

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA



TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

*ANÁLISE EXPERIMENTAL DE UM ENLACE
ÓPTICO SEM REPETIÇÃO COM
AMPLIFICADORES DE BOMBEIO REMOTO*

Leonardo Fagundes Luz Serrano

Campina Grande - PB
Novembro de 2015

LEONARDO FAGUNDES LUZ SERRANO

*ANÁLISE EXPERIMENTAL DE UM ENLACE
ÓPTICO SEM REPETIÇÃO COM
AMPLIFICADORES DE BOMBEIO REMOTO*

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Campina Grande
como parte dos requisitos necessários para a
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no
Domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Telecomunicações

Prof. Dr. José Ewerton P. de Farias
Orientador

Uiara Moura, M. Sc.
Supervisor

Campina Grande - PB
Novembro de 2015

LEONARDO FAGUNDES LUZ SERRANO

*ANÁLISE EXPERIMENTAL DE UM ENLACE
ÓPTICO SEM REPETIÇÃO COM
AMPLIFICADORES DE BOMBEIO REMOTO*

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Campina Grande
como parte dos requisitos necessários para a
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no
Domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Telecomunicações

Aprovado em: / /

Prof. Dr. José Ewerton P. de Farias
Universidade Federal de Campina Grande
Orientador

Universidade Federal de Campina Grande
Avaliador

Agradecimentos

Agradeço ao professor Ewerton, Luiz Hecker e Juliano pela grande ajuda para encontrar essa oportunidade de estágio e pelas recomendações.

A João e Uiara por toda a orientação ao longo dos projetos, especialmente nos momentos de impasse.

A Juliano, Alexandre, Tatiani e meus colegas da GTO pelas risadas e companherismo.

E a meus amigos e familia pelo apoio.

Sumário

Resumo	v
Abstract	vi
Lista de Figuras	vii
Lista de Tabelas	viii
Lista de Siglas e Abreviaturas	1
1 Introdução	2
1.1 Objetivos	3
1.2 Metodologia	3
1.3 Cronograma	4
2 Revisão Bibliográfica	5
2.1 Sistemas sem repetição	5
2.2 Amplificadores Ópticos de Bombeio Remoto (ROPA)	6
2.3 Estado da arte	8
3 Resultados	13
3.1 Sistema sem amplificação remota e informações gerais sobre o sistema e a montagem	13
3.2 Sistema com ROPA Rx	16
3.3 Sistema com ROPAs Rx e Tx	21
4 Conclusões	23
5 Referências	24

Resumo

Em diversos casos, como em florestas ou oceanos, sistemas de comunicação são instalados sob condições que dificultam o uso estações regeneradoras, devido a estas necessitarem de infraestrutura e manutenção periódica. Nesses casos, convém o uso de técnicas de projeto de enlace que dispensam elementos ativos entre os terminais, tal como amplificação óptica de bombeio remoto. Neste trabalho é feita a análise experimental de diversas configurações de um enlace óptico sem repetição usando amplificadores de bombeio remoto com o objetivo de atingir o maior alcance possível mantendo OSNR adequada para transmissão em formatos avançados de modulação.

Palavras-chave: ROPA, Transmissão Óptica Sem Repetição

Abstract

In many cases, such as in forests or oceans, communication systems are installed under conditions which are unfavorable to repeater sites, as these require certain infrastructure and periodic maintenance. In these cases, it is convenient to use design methods which dismiss active elements between the terminals, such as remote optically pumped amplification (ROPA). This report describes an experimental analysis of several configurations of a repeaterless optical system using remotely pumped amplifiers with the purpose of reaching the longest distance possible while maintaining high enough OSNR for transmission with advanced modulation formats.

Keywords: ROPA, Repeaterless Optical System

Lista de Figuras

1	Esboço da potência por canal x distância em um enlace sem repetição	5
2	Esboço da potência por canal x distância em um enlace sem repetição com amplificação Raman	6
3	Diagrama de blocos da estrutura básica de um EDFA	7
4	Esboço da potência por canal x distância em um enlace sem repetição com amplificação Raman e ROPA	8
5	Enlace sem repetição com ROPA de dupla passagem. (Fonte: [2]) . .	9
6	Enlace sem repetição duplex com compartilhamento de bombeio residual nos ROPAS. (Fonte: [3])	10
7	Acima, potência do sinal em função da distância percorrida na fibra; e abaixo, potência do bombeio em função da distância percorrida na fibra. (Fonte: [3])	10
8	Resultados da simulação para potência máxima por canal, tilt e OSNR mínima em função da distância	14
9	Máxima potência por canal para diversas potências de lançamento em função da distância	14
10	Diagrama de blocos da montagem do sistema sem amplificação remota	15
11	Diagrama de blocos do transmissor	16
12	Diagrama do sistema com amplificação ROPA Rx e fibra específica para o bombeio	17
13	Diagrama do sistema com amplificação ROPA Rx - sem fibra específica para o bombeio	18
14	Espectro do sinal no receptor com ROPA a 90 km e bombeio de 1 W com propagação na mesma fibra	20
15	Espectro do sinal no receptor com ROPA a 90 km e bombeio de 1,4 W com propagação na mesma fibra	20
16	Espectro do sinal no receptor com ROPA a 90 km e bombeio de 1,8 W com propagação na mesma fibra	20
17	Diagrama do sistema com amplificação ROPA Rx e Tx, com fibras específicas para os bombeios	21

Lista de Tabelas

I	Cronograma	4
II	Enlaces apresentados e suas características	12
III	Informações adicionais sobre os enlaces	12
IV	Alcance do enlace com ROPA Rx para diversas distâncias entre ROPA e receptor	18
V	Alcance do enlace, em km, variando a potência de transmissão e a distância entre ROPA e receptor	18
VI	Alcance do sistema com ROPA Rx sem fibra específica para o bombeio em função da potência de bombeio	19

Lista de Siglas e Abreviaturas

- AGC - *Automatic Gain Control* (Controle Automático de Ganho)
- DCU - *Dispersion Compensation Unit* (Unidade de compensação de dispersão)
- EDF - *Erbium Doped Fiber* (Fibra Dopada com Érbio)
- EDFA - *Erbium Doped Fiber Amplifier* (Amplificador de Fibra Dopada com Érbio)
- GFF - *Gain Flattening Filter* (Filtro de Aplainamento de Ganho)
- ISO - Isolador
- OSA - *Optical Spectrum Analyser* (Analisador de Espectro)
- OSNR - *Optical Signal to Noise Ratio* (Relação Sinal-Ruído Óptica)
- ROPA - *Remote Optically Pumped Amplifier* (Amplificador óptico de Bombeio Remoto)
- SMF-LL - *Single Mode Fiber - Low Loss* (Fibra Monomodo de Baixas Perdas)
- VOA - *Variable Optical Attenuator* (Atenuador Óptico Variável)
- WDM - *Wavelength Division Multiplexing* (Multiplexação por Divisão em Comprimento de Onda)
- WSS - *Wavelength Selective Switch* (Matriz de Chaves Seletoras de Comprimento de Onda)

1 Introdução

Em muitos projetos de sistemas de comunicação óptica é preciso instalar fibras em locais remotos ou de difícil acesso. É o caso, por exemplo, de enlaces onde um dos terminais fica em uma ilha ou numa plataforma de extração de petróleo [1] e também de enlaces entre cidades numa densa área florestal, como a Amazônia [2]. Nesses casos, o uso de estações regeneradoras ao longo da fibra é bastante dificultado.

Estações repetidoras ou regeneradoras ao longo do enlace requerem a instalação de equipamentos especiais, fornecimento de energia, refrigeração, resistência às condições do ambiente onde são inseridos e manutenção periódica. No entanto, o enlace pode ser projetado de modo a dispensar elementos intermediários, simplificando consideravelmente a instalação e manutenção do sistema. Para isso, uma série de aspectos do projeto deve ser adaptada. Projetos desse tipo são referidos na literatura como transmissão sem repetição.

Um sistema óptico de transmissão sem repetição é caracterizado por operar sem elementos ativos, como amplificadores ópticos, entre os terminais transmissor e receptor. O principal objetivo em pesquisas nessa área é obter a maior distância possível sem uso de elementos ativos, juntamente com altas taxas de transmissão de dados. As técnicas usadas em transmissão sem repetição também podem ser usadas em sistemas com repetição, aumentando a distância entre os pontos repetidores caso necessário.

Neste relatório é descrita a análise experimental do projeto de um sistema de transmissão óptico sem repetição feito ao longo de um estágio realizado no Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações (CPqD). Inicialmente, foi reproduzido um sistema sem repetição anteriormente projetado como parte do doutorado de um dos pesquisadores do CPqD [10] e, em seguida, o sistema foi aprimorado por meio do acréscimo de amplificadores ópticos de bombeio remoto, aumentando seu alcance.

1.1 Objetivos

- Compreender os elementos que constituem um sistema sem repetição óptica.
- Fazer uma revisão bibliográfica sobre sistemas sem repetição em comunicações ópticas e amplificação óptica de bombeio remoto.
- Avaliação experimental do sistema sem repetição proposto em simulação pelo supervisor, determinando se a montagem tem comportamento indicado nas simulações.
- Compreender o processo de desenvolvimento dos amplificadores à fibra dopada com érbio e efeito Raman.
- Aprimorar o sistema em teste a partir dos resultados obtidos nos experimentos com a adição de amplificadores ROPA, aumentando o alcance do enlace.

1.2 Metodologia

As atividades desenvolvidas podem ser divididas em algumas etapas, as quais estão listadas e detalhadas a seguir.

1 - Revisão bibliográfica:

Pesquisa na literatura de como se deu a evolução dos sistemas sem repetição em comunicações ópticas e seu espaço no projeto de sistemas de telecomunicações, destacando os principais marcos recentes em termos de alcance e quantidade de informação transmitida, dada pelo produto do número de canais pela taxa transmitida por canal.

2 – Montagem do experimento base:

Estudo sobre o trabalho realizado previamente pelo CPqD dentro do tema de sistemas sem repetição em comunicações ópticas [10]. A partir deste estudo, é proposto um modelo para análise experimental.

3 - Projeto do amplificador ROPA:

Uso de amplificadores ópticos remotos (ROPA) para aumentar o alcance do sistema sem repetição. A inserção deste componente acrescenta competitividade ao sistema proposto e corresponde a uma nova linha de pesquisa dentro CPqD.

1.3 Cronograma

O trabalho foi dividido em uma série de atividades que foram realizadas aproximadamente de acordo com o cronograma apresentado na tabela I.

Tabela I: Cronograma

Atividade	Início	Fim
Análise do sistema sem repetição com amplificação ROPA	03/08/2015	02/10/2015
Revisão bibliográfica	03/08/2015	07/08/2015
Sistema sem amplificação ROPA	10/08/2015	28/08/2015
Montagem	10/08/2015	21/08/2015
Experimento	24/08/2015	28/08/2015
Amplificação ROPA apenas na recepção	31/08/2015	11/09/2015
Montagem	31/08/2015	04/09/2015
Experimento	07/09/2015	11/09/2015
Amplificação ROPA na recepção e transmissão	14/09/2015	02/10/2015
Montagem	14/09/2015	18/09/2015
Experimento	21/09/2015	02/10/2015

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Sistemas sem repetição

Em um sistema de transmissão de um sinal óptico, é necessário manter a potência por canal acima do limite no qual o sinal não pode ser efetivamente distinguido do ruído, porém abaixo de um limite a partir do qual efeitos não-lineares degradam a qualidade do sinal [1]. Esse conceito é ilustrado na Figura 1, nos quais limites de potência determinam o alcance do enlace. Os ganhos no início e fim do sistema são devidos aos amplificadores no transmissor e receptor. Há também uma queda constante de potência do sinal ao percorrer a fibra.

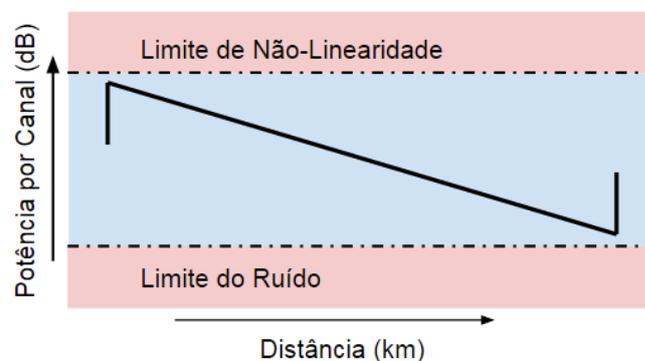


Figura 1: Esboço da potência por canal x distância em um enlace sem repetição

Para aumentar a distância entre os terminais de um enlace sem repetição são utilizadas técnicas para expandir a faixa entre o limite de ruído e o de não-linearidade, juntamente com técnicas para manter a potência por canal na faixa adequada. A expansão dos limites aceitáveis é feita diminuindo a intensidade das não-linearidades por meio de fibras de grande área efetiva e aumentando a tolerância ao ruído via codificação de canal (FECs). FECs são capazes de corrigir taxas de erro de bit (BER) de $1,9 \cdot 10^{-2}$ para taxas de erro na ordem de 10^{-15} [3][4]. Os efeitos não-lineares também podem ser reduzidos com processamento digital do sinal no receptor [7].

É conveniente medir o alcance do enlace na fase de projeto pela perda máxima, em dB, a qual o sinal óptico pode ser submetido e ainda ser recebido adequadamente, pois isto permite separar a influência dos fatores que causam perda de potência ao sinal dos fatores que proporcionam ganho.

Nesse sentido, há duas maneiras de aumentar o alcance do enlace. A primeira é aumentando os ganhos dos amplificadores, a potência do sinal no transmissor ou a sensibilidade do receptor. Esses fatores aumentam a perda máxima suportada pelo enlace. A segunda é diminuindo as perdas nas fibras e nos componentes e conexões

do sistema, melhorando a conversão de potência do sinal em distância do enlace. Em geral, sistemas de transmissão sem repetição suportam perdas totais entre 40 e 90 dB, enquanto a perda nas fibras e componentes pode chegar a valores tão baixos quanto 0,16 dB/km, usando fibras de baixas perdas [1][3]. Para comparação, fibras ópticas comuns têm perda na faixa de 0,20 a 0,22 dB/km.

Para manter a potência do sinal na faixa adequada, além de fibras de baixas perdas, podem ser usados métodos de amplificação remota, como Amplificação Raman Distribuída (DRA), Bombeio Raman de Alta Ordem e Amplificadores Ópticos de Bombeio Remoto (ROPA).

Na Figura 2, Amplificação Raman Distribuída é acrescentada ao enlace apresentado anteriormente. Nesse tipo de amplificação, lasers adicionais são acrescentados em comprimentos de onda mais baixos para propagação pela fibra junto ao sinal. Parte da potência desses lasers adicionais é transferida ao sinal por meio de um efeito chamado Efeito Raman. O ganho ocorre na propagação do sinal pela fibra ao longo de vários quilômetros. No esboço, os laser de bombeio Raman são posicionados nos terminais, dando ganho logo após o transmissor e próximo ao receptor.

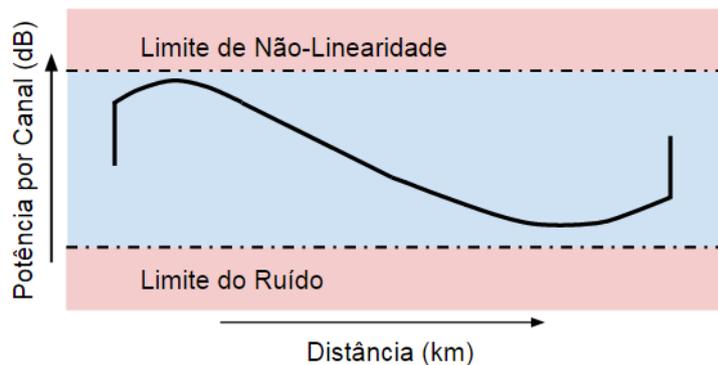


Figura 2: Esboço da potência por canal x distância em um enlace sem repetição com amplificação Raman

Os valores precisos das potências dos canais são de difícil obtenção via análise matemática, pois as equações correspondentes ao comportamento da luz ao propagar em uma fibra óptica são equações não-lineares de alta ordem. Sendo assim, a previsão do comportamento de sistemas ópticos é feita quase exclusivamente por meio de simuladores como o OptiSystem, por exemplo.

2.2 Amplificadores Ópticos de Bombeio Remoto (ROPA)

É interessante discutir inicialmente o comportamento de Amplificadores de Fibra Dopada com Érbio (EDFA) para que sirva de base no entendimento de amplificadores ROPA. O diagrama de blocos de um EDFA simples é apresentado na Figura 3. Em um EDFA, um laser com comprimento de onda de 980 nm ou 1480

nm é inserido na fibra óptica. Esse laser excita íons de érbio em um segmento de fibra dopada de alguns metros de comprimento, geralmente na faixa de 5 a 20 metros. Quando um fóton do sinal óptico incide num íon de érbio excitado, ocorre um fenômeno chamado Emissão Estimulada, no qual o íon retorna ao estado não-excitado e o fóton incidente é copiado, resultando em dois fótons de mesma direção de propagação, frequência e fase. Os novos fótons podem incidir em outros íons, causando uma reação em cadeia responsável pelo aumento do número de fótons do sinal. O uso de érbio como dopagem da fibra é derivado de diversos fatores, sendo que o principal é que o ganho proporcionado pelo érbio é o mais apropriado para a banda C, na qual os sinais ópticos são geralmente transmitidos.

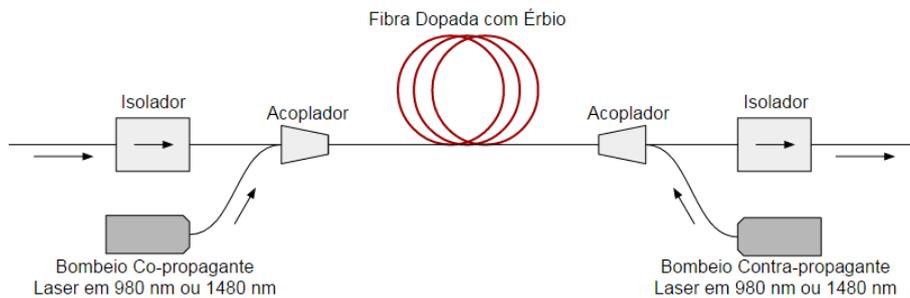


Figura 3: Diagrama de blocos da estrutura básica de um EDFA

A diferença principal entre EDFAs e ROPAs é a distância entre o laser de bombeio e o segmento de fibra dopada. Em um EDFA, ambos são parte de um mesmo componente, enquanto em um ROPA, o laser de bombeio fica a quilômetros do segmento de fibra dopada e o laser de bombeio é propagado até o segmento por uma fibra óptica. Em contraste a EDFAs, onde o laser de bombeio tem potência na faixa dos décimos de watt, amplificação remota requer altas potências de bombeio, na faixa de alguns watts, já que há atenuação na propagação do bombeio pela fibra até o segmento dopado. Assim, é necessário verificar a influência dos altos níveis de potência sobre os componentes utilizados, especialmente conectores, emendas e acopladores. Conexões sujas ou mal feitas podem ser danificadas pela alta potência, comprometendo o desempenho do sistema. Além disso, caso um certo limite de potência seja excedido, ocorre um fenômeno chamado Retroespalhamento Raman, que pode levar a fibra a se comportar como um oscilador, consumindo todo o bombeio [5]. Esse limite varia com os parâmetros da fibra.

Amplificadores Ópticos de Bombeio Remoto (ROPA) são bastante similares a Amplificadores de Fibra Dopada com Érbio (EDFA), onde um laser de bombeio excita átomos de érbio em um alguns metros de Fibra Dopada com Érbio (EDF), amplificando o sinal que se propaga no segmento dopado via emissão estimulada de fótons. No entanto, no caso do ROPA, o laser de bombeio é instalado no terminal transmissor enquanto o segmento dopado fica a dezenas ou centenas de quilômetros. Com a instalação de um laser de bombeio no transmissor e outro no receptor, podem

haver dois ROPAs no enlace.

Acrescentando amplificadores ROPA ao esboço dado na Figura 2, temos o sistema da Figura 4. O ganho desses amplificadores é concentrado, sendo aplicado ao longo de poucos metros, como pode ser observado no esboço pelos aumentos concentrados de potência, assim como ocorre nos EDFAs instalados no início e no fim do enlace. Em geral, o ganho obtido pelo ROPA do receptor é maior. Isso ocorre devido à saturação de ganho do amplificador, ou seja, sinais de potência baixa recebem ganho maior que sinais de alta potência.

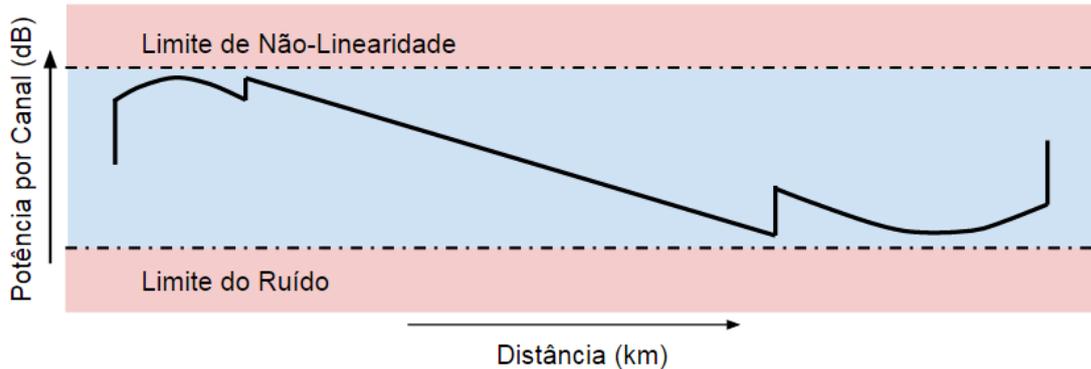


Figura 4: Esboço da potência por canal x distância em um enlace sem repetição com amplificação Raman e ROPA

É importante avaliar o posicionamento da EDF de um ROPA. No caso do ROPA de transmissão, quanto mais distante da fonte do bombeio, mais baixo é o ganho, porém, se estiver muito próximo, o sinal amplificado pode passar dos limites de não-linearidade. Para o ROPA de recepção, quanto mais distante estiver, maior é a distância atingida pelo enlace, mas menor é o ganho obtido. Assim, existem pontos ótimos para instalação de ROPAs e são necessárias várias simulações do sistema para encontrar esses pontos.

O comprimento de onda utilizado para o bombeio de um EDFA pode ser 980 nm ou 1480 nm, porém o bombeio de um ROPA deve ser em 1480 nm, já que as perdas na fibra em 980 nm são muito altas. Devido ao efeito Raman, parte do bombeio em 1480 nm é convertida em ganho em torno de 1580 nm, resultando em ruído amplificado (ASE) nessa região do espectro. O bombeio de um ROPA pode ser transmitido pela própria fibra onde é transmitido o sinal ou por uma fibra específica em paralelo a do sinal.

2.3 Estado da arte

A topologia de sistemas sem repetição e a estrutura interna de um ROPA são tópicos em desenvolvimento e ao longo da última década várias implementações foram propostas. A seguir, algumas delas são destacadas.

Em um enlace de 400 km com taxa de 155 Mb/s (Figura 5) instalado na região Amazônica em 2005, foram utilizados dois ROPAs, sendo o de recepção um ROPA de dupla passagem [2]. Os ganhos obtidos foram de 18 dB e 32 dB no ROPA de transmissão e de recepção, respectivamente, e foram usadas fibras específicas para propagar o bombeio. O sinal foi centrado em 1558 nm por ser o pico de ganho da EDF quando o bombeio está abaixo de 10 mW.

A topologia do ROPA de dupla passagem, apresentada na figura, tem melhor ganho que um ROPA de passagem única quando o sinal de entrada tem baixa potência (menor que -20 dBm). O bombeio restante ao final da EDF é refletido de volta para uma segunda passagem, melhorando o aproveitamento.

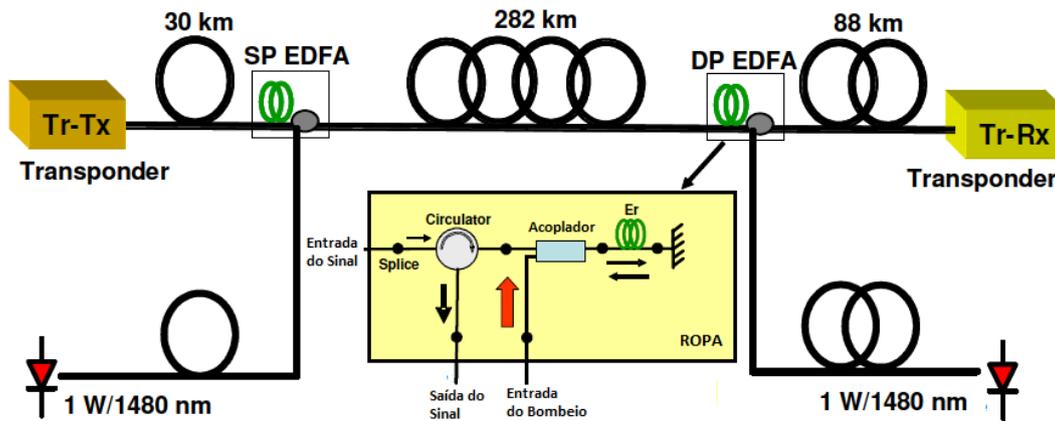


Figura 5: Enlace sem repetição com ROPA de dupla passagem. (Fonte: [2])

Um estudo de 2014 mostra resultados para transmissão de 1 ou 4 canais de 100G, obtendo alcances de 557 km e 523 km, respectivamente [3]. O diagrama desse sistema é mostrado na Figura 6. O sistema é configurado para transmissão duplex. A FEC utilizada é capaz de corrigir taxas de erro de bit (BER) de $1,9 \cdot 10^{-2}$ para taxas de erro na ordem de 10^{-15} , com 15 % de sobretaxa. Na transmissão de 4 canais, são utilizados amplificadores EDFA no transmissor e receptor, sendo incluso no transmissor um WSS para filtrar a ASE e um estágio intermediário DCU (Dispersion Compensation Unit) no EDFA para pré-compensação da dispersão.

Nessa transmissão com 4 canais se faz uso de acopladores de 3 dB e do formato RZ, entrelaçando os canais. O sistema dispõe de amplificadores Raman distribuídos com 7 diferentes comprimentos de bombeio, permitindo flexibilidade e controle do perfil de ganho, além de aumentar a extensão do enlace. Uma configuração de ROPA aprimorada é introduzida nesse estudo, com as EDFs sendo colocadas à mesma distância de seu terminal (133,7 km). Isso traz dois grandes benefícios para uma transmissão bidirecional: primeiro, o número de pontos de instalação cai para 2 em vez de 4; segundo, isso permite recircular os bombeios entre os ROPAs, melhorando o ganho e a figura de ruído. Os ganhos para os ROPAs de transmissão e recepção foram de 4,6 dB e 19,4 dB, respectivamente, com 7 m e 12 m de EDF.

Na Figura 7, é apresentada a potência do sinal em função da distância percorrida na fibra. O ganho distribuído é dado pelos DRAs, enquanto que os ganhos concentrados são dados pelos ROPAs.

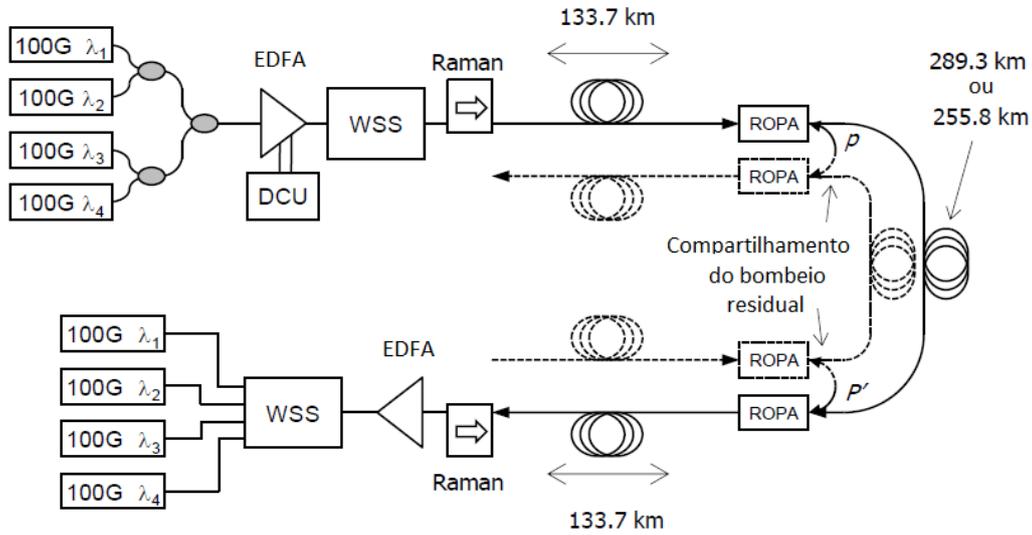


Figura 6: Enlace sem repetição duplex com compartilhamento de bombeio residual nos ROPAs. (Fonte: [3])

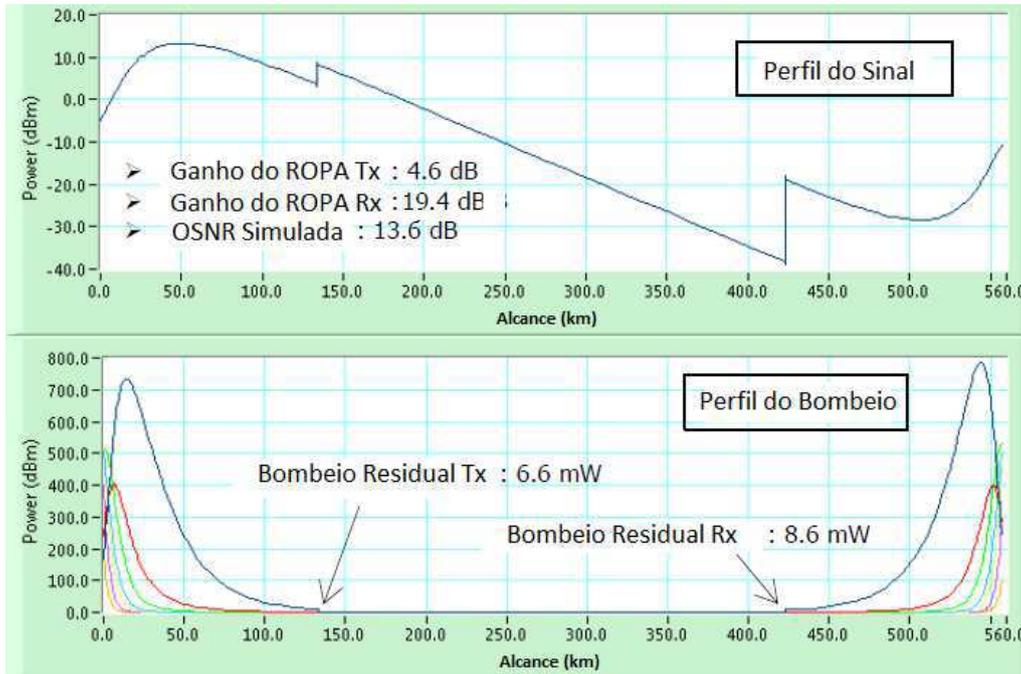


Figura 7: Acima, potência do sinal em função da distância percorrida na fibra; e abaixo, potência do bombeio em função da distância percorrida na fibra. (Fonte: [3])

Outro estudo de 2014 atinge uma taxa de 15 Tb/s com um alcance de 333 km sem ROPA e 389 km com um ROPA de recepção [4]. Amplificadores Raman Concentrados (LRA) feitos com fibra de compensação de dispersão são usados no transmissor e receptor para pré-compensação. Esse trabalho usa ambas as bandas

C e L. Uma pré-ênfase do sinal é feita para compensar o perfil desigual de perdas da fibra, a interferência entre canais causada pelo efeito Raman e obter fator Q similar para todos os 150 canais no receptor. A curva de ganho do ROPA em função da frequência tem grande diferença entre o maior e o menor ganho (“Tilt”) devido ao baixo ganho na banda L. Essa diferença é compensada por um WSS (Matriz Seletora de Comprimentos de Onda) no receptor e pelo perfil de ganho do Raman Contra-propagante, que, assim como no sistema anterior, usa vários bombeios Raman para melhor controle sobre os ganhos no enlace. Mesmo com ganho reduzido na banda L, o ROPA fornece ganho médio de 16,6 dB. A EDF utilizada tem 12 m.

Num outro estudo de 2014, foi transmitido um conjunto de 40 canais a uma taxa de 200 Gb/s (8 Tb/s) com alcance de 363 km [6]. O ensaio explorou o uso de esquemas de modulação de alta ordem, em especial PDM 16-QAM, como forma de aumentar a eficiência espectral e fez uso de enlaces híbrido formados por fibras de sílica pura de área larga ($115 \mu\text{m}^2$ e $135 \mu\text{m}^2$). Em contrapartida, modulação de alta ordem, por requerer maior OSNR, diminui o alcance do enlace. Foi usada uma FEC concatenada, capaz de corrigir BER de até $2,3 \cdot 10^{-2}$, além de uma pré-ênfase do sinal no transmissor, de modo a obter fator Q aproximadamente igual para todos os canais.

Um ponto de destaque desse ensaio é o bombeio de terceira ordem. O laser de bombeio, localizado no receptor, emite 1,4 W com comprimento de onda de 1276 nm. O efeito Raman atua sobre o bombeio e parte da energia é transferida para 1390 nm e, em seguida, para 1483 nm, faixa que excita a EDF. Esse método fornece bombeio para o ROPA e ganho Raman ao sinal, simultaneamente. O ganho combinado é próximo a 40 dB. Uma continuação deste estudo foi apresentada em 2015, sendo mostrado a transmissão de 80 canais PDM 16-QAM também modulados a uma taxa de 200Gb/s (16Tb/s) com alcance de 321km [8]. O arranjo experimental se assemelha ao do primeiro trabalho. Contudo, merece destaque que neste não há a presença do ROPA e o enlace é constituído apenas de fibra de sílica pura com área efetiva de $135 \mu\text{m}^2$.

Como uma forma de resumir os trabalhos apresentados sobre o tema de sistemas sem repetição, na tabela II são apresentadas as informações mais relevantes de cada referência e algumas informações adicionais na tabela III, com destaque para as empresas envolvidas em cada trabalho, o uso de amplificação remota, como também para a métrica Taxa x Alcance (Pb/s * km) que relaciona a capacidade transmitida com a distância alcançada.

A relevância de sistemas sem repetição pode ser medida pela quantidade de trabalhos publicados nos últimos anos nos mais relevantes periódicos e congressos científicos de comunicações ópticas. Dentre as ferramentas para este tipo de enlace são destacadas: fibras de baixa atenuação e grande área; FECs; pré-ênfase do sinal;

Amplificadores Raman Distribuídos (DRA) e Amplificadores de Bombeio Remoto (ROPA). Apesar de alguns trabalhos não utilizarem ROPAs, é evidente o ganho no alcance do enlace quando inserido no sistema, especialmente quando bombeado a partir do receptor.

Tabela II: Enlaces apresentados e suas características

Referência	ROPA	Perda (dB)	Alcance (km)	Capacidade (Tb)	Produto Taxa x Distância (Pb/s x km)
Xtera, Verizon e Corning (OFC 2014) [3]	Sim	90,2	556,7	0,1	0,06
		84,8	523,2	0,4	0,21
Corning, Optics Express 2014 [7]	Não	44,5	285	8	2,29
		45,5	292		2,34
		47,4	304		2,43
ALU, ECOC 2014 [6]	Sim	59,1	363	8	2,9
Xtera e Corning, ECOC 2014 [4]	Não	55,4	333,6	15	5
	Sim	64,3	389,6		5,84
ALU, OFC 2015 [8]	Não	49,2	321	16	4,98

Tabela III: Informações adicionais sobre os enlaces

Referência	Número de canais x Taxa por canal (Gb/s)	Formato de Modulação	Tipos de Fibra
Xtera, Verizon e Corning, OFC 2014 [3]	1 x 120	PM-IRZ-QPSK	EX2000 ($115\mu m^2$)
	4 x 120		
Corning, Optics Express 2014 [7]	40 x 256	PDM-16QAM	EX3000 ($152\mu m^2$)
			EX3000, EX2000 ($152\mu m^2, 110\mu m^2$)
			EX3000, EX2000 ($152\mu m^2, 110\mu m^2$)
ALU, ECOC 2014 [6]	40 x 200	PDM-16QAM	ULA-PSCF, E-PSCF ($135\mu m^2, 115\mu m^2$)
Xtera e Corning, ECOC 2014 [4]	150 x 120	PM-RZ-QPSK	SMF-ULL ($80\mu m^2$)
ALU, OFC 2015 [8]	80 x 200	PDM-16QAM	ULA-PSCF ($135\mu m^2$)

3 Resultados

3.1 Sistema sem amplificação remota e informações gerais sobre o sistema e a montagem

Inicialmente, foram realizadas simulações do sistema considerando os equipamentos disponíveis no laboratório.

Algumas especificações são determinadas pelo projeto base:

- Modulação DP-QPSK
- OSNR mínima de 10 dB
- 40 canais x 120 Gb/s por canal
- Espectro de 1529 a 1561 nm
- Espaçamento de 100 GHz
- Limite de não-linearidade de 10 dBm por canal
- FEC com sobretaxa de 20 % com correção de BER de até $2,3 \cdot 10^{-2}$
- Uso de Fibra Óptica Padrão (STD)

Os amplificadores selecionados foram os seguintes:

- Amplificadores - Transmissor:
 - EDFA com bombeio de 600 mW em 976 nm
 - Raman de 420 mW em 1420 nm
 - Raman de 360 mW em 1452 nm
- Amplificadores - Receptor:
 - EDFA com bombeio de 600 mW em 980 nm
 - Raman de 360 mW em 1440 nm
 - Raman de 360 mW em 1455 nm

Dados esses requerimentos, na Figura 8 são ilustrados a potência máxima atingida por canal, o tilt do sinal (diferença de potência entre o canal de maior potência e o canal de menor potência) e a OSNR mínima no receptor. Os resultados indicam que o alcance do sistema pode atingir cerca de 290 km nessas condições.

Na Figura 9, onde é mostrada a maior potência dentre os canais ao longo do enlace para diversas potências de lançamento, fica evidenciado o efeito considerável que o ganho Raman tem sobre o sistema.

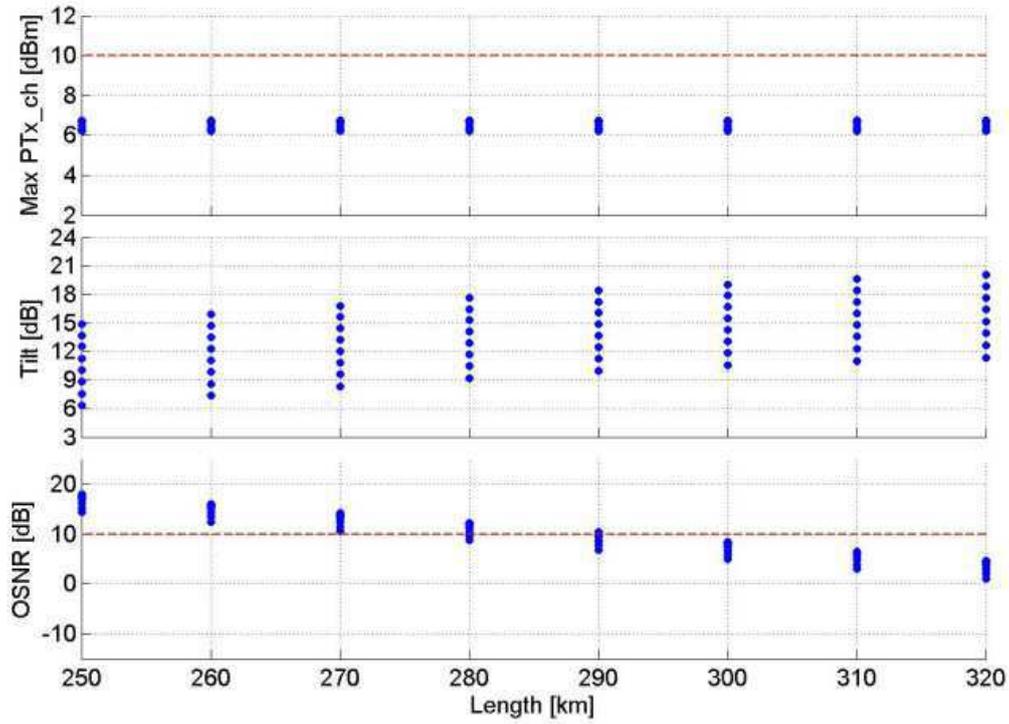


Figura 8: Resultados da simulação para potência máxima por canal, tilt e OSNR mínima em função da distância

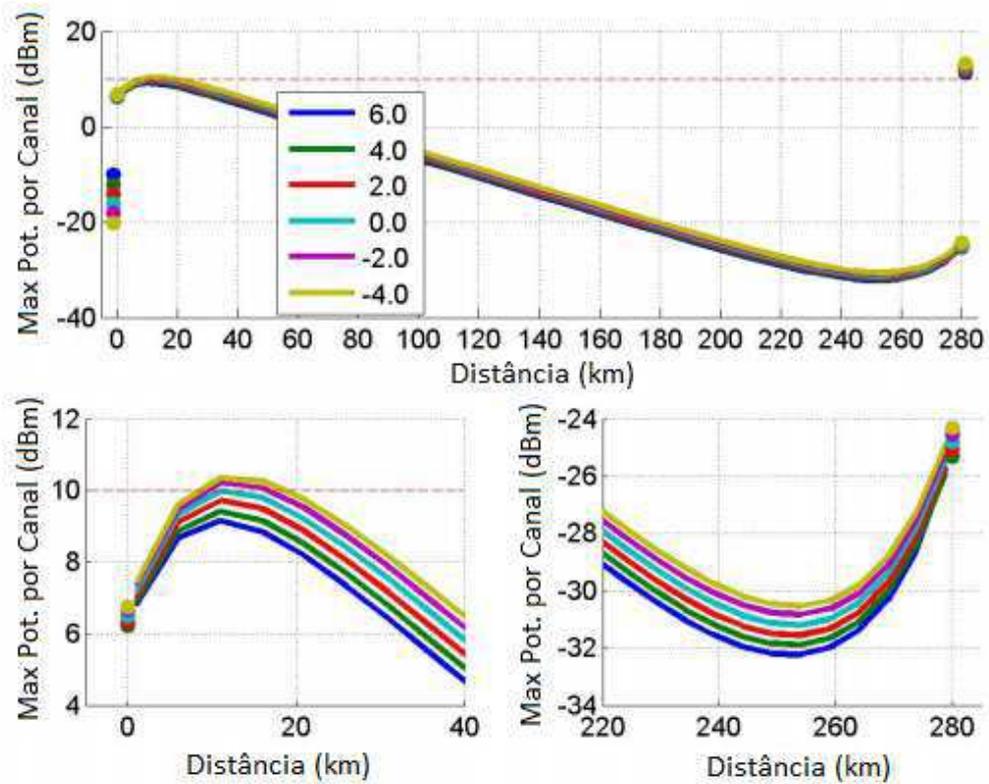


Figura 9: Máxima potência por canal para diversas potências de lançamento em função da distância

Ao fazer a montagem do sistema sem amplificação remota, vários testes foram necessários para detecção de equipamentos defeituosos e erros de montagem.

Um fator de grande importância é que grande parte da fibra óptica da montagem foi substituída por atenuadores ópticos. Isso se deve tanto à quantidade insuficiente de fibra disponível quanto à necessidade de um modo de flexibilizar o comprimento do enlace, ou seja, o uso de atenuadores no lugar de fibras em alguns pontos permite o ajuste fino da distância de maneira mais rápida e prática.

A escolha de quais segmentos do enlace deveriam ser representados por fibra óptica e quais seriam representados por atenuadores é crítica para minimizar o erro causado por essa limitação. A prioridade foi dada aos pontos onde os efeitos não-lineares, causados pela alta potência do sinal óptico ou pelo bombeio Raman, têm maior presença. Sendo assim, pontos próximos aos terminais devem necessariamente ser modelados com fibra óptica para que ocorra o ganho Raman.

O alcance obtido nos experimentos foi na faixa de 275 a 280 km, com potência de lançamento de -2 dBm. Há alguma incerteza em relação a esse valor já que as perdas de inserção dos componentes não são conhecidas com precisão.

O diagrama da montagem é apresentado na Figura 10. O sinal transmitido é amplificado por um EDFA e recebe ganho Raman ao longo dos primeiros quilômetros do enlace. Um segmento intermediário de fibra óptica do enlace tem seu comportamento modelado por um atenuador óptico variável (VOA), pois nesse ponto do enlace, o ganho Raman pode ser desprezado. Em seguida, o sinal percorre outro segmento de fibra onde recebe ganho Raman, é pré-amplificado por um EDFA e chega ao receptor.

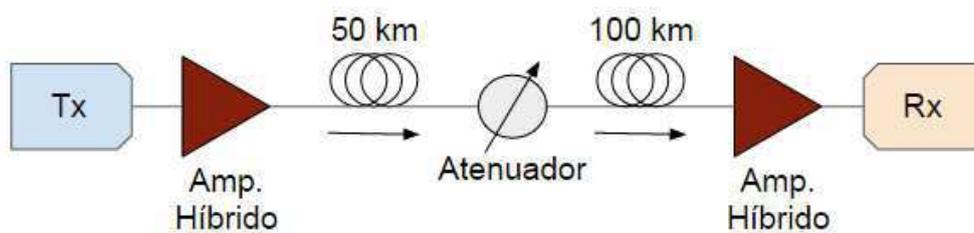


Figura 10: Diagrama de blocos da montagem do sistema sem amplificação remota

O transmissor do diagrama é uma composição de outros blocos, como é ilustrado na Figura 11. 40 lasers com frequências separadas de 100 GHz ocupando toda a banda C, de 1529 nm a 1561 nm, são modulados e o canal de menor OSNR no receptor é substituído por um canal gerado em um transponder. A potência de lançamento do sinal é controlada por um atenuador.

O receptor é composto por um *beam splitter* (divisor de feixe) e prossegue para o transponder e para um analisador de espectro (OSA).

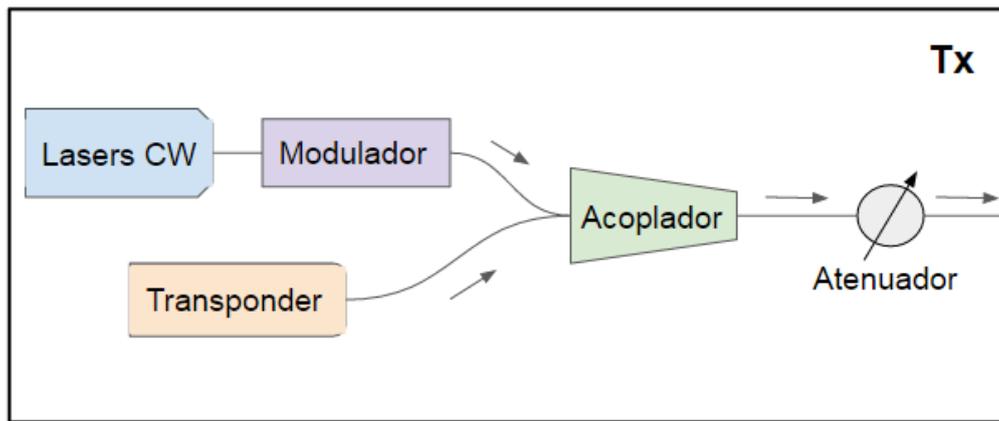


Figura 11: Diagrama de blocos do transmissor

O transponder é um equipamento composto por um transmissor e um receptor. Ao substituir um dos canais do sinal pelo canal gerado no transponder, é possível verificar se o sistema atende as exigências para transmissão, pois a recepção desse canal pode ser feita no fim do enlace pelo transponder.

3.2 Sistema com ROPA Rx

Foram testadas duas configurações para o sistema sem repetição com ROPA de recepção: com ou sem fibra específica para propagação do bombeio. Ao utilizar uma fibra separada para o bombeio alguns efeitos não-lineares são evitados, mas há um aumento do custo do sistema.

A revisão bibliográfica e simulações iniciais indicam que a potência de bombeio mais adequada é em torno de 1,5 W, com distância entre o ROPA e o receptor de aproximadamente 90 km. Os lasers disponíveis em laboratório com comprimento de onda de 1480 nm alcançam potência de até 2 W. No entanto, para potências acima de 1 W, o espectro do laser começa a se alargar. Já que os acopladores utilizados são formados internamente por grades de Bragg (FBG), parte da potência é filtrada e perdida.

Para modelar bombeios de 1,5 W nessas condições, um atenuador é posto no ramo do bombeio e sua atenuação é ajustada de modo que a potência do bombeio medida no acoplador seja igual a que seria medida caso o laser, com potência de lançamento de 1,5 W, percorresse a distância em teste.

Por exemplo, considerando atenuação na fibra de 0.2 dB/km, um segmento de 100 km causa atenuação de 20 dB. Já que 1,5 W corresponde a 31,76 dBm, a potência após 100 km seria 11,76 dBm. No experimento, essa potência é obtida configurando o laser para potência em torno de 1 W e ajustando o atenuador para que a potência em sua saída seja de 11,76 dBm.

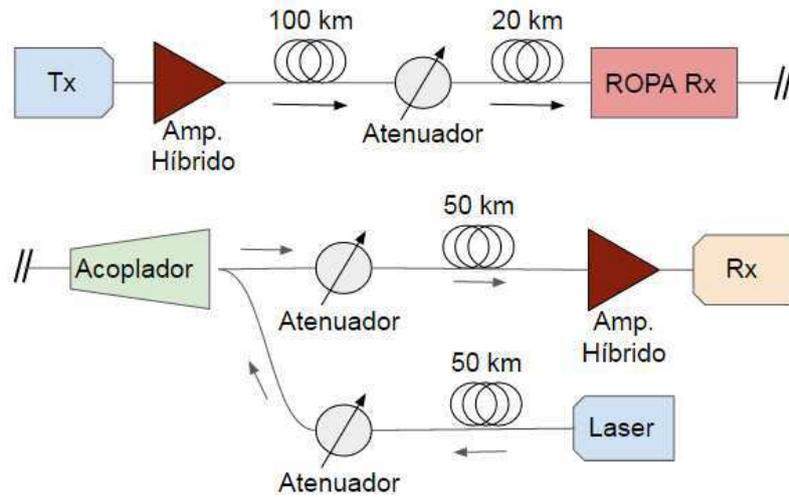


Figura 12: Diagrama do sistema com amplificação ROPA Rx e fibra específica para o bombeio

A montagem com fibra separada para o bombeio, ilustrada na Figura 12, usa atenuadores entre o segmento de fibra dopada e o laser de bombeio. Isso permite o ajuste da distância do receptor ao ROPA para medir a distância de melhor desempenho.

Foi considerado o uso de apenas um atenuador, entre o ROPA e o acoplador, no lugar de um para o ramo de bombeio e outro para o ramo do sinal, porém há uma pequena diferença na atenuação do feixe dependendo do sentido de propagação. Assim, essa abordagem foi evitada quando possível.

Foram feitas medições do alcance do enlace variando a distância do ROPA ao receptor. Os resultados dessas medições são apresentados na tabela IV. Os valores dos VOAs foram convertidos a distâncias de enlace considerando a atenuação média de 0.2 dB/km de uma fibra óptica padrão. A potência do sinal na saída do transmissor foi de -1.5 dBm.

Há alguma incerteza relacionada a essas medições devido as medições do transponder. Dependendo da qualidade do sinal, o transponder responde com um sinal verde, amarelo ou vermelho, correspondendo a condições de erro zero, erro abaixo do limite da FEC e erro acima do limite da FEC, respectivamente. O ajuste do enlace foi feito alvejando a resposta amarela do transponder, a qual corresponde a uma variação de cerca de 5 km no comprimento do enlace.

Para comparar melhor as distâncias ao ROPA de 90 e 100 km, foram feitas medições variando a potência de transmissão do sinal. Os resultados estão na tabela V.

Para testes com propagação do bombeio na mesma fibra, a montagem foi modificada de acordo com o diagrama na Figura 13. Foram medidos os alcances do

Tabela IV: Alcance do enlace com ROPA Rx para diversas distâncias entre ROPA e receptor

Distância do ROPA ao receptor (km)	Alcance do enlace (km)
80	324
90	329
100	328
110	320

enlace variando a potência de bombeio de 1 a 2 W. Os alcances são listados na tabela VI. Como mencionado anteriormente, o espectro do laser tende a se alargar com o aumento da potência e parte do bombeio é filtrado no acoplador. Sendo assim, os valores reais do bombeio são um pouco mais baixos que os listados. A potência de lançamento do sinal foi de -1,5 dBm.

Tabela V: Alcance do enlace, em km, variando a potência de transmissão e a distância entre ROPA e receptor

Potência de transmissão (dBm)	Alcance (ROPA a 90 km)	Alcance (ROPA a 100 km)
-4,5	321 km	319 km
-1,5	329 km	328 km
+1,5	327 km	329 km

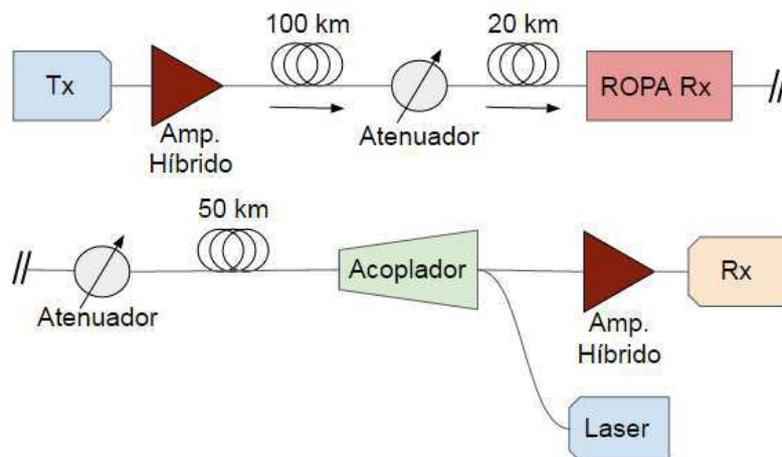


Figura 13: Diagrama do sistema com amplificação ROPA Rx - sem fibra específica para o bombeio

A propagação do bombeio do ROPA na mesma fibra que o sinal causa efeitos não lineares. O mais notável do ponto de vista de potência é o ganho Raman. Como regra prática, feixes de luz que propagam na fibra geram ganho Raman numa faixa de algumas dezenas de nanômetros com centro em torno de 100 nm acima. Já

Tabela VI: Alcance do sistema com ROPA Rx sem fibra específica para o bombeio em função da potência de bombeio

Potência do laser de bombeio (W)	Alcance do enlace (ROPA a 90 km)	Alcance do enlace (ROPA a 100 km)
1	302 km	-
1,2	312 km	-
1,4	316 km	302 km
1,5	316 km	304 km
1,6	318 km	309 km
1,7	316 km	312 km
1,8	315 km	310 km

que o bombeio tem comprimento de onda 1480 nm e o sinal óptico ocupa a faixa de 1529 a 1561 nm, os canais de maior comprimento de onda do sinal aumentam sua potência a medida que a potência do bombeio é aumentada. A diferença é amplificada quando o sinal passa pelo pré-amplificador do receptor, pois os canais de maior potência recebem maior ganho. O efeito descrito pode ser observado nos espectros de algumas das medições anteriores, nas Figuras 14, 15 e 16.

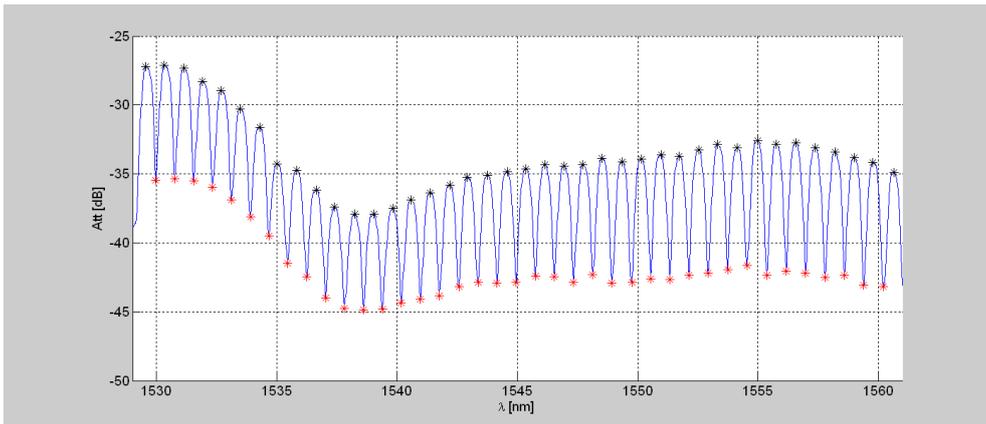


Figura 14: Espectro do sinal no receptor com ROPA a 90 km e bombeio de 1 W com propagação na mesma fibra

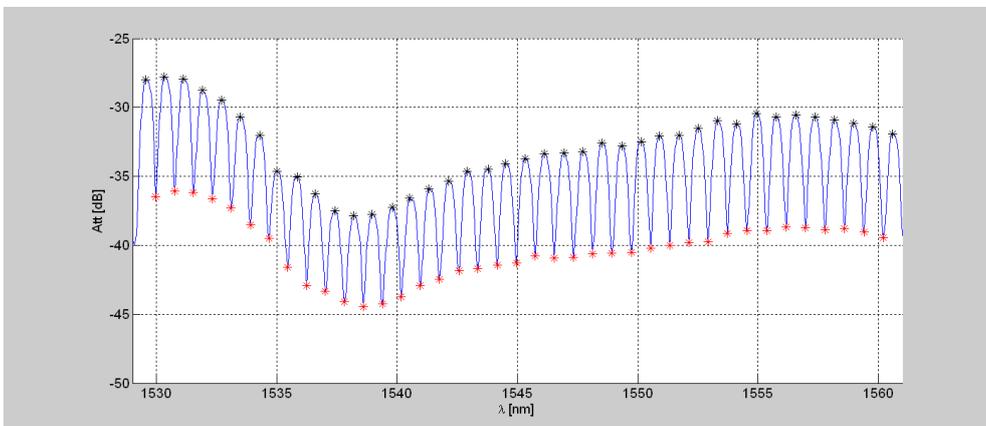


Figura 15: Espectro do sinal no receptor com ROPA a 90 km e bombeio de 1,4 W com propagação na mesma fibra

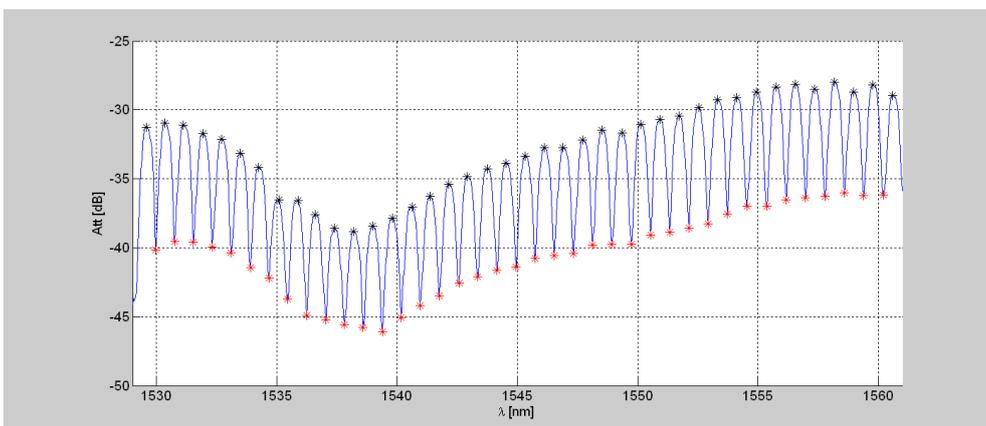


Figura 16: Espectro do sinal no receptor com ROPA a 90 km e bombeio de 1,8 W com propagação na mesma fibra

3.3 Sistema com ROPAs Rx e Tx

Dados os resultados obtidos nos experimentos sem amplificação remota e nos experimentos com ROPA no receptor, foram selecionadas as seguintes condições de operação para o sistema com ROPA de transmissão e de recepção:

- Potência de transmissão -1,5 dBm
- Bombeio para os ROPAs de 1,5 W
- Fibras específicas para propagação do bombeio
- ROPA Rx a 90 km do receptor

Além disso, a revisão bibliográfica e simulações do sistema indicam que a distância mais adequada para o ROPA do transmissor é em torno de 40 km. A montagem realizada é apresentada na Figura 17.

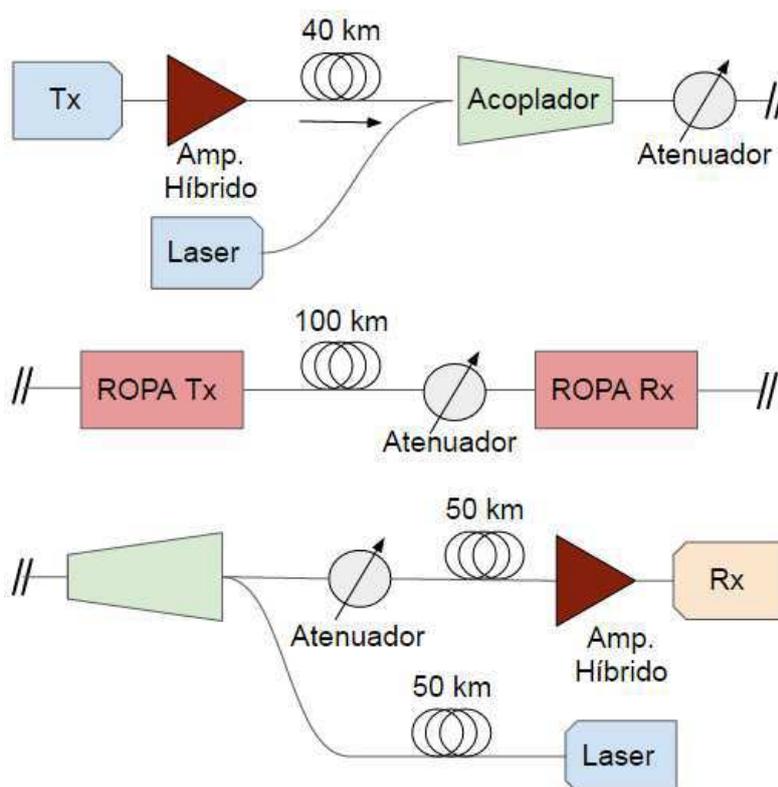


Figura 17: Diagrama do sistema com amplificação ROPA Rx e Tx, com fibras específicas para os bombeios

As medições iniciais indicaram que o alcance do enlace fica em torno de 329 km, o que está em desacordo com os resultados esperados, já que os experimentos anteriores atingiram essa distância com apenas o ROPA Rx.

Para determinar a causa da redução do alcance, foram testados diversos valores de bombeio do ROPA Tx, além de potências de transmissão e distâncias do

transmissor ao ROPA, sempre atingindo alcances menores. Alguns dos casos testados para o sistema apenas com ROPA Rx foram testados novamente para confirmar os resultados obtidos e as potências antes e depois de alguns componentes foram medidas em busca de inconsistências.

Concluiu-se que a provável causa do desempenho abaixo do esperado é o acoplador próximo ao ROPA Tx. Sua estrutura baseada em grades de Bragg atua como um filtro de faixa estreita, removendo o bombeio Raman remanescente do transmissor e atenuando a potência do bombeio do ROPA. Outro possível fator é a ocorrência de efeitos não lineares no sinal após o ROPA Tx, aumentando a OSNR mínima necessária para recepção do sinal.

Confirmada a causa da redução, buscou-se uma estimativa de quanto foi o ganho no alcance devido ao ROPA Tx. Para isso, foi testado o alcance do sistema com o segmento de fibra dopada do ROPA Tx removido. O valor medido foi de 303 km, o que indica que a inclusão do ROPA Tx aumentou o alcance do enlace em 26 km.

Também foi observada, quando não há uma fibra adicional para propagação do bombeio, a transferência de parte da potência do laser de bombeio do ROPA para o sinal por meio do Efeito Raman, do mesmo modo como ocorre em um Amplificador Raman Distribuído.

4 Conclusões

Como parte das atividades realizadas ao longo de um estágio no Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações (CPqD), foi feita uma revisão da bibliografia mais recente em transmissão sem repetição e amplificação óptica com bombeio remoto. Em seguida, foi realizada a análise experimental e aprimoramento de um sistema sem repetição projetado previamente por um dos pesquisadores do CPqD em seus estudos de doutorado [10]. A principal contribuição desse estudo é a inclusão de amplificação óptica de bombeio remoto (ROPA) no sistema, aumentando o alcance do enlace de 280 km a 330 km.

Foram analisados os efeitos de diversos fatores sobre o alcance do sistema, como, por exemplo, a potência de transmissão do sinal, as potências de bombeio dos amplificadores remotos, as distâncias entre os amplificadores remotos e seus respectivos lasers de bombeio e o uso de fibras ópticas específicas para propagação do bombeio dos amplificadores remotos.

Ao longo da condução dos experimentos foram encontrados diversos desafios de ordem prática, em sua maioria solucionados, porém parte deles afetaram o desempenho esperado do sistema, como a quantidade de fibra óptica disponível e particularidades de alguns componentes.

Não foi possível fazer a caracterização completa da influência de um ROPA de transmissão no sistema estudado. Mesmo assim, os experimentos proporcionaram uma contribuição considerável com a adição do ROPA de recepção, já que este é responsável pelo maior aumento no alcance de um enlace sem repetição dentre os dois ROPAs.

5 Referências

- [1] - D. Chang, W. Pelouch, S. Burtsev, B. Clesca, P. Perrier, and H. A. Fevrier, "Advanced Technologies for Unrepeated Transmission Systems and their Applications", in Asia Communications and Photonics Conference 2014, OSA Technical Digest (online) (Optical Society of America, 2014), paper
- [2] - J. B. Rosolem, M. R. X. de Barros, R. Arradi, S. M. Rossi, A. A. Juriollo, J. A. Matuso, E. Mobilon, D. S. dos Reis, R. Domingues, and J. V. Fior, "Repeaterless Optical System Demonstration in a Tropical Environment Using Double Pass Remote EDFA", in Optical Amplifiers and Their Applications/Coherent Optical Technologies and Applications, OSA Technical Digest Series(CD) (Optical Society of America, 2006), paper OTuD3.
- [3] - T. J. Xia, D. L. Peterson, G. A. Wellbrock, D. Chang, P. Perrier, H. Fevrier, S. Ten, C. Tower, and G. Mills, "557-km Unrepeated 100G Transmission with Commercial Raman DWDM System, Enhanced ROPA, and Cabled Large Aeff Ultra-Low Loss Fiber in OSP Environment", in Optical Fiber Communication Conference: Postdeadline Papers, (Optical Society of America, 2014), paper
- [4] - Do-il Chang, Hector de Pedro, Philippe Perrier, Herve Fevrier, Sergey Ten, Christopher Towery, Ian Davis and Sergejs Makovejs, "150 x 120 Gb/s Unrepeated transmission over 333.6 km and 389.6 km (with ROPA) G.652 fiber", ECOC 2014
- [5] - Estabrook, Kent and Kruer, W. L. and Williams, E. A., "Raman backscattering and forward scattering thresholds in parabolic density profiles", Physics of Fluids, 31, 372-374 (1988), DOI:<http://dx.doi.org/10.1063/1.866870>
- [6] - Bissessur, H., Bastide, C. Dubost, S., Etienne, S., Mongardien, D. "8 Tb/s unrepeated transmission of real-time processed 200 Gb/s PDM 16-QAM over 363 km", ECOC 2014, Pages 1-3, DOI:
- [7] - "Unrepeated 256 Gbs PM-16QAM transmission over up to 304 km with simple system configurations"
- [8] - H. Bissessur, C. Bastide, S. Dubost, and S. Etienne, "80 x 200 Gb/s 16-QAM unrepeated transmission over 321 km with third order Raman amplification," in Optical Fiber Communication Conference, OSA Technical Digest (online) (Optical Society of America, 2015), paper W4E.2.
- [9] - Agrawal, G. P. Fiber-Optic Communication Systems 4 ed. Rochester, NY:

Wiley, 2010.

[10] - Rodrigues Fernandes de Oliveira, J. (2012). "Hybrid EDFA/Raman Amplification Topology for Repeaterless 4.48 Tb/s (40 x 112 Gb/s DP-QPSK) Transmission Over 302 Km of G.652 Standard Single Mode Fiber". *Lightwave Technology, Journal of* (Volume:31 , Issue: 16, p. 2799)