

Projeto de Graduação



28 de Junho de 2021

OTDR Por Contagem de Fótons de Aquisição Rápida

Camila Lima de Sousa



Projeto de Graduação



OTDR Por Contagem de Fótons de Aquisição Rápida

Aluno: Camila Lima de Sousa

Orientador: Gustavo Castro do Amaral

Corientador: Felipe Calliari

Trabalho apresentado com requisito parcial à conclusão do curso de Engenharia Elétrica na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

Agradecimentos

Não poderia entregar o presente trabalho sem antes agradecer àqueles que foram fundamentais para sua elaboração.

Agradeço à toda a minha família, em especial à minha mãe, Karine, e à minha avó, Nadja, por todo carinho, motivação e suporte incondicional. Sem eles nada disso seria possível. Não há palavras suficientes para demonstrar o quanto sou grata por tudo que fizeram por mim.

Ao meu namorado, melhor amigo e companheiro de profissão, Breno, por toda paciência, carinho e companheirismo.

À Victoria, pela amizade genuína, que sempre me incentivou e apoiou. Seus conselhos foram valiosos para que eu chegasse até aqui.

Aos Professores Gustavo Amaral, Felipe Calliari e Guilherme Temporão por todo tempo e atenção dedicados, sem os quais não seria possível a conclusão desse trabalho.

Por fim, mas não menos importante, à todos os meus amigos que estiveram ao meu lado ao longo desta jornada.

Resumo

Neste projeto apresentam-se conceitos relevantes no contexto de comunicações ópticas. São apontados os principais métodos de monitoramento para fibras ópticas utilizados atualmente, além de destacar as vantagens de cada um, fazendo uma breve comparação. A partir da análise destes métodos, são apontados os motivos pelos quais escolheu-se o OTDR por contagem de fótons para fazer parte do sistema de monitoramento para fibras ópticas desenvolvido. Ademais, retratam-se os resultados obtidos através da montagem experimental, bem como todo o aperfeiçoamento até chegar no resultado final.

Palavras-chave: Comunicações ópticas, FPGA, Optoeletrônica, OTDR Por Contagem de Fótons

Fast Aquisition Photon Counting OTDR

Abstract

This project presents relevant concepts in the optical communication area. The currently most used monitoring methods for optical fibers are introduced, highlighting the advantages of each one and making a brief comparison. The reason for choosing photon-counting OTDR to be part of the developed optical fibers monitoring system is discussed by analyzing these methods. Moreover, it's debated the results obtained through the experimental project and all the improvements made to reach the final result.

Keywords: Optical Communication, FPGA, Optoeletronics, Photon-Counting OTDR

Lista de Figuras

1	Fibra Óptica	1
2	Redes de Fibras Intercontinentais	2
3	Traço do OTDR Exemplificando os Principais Defeitos	3
4	Esquemático de um I-OFDR	4
5	Diagrama de Blocos do DD-OTDR	5
6	Diagrama de Blocos do Sistema	6
7	Foto da Bancada do Sistema do OTDR	6
8	Esquemático do Figura de Oito Mode-Locked Laser Passivo Utilizado no Trabalho	6
9	Foto da Bancada do Sistema do Mode-Locked Implementado Com o Sistema do OTDR ao Fundo	7
10	Fotodetector - SPD	8
11	Diagrama de Blocos da FPGA	9
12	Medida Realizada Utilizando Apenas a ASE do SOA Em Uma Fibra de 10 km	10
13	Janela de Uma Medida de Uma Fibra Utilizando CW	11
14	Pulsos do Mode-Locked Laser	12
15	Espectro Elétrico do Pulsos do Mode-Locked Laser	12
16	Espectro Elétrico do Pulsos do Mode-Locked Laser Aumentado	13
17	Traço do OTDR da Medida Sem Amplificação	13
18	Traço do OTDR da Medida Com Amplificação	14
19	Medida Comparativa do Ruído e Desvio Padrão	14
20	Média e desvio padrão de contagens com e sem o sistema Mode-Locked	15
21	Dinâmica em função da amplitude do pulso do SOA	15

Lista de Tabelas

1	Faixa de Telecomunicações	1
2	Métodos de Monitoramento.	3

Sumário

1	Introdução	1
2	Monitoramento de Fibras Ópticas	3
a	OFDR	4
b	OTDR	4
c	OTDR Por Contagem de Fótons	5
3	Setup Experimental	6
a	Geração de Pulsos	6
b	Sincronismo	8
c	Detecção de Fótons	8
4	Análises e Medidas	10
a	Primeiros Resultados	10
b	Desenvolvimento	11
c	Otimização da Dinâmica em Função do Tempo	14
d	Otimização da Dinâmica em Função do SOA	15
5	Conclusões & Trabalhos Futuros	17
	Referências	18

1 Introdução

A criação do laser, no início dos anos 60, alavancou o interesse nas comunicações ópticas. Na década seguinte, a necessidade de utilizar frequências mais elevadas, a fim de transmitir uma quantidade maior de bits, desencadeou o desenvolvimento de fibras. Atualmente, a fibra óptica se trata de um guia de onda cilíndrico dielétrico, com revestimento externo, feito de materiais com baixas perdas, usualmente vidros de sílica, com alta pureza.

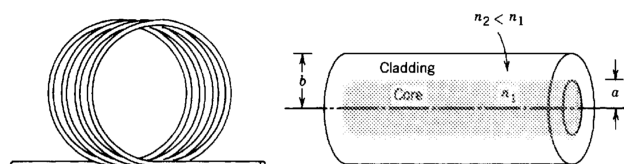


Figure 8.0-1 An optical fiber is a cylindrical dielectric waveguide.

Figura 1: Fibra Óptica [1].

Este dispositivo trouxe vantagens importantes, como possibilitar comunicações em taxas muitíssimo mais altas que em outros meios, já que suportam uma largura de banda bastante larga. Além disso, a baixa atenuação na faixa de telecomunicações (Banda C, tabela 1) tornou possível atingir longas distâncias. Há alto nível de segurança, pois não é possível fazer interceptação sem interromper a comunicação. Ademais, não sofre interferências eletromagnéticas. Desde o desenvolvimento de tal tecnologia, enlaces de fibras são utilizados para transmissão de voz, vídeos, telemetria, sensoria-mento, sinal de televisão a cabo, internet e até mesmo a conexão intercontinental [1].

Bandas	Descrição	Faixa	Tipo
VLF	Frequência muito baixa	3 kHz - 30 kHz	Rádio Frequência
LF	Frequência baixa	30 kHz - 300 kHz	
MF	Frequência mediana	300 kHz - 3 MHz	
HF	Frequência alta	3 MHz - 30 MHz	
VHF	Frequência muito alta	30 MHz - 300 MHz	
UHF	Frequência ultra alta	300 MHz - 3 GHz	
SHF	Frequência super alta	3 GHz - 30 GHz	
EHF	Frequência extremamente alta	30 GHz - 300 GHz	Frequência Óptica
O	Original	1260-1360 nm	
E	Extendida	1360-1460 nm	
S	Curto	1460-1530 nm	
C	Convencional	1530-1565 nm	
L	Longo	1565-1625 nm	
U	Ultra longo	1625-1675 nm	

Tabela 1: Faixa de Telecomunicações

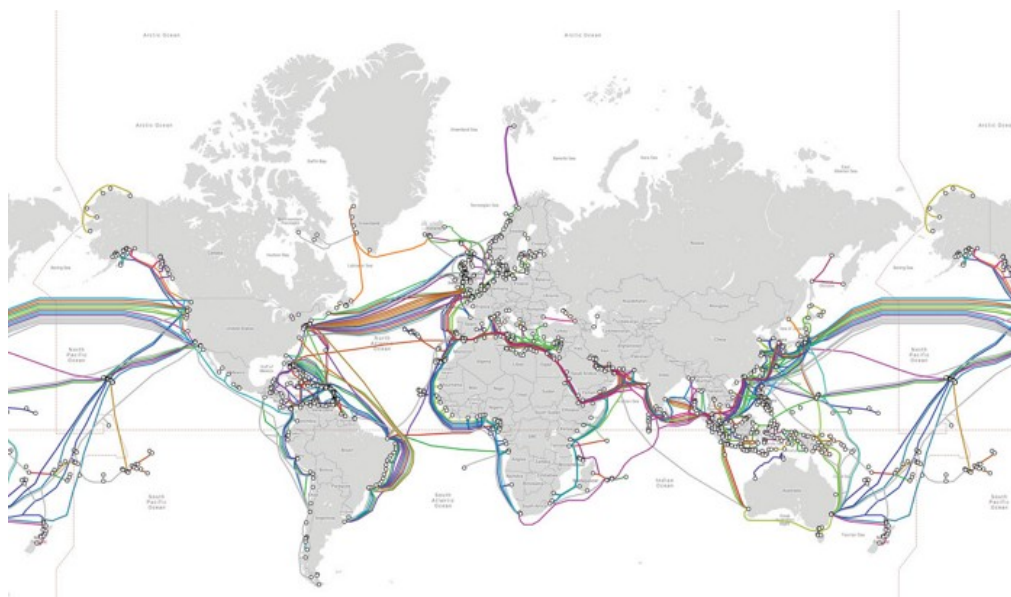


Figura 2: Redes de Fibras Intercontinentais [2].

Devido às suas vantagens, elencadas anteriormente, fibras ópticas têm sido utilizadas de maneira crescente no mercado de telecomunicações e se tornado um dos principais produtos. Contudo, todas as tecnologias são passíveis de defeitos. Embora o preço das fibras tenha diminuído consideravelmente em relação ao preço inicial, ainda são relativamente caras, mas o custo maior é da construção e instalação do equipamento. A infra-estrutura que possibilita as telecomunicações deve ser preservada, em vista de que é a maior parte do investimento. Logo, é mais interessante reparar o equipamento existente, do que substituí-lo por um novo.

Supondo que uma fibra que interliga dois continentes, apresente alguma falha, ou seja, de um dos lados não chegam dados, saber onde consertar e qual foi o defeito ocorrido, é de grande importância para que seja reparado o mais rápido possível. Portanto, é imprescindível a existência de dispositivos capazes de identificar defeito e/ou falhas em fibras ópticas de forma a garantir a robustez na operação da rede. Neste trabalho apresentam-se os mecanismos utilizados atualmente para monitoramento de redes fotônicas, com maior destaque ao OTDR por contagem de fótons, bem como todo o desenvolvimento experimental deste dispositivo, análise de resultados importantes obtidos e otimizações de parâmetros do sistema.

2 Monitoramento de Fibras Ópticas

Nesta seção abordam-se os principais mecanismos utilizados atualmente para realizar o monitoramento de redes ópticas. Em seguida, apresenta-se uma tabela, comparando estes. Vale ressaltar que os valores apresentados abaixo foram coletados do livro [3]. Os valores em questão já não estão mais em acordo com o atual estado da arte desta tecnologia. Contudo, ainda servem como referencial para comparação.

Técnica	Resolução espacial (mm)	Faixa Dinâmica (dB)
DD-OTDR	5	50
PC-OTDR	10	60
I-OFDR	4	50
C-OFDR	0.012	106

Tabela 2: Métodos de Monitoramento.

Primeiramente, antes de estudarmos os métodos de monitoramento, é importante analisar quais são os possíveis problemas que pode-se encontrar. Estes estão listados abaixo.

- Perdas por conectores: quando se deseja conectar links ópticos com outros equipamentos, utiliza-se conectores. O ar que se encontra entre os dois núcleos causa uma diferença de índice de refração, gerando reflexão. Além disso, podem haver impurezas nos conectores.
- Perdas por soldas: ao soldar fibras, podem ocorrer bolhas de ar, impurezas entre os dois núcleos e desalinhamento de núcleos, gerando perdas.
- Curvas: ao curvar a fibra óptica, o ângulo dos feixes pode ficar menor do que o ângulo crítico, fazendo com que parte da luz seja transmitida para o revestimento. Além disso, a tração e a compressão que ocorrem numa curvatura, ocasionam a diferença de índice de refração dentro do núcleo, adicionando perdas.
- Eventos externos: vento, animais ou acidentes podem lesionar a fibra.

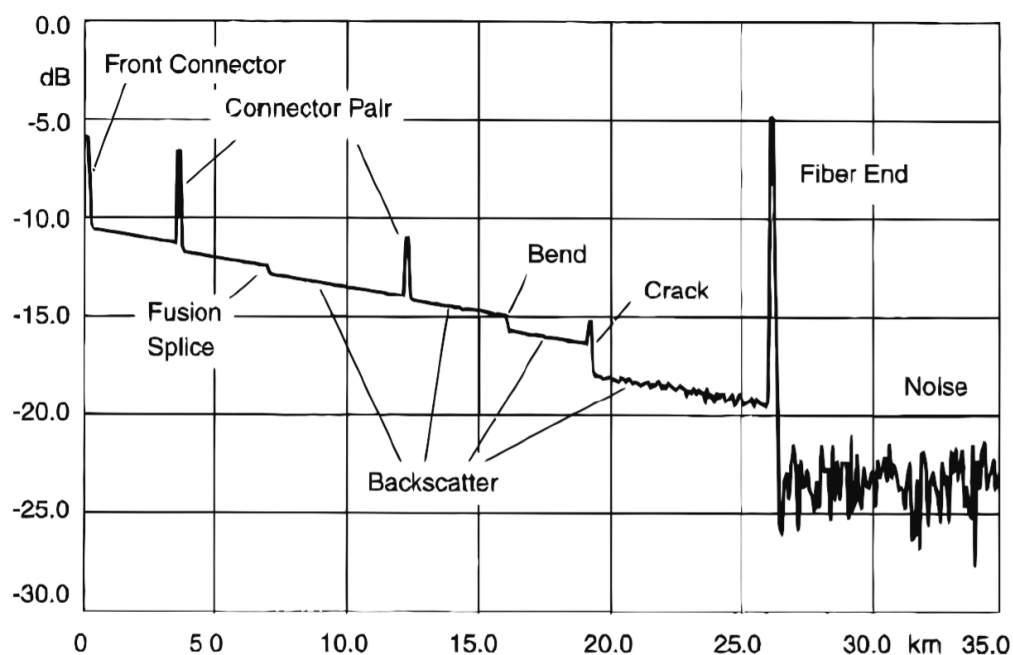


Figura 3: Traço do OTDR Exemplificando os Principais Defeitos [3].

Todas essas situações contribuem para a redução da potência transmitida no sistema e são considerados defeitos na rede. Ao perder um link de comunicação, além do prejuízo financeiro, o sistema

é impossibilitado de enviar informações neste canal. Dessa forma, o monitoramento de enlaces de fibras ópticas se faz de extrema importância.

A reflectometria óptica, baseada no fenômeno de retroespalhamento de Rayleigh [4], é dos principais métodos utilizados para fazer a caracterização de sistemas ópticos. Pode ser dividida em Reflectometria Ótica no Domínio do Tempo (OTDR) e Reflectometria Ótica no Domínio da Frequência (OFDR). Para realizar uma medida é necessário conectar uma das extremidades da fibra ao equipamento. Através da curva gerada, distância percorrida na fibra vs potência em dBm, comumente chamada de traço, é possível caracterizar fibras óticas e tirar informações importantes como, por exemplo, localizar falhas na fibra e perdas por conexões e soldas, estimar seu comprimento e mensurar a atenuação. Na figura 3, pode-se ver cada um dos defeitos mencionados anteriormente.

a OFDR

O funcionamento do OFDR se dá através de um analisador de redes vetorial elétrico (NA), que envia potência óptica modulada senoidalmente para uma fibra. A função de transferência no domínio da frequência é obtida pela medida da amplitude e fase do sinal refletido para cada frequência examinada. Fazendo a transformada de Fourier inversa da resposta em frequência e colocando em escala do tempo, de forma a representar a distância percorrida, obtêm-se a curva reflectividade óptica versus distância. Sua vantagem é que possui maior resolução espacial em relação ao OTDR. Lembrando que a mínima resolução espacial é inversamente proporcional ao intervalo no qual a frequência é varrida [3].

Existem dois tipos de OFDR: OFDR coerente (C-OFDR) [5] e OFDR incoerente (I-OFDR) [6]. Quando a varredura é feita através da portadora óptica, trata-se do C-OFDR. Quando é feita a partir do envelope de modulação, I-OFDR. Sua principal aplicação é para a caracterização de componentes de rede óptica com alta sensibilidade e resolução milimétrica.

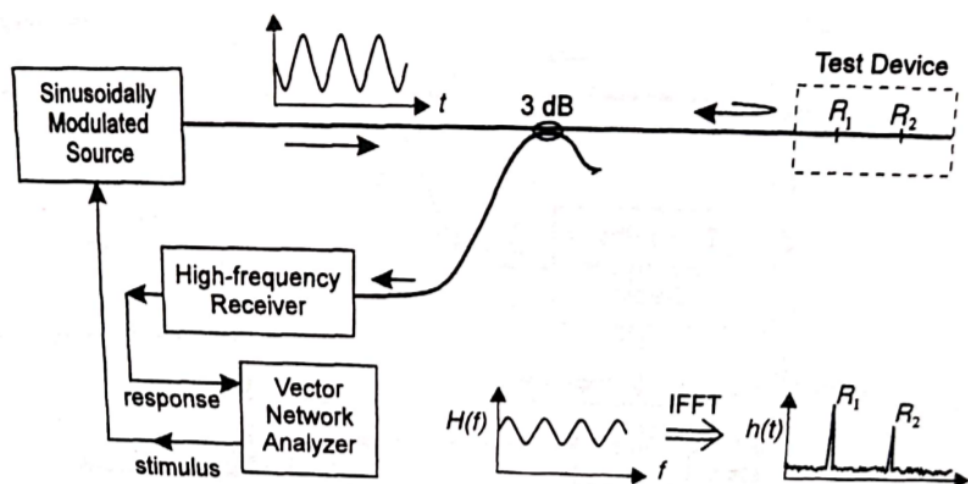


Figura 4: Esquemático de um I-OFDR [3].

b OTDR

O sistema de um OTDR de detecção direta (DD-OTDR), representado na figura 5, é composto por um laser, que ao emitir pulsos óticos, os envia para o circulador, que os leva até a fibra, onde ocorre o retroespalhamento. Os pulsos que retornam passam pelo circulador e vão para o fotodetector, que medirá a potência da luz recebida. Após o processamento do sinal, em posse do tempo do tempo que o pulso demora pra ir e voltar na fibra, o round trip, e a velocidade da luz na fibra, é possível distinguir a qual parte da fibra tal intensidade luminosa se refere.

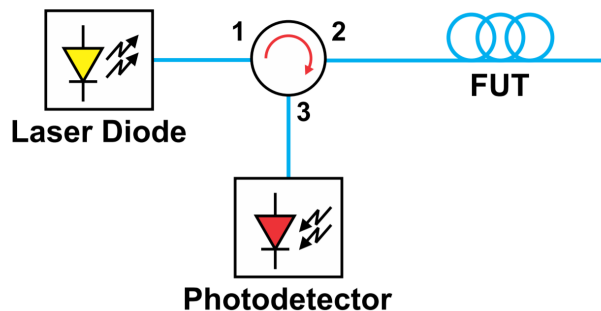


Figura 5: Diagrama de Blocos do DD-OTDR [7].

Todavia, vale ressaltar que a resolução espacial e a faixa dinâmica (relação entre sinal e ruído) apresentam uma relação de compromisso, pois ao aumentar a potência do pulso, gera-se o alargamento do mesmo, ocasionando na perda de resolução. Portanto, quanto mais fino for o pulso, maior será a resolução e quanto mais potente, maior será a faixa dinâmica. No entanto para conseguir uma potencia maior, comumente o pulso se alarga.

c OTDR Por Contagem de Fótons

Utilizando-se um tubo foto-multiplicador ou fotodiodo avalanche operando no modo Geiger, no comprimento de onda de telecomunicações, obtém-se um OTDR por contagem de fótons. Comparando-o ao DD-OTDR, o PC-OTDR possui algumas melhorias: maior sensibilidade devido à detecção de potências baixas no regime de fótons únicos, maior resolução espacial, sem comprometer a faixa dinâmica, menor variação de tempo e melhor desempenho no afterpulsing. Entretanto, é mais lento, já que é um sistema digital, enquanto o convencional é analógico [8–10].

Neste trabalho, optou-se pelo uso do OTDR por contagem de fótons devido às suas vantagens já mencionadas. A fim de reduzir sua desvantagem, implementou-se uma estrutura de processamento e condicionamento de sinais capaz de medir janelas simultâneas, diminuindo, por consequência, o tempo de medição do equipamento. Dessa forma, obteve-se a combinação de uma dinâmica razoável, com resolução de centímetros, sistema de aquisição mais rápido e tunabilidade. Na seção seguinte apresenta-se o setup experimental implementado.

3 Setup Experimental

Abaixo tem-se a imagem do esquemático do sistema desenvolvido. Pode-se dividi-lo em 3 blocos principais: geração de pulsos, sincronismo e detecção de fótons. A geração é composta pelo Figura de 8 Mode-locked Laser Passivo (F8-PMLL), responsável por gerar os pulsos de monitoramento que serão utilizados para caracterizar a fibra. O bloco do sincronismo é constituído por dois geradores digitais de atrasos (DDG, Digital Delay Generator) e um amplificador óptico semiconductor (SOA). Por último, o bloco de detecção que é integrado pelo fotodetector, representado por SPD na imagem, um TDC e a FPGA [7].

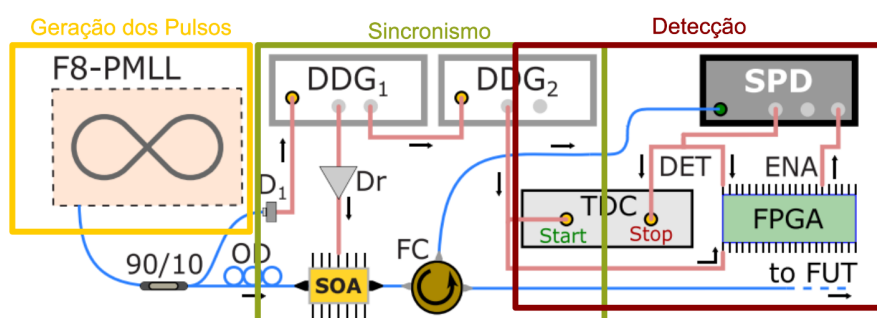


Figura 6: Diagrama de Blocos do Sistema.

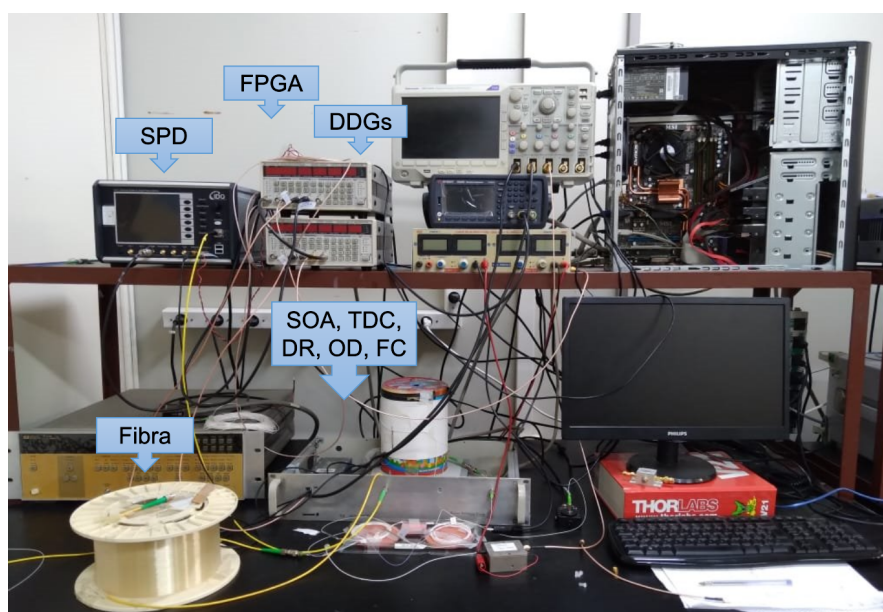


Figura 7: Foto da Bancada do Sistema do OTDR.

a Geração de Pulsos

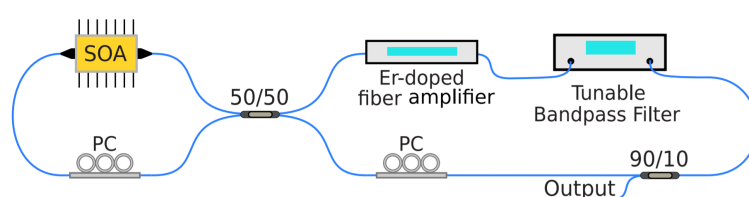


Figura 8: Esquemático do Figura de Oito Mode-Locked Laser Passivo Utilizado no Trabalho [11].

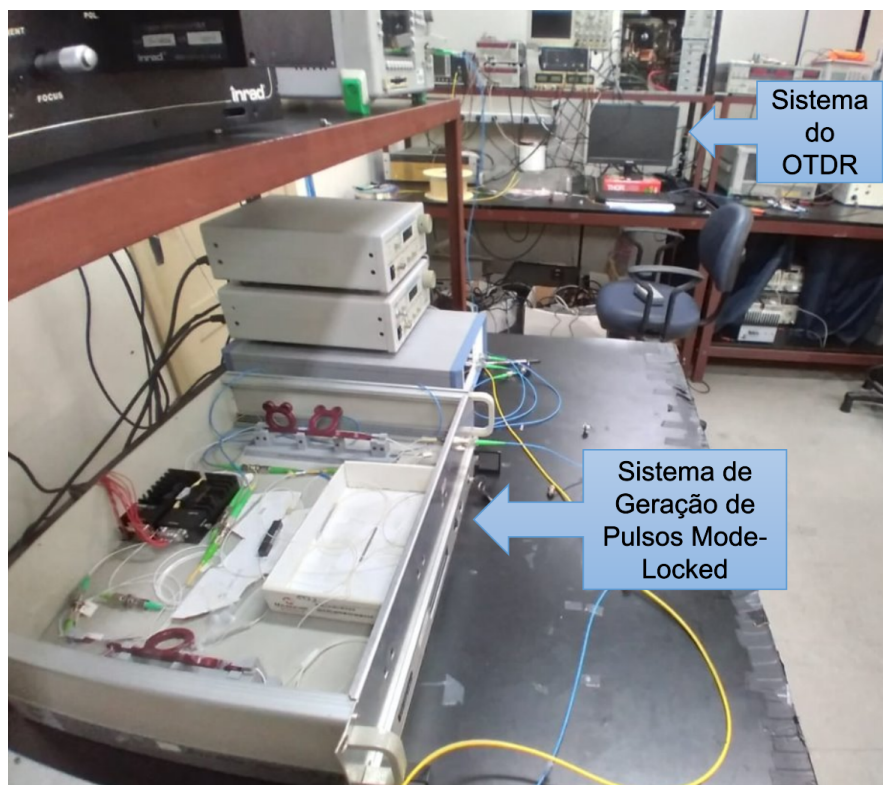


Figura 9: Foto da Bancada do Sistema do Mode-Locked Implementado Com o Sistema do OTDR ao Fundo.

Para gerar os pulsos a serem enviados para a fibra, utilizou-se uma montagem de um figura de um laser de modos casados passivo em estrutura do tipo figura-de-8 em fibra, seu funcionamento pode ser brevemente explicado pensando de uma forma iterativa. Na primeira iteração, o instante em que o sistema é ligado, não há luz entrando no SOA, então nada será amplificado. Todavia, este irá gerar emissão estimulada amplificada (ASE, Amplified Stimulated Emission), luz incoerente. A ASE é gerada para os dois lados, logo, parte da ASE irá para o controlador de polarização (PC) e a outra parte para o beam-splitter 50/50. Ao passar pelo divisor de feixes ópticos, a ASE irá para o amplificador com fibra dopada érbio (EDFA, Er-Doped Fiber Amplifier), que também produz ASE. As duas se somam e serão amplificadas. Passando pelo filtro, este selecionará o espectro central a ser trabalhado. Para este trabalho foi eleito o comprimento de onda central de 1550 nm, o comprimento de ondas de telecomunicações.

A cada iteração modos específicos, regidos pelo tamanho da cavidade, são amplificados, desta forma, tornam-se coerentes. Apenas estes modos sobrevivem dentro da cavidade. É necessário fazer ajuste da fase para que estes modos fiquem casados. Com isso, conseguimos um trem de pulsos, pois tem-se um pente de frequência. Dependendo do ajuste de fase e da corrente no SOA, pode-se atingir diferentes harmônicos da fundamental, determinada pelo comprimento da cavidade. Isto é interessante, pois podemos tunar a geração de pulsos.

Apesar da tunabilidade e dos pulsos potentes e finos gerados, há diversos fatores que podem arruinar o casamento de fase dos modos. Por exemplo, variações de temperatura afetam o índice de refração dentro da fibra óptica, descasando a fase. De mesmo modo, interferências externas, como uma curvatura diferente ou vibrações, podem também acabar com a condição de fase. Todos esses fatores afetam o casamento de modos, então vale ressaltar que o seu manuseio é bem complexo. No entanto, após atingir a configuração desejada e não havendo fatores externos que possam interferir no sistema, este apresenta um excelente desempenho.

b Sincronismo

O sincronismo dos pulsos foi realizado utilizando um SOA e dois geradores digitais de delay (DDG), conhecidos como Stanfords. O primeiro possui estrutura física semelhante a um laser, mas não apresenta ressonador óptico [12], sendo apenas um meio de ganho do laser. Estes são capazes de amplificar o sinal gerando ganhos de até 35 dB no espectro entre 1280 a 1650 nm. O fato mais interessante deste dispositivo é que pode ser acionado durante uma janela de tempo específica, controlado por um pulso elétrico; em instantes onde o pulso elétrico não está ativo, o dispositivo introduz perdas elevadas, se comportando como uma chave óptica amplificada. Neste trabalho, tal pulso foi implementado a partir do AVTECH (DR) [13]. Já o DDG é um gerador de atraso digital, que possui 5 canais de saída com resolução de 5 ps [14].

De modo geral, após o figura de 8 gerar os pulsos finos com o espectro desejado, os mesmos são amplificados. Ao passar pelo beam splitter 90/10, 90% da luz passa por um delay óptico (OD, Optical Delay) e vai para o SOA. Já os 10% restantes, são detectados e usados para acionar, "trigger", o DDG₁. Depois disso, o DDG₁ conta um número específico de pulsos, tal que apenas um pulso óptico esteja passando pela fibra. Em seguida, ele aciona o AVTECH, o qual gera a janela do SOA, permitindo que o pulso óptico passe. É notório ressaltar que o OD atrasa o pulso óptico de modo que o pulso que trigou o DDG₁ seja o que passa pelo SOA. Depois disso, o pulso que sai do SOA passa por um circulador (FC, Fibred Circulator), que faz com que ele vá para a fibra. Todas as reflexões que ocorrem na fibra e chegam no circulador, vão para a porta 3, conseqüentemente, chegando até o SPD (figura 10).

c Detecção de Fótons



Figura 10: Fotodetector - SPD [15].

A detecção do sistema, dispõe de um Conversor de Tempo para Digital (TDC, Time-to-Digital Converter), Field Programmable Gate Arrays (FPGA) e detector de fótons únicos (SPD, Single-Photon Detector). O primeiro dispositivo é um sistema digital que discretiza o tempo, que tem a capacidade de medir intervalos da ordem de nanossegundos até picossegundos. Neste trabalho utilizou-se um TDC que atinge 55 ps. Vale ressaltar que este TDC funciona sem a necessidade de componentes analógicos. Assim, resultando em circuitos integrados eficientes, economizando energia, espaço e custo.

A FPGA é um dispositivo feito para ser programado pelo usuário, através de um software que utiliza linguagem de descrição de hardware (HDL). Sua estrutura é composta por um grande número de blocos lógicos configuráveis (CLB), que são pequenas células que contêm estruturas básicas de eletrônica digital e blocos de entrada e saída (IOB). Escolheu-se trabalhar com este dispositivo devido a sua velocidade de processamento e o fato de que suas instruções são paralelizadas, ou seja, é possível realizar múltiplas operações ao mesmo tempo [7].

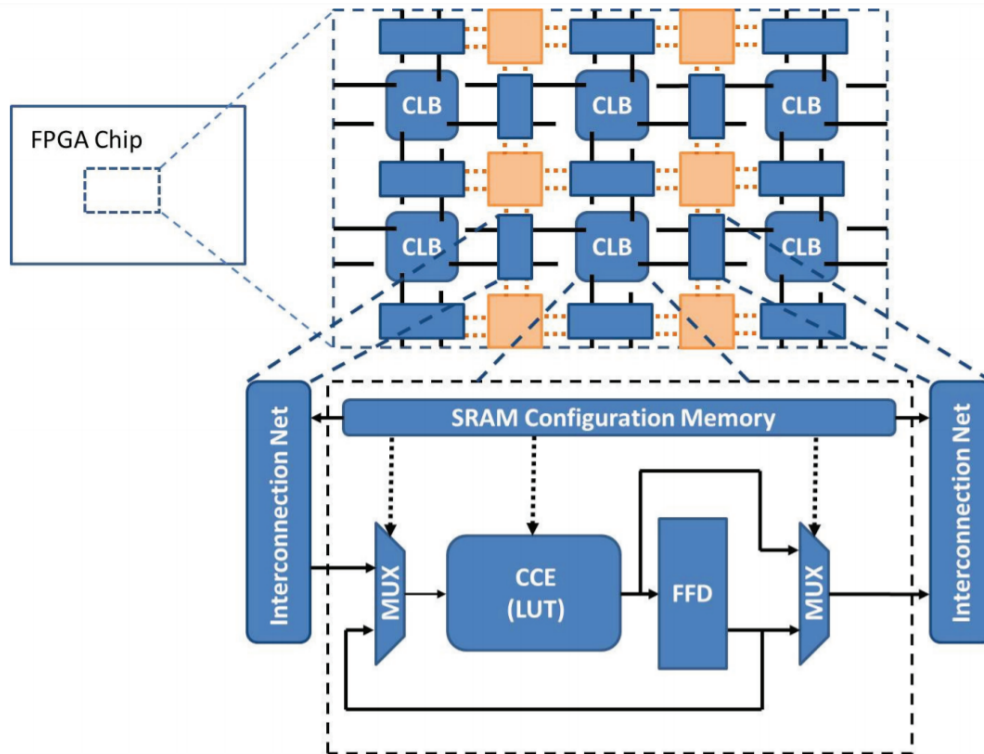


Figura 11: Diagrama de Blocos da FPGA [8].

O sistema funciona da seguinte maneira, quando o pulso óptico é convertido em pulso elétrico e aciona o DDG_1 , depois de um tempo, este inicia a contagem do TDC. Ao mesmo tempo, a FPGA é avisada sobre esse evento. Logo, o SPD recebe um pulso para abrir uma janela de medida de 20 ns. Simultaneamente, o SPD faz a contagem de fótons e o TDC a contagem de tempo. Quando a janela de detecção acaba, o SPD manda um sinal avisando tanto a FPGA quanto o TDC terminando a contagem, por conseguinte terminando uma janela de medida do OTDR. O tempo e as contagens de fótons são enviados para a FPGA ao fim de uma iteração. Esse processo é repetido diversas vezes, o quanto for programado pelo usuário.

Em posse da contagem de fótons, do tempo decorrido e do índice de refração da fibra, é possível calcular a distância do ponto no qual ocorreu tal reflexão. A expressão utilizada para o cálculo da distância é:

$$d = \frac{c}{2n}t \quad (1)$$

Na próxima seção discute-se sobre as dificuldades encontradas ao longo do experimento, as melhorias realizadas e os resultados mais relevantes.

4 Análises e Medidas

Este projeto tem como base o trabalho anteriormente desenvolvido por Calliari [11]. Utilizou-se o sistema referido a fim de otimizá-lo e torná-lo mais robusto. Para isso, atacou-se pontos onde foram identificados que a otimização dos parâmetros não havia sido feita da maneira mais eficiente. Outro objetivo foi tornar toda a operação do sistema mais estável.

a Primeiros Resultados

O primeiro passo do projeto foi fazer com que o sistema do OTDR desenvolvido por Calliari, que já se encontrava desligado há mais de 1 ano, voltasse a funcionar. Para isso, precisou-se procurar parte dos equipamentos no laboratório e entender como manuseá-los. Após o estudo do sistema, deu-se início à montagem.

Inicialmente, não havia fonte óptica, apenas a ASE do SOA. Esta configuração apresentou resultados promissores, possibilitando visualizar algo semelhante a um traço de OTDR, mas ainda sim, havia muitos desafios. Para obter resultados razoáveis, era necessário fazer medidas longas de 5 a 10h. Abaixo, figura 12, apresenta-se um dos resultados mais motivantes obtidos com esta configuração.

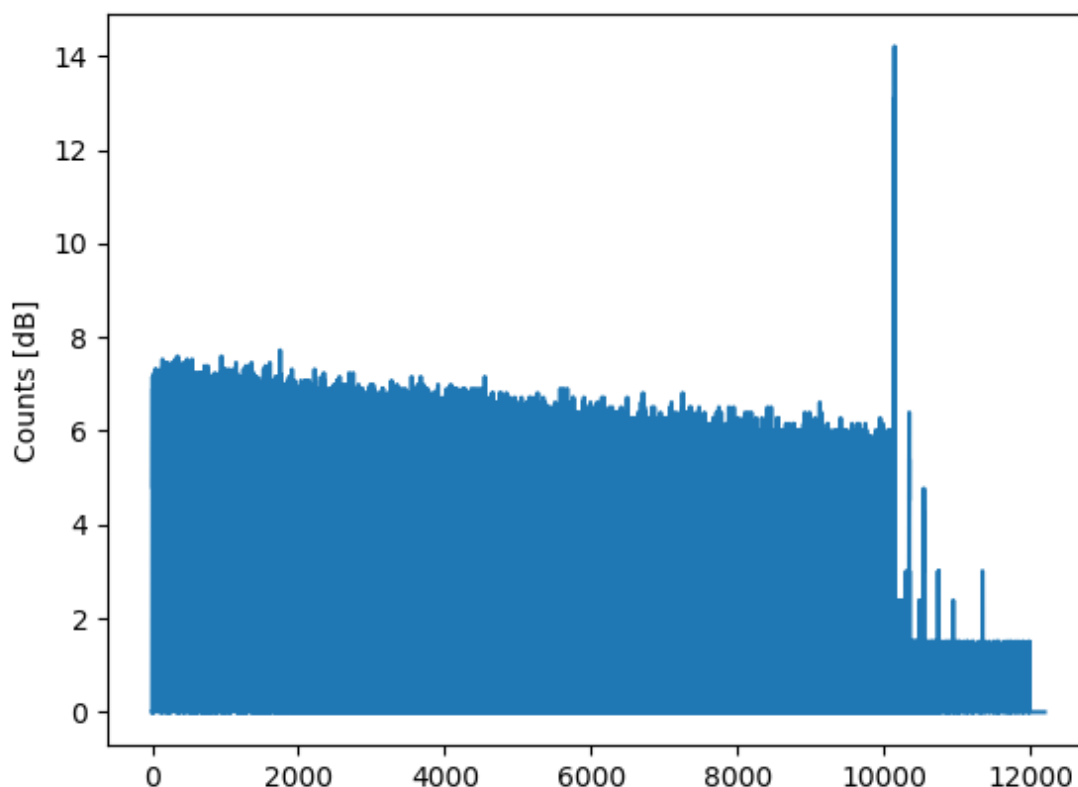


Figura 12: Medida Realizada Utilizando Apenas a ASE do SOA Em Uma Fibra de 10 km.

É importante ressaltar que as janelas da medida da figura 12, eram largas o suficiente para que imediatamente após o final de uma janela, outra começasse. Assim, parecem ser contínuas. Além disso, o razão sinal ruído é tão baixa, fazendo com que a medida oscile do máximo ao zero, preenchendo o que está embaixo da curva.

b Desenvolvimento

O primeiro passo a se melhorar foi o pulso elétrico da FPGA que fazia a janela do detector. O meio do pulso não tinha formato retilíneo, o que atrapalhava as contagens, pois modulava a janela. As partes mais altas do pulso faziam com que o diodo avalanche fosse mais suscetível a contar fótons do que nas partes menores. Uma das soluções encontradas foi utilizar um novo AVTECH acionado pela FPGA para gerar a janela de detecção. Ainda assim, no meio do pulso apresentavam-se variações indesejadas.

Todavia, este AVTECH possui um overshoot largo, uma descida lenta e ainda havia variações no meio. Sendo assim, um resultado pior do que utilizando a FPGA. Então decidiu-se modificar o setup para que o próprio SPD gerasse os pulsos da janela de contagem. Sendo a FPGA responsável por trigger o mesmo. Notou-se que ainda haviam os mesmos problemas tanto no início e no final da janela, no entanto, no meio era retilíneo. Para contornar este problema que comprometia a medida, implementou-se no código um corte que ignorava o início e o fim da janela.

De maneira a diminuir o tempo da medida, implementou-se um laser de onda constante (CW, Constant Wave), enquanto o Mode-Locked ainda não estava pronto para ser inserido no sistema. A potência dos pulsos que iam para fibra agora eram maiores e, por isso, a medida era mais rápida. Em vista disso, os resultados seguintes foram bem mais estáveis que nos cenários anteriores. Apesar disso, deparou-se com uma nova questão. O tamanho do pulso agora era limitado na largura, em 20 ns. Na figura 13, apresenta-se a medida de uma janela do sistema nesta configuração.

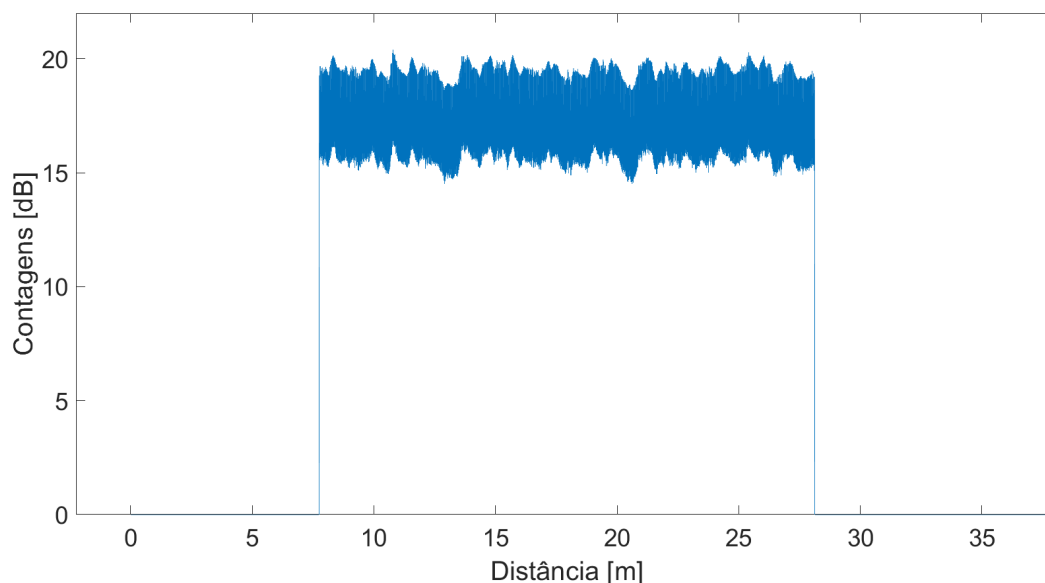


Figura 13: Janela de Uma Medida de Uma Fibra Utilizando CW.

Quando o sistema do F8-PMLL ficou pronto, retirou-se o CW e em seu lugar foi colocado o Mode-Locked Laser, que gerava pulsos finos, potentes e estáveis. Isto fez com que as medidas ficassem mais rápidas. Também resultou numa melhor resolução, devido aos seus pulsos finos.

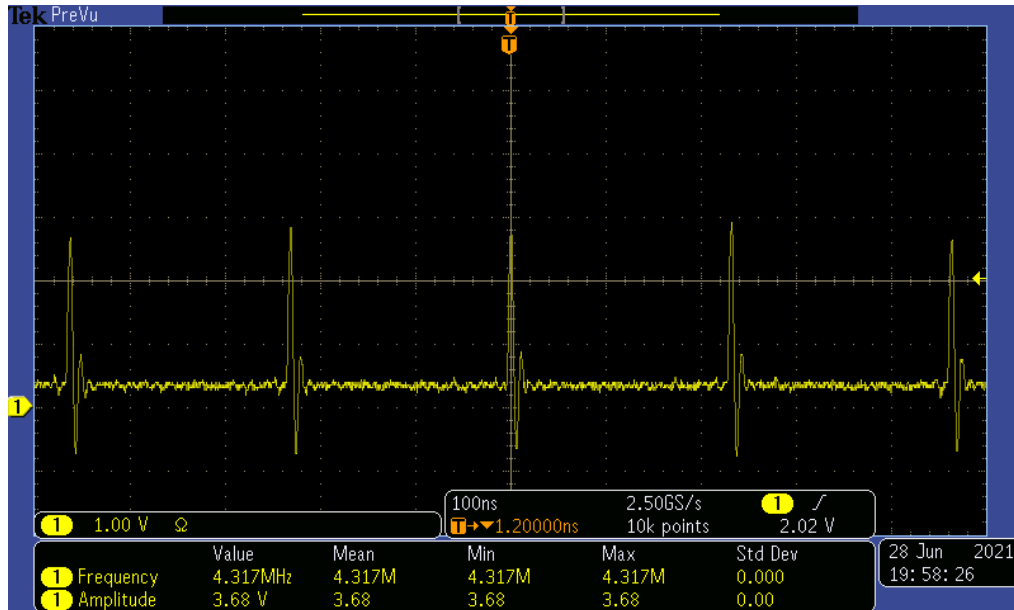


Figura 14: Pulsos do Mode-Locked Laser.

A figura 14 apresenta o pulso que triggava o Stanford, sinal amarelo. O pulso não parece desempenhar o comportamento descrito, pois a resposta em frequência do detector utilizado limitava sua largura, por isso, observam-se oscilações. A seguir apresenta-se o espectro elétrico desses pulsos gerados. Neles observam-se os modos de frequência da cavidade e a resposta do detector. Próximo a 120 MHz os modos são atenuados.

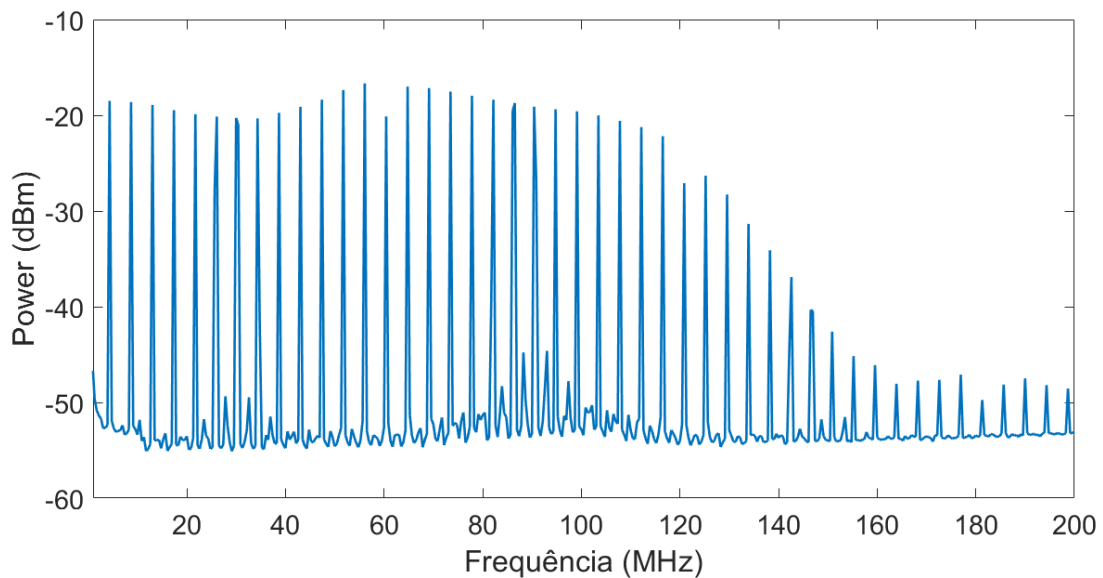


Figura 15: Espectro Elétrico do Pulsos do Mode-Locked Laser.

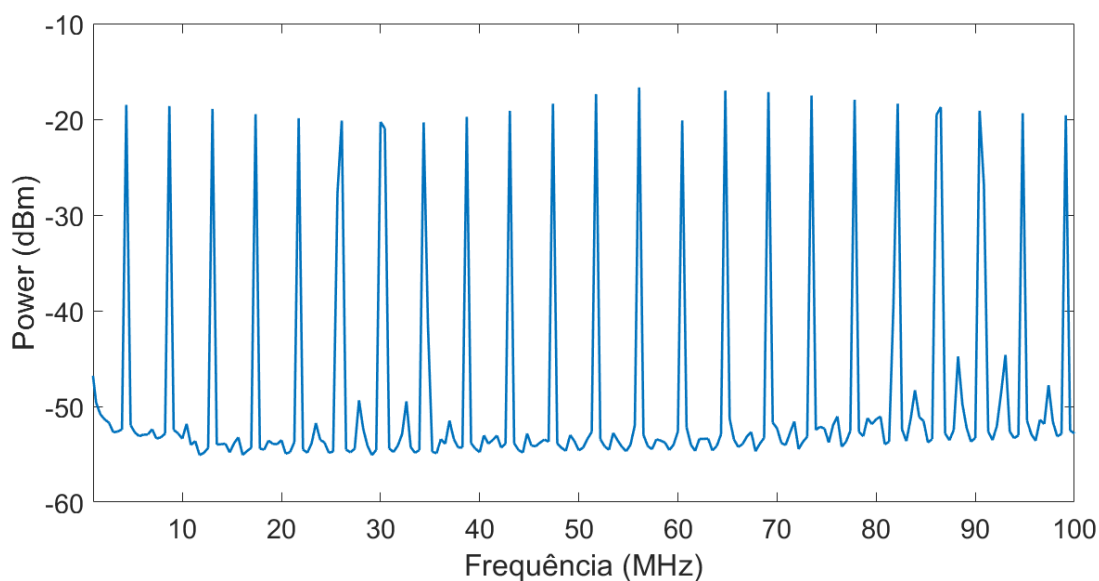


Figura 16: Espectro Elétrico do Pulsos do Mode-Locked Aumentado.

No entanto, observou-se que a dinâmica ainda não alcançava a obtida no artigo [11]. Portanto, foi desenvolvido um sistema para amplificar os pulsos ópticos produzidos pelo Mode-Locked. Por conseguinte, apresentam-se as figuras produzidas, onde na 17 ainda não havia sido implementado a amplificação, já em 18 tem-se uma medida com os pulsos amplificados.

É notável que o tempo de realização das duas medidas não é igual. O resultado da figura 17, foi obtido depois de 13 minutos, já o da figura 18 demorou 6 minutos. Com isso, conclui-se que um sistema amplificado permite realizar medidas mais curtas tendo um desempenho igual ou superior ao sem amplificação.

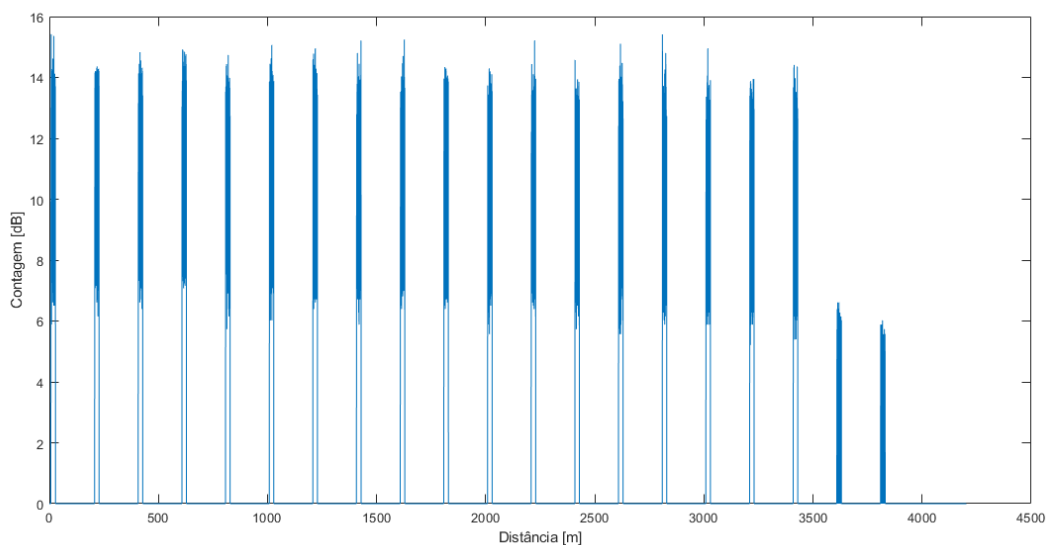


Figura 17: Traço do OTDR da Medida Sem Amplificação.

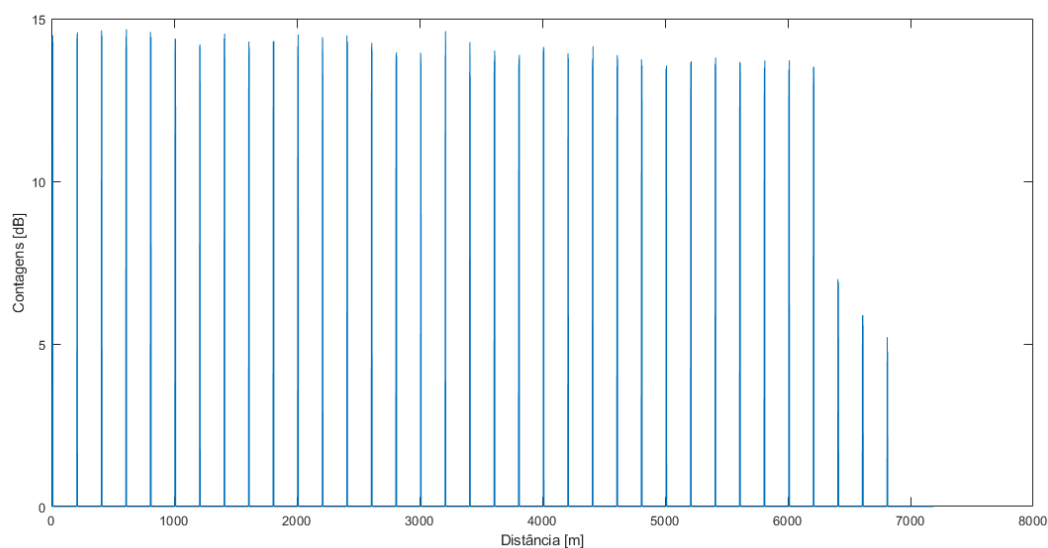


Figura 18: Traço do OTDR da Medida Com Amplificação.

c Otimização da Dinâmica em Função do Tempo

O primeiro passo da otimização foi observar quanto tempo seria necessário para saturar a dinâmica. Por isso, o código foi modificado para salvar as medidas do traço a cada 1 minuto. Em seguida, foi realizada uma etapa de pós processamento para analisar a primeira janela do OTDR, assim calculando a média de contagens e o desvio padrão. O mesmo foi feito para o sistema sem fibra na saída do OTDR. Desta forma, foram analisados os mesmo parâmetros, só que para o ruído. Na figura 19, pode-se ver o resultado obtido. Vale ressaltar que o sistema não estava amplificado quando esta medida foi realizada, por isso a dinâmica não atingiu o esperado. No entanto, serviu de referência para as próximas medidas e espera-se realizar a mesma medida com o atual sistema.

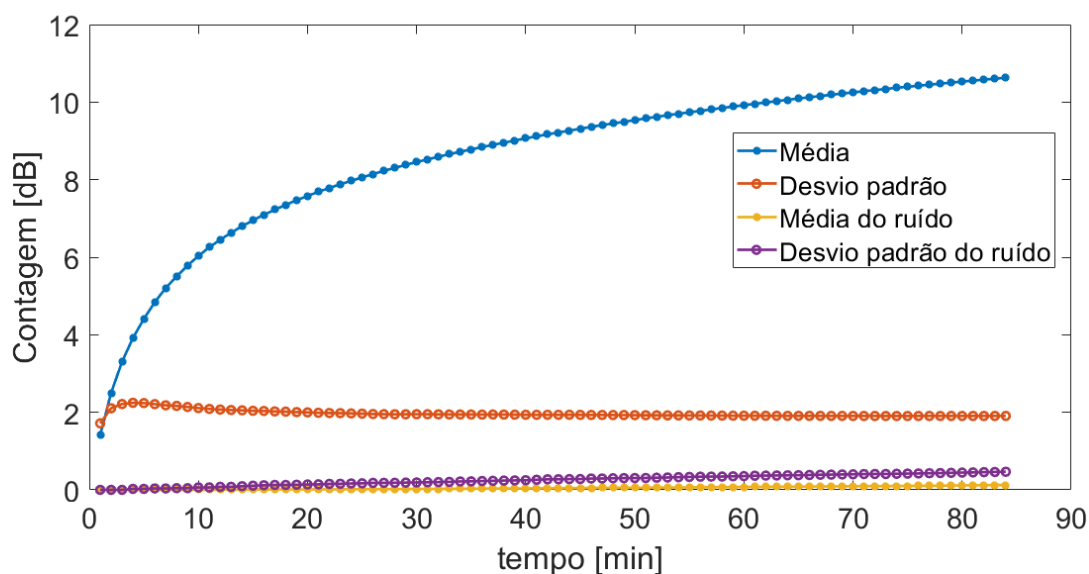


Figura 19: Medida Comparativa do Ruído e Desvio Padrão.

d Otimização da Dinâmica em Função do SOA

Com os pulsos amplificados, pensou-se em uma medida para otimizar a amplitude do pulso aplicado no SOA. Para averiguar esta relação, realizou-se medidas de curta duração com o OTDR, variando e monitorando a amplitude do pulso gerado pelo AVTECH. O manuseio deste gerador é manual, por meio de potenciômetros de precisão. Desta forma, a cada medida realizada foi necessário ajustar os parâmetros da amplitude e da largura do pulso, porque ao alterar um deles, o outro também se alterava.

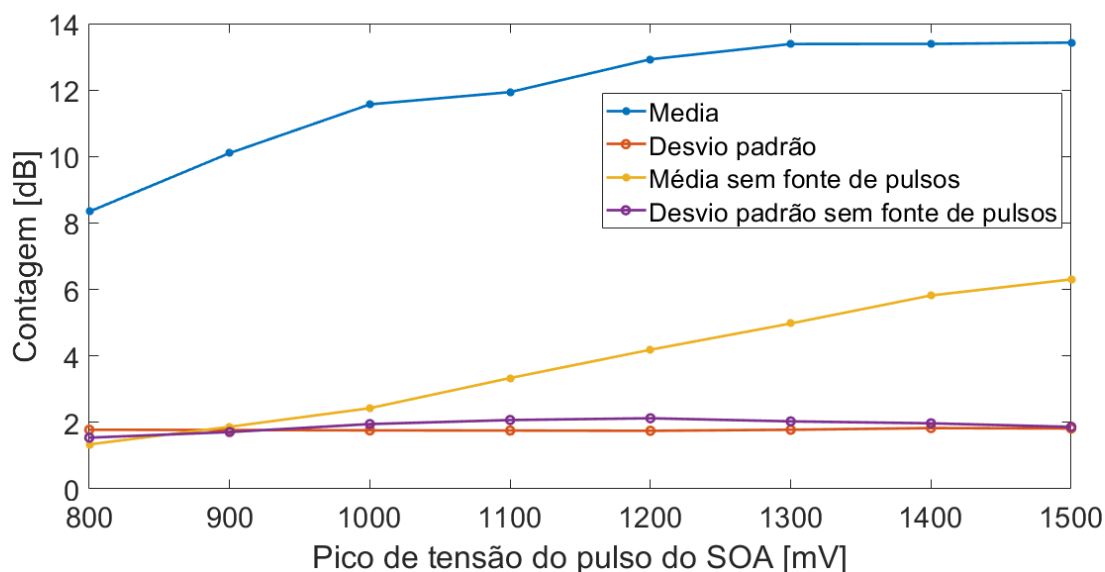


Figura 20: Média e desvio padrão de contagens com e sem o sistema Mode-Locked em função da amplitude do pulso do SOA.

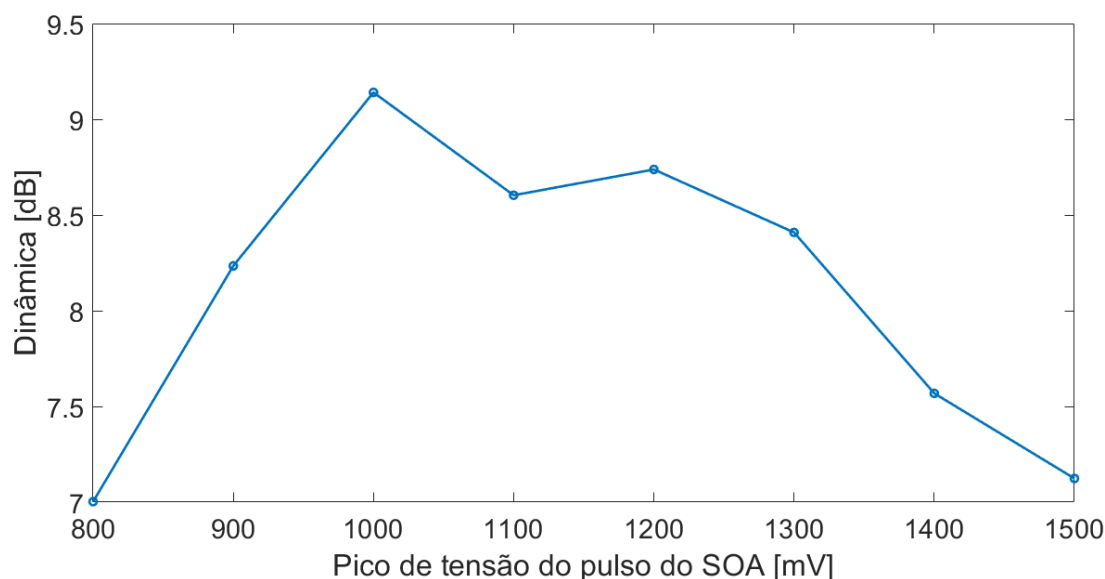


Figura 21: Dinâmica em função da amplitude do pulso do SOA.

Com o intuito de calcular a dinâmica, foi necessário medir o ruído. Esta foi implementada, desligando a fonte de pulsos Mode-Locked, ou seja, apenas a ASE do SOA é utilizada, como nas primeiras medidas. Assim obteve-se o resultado apresentado na figura 20. Importante ressaltar que a medida

de tensão apresentada refere-se à saída de monitoramento do AVTECH, que representa apenas uma fração da real amplitude [13].

De posse dos resultados anteriores, calcula-se a diferença entre a média de contagens com e sem o sistema de pulsos Mode-locked, logo, obtendo a dinâmica em função da amplitude do pulso do SOA, figura 21. Não foi alcançada a dinâmica teórica, devido ao tempo de duração das medidas, 6 minutos. Por isso, um dos próximos passos para este projeto é averiguar qual o tempo mínimo para atingir a melhor dinâmica.

Apesar disso, a partir deste último resultado, já é possível concluir uma melhoria para o sistema. Pois, observa-se que ao passo que a amplitude do pulso aplicado no SOA aumenta, as contagens também aumentam. Entretanto, a SNR é prejudicada. Com isso, nota-se que o máximo de dinâmica é obtido, com a amplitude do pulso de 1 V.

5 Conclusões & Trabalhos Futuros

Implementar o sistema foi de grande aprendizado, pois a cada problema encontrado, não foram medidos esforços para solucioná-los. Ao término deste trabalho, alcançou-se a maioria dos objetivos setados. O sistema de OTDR por contagem de fótons, que estava desligado há mais de um ano, foi religado com sucesso. Ademais, foi possível encontrar a amplitude do pulso aplicado no SOA que resulta na melhor dinâmica. Entretanto, ainda faltam algumas metas a serem atingidas.

Portanto, nos trabalhos futuros pretende-se estudar o tempo de medida, a fim de encontrar a mínima duração para a qual a dinâmica atinge seu valor máximo, semelhante ao que fora feito na figura 19, porém com os pulsos ópticos amplificados. Em seguida, tirar novas medidas avaliando o pulso do SOA. Não obstante, é essencial que o sistema alcance uma dinâmica de aproximadamente 17 dB [11], ou seja, seu máximo. Por fim, o sistema ótimo será utilizado para medir diferentes enlaces.

Referências

- [1] B. E. A. Saleh and M. C. Teich, *Fundamentals of Photonics*. John Wiley & Sons, 1991.
- [2] M. Jacoby, "As telecom demands grow, optical fibers will need to level up," *Chemical & Engineering News*, 2021. [Online]. Available: <https://cen.acs.org/materials/photronics/telecom-demands-grow-optical-fibers/98/i10>
- [3] D. Derickson, *Fiber Optic - Test and Measurement*. Prentice Hall, 1998.
- [4] G. P. AGRAWAL, *Fiber-Optic Communication Systems*, 3rd ed. John Wiley & Sons, 2002.
- [5] J. P. von der Weid, R. Passy, G. Mussi, and N. Gisin, "On the characterization of optical fiber network components with optical frequency domain reflectometry," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 15, no. 7, pp. 1131–1141, Jul 1997.
- [6] S. Liehr, N. Nother, and K. Krebber, "Incoherent optical frequency domain reflectometry and distributed strain detection in polymer optical fibers," *Measurement Science and Technology*, vol. 21, pp. 1–4, 2010.
- [7] F. Calliari, "Automatic high-dynamic and high-resolution photon counting otdr for optical fiber network monitoring," Master's thesis, PUC-Rio, 2017.
- [8] G. C. do Amaral, "Fpga applications on single photon detection systems," Master's thesis, PUC-Rio, 2014.
- [9] L. E. Y. Herrera, "Reflectometria óptica de alta resolução por contagem de fótons," Ph.D. dissertation, PUC-Rio, 2015.
- [10] P. Eraerds, M. Legré, J. Zhang, H. Zbinden, and N. Gisin, "Photon counting otdr: Advantages and limitations," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 28, no. 6, pp. 952–964, 2010.
- [11] F. Calliari, M. M. Correia, G. P. Temporão, G. C. Amaral, and J. P. von der Weid, "Fast acquisition tunable high-resolution photon-counting otdr," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 38, no. 16, pp. 4572–4579, August 2015.
- [12] J. M. Senior and M. Y. Jamro, *Optical Fiber Communications: Principles and Practice*, 3rd ed. Pearson Education, 2009.
- [13] "Avm series - pulse generators with ultra-fast rise times," Avtech Electrosystems Ltd, Specifications Sheet, 2016.
- [14] "Dg645 digital delay generator: User manual," Stanford Research Systems, Specifications Sheet, 2008.
- [15] "Infrared single-photon counting system," ID Quantique, Specifications Sheet, 2014.