador de ASE, os fenômenos de diafonia ocorrido em cada canal ganham importância e, por consequência, modifica o comportamento dos canais. Pode ser também o observador que acima de 24 dB todos os canais apresentam um patamar de BER, fenômeno característico da interferência entre canais.

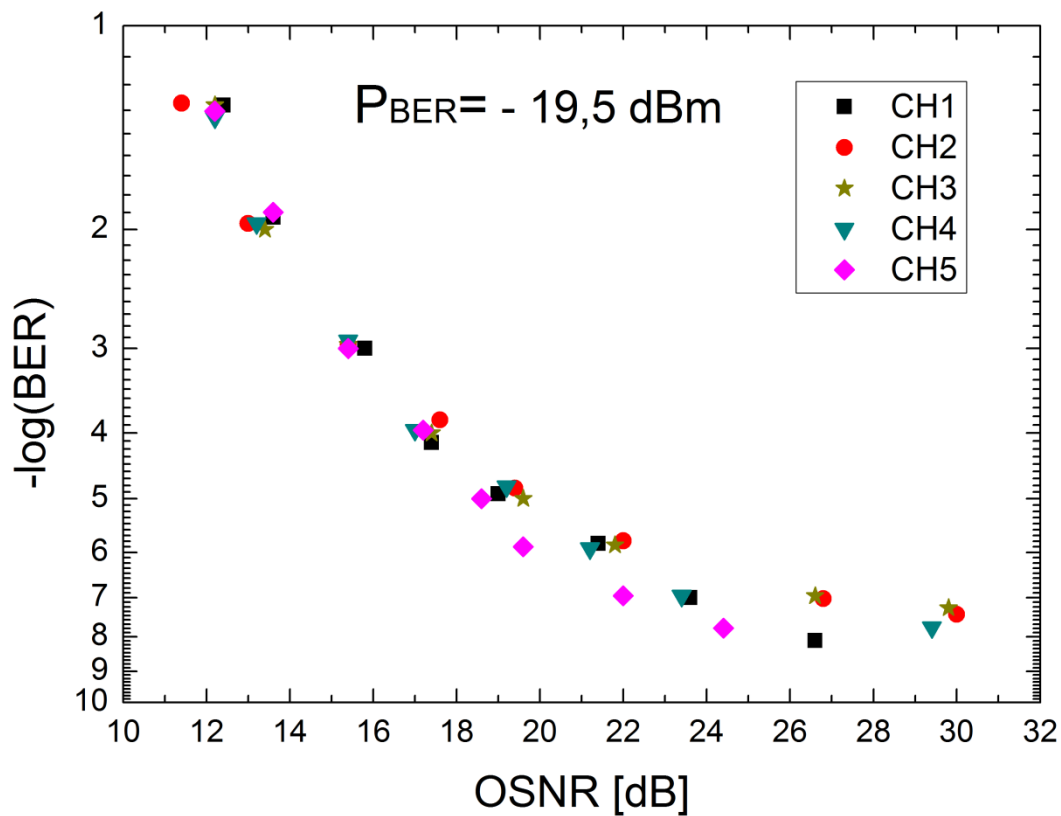


Figura 20 - BER x OSNR [dB]

#### 4.4.

#### Avaliação do Efeito da Multiplexação em Polarização

A técnica de multiplexação em polarização (PolMUX) permite um aumento da eficiência espectral do sistema de transmissão óptica em até 100%[15]. A configuração experimental apresentada na Figura 21 teve como objetivo verificar o comportamento da penalidade de potência no receptor devido à utilização desta técnica.



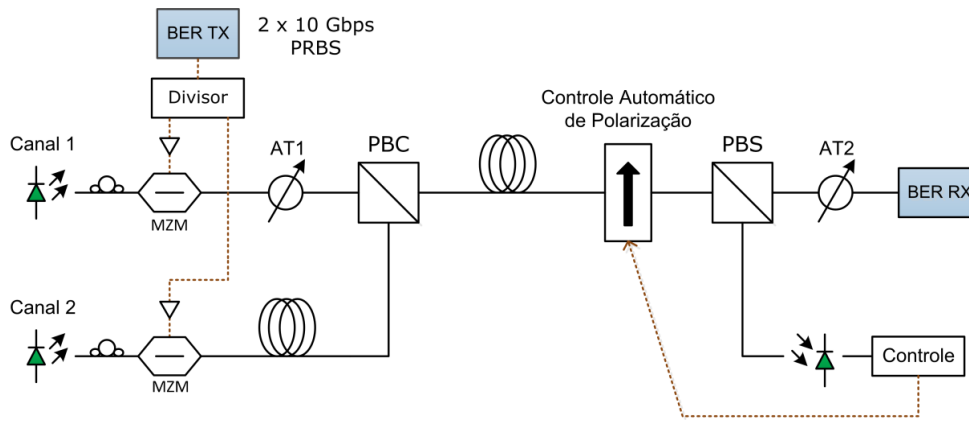


Figura 21 - Configuração Experimental para Avaliação da Multiplexação em Polarização

Para possibilitar a multiplexação em polarização (PolMUX), alguns componentes tiveram que ser adicionados em relação às configurações apresentadas até o momento. Para multiplexar em polarização os sinais das fontes de luz, foi utilizado um combinador de feixe da polarização para juntar os sinais das fontes polarizados horizontalmente e verticalmente na saída do combinador de feixe de polarização (PBC *Polarization Beam Combiner*) situado na entrada do enlace de fibra óptica. O primeiro atenuador (AT1) converteu o balanceamento de potência com o segundo canal que sofreu uma atenuação superior devido ao uso de um rolo fibra óptica para descorrelacionar os sinais modulantes provenientes do mesmo gerador de sinais PRBS. Os comprimentos de onda das portadoras ópticas sofreram uma mudança de forma que o valor máximo do canal 1 estivesse situado no primeiro zero do espectro de frequência do canal 2 e vice-versa. Com isso, o sistema de transmissão de dados demanda uma maior largura de banda, mas ganha robustez quanto ao embaralhamento das polarizações dos canais no enlace da fibra óptica, diminuindo a probabilidade de agregação de penalidades no sistema de comunicação óptica em questão. Para manter os dois canais separados em polarização no enlace foi utilizada uma técnica de controle automático da polarização, que utilizou um fotodetector para maximizar o sinal de amostra de um dos canais. O sinal elétrico de realimentação era coletado após o componente óptico separador de feixes em polarização (PBS *Polarization Beam Splitter*) que era utilizado para separar os dois canais no fim do percurso para o processamento de análise do desempenho. O controle de polarização funciona de forma a maximizar o sinal de realimentação recebido, assim mantendo o máximo do sinal com polarização correspondente à entrada do PBS corretamente direcionado e, por

consequência, direcionando também o máximo do sinal correspondente à outra entrada do PBS.

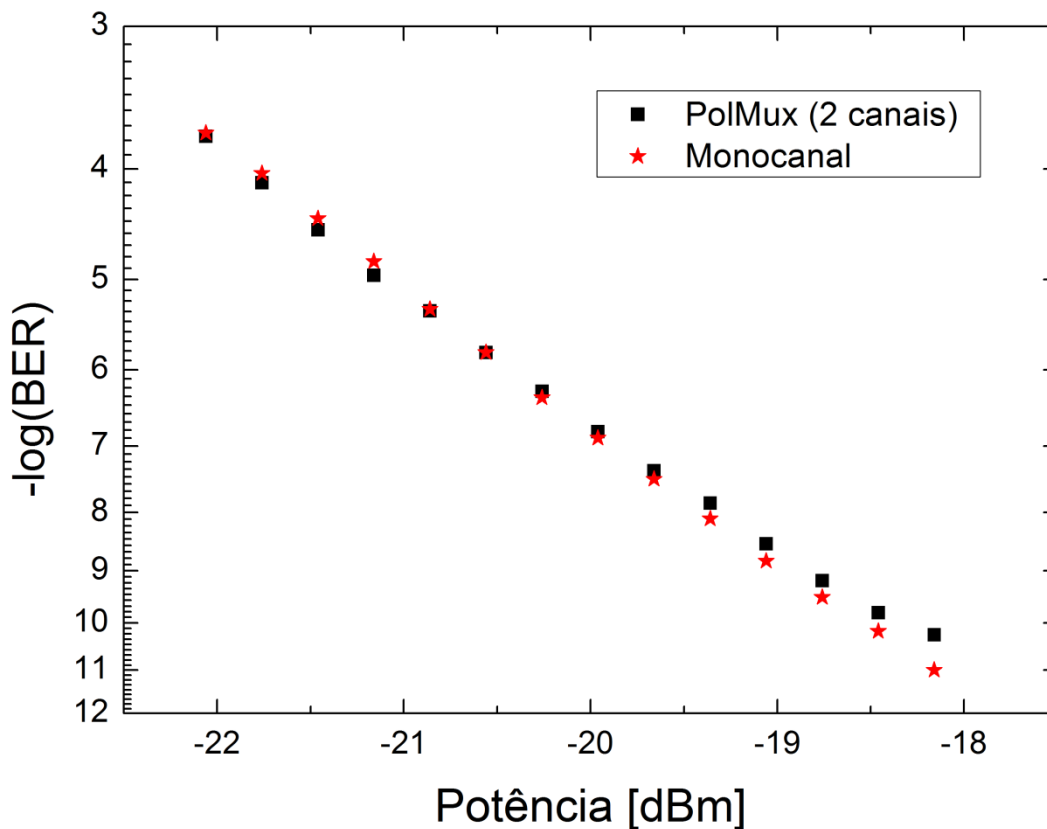


Figura 22 - Curva BER para uma transmissão com um único canal e para uma transmissão usando 2 canais de 10Gbit/s utilizando a técnica de multiplexação em polarização

Um resultado bastante satisfatório foi obtido como pode ser observado na Figura 22. Uma curva de BER muito semelhante foi obtida para um único canal de transmissão referente à curva de referência comparada com a utilização da técnica de multiplexação em polarização dobrando a capacidade de transmissão de dados. No resultado utilizando a multiplexação em polarização, o primeiro canal foi usado para análise da taxa média de bits, representada na Figura 22, enquanto o segundo canal foi utilizado como sinal de controle da polarização. A largura de banda necessária para transmitir dois canais de 10 Gbit/s utilizando a multiplexação em polarização é menor comparada ao envio de dois canais de 10 Gbit/s em um sistema DWDM sem o uso desta técnica, em um custo pequeno de penalidade.

#### 4.5. Multiplexação Densa por Divisão em Comprimento de Onda e em conjunto com Multiplexação em Polarização

Após os experimentos realizados para avaliação das técnicas de multiplexação por divisão de comprimento de onda e multiplexação em polarização, o próximo passo foi analisar o comportamento das técnicas em conjunto. Desse modo, a configuração experimental para o teste do comportamento das técnicas em conjunto está representada na Figura 23.

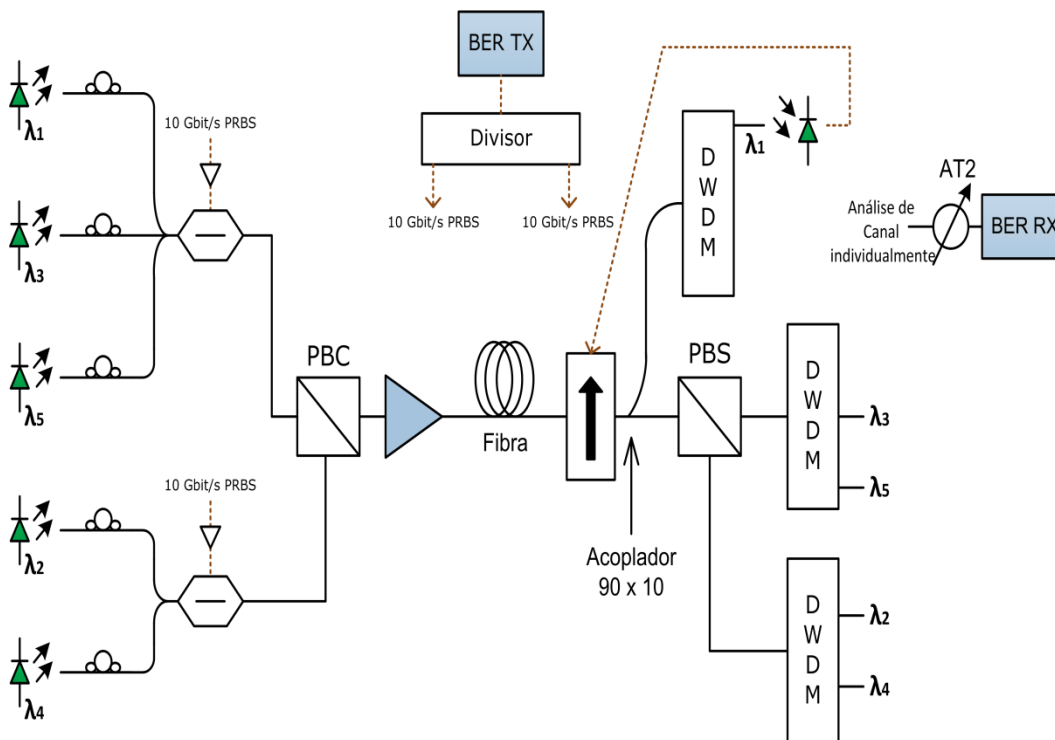


Figura 23 - 50 Gbit/s utilizando POLMUX em conjunto com um sistema UDWDM de 50GHz

No experimento da seção 4.3, a transmissão de 50 Gbit/s foi realizada dentro de uma janela de operação de 82,5 GHz, utilizando apenas um sistema DWDM. Com a adição do PolMUX, a mesma capacidade de transmissão de dados pode ser alcançada em uma banda de operação de apenas 50 GHz. A configuração experimental foi realizada, conforme Figura 23, utilizando o contingente de cinco lasers; um para cada portadora óptica. No módulo do transmissor, um MZM foi utilizado para realizar a modulação de três canais e um segundo MZM foi utilizado para modular os outros dois canais restantes. Em seguida, um PBS foi utilizado para injetar na fibra óptica usada como o meio de

propagação, os três canais ( $\lambda_1$ ,  $\lambda_3$  e  $\lambda_5$ ) com polarização ortogonal aos outros dois canais ( $\lambda_2$  e  $\lambda_4$ ). O comprimento de onda de cada portadora foi ajustado de forma que o valor máximo de um canal com polarização vertical casasse com um zero no espectro de um canal com polarização horizontal e vice-versa. Esse procedimento, apesar de piorar a eficiência espectral do sistema, teve como objetivo melhorar a robustez do sistema implementado em relação à provável penalidade devido a multiplexação em polarização. Na Figura 24, é ilustrado o espectro sobreposto nas duas entradas do PBS.

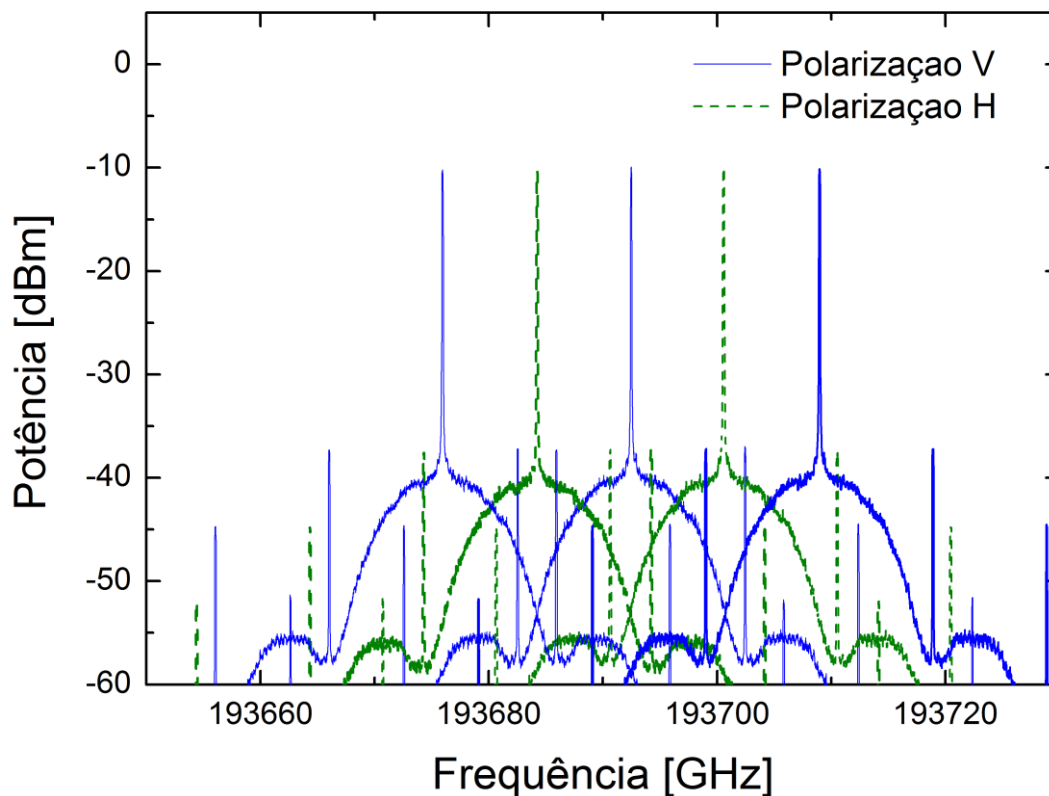


Figura 24 - Espectros dos 3 canais polarizados verticalmente e espectro pontilhado dos dois canais restantes com polarização ortogonal

O espaçamento entre canais com polarização análoga foi definido em 16,5 GHz, pois representa a maior separação a fim da largura de banda total do sistema não ultrapassar 50 GHz, que é comercialmente utilizado nos sistemas de comunicação óptica. Na Figura 25, pode ser visualizado o espectro dos cinco canais em conjunto na saída do módulo transmissor.

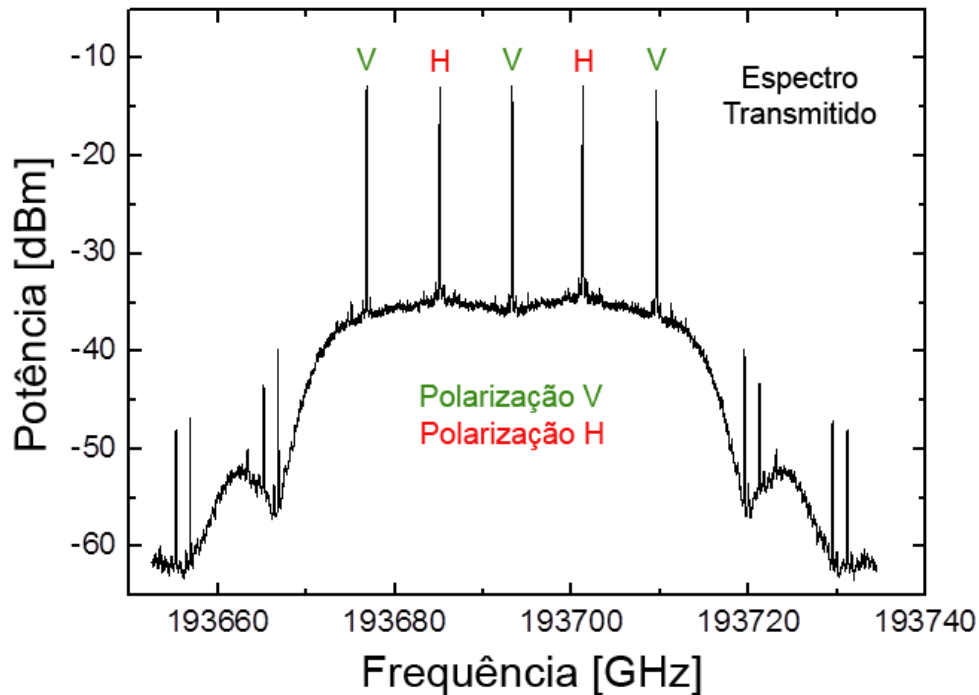
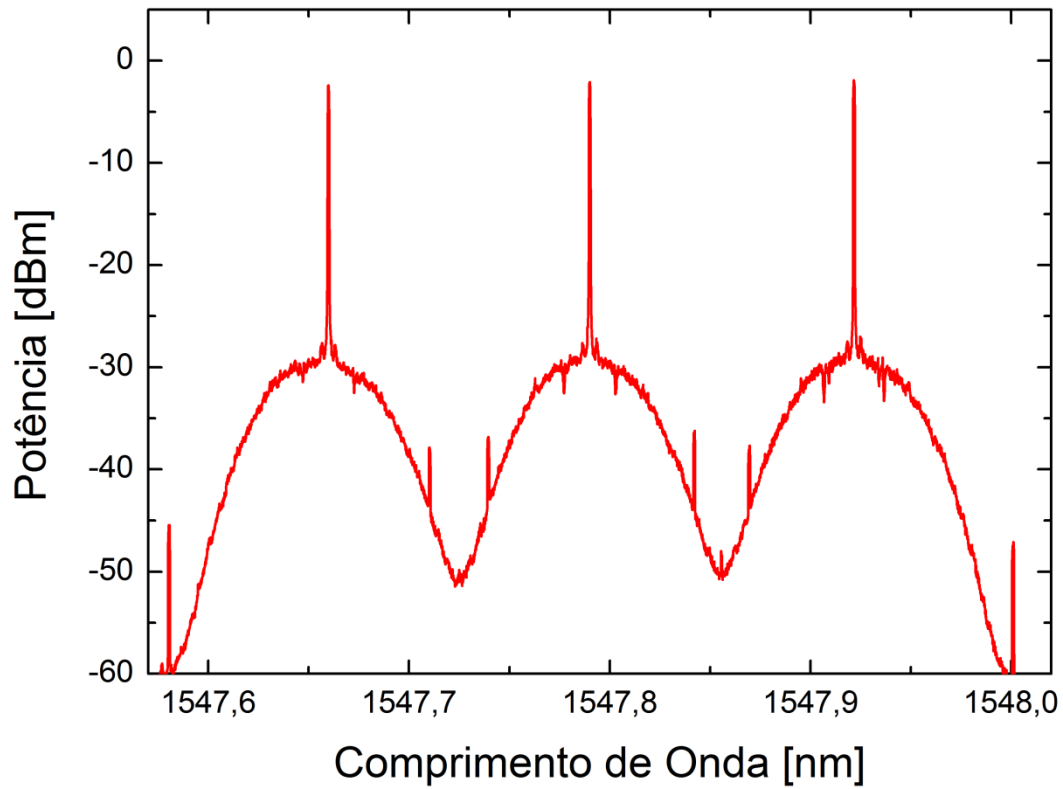


Figura 25 - Espectro dos cinco canais de comunicação adquiridos na saída do módulo transmissor

Por meio da visualização do espectro na saída do transmissor, pode-se notar o quanto os canais adjacentes, independente da polarização, estão próximos. O espaçamento entre canais é de 8,25 GHz, valor bastante estreito, o que torna o PolMUX de suma importância para distanciar os canais e, desta forma, viabilizar a transmissão de dados com taxa de erro média aceitável. Após a montagem da configuração experimental, o primeiro ponto relevante foi averiguar, mais uma vez, a vantagem da realização do deslocamento do filtro do demultiplexador em relação à portadora óptica dos canais. O espectro do sinal na saída do demultiplexador com filtro centrado e deslocado das portadoras ópticas dos canais com polarização vertical é ilustrado na Figura 26.

(a)



(b)

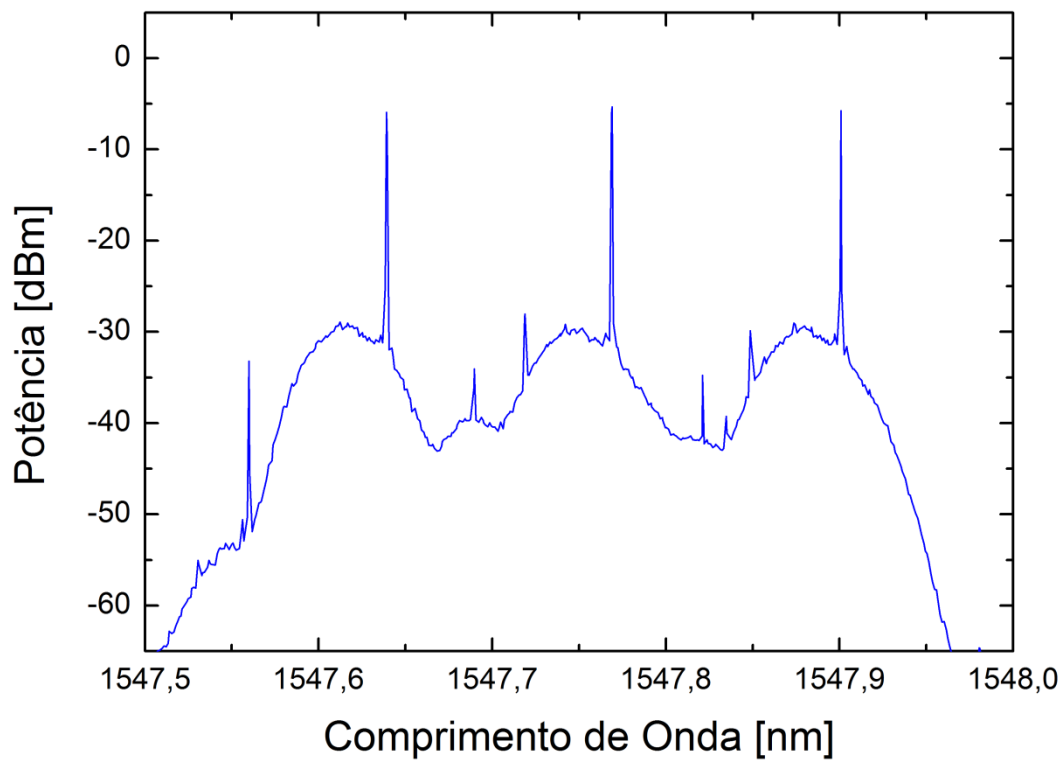


Figura 26 - (a) Espectro dos canais com centrados no máximo do filtro utilizado para e demultiplexação e (b) o mesmo espectro com a frequência deslocada em relação ao valor de máximo do filtro

O resultado acima é referente ao canal central (comprimento de onda  $\lambda_3$ ), que é o mais afetado por possuir canais adjacentes em ambos os lados, mostra que a modulação ASK-VSB apresenta uma penalidade bastante inferior à modulação ASK. Em números, os valores estão de acordo com os resultados anteriormente medidos nos sistemas menos complexos. A título de ilustração, a Figura 27 ilustra o espectro do sinal utilizado para a realimentação do controlador automático da polarização. Apesar do nível pequeno de potência do sinal, o fotodetector utilizado para conversão do sinal óptico em sinal elétrico dispunha um fator de ganho na ordem de  $10^4$ , o que era suficiente para fornecer um sinal elétrico de realimentação de 0 v até 5 v, conforme especificação do controlador automático de polarização.

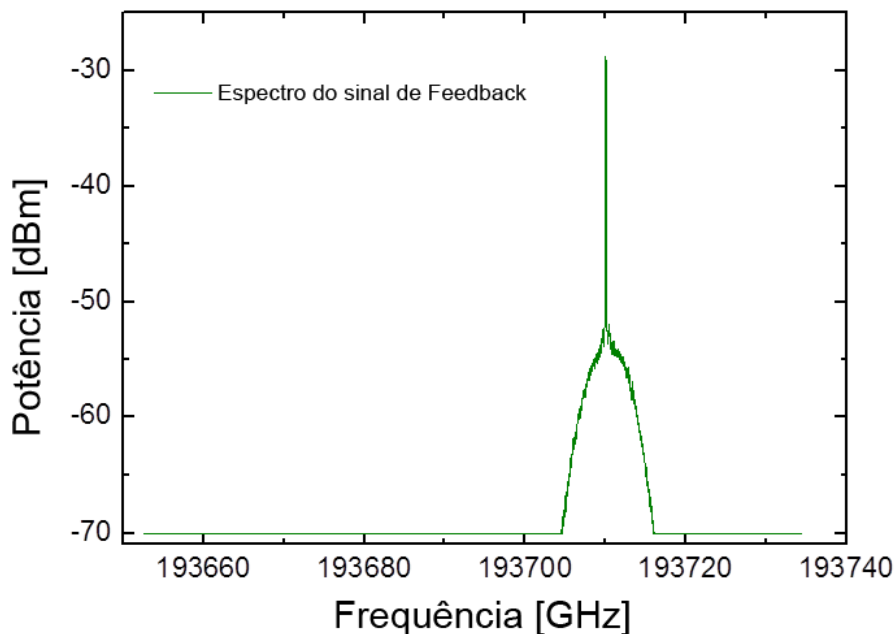


Figura 27 - Sinal de realimentação utilizado para alimentar o controlador automático de polarização

#### 4.6. Geração de Múltiplas Portadoras

Após o estudo das técnicas tendo em vista o comportamento dos sistemas ópticos de transmissão de dados tendo em vista a busca do melhoramento da eficiência espectral das configurações experimentais, o próximo passo foi realizar

um experimento para analisar o desempenho da configuração experimental em virtude da utilização de um gerador de multiportadoras ópticas no lugar dos lasers usados para o fornecimento do sinal de portadora para cada canal individualmente até o momento. O esquema do gerador de multiportadoras está ilustrado na Figura 28.

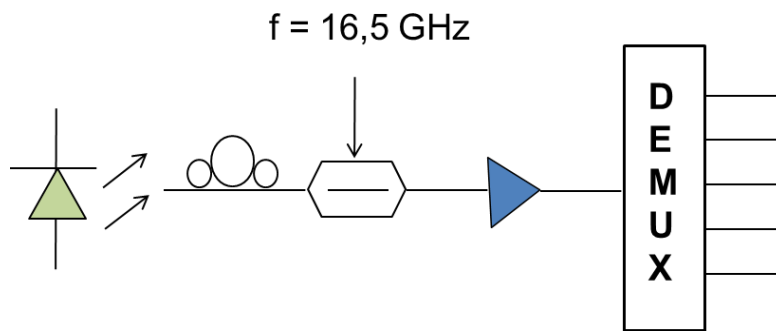


Figura 28 - Geração de Múltiplas Portadoras

Pode ser observada na Figura 28 que foi utilizado apenas uma fonte de luz para a geração de múltiplas portadoras ópticas. Um modulador Mach-Zehner foi modulado com o sinal elétrico da saída do amplificador de potência que foi saturado com um sinal elétrico cossenóide com frequência de 16,5 GHz. A saturação do amplificador ocasionou a geração frequências harmônica do sinal elétrico cosseno. A frequência de 16,5 GHz foi escolhida pois representa exatamente o espaçamento desejado entre as várias portadoras ópticas criadas, conforme ilustrado na Figura 29.



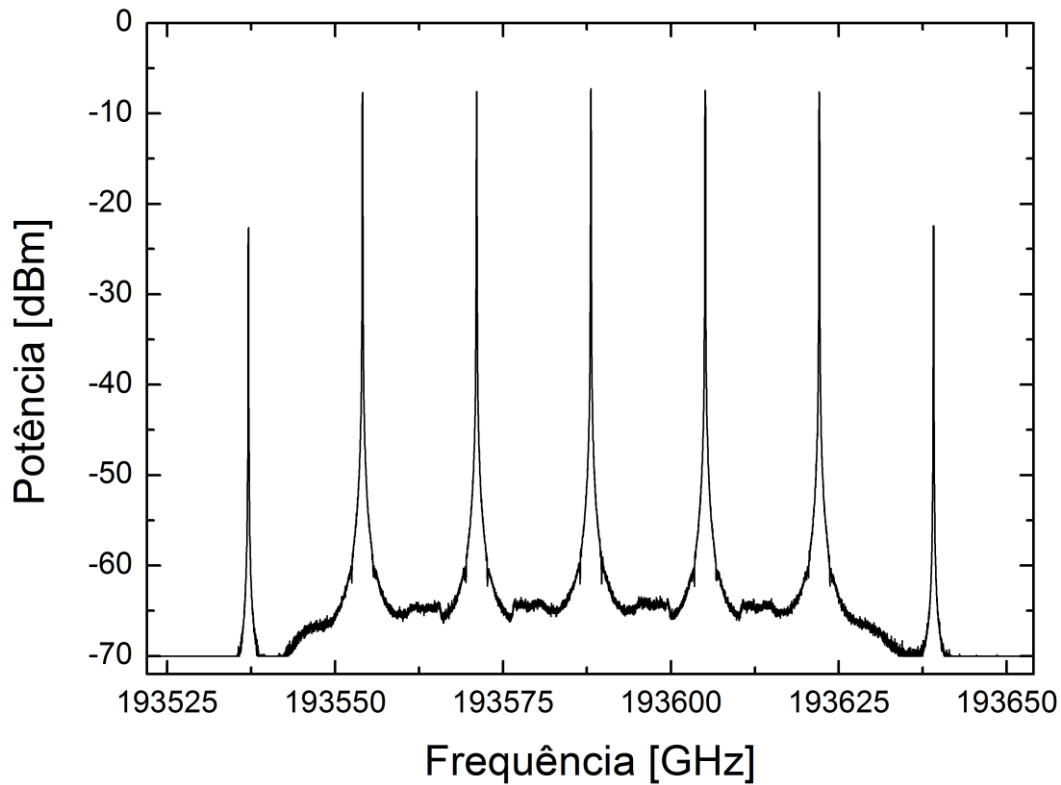


Figura 29 - Espectro do sinal na saída do modulador Mach-Zehnder simples de geração de múltiplas portadoras

A Figura 29 ilustra o espectro das múltiplas portadoras, logo após a porta de saída do modulador. O número de portadoras geradas poderia ser ainda maior, sendo necessário apenas o aumento da saturação do amplificador utilizado em série com o sinal elétrico cosseno. A criação de cinco portadoras foi o número escolhido para a realização de experimentos para constatar o funcionamento de sistemas multicanais empregando a geração de múltiplas portadoras.

Portanto, para certificação do funcionamento do gerador de múltiplas portadoras, o sistema de multicanais, ilustrado na Figura 30, foi elaborado.

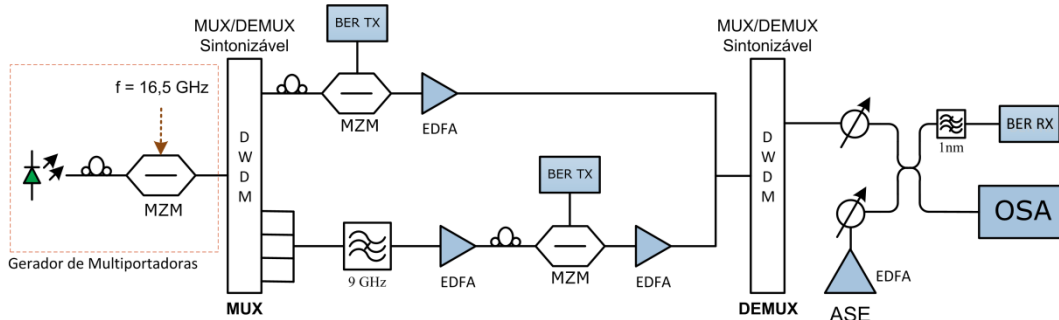


Figura 30 - Configuração experimental para verificação do desempenho do gerador de multiportadoras

Inicialmente, o esquema para geração de múltiplas portadoras (*comb source*) foi colocado na entrada do sistema de comunicação óptica montado. Após a geração das múltiplas portadoras, um MUX/DEMUX sintonizável foi adicionado com a função de demultiplexador, separando o canal central ( $\lambda_3$ ) dos demais ( $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ ,  $\lambda_4$ ,  $\lambda_5$ ). A saída do demultiplexador onde estava o canal central foi direcionada para o modulador Mach-Zehnder simples, e modulado com um sinal PRBS de 10Gbit/s, e depois, o sinal óptico da saída do modulador foi amplificado por um amplificador óptico EDFA. Os outros quatro canais ( $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ ,  $\lambda_4$ ,  $\lambda_5$ ), dispostos em quatro saídas diferentes do demultiplexador, foram agrupados na mesma fibra óptica por meio de um acoplador 4x1. Um filtro rejeita-banda com frequência central igual ao do canal central ( $\lambda_3$ ) foi utilizado para minimizar espúrios dos quatro canais dentro da banda de passagem do canal central que seria posteriormente analisado. Após o filtro, os quatro canais separados do canal central foram modulados com a utilização de um único modulador Mach-Zehnder simples e amplificados. Após o processo de modulação, o canal central e os outros quatro canais do sistema multicanais da configuração experimental foram agrupados na mesma fibra óptica com a utilização de um acoplador 50x50.

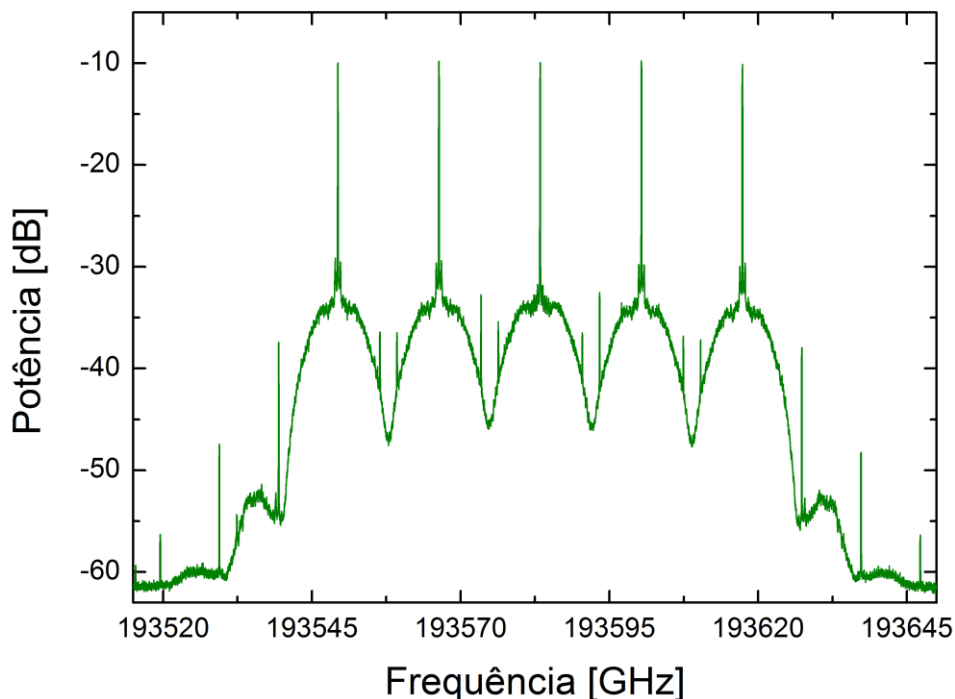


Figura 31 - Espectro dos sinais modulados utilizando a técnica de geração de multiportadoras

A partir deste ponto, o esquema análogo ao utilizado antes foi aplicado neste contexto. Um segundo MUX/DEMUX sintonizável foi usado para separar o canal central dos demais. Os atenuadores, o amplificador EDFA e o filtro de 1nm e os equipamentos para a aquisição dos resultados tiveram exatamente a mesma função apresentada anteriormente. De um modo geral, todos os resultados foram satisfatórios. A Figura 32 mostra o espectro do sinal na entrada do segundo demultiplexador com o canal central desligado, onde é possível observar, dentro da largura de banda disponível para uso do canal central, dois pontos com elevações de potência acima de -40 dBm e um patamar de potência por volta de -50 dBm por toda faixa do canal central. Essa energia dentro da largura de banda do canal central foi fonte de adição de penalidade do sistema. A Figura 33 mostra o canal central filtrado depois do demultiplexador exibindo a diafonia causada pelos outros quatro canais desta configuração experimental.

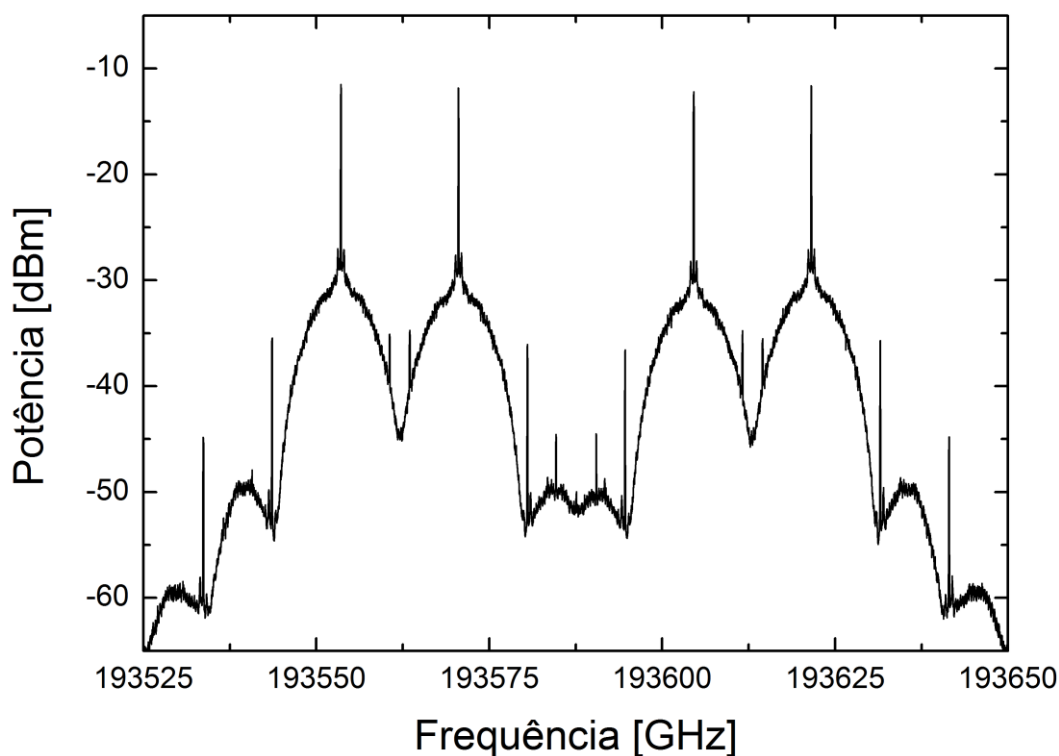


Figura 32 - Espectro do sinal antes do segundo demultiplexador com o canal central desligado

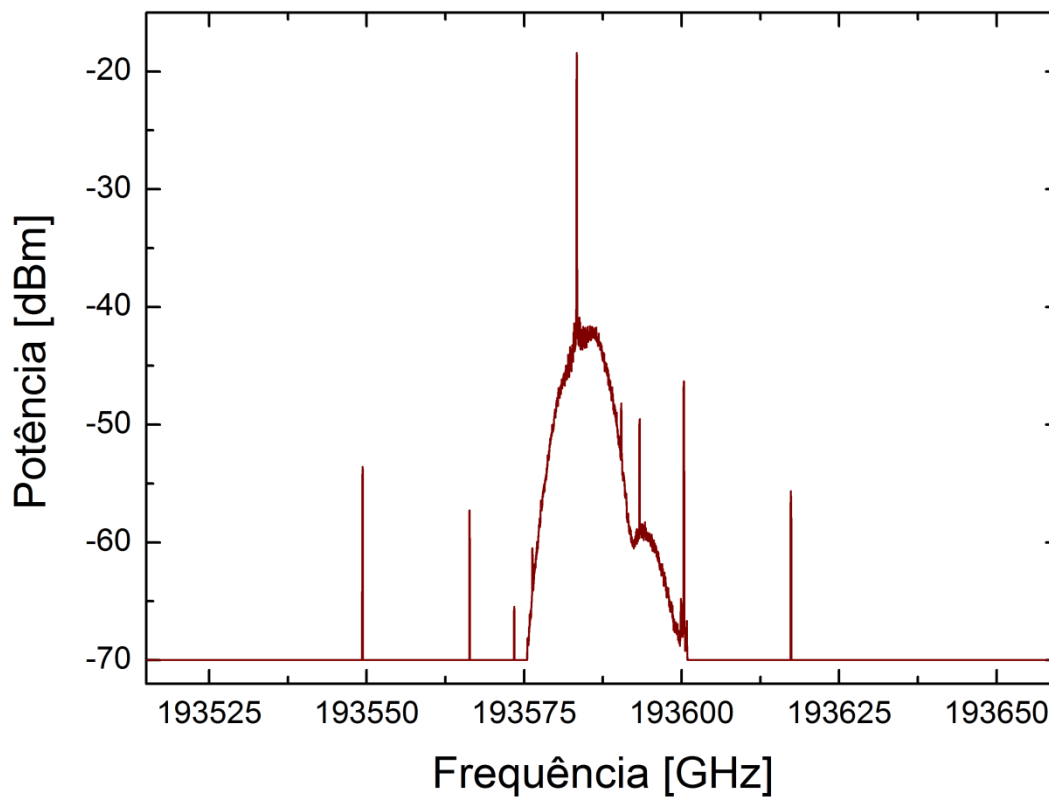


Figura 33 - Espectro do canal central após a filtragem realizada pelo segundo demultiplexador

Os resultados, como de praxe, foram adquiridos levando em consideração a taxa média de erro de bit da configuração experimental em função da potência óptica de entrada do receptor e em função da relação sinal ruído óptica (OSNR) presente no receptor. As curvas apresentadas na Figura 34 representam as taxas médias de erros de bits em função da potência de entrada do receptor para três situações distintas, conforme a ilustração abaixo.

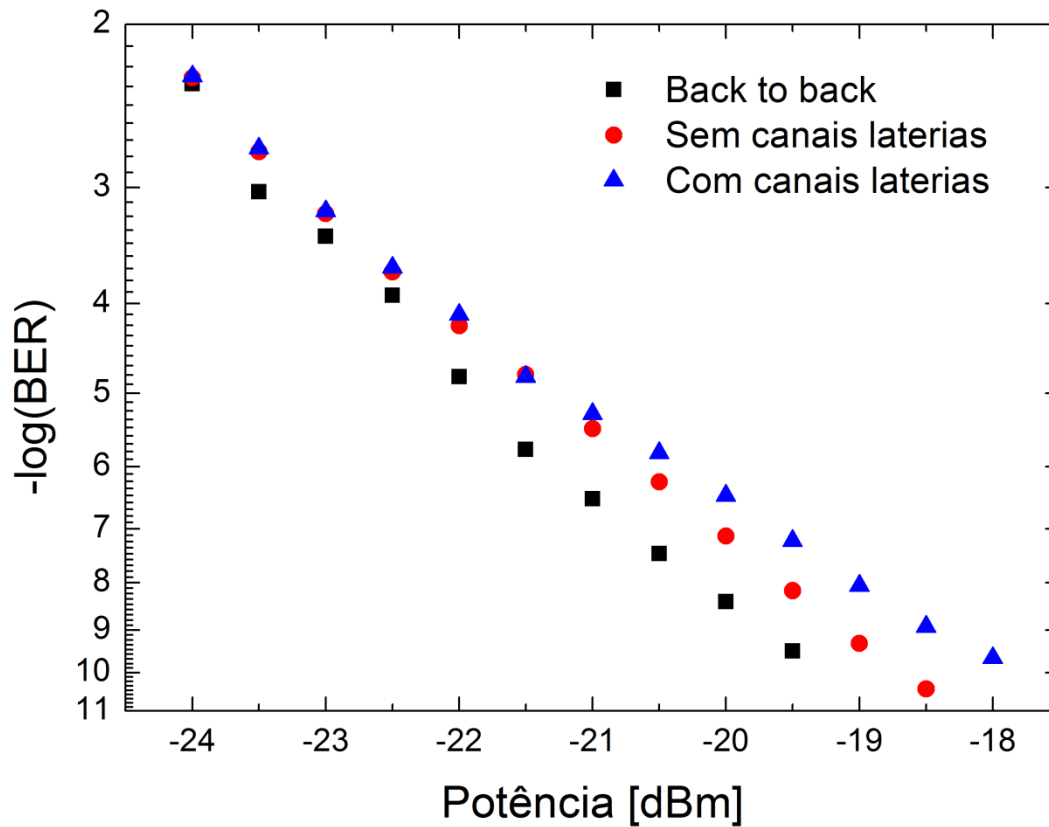


Figura 34 - Desempenho da configuração para geração de multiportadoras

A curva *back-to-back* representa o valor de referência da mínima potência necessária no receptor para a obtenção de uma dada taxa média de erro de bits. Os pontos no gráfico indicam que para uma BER de  $10\text{E}-8$ , o sistema óptico em estudo com canais laterais desligados apresenta uma penalidade 1 dB, enquanto o com canais laterais ligados, a penalidade subiu para aproximadamente 1,5 dB. Como esperado, a curva *back-to-back* representa o melhor desempenho e foi utilizado como referência para comparação com os resultados obtidos.

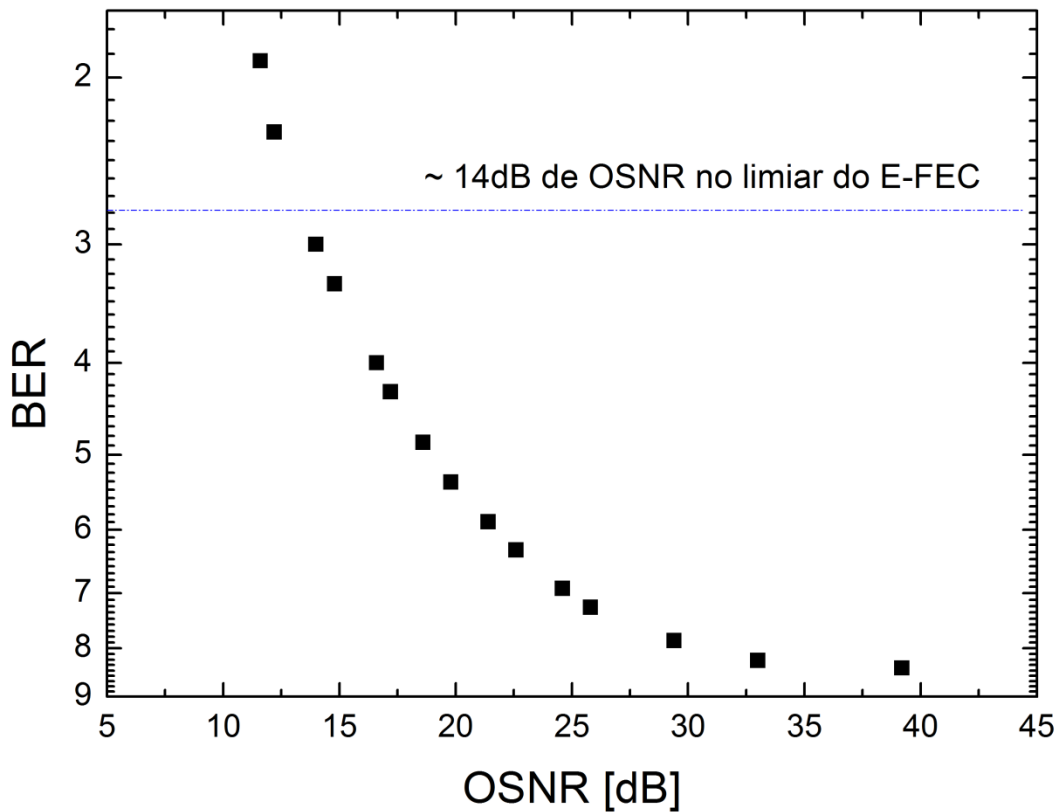


Figura 35 - Taxa média de erro de bits média x OSNR [dB] correspondente ao canal central

A Figura 35 apresenta o resultado obtido quando foi utilizada a fonte de ruído de ASE em relação à BER. Para uma OSNR elevada, próxima de 40 dB, o canal central apresentou o valor de BER mensurado em torno de  $1\text{E-}9$ . Um ponto importante é que em sistemas ópticos pode ser usado um algoritmo corretor de erro (FEC) no qual existe a possibilidade de transformar uma BER de  $2\text{E-}3$  no receptor para um valor bastante melhor em torno de  $10\text{E-}12$ . Portanto, um traço na BER de  $2\text{E-}3$  foi realizado para melhor visualização deste limiar. Nesta dissertação foi assumido que para uma BER igual ou melhor que  $2\text{E-}3$ , o sistema de transmissão de dados poderia ser totalmente viável, uma vez que, não havia a possibilidade da implementação real do FEC no laboratório por falta de recursos. Voltando à Figura 35, a pior OSNR que estava acima deste patamar foi de 14dB. Esse valor de OSNR representa o limite para a configuração experimental sob estudo.