



Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Departamento de Engenharia Elétrica

Breno Machado Vasconcelos Alves

Estágio Supervisionado

Idea! Sistemas Eletrônicos

Campina Grande - PB

Julho de 2019

Breno Machado Vasconcelos Alves

Estágio Supervisionado

Idea! Sistemas Eletrônicos

Relatório de Estágio Supervisionado submetido à Coordenação de Curso de Graduação de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Danilo Freire de Souza Santos

Supervisor: Msc. Felipe Bizerra Fidèles

Campina Grande - PB

Julho de 2019

Breno Machado Vasconcelos Alves

Estágio Supervisionado

Idea! Sistemas Eletrônicos

Relatório de Estágio Supervisionado submetido à Coordenação de Curso de Graduação de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Trabalho aprovado em: Campina Grande - PB, / /

**Prof. Dr. Danilo Freire de
Souza Santos, UFCG**
Professor Orientador

Campina Grande - PB
Julho de 2019

Dedico este trabalho aos meus pais e à minha
querida irmã.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente aos meus pais, José Francisco e Leila, e à minha irmã, Leilane, por todo o apoio dado. Com muita fé em Deus, amor e esforço possibilitaram que nada, nunca, me faltasse.

Agradeço a Felipe Fidéles e Juliano Oliveira pela oportunidade, pelos diversos ensinamentos e pelo apoio ao longo do estágio.

Agradeço a toda a equipe de Fotônica e Engenharia de Produto, em especial a Luís, Diogo, Ricardo, Leandro, Lucas, Vinícius Oliveira e Filipe, por todo o aprendizado ao longo desses meses.

Agradeço aos amigos e colegas que também pegaram o coletivo UFCG/UFPB - Campinas-SP e tornaram essa experiência muito mais fácil e divertida.

Agradeço ao professor Danilo Freire de Souza Santos pela orientação no estágio e pelo suporte ao longo da graduação.

Por fim, aos funcionários do DEE, em especial Adail e Tchai, que sempre estiveram acessíveis, disponíveis e com uma imensa vontade em ajudar, por menor que tenha sido o problema.

“Run rabbit run
Dig that hole, forget the sun
When at last the work is done
Don't sit down, it's time to dig another one“

Breathe (In the Air) - Pink Floyd

Resumo

Este trabalho apresenta as principais atividades desenvolvidas durante o estágio na Idea! Electronic Systems, realizado de fevereiro a julho de 2019. As atividades estão inseridas no âmbito dos projetos de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) 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 um dos principais produtos da Idea!, o laser sintonizável de cavidade externa. Algumas contribuições foram aqui relatadas, como a execução de testes no laser η ITLA e a criação de uma interface gráfica para operação dos lasers da Idea!.

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

Abstract

This work presents the main activities developed during the internship at Idea! Electronic Systems, held from february to july 2019. The activities are part of the Research and Development (R&D) projects in the company's Product Engineering and Photonics sectors. In this report, we highlight the theoretical studies carried out on optical communications systems, as well as the development of automated tests for one of Idea!'s main products, the external cavity tunable laser. Some contributions have been reported here as the development of tests to η ITLA laser and the design of a graphical user interface to Idea's lasers operation.

Keywords: Optical Communications, Tunable Laser, Automated Testing.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Empresas parceiras da Idea!	12
Figura 2 – Exemplos de trabalhos das sub-áreas da Engenharia de Produto.	13
Figura 3 – Sistema de comunicação óptica.	15
Figura 4 – Geometria de uma fibra óptica.	16
Figura 5 – Atenuação da fibra monomodo em função do comprimento de onda.	17
Figura 6 – Elementos do canal em sistemas óptico de comunicações	17
Figura 7 – Efeitos de dispersão na fibra monomodo	18
Figura 8 – Transmissor em sistema de comunicações que utiliza a detecção coerente	19
Figura 9 – Receptor em sistema de comunicações que utiliza a detecção coerente .	19
Figura 10 –Etapas de processamento do DSP em um sistema de detecção coerente para um sistema sistema 32GBaud (QPSK, 8QAM e 16QAM) após uma transmissão de 1000 km.	20
Figura 11 –Elementos básicos de um laser.	21
Figura 12 –Relação entre o espectro óptico e cada elemento do laser sintonizável..	21
Figura 13 –Amostra de Laser μ ITLA - À esquerda o laser completamente montado e à direita o laser sem mecânica.	24
Figura 14 –Placas de teste do μ ITLA - À esquerda a placa de testes EVK e à direita a placa de testes Open.	24
Figura 15 –Equipamentos do laboratório de Engenharia de Produto da Idea!.	25
Figura 16 –Fluxo de testes dos lasers da Idea!.	26
Figura 17 –Testes básicos de corrente e temperatura de alguns elementos do laser.	26
Figura 18 –Testes básicos do fotodiodo e do circuito de ganho.	27
Figura 19 –Calibração do fotodiodo e da fase da cavidade.	28
Figura 20 –Teste mapa de varredura de um laser μ ITLA com 12 canais.	29
Figura 21 –Laser η ITLA da Idea! - À esquerda uma comparação do tamanho da placa e à direita o laser η ITLA sem mecânica.	30
Figura 22 –Placa de testes η Extended.	30
Figura 23 –Testes do Controlador PID Digital do TEC no laser η ITLA	31
Figura 24 –Respostas do controlador do TEC quando perturbado por passos de 10, 13 e 16 dBm na potência de saída do laser.	32
Figura 25 –Módulo óptico comercial - À esquerda uma visão do módulo montado e à direita o <i>setup</i> de testes na câmara climática	33
Figura 26 –Resultado do teste : À esquerda a constelação com a câmara a 0°C e à direita com o a câmara a 70°C	33
Figura 27 –Interface gráfica do Qt Designer.	34

Figura 28 –Arquitetura de software da GUI.	34
Figura 29 –GUI de Operação do Laser - Elementos do Laser	35
Figura 30 –GUI de Operação do Laser - Especificação OIF.	35
Figura 31 –GUI de Operação do Laser - Python Console.	36
Figura 32 –GUI de Operação do Laser - Gráficos.	36

Lista de abreviaturas e siglas

ASE	Amplified Emission Spontaneous
ASIC	Application-Specific Integrated Circuit
BER	Bit Error Rate
CD	Chromatic Dispersion
CFP2-DCO	C form-factor pluggable - Digital Coherent Optics
DSP	Digital Signal Processor
DWDM	Dense Wavelength-Division Multiplexing
EDFA	Erbium Dopped Fiber Amplifier
ITU	International Telecommunication Union
GUI	Graphical User Interface
OIF	Optical Internetworking Forum
PMD	Polatization Mode Dispersion
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
SMSR	Side Mode Suppression Ratio
SNR	Signal to Noise Ratio
TEC	Thermo Electrical Cooler
TECL	Tunable External Cavity diode Lasers

Sumário

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	A Idea Sistemas Eletrônicos	12
1.1.1	Engenharia de Produto	13
1.2	Objetivos	13
1.3	Organização do Trabalho	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1	Sistemas de Comunicação Óptica	15
2.1.1	O Canal Óptico	15
2.1.1.1	A Fibra Óptica	15
2.1.1.2	Atenuação no Canal	16
2.1.2	O Transmissor Óptico	18
2.1.3	O Receptor Óptico	19
2.2	Laser Sintonizável de Cavidade Externa	19
2.2.1	Regulamentação	21
3	ATIVIDADES DESENVOLVIDAS	23
3.1	Treinamento	23
3.2	Testes de Laser Sintonizável	25
3.2.1	Testes Básicos	25
3.2.2	Testes de Calibração	27
3.2.3	Testes do Laser η ITLA	29
3.2.4	Testes do Módulo CFP2-DCO	31
3.2.5	GUI de Operação dos Lasers	32
4	CONCLUSÃO	37
	Bibliografia	38

1 INTRODUÇÃO

Este relatório tem como objetivo descrever as atividades desenvolvidas pelo estudante Breno Machado Vasconcelos Alves durante o período de estágio supervisionado no setor de Engenharia de Produto da Idea Sistemas Eletrônicos do dia 11/02/2019 ao dia 23/07/2019.

1.1 A Idea Sistemas Eletrônicos

A Idea! Electronic Systems, localizada em Campinas - SP, é uma empresa de serviços de alta tecnologia focada na evolução do estado da arte da fotônica e da microeletrônica, visando os ASICs e a convergência com a fotônica. Os mercados de telecomunicações e de comunicação de dados (centros de dados) são os principais alvos da Idea!. As soluções da Idea! são baseadas em serviços de IPs e tecnologias para permitir transmissões ópticas de altíssima velocidade (100G, 400G, 1T) (IDEA!, 2019).

A Idea! está atingindo as condições para seus objetivos com base em uma equipe de engenharia interna de alto nível, construindo um conjunto de parcerias de alto nível (Figura 1) e investindo em salas limpas, equipamentos e ferramentas para o desenvolvimento. Um avançado fluxo de microeletrônica, uma equipe experiente de projeto e embalagem fotônica trabalha em conjunto para construir soluções convergentes de fotônica / microeletrônica com uma visão verdadeiramente holística.

Figura 1 – Empresas parceiras da Idea!.



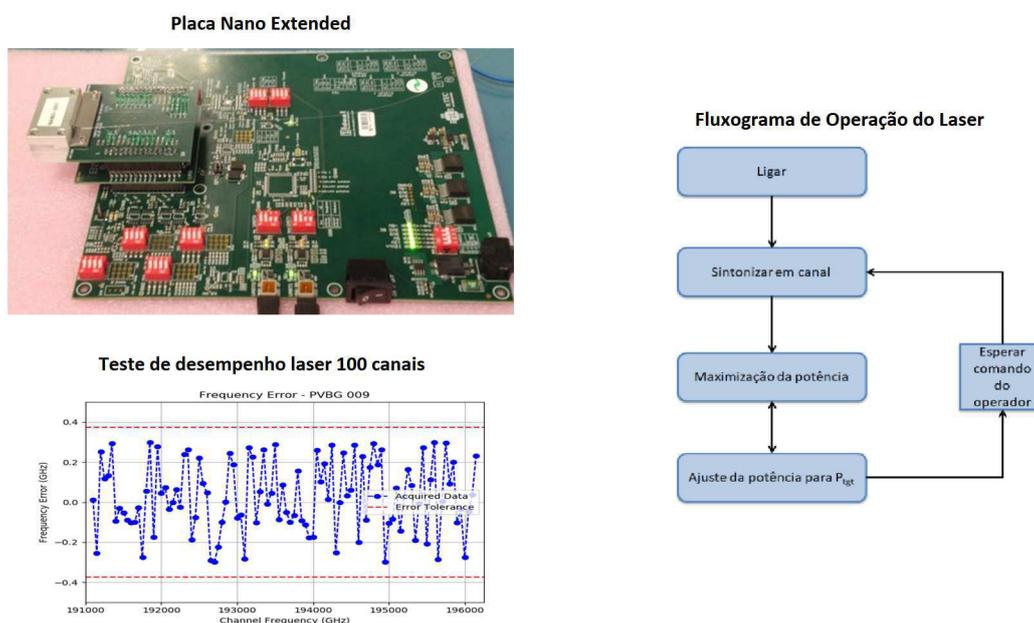
Fonte: Idea! Sistemas Eletrônicos

Com a comunicação óptica como um motivador, os mercados globais de telecomunicações e de comunicação de dados (data-centers) são os principais alvos das soluções da Idea!. A empresa é organizada em três divisões de desenvolvimento: microeletrônica, fotônica e engenharia de produto. Dentre as tecnologias desenvolvidas por essas divisões, destacam-se: Circuitos Integrados de Aplicação Específica (ASIC - *Application Specific Integrated Circuits*), Circuitos de Fotônica Integrada (PIC - *Photonic Integrated Circuits*), laser sintonizáveis e amplificadores ópticos.

1.1.1 Engenharia de Produto

O principal objetivo da equipe de Engenharia de Produto é convergir microeletrônica / fotônica em dispositivos integrados de alta velocidade para transceptores, regeneração e gerenciamento em redes ópticas DWDM. A área de Engenharia de Produto se divide em três grandes áreas de conhecimento: *hardware*, *firmware* e testes. A Figura 2 ilustra exemplos de trabalhos realizados em cada uma dessas áreas.

Figura 2 – Exemplos de trabalhos das sub-áreas da Engenharia de Produto.



Fonte: Próprio autor.

1.2 Objetivos

De maneira geral, este trabalho tem como objetivo, conforme definido no plano de trabalho do estágio, o desenvolvimento de testes automatizados para laser sintonizável. Para tal, o estagiário será capacitado em processo de desenvolvimento de testes auto-

matizados de *firmware*/sistema, como também em programação em Python para testes automatizados de *firmware* via controle de equipamentos de teste.

Os objetivos específicos do trabalho são listados abaixo:

- Aprender o processo de testes de dispositivos ópticos;
- Aprender a usar a plataforma de testes utilizada em laboratório para testes dos lasers;
- Aprender o uso de ferramentas de testes automatizados;
- Programar em Python para testes automatizados via controle de equipamentos;
- Conectar a plataforma de testes utilizada com banco de dados e Xray (plataforma de gerenciamento de testes vinculada ao Jira);
- Desenvolver uma interface para testes

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 entendimento do trabalho.
- Capítulo 3: Atividades Desenvolvidas. Neste capítulo são apresentadas as principais atividades desenvolvidas no estágio.
- Capítulo 4: Conclusão: Aqui são apresentadas as conclusões do trabalho.

Ao fim do documento são apresentadas as referências.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta os principais conceitos e fundamentos técnicos utilizados no decorrer do estágio, no intuito de prover maior embasamento teórico ao que será explanado posteriormente. São aqui descritos os conceitos de sistemas de comunicações ópticas e lasers sintonizáveis de cavidade externa.

2.1 Sistemas de Comunicação Óptica

Os sistemas de Comunicação Óptica constituem um grande avanço tecnológico na área de comunicações pois permitem desenvolver sistemas para enviar mensagens a longas distâncias. Um diagrama de bloco genérico de um sistema de comunicação óptica pode ser visto na Figura 3, ele consiste em um transmissor, um canal de comunicação e um receptor.

Esses três elementos são comuns a todos os sistemas de comunicação, a única diferença é que nesse caso o canal de comunicação é um cabo de fibra óptica. Os outros dois componentes, o transmissor óptico e o receptor óptico, são projetados para atender às necessidades de um canal de comunicação específico. Nesta seção, discutimos as questões gerais relacionadas ao papel da fibra óptica como canal de comunicação e ao projeto de transmissores e receptores.

Figura 3 – Sistema de comunicação óptica.



Fonte: Próprio autor.

2.1.1 O Canal Óptico

O papel do canal de comunicação é transportar o sinal óptico do transmissor para o receptor sem distorcê-lo. A maioria dos sistemas ópticos usa fibras ópticas como canal de comunicação porque as fibras de sílica podem transmitir luz com perdas tão pequenas quanto 0,2 dB/km (AGRAWAL, 2010).

2.1.1.1 A 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 (Figura 4). 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, 2007).

Figura 4 – Geometria de uma fibra óptica.



Fonte: *Fundamentals of Photonics* (SALEH, 2007).

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.

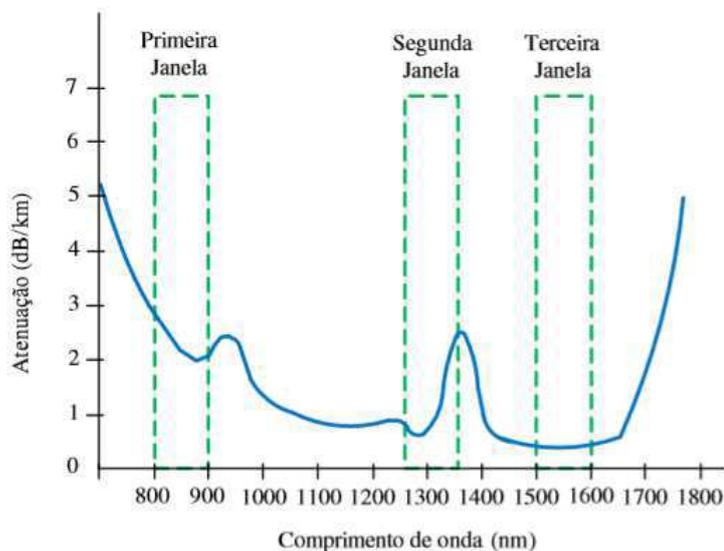
2.1.1.2 Atenuação no Canal

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. A tecnologia de fibras ópticas presente nos dias atuais nos permite operar no espectro óptico onde a fibra apresenta menor atenuação, ou seja a região dos 1550 nm.

O mais simples tipo de atenuação que ocorre nas fibras monomodo é a perda de potência devido as longas distâncias. Uma solução muito comum para resolver esse problema é a adição de regeneradores de sinal e amplificadores ópticos no canal. Dessa forma, o diagrama simplificado exibido na Figura 3 pode ser visto com um pouco mais de detalhes na Figura 6. Esses amplificadores ópticos, conhecidos como EDFA, possuem no núcleo íons de érbio que quando e bombeados em um comprimento de onda adequado fornece ganho óptico através do princípio da inversão de população.

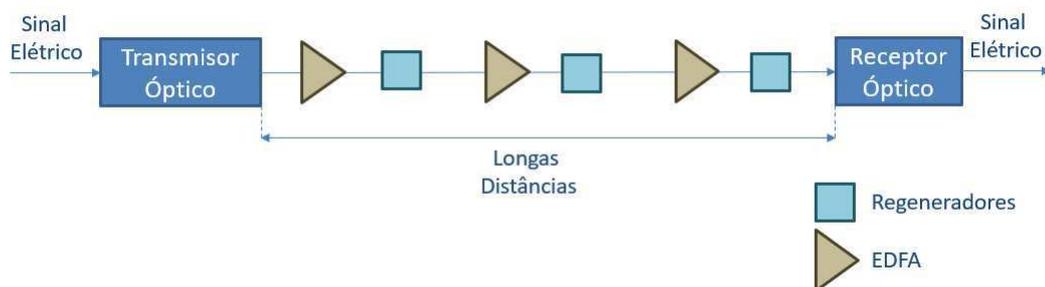
Uma desvantagem do uso do EDFA é que o bombeamento é feito a partir de um processo de emissão espontânea amplificada (ASE - *Amplified Emission Spontaneous*). Esse processo adiciona ruídos ao canal piorando assim a relação sinal-ruído (SNR - *Signal to Noise Ratio*), o que pode provocar um aumento na taxa de erro de bits (BER - *Bit Error Rate*) do receptor.

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



Fonte: Lima, T. C. (2015).

Figura 6 – Elementos do canal em sistemas óptico de comunicações

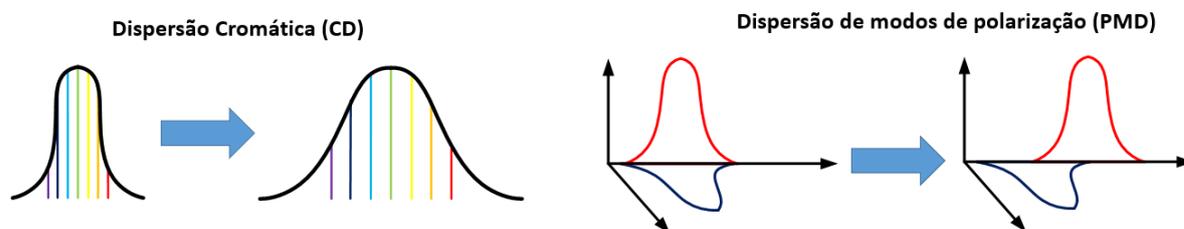


Fonte: Próprio Autor

Além dos efeitos de atenuação, o canal óptico apresenta efeitos dispersivos e não-lineares que degradam a mensagem transmitida. Dentre os efeitos dispersivos do canal podemos citar os efeitos de Dispersão Cromática (CD - *Chromatic Dispersion*), também conhecida como dispersão por velocidade de grupo, e de Dispersão dos Modos de Polarização (PMD - *Polarization Mode Dispersion*). No caso dos efeitos não lineares destacam-se a Auto-modulação de Fase, a Modulação de Fase Cruzada e a Mistura de Quatro Ondas.

A Figura 7 ilustra os efeitos da CD e da PMD no sinal. Na dispersão cromática diferentes componentes espectrais do pulso viajam a velocidades de grupo ligeiramente diferentes, isso ocorre pois a velocidade de grupo associada ao modo fundamental é dependente da frequência. No caso da dispersão por modos da polarização duas diferentes polarizações de luz, que normalmente viajam na mesma velocidade, viajam em velocidades diferentes devido a imperfeições e assimetrias aleatórias na fibra, causando espalhamento dos pulsos ópticos. (RAJIV, 1998)

Figura 7 – Efeitos de dispersão na fibra monomodo



Fonte: Idea! Sistemas Eletrônicos.

A Auto-modulação de Fase ocorre quando o aumento da potência de transmissão provoca alterações no índice de refração da fibra, modificando a fase do campo elétrico propagante, dando origem a modulação de fase do sinal referente ao próprio canal. De forma similar, quando há dois ou mais canais sendo transmitidos na fibra a fase do campo elétrico de cada canal também é alterada pela potência dos demais canais, efeito conhecido como Modulação Cruzada de Fase (Agrawal, 2010).

A Mistura de Quatro Ondas é uma interferência originada pela interação entre três componentes de frequência, originando uma quarta componente espectral (Djordjevic et al., 2010). Em sistemas de longa distância sem compensadores de dispersão, a interferência não-linear pode ser modelada como ruído aditivo, mas cuja potência depende da potência do sinal lançado na fibra (Bosco et al., 2011).

2.1.2 O Transmissor Óptico

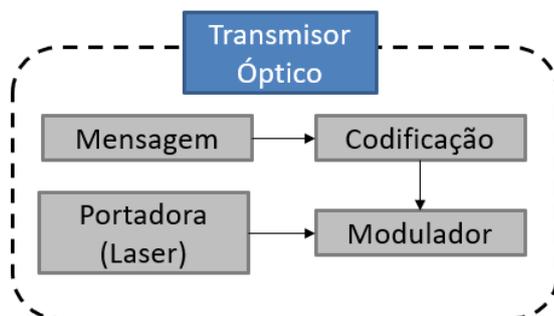
Uma das grandes revoluções na história dos sistemas de comunicação óptica foi o advento das técnicas de detecção coerente. Antes, os sistemas ópticos utilizavam formatos de modulação simples em que bits modulavam a intensidade de uma portadora óptica no transmissor e no receptor esses bits eram recuperados 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 - *Digital Signal Processor*) 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).

A Figura 8 apresenta os elementos de um transmissor em sistema de comunicações que utiliza a detecção coerente. O transmissor é composto de uma portadora óptica, 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 IQ (IQM - *IQ Modulator*).

Figura 8 – Transmissor em sistema de comunicações que utiliza a detecção coerente

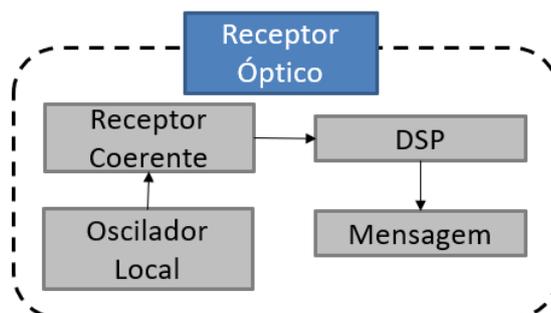


Fonte: Próprio autor.

2.1.3 O Receptor Óptico

Os elementos de um receptor óptico em sistemas de detecção coerente são apresentados na Figura 9. O principal objetivo da utilização de um DSP em sistemas ópticos coerentes é a compensação de efeitos adversos advindos da fibra óptica e do transceptor. Na Figura 10 podem ser observados os resultados do processamento de um DSP para um sistema 32GBaud (QPSK, 8QAM e 16QAM) após uma transmissão de 1000 km.

Figura 9 – Receptor em sistema de comunicações que utiliza a detecção coerente



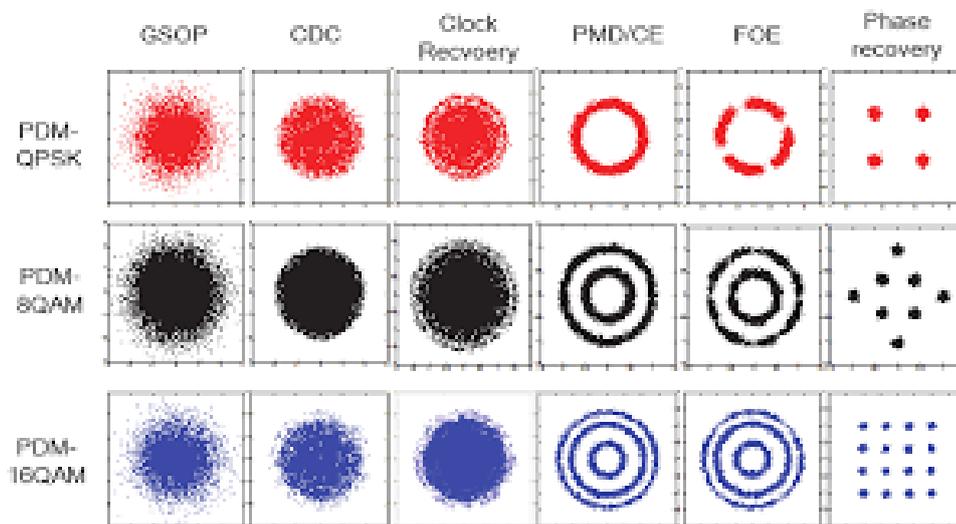
Fonte: Próprio autor.

2.2 Laser Sintonizável de Cavidade Externa

O nome laser (*Light Amplification by Stimulated Emission*) significa amplificação da luz por emissão estimulada de radiação. Ou seja, um laser é um dispositivo que emite luz através de um processo de amplificação óptica baseado em emissões estimuladas de fótons.

Os lasers de diodo semicondutor são usados em uma ampla variedade de aplicações, desde fontes de leitura em leitores de discos compactos até transmissores em sistemas

Figura 10 – Etapas de processamento do DSP em um sistema de detecção coerente para um sistema sistema 32GBaud (QPSK, 8QAM e 16QAM) após uma transmissão de 1000 km.



Fonte: (Jianjun Yu et al, 2018)

de comunicação de fibra ótica, pois possuem recursos conhecidos: alta confiabilidade, tamanho miniatura, menor consumo de energia, maior capacidade de sincronização e alta eficiência.

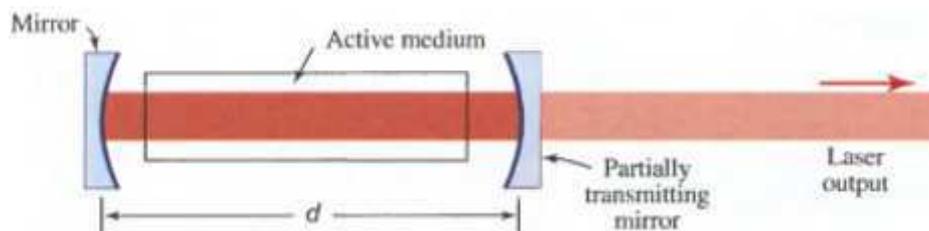
O laser é um oscilador óptico. Ele compreende um amplificador óptico ressonante cuja saída é realimentada na entrada com a fase correspondente. O processo de oscilação pode ser iniciado pela presença na entrada do amplificador até mesmo de uma pequena quantidade de ruído que contém componentes de frequência dentro da largura de banda do amplificador. Esta entrada é amplificada e a saída é realimentada para a entrada, onde é submetida a amplificação adicional (Saleh et al, 2007).

O processo continua indefinidamente até que uma saída grande seja produzida. O aumento do sinal é limitado pela saturação do ganho do amplificador, e o sistema atinge um estado estacionário no qual um sinal de saída é criado na frequência do amplificador ressonante .

A realimentação óptica é obtida colocando o meio ativo em um ressonador óptico. Um ressonador de Fabry-Perrot, compreendendo dois espelhos separados por uma distância d , contém o meio (índice de refração n) no qual residem os átomos ativos do amplificador (Figura 11). As frequências/comprimentos de onda que a cavidade pode gerar são chamados modos da cavidade. Esses modos são os harmônicos que são refletidos. O ressonador sustenta apenas frequências que correspondem a uma mudança de fase de ida e volta, o que é múltiplo de 2π .

Um dos principais modelos de laser de diodo são o lasers de cavidade externa sintonizável (TECL - *Tunable External Cavity diode Lasers*) consiste principalmente de

Figura 11 – Elementos básicos de um laser.

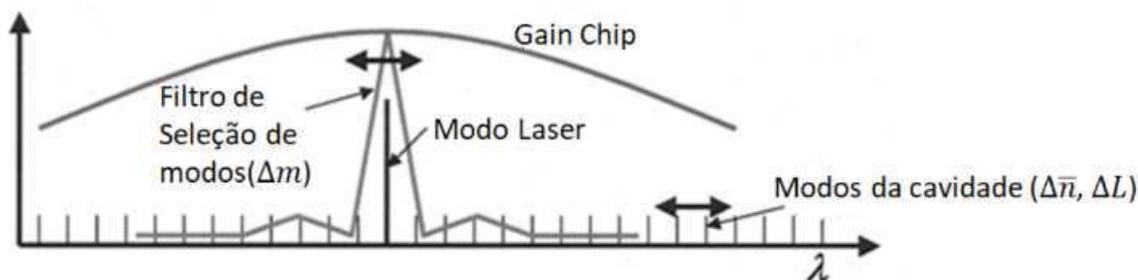


Fonte: (Saleh et al, 2007)

um laser de diodo semiconductor com ou sem revestimentos anti refletor em uma ou duas faces, colimador para acoplar a saída de um laser de diodo e um filtro de seleção de modo externo. Cavidades mais longas geram largura de linha mais estreita, útil para modular mais informações para a luz (YE, 2007).

A Figura 12 apresenta a relação entre o espectro óptico e cada elemento do laser sintonizável. O controle do filtro de seleção de modo externo permite sintonizar o laser em diferentes frequências. Em alguns lasers essa configuração pode ser aprimorada com a adição de um defasador capaz de alterar o índice de refração da cavidade. O controle desse defasador permite alinhar os modos da cavidade com o modo do filtro de seleção no ponto de máxima potência de saída.

Figura 12 – Relação entre o espectro óptico e cada elemento do laser sintonizável..



Fonte: Adaptado de (Coldren et al, 2004)

2.2.1 Regulamentação

Produtos para comunicação óptica, como os TECLs, precisam seguir alguns padrões de mercado para que possam operar de forma regulamentada, isso significa que devem seguir normas ligadas a comunicações e a lasers sintonizáveis. A União Internacional de Telecomunicações (ITU - *International Telecommunication Union*) é uma agência especializada das Nações Unidas (ONU) que é responsável por questões que dizem respeito a tecnologias de informação e comunicação.

Uma das principais regulamentações da ITU é a Grade de Frequências, uma tabela de todas as frequências centrais (e comprimentos de onda correspondentes) dos canais

permitidos em um sistema de comunicações. A Grade de frequência mais comum usada para comunicação por fibra ótica é aquela usada para espaçamento de canal em DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing*) em comprimentos de onda em torno de 1550 nm e definida pela (ITU-T G.694.1, 2012). A grade é definida em relação a 193,1 THz e se estende de 191,7 THz a 196,1 THz com espaçamento de 100 GHz.

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 principais atividades realizadas pelo estagiário durante as 920 horas de vigência de contrato com a Idea Sistemas Eletrônicos. O primeiro mês de estágio foi composto por treinamentos e reuniões com as equipes técnica e administrativa para esclarecer os ideais e as metodologias da empresa. Com o fim desse período as primeiras demandas técnicas começaram a ser cumpridas com a execução de testes para lasers e módulos ópticos, além do desenvolvimento de recursos e funcionalidades para a automatização dos testes. Tais atividades serão melhor detalhadas no decorrer deste capítulo.

3.1 Treinamento

O período de treinamento teve duração efetiva de 30 (trinta) dias. Durante esse período foram realizadas reuniões com as equipes técnica e administrativa com o objetivo de apresentar a empresa, o setor, os funcionários e as tecnologias desenvolvidas. Além disso, nessa etapa foram realizados treinamentos para o aprendizado das ferramentas de software utilizadas na empresa, aulas teóricas e estudos sobre comunicação óptica, e aulas práticas sobre a operação dos lasers e a execução de testes.

Foram adquiridos conhecimentos que não são comumente apresentados na faculdade, como a vivência em um ambiente empresarial, o uso de metodologias ágeis de projeto com realização de reuniões semanais para acompanhamento, a utilização de sistemas de gerenciamento de projetos, sistemas de controle de versionamento de códigos e ferramentas para automação de testes, e a organização do fluxo de trabalho.

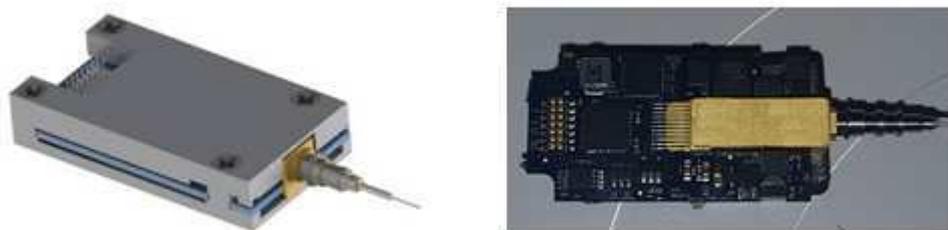
No estudo dos sistemas de comunicação óptica foram revisados alguns conhecimentos de telecomunicações adquiridos na graduação, como modulação de sinais e formatação de pulso. Além disso, foram realizados estudos sobre sistemas ópticos de comunicação com detecção coerente, amplificadores ópticos a fibra 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 diodos 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 aprofundada a fim de tornar mais eficiente o entendimento das rotinas de testes.

Após essas etapas de estudos genéricos sobre conhecimentos importantes para o

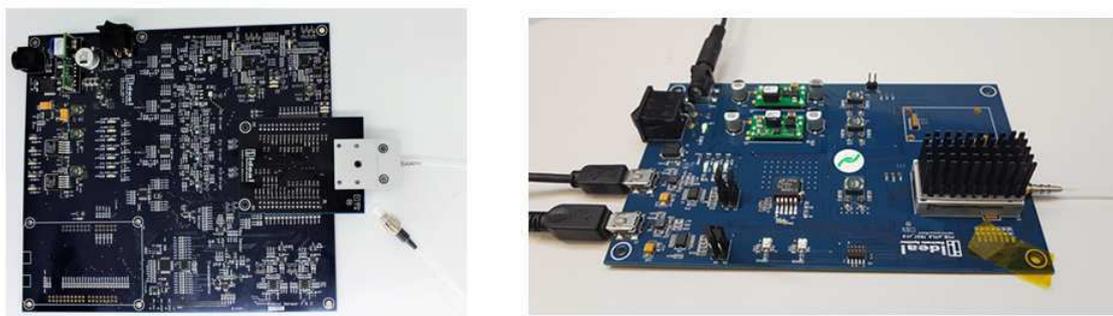
setor, foram iniciados treinamentos voltados para os produtos e tecnologias internos da Idea. Em tais treinamentos foram apresentados, os lasers, as placas de testes, os softwares e os equipamentos do laboratório. A Figura 13 apresenta uma amostra do laser μ ITLA e a Figura 14 ilustra as placas utilizadas para realizar a comunicação com o laser. A placa denominada EVK apresenta circuitos que possibilitam testar a *goldbox* e simular a eletrônica do laser, enquanto a placa Open permite testar o laser completo.

Figura 13 – Amostra de Laser μ ITLA - À esquerda o laser completamente montado e à direita o laser sem mecânica.



Fonte: Idea! Sistemas Eletrônicos.

Figura 14 – Placas de teste do μ ITLA - À esquerda a placa de testes EVK e à direita a placa de testes Open.



Fonte: Idea! Sistemas Eletrônicos.

Antes de iniciar a execução dos testes foram necessários treinamentos práticos de manipulação e limpeza de fibras ópticas, ao fim dessas sessões foram apresentados os equipamentos do laboratório. Como ilustra a Figura 15, o laboratório de Engenharia de Produto dispõe de diversos equipamentos que permitem a leitura de parâmetros importantes do laser, como potência, comprimento de onda e razão de supressão de modo lateral (SMSR - Side Mode Suppression Ratio), além de possibilitar a realização de testes térmicos. Por fim, foram feitas reuniões para apresentar o fluxo de testes e as interfaces de programação de aplicações utilizadas no *firmware*, na operação e nos testes dos lasers.

Figura 15 – Equipamentos do laboratório de Engenharia de Produto da Idea!.



Fonte: Idea! Sistemas Eletrônicos.

3.2 Testes de Laser Sintonizável

Para realizar os testes são utilizadas bibliotecas proprietárias da Idea. Algumas bibliotecas contém interfaces para a comunicação com os lasers, outras definem a comunicação com os equipamentos do laboratório e outras os códigos para testar elementos e funcionalidades do laser. Como todos esses sistemas estão integrados pelas bibliotecas é possível realizar os testes de forma automática.

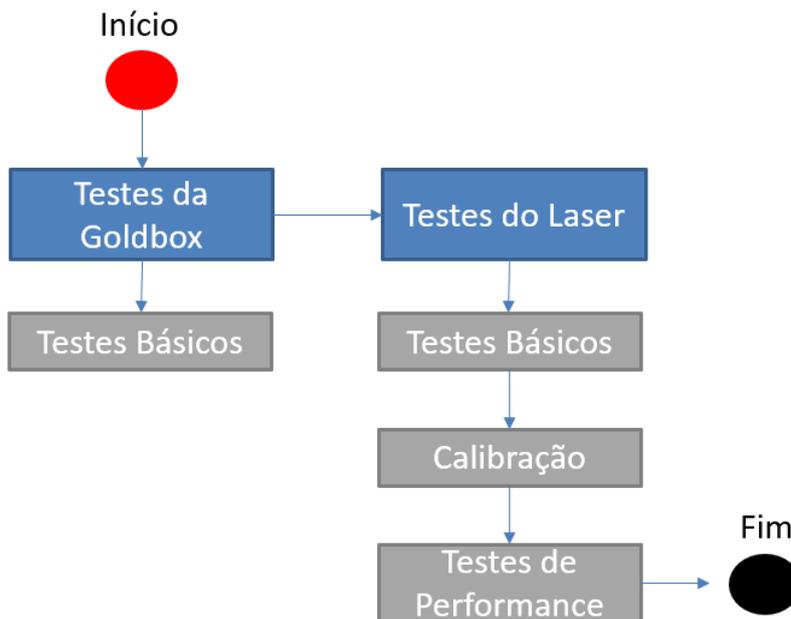
O fluxo de testes nos lasers da Idea seguem uma ordem bem definida, como pode ser visto na Figura 16. Primeiramente são realizados testes nas placas para validação da eletrônica do laser, caso a placa esteja funcionando como esperado, são testados os lasers em três níveis: testes básicos, testes de calibração e testes de performance. A primeira tarefa prática do estágio foi a realização de testes básicos e de calibração nos lasers μ ITLA da Idea.

3.2.1 Testes Básicos

Os testes básicos consistem em testes nos elementos ativos do laser para verificar se esses elementos estão funcionando bem e são capazes de serem controlados. São realizados testes nos sensores e atuadores de corrente e temperatura dos filtros ópticos e do defasador de fase.

A Figura 17 demonstra alguns resultados desses testes, no primeiro foram testados os *drivers* de corrente dos elementos. Nesse teste o TEC é mantido com a temperatura controlada enquanto são acionados os *drivers* de corrente do filtro e do defasador da cavidade, o resultado esperado é que a temperatura dos elementos tenha uma elevação de pelo menos 30°C quando a corrente for 25mA e que o *crosstalk* térmico entre os elementos não seja muito elevado.

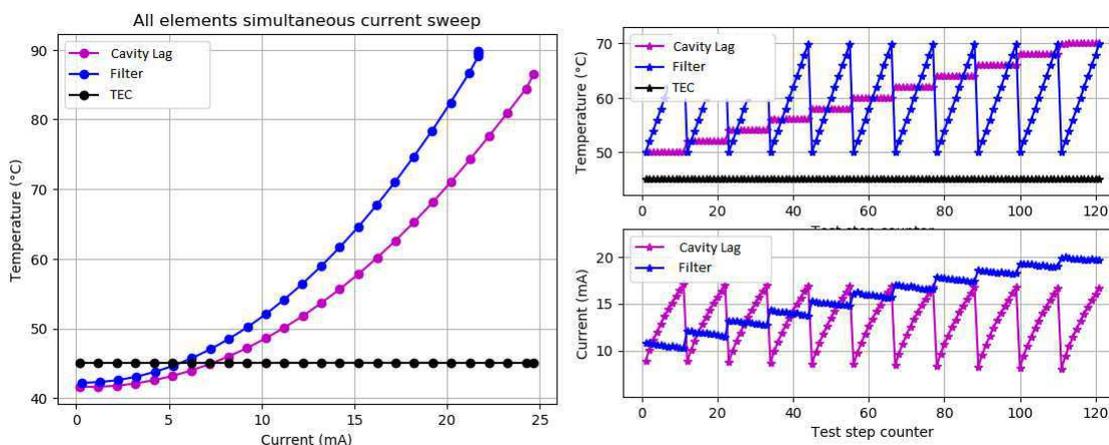
Figura 16 – Fluxo de testes dos lasers da Idea!.



Fonte: Próprio Autor.

Na figura da direita é ilustrado o resultado do controle de temperatura do filtro e do defasador. Mantém-se um dos elementos em temperatura fixa enquanto no outro é feita uma rampa de temperatura. Caso os controladores estejam funcionando o elemento a temperatura fixa irá reduzir a corrente aplicada por causa do *crosstalk* térmico. Esse teste é feito repetidas vezes para diferentes valores de temperatura do elemento com temperatura fixa.

Figura 17 – Testes básicos de corrente e temperatura de alguns elementos do laser.



Fonte: Idea! Sistemas Eletrônicos.

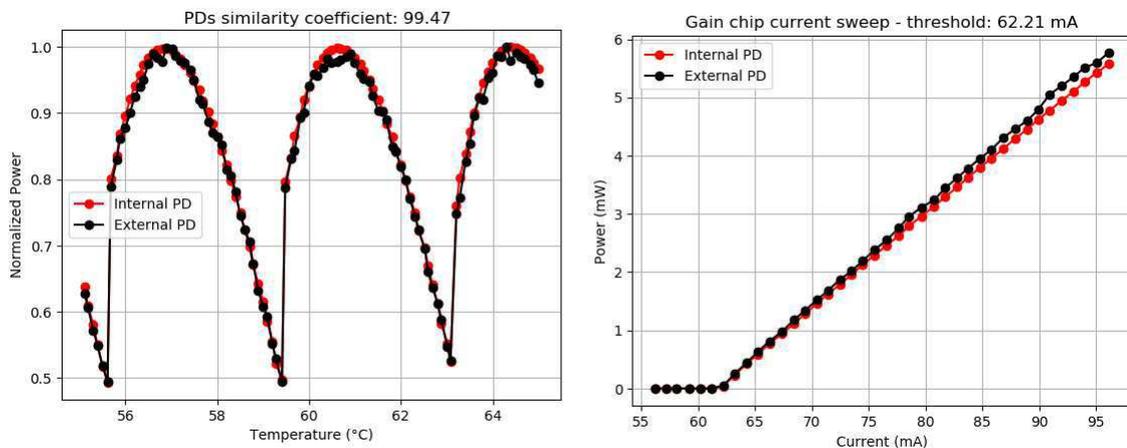
Além desses elementos, também são testados o funcionamento do fotodiodo e do circuito de ganho. O teste do fotodiodo consiste em comparar a leitura de potência do

fotodiodo com a leitura de um medidor de potência óptica externo, um dos testes do circuito de ganho envolve a a medida do limiar de corrente para o meio de ganho. Alguns resultados de testes executados nesses elementos durante o estágio são apresentados na Figura 18.

Para verificar a similaridade entre a potência do fotodiodo e o medidor de potência externo é utilizada uma técnica chamada R^2 ou Coeficiente de Determinação. Este coeficiente é a razão entre a soma de quadrados da regressão e a soma de quadrados total, 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.

Na medida do limiar de corrente do chip de ganho é elevada a corrente desse elemento em passos de 1mA até que se encontre o ponto em que a luz consegue sair da cavidade e gerar potência óptica na saída. Esse é um teste muito importante pois valores muito altos de limiar podem indicar desalinhamento entre os elementos, causando um aumento nas perdas internas do laser. A faixa de valores do limiar varia de acordo com o fornecedor do chip e varia com a frequência de operação do laser, no caso do teste apresentado na figura o limiar foi de 62.21 mA em 1550 nm, um valor válido para o fornecedor em questão.

Figura 18 – Testes básicos do fotodiodo e do circuito de ganho.



Fonte: Idea! Sistemas Eletrônicos.

3.2.2 Testes de Calibração

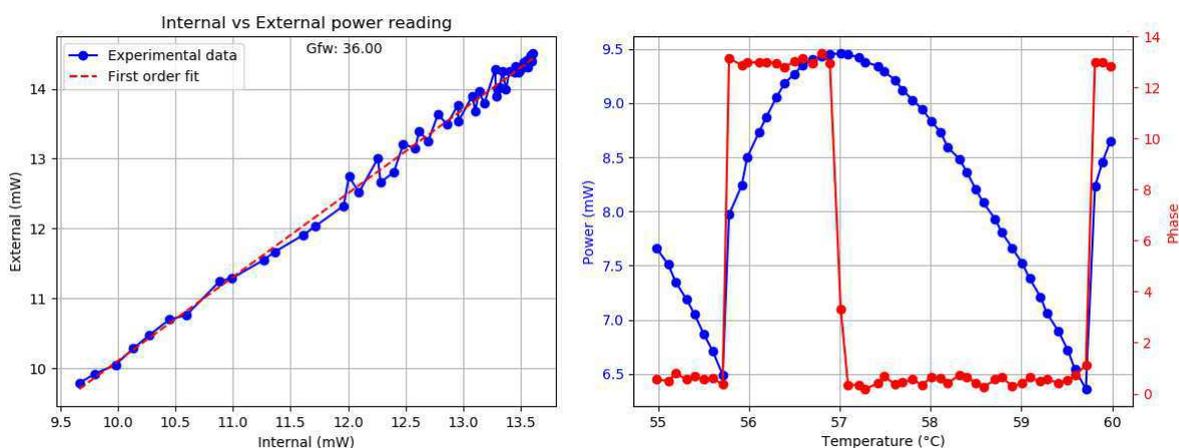
O objetivo dos testes de calibração é obter parâmetros que serão usados na operação do laser, como calibração do fotodiodo, amplitude e fase de oscilação, ganho de *feedforward* (útil para algoritmos de travamento de fase e rastreamento de energia), controle de temperatura da *goldbox* e tabela de canais, que define as condições dos elementos do laser para ajuste nos canais da rede da ITU e ser estável durante a operação.

O teste de calibração do fotodiodo tem como objetivo calcular o valor do ganho necessário para que os valores de potência internos sejam similares as medições de potência de saída. Com o fotodiodo calibrado é importante calibrar a amplitude e fase de oscilação utilizados no algoritmo de maximização da potência. Durante o estágio foram realizados testes de calibração para diversos lasers, a Figura 19 ilustra resultados de alguns dos testes citados previamente.

No primeiro teste é calculado um valor de ganho para a leitura do fotodiodo, esse coeficiente é multiplicado ao valor da leitura da tensão do circuito do elemento. No segundo 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 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°).

No algoritmo de maximização da potência é aplicada uma pequena oscilação (modulação de amplitude) a um dos elementos na cavidade externa. A modulação de amplitude é uma pequena oscilação no *setpoint* de temperatura aplicada ao aquecedor do elemento. A amplitude da modulação é maior quando os modos de cavidade estão desalinhados com o filtro da cavidade externa e menores quando estão bem alinhados. Para garantir que o ponto de máxima potência foi atingido, basta realizar uma demodulação de amplitude do sinal de potência e observar o ponto em que a parte real desse sinal é minimizada.

Figura 19 – Calibração do fotodiodo e da fase da cavidade.

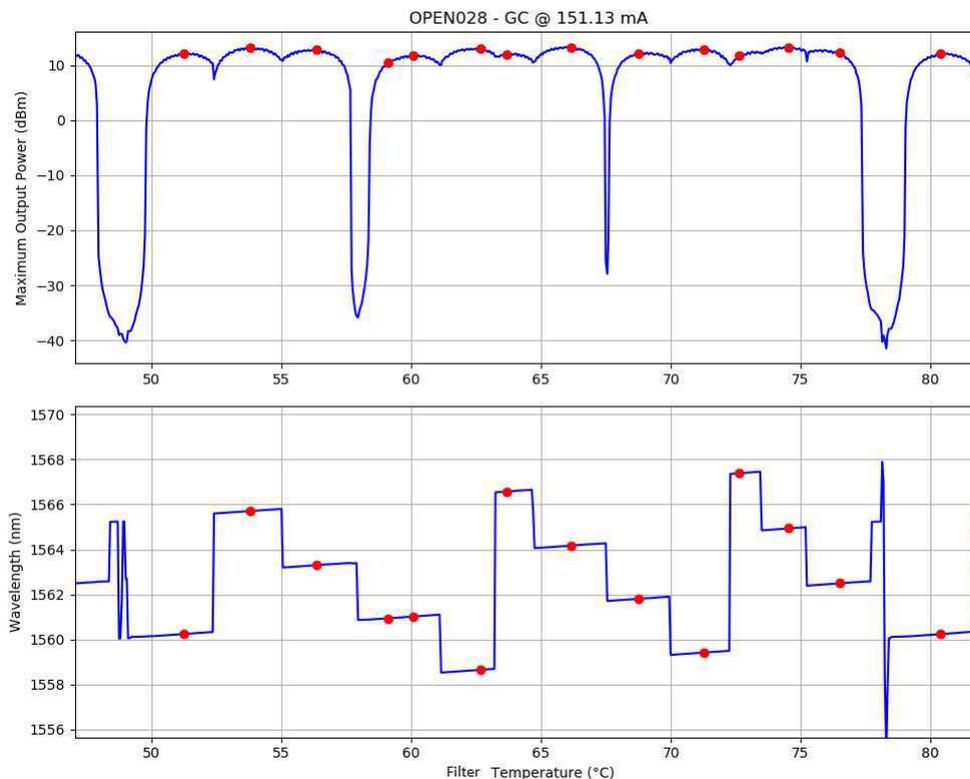


Fonte: Idea! Sistemas Eletrônicos.

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 quão uniforme é o laser. O resultado de um mapa de varredura realizado em um laser μ ITLA com 12 canais é ilustrado na Figura 20, são mostrados 12 temperaturas do filtro em que o laser opera com boa potência.

Figura 20 – Teste mapa de varredura de um laser μ ITLA com 12 canais.



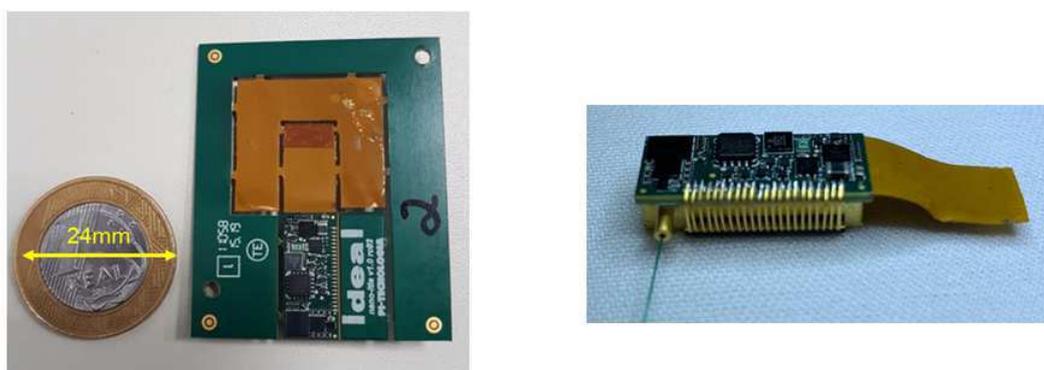
Fonte: Idea! Sistemas Eletrônicos.

3.2.3 Testes do Laser η ITLA

Um dos principais projetos da Idea no ano de 2019 é o projeto do laser η ITLA, um laser com as dimensões ultra compactas e baixo consumo de potência. A Figura 21 ilustra o laser η ITLA e demonstra o seu tamanho. Devido ao alto nível de complexidade na montagem e testes desse tipo de placa, a equipe de Engenharia de Produto desenvolveu uma placa de testes chamada η Extended para agilizar o desenvolvimento de testes nessas unidades. Essa placa contém toda a eletrônica do laser η ITLA numa versão estendida e contendo pontos de teste e chaves de simulação de cargas para que fosse possível testar o projeto da eletrônica antes da fabricação das unidades do η ITLA.

O período de testes na placa η Extended foi um dos mais enriquecedores do estágio. Nele diversos conhecimentos adquiridos na graduação, como eletrônica analógica, circuitos elétricos, dispositivos eletrônicos e instrumentação, foram de muita importância. A Figura 22 ilustra a placa η Extended e alguns dos seus principais componentes. Os testes do *hardware* se basearam em verificar se as tensões e correntes aplicadas e lidas nas cargas

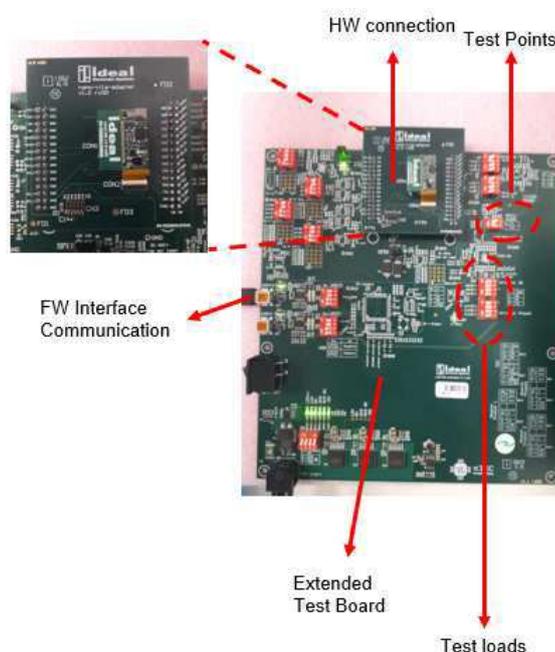
Figura 21 – Laser η ITLA da Idea! - À esquerda uma comparação do tamanho da placa e à direita o laser η ITLA sem mecânica.



Fonte: Idea! Sistemas Eletrônicos.

estavam coerentes com o projeto da eletrônica. Em muitos casos foram notadas diferenças e reajustes de valores de componentes, como capacitores e resistores, tiveram de ser feitos. Quando a placa η ITLA foi fabricada notou-se o sucesso dessa abordagem, o produto foi testado e validado em tempo recorde na Idea!

Figura 22 – Placa de testes η Extended.



Fonte: Idea! Sistemas Eletrônicos.

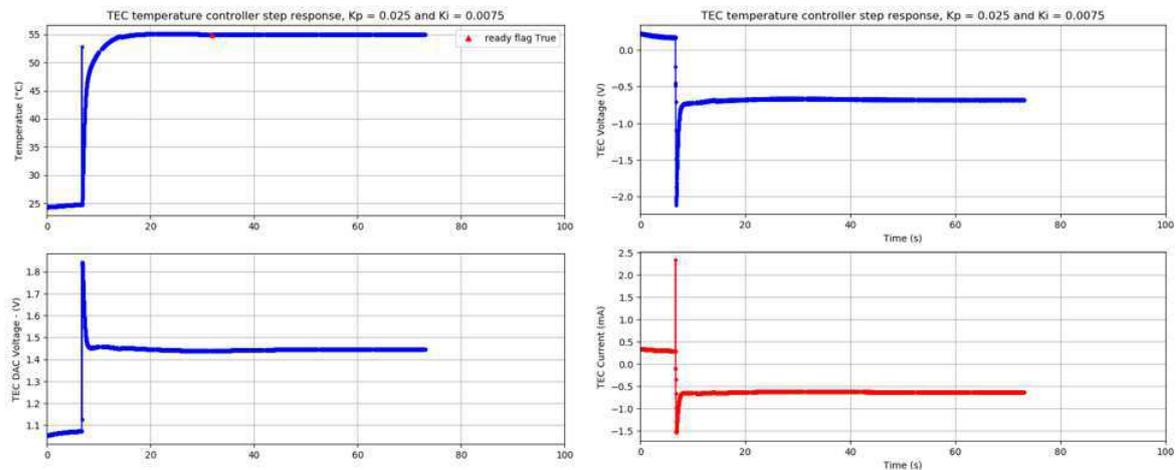
A partir do momento que a placa foi completamente depurada e a eletrônica foi validada, a principal atividade do estágio foi o desenvolvimento de uma biblioteca que permitisse a comunicação com o laser η ITLA e uma biblioteca para a realização dos

testes de forma automática. Como a estrutura interna do laser η ITLA difere da do laser μ ITLA, nem todo o código pôde ser portado e algumas modificações tiveram de ser feitas.

Uma das diferenças foi a adição de um controlador PID digital no TEC do laser. Inicialmente foi utilizada a técnica de sintonia PID Ziegler–Nichols. Essa técnica é realizada ajustando os ganhos k_I (integral) e k_D (derivativo) para zero. O ganho k_P (proporcional), é então aumentado (de zero) até alcançar o ganho final k_U no qual a saída da malha de controle tem oscilações estáveis e consistentes. k_U e o período de oscilação T_U são usados para definir os ganhos P, I e D dependendo do tipo de controlador (ZIEGLER; NICHOLS, 1942).

Os resultados obtidos pelo método de sintonia foram positivos, entretanto, foi desenvolvido um algoritmo para realizar a calibração dos ganhos do controlador de forma empírica e verificar seu desempenho. O uso do método empírico para encontrar os ganhos resultou em um controle mais rápido e estável pra o sistema. A Figura 23 ilustra resultados dos testes de calibração do controlador no laser no laser η ITLA e a Figura 24 ilustra a atuação do controlador quando algumas perturbações são aplicadas no sistema.

Figura 23 – Testes do Controlador PID Digital do TEC no laser η ITLA



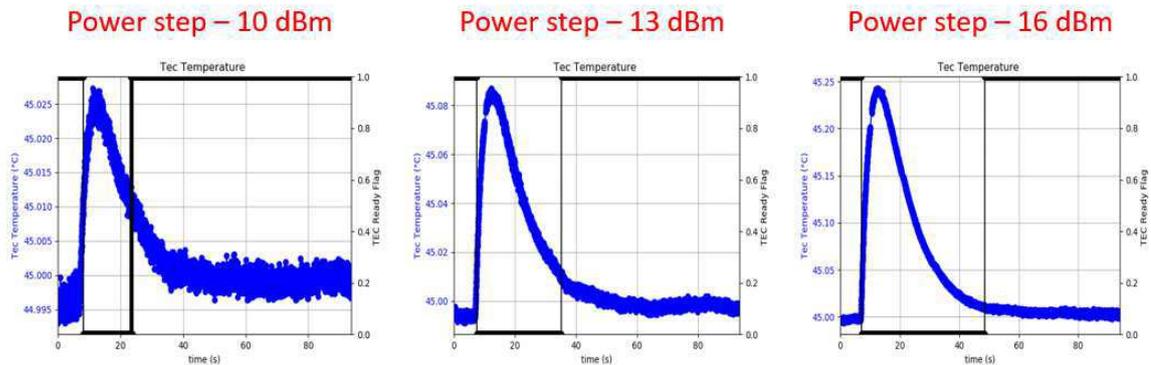
Fonte: Próprio autor.

3.2.4 Testes do Módulo CFP2-DCO

Devido aos resultados de sucesso obtidos na qualificação do laser μ 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 μ ITLA em comparação com a inicialização de outros lasers comerciais que se integravam bem com o módulo óptico. Este trabalho resultou em um conjunto de mudanças que tiveram de ser feitas no *firmware* de inicialização do laser μ ITLA para que pudesse se integrar com o módulo.

Ao fim dessa atividade, com o módulo integrado, foram realizados testes térmicos para qualificar as condições de operação do laser em diferentes temperaturas. Devido

Figura 24 – Respostas do controlador do TEC quando perturbado por passos de 10, 13 e 16 dBm na potência de saída do laser.



Fonte: Próprio autor.

as dimensões do módulo não serem suportadas pela câmara climática do laboratório de Engenharia de Produto da Idea, esses testes foram realizados numa câmara do Instituto Eldorado. Na Figura 25 podem ser vistos o módulo óptico e a configuração do teste na câmara climática.

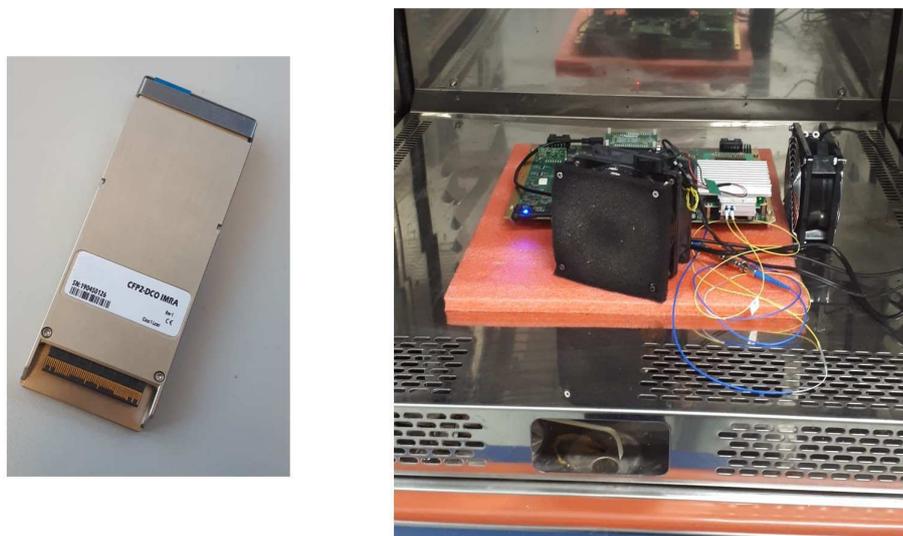
Para realizar esses testes foi necessário desenvolver uma biblioteca para comunicação com o módulo e um código para obter as informações do módulo durante o teste. Os resultados desse teste para uma situação em que o TX do módulo foi conectado diretamente ao RX e a temperatura da câmara foi variada de 0 a 70°C podem ser vistos na Figura 26. Nota-se que a variação de temperatura provocou uma maior taxa de erros de bit. Como o objetivo do teste era validar a operação do módulo em diferentes temperaturas, esse resultado não foi proveitoso e mostra que estudos deveriam ser feitos para aprimorar a dissipação térmica do módulo.

3.2.5 GUI de Operação dos Lasers

Uma das principais atividades realizadas durante o estágio foi o desenvolvimento de uma interface gráfica do usuário (GUI - *Graphical User Interface*) para a operação dos lasers μ ITLA e η ITLA. O objetivo do desenvolvimento dessa interface foi substituir a operação de lasers via linha de comando e permitir a visualização de parâmetros importantes do laser de forma simultânea. A especificação da versão inicial da GUI definiu como principais funcionalidades:

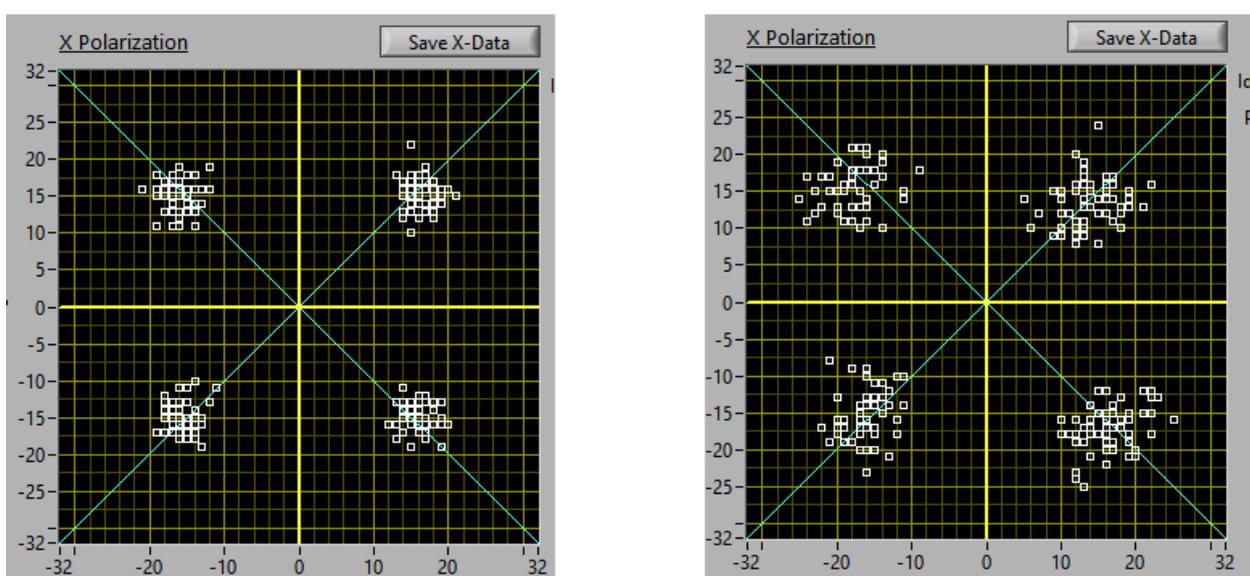
- Permitir a conexão e comunicação com os lasers μ ITLA e η ITLA.
- Permitir a visualização de informações dos elementos ativos do laser.
- Permitir a visualização de informações da especificação da OIF.
- Permitir o uso do console diretamente da GUI, caso fosse necessário.

Figura 25 – Módulo óptico comercial - À esquerda uma visão do módulo montado e à direita o *setup* de testes na câmara climática



Fonte: Idea! Sistemas Eletrônicos.

Figura 26 – Resultado do teste : À esquerda a constelação com a câmara a 0°C e à direita com o a câmara a 70°C .



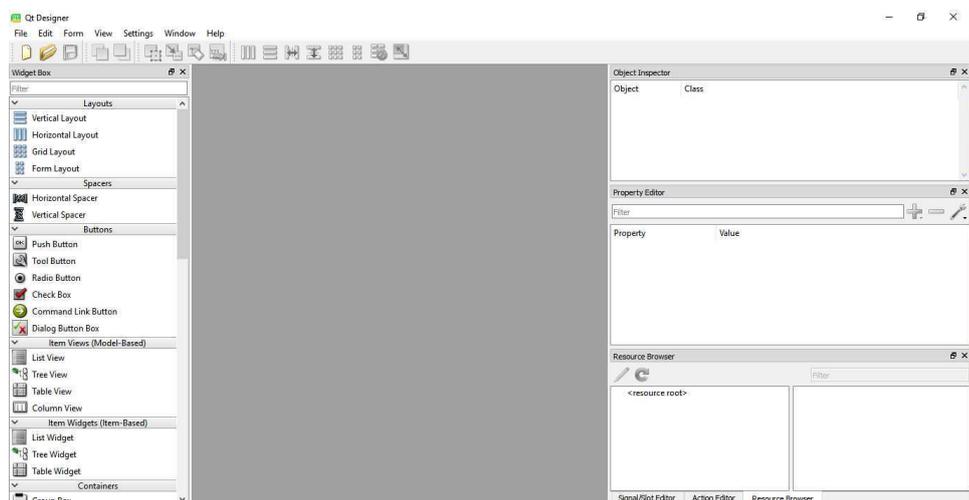
Fonte: Próprio Autor.

- Permitir a visualização de gráficos em tempo real dos principais parâmetros do laser.

O projeto foi feito utilizando a plataforma Qt v5, um conjunto de bibliotecas C++ multi-plataforma que implementam APIs de alto nível para desenvolvimento de sistemas móveis e *desktop* modernos. A interface foi criada com ferramenta *Qt Designer*, a qual permite desenvolver interfaces de aplicativos *desktop* em um ambiente "o que você vê é o que você ganha" (WYSIWYG - *What You See Is What You Get*). A Figura 27

ilustra a interface gráfica do Qt Designer, nela é possível criar um projeto em branco e adicionar os componentes (*widgets*) ao projeto utilizando o mecanismo arrastar-e-soltar. Esses componentes ficam localizados no menu lateral esquerdo e variam desde *containers* até botões, caixas de texto e rótulos.

Figura 27 – Interface gráfica do Qt Designer.

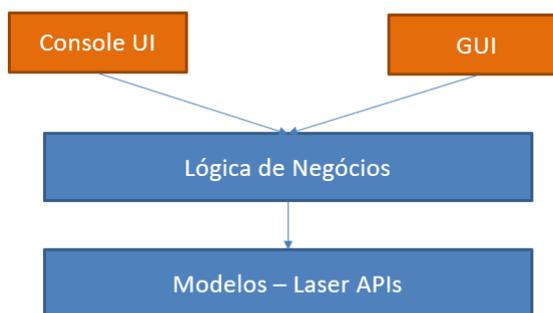


Fonte: Próprio Autor.

O Qt Designer gera projetos no formato *.ui*, uma linguagem de marcação interna da aplicação. Esse arquivo pode ser convertido para linguagem *python* e assim ser integrado a uma aplicação com as bibliotecas dos lasers. Para isso foi utilizada a plataforma *PyQT5*, um conjunto abrangente de bibliotecas *python* para o Qt v5.

Foi projetada uma arquitetura de software em camadas para o desenvolvimento da aplicação, essa arquitetura pode ser vista na Figura 28. A camada de modelos representa as APIs dos lasers, a camada intermediária representa a camada lógica do sistema e a camada de aplicação representa a aplicação *desktop* que interage com o usuário. No desenvolvimento da GUI foram utilizados conhecimentos como programação orientada a objetos, *design* de interface de usuários e *multithreading*.

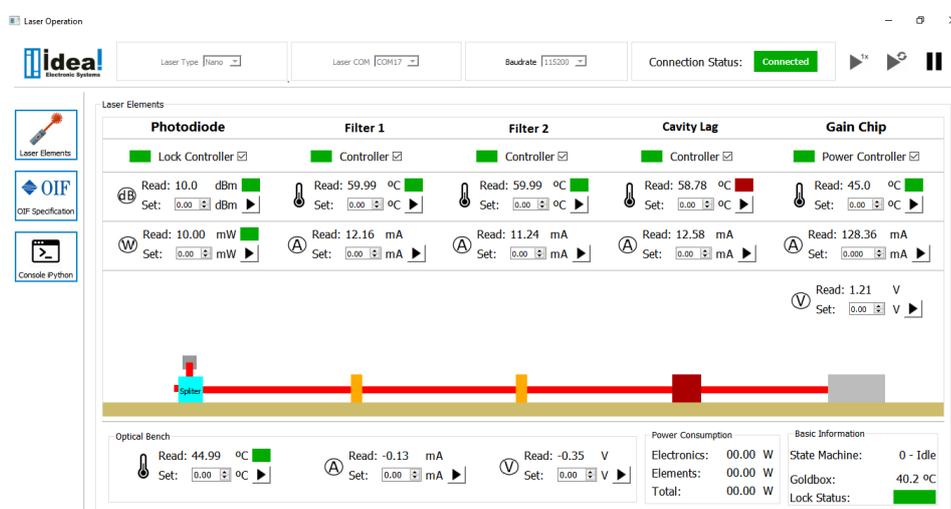
Figura 28 – Arquitetura de software da GUI.



Fonte: Próprio Autor

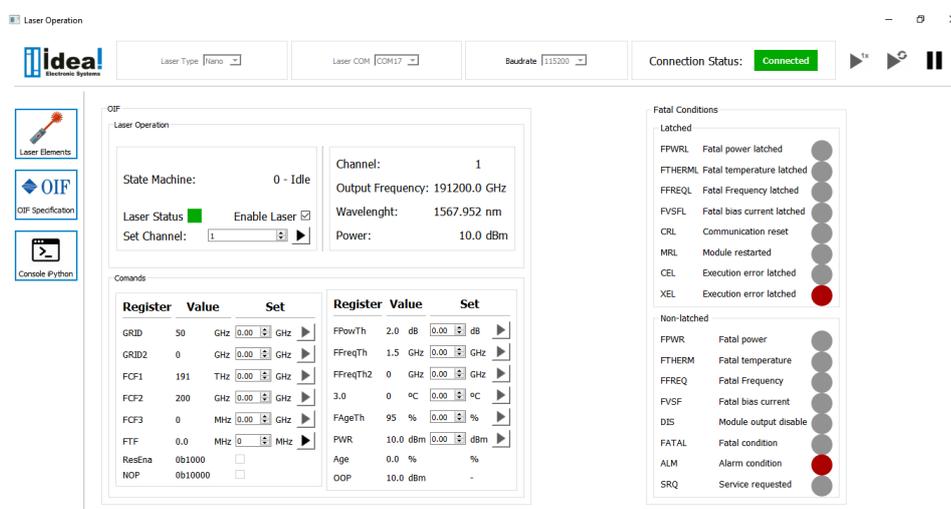
As Figuras 29 a 32 apresentam vistas da GUI desenvolvida. A aplicação contém um menu de configuração no topo, no qual é possível escolher o laser a se conectar, configurar a porta e o *baudrate* e realizar a conexão. O menu principal é o menu lateral, no qual é possível escolher o conteúdo central da aplicação. O primeiro item do menu, chamado *Laser Elements* permite visualizar e alterar os principais parâmetros do laser, o segundo item do menu representa uma janela com as os parâmetros do laser presentes na especificação da OIF, a ultima janela contém um console que torna possível utilizar as APIs diretamente. Por fim, a GUI apresenta uma janela com gráficos atualizados em tempo real de parâmetros como potência do laser, temperatura e corrente de elementos.

Figura 29 – GUI de Operação do Laser - Elementos do Laser



Fonte: Próprio Autor

Figura 30 – GUI de Operação do Laser - Especificação OIF.



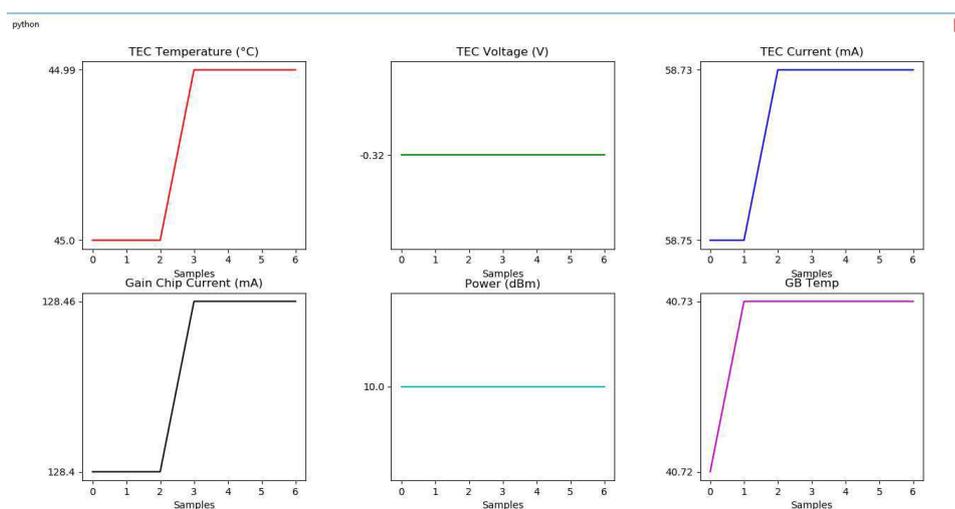
Fonte: Próprio Autor

Figura 31 – GUI de Operação do Laser - Python Console.



Fonte: Próprio Autor

Figura 32 – GUI de Operação do Laser - Gráficos.



Fonte: Próprio Autor

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 Idea! Electronic Systems é uma empresa que está posicionada nesse mercado, entregando tecnologia de ponta através de projetos de P&D.

Neste trabalho foram descritas as principais atividades realizadas pelo autor como estagiário na Idea!, colaborando em projetos de desenvolvimento de produto, no caso, em lasers sintonizáveis de cavidade externa dos tipos μ ITLA e η ITLA, Trabalhou-se em conjunto com as equipes de Fotônica e Engenharia de Produto, atuando como desenvolvedor de testes para o laser.

No texto relatou-se os treinamentos efetuados, destacando-se os estudos de nivelamento teórico. Também foram exibidos alguns resultados da contribuição realizada, como nos testes realizados nos lasers, no módulo óptico e a criação de uma GUI para operação dos lasers.

Das atividades do Plano de Trabalho para todo o ano de estágio, apenas uma não foi cumprida devido ao fato de ter-se priorizado os testes no módulo óptico. Além do mais, o trabalho executado contribuiu diretamente no desenvolvimento do produto. Por tais razões, o autor segue colaborando em novos projetos da empresa.

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. Portanto, muitas disciplinas estudadas durante a graduação foram pertinentes. Esta pluralidade de conhecimentos aplicados evidencia o grau do caráter técnico do estágio realizado.

Por fim, a oportunidade de estágio foi extremamente proveitosa e enriquecedora não apenas por oferecer cursos e treinamento para desenvolvimento técnico do aluno, como também pelo ambiente de colaboração e aprendizado existentes dentro da empresa, sempre desafiador e oferecendo todas as ferramentas necessárias para inovação.

Bibliografia

- [1] AGRAWAL, G. P. Fiber-Optic Communication Systems. [S.l.: s.n.], (2010). Wiley, fourth edition.
- [2] TRONCO, R. T.; AVILA, L.F. FUNDAMENTOS DE COMUNICAÇÕES ÓPTICAS, 2007.
- [3] RAJIV R.; KUMAR N.; SIVARAJAN, D. et al. Optical Networks: A Practical Perspective (Harcourt: San Diego, 1998).
- [4] YU, J.; ZHANG J.; LI, X. A survey on the smart homes using Internet of Things (IoT). International journal of advance research in computer science and management studies, [S.l.], 12 dez. 2014. v. 2.
- [5] COLDREN, L. A.; FISH, G. A. ; AKULOYA Y; et al. Tunable Semiconductor Lasers : A Tutorial, Journal of Lightwave Technology, vol. 22, no. 1, pp. 193–202, 2004.
- [6] 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
- [7] SEIMETZ, M. High-Order Modulation for Optical Fiber Transmission. Berlin: Springer, 2009.
- [8] BOSCO, G., POGGIOLINI, P., CARENA, et al. Analytical results on channel capacity in uncompensated optical links with coherent detection. Opt. Express, (2011).
- [9] IDEA ELECTRONIC SYSTEMS. 2019. Disponível em: <<https://www.idea-ip.com/>> Acesso em: 20 Fev. 2019.
- [10] DJORDJEVIC, I. B., RYAN, W., VASIC, B. Coding for Optical Channels. Springer. (2010).
- [11] LIMA, T. C. Redes ópticas de longa distância com transceptores de taxa de código variável. Master's thesis, (2015). Universidade de Brasília.
- [12] SALEH, B. E. A.; TEICH, M. C. (1991). Fundamentals of photonics. New York, Wiley.
- [13] CUNYUN, Y. Tunable External Cavity Diode Lasers, (Texas A&M University, USA), 2004.
- [14] ITU-T G.694.1, Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid, 2012. Disponível em: <<https://www.itu.int/rec/T-REC-G.694.1/en>> Acesso em: 20 Fev 2019.

[15] OIF-ITLA-MSA-01.3. Integrable Tunable Laser Assembly Multi Source Agreement, 2015. Disponível em: <<https://www.oiforum.com>> Acesso em: 20 Fev 2019.

[16] ZIEGLER, J.G ; NICHOLS, N. B. Optimum settings for automatic controllers. (1942).