



Universidade Federal de Pernambuco  
Centro de Ciências Exatas e da Natureza  
Programa de Pós-graduação em Física

Leandro de Andrade Silva

**Estabilidade de *Lasers* de Diodo e Sua  
Aplicação em Física Atômica**

Recife

2020

Leandro de Andrade Silva

## **Estabilidade de *Lasers* de Diodo e Sua Aplicação em Física Atômica**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Física da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Física.

**Área de concentração:** Óptica

Orientador: Daniel Felinto Pires Barbosa

Co-orientador: Rafael Alves de Oliveira

Recife

2020

Catálogo na fonte  
Bibliotecária Mariana de Souza Alves CRB4-2105

S586e Silva, Leandro de Andrade  
Estabilidade de lasers de diodo e sua aplicação em física atômica / Leandro de  
Andrade Silva. – 2020.  
80 f., il., fig.

Orientador: Daniel Felinto Pires Barbosa.  
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CCEN, Física,  
Recife, 2020.  
Inclui referências e apêndices.

1. Óptica. 2. Laser de diodo. 3. Estabilidade. 4. Vácuo. I. Barbosa, Daniel Felinto  
Pires. (orientador) II. Título.

535.2

CDD (22. ed.)

UFPE-CCEN 2021-09

**LEANDRO DE ANDRADE SILVA**

**ESTABILIDADE DE LASERS DE DIODO E  
SUA APLICAÇÃO EM FÍSICA ATÔMICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Física da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Física.

Aprovada em: 17/12/2020.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Daniel Felinto Pires Barbosa  
Orientador  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. Rafael Alves de Oliveira  
Co-Orientador  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. Marcio Heraclyto Gonçalves de Miranda  
Examinador Interno  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. Renné Luiz Câmara Medeiros de Araújo  
Examinador Externo  
Universidade Federal de Santa Catarina

Ao meu bom Senhor e Salvador ressurreto Jesus Cristo e à  
minha linda esposa, Thaísa.

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer, inicialmente, ao meu Deus por tamanha graça que Ele, na sua bondade, derramou sobre mim para chegar até aqui.

Agradeço à minha esposa, Thaísa Andrade, com quem divido esta vitória e as que virão. Ao meu tio, Gilson Ferreira, que me deu grande apoio aqui em Recife. Aos meus amigos que fiz no departamento, em particular, aos mais chegados: Álvaro Mitchel, Jesus Lopez e Ammis Sánchez, Michelle Oliveira, Mateus Rattes, Paulo Cavalcante, estes com quem tive a oportunidade de dividir ótimas tardes com muita prosa e tomando uma boa caneca de café.

Agradeço aos professores do departamento, principalmente, ao professor Daniel Felinto pela sua dedicação e o seu exemplo como pessoa e profissional.

Agradeço ao CNPq que fomentou parte da minha formação acadêmica, e à CAPES a minha atual investidora para prosseguir em minha pesquisa.

## RESUMO

O *laser* de diodo é uma ferramenta vastamente explorada em diversos campos da ciência, medicina e engenharia. Sua aplicação alcançou inclusive a sociedade, tal que vemos o *laser* de diodo em aparelhos de mídia, como os leitores óticos de CDs e DVDs, e em computadores; no tratamento ortodôntico e instrumentos cirúrgicos. Particularmente na física, esse instrumento ganhou bastante espaço em pesquisas relacionadas à dinâmica da luz e sua interação com a matéria. Além desses trabalhos, ainda vemos o contínuo avanço do estado da arte ao implementar diversas técnicas de estabilização e estreitamento da largura de linha de emissão do *laser*, otimização e maior rendimento. Nesse sentido, o nosso trabalho se alinha com a perspectiva de contribuir com uma maneira de estabilizar um *laser* de diodo caseiro, controlando os efeitos externos que afetam a emissão e desestabilizam o equipamento, impossibilitando uma maior eficiência. A técnica aplicada para esse *laser* é voltada, primordialmente, para o baixo vácuo, onde adaptamos toda a peça para suportar evacuação até alguns milibares. Isso atua para desacoplar o *laser* dos efeitos térmicos externos. Adaptações eletrônicas também foram necessárias para que o diodo *laser* funcione dentro da cavidade montada. A corrente que vai no *laser* também foi desacoplada da rede elétrica, de modo que ruídos provenientes da linha comum de transmissão sejam evitados e não afetem a emissão do diodo. Como meio de medir o nível de estabilidade do *laser*, usamos a técnica de absorção saturada do rubídio, escolhendo especificamente a frequência de transição  $5S_{1/2} \rightarrow 5P_{3/2}$  do rubídio 87 como referência, forçando o *laser* a emitir ativamente nessa linha.

**Palavras-chave:** *Laser* de diodo. Estabilidade. Vácuo. Absorção saturada.

# ABSTRACT

The diode laser is a tool widely explored in several fields of science, medicine and engineering. Its application has even reached the society, such that we see diode lasers on media devices, such as optical CD and DVD players, and on computers; in orthodontic treatment and surgical instruments. Particularly in physics, this instrument gained a lot of space in research related to the dynamics of light and its interaction with matter. In addition to these works, we still see the continuous advance of the state of the art by implementing various techniques for stabilizing and narrowing the line width of the laser emission, optimization and greater throughput. In this sense, our work is aligned with the perspective of contributing with a way to passively stabilize a homemade diode laser, controlling the external effects that affect the emission and make the equipment unstable, preventing a greater efficiency. The technique applied to this laser is focused, primarily, on the low vacuum, where we adapted the whole piece to support evacuation down to some millibars. This acts to decouple the laser from external thermal effects. Electronic adaptations were also necessary for the laser diode to work inside the assembled cavity. The current for the laser has also been decoupled from the electrical network, so that noises from the common transmission line are avoided and do not affect the emission of the diode. As a means of measuring the stability level of the laser, we use the rubidium saturated absorption technique, specifically choosing the transition frequency  $5S_{1/2} \rightarrow 5P_{3/2}$  of rubidium 87 as a reference, forcing the laser to actively emit on that line.

**Keywords:** Diode Laser. Stability. Vacuum. Saturated absorption.



# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>10</b>
<b>2</b>	<b>O LASER DE DIODO: CARACTERÍSTICAS E SINTONIZABILIDADE</b>	<b>13</b>
<b>2.1</b>	<b>Características do <i>laser</i> de diodo</b>	<b>13</b>
2.1.1	Potência de saída	15
2.1.2	Emissão espectral	15
2.1.3	Sintonização	16
<b>2.2</b>	<b>Estabilização de <i>laser</i> de diodo em meios atômicos</b>	<b>19</b>
2.2.1	Montagem mecânica	21
2.2.2	Controles de corrente e temperatura	23
2.2.2.1	<i>Controle de corrente (e controle de posição da grade externa)</i>	23
2.2.2.2	<i>Controle de temperatura</i>	24
2.2.3	Estreitamento da largura de linha	25
2.2.4	Espectroscopia de absorção saturada	27
<b>2.3</b>	<b>Medidas de precisão de nível de estabilidade</b>	<b>32</b>
<b>3</b>	<b>INSTRUMENTAÇÃO DO <i>LASER</i> DE DIODO</b>	<b>34</b>
<b>3.1</b>	<b>Montagem da cabeça do <i>laser</i></b>	<b>34</b>
<b>3.2</b>	<b>Controladores de corrente e de temperatura</b>	<b>49</b>
3.2.1	Controlador de corrente	49
3.2.2	Controlador de temperatura	51
<b>4</b>	<b>MEDIDAS E RESULTADOS</b>	<b>57</b>
<b>4.1</b>	<b>Montagem Experimental da Absorção Saturada</b>	<b>57</b>
4.1.1	Controles e equipamentos presentes no processo de absorção	59
<b>4.2</b>	<b>Primeiros Resultados</b>	<b>64</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>71</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>72</b>

<b>APÊNDICE A - DATASHEET DO DIODO <i>LASER</i></b>	<b>74</b>
<b>APÊNDICE B - SOBRE A BOMBA DE VÁCUO</b>	<b>75</b>
<b>APÊNDICE C - CONTROLADOR DE CORRENTE</b>	<b>76</b>
<b>APÊNDICE D - CÓDIGO DO CONTROLADOR DE TEMPERATURA</b>	<b>77</b>
<b>APÊNDICE E - SOBRE O <i>WAVEMETER</i></b>	<b>80</b>

# 1 INTRODUÇÃO

A palavra *laser* é um acrônimo para *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, que em português significa Amplificação da Luz por Emissão Estimulada da Radiação. A explicação desse processo rendeu o prêmio Nobel, em 1964, aos pesquisadores Basov e Prokhorov [1], cujo princípio estava baseado no mesmo processo do maser [2].

Dentre várias formas de gerar amplificação de luz por emissão estimulada, uma em particular será discutida neste trabalho: o *laser* de diodo. O diodo é um dispositivo semicondutor que teve a sua primeira versão desenvolvida por R.N. Hall [3]. Passado algum tempo, uma nova versão foi desenvolvida por Alferov e Kroemer, os quais foram laureados, em 2000, com o prêmio Nobel de física, pelo desenvolvimento e uso para comunicação em altas velocidades e optoeletrônica [4]. Esse novo dispositivo é uma versão atualizada, mais eficiente, do primeiro laser de diodo.

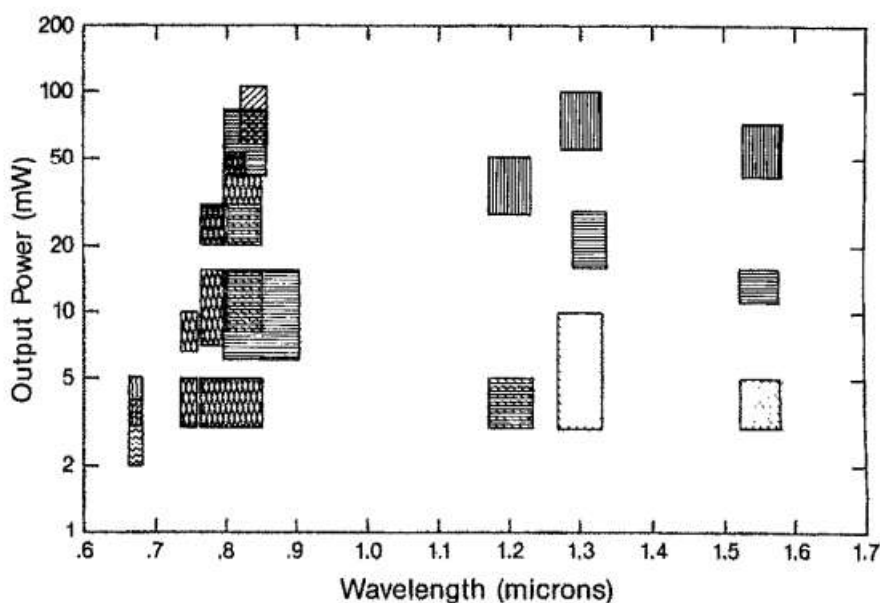
O diodo ganhou maior destaque com o avanço da técnica, de maneira que trabalhos de novos materiais deram, em 2014, o Nobel de física para Isamu Akasaki, Hiroshi Amano e Shuji Nakamura pela invenção do LED azul [5], o qual permitiu compor a luz branca, essencial para o nosso dia a dia.

O *laser* de diodo ganhou importância a partir dos anos de 1980, quando suas propriedades passaram a levar vantagem em comparação com outras fontes de luz coerente existentes. Seu baixo custo, mínimo aparato e instalações para operá-lo, e sintonizabilidade [6] são algumas vantagens que tornam o *laser* de diodo uma ferramenta tão explorada em pesquisas científicas fundamentais e aplicadas, bem como na indústria. O gráfico a seguir (fig. 1), apesar de antigo (1991), deve nos mostrar alguns comprimentos de onda *versus* potência de saída de *laser* de diodo disponíveis no mercado<sup>1</sup>. Nota-se nesta figura que parte da região do espectro visível ainda não era bem coberta. Apenas com a chegada do LED azul foi que comprimentos de onda menores do que 600 nm puderam ser alcançados.

Tornou-se comum o uso dessa fonte de luz em muitas áreas da ciência e indústria. Sensores, leitores óticos, tratamentos médicos e odontológicos, telecomunicação e estética são alguns seguimentos onde o *laser* de diodo é empregado. Também em trabalhos científicos ele

<sup>1</sup> Para uma lista mais atualizada, acesse [https://www.thorlabs.com/navigation.cfm?guide\\_id=2164](https://www.thorlabs.com/navigation.cfm?guide_id=2164). Acessado em: 23 de junho, 2020.

Figura 1 – Alguns *lasers* de diodo cw comercialmente disponíveis. Esse gráfico mostra a faixa de comprimentos de onda e potências de emissão de alguns semicondutores. Cada quadrado hachurado são apenas representativos de alguns fabricantes. Gráfico antigo, de 1991.



Fonte: figura retirada da referência [7]

tem sua função bastante estabelecida, por exemplo, nas áreas de física atômica [7, 8], fotônica aplicada a biomedicina [9] e química [10].

Vendo, pois, a importância deste dispositivo no nosso cotidiano pela sua presença em diversas áreas de nossas vidas, bem como a facilidade de acesso e o que podemos realizar com ele, o presente projeto busca avançar com o estado da arte em estabilidade de lasers de diodo a partir de uma série de modificações aos equipamentos disponíveis atualmente no mercado. Este projeto é uma parceria entre o Departamento de Física da UFPE, o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Física da UFRPE, e a empresa SETUP. Nele procuramos inovar combinando abordagens típicas da área de física com novas técnicas da engenharia. Do ponto de vista da física, buscamos isolar o sistema em questão do seu ambiente para melhor controlá-lo, identificando as causas externas de perturbações sobre o equipamento e buscando desacoplá-lo das mesmas. Já da engenharia, trazemos o conjunto de técnicas associadas a sistemas embarcados, essencial para o monitoramento e controle interno do equipamento de forma independente do ambiente em volta. Esse projeto tem objetivos tanto acadêmicos quanto comerciais. Do ponto de vista acadêmico, um avanço significativo na estabilização de lasers de diodo tem sempre um grande impacto, pois eles são a base de uma grande quantidade de estudos atuais em uma infinidade de frentes. Localmente, esse desenvolvimento é crucial para o Laboratório de

Redes Quânticas (LRQ) da UFPE, que procura atingir o estado da arte em controle de memórias quânticas visando diversas aplicações na área altamente inter-disciplinar das tecnologias de informação quântica. No momento, todo o funcionamento do LRQ é baseado em lasers de diodo que controlam armadilhas atômicas que precisam ser estabilizadas por longos intervalos de tempo. Do ponto de vista comercial, além do mercado de laboratórios de pesquisa, há o interesse em lasers de diodo estabilizados a linhas atômicas para diversas aplicações na indústria, como, por exemplo, em medidas precisas do ambiente magnético local. Por outro lado, lasers de diodo desse tipo com funcionamento robusto poderiam levar a uma nova geração de kits didáticos, incorporando temas avançados de física atômica e mecânica quântica a um grande número de laboratórios de ensino.

Sendo assim, os próximos capítulos serão discutidos na seguinte ordem. No capítulo dois, focaremos nas características principais de um *laser* de diodo, tendo em vista os principais parâmetros que mostram a “saúde” e a eficiência da luz emitida pelo dispositivo: o seu perfil, a sua largura espectral, a sua frequência e características de estabilidade. O terceiro capítulo será dedicado à discussão da montagem de um sistema *laser*, em conjunto com os principais controladores necessários para o seu funcionamento. Em seguida, no quarto capítulo, serão mostrados os resultados preliminares da caracterização do *laser* construído acompanhando as linhas de transição da absorção saturada de um vapor de isótopos neutros de rubídio 85 e 87. Por fim, um último capítulo concluirá este trabalho, com alguns apêndices deixados para remeter o leitor a vários detalhes deste trabalho.

## 2 O LASER DE DIODO: CARACTERÍSTICAS E SINTONIZABILIDADE

Neste capítulo, discutiremos os principais parâmetros e características de desempenho de um semicondutor de diodo. Focaremos no semicondutor heteroestruturado, e consequentemente no perfil espectral que ele apresenta. Também falaremos de parâmetros importantes, como curva de sintonização e efeitos de temperatura e corrente sobre o *laser*, para melhor entender e otimizar a sua performance.

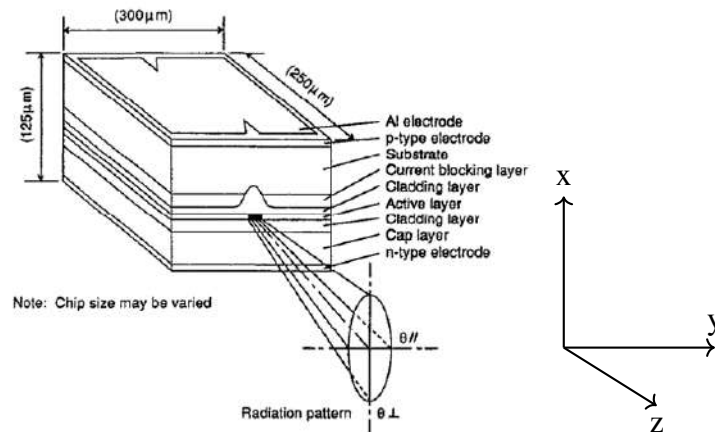
### 2.1 Características do *laser* de diodo

Vamos discutir brevemente algumas características básicas do funcionamento do diodo. Existem atualmente diversas estruturas desenvolvidas, que com o passar dos anos, aumentaram a eficiência desse dispositivo. Dentre elas, vamos tratar particularmente do modelo duplo-heteroestruturado monomodo de AlGaAs (Alumínio-Gálio-Arsênio) a fim de exemplificar o princípio de funcionamento do processo de amplificação no diodo.

Basicamente, um *laser* duplo-heteroestruturado é chamado assim porque a camada ativa, composta de  $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ , é “sanduichada” entre duas camadas de revestimento, de  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ <sup>1</sup>, onde a fração molar de Al em ambas as camadas de revestimento são maiores que a da camada ativa (fig. 2). A corrente fluindo na direção do eixo x, através do diodo, faz com que alguns transportadores de carga sejam injetados para dentro da região ativa onde eles veem uma barreira de potencial na heterojunção, a qual previne a saída das cargas da região ativa. Esses transportadores são elétrons e buracos que se recombinam radiativamente para produzir fótons com a mesma energia do *gap* de banda da região ativa. Além disso, visto que o índice de refração é uma função decrescente da concentração de Al, a heteroestrutura age como um guia de onda dielétrico para os fótons emitidos. Por causa disso, cria-se uma região de confinamento onde a radiação é limitada para existir apenas em um modo.

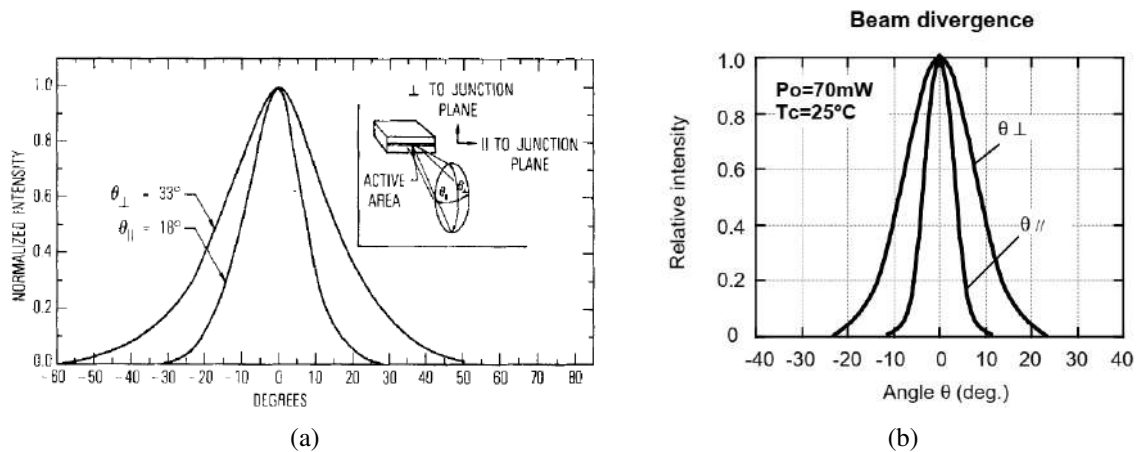
Fatores geométricos são estabelecidos para conseguir o confinamento de apenas um

<sup>1</sup> Os subscritos são frações molares de alumínio e gálio em cada camada

Figura 2 – *laser* de diodo duplo-heteroestruturado monomodo de AlGaAs.

Fonte: imagem extraída da referência [7].

Figura 3 – Distribuição de intensidade em função do ângulo de espalhamento do feixe de saída do *laser*. a) Distribuição angular de intensidade típica das direções transversal e lateral do feixe de saída de um *laser* de diodo. b) Distribuição angular de intensidade do feixe de saída do diodo usado no laboratório de Redes Quânticas (DL7140-201S, SANYO).



Fonte: (a) Imagem extraída da referência [6]. (b) Imagem extraída do *datasheet* do dispositivo (apêndice A).

modo na saída do dispositivo. Cria-se um canal muito estreito na região ativa a fim de fazer a onda ótica oscilar em um padrão espacial. A espessura da camada ativa é da ordem de  $\mu\text{m}$ , o que determina o modo transversal. Por outro lado, restringe-se espacialmente a região lateral da região ativa, com o intuito de causar uma variação espacial, diminuindo o índice refrativo das camadas de revestimento, de modo que a região ativa tenha índice de refração maior. Como resultado, tem-se uma emissão de luz se propagando em uma pequena região com um perfil espectral do *laser* constituído de um único modo fundamental [6, 11].

Devido ao pequeno tamanho da área ativa, a luz de saída tende a divergir fortemente

em ambas as direções paralela e transversal ao plano de junção. Visto que a direção lateral é maior que a direção transversal, a luz se espalha lateralmente e o seu ângulo de abertura é menor que o perpendicular, gerando um perfil elíptico. O gráfico (fig. 3a) mostra o ângulo de distribuição de intensidade, das duas direções, dependentes do ângulo. Ao lado (fig. 3b) está a distribuição de intensidades da luz *laser* do diodo que usamos em nosso experimento, sobre o qual discutiremos no capítulo seguinte<sup>2</sup>.

### 2.1.1 Potência de saída

Outra característica importante é a potência de saída do *laser*, cuja expressão pode ser dada por [6]:

$$P_O = \eta_i \frac{h\nu}{e} \frac{\ln(1/R)}{\alpha L + \ln(1/R)} (I - I_{th}),$$

na qual  $R$  e  $L$  são, respectivamente, a refletividade do espelho da cavidade e o comprimento da mesma;  $\eta_i$  é a probabilidade de recombinação elétron-buraco na região ativa, e  $\alpha$  corresponde a um coeficiente de perdas relacionado a todos os mecanismos de perdas internos;  $h$ ,  $\nu$  e  $e$  são a constante de Planck, a frequência e a carga elementar respectivamente. A figura (4a) mostra uma curva típica da potência de saída em função da corrente de injeção ( $I$ ).

A ação do *laser* começa a partir corrente de corte ( $I_{th}$ ) destacada pelo surgimento de um “joelho” no gráfico. A depender da temperatura de operação, a corrente  $I_{th}$  pode ser deslocada, consequentemente a ação do *laser* pode acontecer antes ou depois. Observe este efeito na figura ao lado (fig. 4b), em que se mostra uma curva de potência de saída *versus* corrente de injeção, para duas temperaturas diferentes, destacando o efeito da mudança de temperatura sobre  $I_{th}$ , do diodo que usamos no laboratório.

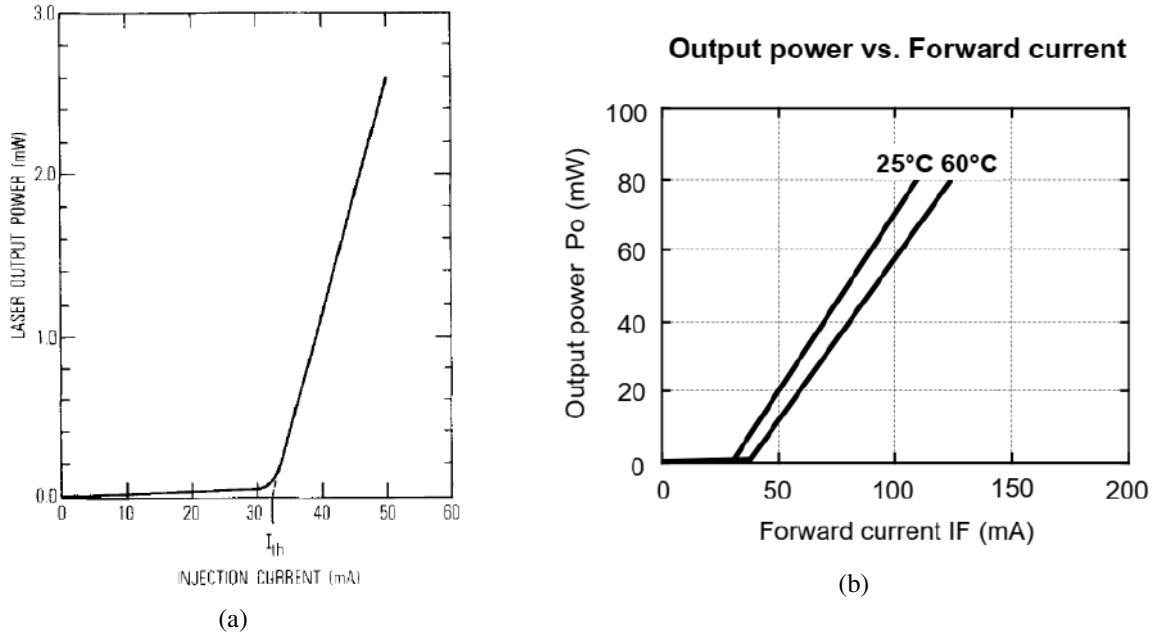
### 2.1.2 Emissão espectral

O diodo pode ser representado por uma minúscula cavidade Fabry-Perot, e o meio de ganho é a região ativa. Os fótons emitidos têm origem nos processos de recombinação dos pares elétron-buraco. O feixe transmitido, portanto, são picos lorentzianos que estão associados com os modos dessa cavidade. Uma forma de medir a separação entre os modos da cavidade é pelo

<sup>2</sup> Este modelo saiu de linha. No entanto, estamos procurando por um substituto capaz de atender aos nossos propósitos.



Figura 4 – Curva de potência de saída em função da corrente de injeção. O *laser* começa a operar a partir da corrente de limiar  $I_{th}$ . a) Um *laser* de diodo típico apresenta essa curva cujo joelho é a corrente-limiar em que o dispositivo começa a operar. A posição dessa corrente depende da temperatura com que o *laser* está operando. b) Desempenho da potência de saída do *laser* de diodo adotado em nosso sistema variando a temperatura.



**Fonte:** (a) Figura extraída da referência [6]. (b) Figura extraída do *datasheet* (apêndice A).

*free spectral range* (FSR), determinado por

$$\Delta\lambda = \lambda^2 / 2n_g L,$$

no qual  $n_g$  é o índice de refração de grupo do meio ativo e  $L$  é o comprimento da cavidade, e  $\lambda$  é o comprimento de onda. O fator 2 que aparece é contando a ida e a volta da luz dentro da cavidade. Note que para o diodo o FSR é tipicamente muito grande, visto que o comprimento  $L$  é muito pequeno. A largura a meia altura do pico lorentziano depende da finesse, ou melhor, depende significativamente da refletividade dentro da cavidade.

### 2.1.3 Sintonização

O comprimento de onda de um *laser* de diodo é, principalmente, determinado pelo *gap* de banda do material semiconductor, em seguida pela temperatura e densidade de corrente da junção [7]. Porém, sintonizar o comprimento de onda através do controle do *gap* não é possível. Por outro lado, o controle da corrente de injeção e temperatura de operação são as vias mediante as quais é possível sintonizar a frequência de um *laser* de diodo.

A sintonização do *laser* de diodo é uma das características mais importantes no processo de emissão. Sintonizar um *laser*, em ordem zero, é controlar a sua temperatura de operação que altera diretamente a saída espectral. Nesse caso, torna-se adequado implementar uma estabilização de temperatura. A corrente de injeção também afeta a temperatura do *laser*. Nesse caso, é desejável o controle duplo da temperatura e corrente a fim de operar o *laser*, otimizando sua estabilidade.

A frequência do *laser* de diodo é sintonizada, também, pela variação da temperatura, porque tanto o caminho ótico da cavidade quanto o comprimento de onda da curva de ganho dependem da temperatura. Todavia, a variação desses parâmetros são independentes. Por exemplo, no dispositivo de AlGaAs o comprimento do caminho ótico muda cerca de 0,06 nm/K, enquanto que a curva de ganho se desloca de aproximadamente 0,25 nm/K [7]. Isso resulta numa curva de sintonização com a temperatura que, em um dispositivo ideal, tem o aspecto de uma escada com “batentes” inclinados.

Pode-se exemplificar uma curva de sintonização característica do *laser* de diodo pela figura (5). Essa curva é apenas um modelo teórico de como é uma curva de sintonização típica, em que cada linha contínua é um modo da cavidade do *laser* operando em uma faixa de temperatura e comprimento de onda. As linhas tracejadas são pontos de descontinuidade significando que entre uma linha e outra houve um salto de modo, ocasionando uma mudança no comprimento de onda. Também é possível observar uma leve inclinação nas linhas contínuas, o que possibilita a sintonização do modo da cavidade através da temperatura.

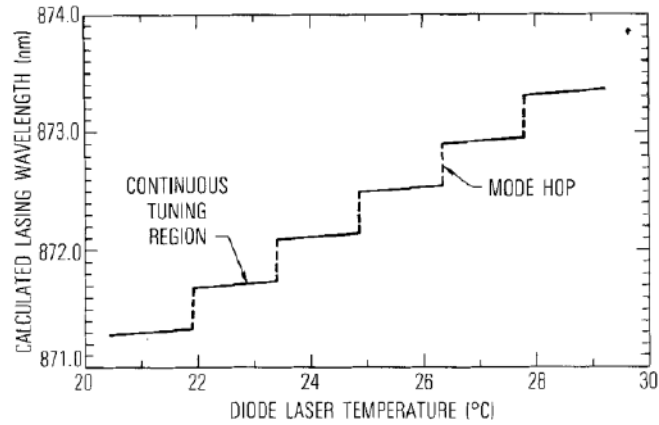
A figura (6) é uma curva de sintonização do *laser* de diodo usado em nosso laboratório. Ela foi obtida a partir do *wavemeter* que temos disponível (modelo 621-A-VIS, *Bristol Instruments*). Usamos a variação da corrente de injeção para aquisição do gráfico.

A equação usada [6] para gerar o gráfico (fig. 5) do modelo é:

$$\lambda_1(T) = \frac{2L[n_0 + pT]}{\text{int}[(2L/c)(n_0 + pT)(v_{p,0} - (\alpha T^2/h(T + \theta)))]}.$$

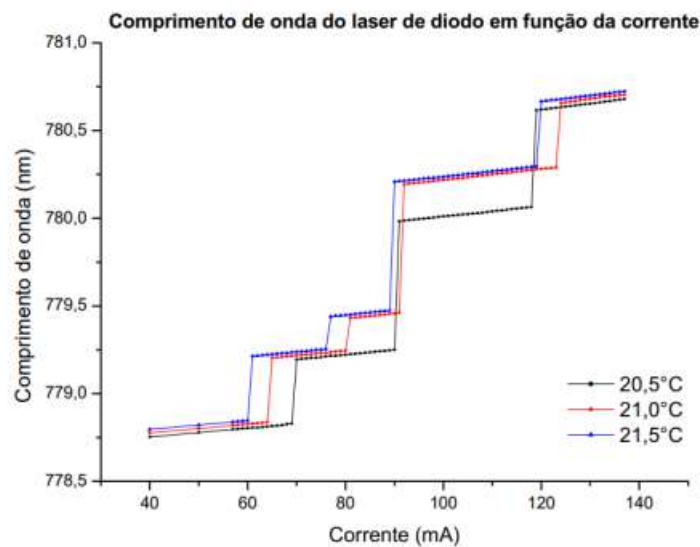
As quantidades  $\alpha$  e  $\theta$  são constantes características do semiconductor; o valor de  $p$  é um coeficiente que também depende do semiconductor; enquanto que  $n_0$  e  $v_{p,0}$  são o índice de refração e frequência do laser extrapolados no zero absoluto,  $T$  é a temperatura e  $h$  é a constante de Planck. O termo “int( $x$ )” é uma função que toma o inteiro mais próximo da variável  $x$ . Essa expressão assume que os modos da cavidade Fabry-Perot mudam com o índice de refração, linear com a temperatura, e com o *gap* de energia do semiconductor, quando o comprimento de

Figura 5 – Modelo exemplificando uma curva de sintonização típica. Cada linha contínua corresponde a um comprimento de onda de um modo da cavidade acessível a pequenos intervalos iguais de temperatura. Quando não há ganho suficiente em um certo modo, a uma faixa de temperatura, o *laser* salta de uma linha para outra, obrigando o *laser* a operar em outro modo e comprimento de onda.



Fonte: imagem extraída da referência [6].

Figura 6 – Curva de sintonização do *laser* de diodo, produzido em nosso laboratório, feita pela aluna de iniciação científica Linda Inez Brasil.



Fonte: imagem extraída da referência [12].

onda do pico da curva de ganho, considerada homogênea, é atingido.

Nesse modelo, as linhas estão igualmente espaçadas. No entanto, uma curva de sintonização real apresenta linhas de tamanhos diferentes e histereses. Isso acontece devido à competição entre os modos decorrentes do deslocamento independente da curva de ganho e do modo da cavidade com relação à temperatura. Outra maneira de obter essa curva é pela variação da corrente de injeção.

Essas são, portanto, as características mais gerais de um *laser* de diodo, importantes para o entendimento do mecanismo de funcionamento do dispositivo, bem como foram dados alguns parâmetros fundamentais que falam sobre o seu desempenho. Estes parâmetros serão úteis ao discutirmos, na próxima seção, alguns métodos de estabilização de frequência e otimização de potência de saída do *laser* aplicado no contexto de física atômica.

Ainda acerca de estabilização, podemos dizer que o controle da frequência de emissão de um *laser* se dá de maneira ativa ou passiva. Comumente, o controle ativo é fazer com que um parâmetro do *laser*, que pode ser a frequência, ou a fase, ou a amplitude, seja reinjetado ao *laser* por meio de um circuito de retroalimentação (*feedback*), que pode ser feito eletronicamente, ou até mesmo por meio de um circuito ótico. A outra maneira, a estabilidade passiva, é o controle periférico das fontes que perturbam a frequência de emissão, como é o caso do efeito da temperatura ambiente sobre o *laser*, a rede elétrica, ou ainda vibrações mecânicas. Trataremos nesta dissertação das duas formas de controle: para o controle passivo, buscamos desacoplar o *laser* dos efeitos da temperatura externa e da rede elétrica; e para o controle ativo, o travamento de uma componente frequência específica por meio de *feedback* eletrônico. Os detalhes desses controles estão reservados nos capítulos subsequentes.

## 2.2 Estabilização de *laser* de diodo em meios atômicos

*Lasers* de diodo são extremamente sensíveis aos estímulos externos. Uma variação de temperatura do ambiente pode alterar o comprimento de onda de saída; ou uma variação brusca da corrente de injeção pode danificar o dispositivo; perturbações mecânicas podem causar vibrações em um *laser* com cavidade externa, afetando o perfil do feixe de saída. Essas condições devem ser controladas a fim de assegurar um alto desempenho do equipamento, principalmente se a sua aplicação está voltada para física atômica.

Nesse contexto, um *laser* bem estabilizado garante que sinais atômicos sejam obtidos sem muita dificuldade. Acontece que as linhas de transição atômicas funcionam como relógios, visto que existe uma frequência bem definida entre dois níveis de energia. Assim, um átomo sentirá mais fortemente a luz do *laser* se a sua frequência de emissão for da ordem da frequência atômica para induzir eficientemente uma transição. Uma técnica bastante comum para estabilizar *lasers* de diodo, via transição atômica, é a absorção saturada, a qual será o foco principal neste trabalho.

Além do processo de estabilização usando meio atômico, o controle passivo da frequência de emissão (o comprimento de onda) de um *laser* de diodo é atingido mediante um controle global e fino da temperatura de operação do *laser*. Isso reduz a possibilidade do dispositivo semicondutor acessar comprimentos de onda indesejáveis.

O comprimento de onda de emissão de um *laser* de diodo pode ser bem controlado ativamente mediante *feedback* ótico, por meio de grade externa. O diodo e a grade formam uma cavidade tipo Fabry-Perot, e a grade seleciona uma componente espectral da luz do *laser*. Essa técnica é bastante comum em *lasers* de diodo de muitos laboratórios, sendo explorada inclusive em *lasers* comerciais. O uso de grade externa torna a frequência de emissão mais bem definida e conta como um método de estabilidade muito eficaz. Largura de linha típica de *lasers* com grade externa é da ordem de 100 kHz. Apesar de vantajoso nesse aspecto, há outras implicações que exigem muitos cuidados na operação desse *laser*, o que torna dispendioso visto que o ônus se encontra em manter tal cavidade muito bem estabilizada. O nosso *laser*, particularmente, opera sem grade externa, assim não trataremos desse método nesse texto.

Outras fontes de perturbações como as vibrações mecânicas sobre a cavidade do *laser* também são dignas de atenção, uma vez que a emissão está diretamente ligada com os modos ressonantes dessa cavidade. Desse modo, vibrações mecânicas sobre o *laser* impedem que a luz emitida alcance o modo de operação desejável.

Sendo assim, tipicamente, as duas principais preocupações na montagem de um *laser* de diodo, para aplicação em física atômica, são o *feedback* ótico e o controle de temperatura. Primeiro, é importante garantir que o arranjo minimize o *feedback* ótico indesejado, e se desejado, seja controlado de modo a não causar alterações inapropriadas na frequência. Isso determina, particularmente, o *layout* geral do equipamento. Em geral, um arranjo compacto e rígido favorece um controle ótimo da temperatura e das vibrações mecânicas. Porém, outros elementos podem ser exigidos na montagem, fazendo com que as dimensões do sistema sejam diferentes de um *laser* para outro.

Portanto, nesta seção vamos focar essencialmente nos cuidados de montagem mecânica, e respectivos mecanismos de estreitamento de largura de linha, usando sistemas de controle de temperatura e corrente, bem como uma discussão do processo de absorção saturada como meio de estabilização de *laser* de diodo.

### 2.2.1 Montagem mecânica

A montagem mecânica para o *laser* é requerida por duas necessidades básicas. A primeira é a temperatura com que se deseja operá-lo, e a segunda é garantir robustez mecânica. O arranjo deve garantir que a temperatura e vibrações sobre o *laser* sejam controladas. Com relação ao controle térmico, basicamente, o dispositivo semicondutor é acoplado a um pequeno bloco metálico, que funciona como um reservatório térmico para resfriar, ou aquecer, o diodo. Esse reservatório recebe o calor de uma fonte térmica que deve atuar para esse processo de aquecimento/resfriamento. Em geral, um dispositivo de leitura de temperatura é acoplado próximo ao chip do diodo *laser* para acompanhar a sua variação de temperatura. Além desses elementos, uma base metálica maior, rígida, é conectada ao pequeno bloco por meio de conectores preferencialmente com isolamento térmico. Essa base serve, também, como um estabilizador mecânico, a fim de evitar trepidações sobre o *laser*.

Outro elemento importante é a lente de colimação que fica posicionada na saída da luz emitida pelo *laser*. Esse elemento colima o feixe de luz, evitando a divergência da emissão. Existem vários tamanhos de lentes, e colocá-la mais longe ou mais próxima da saída dependerá essencialmente da aplicação. Mas, se exigirmos que o *feedback* ótico seja constante, então uma lente de colimação pequena montada muito próxima a saída é a opção mais aconselhável. Depois de colocar cada parte no seu devido lugar, podemos condicionar tudo dentro de uma caixa na tentativa de evitar fluxo de ar sobre o sistema, alterando, assim, a sua temperatura. É necessário se certificar de que uma janela<sup>3</sup> seja aberta para a saída do *laser*.

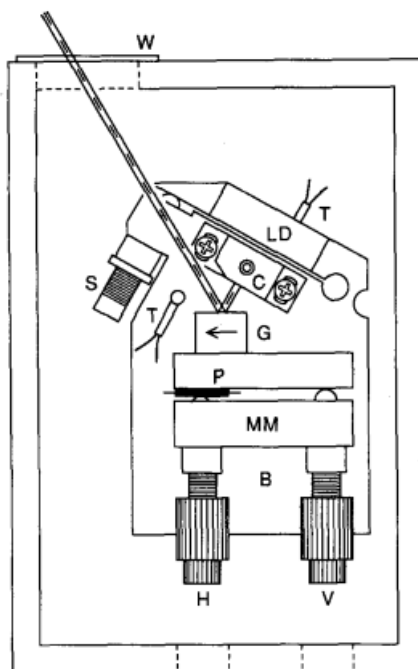
Há várias formas de montagem, mas a que se tornou muito bem estabelecida (padrão comercial) é o *laser* de diodo com grade externa. Como dito anteriormente, a presença da grade de difração<sup>4</sup> formará com o diodo uma cavidade Fabry-Perot externa ao diodo, selecionando a frequência da luz emitida para fora da cavidade. Na figura (7), podemos ver um exemplo de montagem de um *laser* com grade externa. Nessa montagem, em particular, podemos observar a presença da grade (G) disposta na frente do *laser* (LD). G está fixada em uma montagem (MM) que possui dois parafusos de precisão (H, V), os quais ajustam a posição do feixe vertical e horizontalmente, e em relação ao bloco onde LD está acoplado. Dois termistores (T) estão

<sup>3</sup> Existem janelas de vidro com uma película anti-reflexão disponíveis no mercado. Eis um link para conferir este elemento ótico [https://www.thorlabs.com/navigation.cfm?guide\\_id=16](https://www.thorlabs.com/navigation.cfm?guide_id=16). Acessado em: 23 de junho, 2020

<sup>4</sup> Alguns modelos de grade para usar em montagens de *laser* de diodo: [https://www.thorlabs.com/navigation.cfm?guide\\_id=9](https://www.thorlabs.com/navigation.cfm?guide_id=9) Acessado em: 23 de junho, 2020. A sua escolha deve se basear no comprimento de onda do *laser* que vai operar e na resolução da grade.

presentes nessa montagem. Um se encontra bem próximo a LD, e o outro fixo na base (B), a qual segura todos os elementos. Notemos, também, que um parafuso de ajuste fino (S) move um braço de alavanca que prende o bloco onde se encontra C-LD. “C” aqui é a lente de colimação. Esse braço de alavanca funciona para ajustar o tamanho da cavidade formada pelo conjunto G-LD. O feixe resultante sai por uma janela (W) aberta na caixa que envolve toda montagem. Outra observação nessa montagem é a presença de um elemento piezoelétrico (P) posicionado entre G e MM. O piezo é responsável por manter o comprimento da cavidade caso este seja alterado por quaisquer perturbações.

Figura 7 – Exemplo típico de uma montagem de *laser* de diodo com grade externa.



Fonte: Imagem extraída da referência [13].

O estado-da-arte de *laser* de diodo tem avançado ao longo dos anos. Muitas montagens têm sido desenvolvidas para um melhor desempenho do *laser* como um todo. Diversos trabalhos nessa linha foram publicados e ricamente explorados em vários grupos de pesquisa em física atômica [8, 13–16].

A presença da grade externa numa montagem tem a vantagem de tornar mais fina a frequência emitida pelo laser. Por outro lado, ela torna o sistema mais complexo na hora de controlar os parâmetros, o que envolve mais cuidados com o *feedback*. A montagem do *laser* desenvolvido para este projeto de mestrado é mais simples. Ela não envolve grade de difração, nem parafusos de precisão, porque o diodo que adquirimos já tem uma largura de linha estreita

o suficiente, atendendo bem aos propósitos dos experimentos feitos em nosso laboratório. Será discutida mais detalhadamente a montagem que adotamos. Ela se tornou simples no sentido de desenvolver a cabeça do laser, porém envolveu outros problemas que necessitaram de um certo grau de sofisticação.

Uma vez que o aparato é determinado, podemos nos questionar: em qual temperatura desejamos que o *laser* opere? Como ela pode ser ajustada? E de que maneira podemos alimentar o *laser*? Essas perguntas são facilmente respondidas porque existem controladores eletrônicos desenvolvidos para realizar tais funções.

### 2.2.2 Controles de corrente e temperatura

Vimos anteriormente que alguns elementos como fonte térmica, piezoelétrico, sensores eletrônicos de temperatura e o próprio dispositivo semicondutor fazem parte da montagem de um sistema *laser*. A presença deles é parte de uma malha de controle. Cada elemento tem um objetivo particular: alguns informar o estado do *laser*, enquanto outros corrige qualquer mudança indesejada. Ainda tem aquele elemento, no caso o próprio diodo, que funciona sem restrição, para quem os outros trabalham.

Se numa ponta da malha estão todos esses elementos, na outra ponta estão os controles. Eles são, para cada elemento presente, uma central de comando que recebe as informações do estado em que o *laser* está operando, e devolve a informação com uma ordem de corrigir e/ou manter a configuração desejada. Esses controles são o de corrente (e posição da grade) e temperatura.

#### 2.2.2.1 Controle de corrente (e controle de posição da grade externa)

Este é um circuito eletrônico que controla, basicamente, a injeção de corrente para dentro do *laser* de diodo e comumente, também, o transdutor piezoelétrico (PZT).

*Corrente de Injeção.* A corrente injetada no *laser* atua continuamente para a emissão. Em aplicações de física atômica, fontes de corrente podem ter a sua saída modulada por um gerador de função periódica. A luz emitida pelo *laser*, portanto, deve oscilar numa determinada faixa de frequência, e excitará o meio atômico. No caso em que o controle de corrente atua, também, sobre o piezoelétrico, sua função é enviar uma tensão para o piezo que acerta a posição do comprimento da cavidade. Esse é um dos exemplos da malha de *feedback* citada



anteriormente. No geral, essa correção precisa ser rápida o suficiente para conservar o comprimento requerido da cavidade. Na nossa montagem, como o piezoelétrico não está presente, o controlador de corrente que utilizamos funciona apenas para injeção e modulação da corrente (ver apêndice C).

Um *laser* de diodo funciona com algumas centenas de miliamperes (mA) de corrente contínua (DC). O dispositivo que temos usado no nosso laboratório opera em até 140mA. Assim, o controle de corrente deve estar configurado para variar sua corrente dentro da faixa exigida pelo semicondutor. O potenciômetro é o elemento de circuito que fornece variação de injeção e é o elemento mais crítico, pois esse dispositivo funciona através de um contato interno que vai se desgastando com o tempo. Dessa forma, ruídos são enviados para o *laser*, causando, dependendo do grau do ruído, a sua morte, visto que o diodo é extremamente sensível a correntes transientes. Assim, a escolha de um bom potenciômetro é crucial. O circuito de corrente também atua para aquecer a cavidade interna do *laser*, funcionando como ajuste fino da temperatura de operação. Existem no mercado circuitos controladores de corrente DC com baixo nível de ruído e alta velocidade de modulação, porém existem muitas receitas prontas (*homemade*) disponibilizadas, que surgem como alternativa a fim de diminuir custos mantendo qualidade [17, 18].

*Controle do PZT.* Lasers com grade externa necessitam de um controle do tamanho da cavidade. Esse tamanho é efetivamente ajustado por meio do PZT. Este efetivamente ajusta finamente a posição da grade ao receber um *feedback* de corrente toda vez que o comprimento de onda do *laser* (ou tamanho da cavidade) é alterado.

Além dos elementos presentes no *laser* controlados pela corrente, existem aqueles responsáveis pela leitura e controle da temperatura: fonte térmica, termistores, sensores tipo circuito integrado, dissipadores de calor. Todos estes elementos são contados para o controle ativo da temperatura sobre o sistema *laser*.

#### 2.2.2.2 Controle de temperatura

O controle dinâmico da temperatura sobre o *laser* é parte fundamental no seu bom funcionamento. Sabemos que a cavidade do dispositivo semicondutor é termicamente sensível. Isso significa que o comprimento de onda emitido pode sofrer variação com a mudança no comprimento da cavidade.

A frequência do *Laser* de diodo é muito sensível a variações térmicas. Por isso, alguns

grupos empregam controle ativo de frequência, como os circuitos de travamento de frequência, a fim de estabilizar a saída do *laser*. Todavia, existem formas de controle indiretas na saída do *laser* apenas implementando um sistema de isolamento e controle térmico. No exemplo citado acima (fig. 7), foram usados termistores. Estes dispositivos termosensíveis são usados para leitura da temperatura atuante localmente. A leitura é enviada para o circuito controlador, que envia o comando para a fonte térmica a qual deve resfriar/aquecer o dispositivo em torno de uma temperatura pré-fixada.

Existem outros mecanismos de leitura, como os sensores analógicos e digitais (LM35, DS18B20); e os módulos termoelétricos de efeito peltier, que funcionam como fonte térmica para aquecer e resfriar o *laser*. Fica a critério do usuário escolher aquilo que atende bem as necessidades dentro do laboratório. No nosso *laser*, em particular, usamos o sensor analógico LM35 e como fonte térmica, uma pastilha peltier TEC1-12706. Uma placa de Arduino UNO é o circuito que controla esses elementos e estabelece a temperatura em que o *laser* deve operar. Veremos os detalhes no próximo capítulo.

Um detalhe que faz muita diferença na hora do processo de resfriamento e aquecimento é o tamanho e robustez do *laser*. Pois, todo sistema como esse possui uma massa térmica que deverá ser termalizada. Para que o sistema atinja a temperatura definida, levará um tempo razoavelmente longo para que a temperatura seja homogeneamente distribuída. É por isso que as montagens mais compactas são vantajosas. O *laser* que montamos leva cerca de 40 segundos para estabilizar termicamente. Certamente um *laser* cuja montagem mecânica é mais robusta pode levar mais tempo para estabilizar sua temperatura em razão do número maior de elementos mecânicos envolvidos.

Uma boa montagem, e bons controles de corrente e temperatura contribuem para o estreitamento da largura de linha de um *laser*. Vimos que essa largura corresponde à largura do espectro de frequências do laser, ou seja, quanto menor a largura de linha, mais monocromática é a radiação. Em outras palavras, a largura de linha é um parâmetro de precisão e acurácia da frequência emitida pelo *laser*. Discutiremos sobre este assunto no próximo tópico.

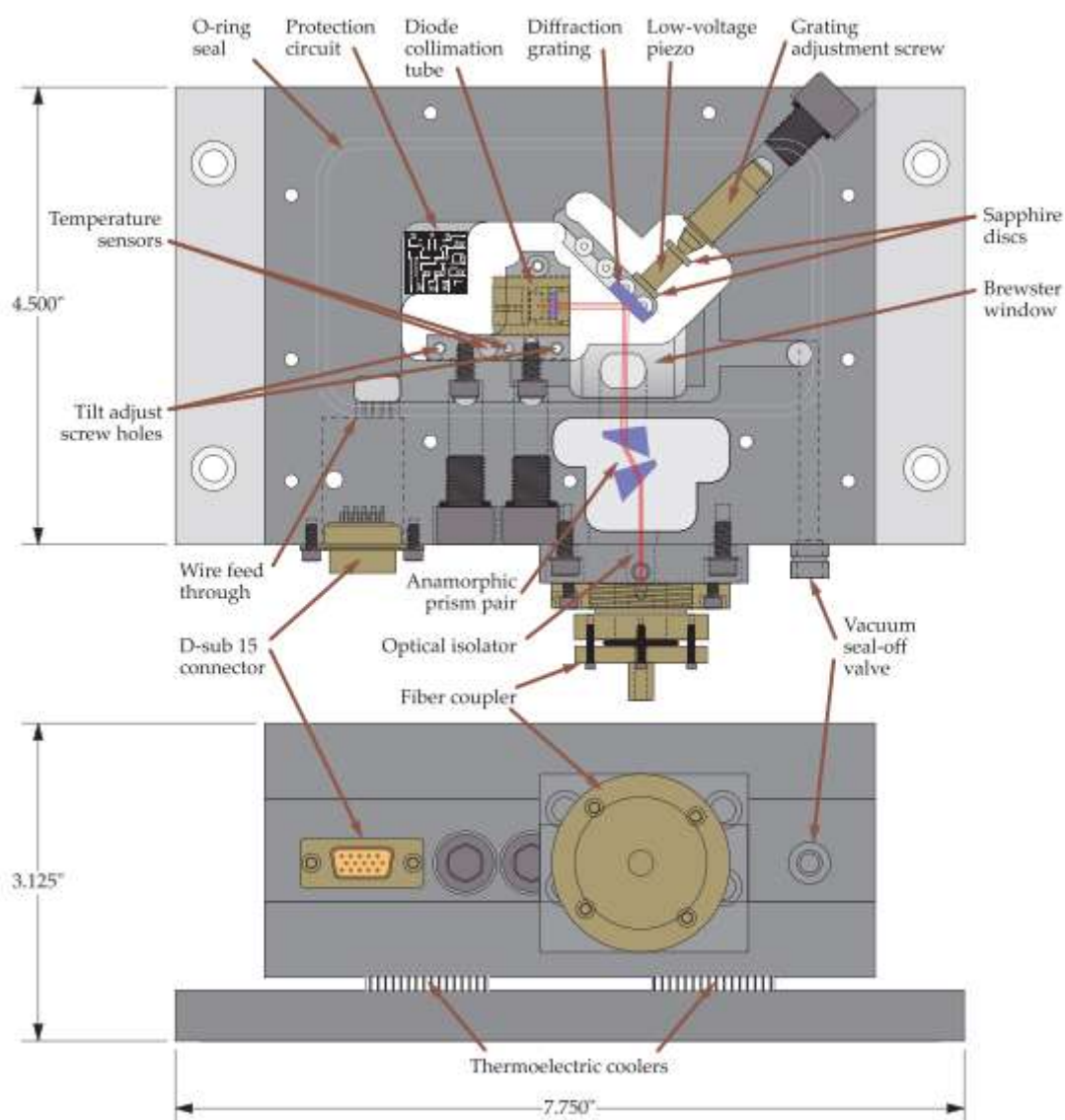
### 2.2.3 Estreitamento da largura de linha

O estreitamento da largura de linha é muito importante em áreas de metrologia ótica, armadilhas a *laser* e comunicação ótica. Ao desenvolver um sistema *laser*, o objetivo é remover todas as possíveis fontes de ruídos que causam alargamento na sua largura de linha. E as fontes

podem ser de natureza artificial, fundamental e ambiental [19].

Um exemplo de fonte de ruído vinda do ambiente pode ser o próprio clima: o *laser* pode se comportar de um jeito no verão, e de outro no inverno. Vibrações acústicas também são fontes de ruído ambiental. A rede elétrica, usada para alimentar os circuitos eletrônicos, pode introduzir ruído em 60 Hz ao *laser*. Todas essas fontes são causas de alargamento do espectro de emissão do *laser*. Ruídos fundamentais, por outro lado, são aqueles conhecidos por *ruído branco* e *ruído rosa* (ou ruído  $1/f$ ). Esses ruídos, por sua vez, geralmente são a componente dominante da largura de linha. Os ruídos ditos artificiais vêm dos próprios sistemas de *feedback*.

Figura 8 – Sistema *laser* para aplicação em experimentos em física atômica. Esse sistema foi projetado para estabilizar passivamente a frequência de um *laser* de diodo.



Fonte: figura extraída da referência [15].

Portanto, exigir uma largura de linha extremamente fina é requerer um isolamento eficaz do sistema *laser* de todas essas fontes causadoras de instabilidade na frequência de emissão. Podemos exemplificar um sistema *laser* com alto nível de estabilidade como o da referência [15]. Seu *laser* foi construído especialmente para experimentos de física atômica. É um sistema muito robusto envolvendo grade externa. Uma cavidade feita de alumínio foi devidamente projetada para receber um dispositivo *laser* com uma grade externa, e outros elementos óticos, como uma janela anti-refletora e um par de prismas anamorfos (fig. 8). A grade fica presa a um braço feito na própria peça de alumínio, e que é ajustado por um parafuso em contato com um piezo de baixa voltagem. O conjunto é devidamente selado para suportar alto vácuo. A eletrônica interna presente é alimentada através de um conector serial *feedthrough*. O sistema também conta com um isolador ótico e um acoplador em fibra integrados a esse *laser*.

Uma vez que o *laser* é montado, e todos os sistemas de controle estão em funcionamento, uma maneira simples de verificar o tempo em que um *laser* permanece estabilizado em frequência é através da espectroscopia de absorção saturada, usando uma célula de vapor atômico, que no nosso caso utilizaremos vapor de rubídio.

#### 2.2.4 Espectroscopia de absorção saturada

Por meio da espectroscopia de absorção saturada, é possível varrer a frequência do *laser* através das linhas de transições atômicas. Essa técnica ajuda a acompanhar a estabilidade da frequência de longo prazo, e o comportamento da sintonização da frequência do *laser* [13]. Vamos voltar a nossa atenção para os átomos alcalinos, em particular o átomo de rubídio, uma vez que utilizaremos este átomo como o nosso meio atômico para caracterização do *laser*.

O átomo de rubídio (Rb) possui dois isótopos,  $^{85}\text{Rb}$  e o  $^{87}\text{Rb}$ . Estes, por sua vez, são encontrados na natureza com abundância de 72% e 28%, respectivamente. Esse átomo dispõe de um único elétron na camada eletrônica mais externa. Sabe-se que a energia desses átomos forma uma estrutura de níveis tal qual o átomo de hidrogênio, quando não levamos em consideração o spin eletrônico. No entanto, ao contar com a presença do spin os níveis de energia dos estados mais excitados são desdobrados em subníveis, as estruturas finas, as quais são explicadas pelo conceito de acoplamento spin-órbita.

Podemos conferir que o átomo de rubídio tem o seu único elétron ocupando a subcamada 5S, que representa o estado fundamental, e cujo momento angular orbital é  $L = 0$ . O primeiro estado excitado desse elétron é aquele cujo  $L$  é igual a 1 representado, então, pelo sím-

bolo  $5P$ . E por causa do acoplamento spin-órbita, este estado excitado forma um dubleto. Pois, lembre-se que o momento angular total  $J$ , dependendo da orientação do spin, assume valores  $J = L - 1/2$  e  $J = L + 1/2$ . Assumindo que  $S = 1/2$  e  $L = 0, 1$ , temos que os valores possíveis de  $J$ , consequentemente os estados dubletos, são  $J = 1/2$  e  $J = 3/2$ . Portanto, a primeira transição de estrutura fina vai do estado fundamental  $5S_{1/2}$  ao estado excitado  $5P_{1/2}$  e é chamada de transição  $D1$ , de comprimento de onda igual a 795 nm; e a outra, que vai do nível  $5S_{1/2}$  para o nível  $5P_{3/2}$ , leva o nome de transição  $D2$  com comprimento de onda igual a 780 nm. Estamos usando um *laser* de comprimento de onda centrado em 780 nm, portanto estamos focados na transição  $D2$  do rubídio.

Também acontece que todos os átomos alcalinos têm um spin nuclear ( $I \neq 0$ ). O momento magnético desse spin interage com o campo magnético gerado pelo elétron de valência, formando um novo padrão de estrutura de níveis, a estrutura hiperfina, cujo momento angular total, agora chamado de  $F$ , é a soma dos possíveis valores de  $J$  e  $I$ . O  $^{87}\text{Rb}$  tem  $I = 3/2$ , e o  $^{85}\text{Rb}$  tem  $I = 5/2$  (detalhes de cada isótopo podem ser verificadas nas referências [20, 21]). Assim, podemos obter os valores de  $F$  da mesma forma como foi calculado os valores de estrutura fina, atentando para os possíveis valores assumidos por  $J$ . Nesse caso,  $F$  pode variar no intervalo de  $|J - I| \leq F \leq J + I$ . Senão, vejamos o caso em que temos  $I = 3/2$  (esse mesmo procedimento pode ser realizado para o caso em que  $I = 5/2$ ):

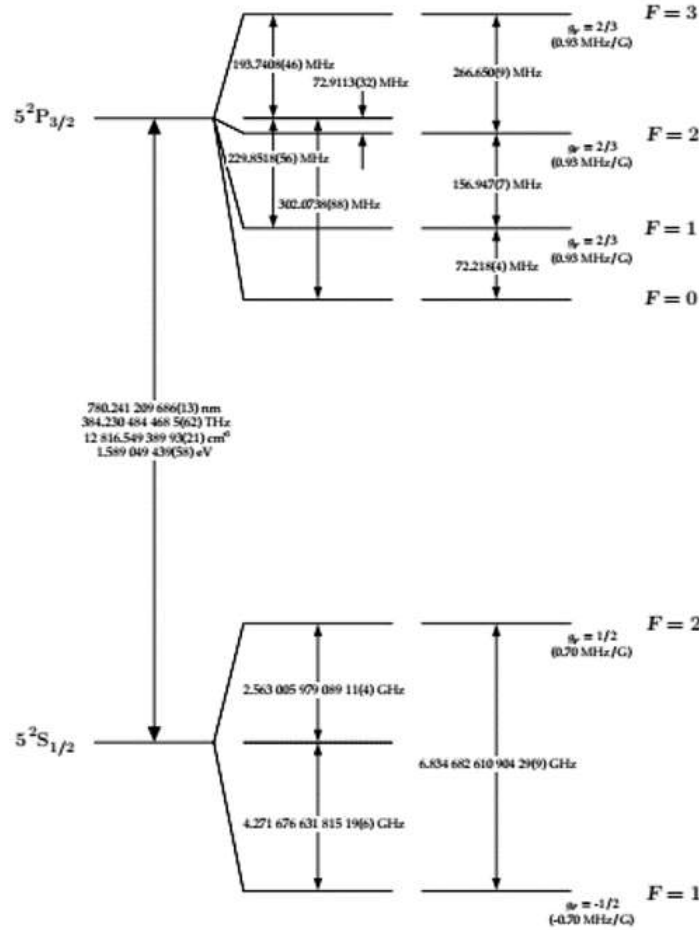
$$\begin{aligned} J = |L - S| &= \left| 0 - \frac{1}{2} \right| = \frac{1}{2}, & J = L + S &= 0 + \frac{1}{2} = \frac{1}{2} \\ J = |L - S| &= \left| 1 - \frac{1}{2} \right| = \frac{1}{2}, & J = L + S &= 1 + \frac{1}{2} = \frac{3}{2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_{L=0} &= |J - I| = \left| \frac{1}{2} - \frac{3}{2} \right| = 1, & F_{L=0} &= J + I = \frac{1}{2} + \frac{3}{2} = 2 \\ F_{L=1} &= |J - I| = \left| \frac{1}{2} - \frac{3}{2} \right| = 1, & F_{L=1} &= J + I = \frac{1}{2} + \frac{3}{2} = 2 \\ F_{L=1} &= |J - I| = \left| \frac{3}{2} - \frac{3}{2} \right| = 0, & F_{L=1} &= J + I = \frac{3}{2} + \frac{3}{2} = 3. \end{aligned}$$

Note que o subnível do estado fundamental  $5S_{1/2}$  se desdobra em outros dois níveis nos níveis hiperfinos  $F = 1$  e  $F = 2$ , e o nível excitado  $5P_{3/2}$  se desdobra em quatro subníveis hiper-

finos  $F' = 0, 1, 2$  e  $3$ . Dessa forma, construímos uma estrutura de níveis como bem apresentada na figura (9)

Figura 9 – Níveis hiperfinos do átomo de  $^{87}\text{Rb}$ , mostrando todas as suas possíveis transições.



Fonte: figura extraída da referência [21]

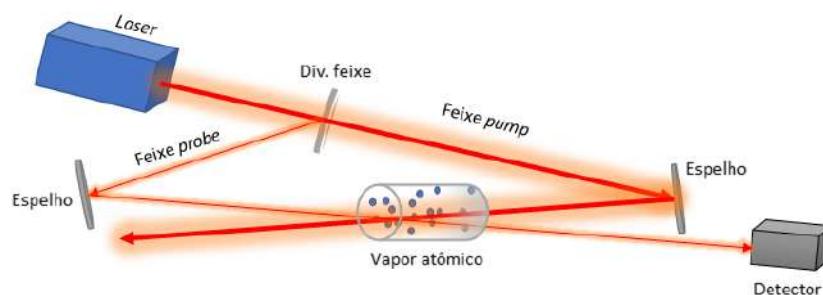
Nessa imagem (9), temos um exemplo dos níveis hiperfinos do átomo do  $^{87}\text{Rb}$  e as suas possíveis transições  $F = 1, 2$  e  $F' = 0, 1, 2, 3$ , além dos *crossovers*, no momento em que o *laser* está acoplado à linha D2. Esses *crossovers* são regiões intermediárias aos níveis reais (1 e 2, 1 e 3, 2 e 3), e não configuram níveis de energia. Através de técnicas espectroscópicas, podemos ver essas possíveis transições atômicas, a depender da linha em que os átomos estão sendo excitados: D1 ou D2. A técnica que vamos utilizar é a técnica de absorção saturada.

A absorção saturada é um fenômeno ótico não-linear de alta intensidade da luz, que nos permite observar todas as transições atômicas, no nosso caso o rubídio, ao excitarmos uma amostra atômica. A partir de dois feixes contra-propagantes, um forte e outro fraco (fig. 10) ambos possuindo a mesma frequência  $\omega_0$ , podemos gerar um espectro acessando todas as

frequências de transição possíveis. Basicamente, o experimento típico consiste de um feixe que sai do *laser* e passa por um divisor de feixe (BS), onde uma parte é transmitida, com potência mais alta, sendo este feixe de bombeio (*pump*); e a outra parte do feixe *laser* é refletido pelo BS, com menor intensidade, o feixe de prova (*probe*), contra-propagante ao *pump*.

Ambos os feixes excitam os átomos contidos na amostra, que veem os fótons com frequência deslocada por efeito Doppler. Digamos que um átomo esteja viajando com velocidade  $v_z$ , ao longo da direção positiva do eixo  $z$  (fig. 11). Um feixe que se aproxima por trás é visto pelo átomo com frequência deslocada de  $\omega = \omega_0 - kv_z$  (*redshift*), enquanto que o feixe que se aproxima pela frente é visto com frequência deslocada de  $\omega' = \omega_0 + kv_z$  (*blueshift*). Assim, alguns átomos absorvem os fótons na frequência de ressonância vista da respectiva transição. Se, por outro lado, o *laser* é ligado próximo da frequência de ressonância atômica, o feixe *pump* reduz a absorção do feixe *probe*, e o resultado são picos estreitos na intensidade do feixe *probe* transmitidos através da amostra (fig. 12), chegando no detector. Os *crossovers* aparecem nesse contexto em decorrência da frequência do *laser* estar sintonizado exatamente entre duas frequências de transição. Imagine que o feixe de *pump* interage com um grupo de átomos com velocidade  $v_z$ . Por causa do efeito Doppler, esse grupo pode absorver o fóton em uma das duas possíveis frequências de transição. Na outra mão, o feixe *probe* interage com um grupo atômico que tem a mesma velocidade e sentido oposto  $-v_z$ . E pela mesma razão que o primeiro caso, este grupo absorverá o fóton em uma das duas possíveis transições. Como podemos observar na figura 39, o resultado são picos relacionados à diminuição da absorção do feixe *probe* causado pelo feixe *pump* nessas frequências de transição.

Figura 10 – Representação de um típico experimento de absorção saturada. Dois feixes contra-propagantes, um forte (feixe *pump*) e outro fraco (feixe *probe*), com mesma frequência, atravessam uma célula de vapor atômico excitando os átomos. O sinal do feixe *probe* é detectado.



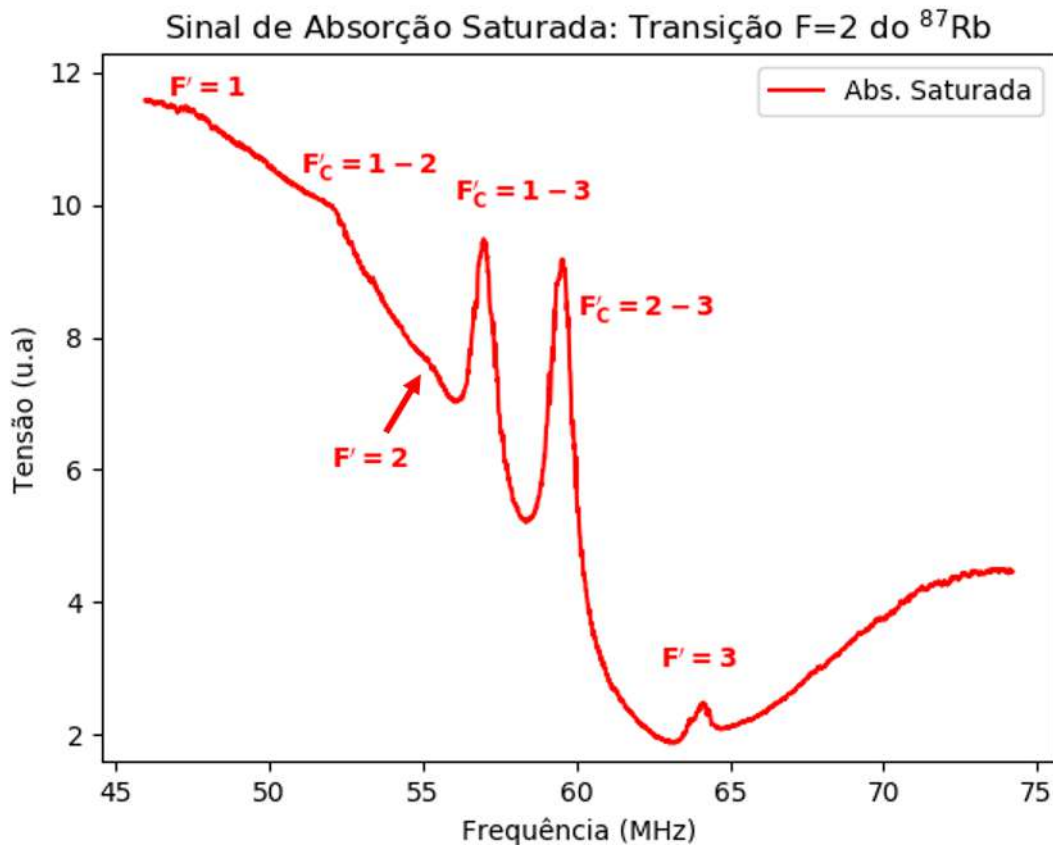
Fonte: O autor (2020)

Figura 11 – Representação esquemática do efeito Doppler experimentado por um átomo dentro de uma célula de vapor de Rb quando interage com os feixes contrapropagantes, de frequência  $\nu$ , do *laser*. O átomo viaja com uma velocidade  $v_z$  ao longo do eixo ótico ( $z$ ). As cores das flexas representam os deslocamentos de frequência, *blueshited* e *redshifted*, que o átomo vê ao se aproximar/afastar do feixe.



Fonte: O autor (2020)

Figura 12 – Um exemplo típico de sinal de absorção saturada, onde os picos de absorção surgem como resultado da excitação atômica pela interação com os feixes contra-propagantes. Os picos se encontram dentro de um poço, o qual representa a distribuição Doppler alargada. Na imagem estão destacados os os picos de *crossovers* e os de transição.



Fonte: O autor (2020)

A espectroscopia de absorção saturada é um parâmetro que pode nos ajudar a investigar a estabilidade do *laser* em relação a uma dessas linhas de transição. Isso pode ser feito fazendo o *laser* operar na frequência de uma transição. Para isso, vamos incorporar alguns mecanismos que auxiliarão nessas medidas de estabilidade. As medidas para esse propósito são várias,



porém gostaria de destacar algumas, as quais estarão relacionadas a esse trabalho.

## 2.3 Medidas de precisão de nível de estabilidade

Uma vez que foi realizada a absorção saturada, e selecionada a frequência com que queremos comparar, será importante medir o quão estável é a frequência de emissão do *laser*. Uma possibilidade é obtendo o desvio de Allan [22]. A vantagem dessa medida é que ela nos dá a informação da dinâmica dos ruídos presentes no processo de estabilidade: as flutuações de Allan *versus* o tempo médio, na forma de um gráfico log-log, permite que os tipos de ruídos sejam identificados pelo *slope* de diferentes regiões. Diferentemente do desvio padrão, o desvio de Allan é a raiz quadrada tomada sobre a média de diferenças quadradas entre valores sucessivos de períodos amostrais. Dessa maneira, pode-se obter uma medida do comportamento da variabilidade de uma quantidade quando é calculada a média sobre diferentes medidas de períodos de tempo, o que permite diferenciar tipos diferentes de variância de sinal [23]. Medidas de desvio de Allan podem ser aplicadas em estabilização de instrumentos [16, 23]; para medidas de calibração e sincronização [24, 25]; e no mercado financeiro [26].

Outra maneira de medir a estabilidade de um *laser*, é comparando a sua frequência de saída com uma frequência de referência, geralmente com largura de linha conhecida mais fina. Isso é possível graças à técnica de interferometria heterodina, em que dois feixes *lasers* oscilam fora de fase, um em relação ao outro, e depois batidos no mesmo detector. O sinal da detecção corresponde às flutuações de fase (ruídos) geradas pelas fontes de instabilidade (térmica, mecânica, elétrica) [27–30]. A vantagem dessa técnica é que permite caracterizar diretamente a fase ótica do laser a partir de um sinal de referência. No entanto, está limitada a carregar erros sistemáticos decorrentes das fontes eletrônicas, ou mecânicas. [29, 31]. Outro problema que surge são as componentes de ruídos branco e  $1/f$  os quais contribuem para o alargamento da forma de linha do *laser* [30]. Isso pode ser contornado pela medida direta de frequência por meio de um ressonador Fabry-Perot. Essa técnica também pode ser empregada em física atômica ao requerer que as duas frequências *lasers* difiram por uma quantidade igual à estrutura hiperfina do estado fundamental de um átomo [8]. No contexto de ultraestabilidade, a técnica auto-heterodina permite medir as componentes de ruído branco e  $(1/f)$  de maneira fenomenológica a partir da composição das duas componentes da densidade espectral de potência [15].

A medida que usaremos, no entanto, deve acompanhar a frequência de emissão do nosso

*laser*, a partir da seleção de uma linha atômica e o travamento dessa frequência por meio de um amplificador *lock-in*. Esse processo demanda uma malha de feedback, onde a frequência selecionada é convertida em um pulso elétrico que será enviado para o *laser* através da corrente de injeção. Para acompanhar a frequência do *laser*, então, usamos um interferômetro *wavemeter*, disponível no laboratório, que deve monitorar em tempo real as flutuações, em frequência, do *laser*. Este procedimento será discutido com mais detalhes posteriormente.

Discutimos os aspectos gerais do *laser* de diodo, desde as principais características do seu funcionamento até sua montagem e métodos de caracterização. Tendo isso em vista, podemos discutir as particularidades da montagem do *laser* que inspirou este projeto, ou seja discutiremos a instrumentação pertinente ao funcionamento do nosso *laser* de diodo, e as técnicas de estabilização ativa e passiva usadas para controlar a frequência de saída do laser.

### 3 INSTRUMENTAÇÃO DO *LASER* DE DIODO

Neste capítulo, abordaremos toda a montagem e os instrumentos necessários para o funcionamento do *laser* de diodo desenvolvido. O objetivo é construir um novo sistema *laser* com melhor estabilização passiva, ou seja, trata-se de um sistema em que os ruídos causadores do alargamento de linha, e instabilidade de frequência em curto e longo prazos, são minimizados ao controlar a ação das suas fontes. Em particular, preocuparemos-nos com o controle térmico, visto que este afeta mais substancialmente a ação do *laser*. Vimos que uma pequena variação de temperatura sobre a cavidade do *laser* é capaz de variar a saída do comprimento de onda em alguns MHz. Por isso, um controle eficiente da temperatura sobre o dispositivo torna mais fácil a sua sintonização.

A partir disso, o controle passivo que queremos alcançar envolverá a construção de um novo *laser* de diodo e de um novo controlador de temperatura digital. O *laser* foi adaptado para suportar baixo nível de vácuo, ou seja da ordem de até  $10^{-3}$  atm. Sua cobertura é feita de acrílico, e ela foi vedada com cola de silicone. Uma base sobre a qual o calor é dissipado foi confeccionada com furos passantes por meio dos quais serão introduzidos fios de alimentação da eletrônica interna, e um passante por onde é feito o vácuo. O controlador de temperatura foi inspirado no modelo precedente desenvolvido pela ex-aluna de mestrado, a Natália Alves [32]. Este novo controlador foi integralmente programado pelo aluno de iniciação científica, o Rodrigo Luiz Santos.

O capítulo será dividido nas seguintes partes: processo de montagem mecânica, que diz respeito à estrutura e usinagem das partes bem como a peça final. Depois disso, será discutida toda a parte eletrônica necessária para o funcionamento do *laser*, enfatizando os controles de temperatura e corrente montados especialmente para este projeto.

#### 3.1 Montagem da cabeça do *laser*

O dispositivo *laser* (diodo *laser*) que usamos em nosso laboratório (Redes Quânticas) é baseado em semicondutor de gálio arsênico, modelo DL-7140-201, da empresa *SANYO ELEC-*

*TRIC CO. LTDA.*<sup>1</sup> (fig. 13a), cujo comprimento de onda está centrado em 785 nm, e que tem potência típica de saída de 70 mW. Possui encapsulamento de 5,6 mm de diâmetro<sup>2</sup>.

Figura 13 – a) *Laser* de diodo da *SANYO ELECTRIC CO. LTDA.*, modelo DL-7140-201. Fonte: foto extraída do site <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=DL7140-201>. Acessado em 06 de julho. b) esquema elétrico da pinagem desse *laser*.



**Fonte:** figura extraída do datasheet (apêndice A).

Os três pinos são as conexões elétricas, porém apenas duas delas serão usadas: os pinos 1 e 2 (fig. 13b). O pino 2 para o neutro, e o pino 1 para a entrada de tensão. É importante ressaltar que as conexões elétricas não devem ser soldadas diretamente nos pinos do diodo, pois este é muito sensível, seja à temperatura do ferro de solda, seja pela corrente devido à eletrostática. É fortemente recomendável o uso de um elemento soquete (usamos o modelo S8060, Thorlabs) sobre quem é realizada toda manipulação e soldagem. Vale lembrar que o encaixe do soquete no diodo deve ser feito no final, quando todo o aparato estiver devidamente pronto, como medida de segurança, para poupar o dispositivo de qualquer dano catastrófico.

Figura 14 – Tubo colimador LT230P-B, e soquete modelo S8060, ambos da Thorlabs.



**Fonte:** imagens extraídas do sítio <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=LT230P-B>. Acessado em 14 de janeiro de 2021.

O diodo *laser* deverá ser encaixado em um tubo colimador (usamos o modelo LT230P-

<sup>1</sup> Este modelo saiu de linha. No entanto, estamos procurando por um substituto capaz de atender aos nossos propósitos.

<sup>2</sup> Mais informações são encontradas no seu *datasheet* (apêndice A).

B, Thorlabs<sup>3</sup>), onde se encontra uma lente esférica de comprimento focal de 4,51 mm ajustável (fig. 14). O diodo <sup>4</sup> é colocado nas peças 1 e 2, nesta ordem, e depois introduzido no tubo, consequentemente o conjunto é preso por um anel de retenção. Ao se certificar de que tudo está muito bem preso, o soquete é colocado no diodo. Com isso, temos a parte ótica devidamente preparada.

Além disso, um pequeno bloco de cobre<sup>5</sup>, usinado na oficina mecânica do Departamento de Física (DF) da UFPE, foi produzido para receber o tubo colimador e um sensor de temperatura LM35 (fig. 15). As dimensões desse bloco são tais que forneçam uma menor massa térmica possível, que permita rápida troca de calor, e consiga superpor um módulo termoeletrico de efeito peltier (usamos um TEC1-12706<sup>6</sup>). Tanto o corpo do tubo quanto a cabeça do LM35 foram cobertos por uma fina camada de pasta térmica (usamos a marca Implastec), a fim de facilitar o processo de condução térmica. Uma vez que o conjunto (bloco + LM35 + tubo + diodo *laser*) é montado, temos a *cabeça do laser*. Vale salientar que a camada de pasta térmica deve ser fina, do contrário o efeito será inverso, pois ao invés de transferir calor, a pasta usada em grande quantidade poderá armazenar mais calor. Outro ponto importante é que essas pastas tenham uma taxa de transferência térmica alta. Assim, é preferível uma pasta com alta taxa condutiva para um melhor desempenho<sup>7</sup>.

Outro bloco, desta vez de alumínio, também preparado na oficina mecânica do DF-UFPE, forma uma base intermediária para compensar a altura da saída do feixe (fig. 15). Ele possui 3 furos com rosca M3 para a sustentação da cabeça. Entre essa base e o bloco de cobre é colocado o módulo peltier, em que um lado em contato com o cobre termalizará a cabeça, enquanto o outro lado em contato com esta base dissipará o calor gerado na face do módulo (fig. 16). Uma camada de pasta térmica é passada nos dois lados do peltier para acelerar a transferência térmica. O módulo gerencia a temperatura em que a cabeça do *laser* deve trabalhar. Esse elemento é robusto do ponto de vista de operação, o que favorece um deslocamento rápido de

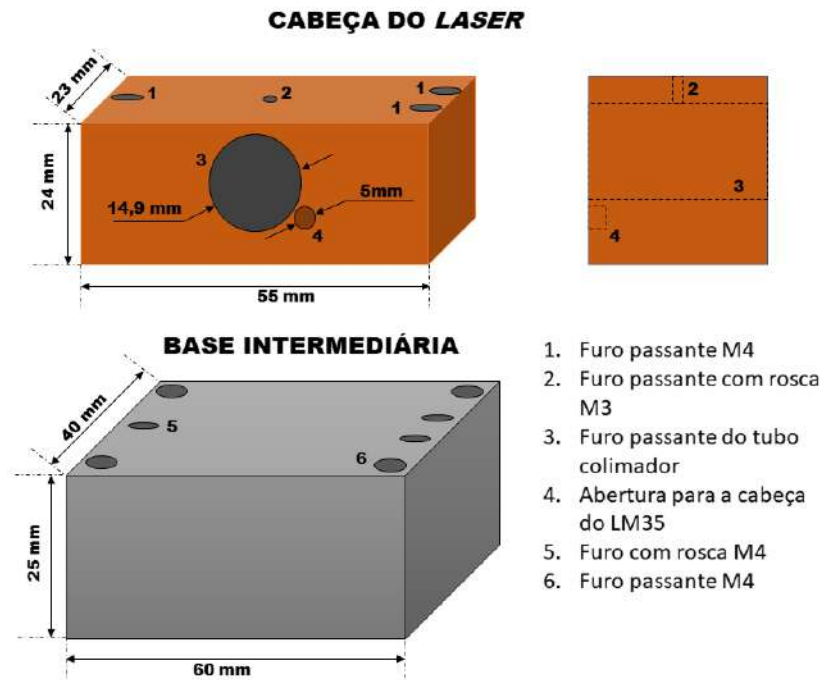
<sup>3</sup> Ver no site <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=LT110P-B>. Acessado em 6 de julho.

<sup>4</sup> Deve-se tomar bastante cuidado ao manusear este elemento. Apenas por segurança, leve as mãos à mesa ótica para descarregar as possíveis cargas eletrostáticas presentes no corpo.

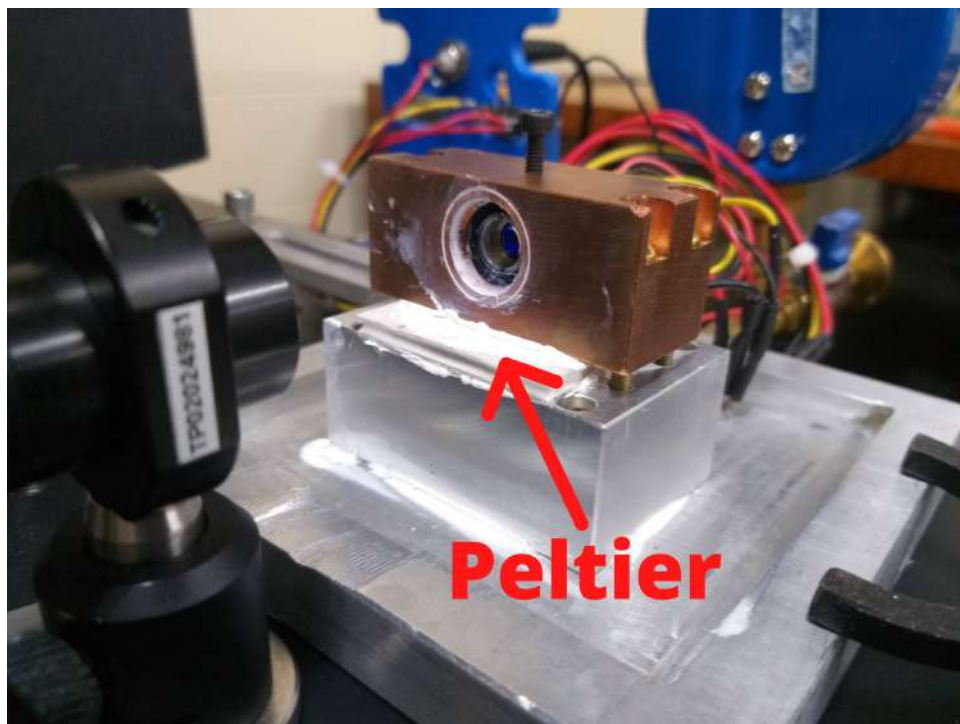
<sup>5</sup> Usamos esse material por causa da sua alta condutividade térmica.

<sup>6</sup> O módulo que usamos opera em até  $\pm 15$  V, e corrente máxima de operação de 6 A. As dimensões deste elemento são de 40 x 40 x 3,9 (mm). É um elemento fácil de encontrar em lojas de peças de refrigeração e ar-condicionado e lojas de eletrônica.

<sup>7</sup> Outra alternativa é o uso de condutores térmicos dielétricos. Este material promete o isolamento elétrico, e permite apenas transferência térmica. Seria um bom substituto às pastas. Também, fitas termocondutoras são uma opção na necessidade de envolver o corpo do tubo colimador. Ver <https://implastec.com.br/categoria-produto/produtos-por-aplicacao/gerenciamento-termico/>. Acessado em 07 de julho.

Figura 15 – Dimensões da cabeça do *laser* e da base intermediária.

Fonte: O autor (2020).

Figura 16 – Cabeça do *laser* de diodo produzida.

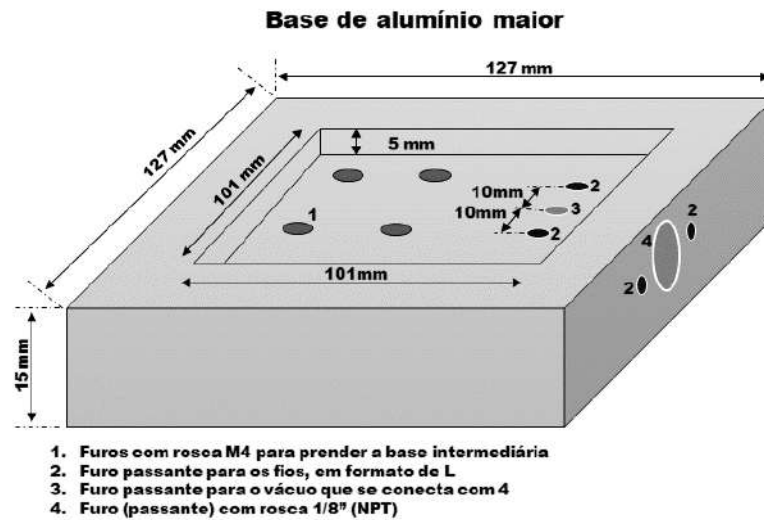
Fonte: O autor (2020).

massa térmica em direção à estabilidade. Ele é governado por um controlador de temperatura, sobre o qual falaremos mais adiante, que diz qual temperatura de equilíbrio o peltier deve prover à cabeça de modo a mantê-la sob condição térmica fixa.

Uma outra base de alumínio maior, também usinada na oficina mecânica do Departamento (fig. 17), fica presa na mesa ótica, sustentando o conjunto (base intermediária + cabeça). Ela também dissipa o calor que vem da base intermediária direto para a mesa, por isso é passado entre essas bases uma camada de pasta térmica, e entre a base maior e a mesa ótica. Essa base foi adaptada para a realização do vácuo. Um rebaixo de 5 mm centralizado na peça foi feito para comportar uma caixa de acrílico, que funcionará como tampa, envolvendo a cabeça do *laser*. Também, foram feitos três furos passantes, na parte lateral externa e na região rebaixada. Cada furo se encontra para formar um passante no formato de L, de tal maneira que dois deles, os furos das extremidades, servem para a passagem dos fios de alimentação eletrônica, e o do meio para a evacuação (fig. 18). As dimensões desses furos são arbitrárias, pois o importante é que os diâmetros sejam suficientes para a passagem dos fios e para a evacuação, de modo a ter um controle fácil da perda do vácuo. No nosso caso, cada passante tem diâmetro de 5 mm.

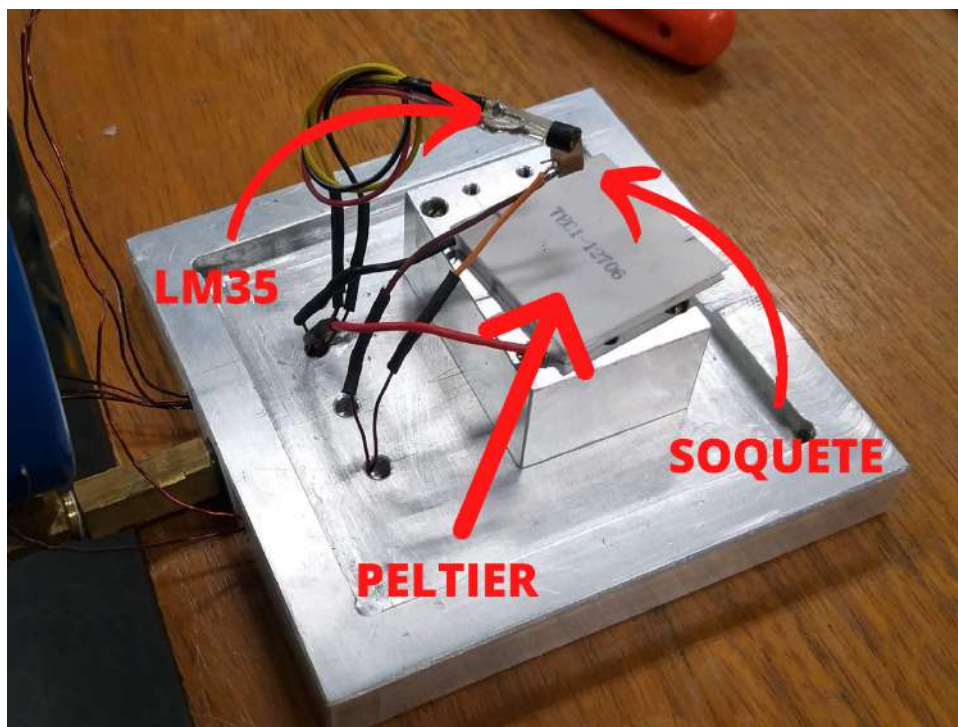
Os fios elétricos são um *feedthrough* adaptado. Usamos fios de cobre resinados (aproximadamente 1 mm de diâmetro) para a alimentação do diodo, do LM35 e do peltier. Esses fios devem ser cuidadosamente passados pelos furos para evitar o desgaste da resina, do contrário o contato direto com a base, ou com os outros fios, pode causar curto-circuito, ou acidente elétrico. Os furos foram, então, preenchidos com cola de silicone para vedar os passantes, e assim evitar perda de vácuo (fig. 19). Em uma extremidade, cada fio é soldado nos terminais dos dispositivos eletrônicos presentes dentro do *laser*, enquanto que na outra extremidade soldamos um conector BNC para alimentação de corrente elétrica do diodo, e um conector serial de 9 pinos para o controle do LM35 e peltier. Esses conectores, por fim, são fixados em um painel fora do *laser*, preso à mesa ótica, a fim de evitar esforço mecânico sobre os fios elétricos e, conseqüentemente, desalinhamento do feixe e desgaste das vedações ao conectar e desconectar os cabos *laser* dos controladores (fig. 20). Um filtro passa-baixa foi soldado, entre o sinal e neutro do LM35, no conector serial, para limpar o ruído da leitura de temperatura. Usamos um resistor de 100  $\Omega$  e um capacitor cerâmico de 1  $\mu\text{F}$  (fig. 21).

Figura 17 – Forma esquemática das medidas da base maior. Quatro furos com rosca foram abertos para prender a base intermediária, e os outros três são os passantes em forma de L, nos quais atravessam fios de cobre para alimentação elétrica e um para a evacuação. Na parte lateral externa, uma rosca de 1/8" foi aberta para a conexão hidropneumática.



Fonte: O autor (2020).

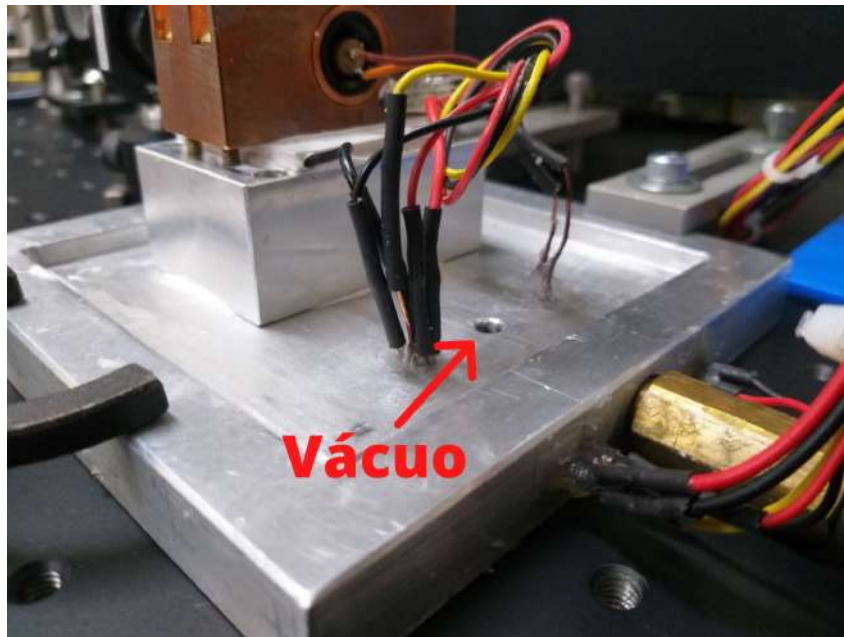
Figura 18 – Vista das entradas dos fios e os elementos eletrônicos soldados: o peltier, LM35 e o soquete do diodo.



Fonte: O autor (2020).



Figura 19 – Vista dos fios de alimentação eletrônica e a passagem para o vácuo. As passagens dos fios foram vedadas com cola de silicone.



Fonte: O autor (2020).

Para o vácuo, foi aberta na região externa dessa base maior uma rosca de 1/8" (norma NPT<sup>8</sup>) para comportar as conexões hidropneumáticas (fig. 22). A válvula presente é do tipo esférica de 1/4" (válvula principal), e está conectada a reduções de 1/4" para 1/8" antes e depois. Na extremidade, antes da válvula, encontra-se uma flange KF-30<sup>9</sup>, em latão, adaptada com uma rosca fêmea no centro para a entrada da redução de 1/8". Esta flange foi produzida na oficina mecânica do DF. Incluímos um medidor analógico de pressão (escala de mbar), depois da válvula principal, com resolução de 10 mbar (fig. 23), a fim de acompanhar o nível de vácuo dentro do *laser* ao longo do tempo.

<sup>8</sup> Todas as dimensões referidas destas conexões estão nesta norma. Portanto omitirei esta informação a partir de agora.

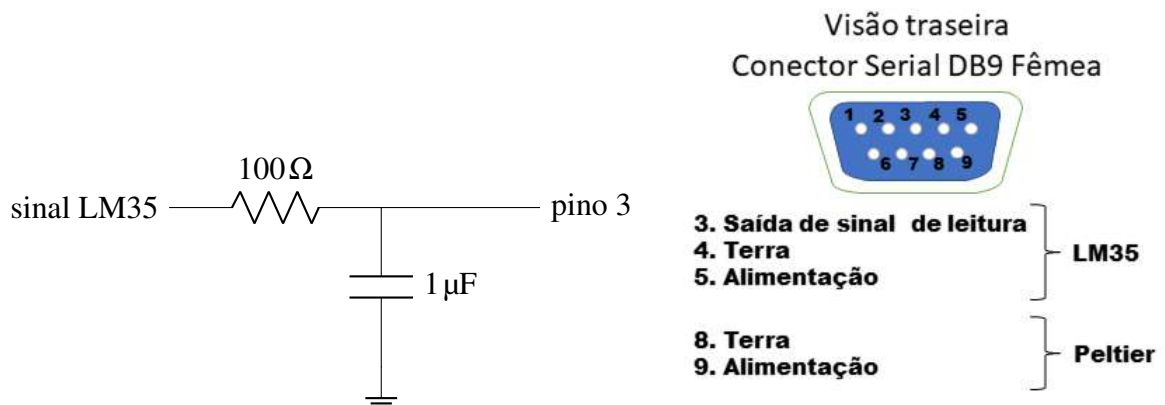
<sup>9</sup> KF é o tipo de flange e 30 é o diâmetro externo em milímetros.

Figura 20 – Montagem de um painel eletrônico para ligações dos controladores de corrente e temperatura e alimentação do diodo, LM35 e peltier.



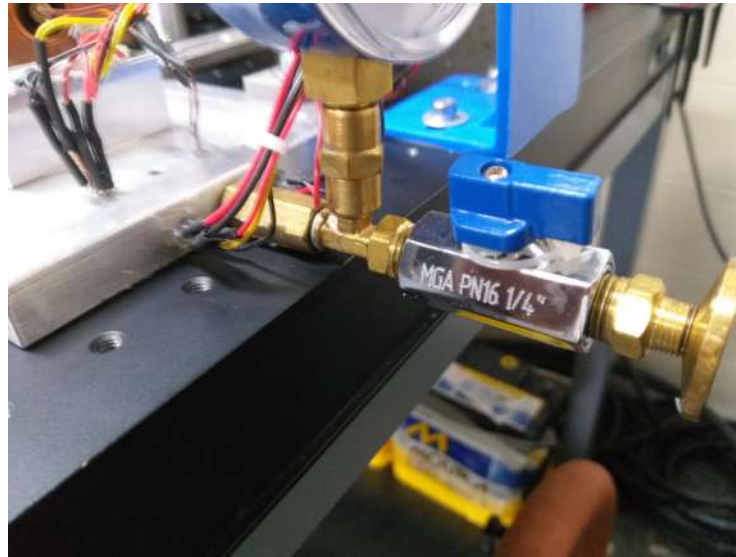
Fonte: O autor (2020).

Figura 21 – Circuito passa-baixa usado para limpar ruído de baixa frequência vindo do sinal de leitura do LM35. O fio elétrico do pino de sinal do LM35 é soldado em uma perna do resistor de  $100\ \Omega$ . A outra extremidade é soldada a um dos terminais de um capacitor cerâmico de  $1\ \mu\text{F}$ , e então ligados no pino 3 do conector serial. A outra perna do capacitor é então aterrada.



Fonte: O autor (2020).

Figura 22 – Conexões de 1/8" e válvula de 1/4" para a evacuação do *laser*.



Fonte: O autor (2020).

Figura 23 – Medidor analógico de pressão com resolução de 10 mbar.



Fonte: O autor (2020).

Tanto as conexões quanto o medidor foram comprados no mercado local. O uso desses elementos foi uma solução útil, principalmente, para desacoplar o *laser* da bomba de vácuo, permitindo maior mobilidade do instrumento. A flange do *laser* acomoda-se em uma válvula continuamente aberta (chamemos de válvula morta), fabricada na oficina mecânica do DF, que possui flanges KF-30 e KF-40. A KF-30 fica conectada ao *laser*, e a KF-40 permanece inutilizada (fig. 24). Usamos um anel centralizador com *o'ring* para a vedação e interconexão entre

os KF-30, os quais predemos com uma abraçadeira de vácuo (fig. 25). É passada uma pequena porção de graxa de vácuo para ajudar o *o'ring* no momento da fixação e a não ressecagem. A válvula morta liga-se a um tubo de silicone industrial, que por sua vez é preso a um tubo de latão com 30 cm de comprimento e 5/8" de diâmetro interno (ABNT), em cuja extremidade do tubo está uma flange KF-40 que é conectada à bomba de vácuo (fig. 26). A bomba que usamos é do laboratório de átomos frios, coordenado pelo professor J. W. Tabosa. Ela é uma bomba de palheta rotativa de duplo estágio, a base de óleo, modelo Varian DS 202 da Agilent<sup>10</sup>, capaz de alcançar até  $10^{-4}$  mbar. Essa bomba permite remover facilmente o ar atmosférico de dentro do *laser*, com o intuito de isolar este dos efeitos térmicos do ambiente externo. Com a válvula principal aberta, nós deixamos a bomba ligada por 1 ou 2 segundos, que é tempo suficiente para retirar o ar, e então fechamos a válvula e desligamos a bomba. Os gases que são liberados, após a evacuação, não configuram uma preocupação imediata, tendo em vista que o alvo é eliminar a condutividade térmica por meio do ar atmosférico, evitando perturbações térmica sobre a cabeça do *laser* durante sua operação.

Figura 24 – Válvula *homemade* inserida no sistema de forma a realizar o vácuo no *laser*. Ela possui duas flanges, a KF-30 que é usada para conectar ao *laser* no momento da evacuação; e a KF-40 que permanece fechada. A válvula fica continuamente aberta.



Fonte: O autor (2020).

<sup>10</sup> O datasheet desse modelo de bomba se encontra no apêndice B

Figura 25 – Anel centralizador para vedação. Um anel metálico é envolvido por uma borracha *o'ring* de vedação. Esse elemento une duas flanges para o trabalho em baixo vácuo. Ao lado está uma abraçadeira para prender flanges.



**Fonte:** (esquerda) Imagem extraída do site <https://www.idealvac.com/Centering-Ring-KF-30-Vacuum-Fittings/pp/P101243>. (direita) Imagem extraída do site <https://pt.aliexpress.com/i/32953288941.html>, acessado em 23 de julho.

Figura 26 – Conexão que vai da bomba de vácuo ao *laser*. Um tubo de silicone industrial é preso à válvula caseira, e a um tubo de latão de 5/8" de diâmetro interno, em cuja extremidade está uma flange KF-40, que é presa na bomba de vácuo.



**Fonte:** O autor (2020).

Uma caixa em acrílico foi montada, funcionando como tampa, para envolver a cabeça do *laser* (fig. 27). Foram preparadas cinco peças, de modo que uma delas dispõe de uma abertura para a janela de passagem do feixe. Todas as partes foram coladas com cola instantânea<sup>11</sup>, e cobertas com cola de silicone<sup>12</sup>, por dentro e por fora, para vedar toda a caixa e permitir o processo de vácuo. Esse procedimento requer alguns cuidados. Em primeiro lugar, ao juntar uma peça de acrílico a outra, a região onde será aplicada a cola instantânea deve estar limpa,

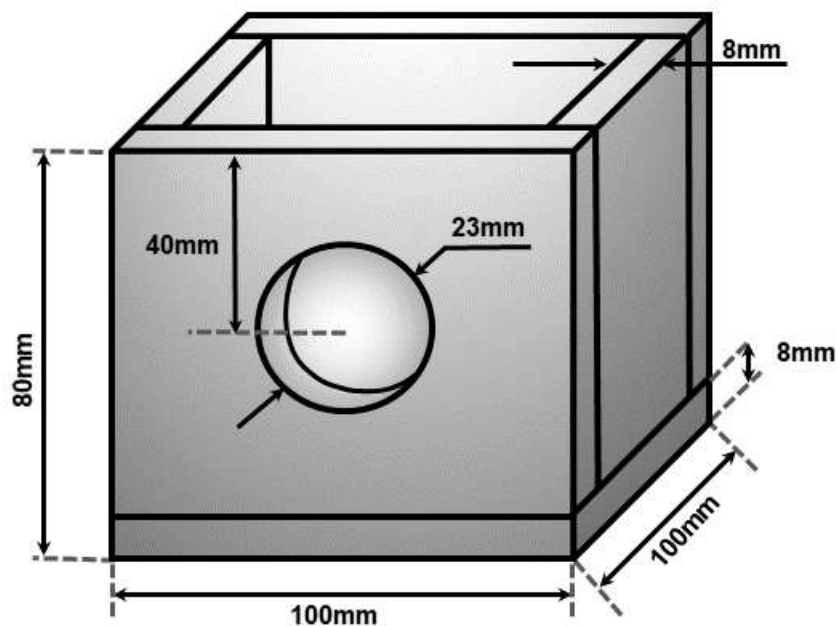
<sup>11</sup> A marca usada aqui foi a Loctite. A escolha foi por ela ser a mais conhecida no mercado.

<sup>12</sup> Usei do tipo acética e transparente, visto que atua em diversas superfícies. A sua desvantagem é o odor muito forte. Testei várias marcas, e todas elas atenderam bem ao nosso propósito. Portanto, não houve qualquer preferência entre as colas de silicone.



ou seja livre de poeira e gordura. Além disso, com um estilete, abrimos um sulco na superfície de contato, na região do acrílico onde a cola entrará em contato, até o extremo de uma junção, a fim de não vazar para as outras partes do acrílico, visto que o produto costuma manchar o material. Em segundo lugar, deve-se aplicar a cola de maneira a não deixar bolhas para não criar pontos de rupturas, quando passar pelo processo de evacuação. Por isso, foi adicionada, depois da secagem da cola instantânea, a cola de silicone nas junções. Esse procedimento garante maior vedação para o caso de haver ainda alguma falha com a cola instantânea. Os fabricantes das colas garantem a cura entre 24h e 48h, então é importante esperar esse tempo para que toda a peça esteja devidamente fixada. Nas embalagens desses produtos encontramos tempos de secagem rápida, mas isso não significa secagem total, por isso precisamos esperar um dia, no máximo dois, para ter certeza de que a cola está completamente seca. Uma vantagem desse método é a facilidade e o custo total. Também, mostrou-se eficiente ao estresse mecânico quando é feito e desfeito o vácuo. A desvantagem, por outro lado, encontra-se no aspecto visual. Devido à cola instantânea, o acrílico fica manchado, e o silicone fica exposto. Apesar disso, o resultado obtido foi satisfatório.

Figura 27 – Caixa em acrílico para envolver a cabeça do *laser*.



Fonte: O autor (2020).

Outros tipos de cola foram testadas, como os adesivos epóxis<sup>13</sup>. O adesivo epóxi poderia substituir sozinho a cola instantânea e o silicone. Além disso, não suja o acrílico, é de fácil manuseio, baixo custo, e une bem as juntas das peças. Porém, ao passar pelo estresse mecânico, o epóxi começou a perder aderência, ficando seco e quebradiço. Todavia, para não generalizar, pode-se testar um epóxi com alta resistência à tração e esforço mecânico (as que possuem titânio em sua composição). Algumas marcas dispõem desse tipo de adesivo, como a Wurth. A outra cola testada foi o clorofórmio. Na verdade, isto não é uma cola, mas um solvente. Ele ataca o acrílico fundindo sua superfície, o que permite unir os materiais para formar uma peça única. Essa substância deve ser cuidadosamente administrada, visto que é extremamente tóxico ao nosso organismo. Ao submeter a caixa ao processo de vácuo, porém, o clorofórmio não se mostrou eficaz, ocasionando uma implosão no momento em que fizemos o vácuo. Suspeitamos que ou o clorofórmio deixou bolhas quando foi aplicado no acrílico, ou a caixa de acrílico usada era incapaz de suportar estresse mecânico, pois sua parede era mais fina (de 5 mm) em relação à caixa atual. Seria interessante realizar outros testes com essa cola para verificar, de fato, a sua resistência ao esforço mecânico. Uma outra cola que poderia ser testada é a específica para acrílico. A linha de colas para acrílico Sinteglas possui cinco versões do mesmo produto, apenas variando a potencialidade. Podem ser testadas, preferencialmente, as colas S-320/6 e S-330, que prometem alta resistência próxima da resistência do acrílico. Em geral, as colas específicas para acrílico costumam ser vendidas para pessoas jurídicas, e o seu manuseio requer cuidados especiais, além de serem mais caras.

Completada a etapa de colagem e secagem total, foi produzida uma borracha, usando cola de silicone, para estabelecer a vedação entre a caixa de acrílico e a base maior, na região rebaixada que serve como encaixe. Em um recipiente com água, dilui-se detergente doméstico. Despeja-se grande parte do silicone e então começa o processo de sovagem, como uma massa de modelar. Isso faz com que o silicone forme uma massa que permitirá a sua distribuição no fundo da caixa. Assim que é feito todo o revestimento, é só encaixar na base e esperar secar<sup>14</sup>. A consistência dessa borracha é macia, o que a torna eficiente no processo de vácuo, visto que ela é fortemente pressionada; ela também preenche bem toda a região, evitando pontos de escape; e é flexível, pois se amolda bem às superfícies em que entra em contato. Esse método se mostrou eficaz em relação a outras borrachas, e os substituiu muito bem. Foram usados alguns lençóis

<sup>13</sup> Usei marcas conhecidas, como Araudite e similares.

<sup>14</sup> Essa solução foi encontrada no seguinte vídeo: <https://youtu.be/97NLJOUiaUg>, acessado em 24 de julho

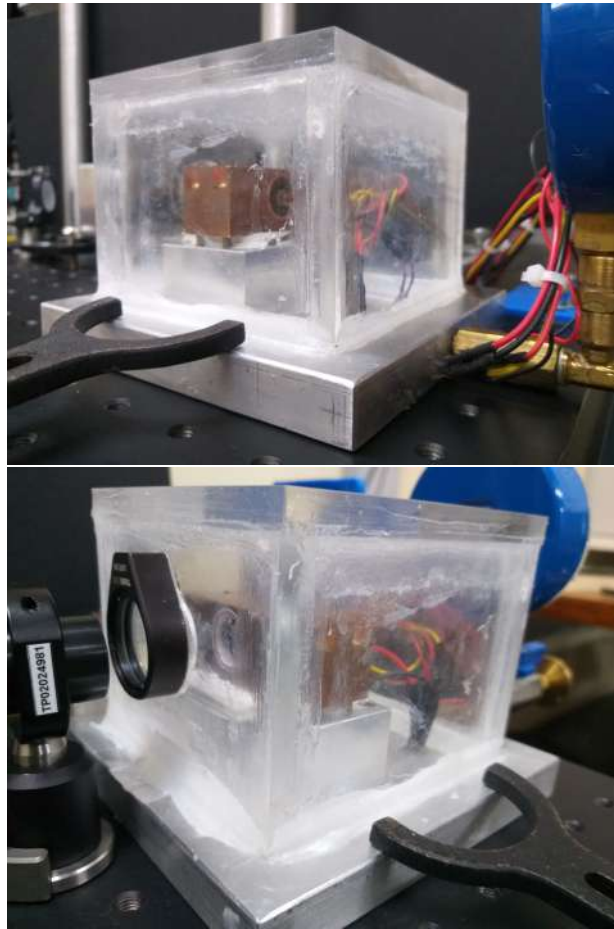
de borracha, o de silicone e o sem lona. Em teoria, elas são maleáveis, mas para serem usadas como vedação seria mais adequado adaptar as peças de acrílico com algum tipo de *knife edge*, o que se tornou inviável devido à fragilidade do material. Ainda outras tentativas de vedar a caixa usando borracha de geladeira foram feitas, mas ajustar o tamanho da borracha para caber no tamanho da caixa de acrílico, e a colagem, tornaram o esforço impraticável.

Para a janela de saída do feixe, foi usado um suporte ótico (LMR1, Thorlabs) para elementos óticos de uma polegada. Ele comporta uma janela de vidro com *coating* anti-reflexão (N-BK7: WG11050-B, Thorlabs), de largura de banda na faixa de 600-1050 nm. O LMR1 foi colado na região reservada do acrílico com epóxi. Ao contrário da caixa de acrílico, que precisa ser constantemente manuseada, e a carga mecânica sobre ela é maior, foi possível manter o suporte colado com o epóxi, pois se trata de uma peça pequena e não requer contínuo manejo. Fixado o suporte, um anel de borracha *o'ring*, de 1" de diâmetro e 2 mm de espessura, é posto dentro do LMR1, e em seguida introduz-se o N-KB7 para que, no momento do vácuo, seja empurrada contra o anel e aja uma vedação à entrada de ar para dentro da caixa. O conjunto (N-BK7 + *o'ring*) é preso por um anel de retenção (CMRR, Thorlabs), que é levemente apertado apenas para segurar o conjunto, pois o vácuo é quem faz todo o trabalho de reter a janela. O aperto forte do CMRR causa pontos de "vazamento do vácuo". Por essa razão é que o anel de retenção é levemente apertado, impondo limite ao relaxamento do conjunto.

Esse foi o processo de montagem do *laser* de diodo, e o resultado pode ser visto em (fig. 28). Essa montagem é uma novidade ao adotado no laboratório. Espera-se, eventualmente, uma melhora do ponto de vista de resistência às perturbações térmicas externas, e melhor travamento ótico.



Figura 28 – Montagem final do *laser* de diodo. Na imagem superior, temos uma visão traseira. Enquanto que na inferior, a parte frontal de toda a montagem.



**Fonte:** O autor (2020).

Outras modificações no sistema também foram adotadas, desta vez na parte eletrônica. A rede elétrica acrescenta ruído de 60 Hz, o qual é transmitido para o diodo. Além disso, precisamos reconhecer sua instabilidade nas possíveis quedas de energia, ou oscilações que ocasionam corrente transiente, as quais afetam diretamente o diodo. Acreditamos que o desacoplamento do controlador de corrente da rede elétrica permitiria a eliminação de mais uma fonte de ruído e, assim, manter uma estabilidade de sinal do *laser* ainda mais significativa. Portanto, vamos discurtir a solução do desacoplamento elétrico do *laser* no contexto da construção dos controladores.

## 3.2 Controladores de corrente e de temperatura

A alimentação dos controladores de corrente e temperatura, no nosso laboratório, é feita por meio de fontes de tensão caseiras, as quais fornecem uma tensão contínua de  $\pm 15$  V. No entanto, quando alimentamos o controlador de corrente com estas fontes, o ruído vindo da rede elétrica pode ser transmitido para o *laser*, e não há qualquer sistema de proteção que previna o diodo de “morrer”, em caso de corrente transiente devido a oscilações fortes da rede. Por isso, para eliminar esta fonte perturbativa, desacoplamos especialmente o controlador de corrente da fonte de tensão, que é alimentada pela rede elétrica, instalando duas baterias automotivas (Moura), ligadas em série, fornecendo uma tensão de  $\pm 12$  V ao controlador. Uma pequena caixa de controle foi feita para ligar as baterias em até dois controladores simultaneamente; esse painel também permite ligar uma fonte para carregar as baterias quando descarregarem (fig. 29). O circuito contido neste dispositivo é relativamente simples. Usamos conectores bananas, onde entram as baterias e um carregador (pode ser uma fonte de bancada), e ligamos a uma chave de três posições, cuja função é chavear as baterias aos controladores, ou conecta ao carregador, e a terceira posição é a de desligar todo o sistema.

Os controles de corrente e temperatura, originalmente, são desenvolvidos para trabalhar com tensão de  $\pm 15$  V, ainda assim funcionam bem quando ligados às baterias. Cada controle foi produzido no laboratório Redes Quânticas, em particular o controlador de corrente. O controlador de temperatura, por outro lado, foi parcialmente produzido na oficina de eletrônica do DF-UFPE. Falaremos, portanto, sobre cada um deles nas próximas seções.

### 3.2.1 Controlador de corrente

O controlador de corrente que usamos é um circuito analógico<sup>15</sup>, de produção caseira, que possui: duas entradas de alimentação de  $\pm 12$  V ( $\pm 15$  V), uma entrada de modulação de corrente, uma saída de corrente e uma saída para inserção de um monitor de leitura. Este equipamento foi projetado para entregar uma corrente de até 140 mA.

Esse circuito é uma receita disponibilizada no laboratório de Redes Quânticas. E como podemos observar no circuito (ver apêndice C), a corrente enviada através do circuito a partir da entrada P, e uma parte dela chega no mosfet (IRF 9510) que chaveia a passagem de corrente pela variação da sua tensão por meio de um potenciômetro de  $10\text{k}\Omega$  (R14). É importante frisar que

<sup>15</sup> O diagrama deste circuito se encontra no apêndice C.

Figura 29 – Painel de controle das baterias. Ele foi desenvolvido para facilitar a ligação das baterias aos controladores, além de permitir conectar uma fonte de carga, em caso de um eventual descarregamento delas.



Fonte: O autor (2020).

este elemento é bastante crítico, pois ele funciona por um contanto mecânico que se desgasta com o tempo, incutindo ruídos elétricos no diodo *laser*, causando possível dano. Usamos um modelo da Vishay por ser mais robusto nesse sentido.

A corrente que o mosfet entrega na saída (J) pode ser modulada, como pode visto no *jump 5*, onde introduzimos um circuito para entrada de modulação. Os OP270 são amplificadores operacionais cuja função é amplificar o sinal modulado de entrada que fará a corrente oscilar, em tensão, na saída da fonte. A corrente modulada é ajustada para excitarmos o vapor de isótopos de  $^{85,87}\text{Rb}$ . Geralmente, usamos uma rampa com amplitude de 5 Vpp e faixa de frequência de 100 Hz. Isso basta para acessar os quatro poços do espectro de absorção saturada do rubídio. A função triangular é gerada por um gerador de função externo do osciloscópio que temos usado (DSO-X 2014A, Agilent Technologies).

Ainda sobre o circuito, podemos ler a corrente de saída através da queda de tensão sobre um resistor de baixa resistividade, 50  $\omega$  (R17). A leitura da corrente é feita na tela de

um multímetro. Este é conectado à saída monitor do controlador, e a faixa de tensão mostrada é de 0V à 12 V (ou 15 V, caso a tensão fornecida seja de  $\pm 15$  V). A transformação de tensão para corrente segue uma relação simples. Ajustamos, particularmente, nosso controlador para que 1 V corresponda a 12 mA de corrente fornecida (fig. 30). Esse ajuste é feito por meio de um trimpot com o qual defino a tensão no amplificador operacional (LT1167), regulando a resistência do trimpot. A leitura na saída do monitor é comparada com a corrente de saída (sem a modulação) lida por outro multímetro que ler a saída da corrente pela queda de tensão sobre um resistor de 1  $\Omega$  acoplado à saída da fonte. Ajustamos a máxima tensão de leitura para corresponder ao máximo valor de corrente.

### 3.2.2 Controlador de temperatura

Como dito anteriormente, o controlador de temperatura desenvolvido para este *laser* foi um trabalho conjunto com o aluno de iniciação científica Rodrigo Luiz Santos e o técnico de eletrônica do DF, Daniel Melo.

Usamos uma placa eletrônica programável Arduíno (UNO) como controlador de temperatura (fig. 31). Ela foi programada<sup>16</sup> pelo Rodrigo, seguindo as características de um circuito PI.

O controlador basicamente recebe a leitura do LM35, cujo sinal é digitalizado por um conversor analógico-digital de 16 bits (ADC, modelo ADS1115). Com o sinal digitalizado, o programa compara a temperatura lida ( $T_l$ ) com uma temperatura de *setpoint* ( $T_0$ ), definida pelo usuário, subtraindo um do outro, e depois multiplica essa diferença por um valor proporcional  $\beta$  (ganho), que também é definido pelo usuário. A saída  $\alpha$  é um número, convertido em tensão por um conversor digital-analógico (DAC, modelo DAC8552), que será enviado para o peltier que termalizará a cabeça do *laser*. A equação a seguir sintetiza o que acontece ao controlador.

$$\alpha = \beta(T_l - T_0) \quad (3.1)$$

O valor de  $\beta$  é muito grande. A razão disso é porque o sinal de saída do DAC, que está entre 0 V e 5 V, deriva de uma escala de registros de 16 bits, ou seja  $2^{16}$  valores de memória. Por causa disso, temos um proporcional muito grande multiplicando uma diferença de temperatura em geral muito pequena. A ação do proporcional é corrigir a temperatura da cabeça para  $T_0$  tão rápido quanto possível.

<sup>16</sup> Os detalhes do código se encontram no apêndice D.

Figura 30 – Painel: Controlador de corrente que usamos para alimentar o *laser*. Ele possui uma saída de corrente, que vai de 0 à 140 mA; uma entrada para modulação da corrente de saída; uma saída para leitura da corrente fornecida, a qual é obtida por meio de uma conversão simples entre uma tensão mostrada e a corrente selecionada; as entradas da alimentação do circuito. Circuito: Aspecto interno da placa eletrônica com todos os elementos soldados.

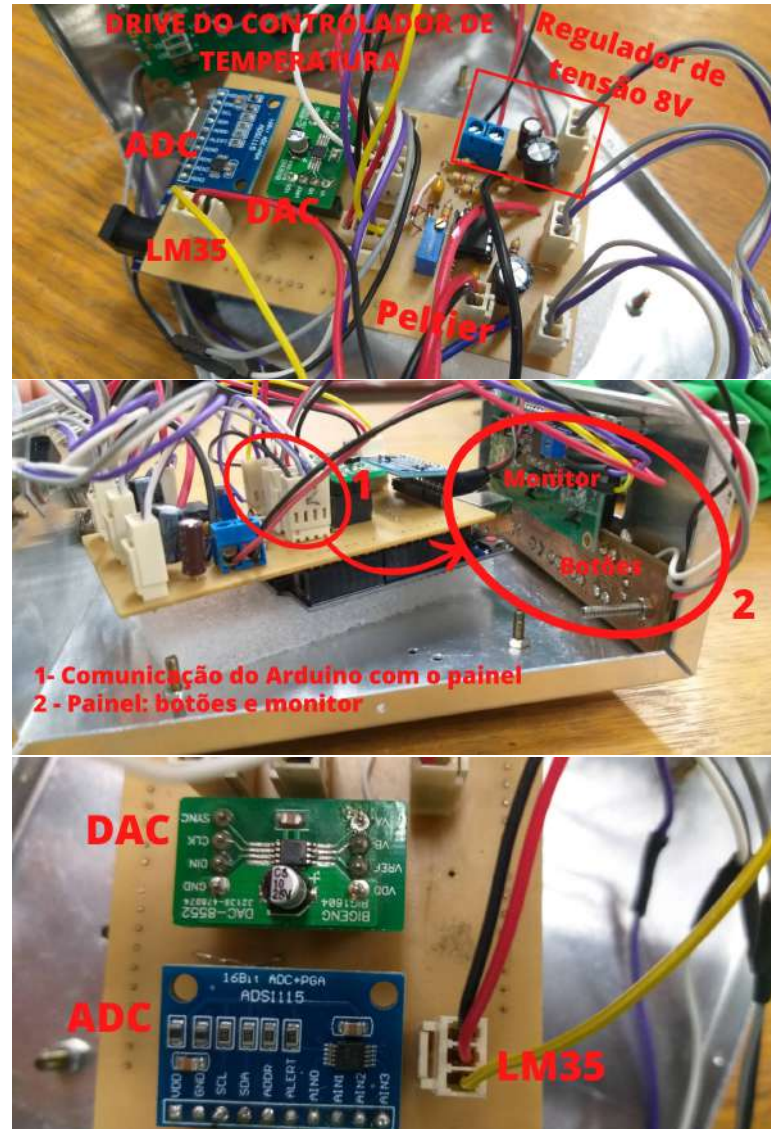


Fonte: O autor (2020).

A parte integrativa do circuito resulta da leitura do LM35, visto que o valor de  $T_l$  varia constantemente. Por isso, a fim de suavizar essa dinâmica e definir uma temperatura de leitura



Figura 31 – Controlador de temperatura com arduino. Acima da placa se encontra o drive que estabelece comunicação direta com o Arduino. O sinal do LM35 é recebido pelo ADC, o qual converte o sinal em digital. O programa executa o cálculo equivalente a ação e entrega ao DAC o valor que é convertido em sinal analógico. Este sinal é amplificado e enviado para o peltier que termaliza a cabeça do *laser*. Um regulador de tensão de 8V é integrado ao circuito para alimentar o Arduino a partir de uma fonte externa. O circuito inteiro é alimentado com  $\pm 15$  V.



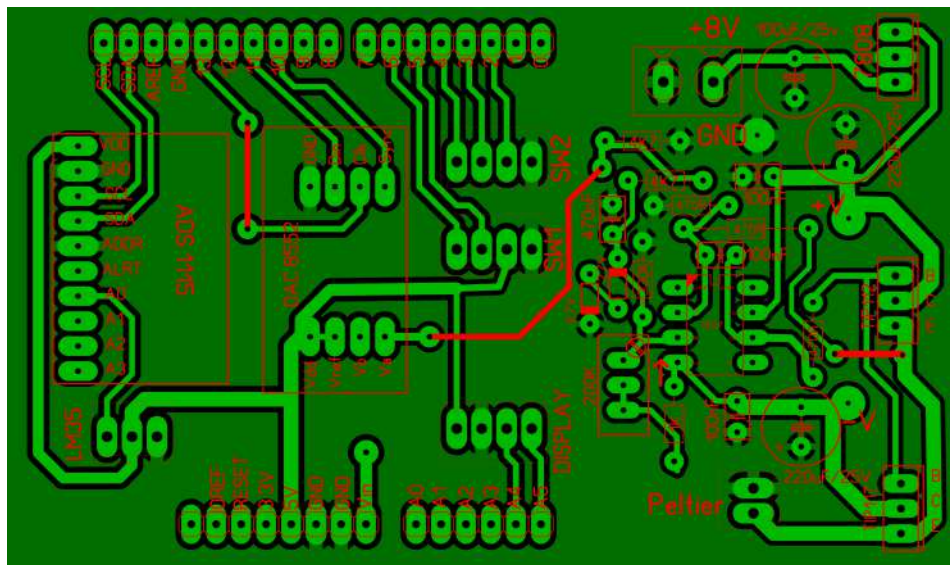
Fonte: O autor (2020).

média, impomos um integrador que torna  $T_l$  um valor médio de temperaturas de leitura. Obtida a média, esse valor é subtraído de  $T_0$ . Se  $T_l < T_0$ , o programa entende que a cabeça do *laser* precisa ser aquecida. Assim, ao obter a diferença, multiplica-se esse valor pelo  $\beta$ , entregando um número  $\alpha$  da escala digital, que é convertido em tensão dentro da faixa de 0 V a 5 V. Um circuito posterior amplifica esse sinal de tensão para o peltier, que aquece a cabeça até o valor de  $T_0$ , fechando o circuito de feedback (fig. 32). Esse mesmo processo acontece quando  $T_l > T_0$ .

Nesse sentido, podemos notar que a diferença de temperatura pode ser positiva ou negativa. Sendo assim, ajustamos a escala de 0 à 5 V para uma escala de  $\pm 2,5$  V, tornando o zero da escala dos bits igual a  $2^{15}$ . No circuito eletrônico, usamos um trimpot que ajusta a escala de tensão na metade de uma onda senoidal, e assim o sinal recebido pelo peltier é uma tensão positiva ou negativa dependendo do valor, em bit, convertido pelo DAC. É dessa forma que o programa entende quando o *laser* deve ser aquecido ou resfriado.

O sinal típico desse processo é o de um oscilador harmônico amortecido, cuja amplitude do sinal é ajustado pelo  $\beta$  (fig. 33). Observe que a força das oscilações aumenta com o proporcional, desestabilizando o sistema, por isso, no nosso caso, procuramos um  $\beta$  tal que leve o sistema à rápida termalização, requerendo um valor pequeno do ganho do ponto de vista de ajuste e não de valor, pois já vimos que ele é essencialmente grande.

Figura 32 – Circuito que vai sobre Arduino. Este protótipo recebe os conversores ADC e DAC que se comunicam com um circuito amplificador que manda o sinal de tensão para o peltier. Outros circuitos estão presentes para conectar um monitor de LCD (de protocolo I<sup>2</sup>C), um painel de botões de controle, e um regulador de tensão de 8 V para alimentar o Arduino por meio da fonte externa.

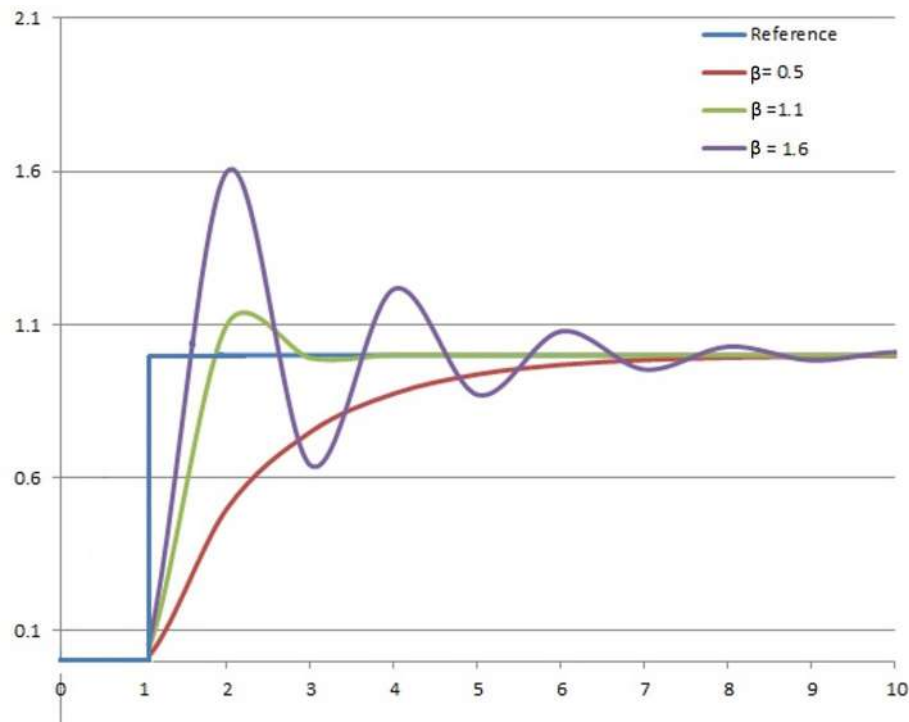


**Fonte:** Produzido pelo técnico da oficina de eletrônica do Departamento de Física.

Incluimos um painel de LCD, conectado a um módulo de protocolo I<sup>2</sup>C, que mostra na tela os principais parâmetros que consideramos: ganho  $\beta$ , temperatura de *setpoint* e a temperatura de leitura que monitoramos em tempo real.

Um painel de botões foi posto para melhor controlar o Arduino sem a necessidade de reprogramação. Também inserimos no código uma variável EEPROM com o objetivo de armazenar na memória do próprio Arduino o último valor lido de  $T_0$  e  $\beta$ . Este recurso é uma solução

Figura 33 – Representação típica de um processo de termalização de um *laser* de diodo. Seu comportamento é o mesmo de um oscilador harmônico amortecido.



**Fonte:** figura extraída (adaptada) da referência [https://pt.wikipedia.org/wiki/Controlador\\_proporcional\\_integral\\_derivativo](https://pt.wikipedia.org/wiki/Controlador_proporcional_integral_derivativo). Acessado em 09 de janeiro de 2021.

encontrada para o caso do controlador ser desligado. Também, as experiências anteriores com o controlador de temperatura em funcionamento no experimento principal é que o valor de  $T_0$  sempre é perdido quando ocorre queda de energia elétrica. Por causa disso, achamos viável programar o nosso controlador para guardar esses valores como medida estratégica (fig. 34).

Com isso, fechamos esse capítulo sobre a montagem e preparação de todos os equipamentos necessários para o funcionamento do nosso *laser* de diodo. Ainda precisamos caracterizar o nosso sistema, a partir do sinal de absorção saturada, e os resultados obtidos segundo a técnica que utilizaremos. Estes detalhes serão abordados no próximo capítulo.



Figura 34 – Visão frontal e traseira do novo controlador de tempertarua. Um botão EEPROM é requerido para salvar e atualizar os últimos valores de  $T_0$  e  $\beta$  assumidos no programa. O botão de MENU acessa as configurações do programa para mudar valores do proporcional e temperatura de *setpoint*.



**Fonte:** O autor (2020).

## 4 MEDIDAS E RESULTADOS

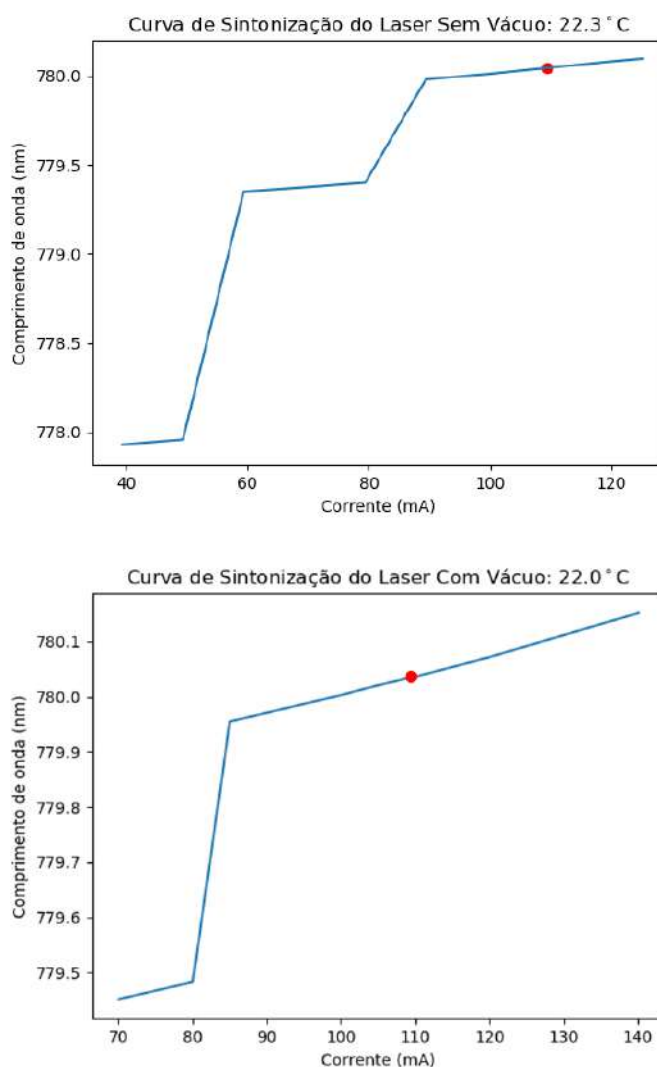
Neste capítulo, abordaremos tanto a montagem experimental quanto os resultados das medidas de travamento realizadas, nas diferentes situações de operação as quais o *laser* foi submetido, tendo em vista a linha de transição atômica do espectro do  $^{87}\text{Rb}$  que queremos como sinal de referência: a linha  $F = 2 \rightarrow F'_C = 2 - 3$ . Com a ajuda do *wavemeter*, podemos ver diretamente na tela do computador a frequência de operação do *laser* e fazer gravações, em um arquivo, das flutuações em frequência ao longo do tempo. Utilizaremos, também, um amplificador *lock in*, que auxiliará no travamento de uma frequência específica, em particular a frequência na transição mencionada acima. Contamos com um osciloscópio com gerador de função integrado para visualização de sinal e modulação da corrente para varredura do espectro de absorção saturada do rubídio.

De posse de todos os equipamentos, devidamente implementados, é fundamental caracterizar o *laser* montado. Como estamos comparando duas condições de operação distintas: com e sem vácuo, precisamos deixar o sistema funcionando em temperatura e corrente parecidas, a fim de comparar efetivamente os dois casos. Levantamos uma curva de sintonização de ambas as condições para garantir que a absorção saturada esteja acontecendo no centro de um dos patamares, de modo que tenhamos liberdade para operar o *laser* sem sofrer salto de modo. No caso sem vácuo, operando com corrente de 109 mA e à temperatura de 22,3 °C, observamos que a absorção saturada se encontra no meio da última linha de sintonização. E com o *laser* evacuado, com a mesma corrente, alcançamos a mesma condição, porém à temperatura de 22,0 °C (fig. 35). Mantivemos a temperatura da sala em 23,0 °C, durante todo o experimento, desde a caracterização do *laser* até as medidas de estabilidade.

### 4.1 Montagem Experimental da Absorção Saturada

A montagem experimental da absorção saturada é a mesma em ambos os estados do *laser*. A luz de saída atravessa um isolador ótico (IO) dependente da polarização (Modelo IO-3D-780-VLP, Thorlabs), o qual evita reflexões de volta sobre o *laser*. A luz deixa o isolador com uma perda de potência de aproximadamente 10%, e segue até uma placa de vidro fina

Figura 35 – Acima: curva de sintonização do laser sem vácuo. O espectro de absorção surge na tela do osciloscópio a uma corrente de 109mA sob a temperatura de 22,3 °C. Abaixo: curva de sintonização do laser evacuado, com o espectro do rubídio surgindo em 109 mA e temperatura de 22,0 °C.

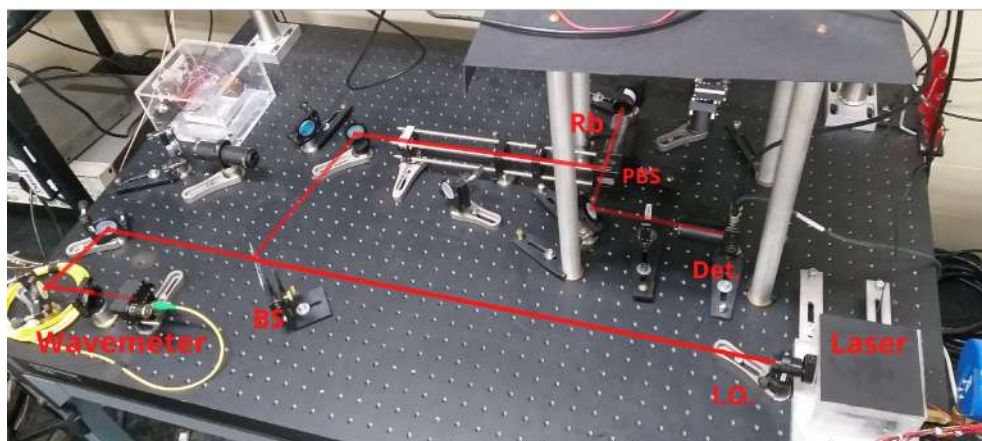


**Fonte:** O autor (2020).

(BS) que divide o feixe em duas componentes, em que uma é transmitida direto para uma fibra monomodo, com acoplamento do feixe de uns 30%, e uma parte refletida, por sua vez, é direcionada para um telescópio, cuja primeira lente tem foco em 40 mm e a segunda tem foco em 150 mm, que deve expandir e colimar o feixe. A fim de baixar a potência da luz, colocamos na entrada do telescópio um filtro de densidade neutra (ND) de densidade ótica (OD) de 0.5, com o intuito de diminuir o efeito de alargamento por potência sobre o sinal de absorção. Depois do telescópio, a luz passa por um cubo divisor de feixe por polarização (CM1-PBS252, 620-1000 nm, thorlabs), do qual aproveitamos a saída de polarização vertical, de potência maior,

para excitar os átomos de rubídio. Ao atravessar a célula de vapor, o mesmo feixe é filtrado outra vez por um fator OD de 0.4 e sua fase é girada por uma placa de onda  $\lambda/4$  duas vezes, ida e volta, com o intuito de sondar os átomos excitados. O feixe de prova é encaminhado para um detector (PDA36A, Thorlabs) fechando o circuito ótico (fig. 36).

Figura 36 – Visão geral do experimento de absorção saturada. O *laser* sai do IO e é dividido pelo BS, em que um dos braços é direcionado para dentro de um telescópio, e o outro enviado para uma fibra ótica. O feixe que sai do telescópio passa por um PBS, cuja polarização vertical entra na célula de vapor de rubídio, excitando os átomos. Este feixe deixa a célula, e em seguida é filtrado e girado por um  $\lambda/4$ , então refletido de volta passando, de novo, pelo processo de giro e filtragem, atravessando então a célula de rubídio provando os átomos. O feixe de prova, por sua vez, é refletido para o detector.

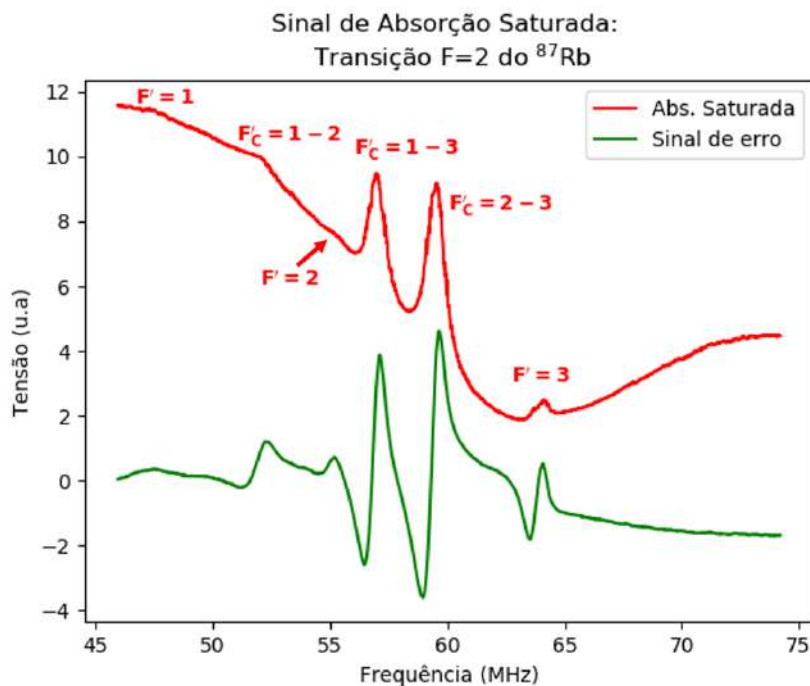


Fonte: O autor (2020).

#### 4.1.1 Controles e equipamentos presentes no processo de absorção

Para viabilizar o fenômeno de absorção saturada, alguns elementos de controles são adicionados ao sistema, tais quais um osciloscópio (usamos o DSO-X 2014A, 100 MHz, Agilent Technologies) e um amplificador *lock in* (SR530, Stanford Research Systems). Estamos interessados em dois sinais, em que um deles é o próprio sinal de absorção saturada, e o segundo é a derivada correspondente. O osciloscópio, além de nos mostrar esses sinais, permite-nos também gerar uma onda triangular (rampa), importante para varrer o espectro do rubídio. A amplitude da rampa está limitada para variar entre 10 mVpp e 2,5 Vpp, que são os limites inferior e superior admitidos pelo gerador do osciloscópio. Essa onda corresponde a uma amplitude de tensão modulada entregue na saída da corrente, que corresponde a uma variação de alguns mA sobre

Figura 37 – Exemplo do sinal dispersivo (em verde) correspondente à derivada do pico de absorção saturada (em vermelho).



o diodo. A frequência da luz de saída varre o vapor na linha D2 de excitação da estrutura fina do rubídio. O sinal da absorção saturada é capturado pelo detector, que o envia direto para a entrada de sinal do *lock in*. A frequência é selecionada diminuindo-se a amplitude de varredura, centralizando na tela do osciloscópio um dos picos desejados da estrutura hiperfina.

Uma vez que o sinal de absorção é enviado para o *lock in*, este integra eletronicamente os picos da absorção, resultando num sinal dispersivo (sinal de erro) correspondendo à derivada daqueles picos. Para obter isso, o instrumento multiplica o sinal de absorção com uma modulação de referência proveniente do oscilador interno do *lock in*. O produto é integrado, na escala temporal, e o resultado é justamente o sinal dispersivo, ou seja, a derivada do sinal de absorção [33] (fig. 37). A amplitude e frequência que estabelecemos do oscilador interno são, respectivamente, 0.1 V e 10 kHz. Esta frequência é também injetada na corrente do *laser*.

O zero do sinal de erro corresponde ao máximo do pico de absorção. Para todos os efeitos, buscamos um travamento exatamente neste centro, ou seja, a frequência de emissão do *laser* exigida é a frequência de ressonância da transição do rubídio, tal que ele permaneça travado, por um longo tempo, nessa frequência. Isso significa ter a frequência do *laser* variando dentro do intervalo da amplitude do sinal de erro, entre o máximo e o mínimo. A perda do travamento

acontece quando a frequência é arrastada para fora desse intervalo de confiança. As causas do arraste podem ser diversas: vibrações mecânicas sobre o *laser*, variação de temperatura, instabilidade eletrônica, etc. Para otimizar o tempo de travamento, ajustamos os parâmetros do *lock in* ao sistema.

Os principais parâmetros desse equipamento são a fase, o *offset*, a sensibilidade e a constante de tempo (ou tempo de integração). A fase ajusta o sinal de erro para ser crescente, ou decrescente, de modo que o *feedback* eletrônico, na saída do *lock in*, corrija as mudanças na frequência, trazendo-a de volta para o valor inicialmente escolhido. No nosso experimento, a fase que encontramos foi de  $-50.5^\circ$ . Este valor é particular do sistema, dependendo da malha eletrônica e ótica de travamento. Em outros sistemas, a fase é diferente e deverá ser encontrada. Se a fase ótima foi encontrada, ajustamos o sinal de erro com o *offset*, a fim de coincidir o centro da curva de dispersão com o zero do eixo x no osciloscópio. Observamos que a fase desloca o *offset* todas as vezes que ela é mudada, porém uma vez encontrada, não há necessidade de mudanças no *offset* a não ser no parâmetro seguinte, a sensibilidade. Dessa vez, o ajuste no *offset* ocorre de forma mais fina.

No caso da sensibilidade, o *lock in* entende que o sistema está funcionando numa certa escala de tensão. Esta tensão é definida pelo equipamento a partir do sinal de entrada que ele recebe. Dois cuidados são muito importantes nesse momento de encontrar a escala ótima. O primeiro deles é o operador estar tentado a diminuir na escala tanto quanto queira. Isso pode levar o *lock in* inevitavelmente a uma sobrecarga, pois o sinal de entrada se encontra em uma tensão muito além da escala escolhida. O segundo cuidado é o inverso disso, é subir a escala de sensibilidade. Nesse caso, não há risco de sobrecarga sobre o *lock in*, porém o ponto de travamento é levado à condição subótima, visto que os ruídos associados ao sistema são “ignorados” pelo equipamento. A condição ótima que operamos o nosso *laser*, evacuado e não evacuado, encontra-se na escala de  $500 \mu\text{V}$ . Uma vez que a escala de tensão é devidamente ajustada, podemos travar o *laser*. O tempo de integração é ajustado a partir desse ponto, conforme a necessidade do sistema, diante do máximo tempo de travamento alcançado. A constante de tempo que definimos é de 10 ms.

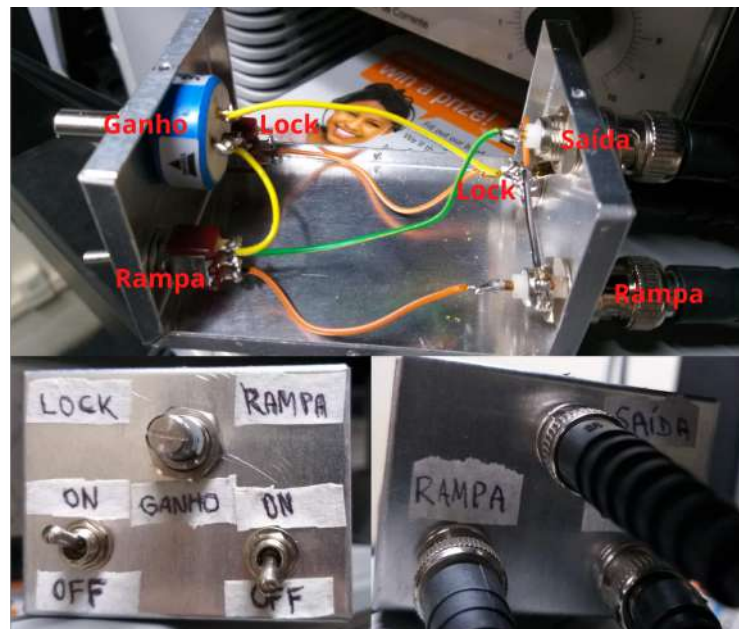
Para obtermos o travamento na frequência desejada, contamos com uma pequena caixa de travamento, cujas ligações são relativamente simples (fig. 38). Ela possui três conectores e um potenciômetro de ajuste de ganho (desnecessário em nosso caso): um conector para entrada da rampa, o outro para entrada do sinal de travamento, e o terceiro é a saída de sinal



que segue direto para a entrada de modulação da fonte de corrente; o potenciômetro faz o ajuste fino do sinal de travamento enviado à corrente do *laser*. Duas chaves liga/desliga nos permite, com uma, desligar a rampa e, com a outra, ligar o travamento, e vice-versa.

Por conveniência, escolhemos o pico  $F = 2 \rightarrow F'_C = 2 - 3$  do  $^{87}\text{Rb}$  (fig. 39). Buscamos obter maior tempo possível de travamento do nosso *laser* de diodo em relação a essa linha.

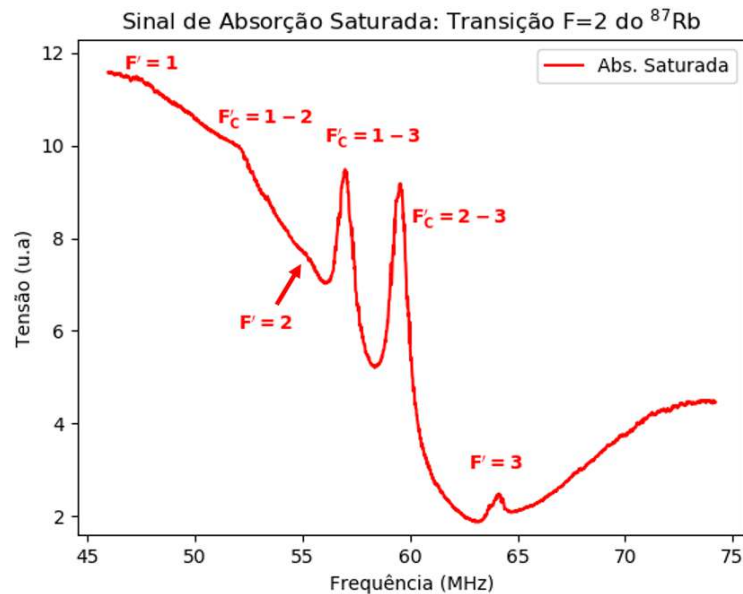
Figura 38 – Esta caixa de travamento auxilia na entrada e saída de sinais, permitindo o ligamento/desligamento alternado dos sinais de absorção e frequência de travamento que devem ser enviados para a corrente do *laser*. Há três conexões e um potenciômetro de ajuste. Um deles serve para a entrada da rampa, o outro para a entrada de sinal de travamento quando a rampa é desligada, e o terceiro é a saída de um dos sinais os quais entram na modulação da fonte de corrente. O potenciômetro funciona como um ganho, para o ajuste fino do sinal de travamento de frequência do *laser*. Porém, este fica inutilizado.



Fonte: O autor (2020).

Para adquirir os dados de travamento, contamos com o *wavemeter* (621 VIS-A, wavelength meter, Bristol Instruments). Ele recebe a luz *laser*, por meio da fibra monomodo presente no aparato. O *wavemeter* é um tipo de interferômetro de Michelson, calibrado por um laser de Hélio-Neônio (HeNe), com acurácia de aproximadamente 60 MHz (em 300 THz), segundo o fabricante (ver apêndice E), para medidas precisas de comprimentos de onda. Os valores obtidos pelo *wavemeter* são enviados para o computador, por meio de comunicação serial. O instrumento conta com uma interface gráfica, com programas disponíveis para rotinas em LabView. Na interface, podemos selecionar as grandezas físicas que desejamos medir: comprimento de onda, frequência, ou número de onda. Também podemos definir uma média amostral, cujo má-

Figura 39 – Espectro de absorção saturada do rubídio 87 no nível de energia  $F=2$ . O travamento é feito no pico  $F'_C = 2 - 3$ .



**Fonte:** O autor (2020).

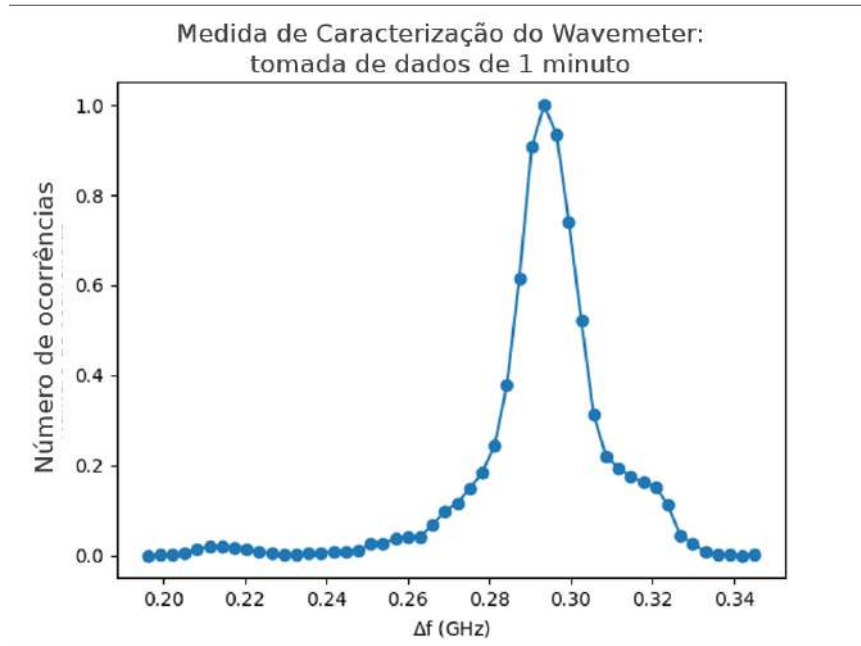
ximo chega a 16 médias. A taxa de medida é de no máximo 10 Hz, e podemos escolher o meio de propagação da luz (ar ou vácuo). Também podemos fixar uma resolução de no mínimo 4 e no máximo 9 algarismos significativos. Pode-se ainda gravar um arquivo no formato .CSV, cujas colunas da tabela são uma com os valores da grandeza física selecionada e outra coluna para a potência que chega no wavemeter através da fibra. Vale ressaltar que esse equipamento permite receber uma potência de entrada de dezenas de microwatts até alguns miliwatts. Antes da entrada da fibra, colocamos um filtro ND de fator 2, a fim de baixar a potência de entrada, para atingir o valor dentro das especificações do instrumento.

Usamos a linha de transição de referência ( $384.227,981876 \text{ GHz}^1$ ) para caracterizar o wavemeter e conferir a sua acurácia. O resultado (fig. 40) é a distância em frequência do valor medido em relação à linha. Notemos que o máximo se encontra cerca de 280 MHz, o qual não parece se encaixar dentro da acurácia especificada pelo fabricante do equipamento. No entanto, esse valor 4 vezes maior pode estar ligado à perda por desalinhamento do interferômetro do próprio *wavemeter*, em razão do longo tempo de uso do equipamento. Apesar disso, esse deslocamento não deve interferir negativamente nas medidas que realizamos. Pois o resultado final obtido é uma série de valores a menos de 280 MHz.

<sup>1</sup> O cálculo desta frequência pode ser feito segundo a referência [21]



Figura 40 – Medida de caracterização do wavemeter em relação à linha  $F=2 \rightarrow F'_C = 2 - 3d o^{87}\text{Rb}$  (384.227,981876 GHz)



Fonte: O autor (2020).

Para a aquisição dos dados, os arquivos que geramos das medidas do wavemeter guardamos, em tempo real, aproximadamente 4,3 valores amostrais por segundo, no máximo. Sendo assim, estamos realizando medidas considerando o ar como meio de propagação, em resolução máxima, sem qualquer média, gravando os valores de frequência. Gravamos arquivos do *laser* travado, com e sem vácuo, a fim de comparar o nível de melhora que o vácuo causa ao *laser* em comparação com o *laser* não evacuado. Queremos observar como o *laser* evacuado se comporta no longo prazo, a partir da observação das flutuações das frequências adquiridas nos dados.

## 4.2 Primeiros Resultados

Foi feita uma série de medidas com o *laser* evacuado e não evacuado, testando alguns tempos de integração (1 ms, 3 ms, 10 ms) e sensibilidade (1 mV, 2 mV, 200  $\mu\text{V}$ , 500  $\mu\text{V}$ ) do *lock in* (fig. 41). Acima e abaixo vemos o comportamento global quando o *laser* se manteve travado na linha. Cada estrutura dessa é uma curva estacionária variando em torno do zero: tomamos cada aquisição e subtraímos da média dos primeiros 15 valores de frequência. A perda do travamento é observada nas linhas verticais na forma de saltos abruptos. O tempo no eixo horizontal, para não confundir com a constante de tempo do *lock in*, é o período em

minutos que o *laser* esteve travado.

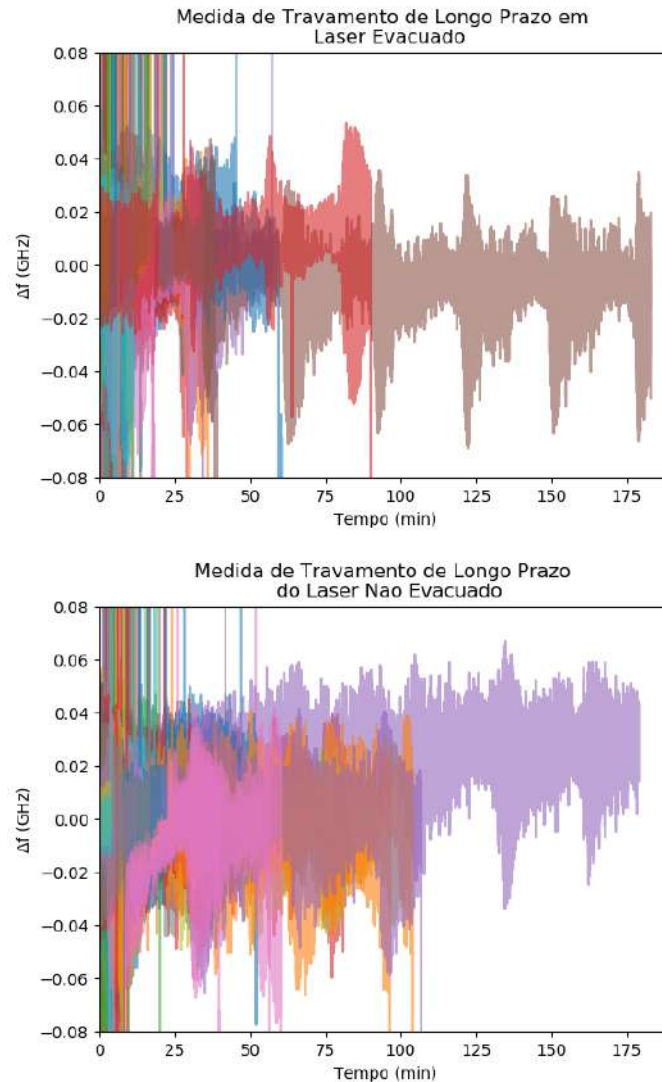
Tempos mais longos foram atingidos quando configuramos o *lock in* em  $500\ \mu\text{V}$ , com tempo de integração de 10 ms, tornando-se a melhor otimização alcançada, até o momento, de acordo com as condições em que se encontrava o *laser*. Nas demais configurações, era mais provável que o travamento se perdesse com poucos minutos: menos do que 15 minutos. Isso não significa que todos os lances de menos que 15 minutos são devido a pouca otimização, mas muitas delas são. A fim de compararmos as duas situações em que submetemos o *laser*, tomemos os dois tempos de travamento mais longos (fig. 42). Nas duas curvas, veja que o *laser* evacuado se mantém mais estável, sem efeito de *drift*. Por outro lado, vemos estruturas aparentemente periódicas em ambas, porém suspeitamos que seja uma perturbação do próprio *wavemeter*. Ainda assim, visualmente, podemos notar que o *laser* evacuado opera com menos flutuações na frequência do que estando sem vácuo. Isso indica que os efeitos térmicos causados pelo ar é significativo, e cooperam para uma instabilidade maior sobre a cabeça.

Manter o *laser* travado por horas se deve primordialmente às condições do ambiente e da estabilidade eletrônica do *laser*, pois este precisa de um certo prazo, geralmente longo, para se acomodar à temperatura e à corrente fornecidas. O nosso *laser* leva cerca de 3 a 4 horas para se acomodar depois de colocá-lo na linha. Para otimizar esse tempo, pode-se deixar o *laser* imerso em ambiente climatizado (ar-condicionado continuamente ligado), de um dia para o outro, para ajudar na diminuição do tempo de estabilização.

De outro ângulo, podemos observar como as frequências se distribuem em cada caso (fig. 43). Removemos a parte em que o *laser* perde o travamento. O intervalo de frequência foi dividido em 400 partes, considerando todas as medidas realizadas: otimizado e primeira otimização. A curva vermelha representa a distribuição normal das frequências do *laser* não evacuado, e a curva preta é o caso do *laser* com vácuo. Em ambas as condições do *laser*, vemos que o *laser* evacuado parece estar mais bem comportado do ponto de vista de estabilidade em frequência. Note que as flutuações são bem definidas, diferentemente da curva vermelha, em que as frequências se distribuem, no mesmo intervalo, com maior desvio a partir do zero. Isso pode indicar uma vantagem do vácuo em relação à presença do ar dentro do *laser*.

Vamos ver agora a probabilidade de encontrar o *laser* travado, nos casos evacuado e não evacuado, com alguma e melhor otimização. As medidas estão representadas pelos gráficos monolog, onde fitamos cada curva para indicar qual dos *lasers* possui maior tempo médio de travamento, baseando-se na estabilidade proposta (fig. 44). Cada gráfico é uma comparação

Figura 41 – Visão global dos tempos de travamento do *laser* evacuado (acima) e não evacuado (abaixo). As cores foram geradas apenas para diferenciar visualmente uma curva da outra, e não corresponde à diferença entre parâmetros.

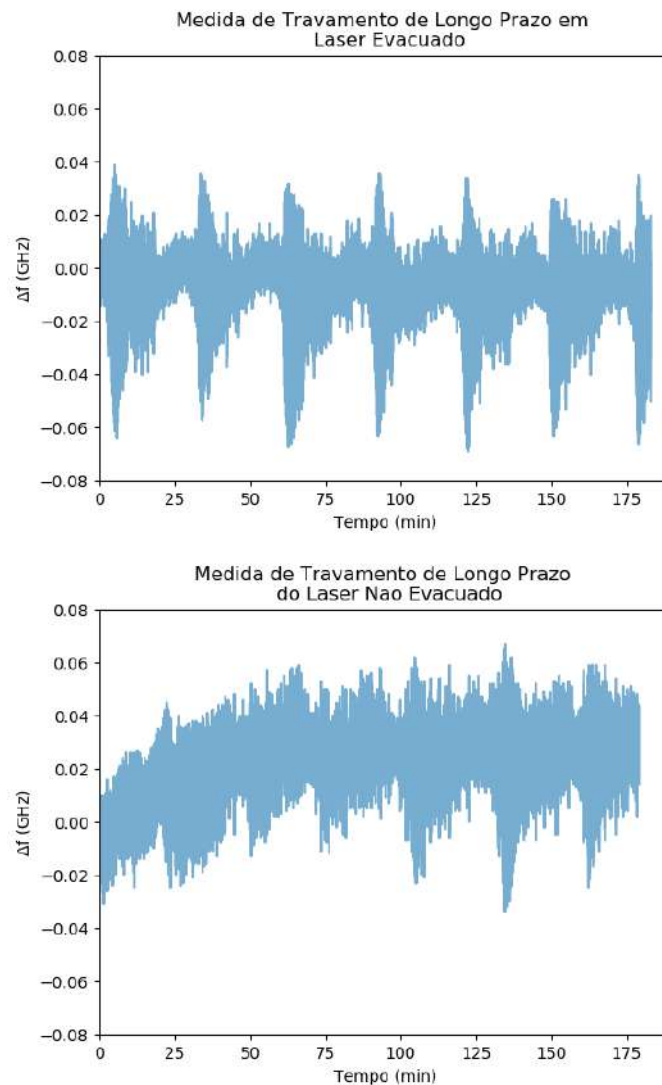


Fonte: O autor (2020).

entre os dois estados do *laser* para cada nível de otimização. Cada *fit* mostra o tempo médio de travamento do *laser*, representado pelo inverso do coeficiente da reta. Notemos no caso do *laser* com primeira otimização (gráfico acima) que em ambos os estados do *laser* a probabilidade de estar travado é próxima um do outro, cerca de 5 e 8 minutos do *laser* sem vácuo e com vácuo, respectivamente, mas que o vácuo contribui para uma maior probabilidade do *laser* estar travado. Por outro lado, na melhor otimização (gráfico abaixo), o *laser* sem vácuo se mostra mais robusto ao mostrar maior tempo médio de travamento.

De fato, ao observar o comportamento de ambos ao longo das realizações das medidas era possível perceber que o *laser* sem vácuo mantinha-se mais tempo travado, suportando as

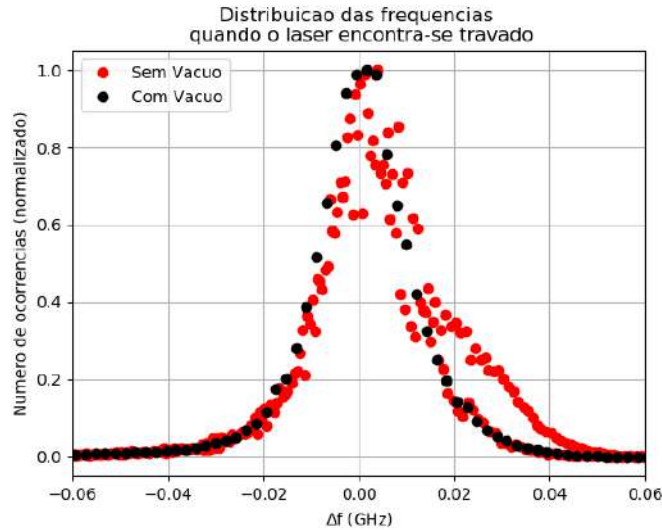
Figura 42 – Amostra de uma curva mais longa dos tempo de travamento do *laser* evacuado (acima) e não evacuado (abaixo).



**Fonte:** O autor (2020).

mesmas condições que o *laser* evacuado: as vibrações sobre a mesa ótica, a movimentação dentro da sala durante as medidas, demonstraram que o estado sem vácuo era bem mais robusto. Sendo assim, o que podemos concluir previamente é que o *laser* evacuado ou ainda precisa ser melhor otimizado, ou o *laser* não evacuado leva mais vantagem do que o primeiro em todos os aspectos. Como sabemos que há indícios de boa estabilidade do *laser* evacuado, então podemos nos direcionar ao primeiro caso: em que o estado evacuado ainda precisa ser melhor otimizado para obtermos maior tempo de travamento. Acreditamos que uma opção é a otimização do ponto de *lock*, e isso parece mais crítico do que fazer ou não o vácuo. Além disso, destacamos que o ar na cabeça ajuda um pouco a estabilizar a temperatura sobre o diodo, mas não parece

Figura 43 – Distribuição de frequências dos estados evacuado e não evacuado. Removemos dos dados os pontos em que o travamento é perdido. Em cada estado, dividimos o intervalo de frequência, máximo e mínimo, em 400 partes.



Fonte: O autor (2020).

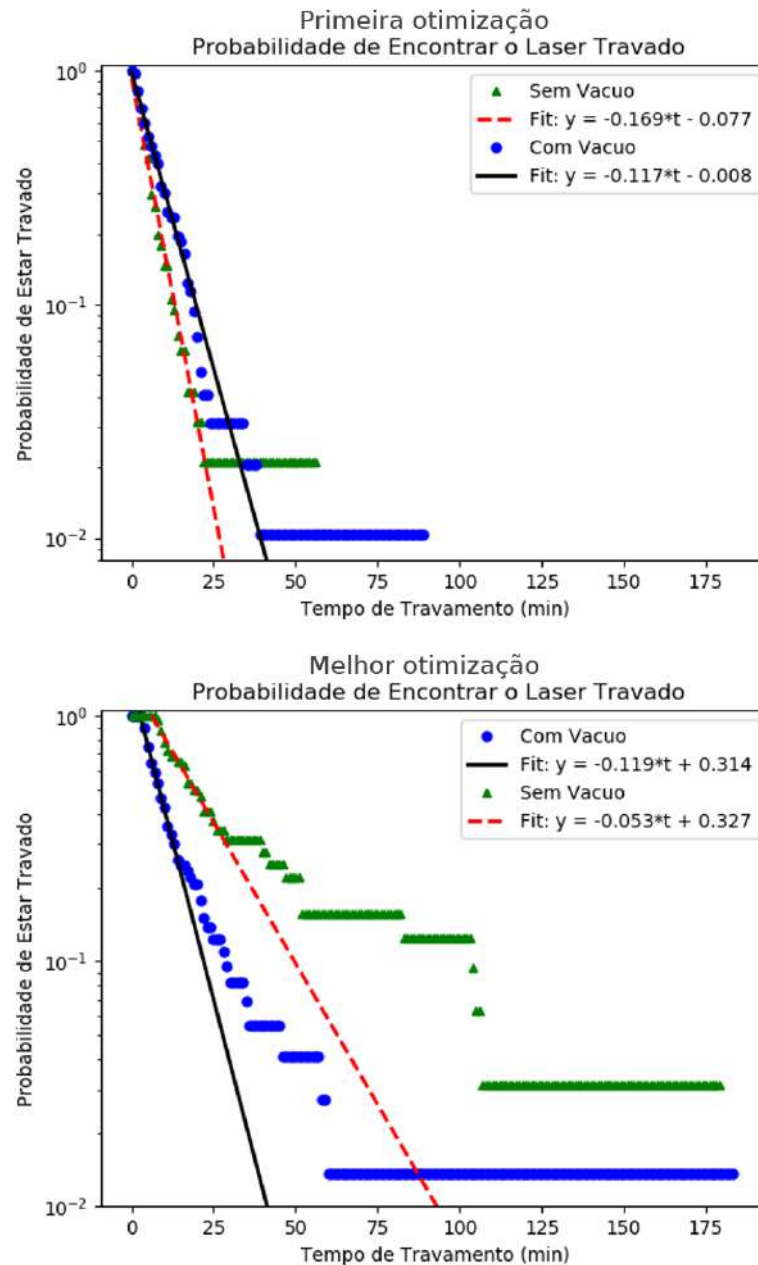
ser suficiente. Para isso, fizemos alguns outros testes para chegarmos numa melhor conclusão.

Ainda comparando os dois *lasers*, fizemos alguns testes de condições mais agressivas, como testes de impacto ao redor do *laser* e variação de temperatura ao desligar o ar-condicionado da sala. Pudemos perceber, a partir do comportamento do sinal de absorção de cada estado do *laser*, qual dos dois casos mostrava maior robustez. No caso evacuado, o sinal de absorção ficava bem mais comportado, aparentemente suportando melhor as vibrações mecânicas. Com socos, batendo palmas ou batendo os pés próximo à mesa ótica, vimos que os sinais de absorção e travamento sentiam pouco essas vibrações, ou tremiam pouco e rapidamente se restabeleciam. O mesmo não acontecia com o *laser* sem vácuo. Essa diferença de comportamento não implicava em perda rápida de travamento de um em relação ao outro, mas, aparentemente, dava indícios de que o *laser* evacuado se mostrava promissor quanto a sua qualidade.

A outra medida de robustez foi travar o *laser*, logo em seguida desligar o ar-condicionado da sala, para acompanhar o efeito da variação térmica sobre o *laser*. A medida que a temperatura da sala aumentava, nenhum dos dois vimos qualquer melhora. Com o aumento da temperatura, a corrente do *laser*, em ambos os casos, era continuamente deslocada do ponto inicial: de 109 mA. Portanto, o *laser* com e sem vácuo é susceptível a fortes mudanças térmicas externas.

Considerando, então, esses dois testes, podemos apontar que a ausência do ar, pode ser uma condição necessária para estabilização, mas não é suficiente. É suficiente, porém, que

Figura 44 – Probabilidades do *laser*, com e sem vácuo, estar travado, com alguma (acima) ou melhor otimização (abaixo). Fitamos cada curva para descobrir o tempo médio de travamento de cada caso. Com os parâmetros do *lock in* ajustados e a absorção saturada surgindo no centro de um patamar da curva de sintonização, observamos que o *laser* sem vácuo ainda é mais robusto que o *laser* evacuado.



Fonte: O autor (2020).

o ar isole mecanicamente o *laser*, mas não termicamente. Precisamos assegurar que a parte mecânica (as base) seja termalizada em conjunto com a cabeça. Acontece que o efeito da temperatura externa vem justamente da base em contato com a mesa ótica, por isso, a fim de desacoplar o *laser* completamente do resto da sala, devemos eliminar esse vínculo térmico, e

diminuir o gradiente de temperatura sobre a cabeça do laser. Uma medida para fomentar esse processo é a inserção de uma termalização de duplo estágio, termalizando em primeiro lugar a base, e depois a cabeça do *laser*, isso tornará o sistema menos sensível à variação de temperatura externa.

## 5 CONCLUSÃO

Nesta dissertação, vimos algumas propriedades comuns a *lasers* de diodo. É corriqueiro que um *laser* estável necessite de um bom controle de temperatura, e uma boa fonte de corrente de baixíssimo ruído de modo que a largura de linha não carregue consigo o ruído proveniente da baixa estabilização. Além da instrumentação, apresentamos o modelo de *laser* de diodo com cavidade externa. Essa montagem é muito comum, sendo aplicado inclusive na indústria. Nosso modelo, no entanto, não requer cavidade externa, demonstrando eficácia para as nossas aplicações.

Também apresentamos o nosso desenvolvimento do estado da arte do *laser* de diodo, incluindo algumas soluções em desacoplamento das influências do meio externo: a inclusão das baterias no lugar das fontes de tensão caseiras, e um sistema de baixo vácuo para diminuir as flutuações térmicas sobre o *laser*. Além disso, construímos um novo controle de temperatura digital usando placa Arduíno, sendo este um avanço do que já tínhamos no nosso laboratório. Este controlador simetriza a transmissão de dados na dupla conversão: analógico-digital, digital-analógico.

Usamos como método de medida de estabilidade a absorção saturada do átomo de rubídio. Em particular, a frequência da transição de  $F=2 \rightarrow F'_C=2-3$  do rubídio 87 foi a nossa escolha mais conveniente para travar a emissão do nosso *laser* em ambos os estados, com e sem vácuo. Fizemos o travamento com a ajuda de um *lock-in* comercial e a aquisição dos dados foi feita com um *wavelength meter*, também comercial.

Após a análise, e observação do comportamento do sistema, podemos concluir, ainda de maneira preliminar, que o *laser* evacuado não acompanha o *laser* sem vácuo no quesito otimização. O tempo de travamento médio do *laser* não evacuado é maior do que o *laser* com vácuo. Assim, é preciso uma melhor otimização do estado evacuado. Em ordem zero, a montagem mecânica precisa de aperfeiçoamento, principalmente a parte eletrônica, com a inserção de um sensor de temperatura que nos fornece um sinal digitalizado e um outro estágio de termalização. Ainda na parte de otimização, precisa-se ainda estudar melhor os parâmetros de travamento do *laser* a fim de aumentar o tempo com que o *laser* evacuado mantém-se travado na linha.



## REFERÊNCIAS

- [1] N. Basov, *Nobel Lecture* **1964**.
- [2] A. L. Schawlow, C. H. Townes, *Phys. Rev.* **1958**, *112*, 1940–1949.
- [3] R. N. Hall, G. E. Fenner, J. D. Kingsley, T. J. Soltys, R. O. Carlson, *Phys. Rev. Lett.* **1962**, *9*, 366–368.
- [4] Z. I. Alferov, *Nobel Lecture* **2000**.
- [5] I. Akasaki, *Nobel Lecture* **2014**.
- [6] J. C. Camparo, *Contemporary Physics* **1985**, *26*, 443–477.
- [7] C. E. Wieman, L. Hollberg, *Review of Scientific Instruments* **1991**, *62*, 1–20.
- [8] L. Ricci, M. Weidemüller, T. Esslinger, A. Hemmerich, C. Zimmermann, V. Vuletic, W. König, T. Hänsch, *Optics Communications* **1995**, *117*, 541–549.
- [9] A. Müller, S. Marschall, O. B. Jensen, J. Fricke, H. Wenzel, B. Sumpf, P. E. Andersen, *Laser & Photonics Reviews* **2013**, *7*, 605–627.
- [10] P. A. Martin, *Chem. Soc. Rev.* **2002**, *31*, 201–210.
- [11] T. Suhara em, Marcel Dekker, Inc, **2004**, cap. 5.
- [12] L. I. Brasil, Laser de Diodo para Aplicações em Física Atômica e Molecular, rel. técn., Departamento de Física, Universidade Federal de Pernambuco, **2017**.
- [13] K. B. MacAdam, A. Steinbach, C. Wieman, *American Journal of Physics* **1992**, *60*, 1098–1111.
- [14] C. J. Hawthorn, K. P. Weber, R. E. Scholten, *Review of Scientific Instruments* **2001**, *72*, 4477–4479.
- [15] E. C. Cook, P. J. Martin, T. L. Brown-Heft, J. C. Garman, D. A. Steck, *Review of Scientific Instruments* **2012**, *83*, 043101.
- [16] P. Chang, S. Zhang, H. Shang, J. Chen, *Applied Physics B* **2019**, *125*, 196.
- [17] K. G. Libbrecht, J. L. Hall, *Review of Scientific Instruments* **1993**, *64*, 2133–2135.

- [18] T. P. Meyrath, An Analog Current Controller Design for Laser Diodes, <https://phas.ubc.ca/~qdg/resources/AMORreadingList/diodelasers/laser%20diode.pdf>.
- [19] L. Turner, K. Weber, C. Hawthorn, R. Scholten, *Optics Communications* **2002**, 201, 391–397.
- [20] D. A. Steck, Rubidium 85 D Line Data, <https://steck.us/alkalidata/>.
- [21] D. A. Steck, Rubidium 87 D Line Data, <https://steck.us/alkalidata/>.
- [22] D. W. Allan, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* **1987**, IM-36, 646–654.
- [23] D. V. Land, A. P. Levick, J. W. Hand, *Measurement Science and Technology* **2007**, 18, 1917–1928.
- [24] A. Dobrogowski, M. Kasznia em 2012 European Frequency and Time Forum, **2012**, pp. 247–252.
- [25] L. .-. Bernier, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* **2003**, 52, 483–486.
- [26] R. Hernández-Pérez, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* **2012**, 391, 2883–2888.
- [27] F. Favre, L. Jeunhomme, I. Joindot, M. Monerie, J. C. Simon, *IEEE Journal of Quantum Electronics* **1981**, 17, 897–906.
- [28] P. Gallion, F. J. Mendieta, R. Leconte, *J. Opt. Soc. Am.* **1982**, 72, 1167–1170.
- [29] M. Tanaka, T. Yamagami, K. Nakayama, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* **1989**, 38, 552–554.
- [30] L. B. Mercer, *Journal of Lightwave Technology* **1991**, 9, 485–493.
- [31] C. M. Sutton, *Journal of Physics E: Scientific Instruments* **1987**, 20, 1290–1292.
- [32] N. D. Alves, diss. de mestr., Departamento de Física, Universidade Federal de Pernambuco, **2019**.
- [33] M. Weel, A. Kumarakrishnan, *Canadian Journal of Physics* **2002**, 80, 1449–1458.

# APÊNDICE A - DATASHEET DO DIODO LASER

Ordering number : EN5873A

Infrared Laser Diode



**DL-7140-201**

**High Power Laser Diode**

## Overview

DL-7140-201 is high power (70mW) 785nm laser diode.  
DL-7140-201 is suitable for CD-R.

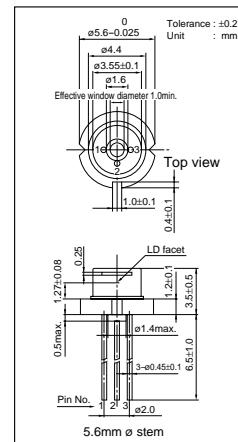
## Features

- High power : 70 mW at 60°C
- Index guided type
- Small package : 5.6 mmØ
- PIN connection : Cathode common type

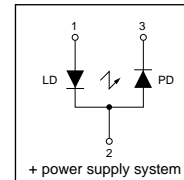
## Absolute Maximum Ratings at Tc=25°C

Parameter	Symbol	Ratings	Unit
Light Output	Po	80	mW
Reverse Voltage	Laser PIN	VR	V
		2 30	
Operating Temperature	Topr	-10 to +60	°C
Storage Temperature	Tstg	-40 to +85	°C

## Package Dimensions



## Electrical Connection



## Electrical and Optical Characteristics at Tc=25°C

Parameter	Symbol	Condition	Min.	Typ.	Max.	Unit
Threshold Current	Ith	CW	-	30	50	mA
Operating Current	Iop	Po=70mW	-	100	140	mA
Operating Voltage	Vop	Po=70mW	-	2.0	2.5	V
Lasing Wavelength	λp	Po=70mW	780	785	800	nm
Beam <sup>*)</sup>	Perpendicular	Po=70mW	15	17	20	deg.
Divergence	Parallel	Po=70mW	5.5	7.0	8.0	deg.
Off Axis	Perpendicular	Δθ ⊥	-	-	±3	deg.
Angle	Parallel	Δθ //	-	-	±3	deg.
Differential Efficiency	dPo/dIop	-	0.6	1.0	1.4	mW/mA
Monitoring Output Current	Im	Po=70mW	0.10	0.25	0.60	mA
Astigmatism	As	Po=70mW	-	10	-	μm

<sup>\*)</sup> Full angle at half maximum note : The above product specifications are subject to change without notice.

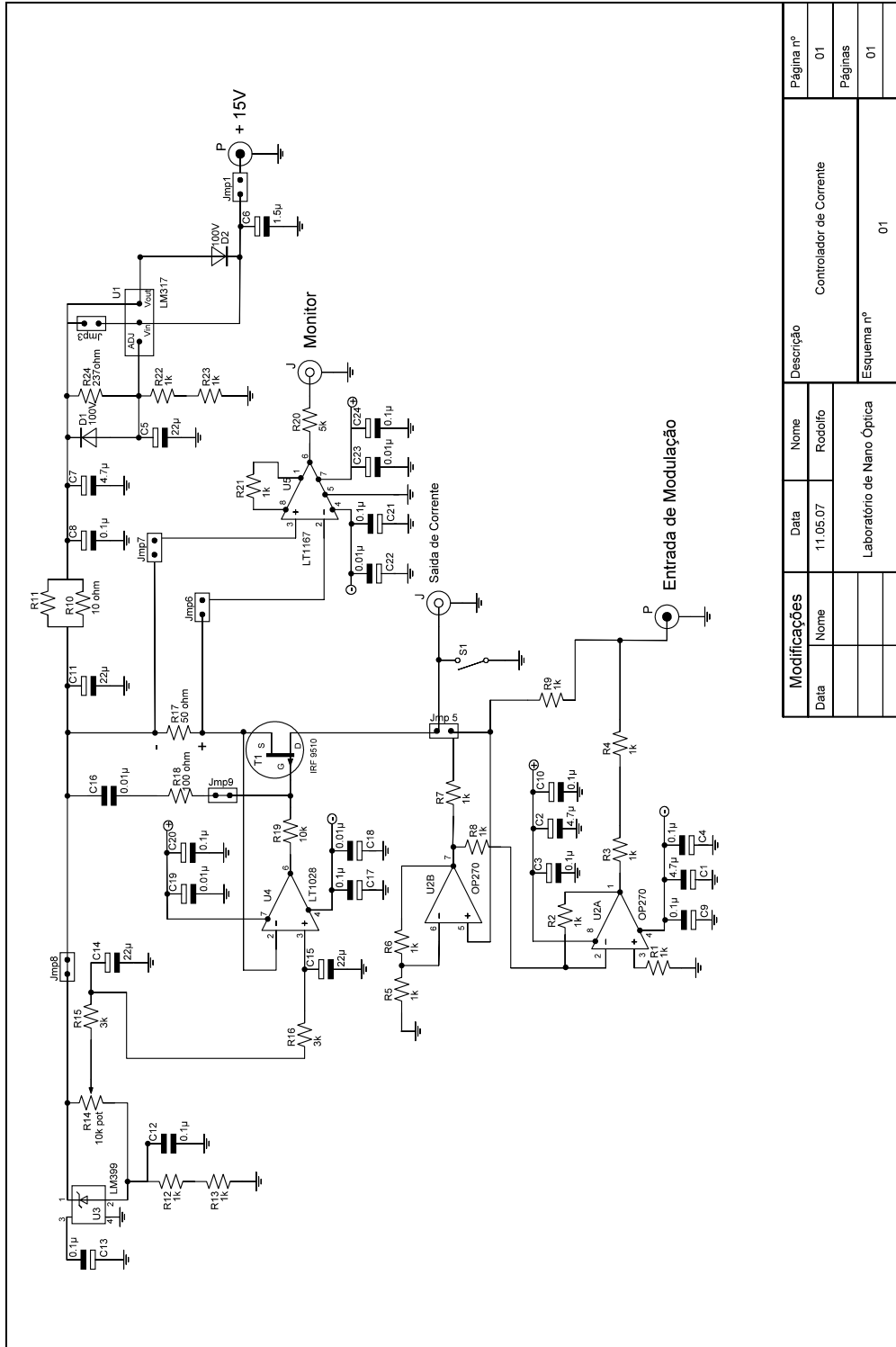
**SANYO Electric Co.,Ltd. Semiconductor Business Headquarters**

TOKYO OFFICE Tokyo Bldg., 1-10, 1 Chome, Ueno, Taito-ku, TOKYO, 110-8534 JAPAN

N2798 GI / N2897 GI, (IM) No.5873 1/3



# APÊNDICE C - CONTROLADOR DE CORRENTE



## APÊNDICE D - CÓDIGO CONTROLADOR DE TEMPERATURA

```
// Programa : Controle de Temperatura (Acrescentar EEPROM, Mudar menu de telas)
// Autor : Rodrigo L. Santos

#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>      //biblioteca para display com I2C
#include <Adafruit_ADS1015.h>      //biblioteca para ADC
#include <DAC855X.h>               //biblioteca para DAC
#define ADC_16BIT_MAX 65536
#define N                      //Definindo o n° de pontos para média das temperaturas

LiquidCrystal_I2C lcd(0x3f,2,1,0,4,5,6,7,3, POSITIVE); //Inicializacao do display
(no endereco 0x27)

DAC855X dac; //Criando objeto do tipo DAC855x da biblioteca utilizada para as
operações com o DAC

volatile float Setpoint = 23.5000, beta = 5., gama = 0.1; //Definicao dos
parametros utilizados no calculo do erro para acao de controle
float alfaB = 0, alfaI = 0, alfaG = 0, alfa = 0;
float Erro; //Declaracao da variavel
Adafruit_ADS1115 ads(0x48); //Criando objeto do tipo ADS115 da biblioteca
utilizada para as operações com o ADC

float lm35_constant, ads_bit_Voltage; //Declaracao de variaveis e parametros para
leitura da temperatura convertendo em sinal digital pelo ADC
int16_t ads_ch0 = 0;
float ads_Voltage_ch0 = 0.0f, Temperature = 0.0f, Temp = 0.0f, Temp_read [N];
int k; //Variavel auxiliar para loop da media das temperaturas

char *texto[] = {"Temperatura:", "Setpoint Temp:", "Ganho Beta:"}; //Textos que
serao printados no display para cada menu exibido

const int buttonSelect = 3; //Declaracao dos botoes utilizados para navegacao
nos menus
const int buttonUp = 4;
const int buttonDown = 5;
volatile int menu = 0, j = 0; //Declaracao de variaveis na criacao dos menus
volatile float var[3]; // = {0,10,10}; //Declaracao da variavel que recebera os
valores das grandezas mostradas no display
float unid[] = {10,1,0.1,0.01,0.001,0.0001}; //Unidades de variacao para as
escolhas dos parametros atraves do display

void setup()
{
    Serial.begin(9600);

    lcd.begin(16,2); //Inicializacao do display com a backlight acesa
    lcd.setBacklight(HIGH); //lcd.setBacklight(LOW);

    pinMode(buttonSelect, INPUT_PULLUP); //Definindo os botoes do menu
    pinMode(buttonUp, INPUT_PULLUP);
    pinMode(buttonDown, INPUT_PULLUP);
    attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(2), changeMenu, RISING); //Interrupcao para
alterar os menus

    ads.setGain(GAIN_SIXTEEN); // seta o ganho
    ads.begin(); // inicializa o ADC
    float ads_InputRange = 0.256f; //Variavel q indica quantos bit o ADC utilizara
para conversao
    ads_bit_Voltage = (ads_InputRange * 2)/(ADC_16BIT_MAX - 1);
    lm35_constant = 10.0f / 1000; //Constante para calculo da temperatura lida
no sensor

    dac.setPins(11, 13, 10); //Definicao dos pinos utilizados para o DAC
    dac.initializeDAC855X(); // inicializa o DAC
}
```

```
void loop(){

    for(k=0;k<N;k++){          //Filtro (media) na leitura da temperatura
        ads_ch0 = ads.readADC_SingleEnded(0);
        ads_Voltage_ch0 = ads_ch0 * ads_bit_Voltage;    //Calculo da temperatura
        //do sinal digital obtido
        Temp = ads_Voltage_ch0 / lm35_constant;
        Temp_read[k] = Temp;
        Temperature = Temperature + Temp_read[k];
    }

    Serial.println(Temperature/N,4);

    Erro = ((Temperature/N) - Setpoint);    //Calculo do erro para gerar a acao de
    controle

    alfaB = -(Erro*100000*beta);    //Acao de controle proporcional, dado o erro e
    beta (fator 100000 para levar ao intervalo cujo sinal do DAC tenha efeito no sistema
    (sinal negativo devido ligacao do drive de temperatura)

    alfa = mudar_Escala(alfaB);    //Funcao para transformar na escala de acao pos
    conversao do DAC(faixa pequena de temperatura para controlar)

    dac.setChipChanValue(1, 0, alfa); //Inserindo o valor de alfa ja na escala
    correta para conversao no dac (0 -> 0.0033V (Offset do DAC))

    switch(menu){              //Condicional para printar os respectivos menus no display
    case 0:
        var[menu] = Temp;//Temperature/20;
        printar_lcd(texto[menu],var[menu]);
        break;

    case 1:
        if(digitalRead(buttonSelect) == LOW){    //Caso o botao 'select' seja
        pressionado, a variavel 'j' sera incrementada e a casa decimal sera deslocada para
        direita
            j++;
            if(j>=6){
                j = 0;
            }
        }
        printar_lcd(texto[menu],Setpoint);    //Funcao definida abaixo que printa no
        display o texto e variavel enviados como argumento
        if(digitalRead(buttonUp) == LOW){    //Dependendo do botao pressionado a
        variavel do respectivo menu sera acrescentada ou reduzida em uma unidade
            Setpoint = Setpoint + unid[j];
        }
        if(digitalRead(buttonDown) == LOW){
            Setpoint = Setpoint - unid[j];
        }
        break;

    case 2:
        if(digitalRead(buttonSelect) == LOW){
            j++;
            if(j>=6){
                j = 0;
            }
        }
        printar_lcd(texto[menu],beta);
        if(digitalRead(buttonUp) == LOW){
            beta = beta + unid[j];
        }
        if(digitalRead(buttonDown) == LOW){
            beta = beta - unid[j];
        }
    }
```

```
        break;
    }

    Temperature = 0;          //Reset para recalcular a temperatura no proximo loop
}

void changeMenu() {          //Funcao ligada a interrupcao do botao de selecionar o
menu
    menu++;                  //Uma vez que o botao tenha sido pressionado a funcao ira
incrementar a variavel e o menu printado mudara
    if (menu > 2) {
        menu = 0;
    }
}

void printar_lcd(char text[], float var){ //Funcao para realizar os prints no
display
    lcd.clear();             //Funcoes da biblioteca utilizada para inicializar o
display
    lcd.cursor();
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print(text);         //Printar o texto recebido
    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print(var,4);         //Printar a variavel recebida
    if (j<2) {                //Como o valor printado possui casas decimais, deve-se
acrescentar uma unidade no valor da posição do cursor após a 'virgula'
        lcd.setCursor(j,1);
        lcd.cursor();
        lcd.blink();
    } else {
        lcd.setCursor(j+1,1);
        lcd.cursor();
        lcd.blink();
    }
    delay(200);
}

float mudar_Escala(float x){ //Nessa funcao o valor da acao sera alterado para
poder, apos ser convertido pelo dac, gerar uma tensao no peltier que possa agir no
sistema
    if(x >= 65535){           // limitar os valores maximos e minimos para ação
        x = 65535;
    } else if(x < -65536){
        x = -65536;
    }
    if(x <= 0){               //A funcao do arduino 'map' é utilizada para transformar o
valor na escala desejada
        x = map(x, -65536, 0, 0, 32767); // valores negativos serão de -2,5V a 0V
    } else if(x > 0){
        x = map(x, 0, 65536, 32768, 65535); // valores positivos serão de 0V a 2,5V
    }
    return x;
}
```



# APÊNDICE E - SOBRE O WAVEMETER

www.testdyne.com Test & Measurement Services

SPECIFICATIONS					
621A			621B		
LASER TYPE		CW only			
WAVELENGTH					
Range		VIS: 350 - 1100 nm		NIR: 500 - 1700 nm	IR: 1.0 - 5.0 μm
Absolute Accuracy		± 0.2 parts per million ± 0.0002 nm @ 1,000 nm ± 0.002 cm <sup>-1</sup> @ 10,000 cm <sup>-1</sup> ± 0.06 GHz @ 300,000 GHz		± 0.75 parts per million ± 0.00075 nm @ 1,000 nm ± 0.0075 cm <sup>-1</sup> @ 10,000 cm <sup>-1</sup> ± 0.225 GHz @ 300,000 GHz	
Repeatability (1)		VIS/NIR		IR	
		± 0.03 parts per million ± 0.06 parts per million		± 0.1 part per million	
Calibration		Continuous with built-in stabilized single-frequency HeNe laser		Continuous with built-in standard HeNe laser	
Display Resolution		9 digits		8 digits	
Units		nm or cm <sup>-1</sup> (vacuum or standard air), GHz			
POWER (VIS AND NIR)					
Absolute Accuracy (2)		± 15%			
Resolution		2%			
Units		mW, μW, dBm			
OPTICAL INPUT SIGNAL					
Maximum Laser Bandwidth (3)		1 GHz 0.003 nm at 1000 nm 0.03 cm <sup>-1</sup>		10 GHz 0.03 nm at 1000 nm 0.3 cm <sup>-1</sup>	
Minimum Input (4)		VIS		NIR	
		100 μW at 350 nm 300 μW at 500 nm 750 μW at 1.0 μm		20 μW at 650 nm 10 μW at 1500 nm 100 μW at 3.0 μm	
		IR		75 μW at 1100 nm 50 μW at 1700 nm 1000 μW at 5.0 μm	
Maximum Input (5)		10 mW			
MEASUREMENT RATE		VIS/NIR		IR	
		4 Hz 2.5 Hz		10 Hz 2.5 Hz	
OPTICAL INPUT		VIS/NIR		IR	
		Pre-aligned FC/PC connector (9 μm core diameter) - optional free beam-to-fiber coupler Collimated beam, 2 mm diameter aperture, visible tracer beam exits aperture to facilitate alignment			
COMPUTER REQUIREMENTS					
PC running Windows Vista or Windows XP with 1 GHz or higher microprocessor, at least 128 MB of available RAM, USB 1.1/2.0 port, VGA monitor, mouse or other pointing device					
INSTRUMENT INTERFACE					
High-speed USB 2.0 interface with Windows-based display program Library of commands for custom and LabVIEW programming					
WARM-UP TIME		< 15 minutes		None	
DIMENSIONS AND WEIGHT		VIS/NIR		IR	
		6.5" W x 5.0" H x 15.0" L (165.1 mm x 127.0 mm x 381.0 mm) 6.5" W x 7.5" H x 15.0" L (165.1 mm x 190.5 mm x 381.0 mm)		14 lbs (6.4 kg) 14 lbs (6.4 kg)	
POWER REQUIREMENTS					
90 to 260 VAC, 50/60 Hz					

- (1) Standard deviation for a 5 minute measurement period after the instrument has reached thermal equilibrium.  
 (2) Calibration wavelength for VIS version is 633 nm. Calibration wavelength for NIR version is 1533 nm.  
 (3) Bandwidth is FWHM. When bandwidth is greater, wavelength is automatically reported with reduced resolution.  
 (4) Sensitivity at other wavelengths can be determined from a graph that is available upon request.  
 (5) For IR version, the maximum input power level is about 10-15 times the minimum input power level.



Bristol Instruments reserves the right to change the detail specifications as may be required to permit improvements in the design of its products. Specifications are subject to change without notice.



Call: **(585) 924-2620** for more information or  
 visit our website at : **www.bristol-inst.com**

*It's Our Business To Be Exact!*

Bristol Instruments, Inc. 7647 Main Street Fishers Victor, NY 14564-8909  
 Tel: (585) 924-2620 Fax: (585) 924-2623 info@bristol-inst.com www.bristol-inst.com

10-08