

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

Relatório de Estágio Integrado

**BrPhotonics - Testes em Dispositivos Fotônicos para
Sistemas de Comunicação**

Alexsandro Ferreira de Barros Júnior

Campina Grande - PB

Julho de 2020

Alexsandro Ferreira de Barros Júnior

BrPhotonics - Testes em Dispositivos Fotônicos para Sistemas de Comunicação

Relatório de Estágio Integrado submetido à
Coordenação de Graduação em Engenharia
Elétrica da Universidade Federal de Campina
Grande como parte dos requisitos necessá-
rios para a obtenção do grau de Engenheiro
Eletricista.

Área de Concentração: Controle e Automação
Universidade Federal de Campina Grande - UFCG
Centro de Engenharia Elétrica e Informática - CEEI
Departamento de Engenharia Elétrica - DEE
Coordenação de Graduação em Engenharia Elétrica - CGEE

Rafael Bezerra Correia Lima, D.Sc.

(Orientador)

Campina Grande - PB

Julho de 2020

Alexsandro Ferreira de Barros Júnior

BrPhotonics - Testes em Dispositivos Fotônicos para Sistemas de Comunicação

*Relatório de Estágio Integrado submetido à
Coordenação de Graduação em Engenharia
Elétrica da Universidade Federal de Campina
Grande como parte dos requisitos necessários
para a obtenção do grau de Engenheiro Ele-
tricista.*

Aprovado em ____ / ____ / ____

Professor Avaliador

Universidade Federal de Campina Grande
Avaliador

Rafael Bezerra Correia Lima

Universidade Federal de Campina Grande
Orientador

Campina Grande - PB

Julho de 2020

Agradecimentos

Agradeço primeiramente aos meus pais, Elzeli e Alexsandro, a minha família e aos meus amigos, esse trabalho só existe pela confiança que me passaram e por todo o apoio dado.

Agradeço a Felipe Fidéles e Juliano Oliveira pela oportunidade, ensinamentos e apoio ao longo do estágio. E também a toda a equipe de Fotônica e Engenharia de Produto, em especial a Luís, Diogo, Amauri, Ricardo, Fátima, Leandro, Lucas, Vinícius Oliveira, Vinícius Cruz, Filipe Vidal, Breno, Machado, Felipe Santos e Jonyelison, por todo o aprendizado e colaboração ao longo desses meses. Sinto-me muito afortunado por ter feito parte deste time. Fé em Deus e pé na tábua.

Agradeço também aos amigos e colegas da UFCG que me receberam tão bem em Campinas-SP e tornaram essa experiência muito mais fácil e divertida.

Agradeço ao professor Rafael Bezerra pela orientação no estágio, trabalho de conclusão de curso e pelo suporte ao longo da graduação.

Por fim ao coordenador da graduação, professor Gutemberg Gonçalves e aos funcionários do DEE, em especial Adail e Tchai, que sempre se dispuseram a ajudar durante todos os processos necessários para conclusão do curso.

*“Laser lights all around me when I get the chance to get my groove on”
(Rex Orange County)*

Resumo

Esse trabalho apresenta as principais atividades desenvolvidas durante o estágio na BrPhotonics, realizado de março a julho de 2020. As atividades estão inseridas no âmbito dos projetos de Produção em larga escala e Pesquisa e Desenvolvimento (PD) nos setores de Engenharia de Produto e Fotônica da empresa. Neste relatório destacam-se os estudos teóricos realizados sobre sistemas de comunicações ópticas, como também o desenvolvimento de testes automatizados para lasers sintonizáveis de cavidade externa.

Palavras-chave: Comunicações Ópticas, Laser Sintonizável, Testes Automatizados.

Abstract

This work presents the main activities developed during the internship at BrPhotonics, held from March to July 2020. The activities are part of the Mass Production and Research and Development (RD) projects in the company's Product Engineering and Photonics divisions. In this report, the theoretical studies carried out on optical communications systems are highlighted, as well as the development of automated tests for external cavity tunable laser.

Keywords: Optical Communications, Tunable Laser, Automated Testing.

Lista de ilustrações

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Algumas Instalações Técnicas: (a) <i>Active Optical Aligner</i> (b) Estação de Caracterização de Gain Chips (c) <i>Wire Bonder</i> | 2 |
| Figura 2 – Empresas parceiras da BrPhotonics: (a) IPG Photonics (b) CPqD (c) Idea! (d) Eldorado (e) Menara Networks (f) PiTec | 2 |
| Figura 3 – Diagrama de blocos de um sistema de comunicação óptica | 4 |
| Figura 4 – Geometria de uma fibra óptica | 5 |
| Figura 5 – Atenuação da fibra monomodo em função do comprimento de onda | 7 |
| Figura 6 – Diagrama de blocos de um Transmissor Óptico | 7 |
| Figura 7 – Diagrama de blocos de um Receptor Óptico | 8 |
| Figura 8 – Diagrama de blocos de um Laser Sintonizável Genérico | 9 |
| Figura 9 – Relação entre o Espectro Óptico e cada Elemento do Laser | 10 |
| Figura 10 – Plataforma de Testes: Placa de Teste e Medidor de Potência Óptica | 12 |
| Figura 11 – Equipamentos do laboratório: (a) OSA Yokogawa AQ6370D (b) WM Bristol 228 Series (c) Câmara Climática Voestch VT4002 (d) Medidor de Potência Óptica Thorlabs PM100D (e) Microscópio de Fibra Óptica | 12 |
| Figura 12 – Fluxo de Produção e Testes - BrPhotonics | 13 |
| Figura 13 – Testes Básicos - (a) <i>Drivers</i> de Corrente e (b) Controle de Temperatura em Elementos do Laser | 14 |
| Figura 14 – Testes Básicos - (a) Similaridade do Fotodiodo e (b) Corrente de Limiar do Circuito de Ganho | 15 |
| Figura 15 – Testes Básicos - Teste de Potência Máxima | 15 |
| Figura 16 – Testes de Calibração - Calibração da fase da cavidade | 16 |
| Figura 17 – Testes de Calibração - Mapa de Varredura | 17 |
| Figura 18 – Testes de Calibração - (a) Ganho do Fotodiodo e (b) Compensador de Temperatura | 18 |
| Figura 19 – Testes de Performance - Rampa de Temperatura, (a) Potência e (b) Frequência | 18 |
| Figura 20 – Testes de Performance - Validação | 19 |
| Figura 21 – Relatório de Testes - Versão do Cliente | 20 |
| Figura 22 – Histograma da Corrente de <i>Gain Chip</i> para 16 dBm | 21 |
| Figura 23 – Bancada de Testes com Módulos Ópticos | 22 |
| Figura 24 – Resultado do teste: Ganho de 10 dB de potência do sinal de entrada acoplado ao amplificador | 22 |
| Figura 25 – Resultado do teste: Sensibilidade da BER em relação à potência do sinal de entrada | 23 |

Lista de abreviaturas e siglas

| | |
|-------|--|
| ASE | <i>Amplified Emission Spontaneous</i> |
| ASIC | <i>Application-Specific Integrated Circuit</i> |
| BER | <i>Bit Error Rate</i> |
| DSP | <i>Digital Signal Processor</i> |
| ECTL | <i>External Cavity Tunable Diode Lasers</i> |
| EDFA | <i>Erbium Dopped Fiber Amplifier</i> |
| GPIB | <i>General Purpose Interface Bus</i> |
| ITU | <i>International Telecommunication Union</i> |
| LED | <i>Light-Emitting Diode</i> |
| OIF | <i>Optical Internetworking Forum</i> |
| ONU | Organização das Nações Unidas |
| OSA | <i>Optical Spectrum Analyzer</i> |
| SMSR | <i>Side-Mode Suppression Ratio</i> |
| TEC | <i>Thermo Electrical Cooler</i> |
| WM | <i>Wavelength Meter</i> |
| YEDFA | <i>Erbium and Ytterbium Dopped Fiber Amplifier</i> |

Sumário

| | | |
|------------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 | BrPhotonics Produtos Optoeletrônicos S/A | 1 |
| 1.2 | Objetivos Gerais | 3 |
| 1.2.1 | Objetivos Específicos | 3 |
| 1.3 | Organização do Trabalho | 3 |
| 2 | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 4 |
| 2.1 | Sistemas de Comunicações Ópticas | 4 |
| 2.2 | Canal Óptico | 5 |
| 2.2.1 | Fibra Óptica | 5 |
| 2.2.2 | Atenuação no Canal | 6 |
| 2.3 | Transmissor Óptico | 6 |
| 2.4 | Receptor Óptico | 8 |
| 2.5 | Laser Sintonizável de Cavidade Externa | 8 |
| 2.5.1 | Regulamentação | 10 |
| 3 | ATIVIDADES DESENVOLVIDAS | 11 |
| 3.1 | Treinamento | 11 |
| 3.2 | Testes de Laser Sintonizável | 13 |
| 3.2.1 | Testes Básicos | 13 |
| 3.2.2 | Testes de Calibração | 16 |
| 3.2.3 | Testes de Performance | 17 |
| 3.2.4 | Relatórios de Testes | 19 |
| 3.3 | Testes em Amplificadores e Módulos | 21 |
| 3.3.1 | Testes de Potência | 21 |
| 3.3.2 | Testes de Sensibilidade | 23 |
| 4 | CONCLUSÃO | 24 |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 25 |

1 Introdução

1.1 BrPhotonics Produtos Optoeletrônicos S/A

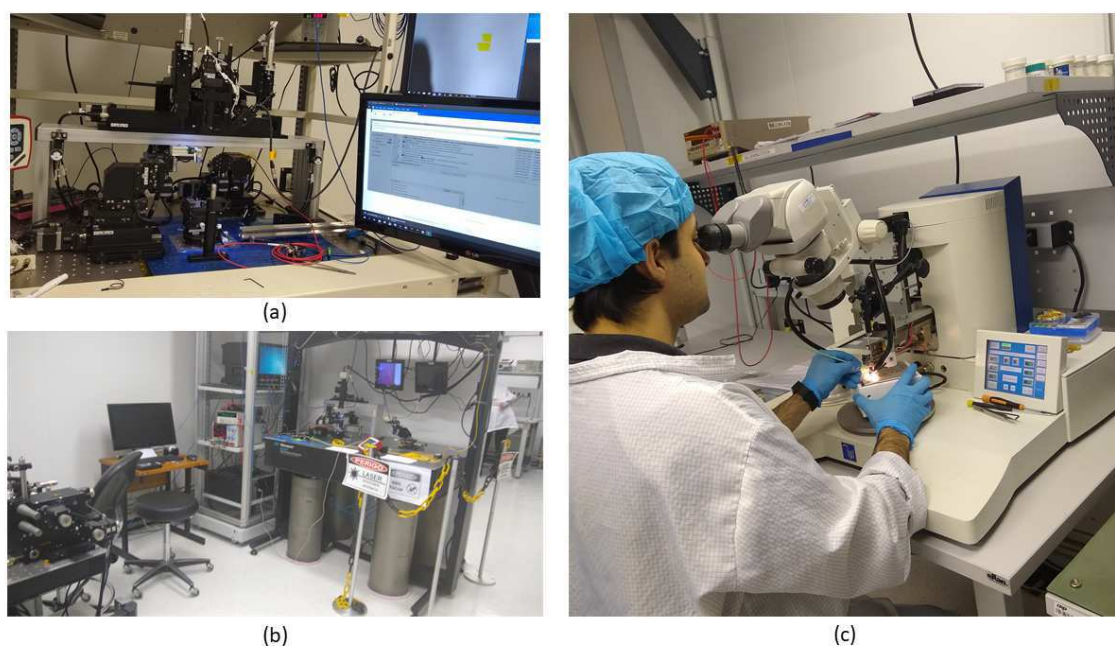
A BrPhotonics Produtos Optoeletrônicos S/A é uma empresa privada especializada no domínio da produção de dispositivos para comunicações ópticas e localizada em Campinas - SP. Sua história iniciou no ano de 2014, onde em parceria com o CPQD e a GigOptix quando inaugurou as instalações industriais para alinhamento de componentes fotônicos em salas limpas de classe 100 e 10.000. Com capacidade para produzir cerca de 1000 unidades de *chipsets* fotônicos por mês, no ano de 2018 foi anunciado o fechamento da produção e conseqüentemente da empresa. Porém, em março de 2020 as instalações foram reabertas como foco na produção em massa de lasers sintonizáveis de cavidade externa. Agora a BrPhotonics faz parte de um grupo de empresas com Idea! e Pi-Tecnologia, que tem como presidente Júlio César Oliveira, ex-presidente e fundador da BrPhotonics em 2014.

Atualmente sua principal solução para o mercado são lasers personalizados para telecomunicações (baixa largura de linha) para módulos de transmissão. Sendo assim, seu trabalho agrega no campo do tráfego da informação digital, de maneira que seus produtos, ao contribuírem com os avanços na geração e transporte de dados, colaborem direta e indiretamente com o atendimento à demanda crescente do consumo de informação digital. Tais avanços estimulam o que há de mais novo e inovador na sociedade atual, como *Smart Business*, *Internet of Things* (IoT), aplicações em *Data Science*, Processamento de Dados em Experimento de Alta Complexidade (e.g. Colisão de Partículas), *Streaming*, *Cloud Computing* e etc.

A Figura 1 exibe algumas das bancadas e estações presentes na empresa para caracterização, alinhamento óptico, calibrações e testes, além de validações do seu produto. A empresa conta com equipamentos de ponta para garantir o desenvolvimento de produtos da mais alta qualidade tecnológica.

Como pode ser visto na Figura 2, a BrPhotonics possui uma rede de colaboradores de mais de 120 pessoas, entre internos e externos, que estão divididos entre departamentos técnicos e administrativos. A empresa é organizada em dois setores, *Packaging* Fotônico e Engenharia de Testes, sendo a última, a divisão na qual o autor está inserido. O principal objetivo do setor de Engenharia de Testes é convergir eletrônica e fotônica em dispositivos ópticos para comunicação.

Figura 1 – Algumas Instalações Técnicas: (a) *Active Optical Aligner* (b) Estação de Caracterização de Gain Chips (c) *Wire Bonder*



Fonte: Elaboração Própria

Figura 2 – Empresas parceiras da BrPhotonics: (a) IPG Photonics (b) CPqD (c) Idea! (d) Eldorado (e) Menara Networks (f) PiTec



Fonte: Elaboração Própria

1.2 Objetivos Gerais

Este relatório de estágio tem como objetivo geral apresentar as atividades desenvolvidas na empresa BrPhotonics no setor de Engenharia de Testes durante o período de Março de 2020 até Julho de 2020.

1.2.1 Objetivos Específicos

- Compreender o funcionamento óptico e sistêmico dos principais blocos que compõem dispositivos ópticos integrados para comunicação de alta capacidade (Laser Sintonizável).
- Compreender o processo e o uso de ferramentas para testes automatizados em dispositivos ópticos.
- Desenvolver *scripts* de testes automatizados por meio do controle e automação de equipamentos utilizando linguagem Python.
- Otimizar o procedimento de testes básicos e calibração em lasers sintonizáveis.
- Implementar relatórios automatizados com os resultados dos testes feitos em todas as unidades montadas.
- Testar unidades de amplificadores ópticos e módulos de comunicação utilizando testes automatizados em Python.

1.3 Organização do Trabalho

Além deste capítulo, o trabalho está organizado da seguinte forma:

- Capítulo 2: Fundamentação Teórica. Neste capítulo são apresentados os conceitos relevantes para o entedimento do trabalho.
- Capítulo 3: Atividades Desenvolvidas. Neste capítulo são apresentadas as principais atividades desenvolvidas durante o estágio.
- Capítulo 4: Conclusão. Aqui são apresentadas as conclusões do trabalho.

Ao fim do documento são apresentadas as referências.

2 Fundamentação Teórica

Neste capítulo são descritos os conceitos de sistemas de comunicações ópticas e lasers sintonizáveis de cavidade externa que foram utilizados no decorrer do estágio.

2.1 Sistemas de Comunicações Ópticas

Um sistema de comunicação transmite informações de um lugar para outro, seja separados por alguns quilômetros ou por distâncias transoceânicas. A informação transmitida é frequentemente transportada por uma onda portadora eletromagnética cuja frequência pode variar de alguns megahertz a várias centenas de terahertz. Os sistemas de comunicações ópticas usam portadoras de alta frequência - na faixa de 100 THz - entre a região visível e infravermelho do espectro eletromagnético. O sistema pode ser dividido em três partes, sendo elas transmissor óptico, canal de comunicação e receptor óptico, representados no diagrama de blocos da Figura 3.

Figura 3 – Diagrama de blocos de um sistema de comunicação óptica



Fonte: Elaboração Própria

O transmissor óptico tem como objetivo criar o sinal óptico de informação a partir e enviá-lo ao canal de comunicação. Usando formatos de constelação específicos para a modulação, o mapeador de símbolos realiza a codificação dos dados de entrada. E para gerar os sinais elétricos modulantes, utiliza-se um filtro com o intuito de formar os pulsos que representam os símbolos mapeados. Tais sinais são enviados a um modulador óptico, onde são utilizados para imprimir a informação a ser transmitida em uma portadora óptica proveniente de uma determinada fonte óptica. Por fim, os sinais são lançados no canal de comunicação (BARBOSA, 2017).

Antes de chegar ao destino, o sinal transmitido se propaga por um meio, que no caso das comunicações ópticas é a fibra óptica e alguns outros componentes adicionais de comunicação. Existem perdas ao longo do caminho devido a efeitos dispersivos e atenuantes que acabam corrompendo o sinal recebido, fazendo com que ele não seja idêntico ao sinal enviado (LIMA, 2015).

Por fim, o receptor óptico tem como objetivo recuperar a informação que foi

distorcida ao longo do canal óptico e entregá-la ao seu destino, transformando a informação contida no domínio óptico em um sinal com as mesmas informações no domínio elétrico.

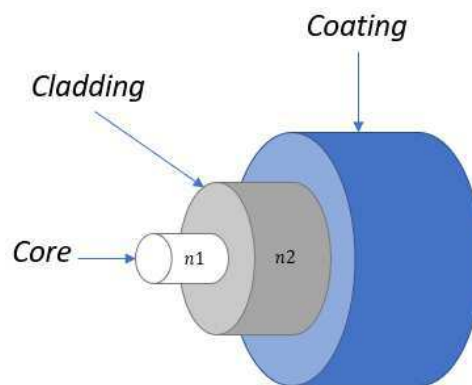
2.2 Canal Óptico

Os sistemas de comunicações ópticas são sistemas de ondas de luz que empregam fibras ópticas para transmissão de informações. No âmago destes sistemas estão cabos de fibra à base de vidro de sílica (SiO_2) de baixa perda. Tais sistemas foram implantados em todo o mundo desde 1980 e revolucionaram o campo das telecomunicações. De fato, a tecnologia da fotônica e comunicações ópticas, juntamente com a microeletrônica, levaram a o advento da "era da informação" que vivemos hoje (AGRAWAL, 2010).

2.2.1 Fibra Óptica

Uma fibra óptica é uma tecnologia associada à transmissão de informações como pulsos de luz ao longo de um fio dielétrico cilíndrico feito de materiais de baixa perda, como vidro de sílica. Tem um núcleo central (*core*) no qual a luz é guiada, embutida em um revestimento (*cladding*) de índice de refração ligeiramente inferior ($n_2 < n_1$) e uma camada para proteção externa (*coating*), como pode ser visto na Figura 4.

Figura 4 – Geometria de uma fibra óptica



Fonte: Elaboração Própria

Raios de luz que incidem sobre o revestimento do núcleo em ângulos maiores do que o ângulo crítico sofrem reflexão total e são guiados através do núcleo sem refração. Raios de maior inclinação para o eixo da fibra são atenuados pelo revestimento em cada reflexão e não são guiados (SALEH; TEICH, 1991).

As fibras ópticas utilizadas para comunicações a longa distância são chamadas de fibras monomodo. Nas fibras monomodo a luz possui apenas um modo de propagação, ou seja, a luz percorre interior do núcleo por apenas um caminho. A principal vantagem das

fibras monomodo é que não há dispersão intermodal porque a energia do pulso injetado é transportada por um único modo, no entanto, outros tipos de dispersão podem ocorrer. Na próxima seção serão discutidos os efeitos de atenuação e degradação na fibra monomodo.

2.2.2 Atenuação no Canal

Como dito anteriormente, os sistemas de comunicações ópticas estão sujeitos a efeitos de atenuação e degradação do sinal. Na Figura 5 a atenuação na fibra óptica em função do comprimento de onda é ilustrada, evidenciando-se as janelas de comunicação usualmente utilizadas. No passado, para comunicações de curtas distâncias – por possuir uma atenuação de 2 a 3 dB/km, que inviabiliza longas distâncias de transmissão – a primeira janela (800 a 900 nm) foi utilizada. A segunda janela, com comprimentos na faixa dos 1300 nm e atenuação de 0,4 dB/km, ainda possui algumas aplicações devido os baixos efeitos de dispersão nessa região – a dependência da frequência do atraso de grupo em fibras ópticas é denotada como dispersão cromática e causada pela dependência da frequência do índice de refração (dispersão do material) e pela orientação de onda dependente de frequência no núcleo de fibra e revestimento de fibra (dispersão de guia de onda) (SEIMETZ, 2009).

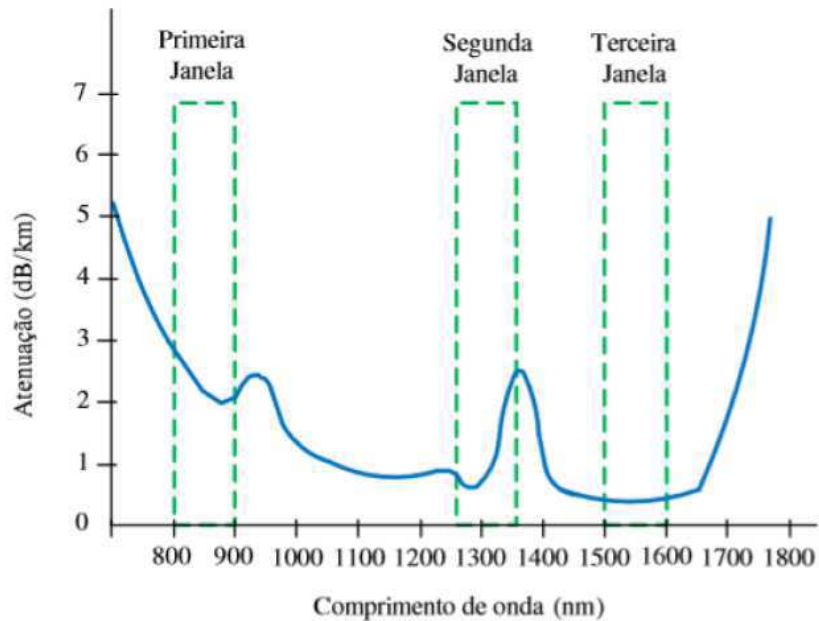
O espectro óptico onde a fibra apresenta menor atenuação é na região dos 1550 nm, numa largura de banda de aproximadamente 100 nm. Este espectro foi dividido em bandas de 30 a 50 nm, nomeadamente, banda S+ (1450 - 1480 nm), banda S (1480 - 1530 nm), banda C (1530 - 1570 nm), banda L (1570 - 1610 nm), e banda L+ (1610 - 1650 nm), para mais fácil referência (PEREIRA et al., 2002).

2.3 Transmissor Óptico

A portadora ideal para transmissão óptica é uma onda de luz com amplitude, frequência e fase constantes. No entanto essa portadora perfeita infelizmente não pode ser gerada na prática.

Uma das grandes revoluções na história dos sistemas de comunicação óptica foi o advento das técnicas de detecção coerente. Antes, os sistemas ópticos utilizavam formatos de modulação simples em que bits modulavam a intensidade de uma portadora óptica no transmissor e no receptor esses bits eram recuperados diretamente do sinal modulado por um fotodiodo. Com a detecção coerente todas as informações de um sinal óptico (amplitude, frequência, fase e polarização) são convertidas em um sinal elétrico e a aplicação de um processador digital de sinais (DSP) junto a esse tipo de detecção permite o uso de formatos avançados de modulação, reduzindo a complexidade de hardware óptico, e compensação digital de efeitos não lineares da fibra que degradam o sinal transmitido (MACEDO, 2012).

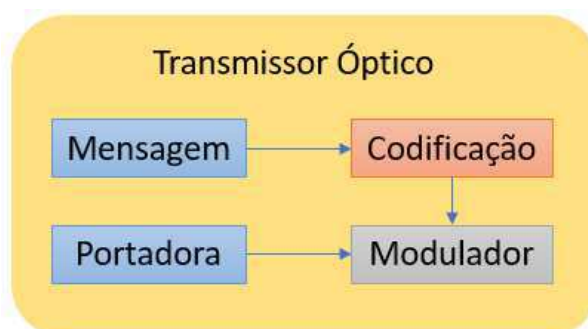
Figura 5 – Atenuação da fibra monomodo em função do comprimento de onda



Fonte: (LIMA, 2015)

O transmissor em um sistema de comunicações que utiliza a detecção coerente é composto de uma portadora óptica, um laser de onda contínua que é modulada por meio de bits de informação. Transmissores que utilizam formatos avançados de modulação são compostos de moduladores ópticos externos (SEIMETZ, 2009): modulador de fase (PM - *Phase Modulator*), Mach-Zehnder (MZM - *Mach-Zehnder Modulator*) e o modulador óptico IQM (*In-Phase Quadrature Modulator*). A Figura 6 mostra os elementos desse transmissor em um diagrama de blocos.

Figura 6 – Diagrama de blocos de um Transmissor Óptico



Fonte: Elaboração Própria

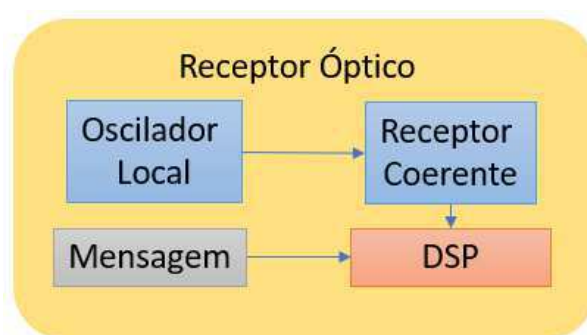
2.4 Receptor Óptico

Em muitos sistemas de telecomunicações, os receptores são baseados na detecção coerente, pois apresentam uma alta sensibilidade na recepção e, como é conhecido no rádio, podem selecionar um canal por meio de um pente de frequências, sintonizando o oscilador na frequência desejada. Na comunicação por fibra óptica, os sistemas coerentes foram um importante tópico de investigação no final dos anos 80 e início dos anos 90.

A detecção coerente de um sinal implica no batimento entre duas ondas, que representam em receptores ópticos, o sinal óptico recebido e o sinal de um laser oscilador local. A frequência de operação do oscilador local não necessariamente precisa ser igual à frequência central do sinal óptico de informação. Neste tipo de detecção, é possível recuperar todos os parâmetros da onda óptica recebida na forma de ondas elétricas: a amplitude, a fase e o estado de polarização (BARBOSA, 2017) (DINIZ, 2013).

O receptor é responsável por converter o sinal do domínio óptico para o domínio elétrico e o faz através do fotodetector. Um fotodetector é um dispositivo opto-eletrônico que converte a intensidade do sinal óptico recebido em corrente elétrica. Para compensar os efeitos adversos advindos da fibra óptica e do transceptor é utilizado um DSP. Na Figura 7 os elementos desse receptor podem ser vistos num diagrama de blocos.

Figura 7 – Diagrama de blocos de um Receptor Óptico



Fonte: Elaboração Própria

2.5 Laser Sintonizável de Cavidade Externa

Como evidenciado pelo seu nome, o LASER (do inglês *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) é um dispositivo que emite luz através de um processo de amplificação óptica baseado em emissões estimuladas de fótons. Os lasers de diodo semicondutor possuem características conhecidas, como: alta confiabilidade, tamanho reduzido, menor consumo de energia, maior capacidade de sincronização e alta eficiência. A luz emitida pelo laser é notável pelo seu grau de coerência espacial e temporal, ou

seja, uma boa parte dos fótons que compõem o feixe é gerada em fase e polarização bem definidas. Isto, aliado ao pequeno tamanho, faz com que os lasers de estado sólido sejam a melhor opção como fonte óptica em sistemas de comunicação desse tipo, principalmente a altas taxas de transmissão (DINIZ, 2013).

De lá para cá, muitos modelos de lasers à diodo já foram propostos, como os baseados em LED com larguras espectrais muito altas e baixas potências de saída; lasers multimodos de Fabry-Pérot com algumas linhas espectrais discretas e uma largura espectral ainda elevada; lasers monomodos *Distributed Feedback* (DFB); e, por fim, lasers de cavidades externas – *External Cavity Laser* (ECL) – com larguras de linha bem reduzidas (na região de sub-megahertz) e capacidade de sintonia em uma larga banda - sendo estes nomeados de *External Cavity Tunable Laser* (ECTL) (SEIMETZ, 2009).

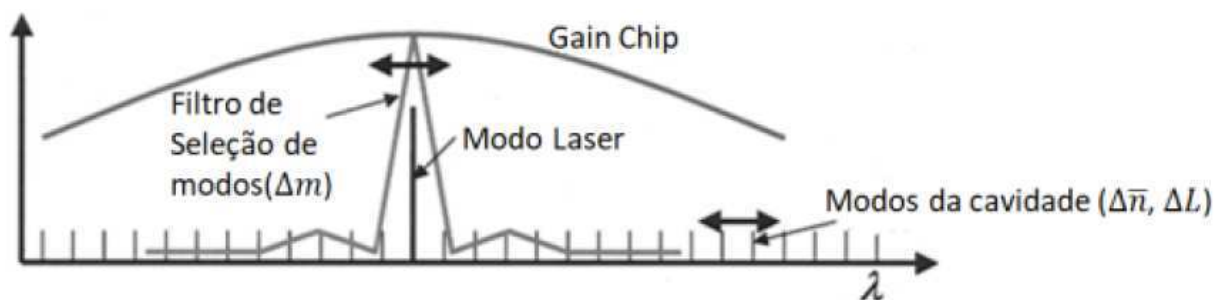
Na Figura 8 temos um diagrama de blocos inspirado no modelo apresentado por (COLDREN; FISH; AKULOYA, 2004), onde cada elemento representado pelos blocos é responsável por conferir alguma das características desejáveis em um ECTL. Na Figura 9, é ilustrada a resposta em frequência do conjunto de todos os elementos que compõem a cavidade, distinguindo qual característica do espectro óptico é alterada por cada elemento. Os modos da cavidade são dependentes do comprimento e do índice de refração efetivo da cavidade, determinado pela posição dos espelhos e pelo elemento de ajuste de fase da cavidade. O filtro de seleção de modo determina qual canal ocorrerá a ressonância do laser. Todos esses elementos são controláveis, de maneira que o laser sintonizável oferece uma excelente autonomia na sintonização de canais de comunicações ópticas.

Figura 8 – Diagrama de blocos de um Laser Sintonizável Genérico



Fonte: Elaboração Própria

Figura 9 – Relação entre o Espectro Óptico e cada Elemento do Laser



Fonte: Adaptado de (COLDREN; FISH; AKULOYA, 2004)

2.5.1 Regulamentação

Como estamos tratando com um processo de comunicação, ambos os lados devem conhecer o que será enviado e recebido. Para isso foram criados padrões de mercado pela União Internacional de Telecomunicações (ITU - *International Telecommunication Union*), uma agência especializada da ONU que é responsável por tratar de assuntos relacionados com tecnologias de informação e comunicação.

Com intuito de limitar a faixa de frequência, foi criada a ITU-T G.694.1 em 2012, que define a grade de frequência a ser utilizada em sistemas de comunicações. Essa grade de frequência para comunicações em fibra óptica é usada para espaçamento de canal em DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing*) com comprimentos de onda em torno de 1550 nm. A grade é definida em relação a 193,1 THz e se estende a partir de 191,7 THz a 196,1 THz com espaçamento de 100 GHz (ITU-T-G.694.1, 2012).

Para a especificação de lasers sintonizáveis existe o Contrato de Montagem de Lasers Sintonizáveis (*Integrable Tunable Laser Assembly Multi Source Agreement*) do Fórum de Internetworking Óptico (OIF - *Optical Internetworking Forum*). Este documento detalha informações como protocolo de comunicação, interface elétrica, fonte de alimentação, especificações ópticas e uma interface mecânica para uso em equipamentos de telecomunicações operando na banda C ou L (subdivisões da terceira janela) (OIF-ITLA-MSA-01.3, 2015).

3 Atividades Desenvolvidas

Neste capítulo serão descritas as atividades desenvolvidas pelo autor durante o período de estágio na empresa.

3.1 Treinamento

Durante o período inicial ocorreu a etapa de treinamento, responsável por fornecer conhecimento ao aluno sobre ferramentas necessárias para os trabalhos a serem desenvolvidos na empresa. Primeiramente, como já foi dito, houve um nivelamento teórico no campo das comunicações ópticas a fim de que o aluno compreendesse os projetos e produtos desenvolvidos na empresa. Após esta etapa, foram realizadas capacitações com as ferramentas de desenvolvimento utilizadas internamente na empresa, como sistemas de versionamento de *software*, linguagem de programação *Python*, aulas práticas sobre a operação dos lasers e a execução de testes, dentre outros. Tais capacitações contribuem ainda mais para a evolução profissional do aluno.

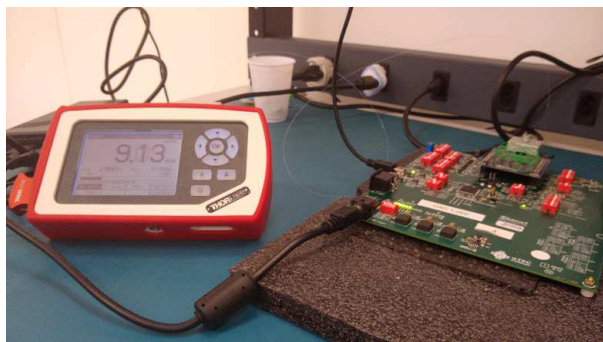
No estudo dos sistemas de comunicação óptica foram revisados alguns conhecimentos de telecomunicações, como modulação de sinais e formatação de pulso. Além disso, foram realizados estudos sobre sistemas ópticos de comunicação com detecção coerente, amplificadores ópticos a fibra dopada com érbio (EDFA - *Erbium-Doped Fiber Amplifier*), atenuações no canal óptico (perdas por dispersão cromática, dispersão dos modos de polarização e efeitos não lineares) e estudos sobre fibras ópticas.

O discernimento de tais conhecimentos serviu como base para a compreensão dos princípios físicos de funcionamento e operação dos lasers de diodo semicondutores. Além disso, o foco dos estudos voltou-se para os lasers sintonizáveis de cavidade externa, nos quais o funcionamento de cada elemento interno teve de ser estudado de forma independente a fim de tornar mais eficiente o entendimento das rotinas de testes.

Após essa etapa de estudo holístico, foram iniciados treinamentos voltados para os produtos e tecnologias internos da BrPhotonics. Em tais treinamentos foram apresentados os lasers, as placas de testes, os softwares e os equipamentos do laboratório. A Figura 10 ilustra a placa utilizada para realizar a comunicação com o laser para realização dos testes iniciais de qualificação da unidade. A placa denominada *Extended Evaluation Kit* (EVK) apresenta circuitos que possibilitam testar a *goldbox* isoladamente e simular a eletrônica do laser.

Outras capacitações também ocorreram, como instruções no Laboratório de Fotônica, que envolviam os diferentes tipos de conectores de fibras ópticas, seu manuseio e

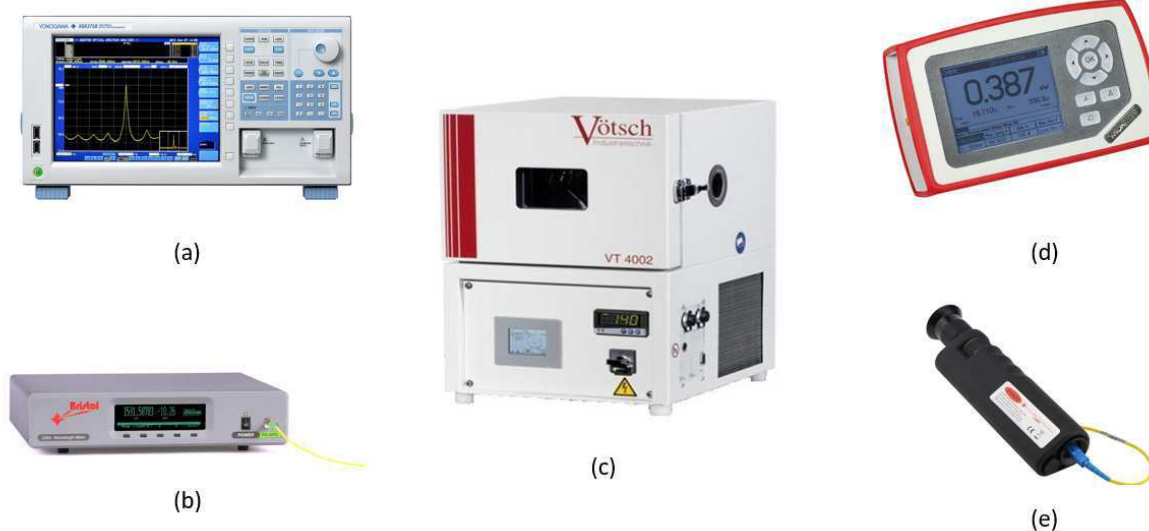
Figura 10 – Plataforma de Testes: Placa de Teste e Medidor de Potência Óptica



Fonte: Elaboração Própria

limpeza para correta utilização dos equipamentos de testes do laboratório. Também ocorreram treinamentos de como utilizar os equipamentos e ferramentas do laboratório, tais como microscópio de fibra óptica, analisador de comprimento de onda de precisão (WM), *Optical Spectrum Analyzer* (OSA), medidores de potência óptica, dentre outros. Esses equipamentos comunicam-se com as estações de trabalho por meio de protocolos GPIB, USB ou Ethernet. Aprender a utilizá-los remotamente também foi uma das etapas do treinamento. Tudo isso regido por instruções de boas práticas e procedimentos de segurança. Na Figura 11 podem ser vistos alguns dos equipamentos utilizados.

Figura 11 – Equipamentos do laboratório: (a) OSA Yokogawa AQ6370D (b) WM Bristol 228 Series (c) Câmara Climática Voetsch VT4002 (d) Medidor de Potência Óptica Thorlabs PM100D (e) Microscópio de Fibra Óptica



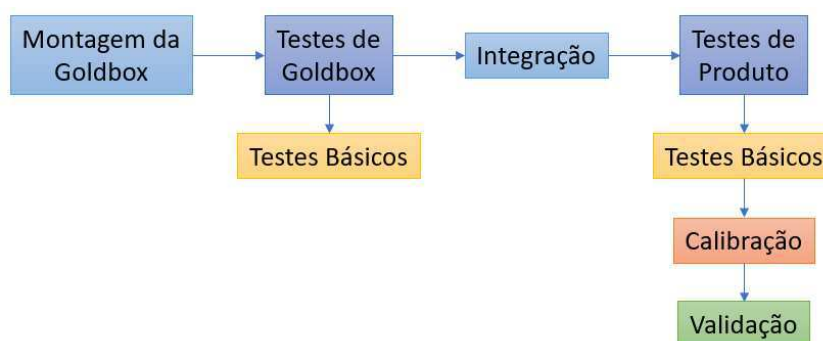
Fonte: Elaboração Própria

3.2 Testes de Laser Sintonizável

Para realização dos testes são usadas bibliotecas desenvolvidas durante o processo de desenvolvimento do produto na Idea! e BrPhotonics. Com essas bibliotecas conseguimos ter acesso a interfaces para comunicação com os lasers, equipamentos, assim como bibliotecas que definem testes que caracterizam os elementos do laser e calibram controladores necessários para o funcionamento em ambientes de operação. Como todos esses sistemas estão integrados pelas bibliotecas, torna-se possível a realização automática dos testes.

O fluxo de produção e testes da BrPhotonics segue uma ordem bem definida, como pode ser visto na Figura 12. Inicialmente, cada componente do produto final é testado isoladamente, *Goldbox*, que consiste na cápsula fabricada com elementos ópticos (defasador, filtro, fotodiodo, diodo laser e TEC) e a Eletrônica, com circuitos de *Drivers* de corrente e leitura de sinais elétricos, caso tudo esteja funcionando como esperado, seguem para a etapa de integração, onde os pinos da *Goldbox* são conectados nas conexões dos circuitos da Eletrônica.

Figura 12 – Fluxo de Produção e Testes - BrPhotonics



Fonte: Elaboração Própria

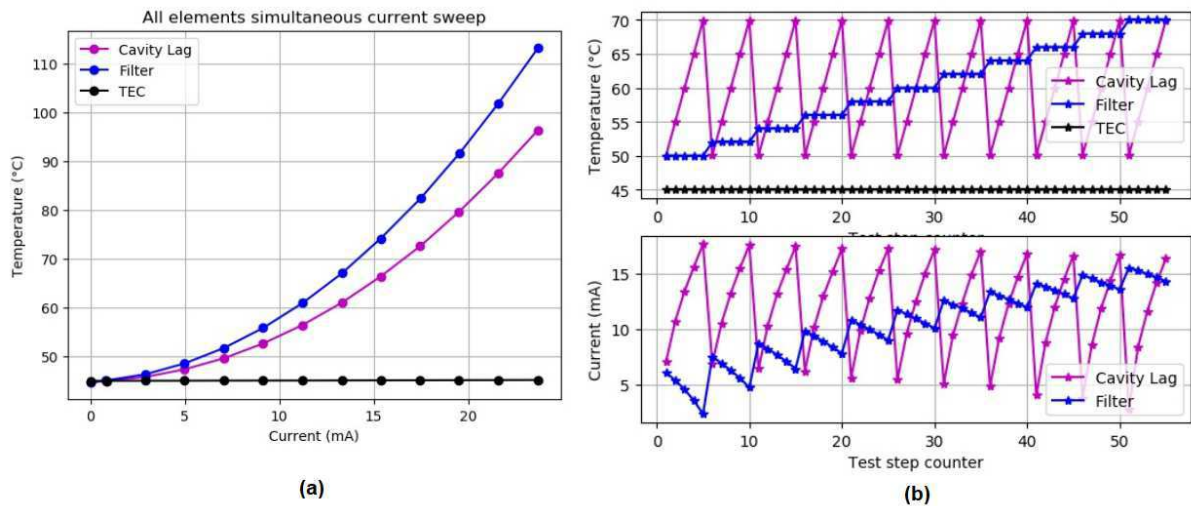
3.2.1 Testes Básicos

Para garantir o funcionamento dos elementos são realizados testes nos sensores e atuadores de corrente e temperatura dos filtros ópticos, do defasador de fase e do diodo laser. Para esses testes iniciais foi dado o nome de Testes Básicos e são realizados tanto na *goldbox* como no produto final.

Na Figura 13 temos resultados desses testes, onde TEC (*Thermo Electrical Cooler*) trata-se de uma célula de Peltier e está localizada abaixo da cavidade, para manter uma temperatura estável durante todo o funcionamento do laser em qualquer ambiente, facilitando o controle dos demais elementos. Nos testes de *Drivers* de Corrente, espera-se que os elementos consigam ultrapassar em pelo menos 30 °C da temperatura do TEC quando a corrente for 25 mA e o *crosstalk* térmico entre os elementos não seja muito elevado.

Já nos testes do controle de temperatura do filtro e do defasador, mantém-se um dos elementos em temperatura fixa enquanto no outro são realizados degraus de temperatura. Caso todos os controladores estejam funcionando corretamente, haverá uma compensação negativa na corrente por conta do *crosstalk* térmico, mantendo assim a temperatura do elemento controlado estável.

Figura 13 – Testes Básicos - (a) *Drivers* de Corrente e (b) Controle de Temperatura em Elementos do Laser



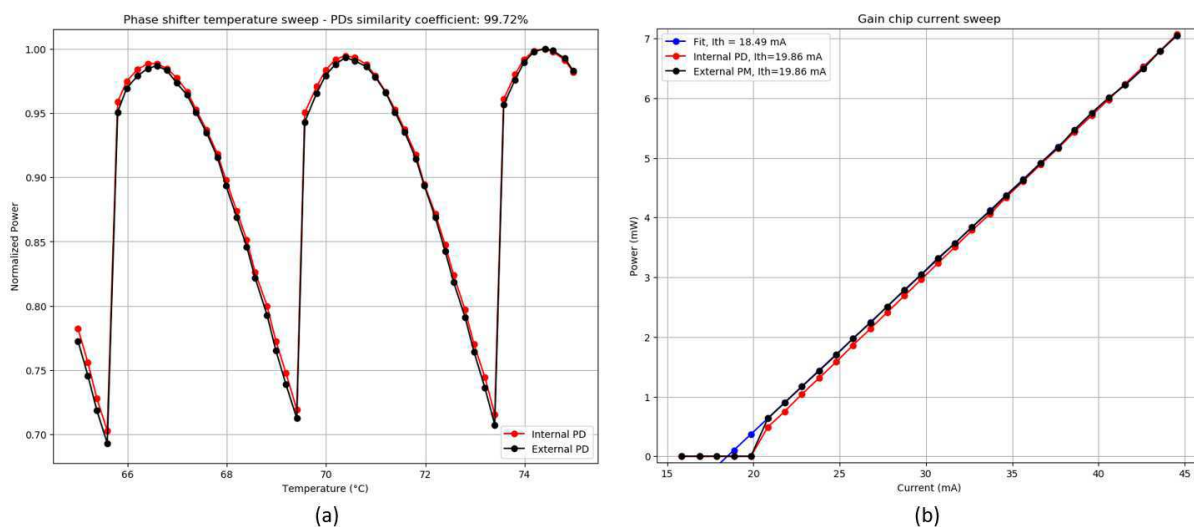
Fonte: Adaptado do *database* da BrPhotonics

Em seguida iniciamos os testes com potência óptica, verificando o funcionamento do fotodiodo, para isso, comparamos a curva de leitura do fotodiodo com a de um medidor de potência óptica externo utilizando uma técnica chamada Coeficiente de Determinação. Este coeficiente é a razão entre a soma de quadrados da regressão e a soma de quadrados totais, indicando uma medida descritiva da qualidade do ajuste obtido. No teste o resultado é mostrado em forma de porcentagem, para valores maiores que 95% de similaridade o teste é aprovado, que foi o caso do teste mostrado na Figura 14.

No teste de medição do limiar de corrente do chip de ganho, inicia-se com uma corrente de *gainchip* elevada e mede-se a potência de saída do laser, em seguida, essa corrente é reduzida em passos de 1 mA até que se encontre o ponto em que a potência de saída óptica inexistir. Com esse teste conseguimos caracterizar um desalinhamento entre os elementos, causando um aumento nas perdas internas. Na Figura 14 vemos que o valor está abaixo de 30 mA então o teste é aprovado.

Por último realizamos o teste de potência máxima da unidade produzida, para isso, fazemos uma varredura na corrente de *gainchip* com os elementos da cavidade devidamente alinhados para garantir a máxima potência de saída. Com esse teste conseguimos filtrar as unidades que não atingem a especificação de potência necessária para transmissão de

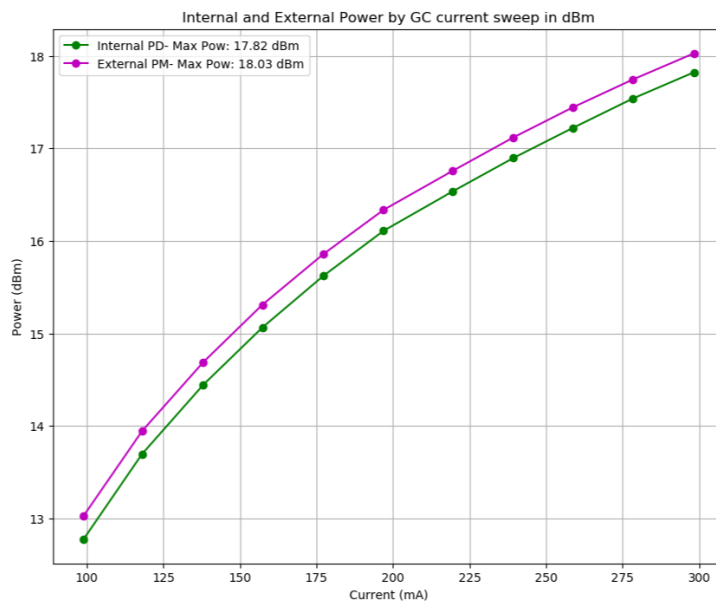
Figura 14 – Testes Básicos - (a) Similaridade do Fotodiodo e (b) Corrente de Limiar do Circuito de Ganho



Fonte: Adaptado do *database* da BrPhotonics

dados em fibra óptica. Na figura 15 vemos que o valor máximo de potência atingido com 300 mA de corrente foi de 18 dBm.

Figura 15 – Testes Básicos - Teste de Potência Máxima



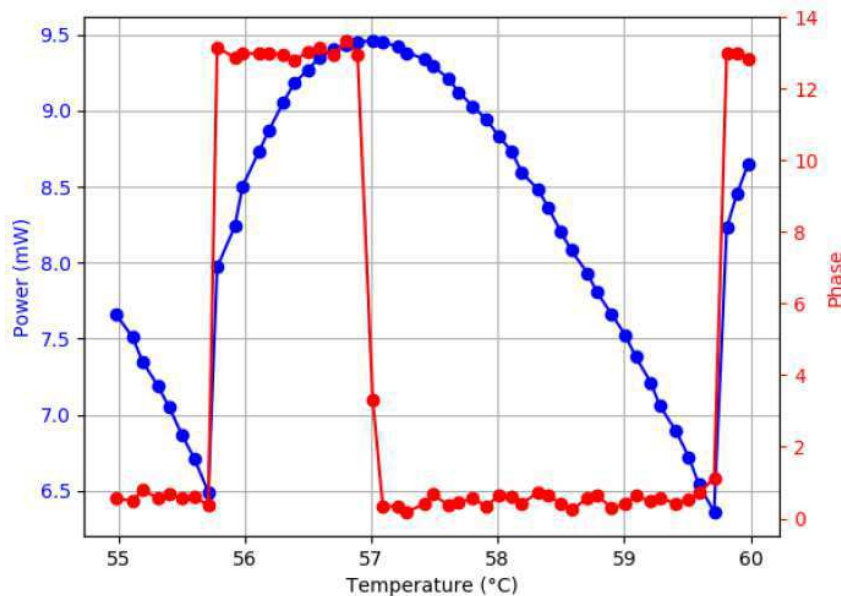
Fonte: Adaptado do *database* da BrPhotonics

3.2.2 Testes de Calibração

Para que o laser consiga ter um ótimo funcionamento em ambiente de operação, são necessárias etapas de calibração de parâmetros fundamentais para correção de efeitos de perda potência e erros de frequência, como amplitude e fase de oscilação, tabela de canais, essa que define as condições dos elementos do laser para ajuste nos canais da rede ITU, calibração do fotodiodo e compensadores de temperatura, assim com todos os parâmetros calibrados o laser consegue apresentar um funcionamento estável.

No primeiro teste é calculado o ajuste de fase para que o modo da cavidade tenha máxima potência. É utilizado um algoritmo de maximização da potência para ajustar a fase da cavidade de modo que o laser possa operar na frequência desejada com potência máxima. Na Figura 16 é possível notar que numa temperatura próxima de 57 °C do defasador, a potência é maximizada e isso gera um ajuste na fase de 13 passos (equivalente a 182°, pois cada passo vale 14°). Ao aplicarmos uma pequena oscilação no *setpoint* de temperatura de um dos elementos da cavidade externa, conseguimos observar que a amplitude da modulação será maior quando a cavidade estiver desalinhada e menor quando bem alinhada. Logo, o controlador busca o ponto em que a parte real do sinal demodulado seja minimizado, garantindo a máxima potência.

Figura 16 – Testes de Calibração - Calibração da fase da cavidade

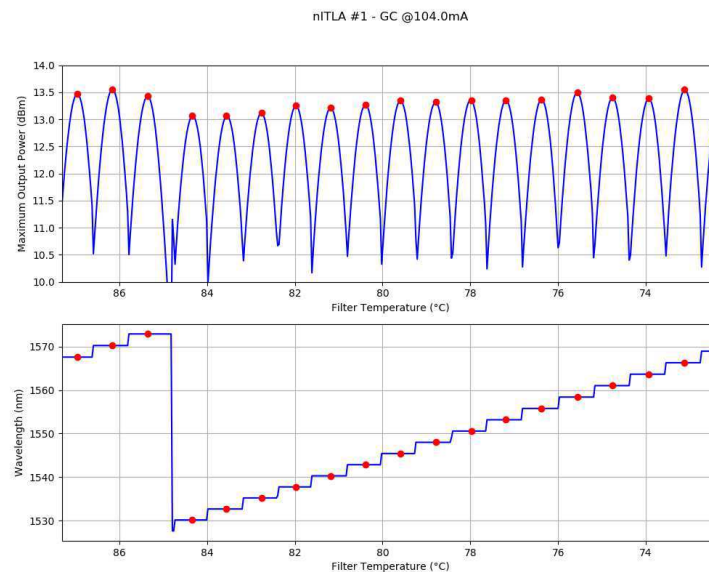


Fonte: Adaptado do *database* da BrPhotonics

Como dito previamente, uma das principais vantagens do uso de lasers de cavidade externa é a flexibilidade na sintonização desses lasers. Para que o laser opere em uma frequência específica com potência e SMSR alta é necessário casar os filtros corretamente. Para isso é realizado o teste de calibração chamado mapa de varredura, o qual estima

a faixa de comprimento de onda para um conjunto específico de parâmetros e mostra qual o comprimento de onda que o laser opera em frequências estabelecidas na tabela de canais da (ITU-T-G.694.1, 2012), seguindo o padrão comercial. Na Figura 17 temos o resultado de um mapa de varredura realizado em um laser η ITLA com 19 canais, os pontos em vermelho mostram as temperaturas do filtro que o laser opera com boa potência.

Figura 17 – Testes de Calibração - Mapa de Varredura



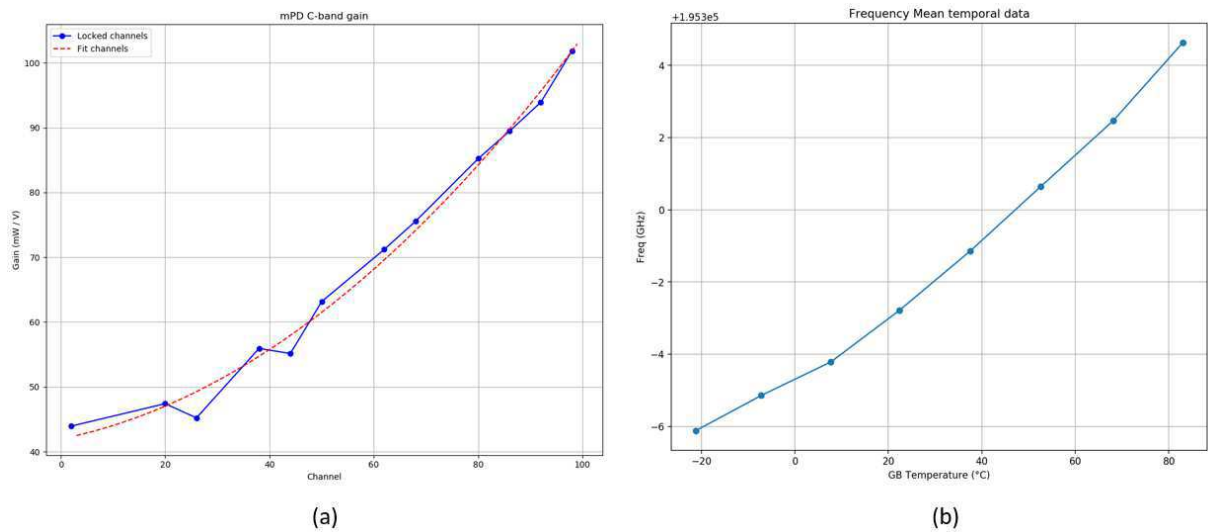
Fonte: Adaptado do *database* da BrPhotonics

Agora com os canais definidos podemos extrair os valores de ganhos necessários para que os valores de potência internos sejam similares as medições de potência de saída, para cada um desses comprimentos de onda. Já a calibração dos compensadores é necessária para estabilizar a frequência de saída enquanto a temperatura da *goldbox* varia no ambiente de operação, assim, a frequência de saída independe da temperatura. Para essa etapa usamos o medidor de comprimento e a câmara climática para simular condições extremas de temperatura. A Figura 18 ilustra os resultados da calibração da leitura de potência externa e do compensador de temperatura externa.

3.2.3 Testes de Performance

Os testes de performance visam avaliar como os lasers estão se comportando em regime de operação, isto é, são testes que têm como objetivo avaliar se o produto está operando dentro das especificações desejadas. Tais testes de desempenho são a última etapa do fluxo de testes e validam algumas características do laser, como potência de saída, frequência, estabilidade durante um período de tempo e temperatura.

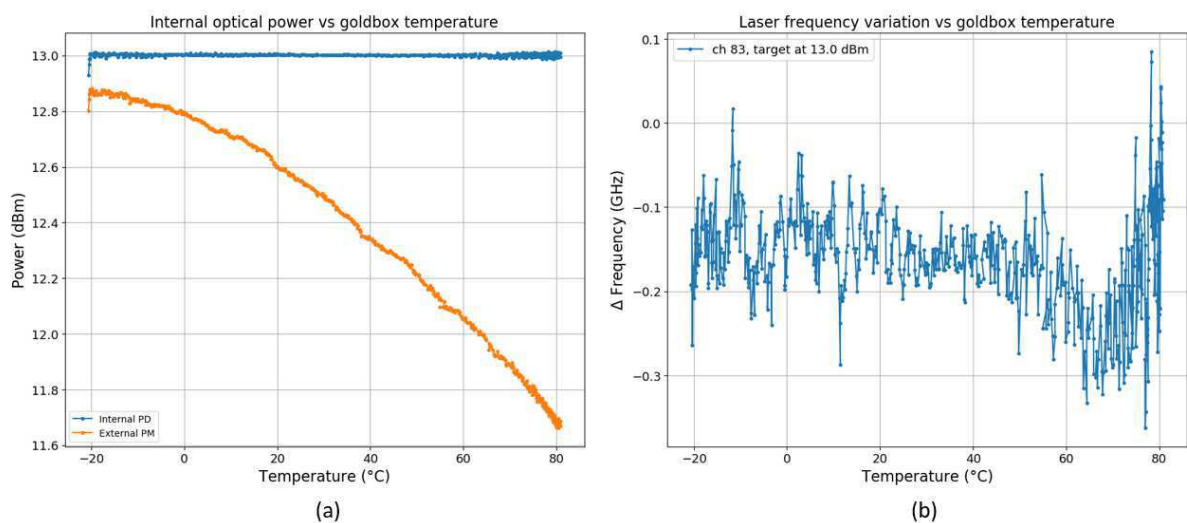
Figura 18 – Testes de Calibração - (a) Ganho do Fotodiodo e (b) Compensador de Temperatura



Fonte: Adaptado do *database* da BrPhotonics

O teste de rampa de temperatura almeja avaliar como estão se comportando todos os elementos internos a cavidade do laser, assim como a cavidade em si, sua potência de saída, frequência de saída e consumo de potência. O laser é posto dentro de uma câmara climática onde é estressado ao máximo a partir de rampas automáticas de temperatura com uma variação de pelo menos 4 °C por minuto. Na Figura 19 podemos ver o resultado de potência e frequência ao variarmos a temperatura do ambiente.

Figura 19 – Testes de Performance - Rampa de Temperatura, (a) Potência e (b) Frequência

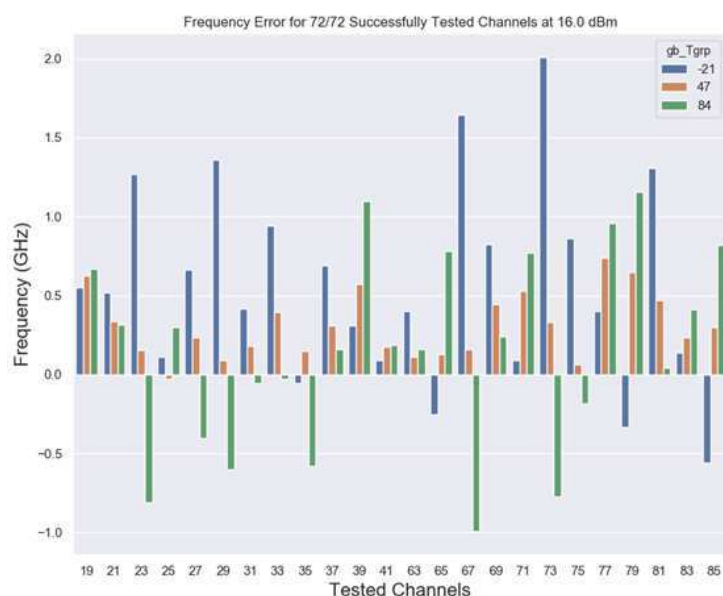


Fonte: Adaptado do *database* da BrPhotonics

O teste de desempenho mais rigoroso é chamado de validação. Esse teste simula a

operação nominal do laser em diferentes temperaturas de câmara, para diferentes potências de saída em diferentes canais simultaneamente alternados. Todos os dados do laser são capturados nesse teste, incluindo o tempo que o laser leva para sintonizar completamente um canal, variações de potência e frequência durante sua sintonia, erros de frequência e potência com relação aos *setpoints* dados, tempo exigido para os controladores convergirem, potência consumida e etc. A Figura 20 ilustra o erro de frequência para cada canal em diferentes temperaturas e o número de testes bem sucedidos com potência de 16 dBm.

Figura 20 – Testes de Performance - Validação



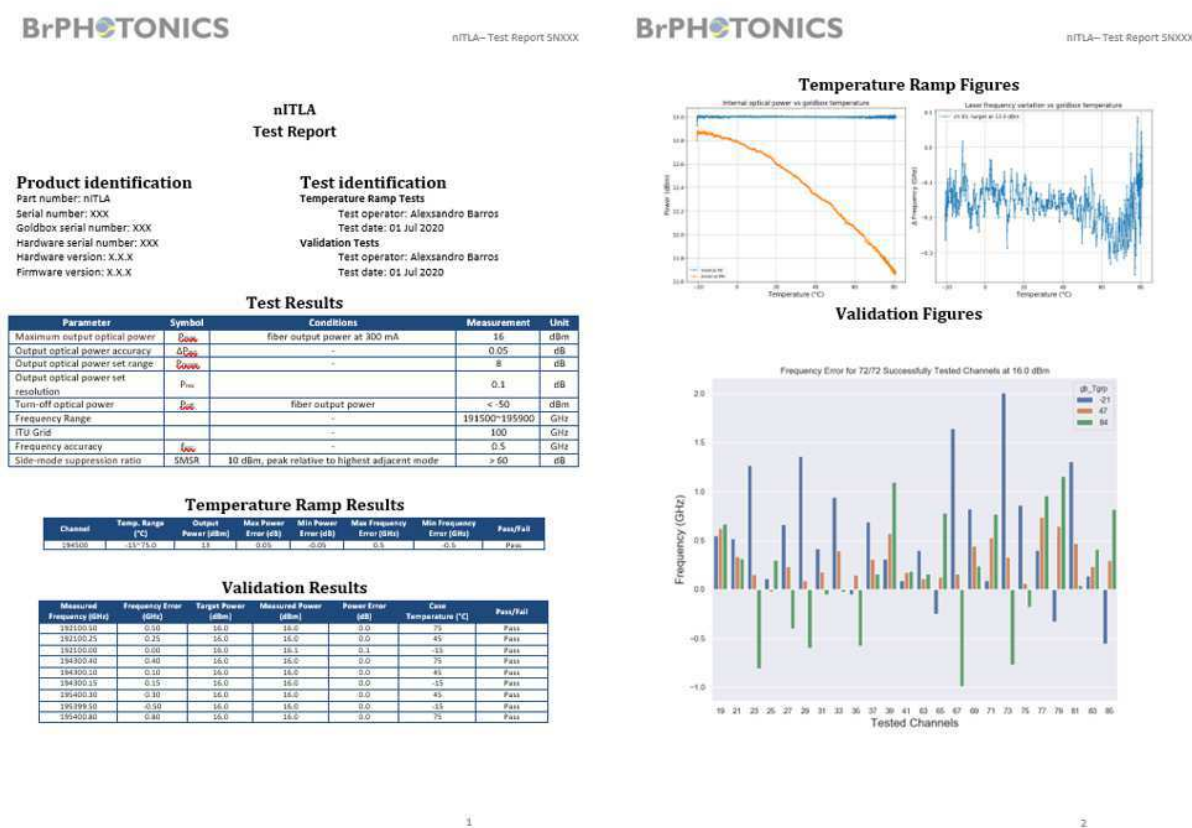
Fonte: Adaptado do *database* da BrPhotonics

3.2.4 Relatórios de Testes

Para realizar a entrega do produto finalizado é comum que empresas enviem um relatório com dados de funcionamento, comprovando que a especificação solicitada pelo cliente foi atendida e validada durante o processo de fabricação. Logo, para que isso fosse possível, de forma automatizada e utilizando a base de dados formada com os testes em *Python*, uma das atividades do estágio do autor foi a implementação do *script* para a geração automática do relatório de teste.

Utilizando de bibliotecas do *Python* para preenchimento de templates do Microsoft Word® e adição de imagens via código, foi possível gerar um arquivo em formato aberto, assim sendo passível de correções mesmo após o preenchimento dos dados pelo script. Na Figura 21 temos um exemplo de relatório gerado e que será enviado juntamente com o produto para o cliente, com resultados dos testes de performance realizados em temperaturas de extremo frio e calor, de acordo com a especificação do produto.

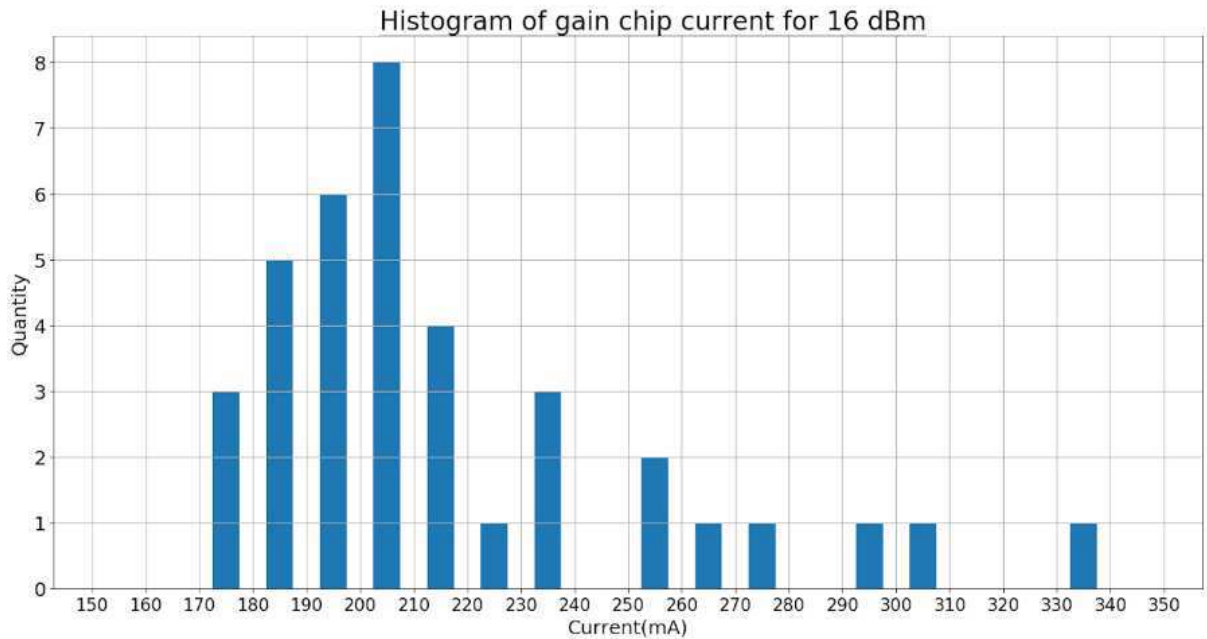
Figura 21 – Relatório de Testes - Versão do Cliente



Fonte: Adaptado do *database* da BrPhotonics

Com o levantamento dos dados da produção também foi possível gerar um relatório estatístico da qualidade das unidades produzidas, rendimento da produção, valores médios para características dos lasers, etc. Analisando um total de 50 unidades produzidas, obtemos que 39 apresentaram resultados satisfatórios para a especificação do produto, ou seja, um rendimento de 78%, com potência média de 17.5 dBm, corrente de limiar do circuito de ganho média de 23 mA e similaridade do fotodiodo com média de 99,45%. Dessas 50 unidades, 12 precisaram passar por retrabalho, onde 10 tiveram problemas encontrados previamente resolvidos antes mesmo da integração com a eletrônica, resultando em uma efetividade de 83,33% nos retrabalhos. Os problemas mais comuns encontrados são de desalinhamento do fotodiodo e perda de potência após o processo de selagem hermética.

Na Figura 22 podemos ver um gráfico de histograma que mostra a distribuição das unidades de *goldbox* em função da corrente de *gain chip* necessária para atingir uma potência de 16 dBm. Percebe-se que há uma distribuição com formato gaussiano e a maioria das unidades precisam de uma corrente entre 200 e 210 mA.

Figura 22 – Histograma da Corrente de *Gain Chip* para 16 dBm

Fonte: Adaptado do *database* da BrPhotonics

3.3 Testes em Amplificadores e Módulos

Devido aos resultados de sucesso obtidos na produção do laser η ITLA, foi testada a integração desse laser com um módulo óptico comercial. Nessa etapa uma das atividades do estágio foi realizar um estudo da inicialização do laser no módulo óptico, calibração de parâmetros do módulo e conexões para testes de transmissão.

Ao fim dessa atividade, com o módulo integrado, foram realizados testes de transmissão para qualificar que os sinais enviados pelo laser estavam sendo recebidos por outro módulo óptico. Na Figura 23 podemos ver a configuração montada no laboratório da Idea! para realização dos testes, utilizando OSA, PM e EVB para comunicação com os módulos.

3.3.1 Testes de Potência

Inicialmente foram feitos testes com EDFA (*Erbium Doped Fiber Amplifier*) e YEDFA (*Erbium and Ytterbium Doped Fiber Amplifier*) que são integrados ao módulo óptico, por possuírem diferentes elementos em suas composições, os amplificadores apresentam diferentes formatos de ASE no espectro óptico, variando o ganho na banda C. Para validar o funcionamento dos amplificadores nos canais utilizados no módulo óptico, analisamos o resultado da ASE produzida pelo laser de bombeio e caracterizamos o ganho que o amplificador irá proporcionar no sinal de transmissão do módulo. Nesse teste também é observada a presença de falhas na conexão do amplificador, causando erros de

funcionamento durante a integração com o módulo.

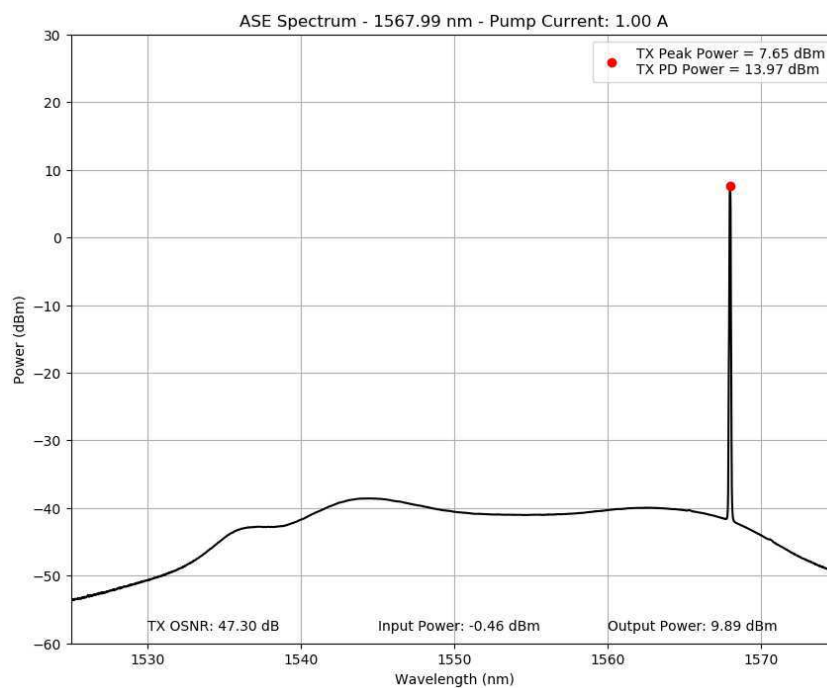
Figura 23 – Bancada de Testes com Módulos Ópticos



Fonte: Elaboração Própria

Na Figura 24 temos o gráfico obtido do OSA com os níveis de potência atingido ao utilizar uma unidade do laser η ITLA acoplada ao YEDFA. Percebe-se que há um ganho de potência devido a ASE gerada e que em transmissões de longa distância são de suma importância para a manutenção da qualidade do sinal recebido.

Figura 24 – Resultado do teste: Ganho de 10 dB de potência do sinal de entrada acoplado ao amplificador

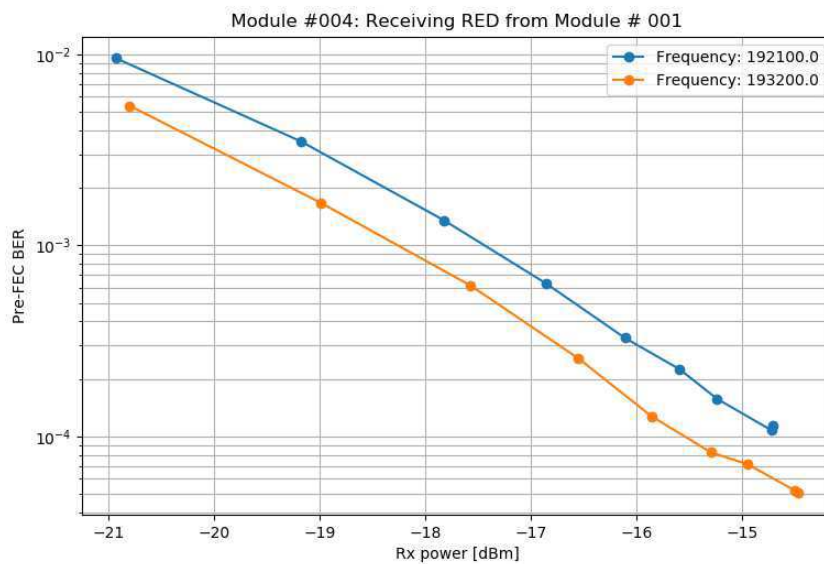


Fonte: Adaptado do *database* da Idea!

3.3.2 Testes de Sensibilidade

Por fim, foram realizados testes para detectar qual o menor nível de potência no sinal de entrada do módulo em que a taxa de erros de bit (BER) não ultrapassa o valor limite. Para isso, utilizamos dois módulos conectados entre si, onde um envia um sinal modulado na frequência escolhida e um segundo módulo recebe esse sinal e demodula o mesmo. Foram implementados testes automatizados para captura dos dados utilizando uma biblioteca de comunicação com o módulo. Na Figura 25 podemos ver o gráfico obtido como resultado do teste. Percebe-se que ao variarmos a frequência obtemos resultados diferentes para o limite da BER, devido a perdas presentes no sistema que variam de acordo com a frequência transmitida.

Figura 25 – Resultado do teste: Sensibilidade da BER em relação à potência do sinal de entrada



Fonte: Adaptado do *database* da Idea!

4 Conclusão

Os sistemas de comunicação óptica e suas altas taxas de transmissão de dados são um dos fatores responsáveis pelo advento da era da informação. O setor, além de sua importância em nossa sociedade atual, movimenta bilhões de dólares todos os anos, investindo em tecnologia e inovação. A BrPhotonics é uma empresa que está posicionada nesse mercado, entregando tecnologia de ponta na produção de lasers sintonizáveis de cavidade externa.

Neste trabalho foram descritas as principais atividades realizadas pelo autor durante seu período de estágio, colaborando em projetos de desenvolvimento de produto, no caso, em lasers sintonizáveis de cavidade externa, trabalhando em conjunto com as equipes de *Packaging* Fotônico e Engenharia de Testes, atuando como desenvolvedor de testes para este tipo de dispositivo.

Durante a realização do estágio, as atividades demandaram o conhecimento em diversos domínios da Engenharia Elétrica, como sistemas de comunicações digitais (principalmente comunicação óptica); programação orientada a objetos, estruturas de dados e engenharia de software; instrumentação eletrônica e conhecimento sobre sistemas de controle. Esta pluralidade de conhecimento aplicada evidencia o grau de caráter técnico do estágio realizado.

Por fim, a oportunidade de estágio foi extremamente proveitosa e enriquecedora. Por meio de cursos e treinamentos que visaram inovação e desenvolvimento técnico, e o ambiente de colaboração e aprendizado existente dentro da empresa ajudaram no crescimento profissional e pessoal do colaborador. Além disso, os desafios que surgiram durante o decorrer do estágio geraram oportunidades para por em prática esse conhecimento adquirido.

Referências Bibliográficas

AGRAWAL, G. P. *Fiber-Optic Communication Systems*. [S.l.]: Wiley, 4th Edition, 2010. Citado na página 5.

BARBOSA, F. A. Avaliação da capacidade de transceptores ópticos considerando limitações de algoritmos de processamento digital de sinais digital de sinais. Dissertação de Ph.D., Universidade de Campinas, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 4 e 8.

COLDREN, L. A.; FISH, G. A.; AKULOYA, Y. Tunable semiconductor lasers: A tutorial. *Journal of Lightwave and Technology*, v. 22, n. 1, p. 193–202, 2004. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 10.

DINIZ, J. C. M. Estimador de desvio de frequência para receptores ópticos coerentes digitais. Dissertação de Ph.D., Universidade de Campinas, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 9.

ITU-T-G.694.1. *Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid*. 2012. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 17.

LIMA, T. C. Redes ópticas de longa distância com transceptores de taxa de código variável. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 4 e 7.

MACEDO, C. F. M. Transmissão e recepção a 40 gb/s e 100 gb/s. Versão provisória de trabalho de dissertação, Faculdade de Engenharia do Porto, Portugal, 2012. Citado na página 6.

OIF-ITLA-MSA-01.3. *Integrable Tunable Laser Assembly Multi Source Agreement*. 2015. Citado na página 10.

PEREIRA, D. B. M. et al. Aplicações de amplificadores de fibra dopada de érbio na banda L. *Revista do DETUA*, v. 3, n. 7, 2002. Citado na página 6.

SALEH, B. E. A.; TEICH, M. C. *Fundamentals of Photonics*. [S.l.]: Wiley, New York, 1991. Citado na página 5.

SEIMETZ, M. High-order modulation for optical fiber transmission. v. 143, 2009. Citado 3 vezes nas páginas 6, 7 e 9.