

RELATÓRIO DE ESTÁGIO



Universidade Federal da Paraíba

Centro de Energias Alternativas e Renováveis

Departamento de Engenharia Elétrica

DESENVOLVIMENTO DE FIRMWARE E TESTES AUTOMATIZADOS PARA LASER SINTONIZÁVEL: ESTÁGIO SUPERVISIONADO REALIZADO NA IDEA! ELECTRONIC SYSTEMS

Apresentado e defendido por

Filipe Vidal Souto

Orientador: Rafael de Sousa Marinho

João Pessoa – 12 de novembro de 2018

Filipe Vidal Souto

**Desenvolvimento de Firmware e Testes Automatizados
Para Laser Sintonizável: Estágio Supervisionado
Realizado na Idea! Electronic Systems**

Relatório de Estágio Supervisionado
apresentado a Coordenação do Curso de
Engenharia Elétrica da Universidade
Federal da Paraíba, como requisito parcial
para obtenção do título de Engenheiro
Eletricista.

Universidade Federal da Paraíba
Centro de Energias Alternativas e Renováveis
Departamento de Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Msc. Rafael de Sousa Marinho

João Pessoa

2018

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

S728d Souto, Filipe Vidal.

Desenvolvimento de Firmware e Testes Automatizados Para Laser Sintonizável: Estágio Supervisionado Realizado na Idea! Electronic Systems / Filipe Vidal Souto. - João Pessoa, 2018.

58 f. : il.

Orientação: Rafael de Sousa Marinho.
Monografia (Graduação) - UFPB/CEAR.

1. Comunicações Ópticas. 2. Laser Sintonizável. 3. Desenvolvimento de Firmware. 4. Testes Automatizados.
I. Marinho, Rafael de Sousa. II. Título.

UFPB/BC

**Desenvolvimento de Firmware e Testes Automatizados Para
Laser Sintonizável: Estágio Supervisionado Realizado na Idea!
Electronic Systems**

por

Filipe Vidal Souto

Relatório de Estágio Supervisionado aprovado em 08 de novembro de 2018

Período letivo 2018.1

Prof. Msc. Rafael de Sousa Marinho

Orientador – UFPB

Msc. Felipe Bizerra Fidéles

Supervisor – Idea!

Prof. Dr. Fabrício Braga Soares de Carvalho

Avaliador – UFPB

Prof. Dr. José Maurício Ramos Neto

Avaliador – UFPB

João Pessoa

2018

*"Out of the night that covers me,
Black as the pit from pole to pole,
I thank whatever gods may be
For my unconquerable soul."*
William Ernest Henley, 'Invictus', 1888

A Isabelle, que sempre estará comigo independente da distância.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer a Felipe Fidéles e Juliano Oliveira, pela oportunidade, ensinamentos e compreensão ao longo do estágio.

Sou agradecido a toda a equipe de Fotônica e Engenharia de Produto, em especial a Luís, Diogo, Ricardo, Leandro, Alexandre, Torres e Vinícius, por todo o aprendizado ao longo desses meses.

Agradeço ao Prof. Rafael, por toda orientação durante o desenvolvimento desse trabalho. A todos que me receberam em Campinas e aos colegas que me motivam todos os dias. Agradeço também a minha família, que me deu todo suporte necessário nessa etapa.

Desenvolvimento de Firmware e Testes Automatizados Para Laser Sintonizável: Estágio Supervisionado Realizado na Idea! Electronic Systems

Resumo: Este trabalho apresenta as principais atividades desenvolvidas durante o estágio na Idea! Electronic Systems, realizado de Julho a Novembro de 2018. As atividades estão inseridas no âmbito dos projetos de 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 *firmware* e testes automatizados para um dos principais produtos da Idea!, o laser sintonizável de cavidade externa. Algumas contribuições foram aqui relatadas, como a transmissão de dados em tempo real para testes e a otimização dos sistemas de controle do laser.

Palavras-Chave: Comunicações Ópticas, Laser Sintonizável, Desenvolvimento de Firmware, Testes Automatizados.

Firmware Development and Automated Testing for Tunable Laser: Supervised Internship at Idea! Electronic Systems

Abstract: This work presents the main activities developed during the internship at Idea! Electronic Systems, held from July to November 2018. The activities are part of the 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 firmware and automated tests for one of Idea!'s main products, the external cavity tunable laser. Some contributions have been reported here as a system for real-time data transmission for testing and optimization of laser control systems.

Keywords: Optical Communications, Tunable Laser, Firmware Development, Automated Testing.

Sumário

Sumário	ix
Lista de Figuras	x
Lista de Abreviações	xii
Capítulo 1: Introdução	1
1.1 Idea! Sistemas Eletrônicos	3
1.2 O Setor	4
1.3 Objetivos	6
1.3.1 Objetivos Específicos	6
Capítulo 2: Fundamentação Teórica	8
2.1 Sistemas de Comunicações Ópticas	9
2.1.1 Transmissor	11
2.1.2 Receptor	13
2.1.3 Canal de Comunicação	14
2.2 Laser Sintonizável de Cavidade Externa	15
Capítulo 3: Atividades Realizadas	20
3.1 Treinamentos	21
3.2 Desenvolvimento de <i>Firmware</i> e Testes Automatizados para Laser Sintonizável	23
3.2.1 Otimização dos controladores do laser sintonizável de cavidade externa	32
Capítulo 4: Considerações Finais	40

Lista de Figuras

1.1	Algumas instituições parceiras. (a) PrimeSilicon (b) Itera (c) Loentropy (d) UFCCG (e) Unicamp (f) CPqD (g) Chipus (h) Eldorado	3
1.2	Algumas instalações técnicas. (a) estação de caracterização de PICs; (b) <i>active optical aligner</i> ; (c) <i>die bonder</i> ; (d) estação de testes de precisão de frequência; (e) estação de análise de potência e espectro óptico; (f) estação de validação de sistemas ópticos.	4
1.3	Mercado de lasers no mundo nas últimas cinco décadas.	5
2.1	Sistema óptico de comunicação.	10
2.2	Estrutura de recepção para sinais com multiplexação em polarizações ortogonais.	12
2.3	Fibra óptica.	14
2.4	Atenuação na fibra óptica em função do comprimento de onda.	16
2.5	Esquemático de um laser sintonizável genérico.	17
2.6	Relação entre o espectro óptico e cada elemento do laser sintonizável.	18
2.7	Relação entre o espectro óptico e cada elemento do laser sintonizável.	19
3.1	Equipamentos do laboratório de fotônica. (a) OSA Yokogawa AQ6370D (b) WM Keysight 86122C (c) Microscópio de Fibra Óptica (d) <i>Optical Power and Energy Meter</i> Thorlabs PMD100.	22
3.2	Laser sintonizável de cavidade externa μ ITLA desenvolvido pela Idea!.	23
3.3	Placa de testes para lasers.	25
3.4	Fluxograma de operação do laser.	26
3.5	Fluxograma da ação de ligar o laser.	27
3.6	Fluxograma da ação de sintonizar um canal.	28
3.7	Fluxograma das ações de ajuste e maximização da potência de saída.	28
3.8	Diagrama de blocos do controle de temperatura dos elementos da cavidade.	29
3.9	Alinhamento do filtro com os modos da cavidade. (a) Bom alinhamento. (b) Mau alinhamento.	30
3.10	Diagrama explicativo de como a modulação AM aplicada em algum dos elementos de sintonia da cavidade funciona para detectar o ponto de maximização da potência óptica.	31
3.11	Diagrama de blocos do controle de temperatura dos elementos da cavidade considerando os efeitos da modulação em amplitude para algoritmo de maximização de potência.	32
3.12	Diagrama de blocos do controle da maximização de potência de saída.	33
3.13	Diagrama de blocos do controle de ajuste de nível potência.	33
3.14	Adaptador USB-UART (FTDI FT232RL).	34

3.15	Sinal oscilatório aplicado sobre a temperatura do elemento de cavidade com controlador de temperatura atuando sobre a corrente elétrica.	35
3.16	Resultados do controle de temperatura sob efeito da modulação AM após linearização. Amplitude de modulação para diferentes <i>setpoints</i> de temperatura: (a) 30 m°C (b) 50 m°C (c) 70 m°C. (d) Essas amplitudes para um mesmo <i>setpoint</i> de temperatura.	36
3.17	Potência óptica no laser e corrente no <i>Gain Chip</i> para um <i>sweep</i> nos valores de K_p do controlador de ajuste de nível de potência.	37
3.18	Potência óptica do laser e corrente no <i>Gain Chip</i> para um <i>sweep</i> nos valores de K_i do controlador de ajuste de nível de potência.	38
3.19	Diferentes <i>setpoints</i> de potência para o controle de ajuste de nível de potência.	39

Lista de Abreviações

ASICs – *Application Specific Integrated Circuits.*

CW – *Continuous Wave.*

DFB – *Distributed Feedback.*

DSP – *Digital Signal Processing.*

ECL – *External Cavity Laser.*

ECTL – *External Cavity Tunable Laser.*

EVB – *Evaluation Board.*

GPIO – *General Purpose Interface Bus.*

IoT – *Internet of Things.*

ITU – *International Telecommunication Union.*

LASER – *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation.*

LED – *Light Emitting Diode.*

LO – *Local Oscillator.*

LOC – *laboratory-on-a-chip.*

OIF – *Optical Internetworking Forum.*

OSA – *Optical Spectrum Analyzer.*

PCB – *Printed Circuit Board.*

PICs – *Photonic Integrated Circuits.*

PID – *Proporcional Integral Derivativo.*

RF – *Radiofrequência.*

RTOS – *Real Time Operating Systems.*

SMF – *Single Mode Fibers.*

UART – *Universal Asynchronous Receiver/Transmitter.*

USB – *Universal Serial Bus.*

WM – *Wavelength Meter.*

μITLA – *micro Integrable Tunable Laser Assembly.*

Capítulo 1:

Introdução

Os sistemas de comunicações ópticas usam as informações transportadas pela luz. A emissão, o processamento e a detecção de luz que vai do infravermelho aos raios-x são possíveis apenas graças aos avanços nas tecnologias ópticas e na fotônica [1]. Da fibra óptica e telecomunicações, à imagens médicas e pesquisa de câncer, estes domínios estão avançando as tecnologias críticas de hoje.

Campos especializados da física e da engenharia com base na ciência da luz, a óptica e a fotônica são umas das responsáveis pelo progresso da qualidade de vida em diversas áreas, desde a tela do computador e a Internet até o telefone celular. Essas tecnologias essenciais são predominantes em quase todos os aspectos da vida cotidiana e continuarão a crescer e melhorar o dia-a-dia das pessoas. Se olharmos para toda a gama de usos presentes e potenciais da óptica e da fotônica, podemos identificar aplicações em redes, comunicação de dados, telecomunicação, processamento de sinal, geração de imagens, *displays*, fotônica em sistemas de Radiofrequência (RF) e *wireless*, sistemas de ondas milimétricas ou micro-ondas, *laboratory-on-a-chip* (LOC), diagnóstico médico, sensores de variáveis químicas/biológicas/físicas, redes neurais, robótica, conversão analógica-digital, computação óptica e testes [2], [3], dentre outras.

É nesse contexto de inovação e tecnologia que diversas empresas concorrem e no enquadramento deste trabalho, a empresa sede onde nossas atividades de estágio foram elaboradas é a Idea!. Este trabalho está organizado da seguinte forma: no capítulo um são apresentados as características da empresa e o setor dentro da empresa no qual nosso estágio foi desenvolvido, bem como os objetivos propostos nesse trabalho; o segundo capítulo apresenta o levantamento de arcabouço teórico no âmbito das comunicações ópticas, que foi desenvolvido durante a etapa inicial e de treinamento no período do estágio; no terceiro capítulo constam as atividades realizadas no período que compreende o estágio, destacando o desenvolvimento de *firmware* para laser sintonizável; por fim, o quarto capítulo contém algumas considerações finais sobre o trabalho desenvolvido.

1.1 Idea! Sistemas Eletrônicos

A Idea! Sistemas Eletrônicos é uma empresa privada especializada no domínio das Comunicações Ópticas e localizada em Campinas – SP. Ela é uma empresa de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) que desenvolve soluções para o mercado global nos campos da microeletrônica e fotônica para sistemas de comunicações ópticas de alta velocidade – acima de 100 Gb/s.

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, colaboram 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 businesses*, *Internet of Things* (IoT), aplicações em *Data Science*, processamento de dados em experimentos de alta complexidade (e.g. colisão de partículas), *streaming*, *cloud computing*, etc.

A Idea! possui uma rede de colaboradores de quase 100 pessoas, entre os internos e externos, que estão divididos entre os departamentos técnicos e administrativos. Na Fig. 1.1 tem-se alguns exemplos das instituições associadas, que vão desde parceiros comerciais à universidades. Entre seus parceiros corporativos, encontram-se instituições de pesquisa, desenvolvimento e inovação, como o Instituto Eldorado e o CPqD. Esses acordos estratégicos vão desde o compartilhamento de quadro técnico a instalações especializadas, como *clean rooms* e laboratórios de testes, potencializando a capacidade de serviços e produtos da empresa.

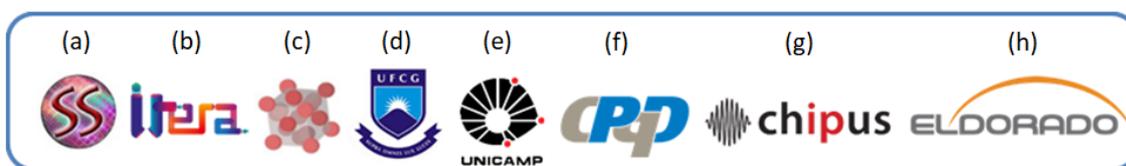


Figura 1.1: Algumas instituições parceiras. (a) PrimeSilicon (b) Itera (c) Loentropy (d) UFCG (e) Unicamp (f) CPqD (g) Chipus (h) Eldorado

Fonte: Produzido pelo autor.

Dentre as tecnologias desenvolvidas na empresa, destacam-se: *Application Specific Integrated Circuits* (ASICs), *Photonic Integrated Circuits* (PICs), laser sintonizáveis e amplificadores

ópticos, sempre com as comunicações ópticas como um motivador. Os mercados de telecomunicações e de comunicação de dados (centros de dados) são os principais alvos das soluções da Idea!. Na Fig. 1.2 pode-se ver algumas estações de testes, caracterização e montagem, que compõem as avançadas instalações técnicas da empresa.

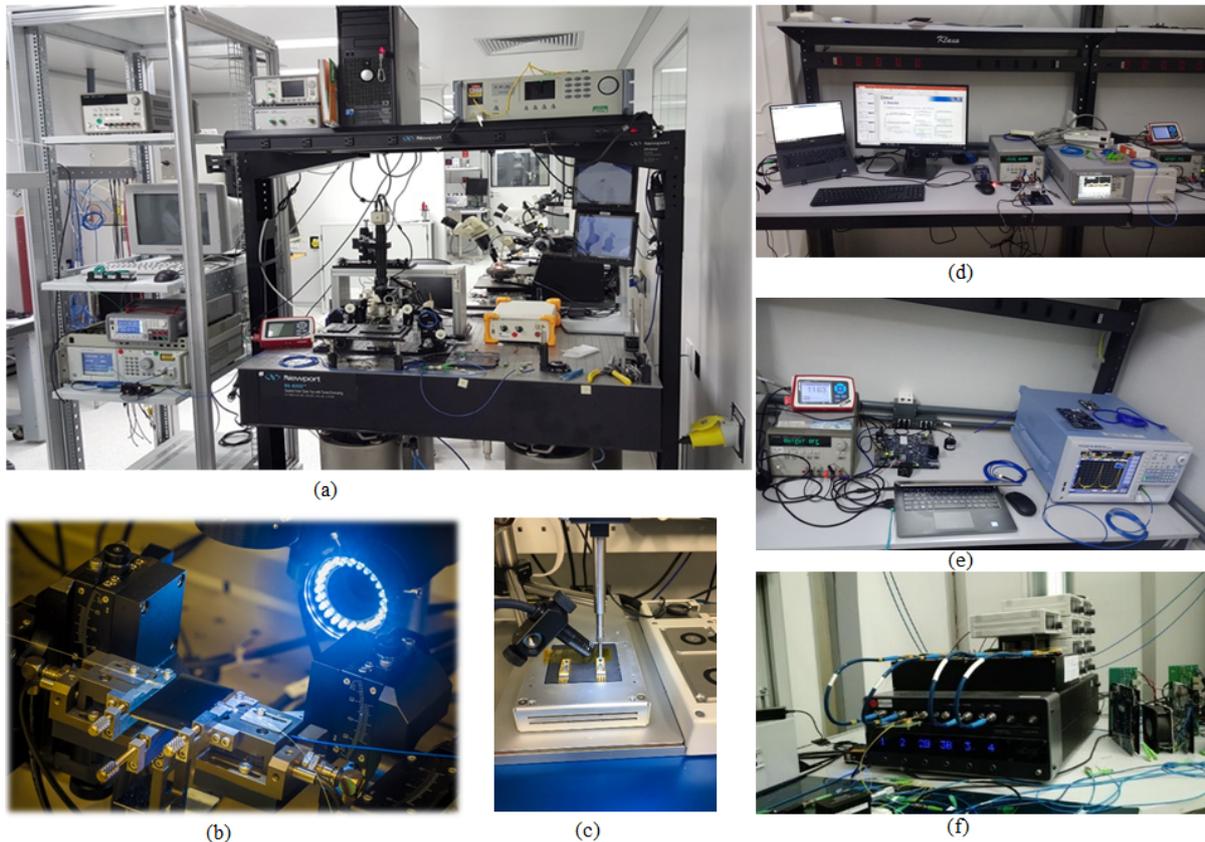


Figura 1.2: Algumas instalações técnicas. (a) estação de caracterização de PICs; (b) *active optical aligner*; (c) *die bonder*; (d) estação de testes de precisão de frequência; (e) estação de análise de potência e espectro óptico; (f) estação de validação de sistemas ópticos.

Fonte: Adaptado do database da Idea!.

1.2 O Setor

As inovações podem ser a única fonte de crescimento da indústria e há poucas inovações que trouxeram um impacto tão extenso quanto o advento das comunicações por fibra óptica. A importância relativa da tecnologia de fibra óptica é evidenciada pela sua velocidade e eficácia

na modelagem da infraestrutura de comunicações em tão curto período, como vem ocorrendo nos últimos anos [4].

O mercado de comunicações ópticas está se expandindo, conforme evidenciado pelo crescimento nas receitas e margens dos fornecedores [1]. Como pode ser observado na Fig. 1.3, a indústria de lasers vem crescendo constantemente há mais de cinco décadas, com valores de vendas anuais de aproximadamente 10 bilhões de dólares atualmente. Além disso, as empresas estão gastando para aumentar a capacidade de produção e as perspectivas de crescimento são boas [1].

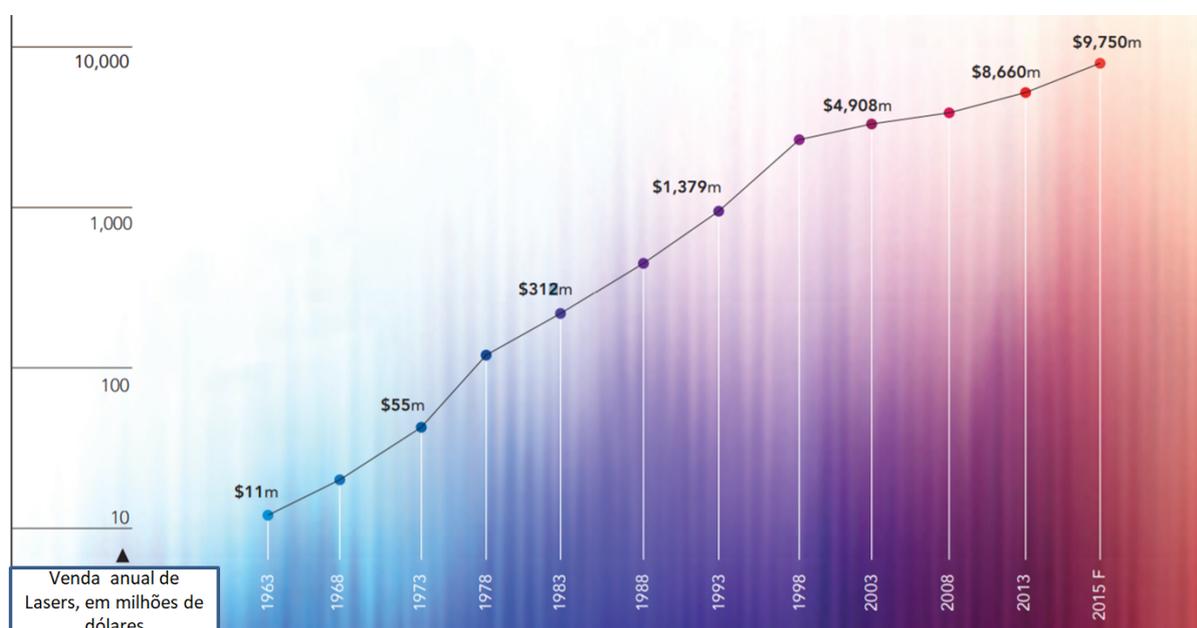


Figura 1.3: Mercado de lasers no mundo nas últimas cinco décadas.

Fonte: Adaptado de [1].

O que impulsiona o crescimento hoje é a corrida desenfreada das empresas da Web 2.0 para construir *datacenters* em larga escala e capturar o mercado de serviços em nuvem e os consumidores. Muito investimento está sendo feito para conectar equipamentos dentro dos *datacenters* e conectar *datacenters* de distâncias que abrangem alguns quilômetros a milhares de quilômetros e, até mesmo, em redes submarinas. A maior demanda hoje é conectar *switches* dentro do *datacenter*, forçando os fornecedores ópticos a desenvolver e fornecer novas soluções de alta capacidade. Enquanto isso, as empresas de telecomunicações também estão gastando

para expandir suas redes. A batalha pela tecnologia 5G, que exigirá uma robusta infraestrutura de fibras ópticas para suportar a rede sem fio, está apenas começando. Esses fatores aqui citados combinados têm um profundo impacto na demanda de volume por conectividade de fibra e transceptores de alta largura de banda, impulsionando o crescimento da receita do setor de comunicações ópticas [5].

Esse mercado de equipamentos, componentes e fibras de rede óptica movimenta 30 bilhões de dólares anualmente e suporta a "camada física" essencial para as redes de comunicações, um mercado de 400 bilhões de dólares anuais [1]. Este negócio, por sua vez, possibilita todos os serviços de telecomunicações, que movimenta mais de 3,9 trilhões de dólares todo ano. Além disso, a indústria de fotônica tem receita anual de mais de 400 bilhões de dólares, com mais da metade desse montante proveniente da venda de *displays* e outros componentes para indústria de eletrônicos [1].

É nesse mercado que a Idea! está posicionada, provendo tecnologia de ponta através de projetos de P&D – atividade vital para as comunicações ópticas.

1.3 Objetivos

De maneira geral, este trabalho tem como objetivo, conforme definido no plano de trabalho do estágio, o desenvolvimento de *firmware* para produto e testes automatizados para laser sintonizável. Para tal, o estagiário deve ser capacitado em processo de desenvolvimento de *firmware*, no uso de ferramentas de auxílio ao desenvolvimento de *firmware* e de testes automatizados de *firmware*/sistema, como também em programação em C/C++ para processador ARM e em programação em *Python* para testes automatizados de *firmware* via controle de equipamentos de teste.

1.3.1 Objetivos Específicos

- Compreender o funcionamento óptico dos principais blocos que compõem os principais dispositivos ópticos integrados para comunicação de alta capacidade (Laser sintonizável);

Capítulo 1 – Introdução

- Compreender o funcionamento de *hardware* dos principais blocos que compõem os principais dispositivos ópticos integrados para comunicação de alta capacidade (Laser sintonizável);
- Compreender o funcionamento do *firmware* embarcado de sistemas ópticos, dos algoritmos de controle dos dispositivos até o processo de gravação e testes desses;
- Compreender o funcionamento de microcontroladores e microprocessadores e suas diferenças;
- Desenvolver aplicações embarcadas em sistemas ópticos utilizando C/C++, controle de versão, ferramentas de *debug*.

Capítulo 2:

Fundamentação Teórica

Como primeira etapa de treinamento, foi realizada uma revisão bibliográfica e estudos de nivelamento teórico sobre as comunicações ópticas. Neste capítulo, alguns dos conteúdos estudados serão apresentados de maneira breve, abordando temas como os sistemas ópticos, sua topologia e seus módulos. Por fim, será introduzido o estudo de lasers de cavidade externa.

2.1 Sistemas de Comunicações Ópticas

Como descrito em [6], 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. A Fig. 2.1 contém um esquema básico de um sistema óptico de comunicação. Pode-se dividir este sistema em três partes, sendo elas o transmissor óptico, o canal de comunicação e o receptor óptico.

O objetivo do transmissor óptico é criar o sinal óptico de informação a partir de sinais elétricos e enviá-lo ao canal de comunicação. Ele é formado por um mapeador de símbolos que realiza a codificação dos dados de entrada segundo a constelação de um formato de modulação específico. Em seguida, um filtro é utilizado com o intuito de formatar os pulsos que representam os símbolos mapeados, gerando assim sinais elétricos modulantes. 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 [7].

Antes de chegar ao destino, o sinal transmitido se propaga por um meio, que no caso das comunicações ópticas é a fibra. O canal é composto por uma fibra óptica e alguns outros componentes adicionais de comunicação. Idealmente, o sinal que chega ao receptor deveria ser idêntico ao sinal transmitido após o modulador. Todavia, a propagação em um canal de comunicação óptica causa distorções no sinal transmitido, fazendo com que o sinal que é

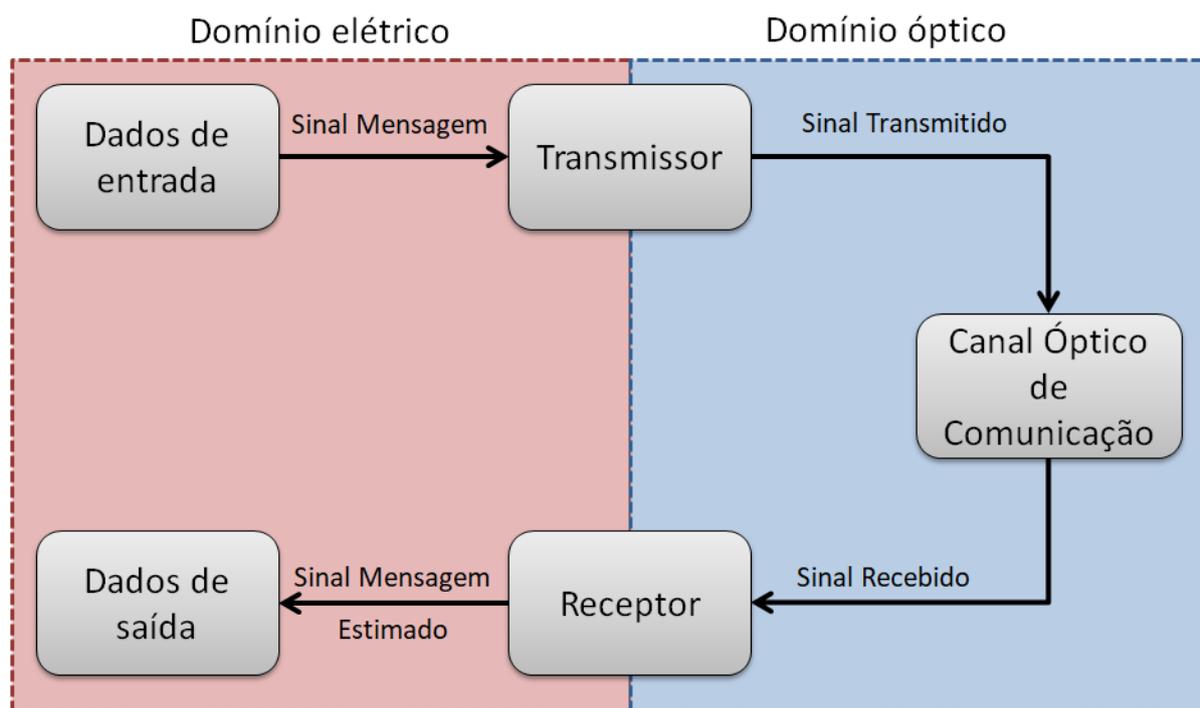


Figura 2.1: Sistema óptico de comunicação.

Fonte: Produzido pelo autor.

recebido pelo receptor seja uma versão corrompida do original. Isso ocorre pois, na fibra, o sinal sofre efeitos dispersivos e atenuantes [8]. Tais efeitos serão descritos mais à frente.

O sinal distorcido proveniente do canal de comunicação é detectado pelo receptor óptico, que possui como objetivo recuperar a informação enviada pelo transmissor e entregá-la ao destino. O receptor óptico tem a função de transformar a informação contida em um sinal representado no domínio óptico para um sinal com as mesmas informações no elétrico, extraindo a informação transmitida e processando-a da maneira mais conveniente. Em síntese, o receptor é composto por elementos opostos ao transmissor, como os fotodetectores, circuitos eletrônicos de *Digital Signal Processing* (DSP), além de decodificadores de símbolos e de um *Local Oscillator* (LO) – tudo a fim de obter um sinal elétrico mais fiel possível ao original.

Um ponto importante nas comunicações ópticas são as suas taxas de transmissão e a alocação do espectro óptico. Os sistemas de comunicações ópticas se baseiam em conexões rígidas, em que os canais possuem taxas fixas de transmissão, sendo acomodadas em porções do espectro (*slots*) que são definidas em uma grade com espaçamentos de 50 GHz [7], estipulada

pela União Internacional de Telecomunicações (ITU). Os sistemas de transmissão baseados em 100 Gb/s que vêm sendo comercializados nos últimos anos atendem essas especificações. Como tais sistemas são compatíveis com a grade de 50 GHz já implantada, a necessidade de substituir a rede não surgiu. As indústrias de telecomunicações e de comunicação de dados estão considerando agora uma taxa de dados de transmissão padrão além de 100 Gb/s – por tal razão, 400 Gb/s está recebendo muita atenção. Infelizmente, a largura espectral ocupada por 400 Gb/s em formatos de modulação padrão é muito grande para a grade da ITU de 50 GHz, e forçá-la a adotar um formato de modulação de eficiência espectral maior só permitiria curtas distâncias de transmissão [9]. A Fig. 2.2 mostra uma grade fixa da ITU (superior) versus uma grade flexível (inferior). A rede fixa não suporta taxas de bits de 400 Gb/s e 1 Tb/s em formatos de modulação padrão, pois elas se sobrepõem a pelo menos um limite da grade de 50 GHz. Adotar grades flexíveis permite não apenas acomodar os “supercanais” (conexões de bandas mais largas), como também evita o desperdício de banda por canais com banda mais estreita.

Por tais razões, a ITU introduziu um novo padrão recomendado (G.694.1), corroborando com o paradigma de redes ópticas flexíveis. Neste novo conceito, as grades são flexíveis e possuem largura de banda de múltiplos inteiros de 12,5 GHz, o que se traduz em uma granularidade superior àquela dos sistemas com grade fixa. Neste conceito de maior granularidade de largura de banda, para que se consiga evitar ao máximo o desperdício de espectro, os intervalos de frequência permitidos têm uma frequência central nominal (THz) definida por $193,1 + n \times 0,00625$, no qual n é um inteiro positivo ou negativo [9].

2.1.1 Transmissor

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. Nas últimas décadas, as fontes de luz foram melhoradas de forma crescente [10]. Nos transmissores de sistemas ópticos, a fonte de luz (laser) atua como a portadora do sinal, podendo ser modulada direta e indiretamente. A modulação direta ocorre quando os dados de entrada são modulados na corrente do laser. Ao realizar esse tipo de modulação, a largura do

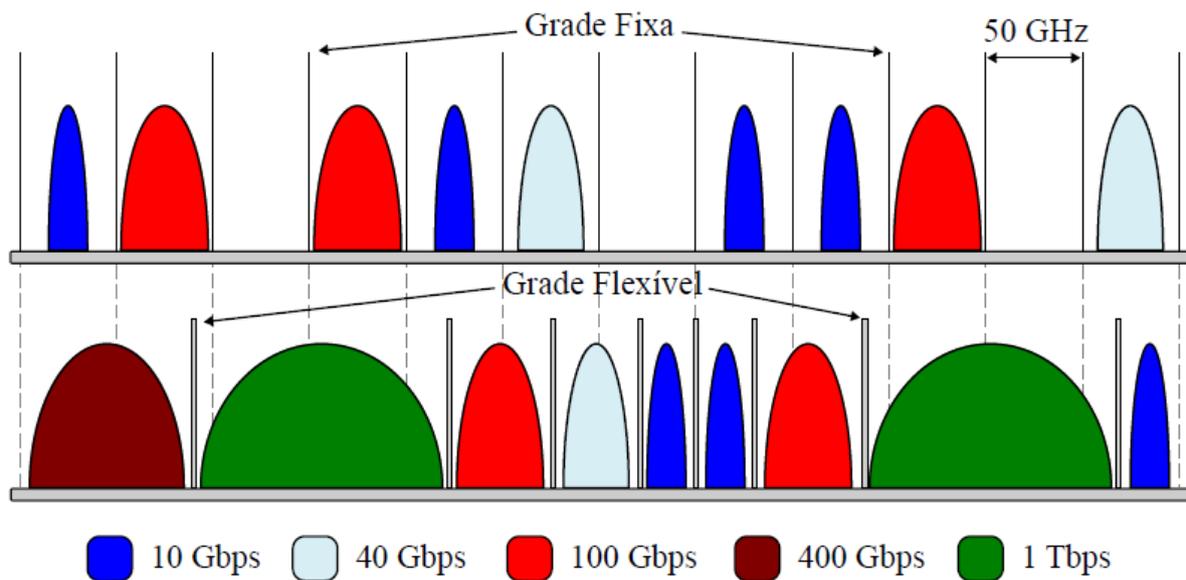


Figura 2.2: Estrutura de recepção para sinais com multiplexação em polarizações ortogonais.

Fonte: [7].

espectro óptico emitido é determinada pela modulação de frequência inerente ao laser sob modulação de amplitude. Tal efeito é referido como *chirp* e induz um alargamento espectral no sinal emitido pelo laser [10]. Para evitar esse efeito, a modulação externa pode ser empregada, onde o laser atua como uma fonte de luz de onda contínua – *Continuous Wave* (CW).

Na situação em que o laser opera como fonte óptica de onda contínua, a inserção da informação a ser transmitida pelo sinal é realizada por um componente externo, que não interfere no funcionamento do laser. Portanto, essa situação favorece a modelagem do sinal produzido pela fonte óptica devido à dissociação desses sinais [7], [10].

É possível expressar o campo elétrico normalizado de uma portadora óptica produzida por um laser ideal em operação no regime CW da seguinte forma:

$$\mathbf{E}_{cw}(t) = \sqrt{P_s} \cdot e^{j(\omega_s t + \phi_s)} \cdot \mathbf{e}_s \quad (2.1)$$

Da Equação 2.1, P_s é a amplitude do campo, ω_s é a frequência de operação em radianos por segundo, ϕ_s é a fase no instante inicial e \mathbf{e}_s é o vetor da polarização do portador óptico. Aplicando-se diferentes modulações, a informação pode ser transmitida não somente pela

variação da amplitude e/ou frequência, mas também pela polarização, ao aplicar-se técnicas de multiplexação, como ocorre nos sistemas ópticos coerentes.

2.1.2 Receptor

Em muitos sistemas de telecomunicações, os receptores são baseados na detecção coerente, pois apresentam uma alta sensibilidade na recepção e, como é conhecido em outros sistemas de telecomunicações, podem selecionar um canal a partir de um conjunto 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 1980 e início dos anos 1990.

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 LO não necessariamente precisa ser igual à frequência central do sinal óptico de informação. Neste tipo de detecção, é possível se recuperar todos os parâmetros da onda óptica recebida na forma de ondas elétricas: a amplitude, a fase e o estado de polarização [7], [11].

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. Demonstra-se na equação a seguir, de forma simplificada, seu funcionamento [11]:

$$I_{sada}(t) = R \cdot P_{entrada}(t) \quad (2.2)$$

em que, $I_{sada}(t)$ é a corrente elétrica (A) na saída do fotodetector, $P_{entrada}(t)$ é a potência (W) do sinal óptico na entrada do fotodetector e R é a responsividade do fotodetector (A/W).

2.1.3 Canal de Comunicação

Os sistemas de comunicações ópticas são sistemas de ondas de luz que empregam fibras ópticas para transmissão de informações. No âmago destes sistemas está o cabo de fibra à base de vidro de sílica (SiO₂) 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 ao advento da "era da informação" que vivemos hoje [6].

A fibra é essencialmente um fino pedaço estreito de vidro que é fechado por um invólucro de plástico protetor. Os cabos de fibra têm uma flexibilidade menor em comparação com os cabos de cobre, mas são muito mais leves. Na Fig. 2.3 está ilustrada a vista lateral e a seção transversal de uma típica fibra óptica. O revestimento do núcleo também é feito de vidro de sílica, entretanto possui um índice de refração maior ($n_{\text{revest.}} > n_{\text{núcleo}}$). Essa diferença de índices faz com que a luz fique confinada dentro do núcleo, caso seu ângulo de incidência θ seja superior ao ângulo de incidência crítico definido por:

$$\sin \theta_c = \frac{n_{\text{núcleo}}}{n_{\text{revest.}}} \quad (2.3)$$

O núcleo para as fibras monomodo (*Single Mode Fibers*) geralmente possui um diâmetro de 8 a 10 μm . Já o revestimento possui diâmetro na faixa de 125 μm , enquanto o invólucro varia de 250 a 400 μm .

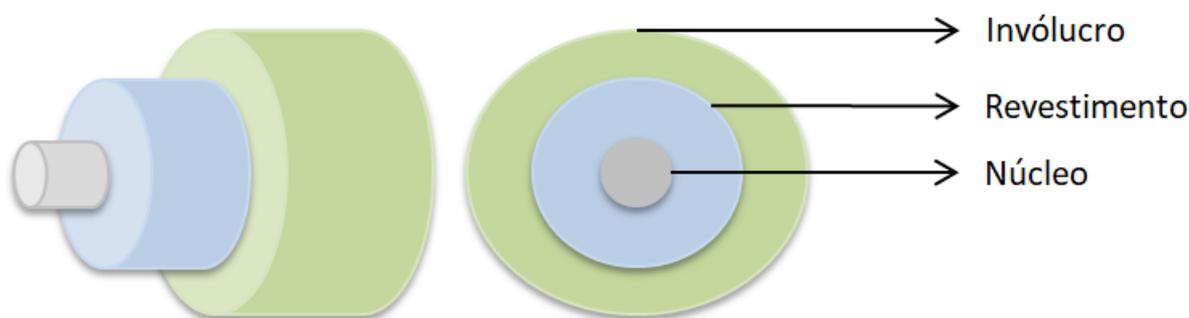


Figura 2.3: Fibra óptica.

Fonte: Produzido pelo autor.

Como dito anteriormente, os sistemas de comunicações ópticas estão sujeitos a efeitos de atenuação e degradação do sinal. Na Fig.2.4 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 aos 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) [10].

O espectro óptico onde a fibra apresenta menor atenuação é na região dos 1550 nm, em uma largura de banda de aproximadamente 100 nm. Este espectro foi dividido em bandas de 30 nm 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 [12].

2.2 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. A luz emitida pelo laser é notável pelo seu alto 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 seu pequeno tamanho, faz com que os lasers de estado sólido sejam a melhor opção para fonte óptica em sistemas de comunicações ópticas, principalmente a altas taxas de transmissão [11]. Inovação essencial para as comunicações ópticas, os primeiros lasers semicondutores de estado sólido foram desenvolvidos na década de 1960 [4]. De lá para cá, muitos modelos de lasers a diodo já foram

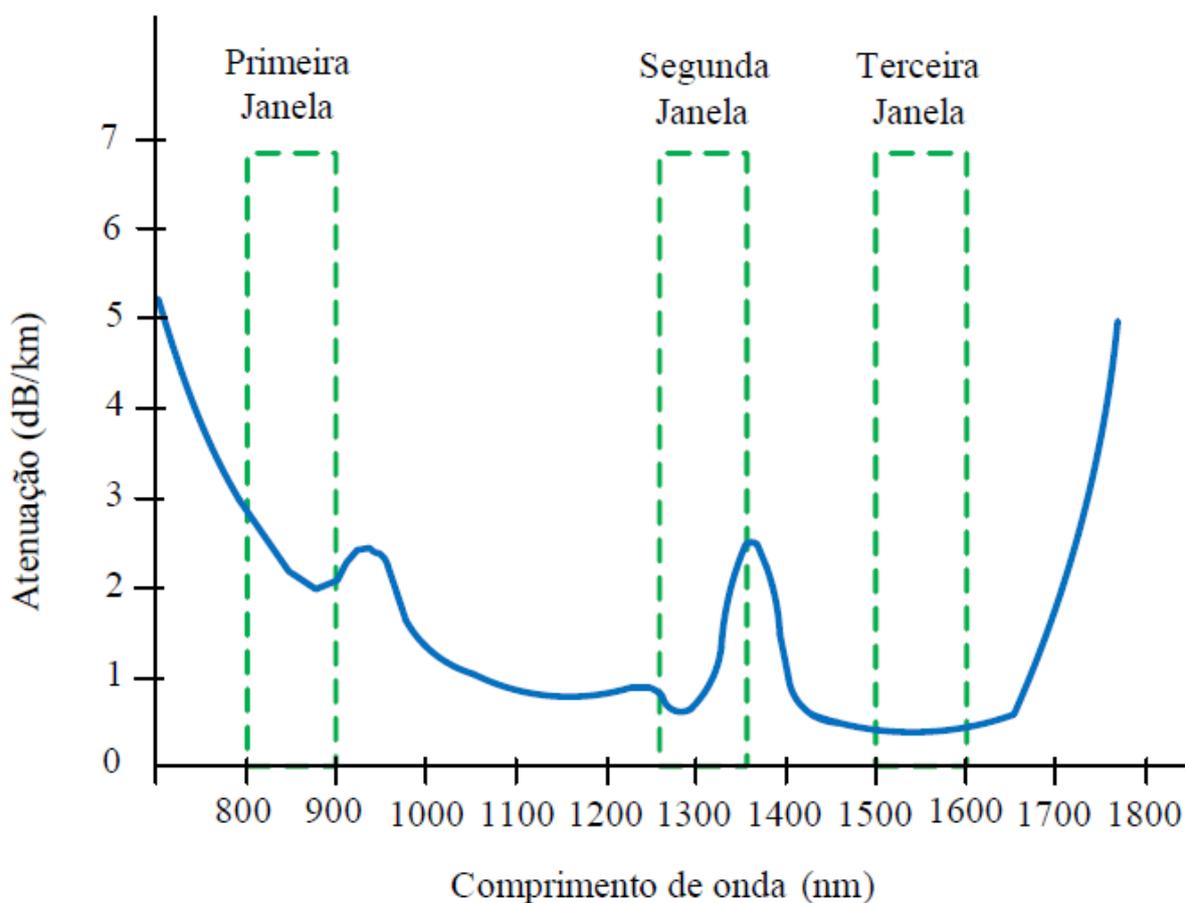


Figura 2.4: Atenuação na fibra óptica em função do comprimento de onda.

Fonte: [8].

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) [10].

Os ECLs fornecem diversas vantagens, principalmente a capacidade de sintonia em uma larga banda – sendo estes nomeados de *External Cavity Tunable Laser* (ECTL) –, redução drástica de custos e larguras de linhas bem estreitas [13]. Também oferece confiabilidade, alta eficiência, tamanho compacto e área de emissão compatível com a fibra.

Inspirado no modelo apresentado por Coldren et al. ([13]), tem-se na Fig. 2.5 a arquitetura genérica de um laser sintonizável de cavidade externa. Cada elemento representado pelos

blocos é responsável por conferir alguma das características desejáveis em um ECTL. Coldren et al. ([13]) também explica que o esquemático representa bem como um laser semiconductor sintonizável evolui à medida que cada elemento é adicionado. Partindo de um laser Fabry-Pérot mais básico, que tem apenas o chip de ganho e os dois elementos espelhados simples, para um laser de frequência única ao adicionar um filtro de seleção de modo. Então, progride para um laser de frequência única sintonizável ao adicionar a possibilidade de ajustar a posição dos espelhos e a frequência central do filtro de seleção de modos, além de adicionar um novo elemento para ajuste da fase da cavidade.

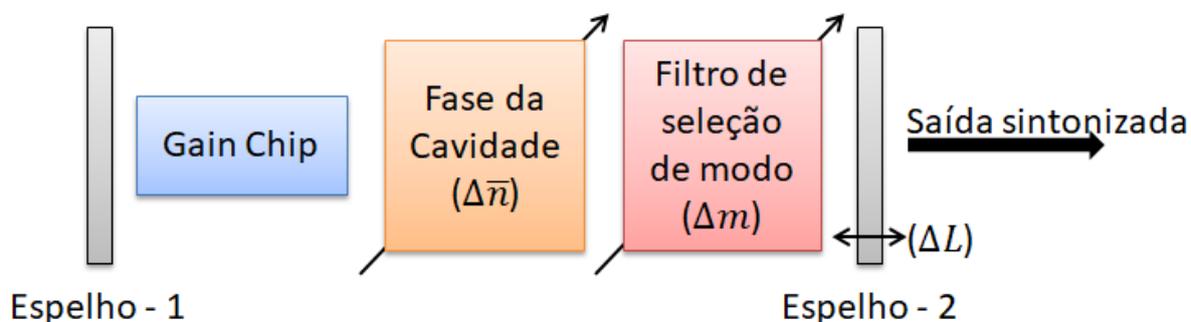


Figura 2.5: Esquemático de um laser sintonizável genérico.

Fonte: Produzido pelo autor.

Na Fig. 2.6, tem-se 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 índice de refração efetivos da cavidade, determinado pela posição dos espelhos e pelo elemento de ajuste de fase da cavidade. O filtro de seleção de modo determina em 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.

A modelagem matemática desse comportamento é descrita na Eq. 2.4, que fornece a relação entre λ (o comprimento de onda do laser), o número do modo de cavidade m , índice efetivo de refração visto pela cavidade (\bar{n}) e o comprimento efetivo da cavidade L . Obviamente, se alguma destas variáveis mudarem, o comprimento de onda também deve mudar. A mudança

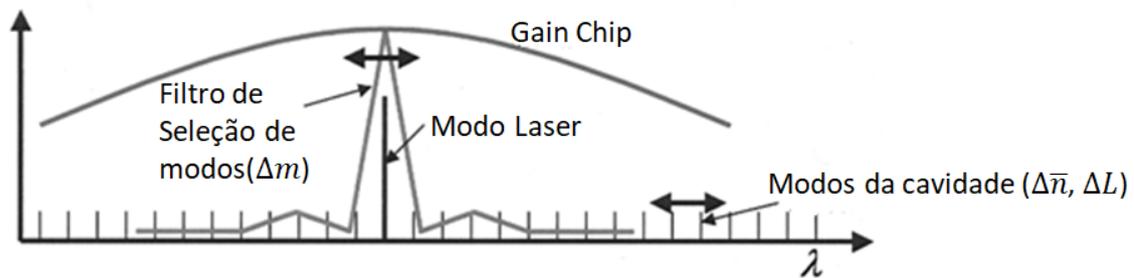


Figura 2.6: Relação entre o espectro óptico e cada elemento do laser sintonizável.

Fonte: Adaptado de [13].

relativa no comprimento de onda derivado da Eq. 2.4 é dada na Eq. 2.5. Como indicado, a alteração relativa do comprimento de onda é diretamente proporcional à alteração relativa no comprimento, índice ou modo da cavidade.

$$\frac{m\lambda}{2} = \bar{n}L \quad (2.4)$$

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\Delta\bar{n}}{\bar{n}} + \frac{\Delta L}{L} - \frac{\Delta m}{m} \quad (2.5)$$

É importante evidenciar que a sintonia do laser é periódica. Idealmente, quando se é feita uma varredura na sintonia de algum desses elementos da cavidade, tem-se um resultado típico como o ilustrado pela Fig. 2.7, que relaciona a potência óptica de saída pelo *sweep* do elemento realizado, estando sintonizado em um mesmo comprimento de onda λ .

Por fim, é importante apontar que para ser utilizado em sistemas de transmissão coerente, um laser sintonizável deve atender a várias especificações, como: alta potência de saída, normalmente acima de 13 dBm; larga faixa de sintonia, que deve ser em torno de 40 nm (tamanho médio das bandas de comprimento de onda); estreita largura de linha, idealmente menor que 100 kHz; e baixo consumo de potência, preferencialmente menor que 3,5 W. Essas especificações serão retomadas no capítulo seguinte, pois são características que devem ser cumpridas durante o desenvolvimento do produto.

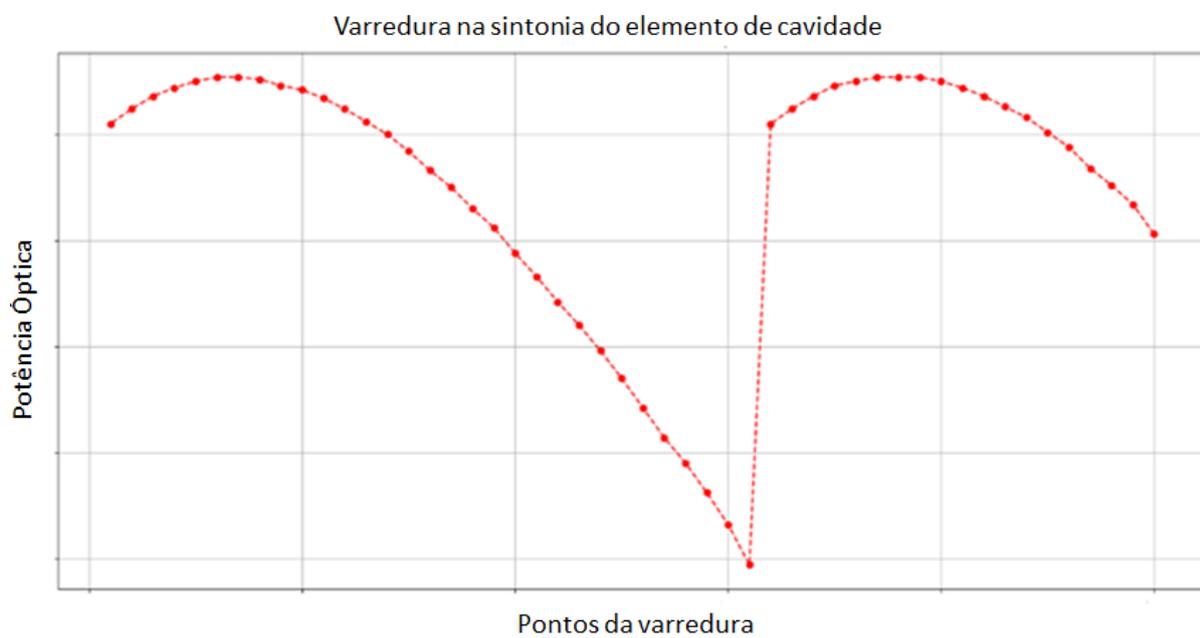


Figura 2.7: Relação entre o espectro óptico e cada elemento do laser sintonizável.

Fonte: Produzido pelo autor.

Capítulo 3:

Atividades Realizadas

Nesta seção serão descritas as atividades desenvolvidas pelo autor durante o período de estágio na empresa.

3.1 Treinamentos

Durante o período inicial do estágio 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, gerenciamento de projetos, *firmware workflow*, *guidelines* de desenvolvimento de software, linguagem (*Markdown*) para documentação, dentre outros. Tais capacitações contribuem ainda mais para a evolução profissional do aluno.

No âmbito de desenvolvimento de *firmware* para sistemas embarcados, foram oferecidos cursos de aperfeiçoamento técnico, como os cursos de *baremetal C* para microcontroladores ARM; programação avançada em C++; desenvolvimento de *bootloaders* para processadores ARM; desenvolvimento de *drivers* de periféricos embarcados; *Real Time Operating Systems* (RTOS).

Outras capacitações também ocorreram, como instruções no Laboratório de Fotônica, que envolviam os diferentes tipos de conectores de fibras ópticas, seu manuseio e limpeza para correta utilização dos equipamentos de testes do laboratório. Também ocorreram treinamentos de como utilizar os equipamentos e ferramentas do laboratório – que podem ser vistos na Fig. 3.1 –, tais como o microscópio de fibra óptica, o analisador de comprimento de onda de precisão (WM), o analisador de espectro óptico – do inglês *Optical Spectrum Analyzer* (OSA), medidores de potência óptica, dentre outros. Esses equipamentos comunicam-se com as estações de trabalho através de protocolos GPIB ou USB. Aprender a utilizá-los remotamente também foi uma das etapas do treinamento. Tudo isso regido por instruções de boas práticas e

procedimentos de segurança no laboratório, com a intenção de promover um ambiente seguro, limpo e eficiente para as atividades de teste e desenvolvimento.

Por fim, o estagiário também foi instruído nos produtos técnicos desenvolvidos pela empresa que seriam utilizados em suas atividades de desenvolvimento, como hardware e metodologias de teste de lasers sintonizáveis; como também compreensão e utilização da interface de comunicação padronizada pela *Optical Internetworking Forum* (OIF) para lasers, seus comandos, organização e estrutura.

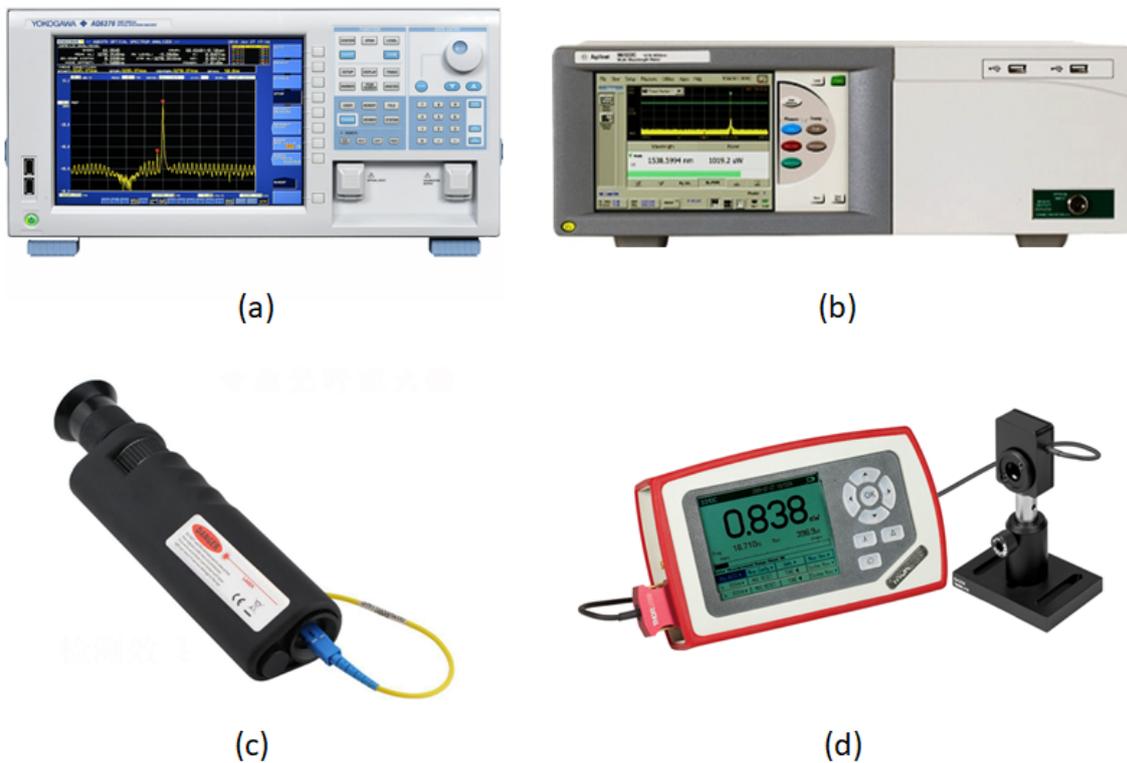


Figura 3.1: Equipamentos do laboratório de fotônica. (a) OSA Yokogawa AQ6370D (b) WM Keysight 86122C (c) Microscópio de Fibra Óptica (d) *Optical Power and Energy Meter* Thorlabs PMD100.

Fonte: Produzido pelo autor.

3.2 Desenvolvimento de *Firmware* e Testes Automatizados para Laser Sintonizável

Como estagiário do setor de engenharia de produto, o aluno atuou principalmente no desenvolvimento de *firmware* para laser sintonizável, testes e validação de produto. Dentre as atividades realizadas, destaca-se a otimização dos sistemas de controle dos elementos do laser sintonizável de cavidade externa μ TLA (*micro Integrable Tunable Laser Assembly*) desenvolvido pela empresa, que pode ser visualizado na Fig. 3.2 a seguir. Na parte da esquerda, observa-se a eletrônica que acompanha o módulo, contendo o microcontrolador ARM, conversor analógico-digital e digital-analógico e toda a instrumentação necessária para o sistema. Na imagem superior à direita, tem-se a capsula hermética *goldbox* integrada à eletrônica com saída para a fibra óptica; logo abaixo, toda a estrutura do laser dentro do módulo mecânico.

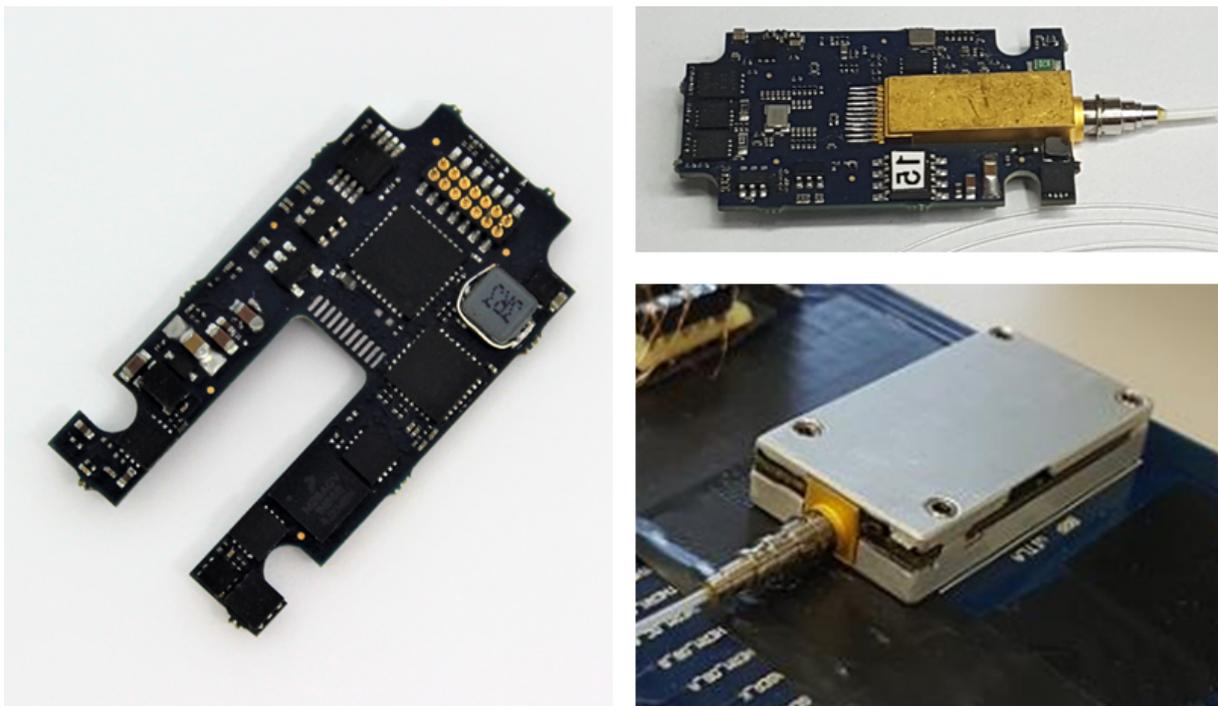


Figura 3.2: Laser sintonizável de cavidade externa μ TLA desenvolvido pela Idea!.

Fonte: Idea! Eletronic Systems (website).

Para realização dos testes e validação do produto, utilizou-se a *Evaluation Board* (EVB) desenvolvida pelo time de Engenharia de Produto da empresa e que pode ser visualizada na

Fig. 3.3 a seguir. Ela possui toda a instrumentação eletrônica necessária para testes, validação e caracterização dos lasers desenvolvidos pela Idea! e produzidos pelo time de Fotônica na *clean room* da empresa. Nesta figura, observa-se o módulo mecânico descrito anteriormente, integrado à EVB através de uma PCB de interfaceamento. Como mencionado no capítulo anterior, algumas especificações devem ser cumpridas por ECTLs que desejem ser empregados comercialmente em sistemas ópticos de transmissão coerente. No geral, são elas:

- Alta potência de saída, normalmente acima de 13 dBm;
- Larga faixa de sintonia, que deve ser em torno de 40 nm (tamanho médio das bandas de comprimento de onda, como a banda C, por exemplo);
- Estreita largura de linha, idealmente menor que 100 kHz;
- Baixo consumo de potência, preferencialmente menor que 3,5 W.

Para que esses requerimentos sejam atingidos, a fotônica do laser precisa ser integrada a um sistema embarcado microcontrolado, que garanta o funcionamento dentro dos padrões esperados durante o tempo de vida do produto, que pode durar décadas. Portanto, o *firmware* de tal sistema é crítico, uma vez que até mesmo “pequenas” oscilações na potência do feixe luminoso entregue à fibra óptica podem ser suficientes para cair a conexão com determinado canal – o que seria referente em um *datacenter*, por exemplo, a um período sem a transmissão de dados.

O sistema do *firmware* do laser pode ser sintetizado em quatro ações principais:

- Ligar o laser;
- Sintonizar um canal de frequência da ITU;
- Atingir uma máxima potência estável;
- Ajustar a potência de saída para um nível desejado pelo operador.

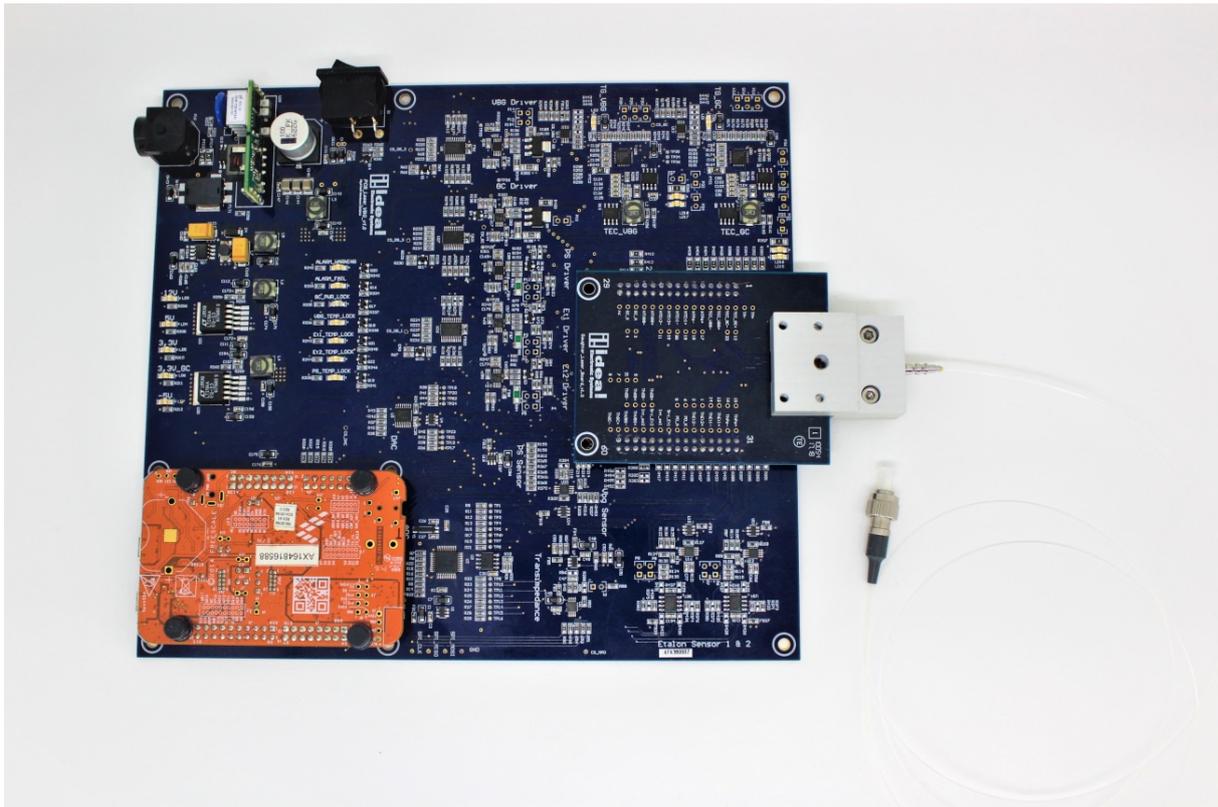


Figura 3.3: Placa de testes para lasers.

Fonte: Idea! Eletronic Systems (website).

Esse fluxo pode ser visualizado na Fig. 3.4 a seguir.

Ligar o laser talvez seja a funcionalidade mais básica esperada dele. Do ponto de vista do usuário, no entanto, simplesmente direcionar uma corrente para o *gain chip* ao ligar o laser pode não ser suficiente, já que os elementos da cavidade podem não estar devidamente ajustados. Desta forma, uma ação de ativação deve incluir a execução prévia de uma ação de sintonia de canal seguida de uma maximização da potência para aquela corrente inicial. Uma vez que a sintonização dos elementos da cavidade esteja completa, o sistema de controle deve aumentar a corrente do *gain chip* para um determinado valor que possibilite atingir a potência alvo desejada pelo usuário. Estritamente falando, o controle responsável por definir a potência de saída para um determinado nível não é necessário na ação de ativação, pois após a potência ser maximizada para determinada corrente, a saída do laser deve ser estável em frequência. Entretanto, uma ação de ajuste do nível de potência óptica pode ser incluída

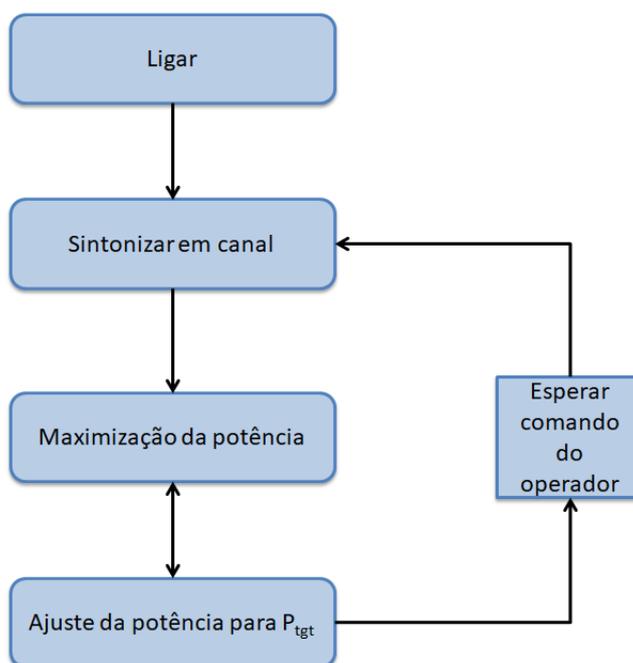


Figura 3.4: Fluxograma de operação do laser.

Fonte: Produzido pelo autor.

no fluxo de execução da ação de ativação como a última etapa, pois o usuário pode esperar ativar o laser em um determinado nível de potência. O fluxograma da ação de ligar pode ser visualizado na Fig. 3.5 a seguir. Nele, o estado de decisão “IDLE” representa o momento em que os elementos da cavidade responsáveis pela sintonia – vide Fig. 2.5: elemento de ajuste de fase de cavidade, filtro de seleção do modo da cavidade; elemento de ajuste de tamanho da cavidade (espelho) – estão devidamente controlados e em regime permanente.

A ação de sintonizar um canal significa definir a frequência do laser para uma determinada posição da grade da ITU. A frequência do laser é definida pelos elementos sintonizáveis da cavidade (vide Fig. 2.5). A ação de sintonia de canal é basicamente o ajuste das variáveis de controle apropriadas dos elementos da cavidade, de modo que a frequência do laser atinge o valor desejado – neste trabalho, como será explicado mais à frente, a variável de controle de tais elementos é a temperatura. É importante observar que o comportamento da ação sintonia do canal depende do status de ativação do laser. Assim como a ação de ligar, uma ação de sintonia de canal prática com o laser ligado deve produzir uma saída estável na frequência

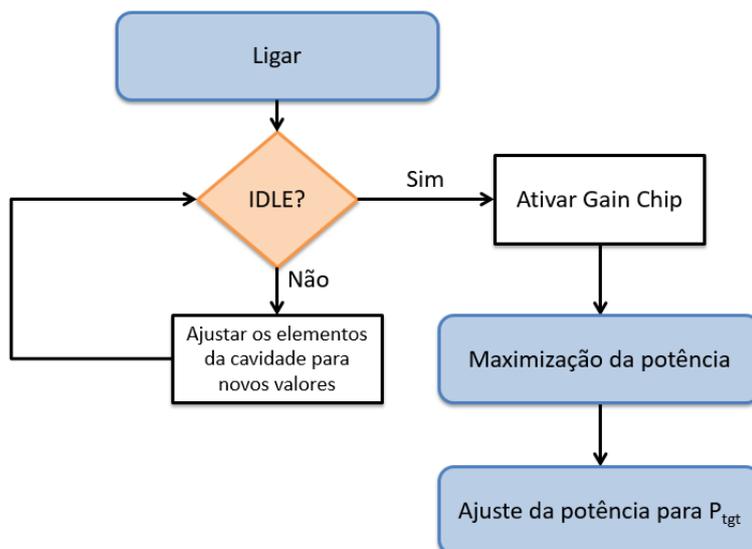


Figura 3.5: Fluxograma da ação de ligar o laser.

Fonte: Produzido pelo autor.

desejada. Desta forma, quando o laser está ativado, o ajuste da temperatura dos elementos da cavidade é seguido por uma maximização da potência e uma adequação do nível de potência óptica. Quando o estado do laser está desativado, o canal de sintonia é limitado ao ajuste térmico dos elementos da cavidade. Na Fig. 3.6, tem-se o fluxograma da ação de sintonização de um canal.

A ação de ajuste e maximização da potência de saída também é uma característica essencial que o laser deve ter. Como o nome diz, permite ao usuário selecionar uma potência de saída desejada dentro de um intervalo determinado pelo fabricante. A ação de ajuste da potência de saída é definida por um *loop* de controle, que compara a leitura interna do fotodetector com um *setpoint* de potência e ajusta a corrente do *gain chip* de acordo. O *loop* de controle da maximização da potência deve funcionar em paralelo, pois variações na corrente do *gain chip* alteram os modos de cavidade na frequência. Quando os dois controles operam independentemente, as constantes de controle devem ser ajustadas com cuidado para que a aplicação de uma etapa atual nunca mude a fase da cavidade o suficiente para alcançar o ponto de descontinuidade da energia entregue pelo laser. Entretanto, também é possível esperar a maximização da potência de saída para determinado nível antes de modificar a corrente do

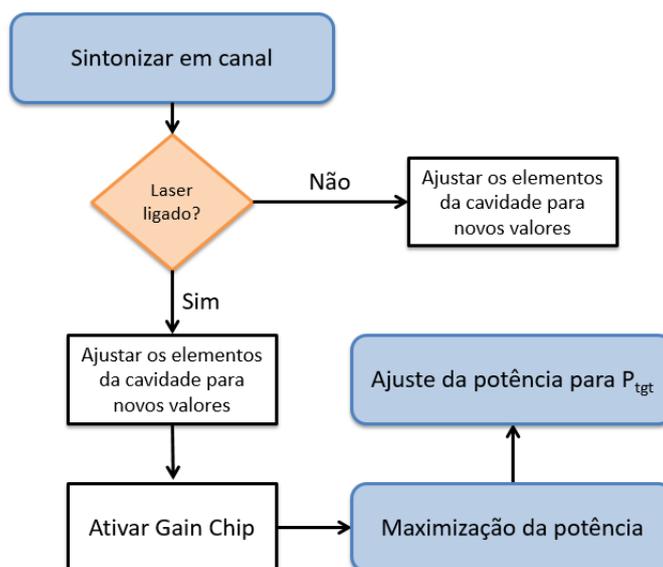


Figura 3.6: Fluxograma da ação de sintonizar um canal.

Fonte: Produzido pelo autor.

gain chip. Este modo de operação é mais robusto, porém mais lento que o modo de operação independente. Na Fig. 3.7 a seguir, tem-se o fluxograma das ações agindo em paralelo. Observa-se que entre elas há um ganho de *feedforward* (K_{ff}), que é o ajuste necessário comentado previamente para garantir um bom funcionamento.

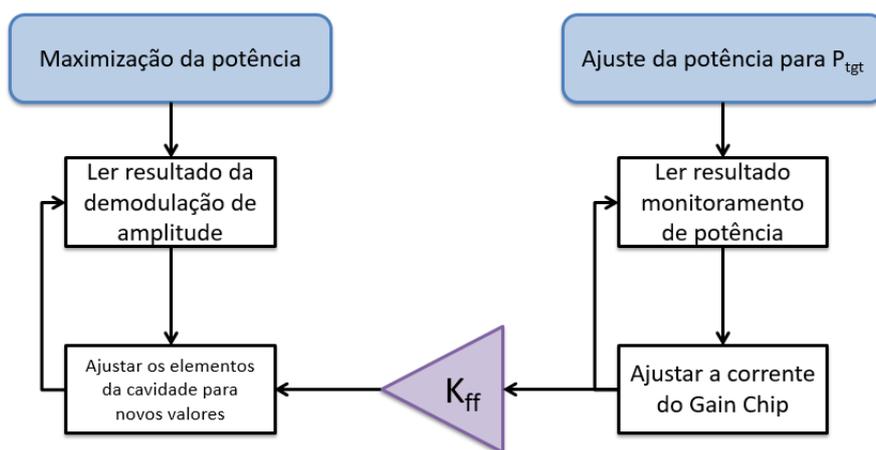


Figura 3.7: Fluxograma das ações de ajuste e maximização da potência de saída.

Fonte: Produzido pelo autor.

O algoritmo usado para manter a temperatura dos elementos da cavidade em um *setpoint* desejado é um controlador Proporcional Integral Derivativo (PID) clássico. Seu diagrama de

blocos é mostrado na Fig. 3.8. Um sinal de erro $e(t)$ é calculado pela comparação de uma temperatura de *setpoint* $T_{set}(t)$ com um valor de leitura $T_{read}(t)$. Então, os termos de correção proporcional (P), integral (I) e derivativo (D) são calculados, somados e resultam em uma aplicação de calor para o aquecedor do componente. Uma nova leitura de temperatura é feita e é retornada ao comparador desde o início do *loop*. É melhor quando o sinal de atuação é a grandeza física calor (potência térmica) em vez de uma corrente elétrica, já que a relação temperatura vs calor é linear, enquanto a relação temperatura vs corrente é quadrática. Isso será detalhado mais à frente.

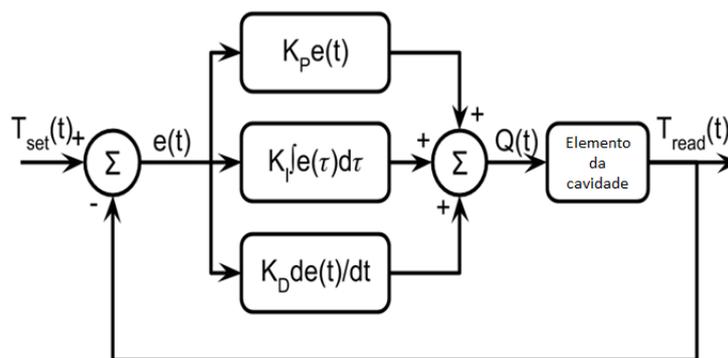


Figura 3.8: Diagrama de blocos do controle de temperatura dos elementos da cavidade.

Fonte: Produzido pelo autor.

A ação de maximização da potência também é controlada usando um controlador PID. O sistema, no entanto, é um pouco mais complexo do que o controle da temperatura. Para manter um modo de cavidade sempre alinhado com o filtro de cavidade externa, uma pequena oscilação (modulação de amplitude) é aplicada a um dos elementos na cavidade externa. A modulação de amplitude é uma pequena oscilação no *setpoint* de temperatura aplicada ao aquecedor do elemento. Quando o sinal de oscilação é aplicado ao filtro de seleção de modo (vide Fig. 2.5 e Fig. 2.6), a resposta de frequência do filtro de cavidade externa oscila enquanto os modos de cavidade são mantidos quase estacionários. Por outro lado, quando o sinal oscilatório é aplicado ao elemento de ajuste de fase, a resposta de frequência do filtro de cavidade externa é estacionária enquanto os modos de cavidade oscilam ligeiramente. De qualquer maneira, o resultado da aplicação do sinal de oscilação descrito é uma pequena

modulação de amplitude da potência de saída. 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. A amplitude de modulação pode, portanto, ser usada como um sinal de “sonda” para inferir quão bom é o alinhamento entre os modos de cavidade e o filtro de cavidade externa. Esse fenômeno pode ser bem visualizado na Fig. 3.9 e Fig. 3.10 a seguir. O objetivo é maximizar a potência de saída garantido que o filtro esteja bem alinhado com o modo da cavidade externa do laser.

Uma nota importante é que quando esse sinal oscilatório é aplicado a um dos elementos controlados termicamente; o diagrama de blocos de seu controle é diferente, como pode ser visto na Fig. 3.11.

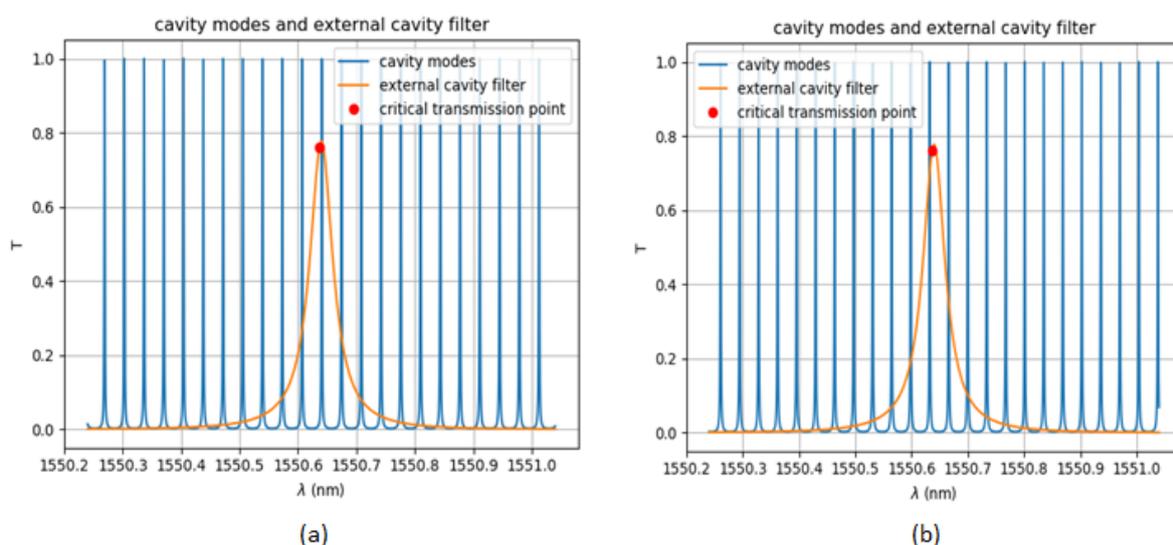


Figura 3.9: Alinhamento do filtro com os modos da cavidade. (a) Bom alinhamento. (b) Mau alinhamento.

Fonte: Produzido pelo autor.

Para garantir que o ponto de máxima potência, i.e., o ponto de melhor alinhamento 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. Isso também é feito através de um controlador PID, que pode ser visualizado na Fig. 3.12, com a variável de controle sendo a parte real do *feedback* de potência e seu *setpoint* sendo 0. Como evidenciado na Fig. 3.7, uma compensação

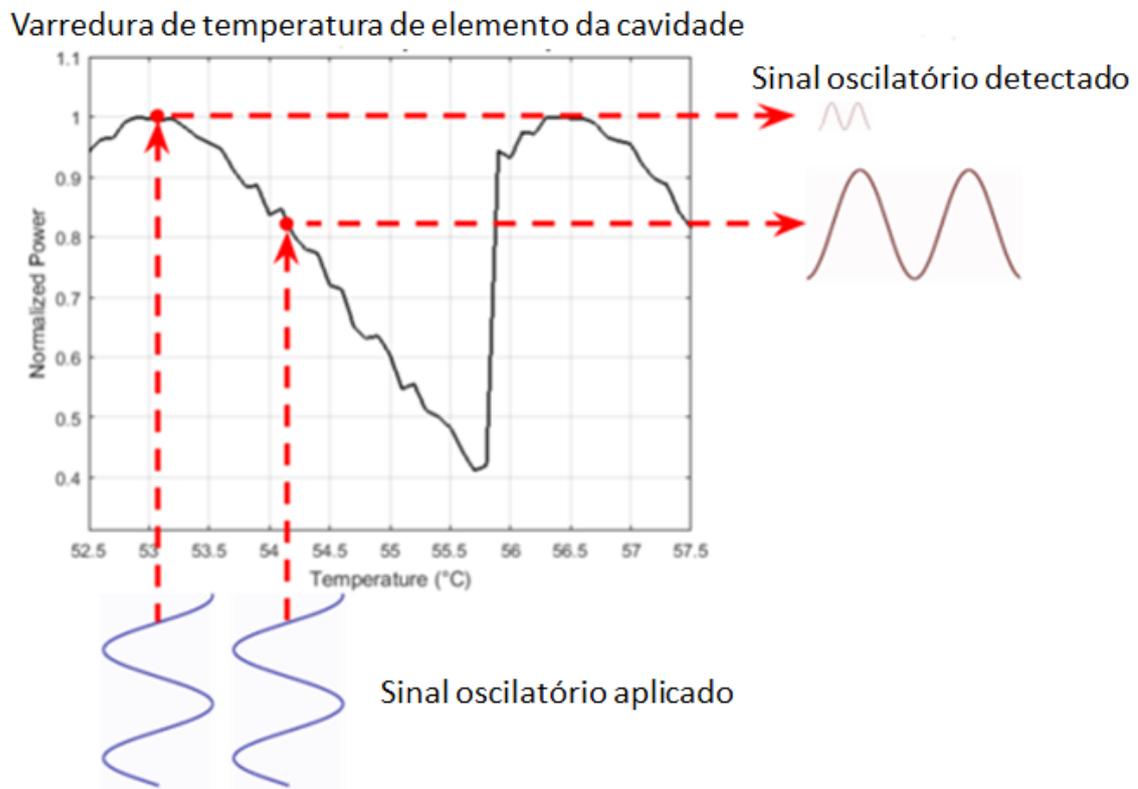


Figura 3.10: Diagrama explicativo de como a modulação AM aplicada em algum dos elementos de sintonia da cavidade funciona para detectar o ponto de maximização da potência óptica.

Fonte: Produzido pelo autor.

$feedforward K_{ff}$ pode ser aplicada à temperatura do elemento de cavidade que está sob efeito da modulação de amplitude descrita para ajudar a convergência do controlador quando a corrente do *gain chip* estiver sendo variada durante um processo de ajuste de nível de potência. O valor de K_{ff} deve ser calibrado, como dito previamente.

O algoritmo de ajuste de nível de potência também faz uso de um controlador PID. A variável de controle aqui é a corrente do *gain chip*, enquanto a variável de processo é a potência óptica do laser. A relação entre essas duas variáveis é bastante direta: uma corrente maior deve aumentar a potência óptica do laser, desde que o modo de cavidade esteja sintonizado. O diagrama de blocos deste controlador pode ser visto na figura a seguir.

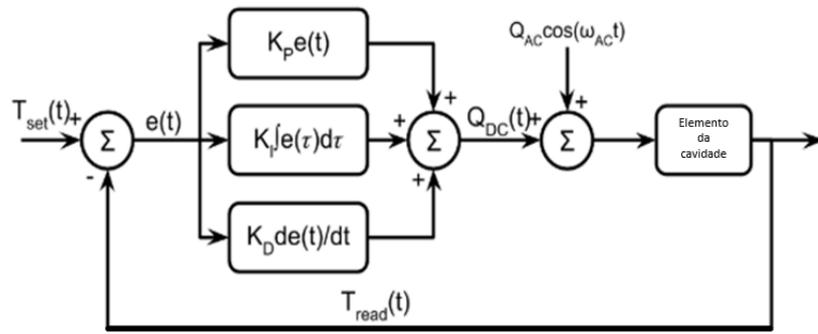


Figura 3.11: Diagrama de blocos do controle de temperatura dos elementos da cavidade considerando os efeitos da modulação em amplitude para algoritmo de maximização de potência.

Fonte: Produzido pelo autor.

3.2.1 Otimização dos controladores do laser sintonizável de cavidade externa

Os controladores que foram detalhados passaram por um extenso processo de otimização, a fim de garantir que o laser em operação seja o mais estável possível. Entretanto, antes de iniciar o processo de otimização, primeiro foi implementado um *data logger* para que todas as variáveis do *firmware* fossem conhecidas em tempo real – aqui, tempo real indica o tempo de execução de um loop do *firmware*, no caso, 10 ms. Esse registrador de dados desenvolvido comunica-se com a estação de operação através de um adaptador serial FTDI FT232RL, que recebia os dados do sistema embarcado por comunicação UART e enviava para a estação de operação por comunicação USB. O adaptador FTDI utilizado é exibido na Fig. 3.14. Esse *data logger* utilizado para testes foi configurado para transmitir mais de 30 variáveis de controle a uma *baudrate* de 460800 bps – valor calculado para suprir as necessidades do sistema.

A otimização de cada controlador teve caráter de desenvolvimento único, cada qual com sua particularidade. Foram realizados mais de 300 testes automatizados, cada um visando otimizar uma característica diferente do laser. Como a quantidade de dados é massiva e incompatível com o formato deste documento, apenas alguns resultados considerados mais interessantes serão apresentados a seguir.

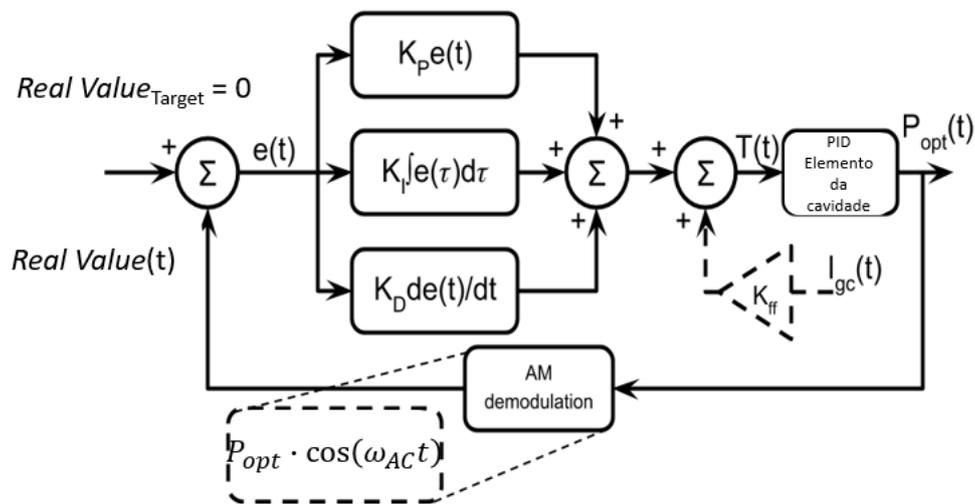


Figura 3.12: Diagrama de blocos do controle da maximização de potência de saída.

Fonte: Produzido pelo autor.

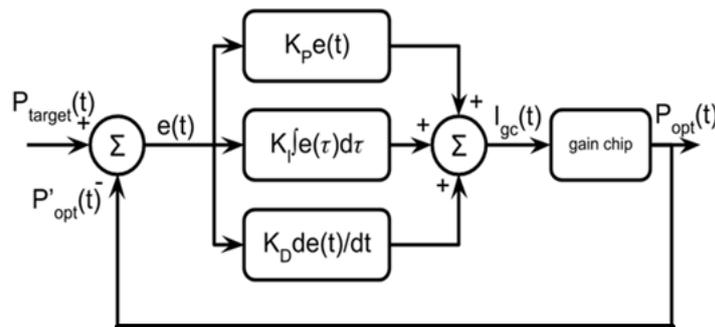


Figura 3.13: Diagrama de blocos do controle de ajuste de nível potência.

Fonte: Produzido pelo autor.

Os controladores mais simples, que envolvem apenas o controle da temperatura dos elementos da cavidade, foram otimizados primeiro. Para tal, os elementos foram caracterizados e suas funções de transferência foram extraídas ao aplicar-se um degrau de temperatura. Após a caracterização e geração de seus modelos, as constantes de controle K_p , K_i e K_d foram definidas. É importante evidenciar que para todos os controladores, a constante do controlador derivativo K_d utilizada foi zero.

Inicialmente, os controladores de temperatura atuavam sobre a corrente dos elementos resistivos utilizados para os elementos. Entretanto, a relação entre corrente elétrica e tempera-

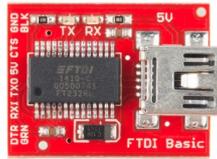


Figura 3.14: Adaptador USB-UART (FTDI FT232RL).

Fonte: Sparkfun, acesso: <https://www.sparkfun.com/products/9716..>

tura não é linear ($T \propto Q \propto P_{elet} = Ri^2$), e como o sistema era assumido como um sistema de primeira ordem ($\dot{y} + ay = bu$), os controladores apresentavam alguns efeitos indesejáveis. Por exemplo, se sobre o elemento da cavidade incidisse a modulação de amplitude do algoritmo de maximização de potencial (vide Fig. 3.10), a amplitude da modulação variava de acordo com o *setpoint* de temperatura em que ele se encontrava, como é ilustrado na Fig. 3.15. Neste elemento foi aplicada a mesma amplitude de 50 m°C para o sinal oscilatório. Entretanto, como pode-se observar, cada nível de temperatura apresenta amplitudes diferentes devido à atuação não-linear do controlador. Para corrigir tal problema, os controladores de temperatura foram linearizados, atuando na potência térmica (calor) ao invés da corrente elétrica do aquecedor. Os resultados após linearização podem ser vistos na Fig. 3.16.

Outro resultado interessante foi a otimização do controlador de ajuste de nível de potência. Como este controlador é mais difícil de modelar devido à sua complexidade, uma vez que envolve diferentes elementos e outros processos, suas constantes de controle K_p , K_i e K_d foram otimizadas de maneira empírica, com testes automatizados realizando varreduras de valores. Na Fig. 3.17 e 3.18, por exemplo, temos as respostas para dois desses testes. Neles, foi configurado um *target* de potência igual para diferentes valores das constantes K_p e K_i (respectivamente) do controlador de ajuste de nível de potência. Estas figuras apresentam os resultados da potência óptica e da corrente do *gain chip*. Pode-se observar que, a partir de um K_p de 0,015, a corrente do *gain chip* apresenta um *overshoot* indesejado, causando instabilidade na potência óptica de saída do laser. Portanto, foi escolhido um valor de $K_p = 0,01$, a fim de evitar-se tais efeitos. Já no *sweep* dos valores de K_i , pode-se ver que todas as

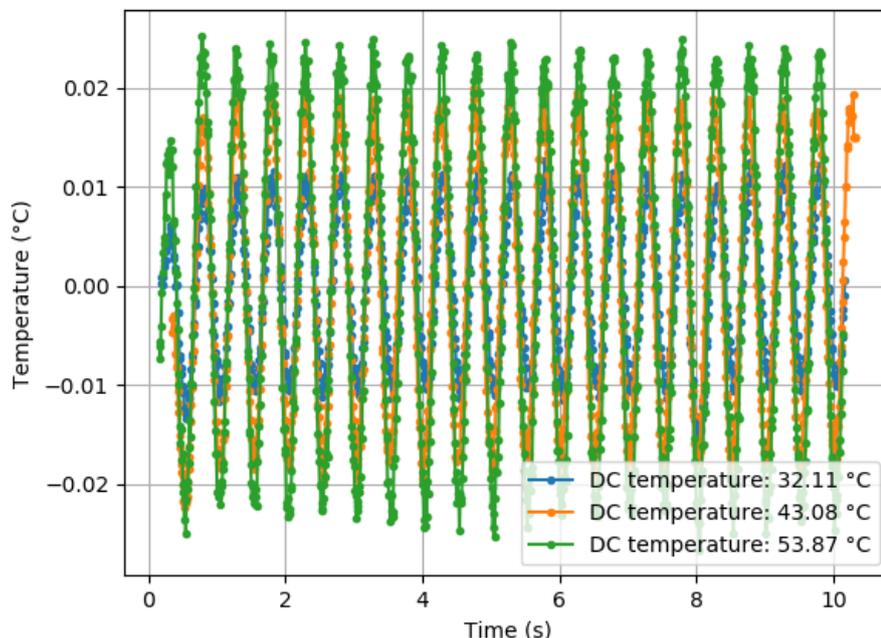


Figura 3.15: Sinal oscilatório aplicado sobre a temperatura do elemento de cavidade com controlador de temperatura atuando sobre a corrente elétrica.

Fonte: Produzido pelo autor.

respostas apresentam resultados estáveis, entretanto o tempo de convergência é maior para o maior valor de K_i (no caso, $K_i = 0,00001$). Por esta razão, este valor foi escolhido.

Após a otimização de todos os controladores, um resultado típico da operação normal do laser – isto é, ligar o laser, sintonizar em um canal da ITU, realizar a maximização da potência da sintonia do canal através do alinhamento do filtro e dos modos da cavidade externa e por fim definir um *target* de potência – pode ser visualizado na Fig. 3.19. Nela, temos três diferentes níveis de potência sendo definidos, e as variáveis sendo observadas são a potência óptica do laser, a corrente no *gain chip* e a *flag* (vide Fig. 3.7) de que o controle de nível de potência convergiu. Os marcadores em vermelho no gráfico de potência indicam o momento em que a *flag* é ativada. Estes são resultados satisfatórios, uma vez que todos ocorrem em menos de 30 segundos (tempo máximo definido pela OIF), sem oscilações, *overshoots* ou quaisquer outras adversidades. Isso demonstra a qualidade dos produtos de tecnologia desenvolvidos na empresa. Os lasers μ TLA sintonizáveis em toda banda C desenvolvidos na Idea! apresentam

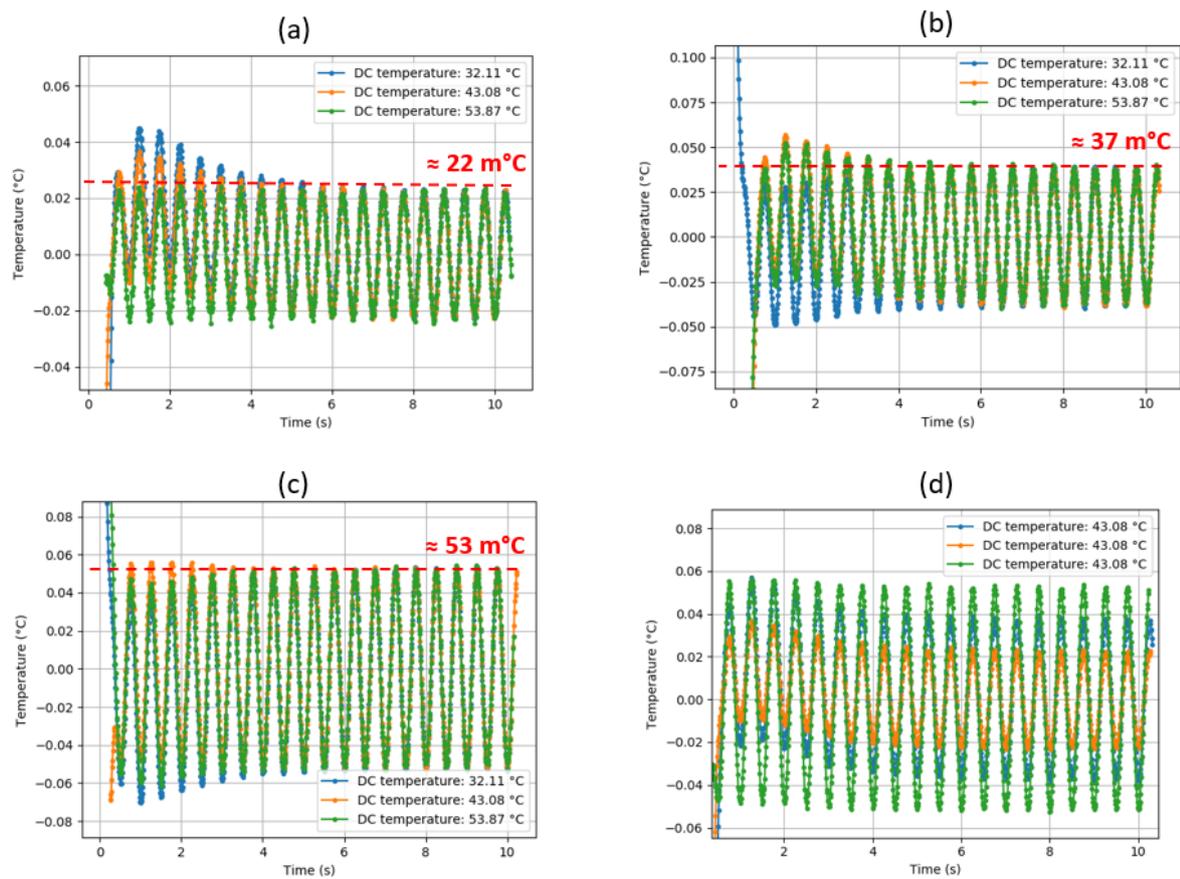


Figura 3.16: Resultados do controle de temperatura sob efeito da modulação AM após linearização. Amplitude de modulação para diferentes *setpoints* de temperatura: (a) 30 m°C (b) 50 m°C (c) 70 m°C. (d) Essas amplitudes para um mesmo *setpoint* de temperatura.

Fonte: Produzido pelo autor.

boa potência de saída, baixo consumo, largura de linha ultra-fina e resposta estável durante testes de longa duração (vários dias).

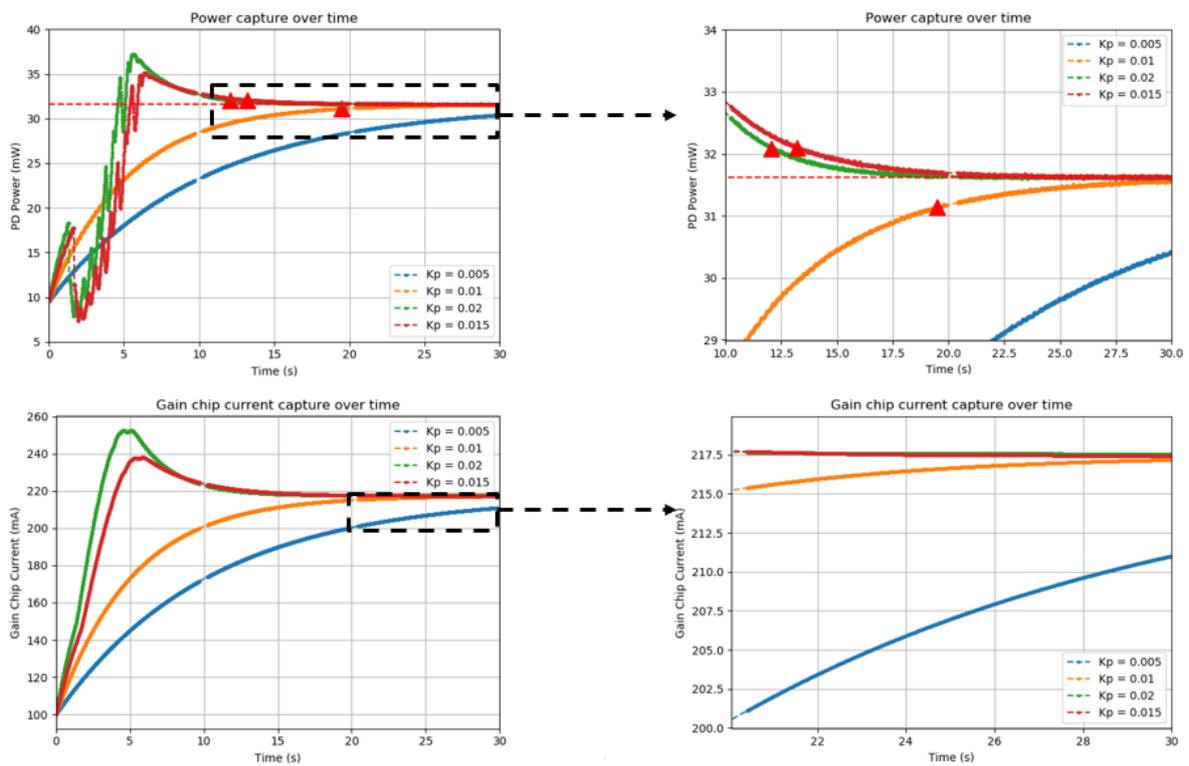


Figura 3.17: Potência óptica no laser e corrente no *Gain Chip* para um *sweep* nos valores de K_p do controlador de ajuste de nível de potência.

Fonte: Produzido pelo autor.

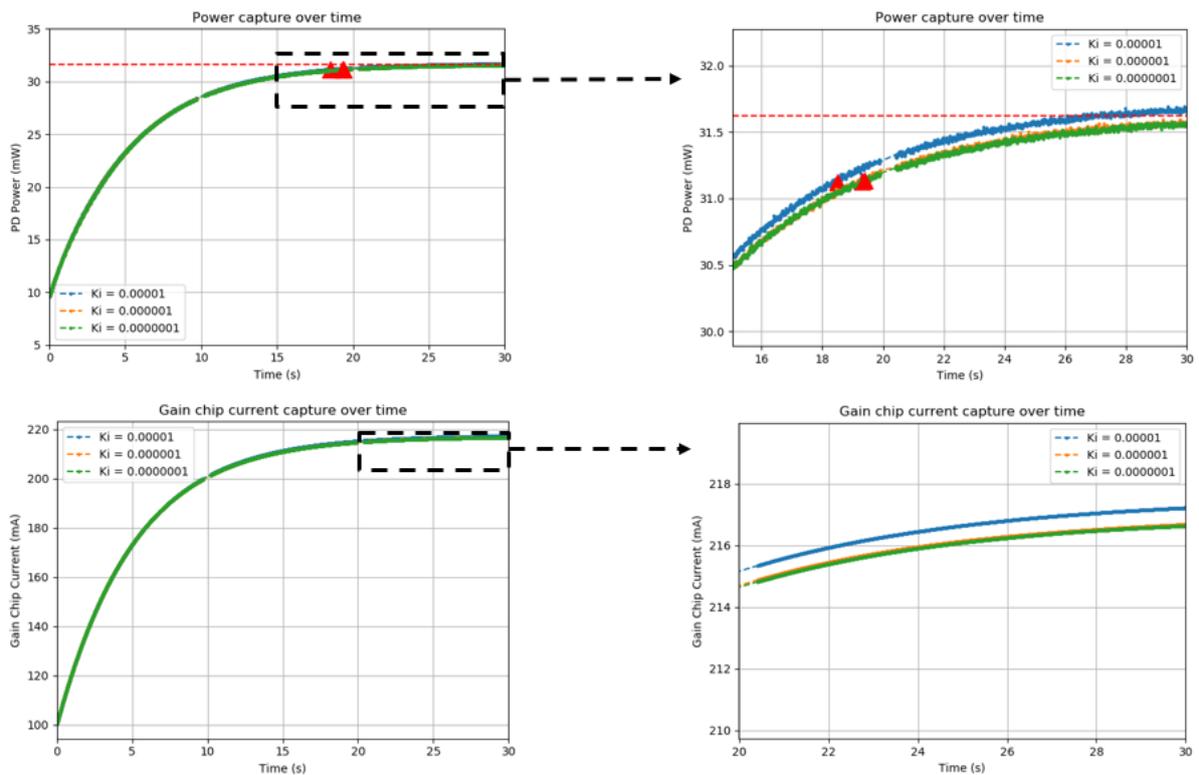


Figura 3.18: Potência óptica do laser e corrente no *Gain Chip* para um *sweep* nos valores de K_i do controlador de ajuste de nível de potência.

Fonte: Produzido pelo autor.

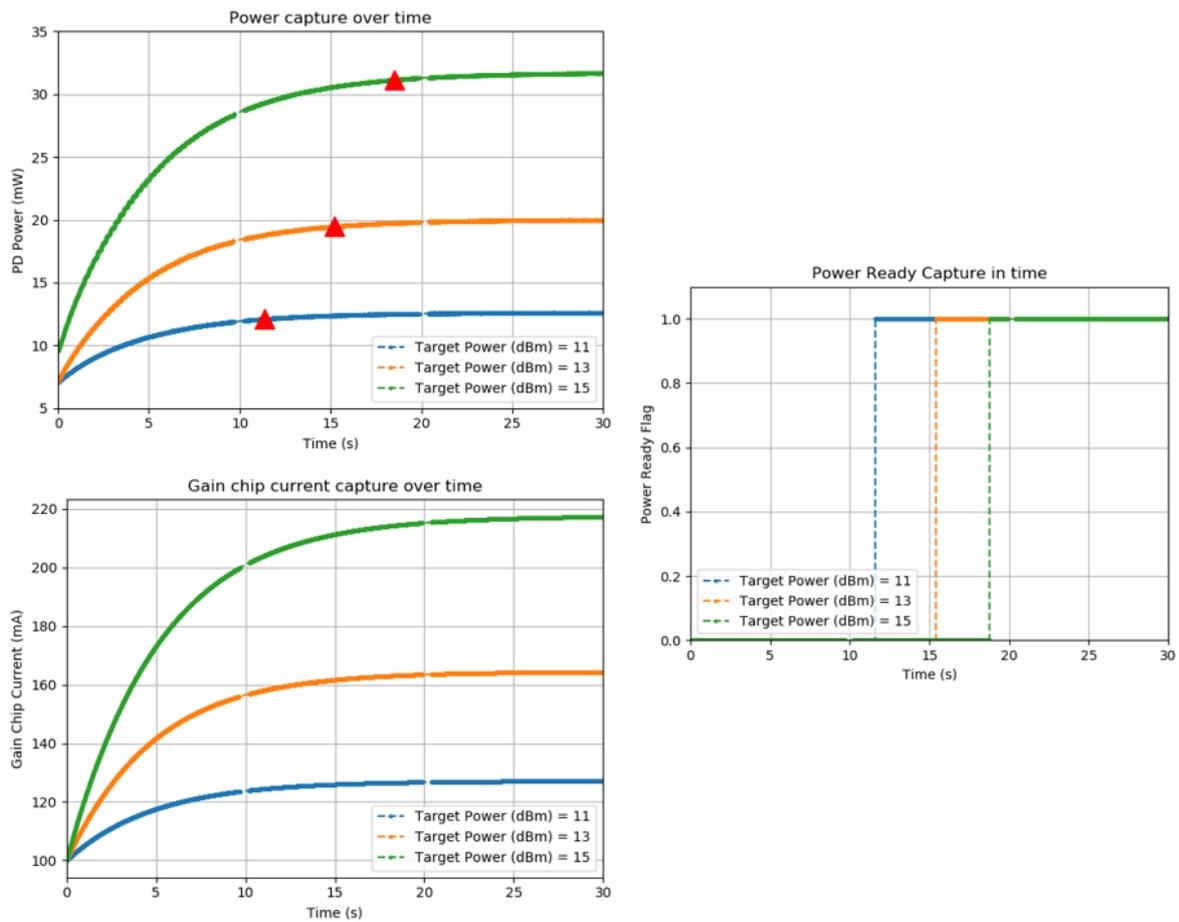


Figura 3.19: Diferentes *setpoints* de potência para o controle de ajuste de nível de potência.

Fonte: Produzido pelo autor.

Capítulo 4:

Considerações Finais

As comunicações ópticas 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, movimentava 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 um laser sintonizável de cavidade externa do tipo μ ITLA. Trabalhou-se em conjunto com as equipes de Fotônica e Engenharia de Produto, atuando como desenvolvedor de *firmware* e 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 trabalhos envolvendo a otimização dos sistemas de controle do laser sintonizável.

Das atividades do Plano de Trabalho para todo o ano de estágio, 70% foi cumprida nos primeiros 4 meses. Este aproveitamento foi deveras apreciado. 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 comunicações ópticas); desenvolvimento de sistemas embarcados e programação em diversas linguagens (C, C++, *Python*, *Markdown*); instrumentação eletrônica e conhecimento sobre sistemas de controle. Portanto, muitas disciplinas estudadas durante a graduação foram pertinentes, dentre as mais vitais destacando-se as disciplinas de Comunicação Digital, Instrumentação Eletrônica, Microcontroladores e Microprocessadores, Técnicas de Programação, Controle e todas as disciplinas que são pré-requisito a estas aqui destacadas. 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

Capítulo 4 – Considerações Finais

oferecendo todas as ferramentas necessárias para inovação.

Referências Bibliográficas

- [1] OSA, “Lighting the Path to a Brighter Future,” 2018.
- [2] R. Soref, “The Past , Present , and Future of Silicon Photonics,” *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 12, no. 6, pp. 1678–1687, 2006.
- [3] OSA, “About Optics and Photonics,” pp. 1–2, 2018.
- [4] R. Zadeh, “Evolution of Innovation: Fiber Optics and the Communications Industry,” Ph.D. dissertation, Massachusetts Institute of Technology, June 2004.
- [5] D. Inniss, “Is the Optical Communications Market Growth for Real ?” pp. 1–5, 2017.
- [6] G. Agrawal, *Fiber-Optic Communication Systems: Fourth Edition*, January 2012.
- [7] F. A. Barbosa, “Avaliação da Capacidade de Transceptores Ópticos Considerando Limitações de Algoritmos de Processamento Digital de Sinais Digital de Sinais,” Ph.D. dissertation, Universidade de Campinas, 2017.
- [8] T. C. de Lima, “Redes Ópticas de Longa Distância com Transceptores de Taxa de Código Variável,” Ph.D. dissertation, Universidade de Brasília, 2015.
- [9] O. Gerstel, M. Jinno, A. Lord, and S. J. B. Yoo, “Elastic Optical Networking : A New Dawn for the Optical Layer ?” *IEEE Communications Magazine*, no. February, pp. 12–20, 2012.
- [10] M. Seimetz, *High-Order Modulation for Optical Fiber Transmission*, January 2009, vol. 143.
- [11] J. C. M. Diniz, “Estimador de Desvio de Frequência Para Receptores Ópticos Coerentes Digitais,” Ph.D. dissertation, Universidade de Campinas, 2013.
- [12] D. B. M. Pereira, C. S. Santos, A. L. J. Teixeira, J. F. Rocha, J. N. Mário, and P. S. B. André, “Aplicações de Amplificadores de Fibra Dopada de Érbio na banda L,” *Revista do DETUA*, vol. 3, no. 7, September 2002.
- [13] L. A. Coldren, G. A. Fish, Y. Akulova, J. S. Barton, L. Johansson, and C. W. Coldren, “Tunable Semiconductor Lasers : A Tutorial,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 22, no. 1, pp. 193–202, 2004.