

### 3 Montagem Experimental

Apresentamos neste capítulo a descrição da montagem experimental bem como os alinhamentos optomecânicos para otimização da detecção dos sinais laser. A caracterização do laser – comprimento de onda emitido versus temperatura do cristal laser é apresentada como comparação entre as medidas realizadas no laboratório e as medidas do fabricante do laser. Testes preliminares de resfriamento da célula de iodo foram realizados, e os resultados são apresentados aqui.

#### 3.1. Descrição Geral

A Figura 3.1 apresenta a montagem experimental dos dispositivos e componentes ópticos utilizados para a realização da estabilização da frequência laser. O esquema experimental foi dividido em quatro partes: *Sistema de Excitação – SE* (3.2), *Sistema para Alinhamentos Ópticos – SAO* (3.3), *Sistema de Resfriamento da Célula – SRC* (3.4), *Sistema de Detecção – SD* (3.5).

Atualmente, a montagem do experimento ocupa uma área de 60 cm x 100 cm (sobre uma mesa óptica, Melles Griot), sendo o objetivo final deste projeto o desenvolvimento de um padrão de referência metrológica de frequência laser. Este padrão será transportável e as dimensões serão compactadas em dimensões de 45 cm x 60 cm como indicado na referência [35].

Um laser comercial Nd:YAG<sup>6</sup> da Innolight, tipo Prometheus 20, é usado no experimento. Ele já vem dobrado em frequência pelo fabricante e emite uma radiação em torno de 532 nm, cuja potência de saída é de aproximadamente 20 mW. Conforme a Figura 3.1 mostra, são usados um isolador óptico para evitar um

retorno da radiação dentro da cavidade laser, e um conjunto de lentes para colimação do feixe dentro da célula (ver item 3.3). O feixe é dividido em dois braços (50/50) por um divisor de feixe (Beamsplitter-BS). Um deles, chamado de referência, é transmitido pelo divisor até um fotodetector A. O outro feixe atravessa ida e volta uma célula de absorção contendo vapor de iodo molecular  $^{127}\text{I}_2$ . O feixe de retorno é então transmitido por um cubo divisor de polarização (CDP) e detectado pelo fotodiodo B. O sinal de erro A-B será usado para corrigir as variações de frequência do laser através de uma malha fechada (Ver item SD).

---

<sup>6</sup> O laser é denominado Nd:YAG (Neodymium-doped Yttrium Aluminium Garnet) por causa do cristal usado para gerar a radiação primária de 1064 nm (ver Apêndice A).

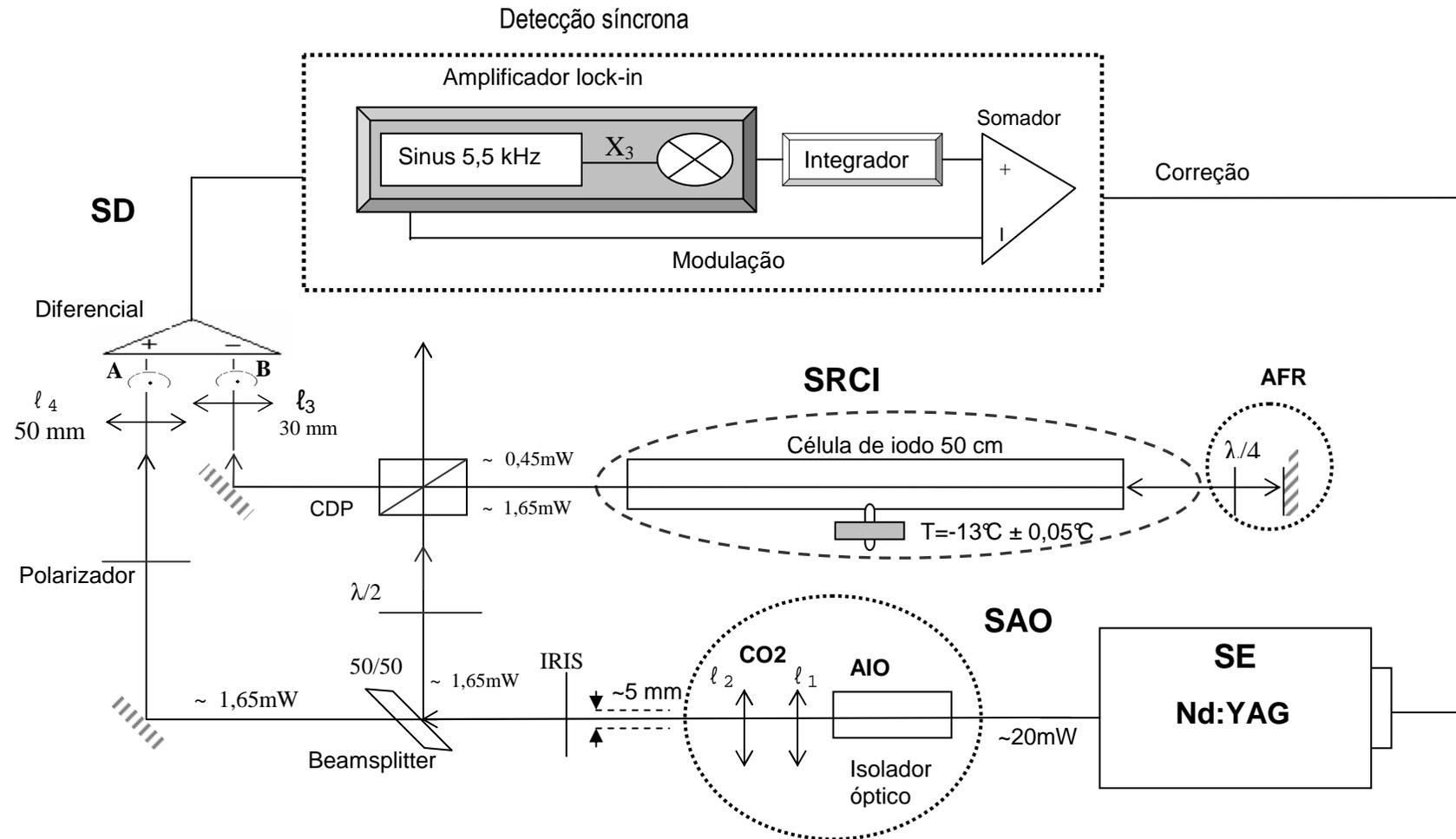


Figura 3.1. Montagem experimental. **SE**: Sistema de Excitação laser Nd:YAG. **SAO** (Sistema para Alinhamentos Óticos): CO2 (Colimador Óptico de duas Lentes), AIO (Alinhamento do Isolador ótico), AFR (Alinhamento do Feixe Refletido na célula). **SRCI**: Sistema de Resfriamento da Célula de Iodo; **SD**: Sistema de detecção.

### 3.2. Sistema de Excitação (SE) Nd-YAG

O sistema laser usado neste projeto é composto de duas partes: a cabeça laser e a unidade de controle eletrônico, ambos conectados por um cabo (Figura 3.2). A cabeça laser é composta de um laser de bombeamento (diodo laser em torno de 808 nm), um cristal monolítico Nd:YAG-NPRO<sup>7</sup>, uma unidade dobradora de frequência (cristal não linear *Periodically Poled Potassium Titanyl Phosphate*- PPKTP, KTiOPO<sub>4</sub>), um circuito de redução de ruído (Noise Eater), controladores de temperatura, espelhos, lentes de focalização e colimação, e uma cerâmica piezelétrica (PZT) aderida ao cristal Nd:YAG para modulação e ajuste de frequência (Figura 3.3). Os comprimentos de onda produzidos tanto pelo diodo (808 nm) laser como pelo cristal Nd:YAG (1064 nm) dependem fortemente da temperatura. A unidade de controle eletrônico foi projetada para prover um controle térmico destes subsistemas.

A radiação infravermelha do cristal Nd:YAG, com 1,1 W de potência de saída em 1064 nm, é focalizada no cristal PPKTP para gerar um comprimento de onda do segundo harmônico em 532 nm, com uma potência de saída de 20mW. Os feixes de saída de 532nm e 1064 nm são separados dentro da cabeça laser usando espelhos dicróicos. Para modulação e ajuste fino da frequência do laser, pode ser aplicada na PZT uma voltagem de até  $\pm 100$  V, via uma conexão BNC situada na parte traseira da cabeça laser. Os ajustes lentos de frequência se realizam pelo controle de temperatura do cristal laser.



Figura 3.2. Sistema Laser Nd:YAG: (a) Cabeça do laser, (b) Unidade de controle eletrônico [28].

<sup>7</sup> Non Planar Ring Oscillator

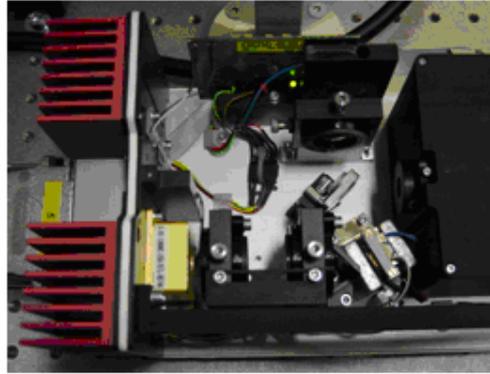
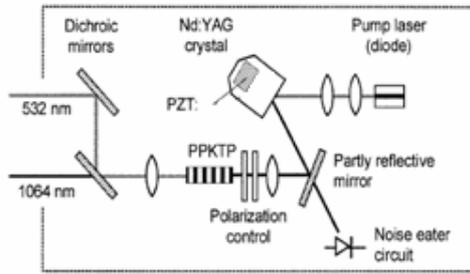


Figura 3.3. Esquema da cabeça laser [28],[35]

### 3.2.1. Caracterização do laser Nd:YAG

A frequência do laser Nd:YAG pode ser variada através da temperatura do cristal laser ( $T_{LC}$ ) Nd:YAG. No contexto deste trabalho, caracterizar o laser Nd:YAG 532 nm significa fixar o comprimento de onda  $\lambda$  (ou frequência) do laser através da  $T_{LC}$ . Por exemplo, segundo o fabricante o comprimento de onda  $\lambda=532,2455$  nm da transição R(56) 32-0 corresponde a uma  $T_{LC}$  de 25,5 °C. A temperatura  $T_{LC}$  pode ser ajustada de duas formas: pelo método manual, medindo o comprimento de onda após de variar a  $T_{LC}$  através de um potenciômetro situado no painel frontal do controle eletrônico (Laser Crystal – Figura 3.3a), e a outra pelo método via remoto, aplicando uma voltagem no conector BNC chamado “Temperatura Laser Crystal 1K/V”, localizado no painel posterior do controlador eletrônico (Figura 3.3b). No primeiro método mede-se o comprimento de onda (ou frequência) do laser usando um *wavemeter*. No segundo método registra-se o espectro das transições moleculares através de um detector e medidor de potência interfaceável, quando o feixe do laser atravessa a célula de iodo.

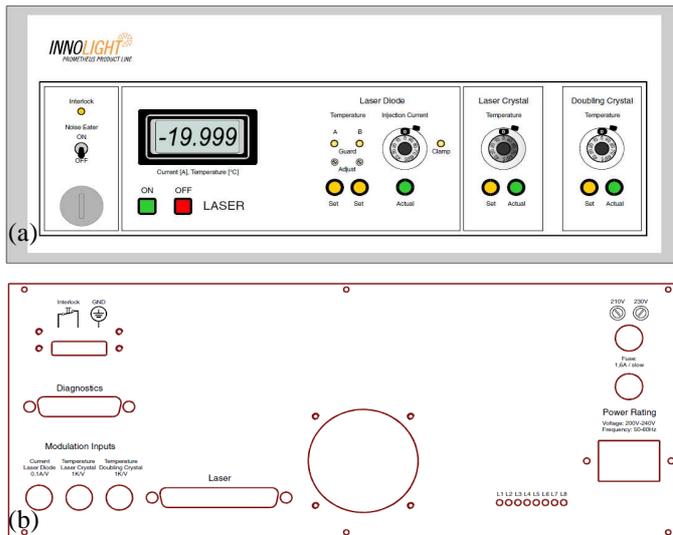


Figura 3.4. (a). Painel frontal e (b). Painel posterior da unidade controle eletrônico do laser Prometheus.

### 3.2.1.1. Método manual, medição do comprimento de onda

Para a determinação do comprimento de onda emitido pelo laser em função da temperatura do cristal laser  $T_{LC}$ , foi usado um *wavemeter* WA-1500 VIS da Burleigh<sup>8</sup>. O instrumento possui uma resolução máxima de 0,0001 nm e uma exatidão relativa 0,2 ppm ( $\delta v/v \sim 2 \cdot 10^{-7}$  ou  $\delta v \sim \pm 55$  MHz). Para realizar uma medição correta, o *wavemeter* ajusta automaticamente a potência do feixe laser a ser detectada através de um filtro interno. O *wavemeter* foi configurado da seguinte forma:

SETPPOINT: 532,2455 nm

MEDIUM: Vácuo

RESOLUTION: Auto

ATTENUATOR: ON.

A configuração óptica do *wavemeter* é similar à de um interferômetro de Michelson. Ele determina o comprimento de onda do laser a ser medido (teste) mediante comparação de sua franja de interferência com a franja proveniente do laser padrão He-Ne incorporado no instrumento. Uma parte do feixe interno deste laser retorna pela abertura de entrada. O feixe do laser teste pode ser alinhado

<sup>8</sup> O *wavemeter* foi verificado com um laser de referência disponível no laboratório. Ver Apêndice.B.

colinearmente com o feixe de referência (Figura 3.5), otimizando assim o caminho óptico do feixe teste no *wavemeter*. Quando a potência mínima de detecção é atingida ( $30 \mu\text{W}$ ), o instrumento começa a ler o valor do comprimento de onda (ou da frequência) do laser a ser medido. Ajustes finos de alinhamento podem ser feitos à medida em que se observa a potência no mostrador do *wavemeter*.



Figura 3.5. Alinhamento dos feixes.

No caso do laser Nd:YAG- Prometheus 20 usado no nosso experimento, foram fixados pelo fabricante os seguintes parâmetros:

I (corrente diodo laser): 2,4 A

T (temperatura diodo laser): 17,56 °C

Para a caracterização do nosso laser, realizamos uma varredura manual da temperatura  $T_{LC}$  e observamos o comprimento de onda  $\lambda$  lido no *wavemeter*. A faixa de temperatura varrida foi de 21 °C a 42 °C com passos de 0,1 °C (ver Gráfico 3.1). A cada variação da temperatura, um tempo de espera de aproximadamente 30 segundos era necessário para estabilização da frequência laser.

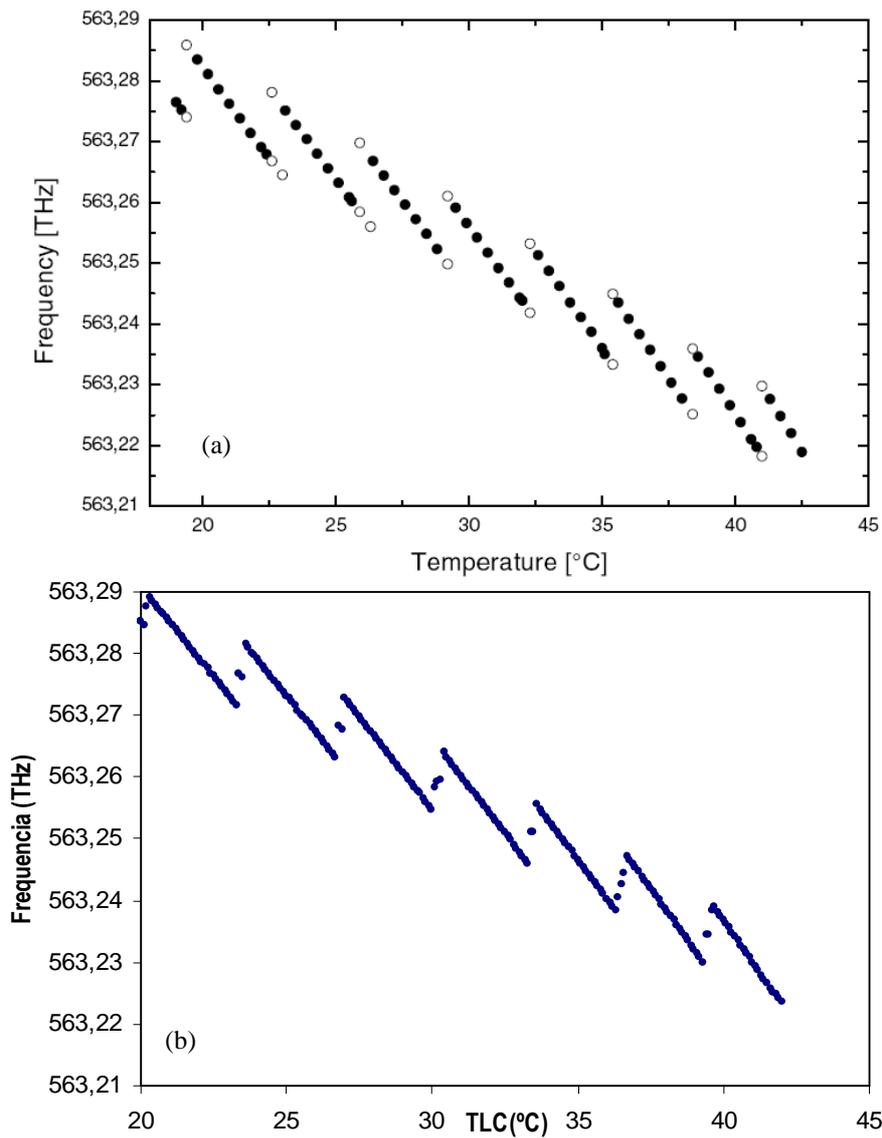


Gráfico 3.1. Comportamento da frequência do laser em função da temperatura do cristal laser  $T_{LC}$ , (a) Medidas do fabricante; (b) Medidas do laboratório.

Tabela 3.1. Valores medidos de frequência pelo fabricante e pelo laboratório.

Lab. /Fab T <sub>Lc</sub> (°C)	Frequência (THz)		Diferença (THz)	Comprimento (nm)		Diferença (nm)
	Fabricante	Laboratório		Fabricante	Laboratório	
20,1	563,272	563,2845	0,0124	532,2337	532,2220	-0,0117
21,3	563,266	563,2832	0,0172	532,2394	532,2232	-0,0162
23,8	563,263	563,2801	0,0171	532,2423	532,2262	-0,0161
25	563,257	563,2732	0,0162	532,2480	532,2327	-0,0152
27,6	563,254	563,2692	0,0155	532,2512	532,2365	-0,0147
28,4	563,250	563,2644	0,0148	532,2551	532,2411	-0,0140
30,6	563,247	563,2627	0,0155	532,2574	532,2427	-0,0147
31,4	563,242	563,2577	0,0153	532,2618	532,2473	-0,0145
33,8	563,239	563,2542	0,0148	532,2647	532,2507	-0,0140
34,5	563,235	563,2500	0,0145	532,2685	532,2549	-0,0136
36,7	563,232	563,2472	0,0146	532,2712	532,2573	-0,0139
37,5	563,227	563,2420	0,0144	532,2758	532,2622	-0,0136
39,4	563,227	563,2345	0,0075	532,2763	532,2693	-0,0070
40,2	563,222	563,2355	0,0137	532,2813	532,2684	-0,0129

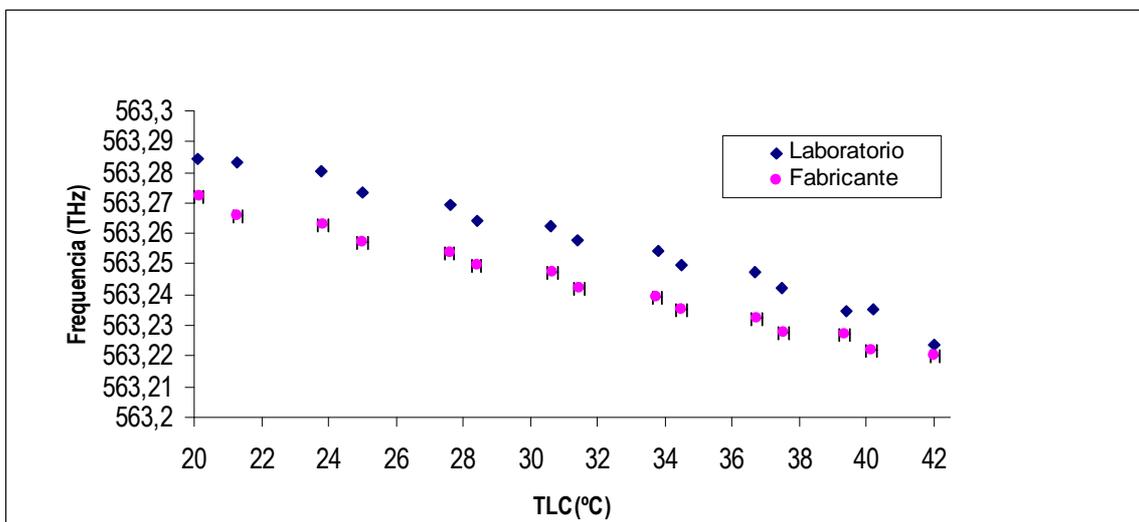


Gráfico 3.2. Comparação de alguns valores das frequências medidas entre o fabricante e o laboratório.

O Gráfico 3.1 mostra que o comportamento geral do nosso laser é compatível com as medidas realizadas pelo fabricante<sup>9</sup>. Porém, podemos notar pela Tabela 3.1 e pelo Gráfico 3.2 um desvio de aproximadamente 0,01 nm. Este desvio não é desprezível visto que pode corresponder à diferença entre duas transições ro-vibracionais (ver Cap.II). Inicialmente, pensou-se que esta diferença era devida à configuração do *wavemeter* (divisor de feixe, detector e interruptores) para o infravermelho próximo (NIR). Mudamos então estes itens para a

<sup>9</sup> O gráfico dado pelo fabricante é somente para fins comparativos e não é usado para calibrar o nosso laser.

configuração visível (VIS), trocando o divisor de feixe e o detector, e ajustando os interruptores do *wavemeter* para a região visível. O Gráfico 3.3 mostra os resultados para as regiões NIR e VIS. A diferença entre as medidas é  $< 10^{-3}$  nm, o que não justifica o desvio de 0,01 nm anteriormente medido. Este desvio pode nos causar um erro na identificação das transições ro-vibracionais (as recomendadas pelo CIPM). A solução para este problema poderá ser feita com a visualização e reconhecimento dos espectros hiperfinos das referidas transições (ver Cap. II) numa etapa posterior do experimento, aplicando uma rampa de alguns volts na PZT do laser e observando o espectro hiperfino num osciloscópio, conforme exemplificado na Figura 3.6.

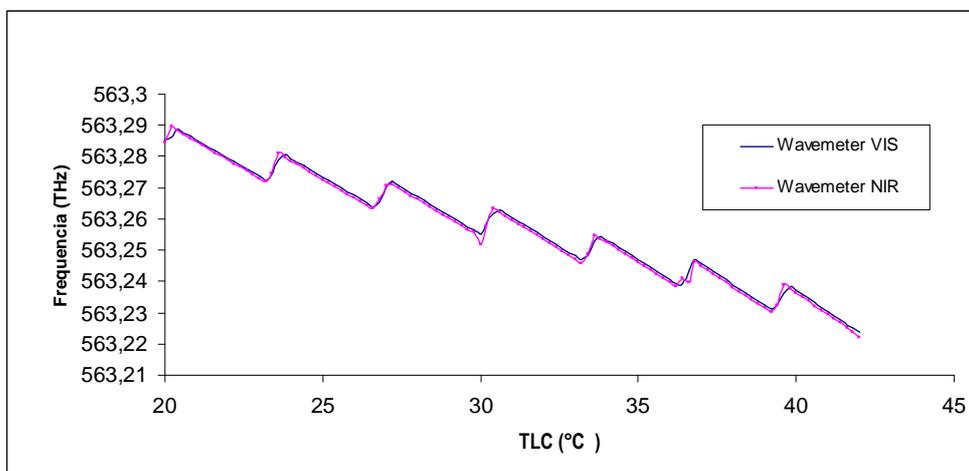


Gráfico 3.3. Comparação das medidas de frequência do laser nas configurações NIR e VIS do *wavemeter*.

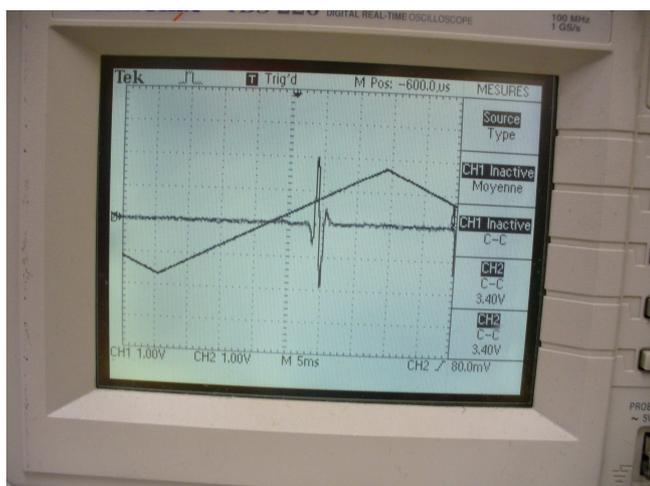


Figura 3.6. Visualização de uma transição hiperfina com rampa aplicada na PZT do laser. (Foto LNE/INM- França)

### 3.2.1.2.

#### Método via remoto, detecção do espectro das transições moleculares.

É possível também varrer a frequência do laser variando a temperatura do cristal laser via remoto. Neste caso, queremos detectar sinais de absorção correspondentes às transições moleculares, com a célula de iodo deixada à temperatura ambiente ( $\sim 22^\circ\text{C}$ ).

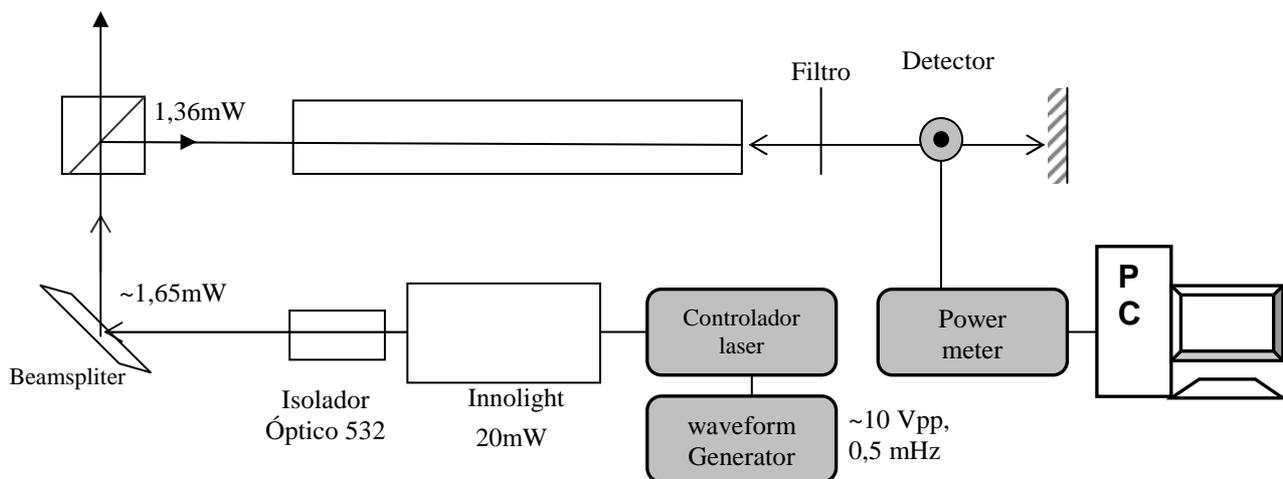


Figura 3.7. Esquema da montagem para varredura de frequência do laser e detecção do sinal de absorção

O sistema empregado para gerar e registrar os espectros laser é composto dos seguintes elementos (ver Figura 3.7):

- Um medidor de potência Newport Dual Channel, modelo 2832C.
- Um gerador de função Agilent, modelo 33120<sup>a</sup>.
- Um osciloscópio.
- Um filtro neutro Melles Griot, 03FNG015 de  $T = 10\%$  e  $D = 1,0$ .
- Um fotodetector Newport, modelo 818-SL.

A Figura 3.7 mostra a montagem do sistema para varredura da frequência laser via remota. Usando um gerador de função, aplicamos um sinal de tensão em forma de rampa através do conector BNC “Temperature Laser Crystal” do painel posterior da unidade de controle (ver Figura 3.2b). Desta forma, variamos a temperatura do cristal laser  $T_{LC}$  e conseqüentemente a frequência do laser.

Em um dos testes, por exemplo, a temperatura  $T_{LC}$  foi ajustada manualmente (painel frontal) a um valor central de  $28\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $T_c$ ), e foi aplicada uma rampa de  $10\text{ Vpp}$  (pic to pic) de amplitude e  $0,5\text{ MHz}$  de frequência (ver Figura 3.8). A sensibilidade do cristal é de  $1\text{ K/V}$ , o que corresponde a uma variação em frequência de  $-6\text{ GHz/V}$ , para  $532\text{ nm}$ . Podemos ver na Figura 3.8 um trecho da rampa ascendente cuja tensão no momento da captura da imagem corresponde a uma temperatura de  $32\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

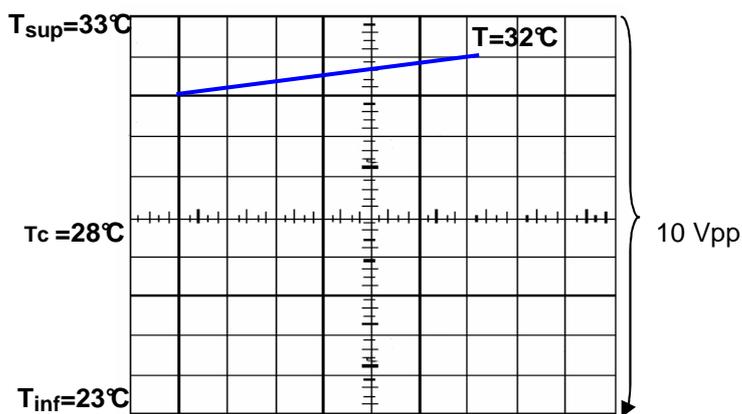


Figura 3.8. Parte da rampa do sinal no osciloscópio. Frequência da rampa:  $0,5\text{ MHz}$ . Faixa de temperatura varrida:  $23\text{ }^{\circ}\text{C}$  até  $33\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

O feixe laser atravessa a célula de iodo e é detectado pelo fotodetector junto com medidor de potência, interfaceado a um PC via programa de LabView (ver Figura 3.9). Quando a frequência do laser entra em ressonância com uma transição do iodo molecular, há uma diminuição do sinal detectado na forma de picos de absorção (ver Figura 3.10). Para uma faixa de varredura de  $10\text{ V}$ , por exemplo, entre  $23\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $33\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Fig.3.10b), o espectro do feixe laser apresenta repetições de picos similares. Isto corresponde provavelmente aos pulso de modos conforme aparecem no Gráfico 3.1. Fazendo uma comparação entre a Figura 3.10b e a Figura 3.15 podemos supor que os picos indicados com as setas na Fig. 3.10b sejam as linhas R(56)32-0 e P(53)32-0. Para uma identificação completa do espectro fino, teria que realizar várias varreduras e recompor o espectro eliminando as repetições. Outra forma de identificar sem ambigüidade a transição do iodo é aplicar uma tensão em forma de rampa na PZT do laser, e identificar a estrutura hiperfina da transição, comparando com espectros já conhecidos e tabelados do iodo molecular em torno de  $532\text{ nm}$  [22].

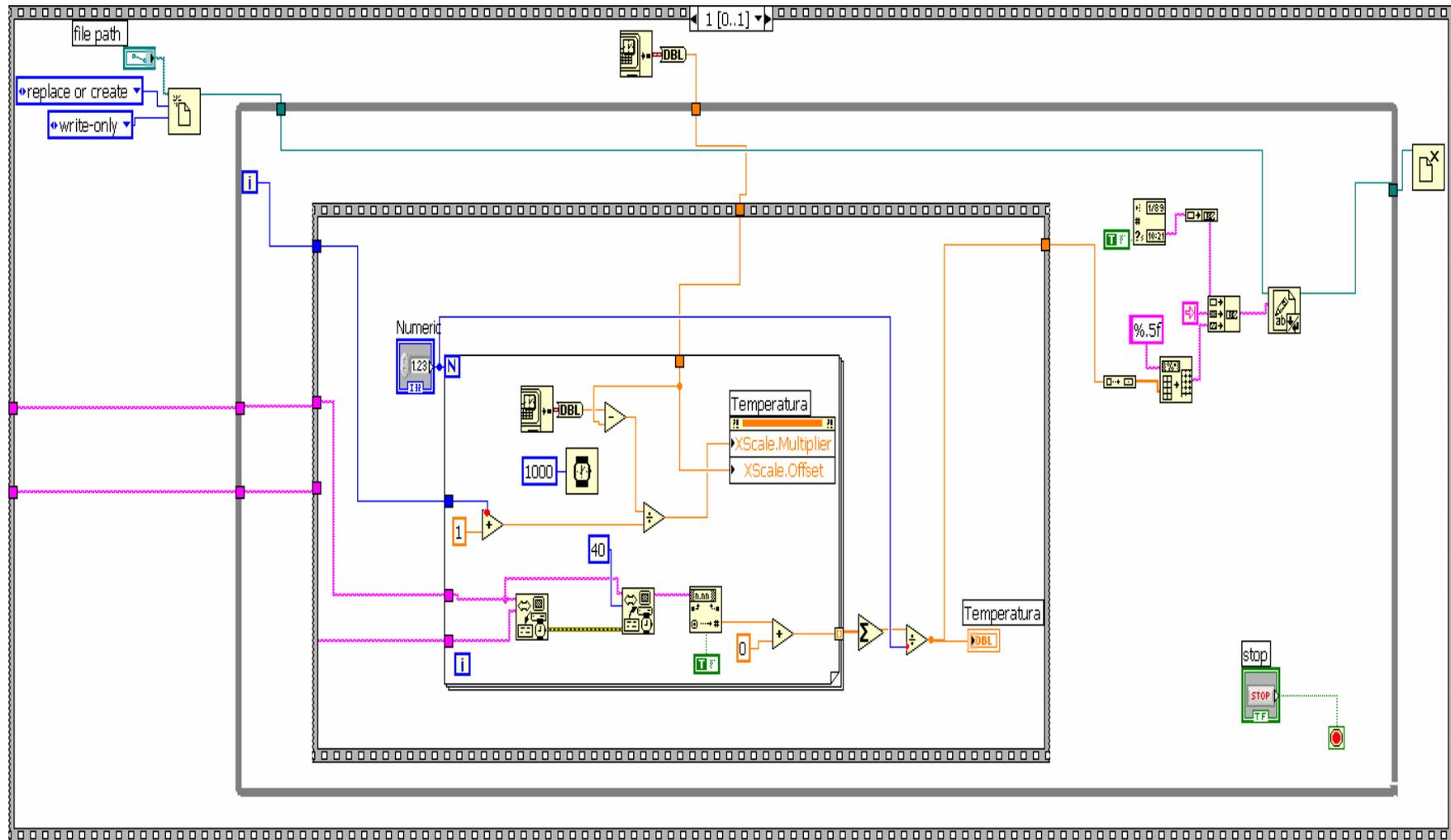


Figura 3.9. Programa em Labview para aquisição do sinal de potência detectado após interação com a célula de iodo. Tempo de integração: 1000 ms.

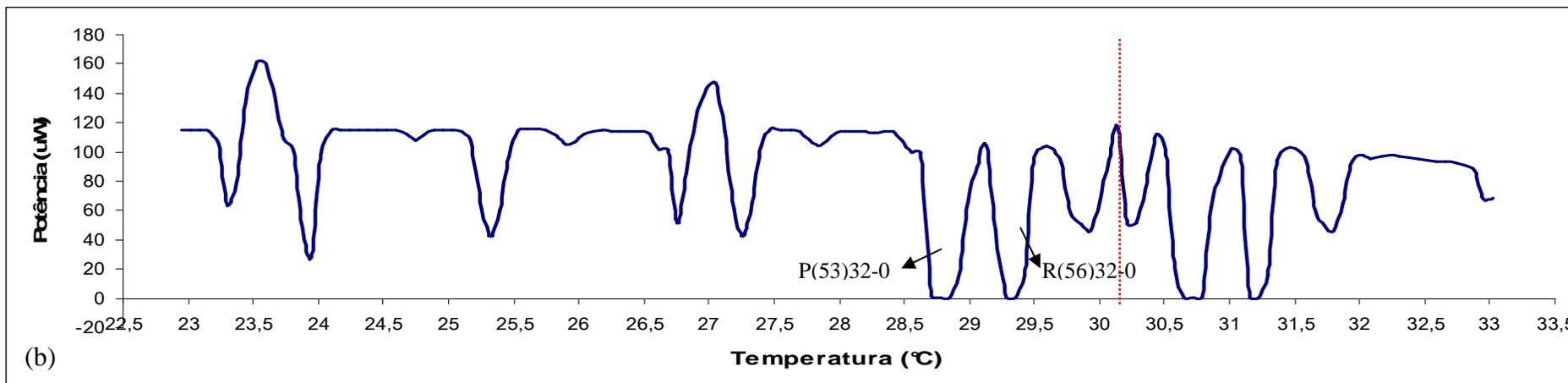
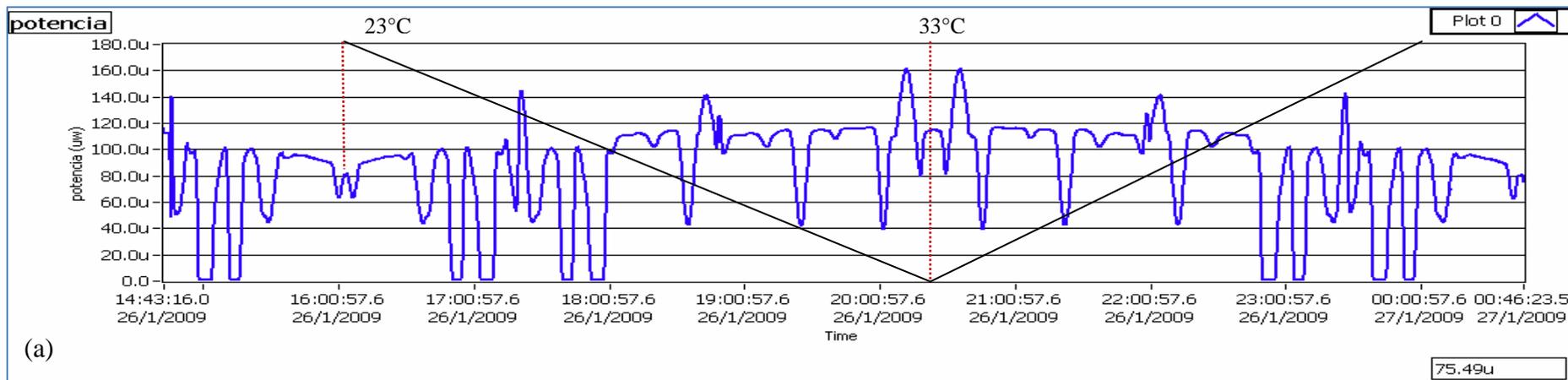


Figura 3.10. .Fig. (a) Potencia em função do tempo em dois ciclos de varredura Fig.(b) Potencia em função da Temperatura num ciclo de varredura (21°C a 33°C). As transições das duas figuras correspondem às fluorescências observadas a olho nu, dentro da célula de iodo, quando variamos a temperatura TLC. Podemos observar algumas repetições de picos que correspondem provavelmente a pulsos de modos dentro da cavidade laser, conforme aparecem no Gráfico 3.1.

### 3.3. Alinhamentos Ópticos (SAO)

Três alinhamentos principais são realizados na nossa montagem experimental: alinhamentos do isolador óptico para evitar o retorno de feixe dentro da cavidade laser, colimação do feixe laser dentro da célula de iodo e alinhamento do feixe de retorno.

#### 3.3.1. Alinhamento do isolador óptico, (AIO)

A Figura 3.11 apresenta a montagem óptica do isolador óptico utilizado para diminuir a perturbação do feixe de retorno dentro da cavidade laser, e assim otimizar a estabilização em frequência do laser. O isolador usado no nosso experimento é do fabricante Isowave, modelo I-56T-5L e foi confeccionado para o comprimento de onda em torno de 532 nm.

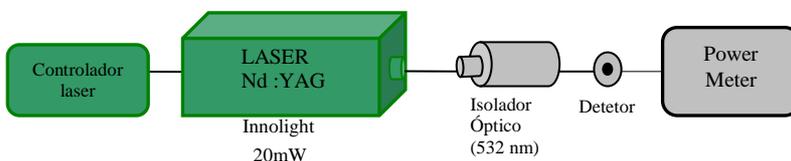


Figura 3.11. Montagem do Isolador óptico.

A Figura 3.12 mostra como um meio sujeito a um campo  $\vec{B}$  faz rodar o plano de polarização do feixe em  $45^\circ$ . Na entrada do isolador existe um polarizador  $P_1$ , com eixo de transmissão paralelo ao eixo  $y$  e na saída um polarizador  $P_2$ , com eixo de transmissão na direção do plano rodado,  $1/\sqrt{2}(\hat{i} + \hat{j})$ . O feixe proveniente do laser passa pelo polarizador  $P_1$ , roda  $45^\circ$  no sentido horário e passa por  $P_2$ . O feixe refletido pelos componentes ópticos (retornando ao laser) passa por  $P_2$ , roda  $45^\circ$  no sentido anti-horário (pois é influenciado por  $\vec{B}$  em sentido inverso) e é bloqueada pelo polarizador  $P_1$ , sendo assim impedida de retornar ao laser [40].

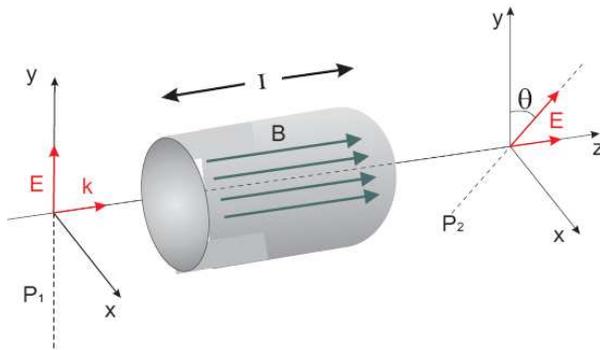


Figura 3.12. Esquema de um Isolador Óptico

Para ajustar e otimizar o funcionamento de nosso isolador óptico (Large Aperture Free Space Isolator, modelo I-56T-5L) segundo instruções do fabricante (Isowave), tivemos que inverter a direção do isolador (ver Figura 3.13a) de tal forma que o detector lesse a potência isolada do feixe.

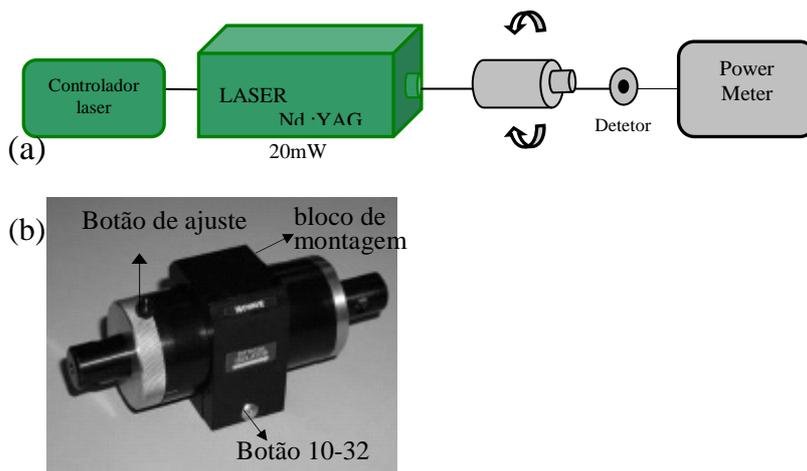


Figura 3.13. Alinhamento do isolador óptico, (a) Isolador Óptico invertido, (b) partes do Isolador óptico.

Após de afrouxar o botão 10-32 (ver Figura 3.13b), rodamos o isolador dentro de seu bloco de montagem (ver Figura 3.13a) e buscamos a máxima potência detectada do feixe no Power Meter. Isto nos indica o eixo onde se tem um pior isolamento. Para determinar o eixo onde o isolamento é máximo afrouxamos devagar o botão de ajuste, assim o valor observado no Power Meter será o mínimo. Quando o isolamento atinge o valor máximo, ajustamos o botão de ajuste e invertemos o isolador para sua posição inicial, rodando o isolador antes de ser ajustado o botão 10-32, até a saída de potência máxima (3,082 mW). A marca

do laser sobre a parte frontal do polarizador de entrada pode ser usada como uma guia de alinhamento para o plano de polarização.

### 3.3.2. Colimador Ótico de duas lentes (CO2)

Precisamos ter um feixe colimado de maior diâmetro (cintura) e de menor divergência para que o sinal do feixe seja intenso e detectável. Em geral se assume que a propagação de um feixe de laser tem um perfil Gaussiano ideal, o qual corresponde ao modo teórico  $TEM_{00}$  (*Transverse Electro Magnetic*, onde não existe nenhuma componente do campo elétrico e magnético na direção de propagação). Como na realidade a saída do laser não é verdadeiramente Gaussiana, ela apresenta uma variação que é medida por um fator de qualidade,  $M^2$  (M-Quadrado) [26], que descreve o desvio do feixe do laser do feixe Gaussiano teórico. Para um feixe Gaussiano teórico  $M^2 = 1$  e para um feixe de laser geralmente  $M^2 > 1$ . Especificamente para o feixe de diodo laser  $TEM_{00}$  colimado como o Nd:YAG o fator  $M^2 = 1,1$  o qual indica que a saída do feixe do laser é 1,1 vezes a divergência de um feixe Gaussiano ideal. Para diminuir a divergência, embora o feixe que sai do laser seja um feixe Gaussiano bastante colimado, e aumentar o diâmetro do feixe, ele pode ser focalizado por um par de lentes esféricas biconvexas. O objetivo desta experiência é aumentar o diâmetro do feixe que sai do laser ( $2w_0$ ) a  $2w$ , assim como de melhorar a colimação do feixe (Ver Figura 3.14).

A montagem (Figura 3.14) está baseada no tipo mais simples de um telescópio óptico que corresponde a um par de lentes biconvexas (Newport), L1 e L2, de raios diferentes e distâncias focais positivas de 38,1 mm e 100 mm respectivamente. Para lasers de cavidade esférica como o Nd:YAG, o diâmetro do feixe é localizada no ponto focal da lente L1 [25].

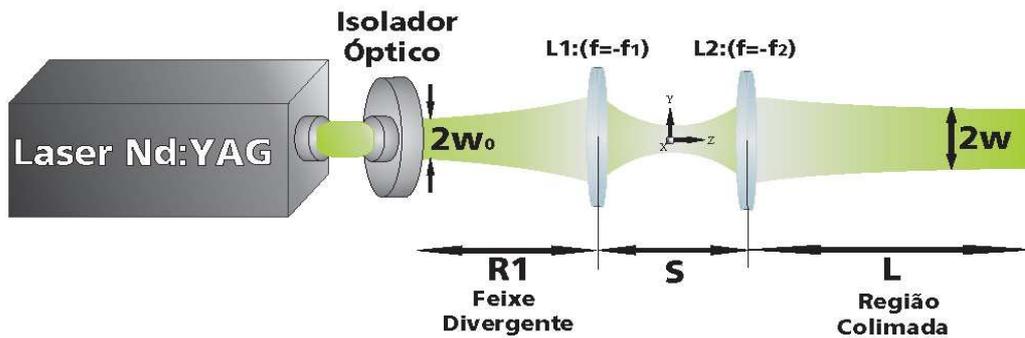


Figura 3.14. Montagem óptica para aumentar o diâmetro do feixe

Se a distância de separação entre as duas lentes é igual à soma de seus comprimentos focais ( $s=f_1+f_2$ ), o comprimento focal da combinação e o comprimento focal posterior (BFL) são infinitos. Este tipo de sistema é chamado “afocal”, já que ele não produz convergência ou divergência total do feixe [27]. Embora o sistema não altere a divergência do feixe colimado, ele alterará o diâmetro do feixe (magnificação). Segundo a geometria óptica, é possível demonstrar a distância de separação que se requer entre as duas lentes para uma colimação ideal. Usando a Eq.(5) do Apêndice C, e fazendo o gráfico da distância colimada vs a distância entre os espelhos “ $l$  vs  $s$ ” (Gráfico 3.4), podemos observar que, para uma máxima distância de colimação ideal ( $L$ ), a separação ótima das duas lentes ( $L_1$  e  $L_2$ ) é de 136 mm (aproximadamente igual a soma das distâncias focais das lentes). Como o feixe que entra na lente  $L_1$  diverge, a distância de separação entre as duas lentes poderia ser maior para que mais raios sejam transmitidos ao longo do eixo da lente  $L_2$  e assim obter uma melhor colimação do feixe. O raio do diâmetro do feixe do laser  $w(z)$  diverge no ar como uma função da distância de propagação  $z$ , e é medido desde a saída do isolador óptico.

Considerando,  $f_1=38,1$  mm,  $f_2=100$  mm,  $R_1=20$  mm e  $w_0=0,40$  mm, nas Eq.(5) e (6) foi possível determinar a distância apropriada “ $s$ ” para  $l$  e  $w$  máximas. No Gráfico 3.4, é possível apreciar a variação da posição do feixe colimado “ $l$ ” segundo a variação da distância “ $s$ ”. Numa faixa de separação de 1 mm até 250 mm para “ $s$ ”, segundo a Eq.(5) (Apêndice C) a distância “ $l$ ” de colimação toma valores diferentes de zero apreciáveis numa distância de aproximadamente 100mm até 150mm para “ $s$ ”. Dentro desta faixa é possível obter o máximo valor positivo de distância de colimação

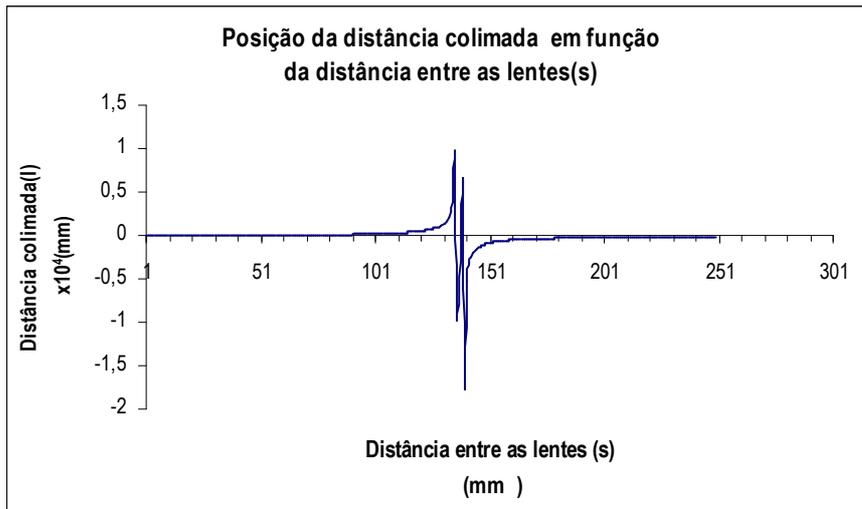


Gráfico 3.4. Análises da distância entre duas lentes para uma distância colimada

O Gráfico 3.5, mostra o raio do feixe  $w(z)$  em função da distância de separação “s” das lentes. No cálculo se usou  $w_0=0,4\text{mm}$ ;  $R_1=20\text{ mm}$ ,  $f_1=38,1\text{mm}$ ,  $f_2=100\text{mm}$ .

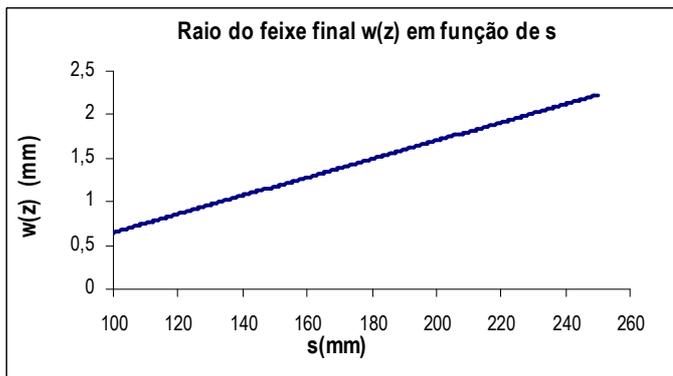


Gráfico 3.5. Raio do diâmetro do feixe  $w(z)$  de propagação no ar do laser Nd:YAG em função de z.

### 3.3.3. Alinhamento do feixe refletido na célula (AFR)

Para realizar a autocolimação do feixe laser dentro da célula, usamos a placa  $\lambda/4$  e a íris da montagem óptica (ver Figura 3.1). Giramos a placa para um máximo de intensidade observado na íris. Ajustamos então o feixe de retorno através do espelho situado atrás da placa  $\lambda/4$ , de tal forma que ele fique centralizado no orifício da íris, fechada ao seu máximo. Depois disso, voltamos a girar a placa  $\lambda/4$  de forma a minimizar a potência do feixe de retorno (spot

visualizado também na íris) e maximizar a potência do feixe transmitido pelo cubo divisor, para detecção.

### 3.4. Sistema de Resfriamento da Célula (SRC)

A molécula de iodo é um elemento muito útil no processo de estabilização de frequências laser, visto que possui um rico espectro no visível. Possui milhares de linhas entre 500 nm e 900 nm, o que permite encontrar, sem muita dificuldade, coincidências entre frequências laser e transições moleculares [42],[43]. Além disso, o iodo tem uma pressão de vapor utilizável perto da temperatura ambiente, de modo que é fácil detectar a sua absorção ou fluorescência quando excitado por um feixe laser.

O objetivo final do presente projeto é localizar a componente hiperfina  $a_{10}$  da linha R(56)32-0 (ver Figura 3.15) do iodo molecular para estabilização do laser (linha que corresponde à transição entre o nível ro-vibracional ( $v'=32, J'=57$ ) do estado eletrônico superior B e o nível ro-vibracional ( $v''=0, J''=56$ ) do estado eletrônico fundamental X – Ver Cap. II). Para que a identificação das transições hiperfinas seja feita sem ambigüidade, é necessário resfriar o meio onde se encontra o iodo molecular, e assim diminuir a agitação térmica das moléculas.

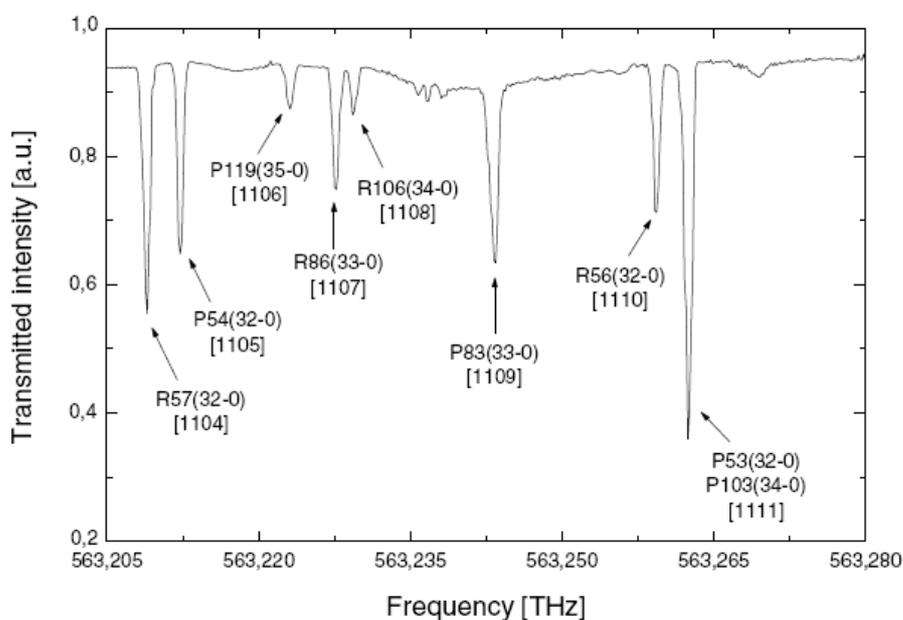


Figura 3.15. Linhas de absorção da molécula de iodo em torno de 532 nm[28].

### 3.4.1. Célula de Iodo

No nosso experimento, o meio que contém o iodo molecular é uma célula - ou tubo selado - de vidro, com janelas ópticas em ambas as extremidades. No processo de fabricação da célula, o iodo é colocado sob vácuo e as janelas são seladas ao tubo. Algumas células possuem janelas com ângulos de Brewster e outras são perpendiculares ao eixo do tubo.

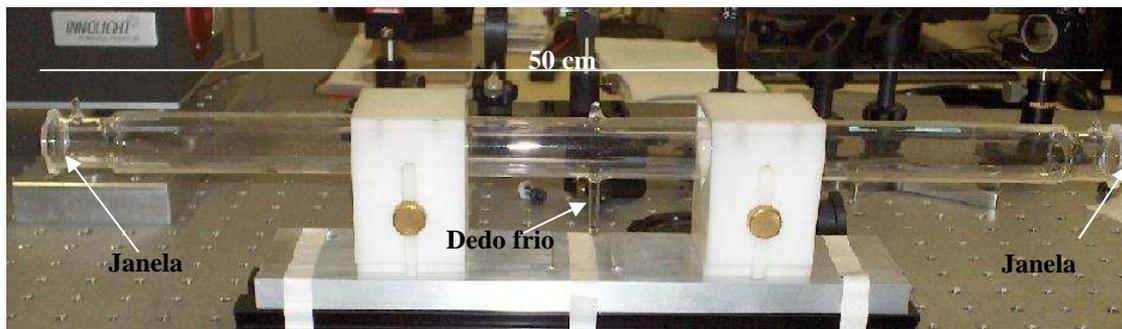


Figura 3.16. Célula de absorção de iodo com “dedo frio”.

A célula do nosso projeto foi encomendada do Instituto de Instrumentação Científica da República Tcheca – IC. Este tipo de célula foi desenhado especialmente para operar fora das cavidades laser Nd:YAG para fins de estabilização. A nossa célula é feita de vidro de sílica fundida, de 50 cm de comprimento. As janelas são planas<sup>10</sup> e são revestidas com material anti-reflexo, na forma de multicamadas de  $\text{TiO}_2$  e  $\text{SiO}_2$ , que evitam qualquer contaminação da célula. O grau de pureza do iodo da célula pode influenciar significativamente o valor medido da frequência do laser estabilizado. Por isso, testes são feitos em fábrica para garantir uma relação sinal-ruído aceitável, usando técnicas de monitoramento de impurezas [29]. Uma vez que a célula é selada na fábrica, não é mais possível mexer na sua estrutura.

Outros fatores que podem afetar as medidas de frequência laser são a temperatura e a pressão de iodo dentro da célula. De fato, estes parâmetros podem influenciar tanto a sensibilidade do sinal (profundidade de absorção) bem como a

<sup>10</sup>Na realidade, as janelas são ligeiramente inclinadas para evitar novas reflexões internas (efeito Etalon).

largura das linhas espectrais individuais. Por isso, é necessário manter um controle de temperatura da célula através do seu dedo frio (Figura 3.16).

Comparações de sistemas de estabilização de frequência demonstram que quanto maior é o comprimento da célula, menor será a pressão no seu interior e, conseqüentemente, melhores são os níveis de sinal-ruído [35],[41]. Por exemplo, resultados de estabilidade de frequência relativa de um determinado sistema laser em 1s são de  $2 \times 10^{-13}$  com uma célula de 20 cm, e de  $6 \times 10^{-14}$  com uma célula de 40 cm [35]. Isto mostra que o comprimento da célula pode limitar ou melhorar a estabilidade de um sistema de estabilização em frequência. Para o nosso experimento, o comprimento indicado é em torno de 50 cm, suficientemente grande para uma boa relação sinal-ruído, e ao mesmo tempo adequado para um sistema compacto transportável.

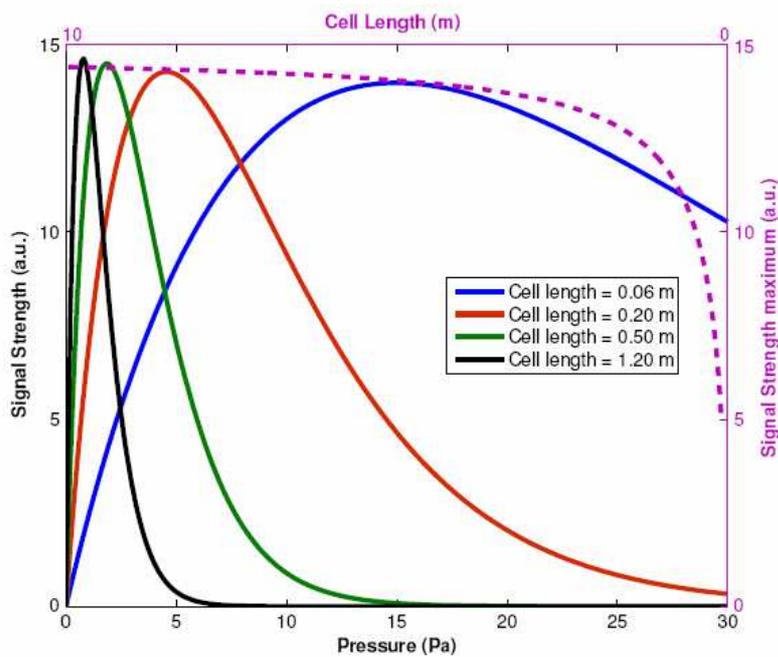


Figura 3.17. Pressão de células de absorção de diferentes comprimentos vs força de sinal. A linha tracejada é o a máximo sinal calculado [41].

Conforme a Figura 3.17 mostra que as células de maior comprimento (1,20 m e 50 cm) possuem pressões menores e apresentam maior intensidade de sinal (linha tracejada). Isto se dá porque o efeito de alargamento por pressão é reduzido em pressões mais baixas e a largura das linhas é mais estreita.

Na prática, as baixas pressões se conseguem em baixas temperaturas (abaixo de zero). Sistemas de estabilização de frequência com célula de iodo comparados

em Comparações Internacionais [6], [31] , [35] demonstram que a dependência da frequência com relação à pressão (-6,0 kHz/Pa) em temperaturas de -10 °C a -15°C, é maior do que a dependência sobre outros fatores tais como a potência (-0,2 kHz/mW). Isto indica que um bom controle da temperatura e conseqüentemente da pressão é necessário no resfriamento da célula de iodo para garantir uma maior estabilidade do laser.

### 3.4.2. Sistema de Resfriamento

A Figura 3.18 mostra o esquema do sistema de resfriamento que escolhemos para diminuir e regular a temperatura dentro da célula. Este ajuste permite uma diminuição da pressão e, conseqüentemente, da agitação térmica das moléculas. A temperatura de resfriamento testada no nosso experimento é de -13 °C<sup>11</sup>.

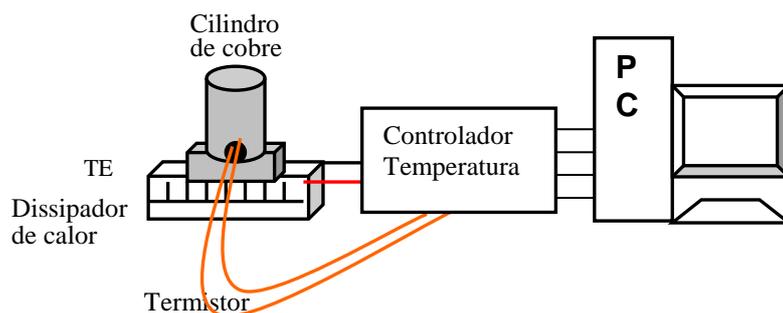


Figura 3.18. Esquema do Sistema de Resfriamento.

#### 3.4.2.1. Componentes estruturais do sistema de resfriamento

O sistema é composto dos seguintes elementos:

- ❖ Um dispositivo termoeletrico Peltier (TE) de dois estágios para resfriar o sistema.
- ❖ Um termistor para medir a temperatura resfriada.

<sup>11</sup> A temperatura de resfriamento recomendada pelo CIPM para sistemas lasers em 532 nm é de -15±1°C. Mas outras temperaturas próximas mostraram-se também adequadas para estabilização dos lasers Nd:YAG.

- ❖ Um controlador de temperatura (ILX Lightwave) que controla a temperatura mediante um circuito eletrônico de retro alimentação.
- ❖ Um cilindro de cobre colocado no lado frio do TE e construído com dimensões adequadas para conter o dedo frio da célula.
- ❖ Um dissipador de calor (barra de cobre) sobre o qual é colocado o Peltier (contato lado quente).
- ❖ Pasta térmica para melhorar as transferências de temperatura entre as junções dos elementos do sistema<sup>12</sup>.
- ❖ Isopor para isolar o micro-ambiente resfriado da temperatura do meio ambiente.
- ❖ Um computador conectado ao controlador de temperatura por GPIB para registrar a temperatura medida via programa Lab View.

### Resfriador Peltier

Um módulo termoeletrico (TE) o Peltier (Figura 3.19a) é um componente eletrônico baseado em um semicondutor que funciona como uma pequena bomba de calor quando é submetido a uma corrente elétrica. O fluxo de calor será movido através do módulo de um lado para o outro, ou seja, um lado do módulo será resfriado enquanto o outro é aquecido simultaneamente. Este fenômeno é reversível mudando a polaridade da fonte. Em consequência, um Peltier pode ser usado para esquentar ou resfriar com uma grande precisão na temperatura desejada.

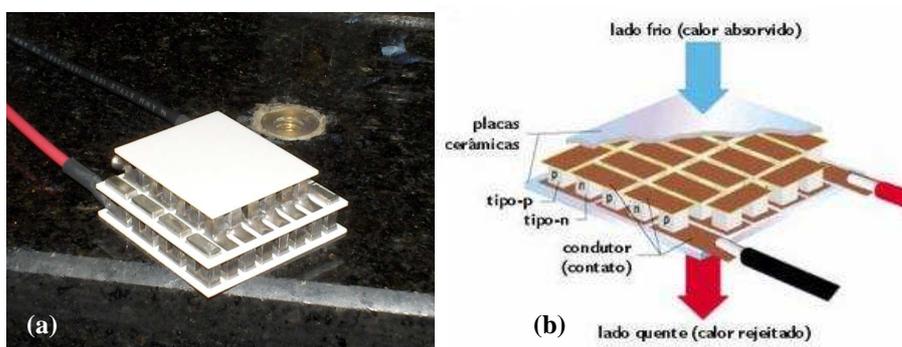


Figura 3.19. (a). Módulo Peltier de dois estágios, (b). Funcionamento do módulo Peltier:

<sup>12</sup> Variações bruscas de temperatura nos lados do TE, podem causar danos na suas superfícies, criando bolhas. Estas podem prejudicar o contacto entre as junções do dissipador e do cilindro de cobre. Isto provocaria um sistema instável e poderia dificultar o processo de auto-ajuste e de resfriamento.

**Escolha do módulo Peltier:** Existem vários tipos de módulos termoelétricos (TE) para resfriamento de sistemas. Para selecionar o módulo apropriado, é necessário definir os seguintes parâmetros:

TC – Temperatura da superfície fria.

Th – Temperatura da superfície quente.

QC – Quantidade de calor absorvido ou removido pela superfície fria do módulo termoelétrico e transferido ao meio ambiente.

$$\Delta T = T_h - T_C$$

Conforme mostram os cálculos no Apêndice D, os valores dos parâmetros do nosso sistema são:

$$T_h=35^\circ\text{C}, T_c=-13^\circ\text{C}, Q_c=8,23\text{ W e } \Delta T=48^\circ\text{C}$$

Além disso, um critério adicional que frequentemente é usado para selecionar o melhor módulo é o coeficiente de desempenho - COP (*Coefficient of Performance*), ver Equação 3.1. Um coef. COP máximo representa uma potência mínima consumida e, portanto, um mínimo de calor transferido ao meio ambiente. Por outro lado, um módulo TE com COP máximo significa maior custo. A Figura 3.20 mostra a relação entre o coeficiente COP máximo e a temperatura de resfriamento  $T_C$ , para módulos com número de estágios diferentes. Esta análise pode ajudar a identificar o tipo de módulo Peltier necessário. Na faixa de  $-5^\circ\text{C}$  à  $-30^\circ\text{C}$  por exemplo, o Peltier de dois estágios possui um COP maior do que um Peltier de um só estágio, para a mesma faixa de temperatura. Para a temperatura de interesse do nosso sistema ( $T_c = -13^\circ\text{C}$ ), um módulo de um estágio trabalharia com desempenho quase mínimo. Por outro lado, um Peltier de três estágios não seria conveniente já que a temperatura mínima de trabalho deste módulo é aproximadamente  $-15^\circ\text{C}$ , conforme mostra a Figura 3.20. Escolhemos então trabalhar com um módulo Peltier de dois estágios. Neste caso, para  $T_c=-13^\circ\text{C}$ , o valor do coeficiente COP é aproximadamente 0,30.

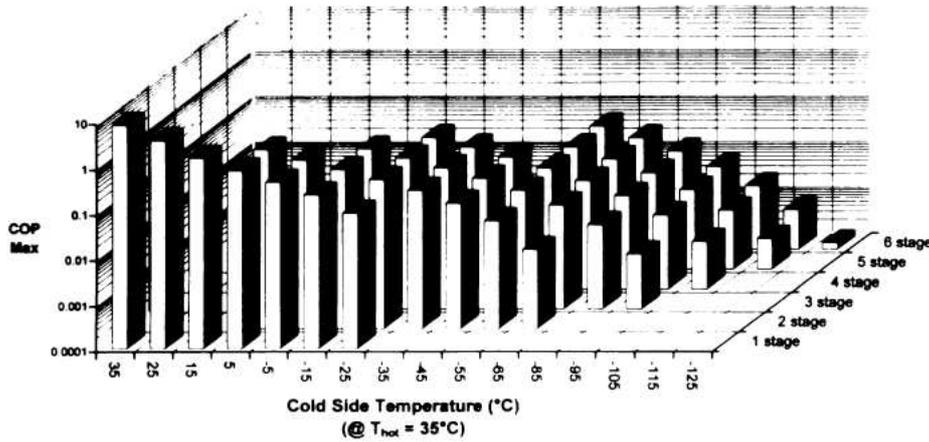


Figura 3.20. ΔT vs o COP max. em função do número de estágios num Peltier.

Conhecendo o COP podemos calcular a potência elétrica de entrada que precisa para alimentar usando a seguinte equação:

$$COP = \frac{Q_c}{P_{int.}(VI)} \tag{3.1}$$

Aplicando na equação (3.1) os valores de COP e  $Q_c$  calculados anteriormente, a potência de entrada necessária  $P_{int}$  é aproximadamente de 27 W.

Em suma, o módulo Peltier adequado para nosso sistema é um Peltier de dois estágios, cuja faixa de temperatura de resfriamento contenha a temperatura  $T_c$  em torno  $-13^\circ\text{C}$  ( $\Delta T = 48^\circ\text{C}$ ). Tal módulo teria um fator COP de  $\sim 0,3$  para a temperatura de interesse, uma potência de alimentação  $P_{int}$  de  $\sim 27$  W e um  $Q_c$  (calor transferido) de  $\sim 8,23$  W. O módulo Peltier que escolhemos é do fabricante Melcor, modelo 2 CP 055 065-71-31 L (Figura 3.19a). Conforme podemos observar na tabela abaixo, ele possui características compatíveis com as mencionadas acima.

*Características do módulo Peltier 2 CP 055 065-71-31 L*

Cooling Requirements	Values
Ambient Temperature ( $T_a$ ) ( $^\circ\text{C}$ )	25
Hot Side Thermal Resistance ( $^\circ\text{C}/\text{W}$ )	0,0
Control Thermal Resistance ( $^\circ\text{C}/\text{W}$ )	0,0
Control Temperature ( $T_{ctl}$ ) ( $^\circ\text{C}$ )	25
Voltage (Volts)	7,72
Current (Amps)	4,30

Parâmetros Termoelétricos	Values
Fator Geométrico (cm)	0,118
Numero de pares	102
(Tc) TEC Cold Tem (°C)	25,00
(Th) TEC Hot Tem (°C)	25,00
(Qc) Heat Pumped at Cold Surface (W)	12,06
COP	0,36
Optimum COP	9,32
(Pin) Power Supply (W)	33,17
(Qh) Total Hot Side Heat Dissipated (W)	45,23
DT Max (°C) @ Qc=0	87,25
Qmax (W) DT=0	12,06

### Dissipador de calor

Como vimos anteriormente, o calor é transferido do lado frio ao lado quente no módulo Peltier. Para evitar o efeito Joule (aquecimento dos condutores), é necessário um dissipador de calor para expulsar ao meio ambiente o calor bombeado pelo módulo Peltier. Um dissipador perfeito absorveria uma limitada quantidade de calor sem incrementar a temperatura dele. Como na prática isto não é possível, espera-se que o dissipador tenha um bom fluxo de calor e que a temperatura dele não ultrapasse 15 °C acima da temperatura ambiente. Uma forma de avaliar o rendimento do dissipador é através de sua resistência térmica:

$$Q_s = \frac{T_s - T_a}{Q} \quad (3.2)$$

Onde:

$Q_s$  é a resistência térmica em °C / W

$T_s$  é a temperatura do dissipador em °C

$T_a$  é a temperatura ambiente do refrigerante em °C

$Q$  é o calor ingressado ao dissipador em W

Quanto menor é o valor de  $Q_s$ , maior é o rendimento do dissipador. No caso ideal,  $Q_s$  é igual a zero. O dissipador usado em nosso sistema, com dimensões específicas (Figura 3.21a), é uma barra de cobre capaz de liberar o calor, como por convecção natural (Figura 3.21b), ao meio ambiente. A temperatura do

dissipador ( $T_s$ ) no resfriamento chega até  $32^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ . Para aplicações de baixa potência como no nosso caso, os valores de  $Q_s$  devem estar entre  $0,5^{\circ}\text{C} / \text{W}$  e  $10^{\circ}\text{C} / \text{W}$  [58]. O rendimento de nosso dissipador foi achado em  $1,75^{\circ}\text{C}/\text{W}$  ( $Q_s=(33-22)/6,3$ ), o que indica que ele é apropriado para nossa aplicação.

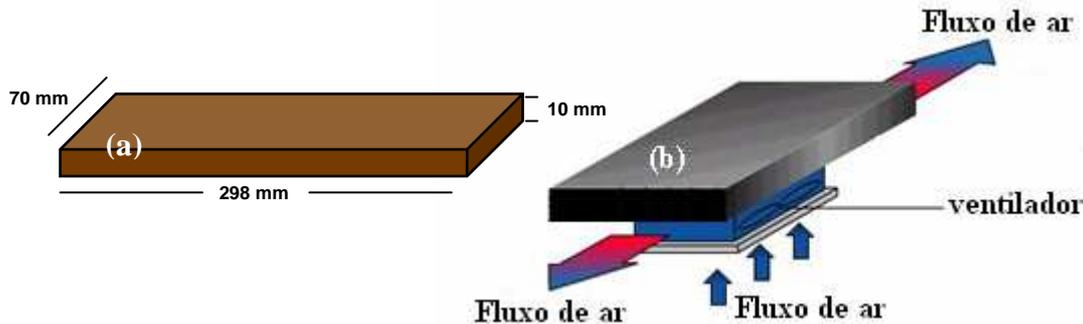


Figura 3.21. (a) Dimensões do dissipador de cobre, (b) Mecanismo de fluxo de calor num dissipador de calor por convecção natural.

### Controlador de Temperatura

O controlador de temperatura utilizado para monitorar nosso sistema de resfriamento é um *ILX Lightwave "Precision Temperature Controller"* modelo *LDT 5948*. O dispositivo detecta a temperatura por meio de um termistor *ILX Lightwave (N/S DL983487)* colocado dentro do cilindro de cobre. O controlador determina automaticamente as constantes P, I, D (*Proportional, Integral e Derivative*) que mais se ajustam ao micro-ambiente (*auto-tune*). Segundo o manual do equipamento, os valores P, I, D podem ter valores de 0 a 9999,99, sendo que, para uma otimização do auto-ajuste, os valores P e I não podem ser menores que 0,5 e 0,1 respectivamente.

O controlador é programado inicialmente com valores "default" dos coeficientes de temperatura do sensor. Estes podem ser verificados no seu certificado de calibração que acompanha o manual do usuário. Os valores são:  $C_1=1,1084 \times 10^{-3}$ ,  $C_2=2,37 \times 10^{-4}$ ,  $C_3=0,7622 \times 10^{-7}$ . As conexões com o módulo Peltier (TE) são feitas através de um cabo com conector de pinos (D9), conforme mostra a Figura 3.22.

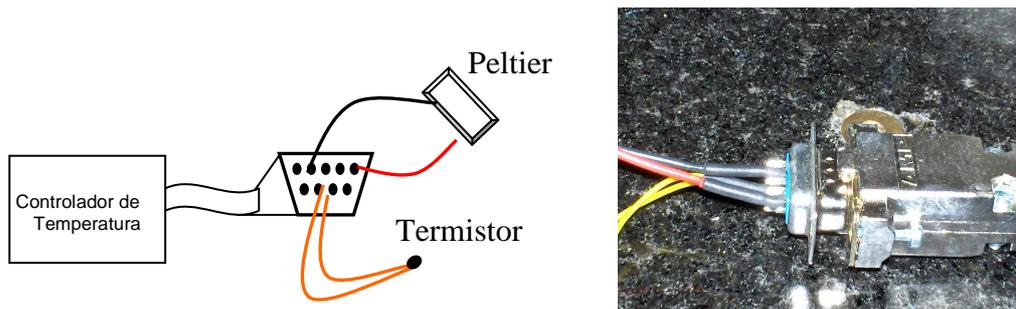


Figura 3.22. Conexões do TE e do Termistor no conector do controlador de temperatura.

### Isolante Térmico

Para maximizar a eficiência térmica, o elemento a ser resfriado (cilindro de cobre) deve ser devidamente isolado (ver Figura 3.23a). O isolador usado em nosso sistema é um isopor<sup>13</sup> (poliuretano) com espessura de 10 mm e de dimensões dadas no Apêndice D, o isopor cobre completamente o cilindro de cobre que albergará o dedo frio da célula de iodo ver Figura 3.23b.

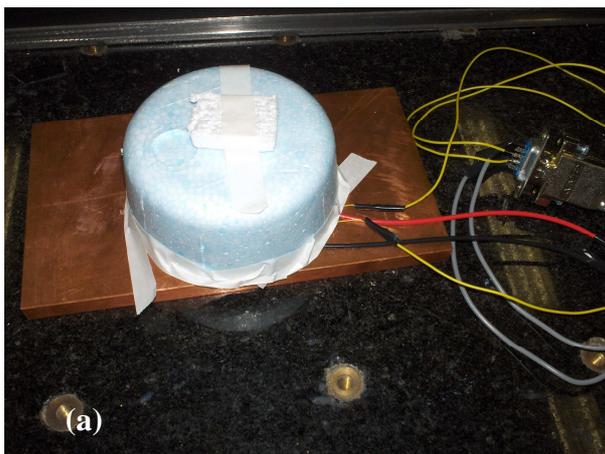


Figura 3.23. (a) Isolamento do cilindro de cobre, (b) Célula resfriada (foto LNE-INM-França).

<sup>13</sup> A qualidade do auto-ajuste dependerá do bom isolamento térmico do sistema a resfriar. É possível usar outro tipo de material como, por exemplo, o teflon para isolar o conjunto cilindro de cobre - TE - Termistor.

Segundo a referência [44], a perda de energia através de um poliuretano comum (isopor) depende de sua espessura (ver Figura 3.24). Para o isolador térmico de nosso sistema (1cm de espessura) a energia perdida é de aproximadamente  $3 \text{ W/m}^2$ .

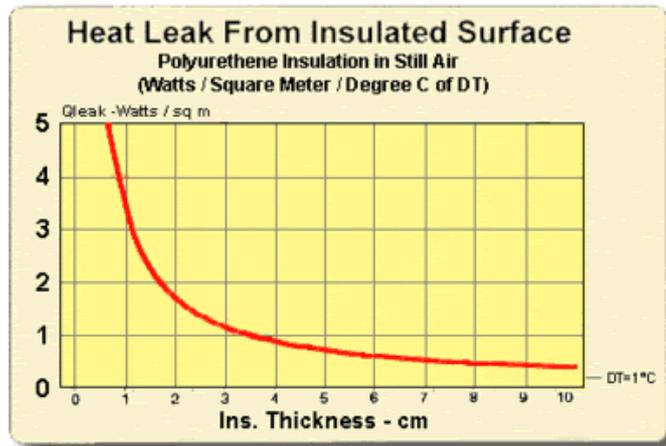


Figura 3.24. Energia perdida vs espessura do isolador [44]

### Aquisição de dados

Mediante a linguagem de programação gráfica LabView e via conexão GPIB, é possível tomar automaticamente os valores de temperatura medidos pelo controlador. O programa registra a Temperatura vs Tempo (ver Figura 3.25).



### 3.4.2.2. Montagem do sistema de resfriamento

A Figura 3.26 apresenta a montagem do sistema de resfriamento. O micro ambiente é resfriado pelo módulo Peltier e a temperatura é monitorada pelo controlador de temperatura de precisão (*ILX Lightwave*), via retro-alimentação. O cilindro de cobre, no qual se colocaria posteriormente o dedo frio da célula, é colocado sobre o lado ‘frio’ do elemento TE, sendo o seu lado ‘quente’ posto em contato com uma barra de cobre para dissipação do calor. O termistor, em contato com o cilindro, mede a temperatura do mesmo e a envia ao controlador. Os dados lidos por este são registrados mediante comunicação GPIB com o computador, através de um programa em LabView.

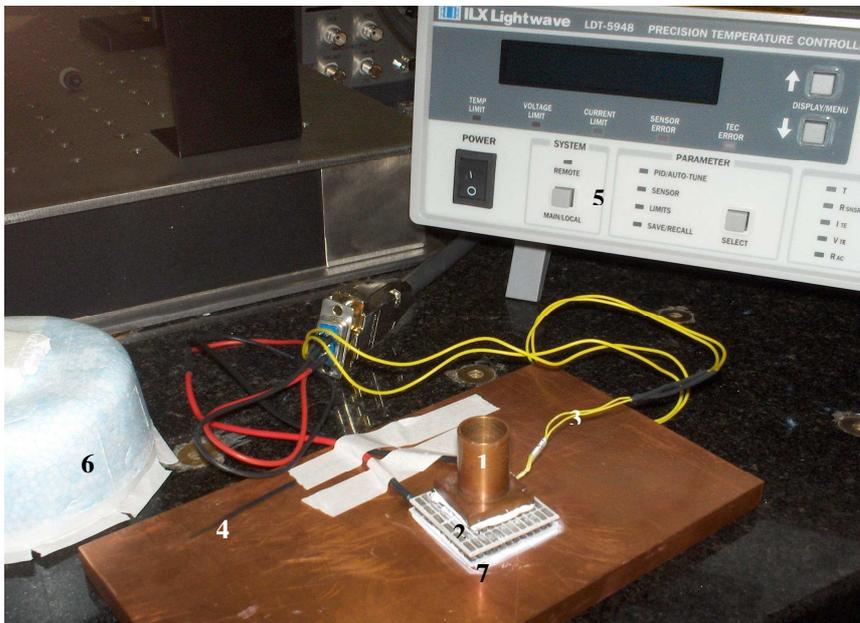


Figura 3.26. Sistema de resfriamento: 1. Cilindro de cobre; 2. TE; 3. Termistor; 4. Dissipador de cobre; 5. Controlador de temperatura de precisão; 6. Caixa de isopor para isolamento térmico; 7. Pasta térmica.

### 3.4.2.3. Processo de Resfriamento

O processo de resfriamento começa com um auto-ajuste pelo controlador (*auto-tune*) de constantes que mais descrevem as condições do micro-ambiente a ser resfriado. Para isso mantemos o conjunto: cilindro de cobre - TE – termistor

dentro de uma pequena cavidade de isopor (Figura 3.23a) para isolá-lo de flutuações ambientais. O controlador de temperatura determina automaticamente as constantes *Proportional*, *Integral e Derivative* (*P, I, D*) que mais se ajustam a este micro-ambiente. O tempo de resfriamento depende dos valores dos coeficientes PID achados no auto-ajuste. É somente depois de alcançar a estabilidade máxima que o controlador de temperatura completa o processo de auto-ajuste, mostrando na tela *Success* e assinalando valores aos coeficientes P, I, D.

Antes de iniciar o processo de resfriamento para auto-ajuste, foi programada uma temperatura  $T_{SET}$  no controlador, como valor de resfriamento a ser alcançado. O controlador toma o valor de temperatura medida pelo termistor, e o compara com o valor de  $T_{SET}$  e, depois, ajusta automaticamente o valor da corrente a ser injetada no Peltier (TE). A resolução do ajuste é de  $0,001^{\circ}\text{C}$ . Depois de encontrar os valores de P, I, D adequados, o controlador para o processo de auto-ajuste e retorna ao valor da temperatura ambiente. No exemplo da Figura 3.27, o auto-ajuste, que começa com um decréscimo a partir da temperatura ambiente até alcançar a temperatura  $T_{SET} = -13^{\circ}\text{C}$ , dura aproximadamente 15 minutos. Os coeficientes de P, I, D ajustados neste caso foram  $P=10,42$ ;  $I=1,346$  e  $D=7,79$ . A estabilidade do processo de auto-ajuste é de aproximadamente  $\pm 0,003^{\circ}\text{C}$ .

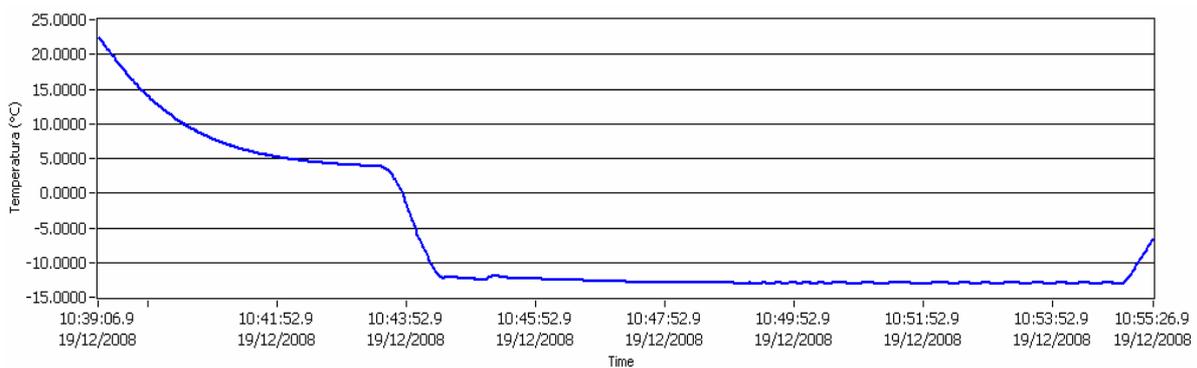


Figura 3.27. Auto - ajuste (PID) em  $-13^{\circ}\text{C}$

Depois do auto - ajuste, o controlador se encontra pronto para resfriar o sistema. Mantendo os valores satisfatórios de PID na programação do controlador, o resfriamento é acionado. No exemplo da Figura 3.28a, a temperatura ambiente começa a descer rapidamente até atingir o valor desejado ( $-13^{\circ}\text{C}$ ), com uma estabilidade de  $\pm 0,015^{\circ}\text{C}$ , num tempo de aproximadamente 6 minutos. Após um

tempo de 3 minutos, o controlador de temperatura consegue estabilizar ainda mais o sistema, chegando a uma estabilidade excelente de  $\pm 0,001^{\circ}\text{C}$  (Figura 3.28b). Num teste a longo prazo (Figura 3.28c), por um período de  $\sim 3$  horas, o sistema de resfriamento se mantém estável, em uma variação média melhor que  $\pm 1\text{mK}$  ( $0,001^{\circ}\text{C}$ ). Pequenos pulso quase cíclicos de  $\pm 3\text{mK}$  ( $0,003^{\circ}\text{C}$ ) aparecem no gráfico. Neste caso, o tempo de integração ingressado no programa LabView era muito pequeno ( $0,5\text{ ms}$ ). Para uma análise a longo prazo, este tempo deve ser aumentado para que os pequenos pulso sejam integrados e, assim, obter se uma avaliação mais adequada de estabilidade da temperatura.

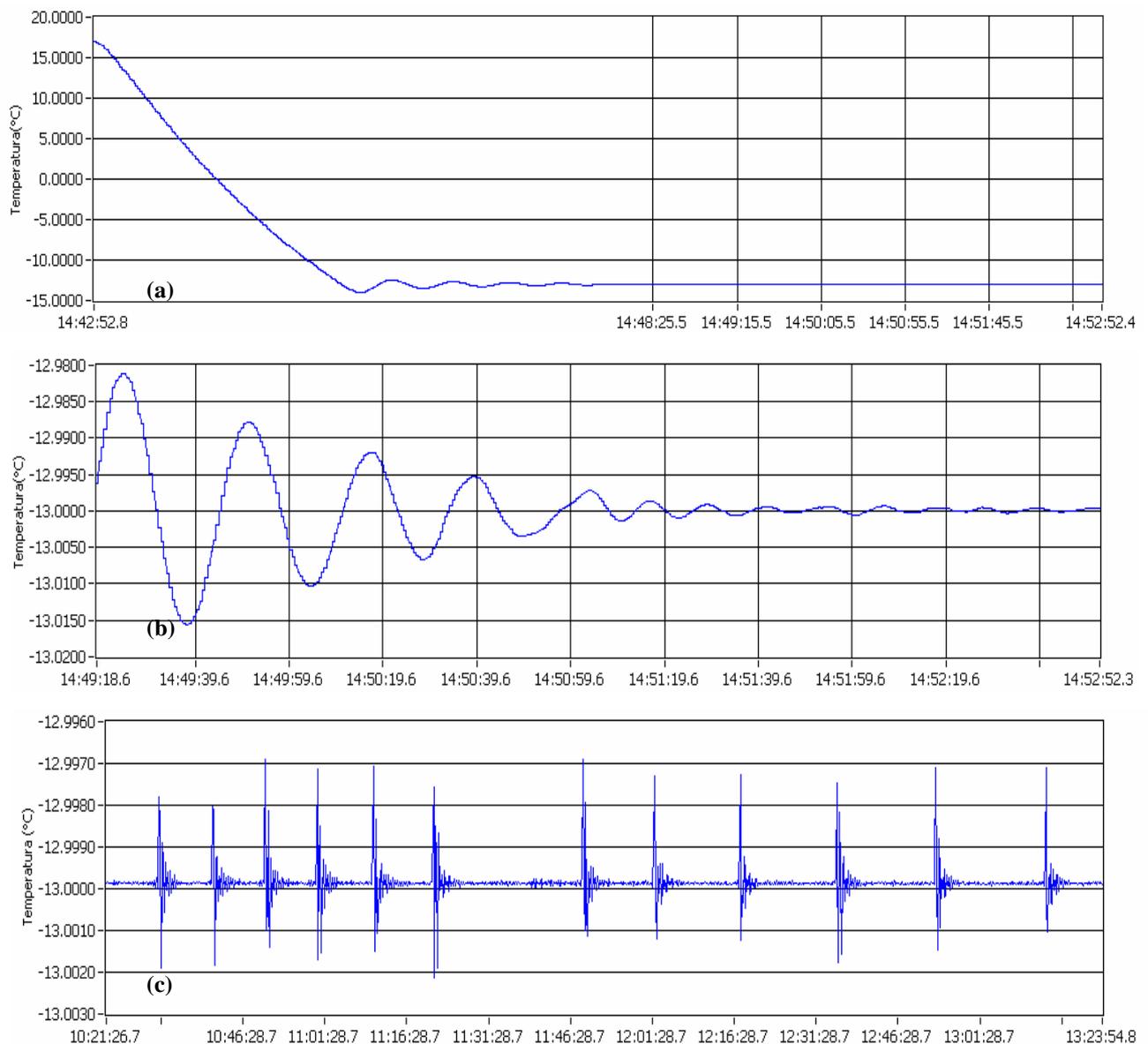


Figura 3.28. (a) Início do processo de resfriamento, (b) Estabilização da temperatura no processo de resfriamento, (c) Estabilização da temperatura a longo prazo

### 3.5. Sistema de Detecção (SD)

A Figura 3.1 mostra em primeira aproximação do que será mais adiante a montagem do Sistema eletrônico de Detecção (SD). O SD detecta a variação da diferença dos sinais A e B, que se produzem com o processo de absorção de radiação laser pelas células de iodo as quais se manifestam como linhas espectrais.

Os sinais A e B são detectados por um amplificador diferencial para formar o sinal de erro (A-B), usado para corrigir as variações de frequência do laser. O balanceamento dos sinais é feito através de um polarizador que ajusta a intensidade do sinal A. O sinal diferencial obtido é usado como sinal de entrada do amplificador *Lock in*. Ele é então demodulado de forma síncrona pela técnica dita “3f” (terceira harmônica-capítulo II), “f” sendo a frequência de modulação ajustada no *Lock in*. O sinal na saída do somador é aplicado à cavidade laser via uma cerâmica piezolétrica (PZT). Desta forma, a frequência do laser pode ser ajustada e travada a qualquer transição desejada do iodo na faixa de 532 nm [35].