

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE FÍSICA DE SÃO CARLOS

Caio César Rocha Lima

Estabilização da temperatura de um cristal não-linear de uma cavidade de
dobramento óptico

São Carlos
2025

Caio César Rocha Lima

Estabilização da temperatura de um cristal não-linear de uma cavidade de
dobramento óptico

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao
Programa de Graduação em Física do Instituto de
Física de São Paulo, para obtenção do título de
Bacharel em Física.

Orientador: Prof. Dr. Emanuel Alves de Lima
Henn - Instituto de Física de São Carlos.

São Carlos
2025

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

RESUMO

Este trabalho descreve o desenvolvimento de um sistema de controle térmico de alta precisão para estabilização de um cristal não linear de PPKTP, utilizado na geração de segundo harmônico (SHG) de luz laser. A luz gerada será empregada em experimentos com átomos de disprósio, que requerem comprimentos de onda específicos para resfriamento e aprisionamento. O projeto incluiu a modelagem e fabricação, por impressão 3D, de um forno customizado, a substituição do aquecimento resistivo por um módulo Peltier e o uso de um termistor NTC para medição de temperatura. A estabilidade foi garantida por um algoritmo PID em microcontrolador *Arduino Nano*, mantendo variações inferiores a $\pm 0,1^\circ\text{C}$. Como extensão, realizou-se a modelagem óptica da cavidade para guiar a usinagem da base metálica de montagem.

Palavras-chave: Laser. Desenho Técnico. Óptica Não-linear. Impressão 3D. Geração de Segundo-Harmônico. PID

1 INTRODUÇÃO

O uso de luz coerente em comprimentos de onda específicos é um elemento central em experimentos de aprisionamento e resfriamento de átomos, como os que utilizam Disprósio. A precisão da frequência e a intensidade da luz são requisitos críticos para acessar transições cíclicas nos átomos e possibilitar tanto o resfriamento quanto o aprisionamento eficientes. No entanto, os comprimentos de onda exigidos, como 421 nm e 626 nm, não estão disponíveis em lasers comerciais turnkey*, exigindo soluções como conversão de frequência baseada em **óptica não-linear**.

O presente trabalho insere-se nesse contexto, tratando do desenvolvimento de um sistema de estabilização térmica para um cristal não-linear de PPKTP (*Periodically Poled Potassium Titanyl Phosphate*) utilizado na geração de luz azul (421 nm) por dobramento de frequência de luz infravermelha (842 nm) em uma cavidade óptica inspirada no modelo proposto por Danekar (1). A estabilidade da temperatura é essencial para a eficiência do processo, uma vez que o casamento de fase (phase matching) é altamente sensível a variações térmicas.

*Soluções turn-key referem-se a sistemas totalmente integrados e prontos para operação logo após a instalação, exigindo configuração mínima por parte do usuário.

1.1 Óptica Não-Linear e Geração de Segundo Harmônico

A óptica não-linear descreve os fenômenos que ocorrem quando a resposta de um meio à incidência de luz intensa deixa de ser proporcional ao campo elétrico aplicado. Um dos principais efeitos desse regime é a **Geração de Segundo Harmônico (GSH)**, na qual a interação da radiação com um meio não linear resulta na emissão de uma nova radiação com o dobro da frequência (ou metade do comprimento de onda) da radiação incidente.

A polarização elétrica $\vec{P}$ de um meio isotrópico pode ser expressa como:

$$P(E) = \varepsilon_0 (\chi^{(1)} E + \chi^{(2)} E^2 + \chi^{(3)} E^3 + \dots) \quad (1)$$

Enquanto o campo elétrico $\vec{E}$ da radiação luminosa **monocromática** pode ser descrito como:

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \frac{1}{2} \left(\vec{E}_0 e^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)} + \vec{E}_0^* e^{-i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)} \right) \quad (2)$$

De forma que ao interagir com um meio não-linear, gerará nele uma polarização, até segunda ordem, como a descrita abaixo:

$$\frac{P}{\varepsilon_0} = \underbrace{\frac{1}{2} \chi^{(1)} \left(E_0 e^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)} + E_0^* e^{-i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)} \right)}_{\text{Resposta Linear}} + \underbrace{\frac{1}{4} \chi^{(2)} \left(E_0^2 e^{i(2\vec{k} \cdot \vec{r} - 2\omega t)} + (E_0^*)^2 e^{-i(2\vec{k} \cdot \vec{r} - 2\omega t)} \right)}_{\text{Geração de segundo harmônico (GSH)}} + \underbrace{\frac{1}{2} \chi^{(2)} |E_0|^2}_{\text{Fator Constante}} \quad (3)$$

A equação 3 mostra que, ao interagir com um meio não-linear de segunda ordem, um campo elétrico monocromático induz no material uma polarização que contém não apenas a componente original de frequência ω , mas também uma nova componente oscilando em 2ω . Essa oscilação de frequência dobrada atua como fonte de emissão de radiação[†] com metade do comprimento de onda da luz incidente.

[†]Dipolos oscilantes são fontes de radiação.(2)

1.2 Casamento de Fase e Cristais do Tipo Periodically Poled

A equação de onda que descreve a propagação de um campo elétrico em um meio polarizado pode ser expressa como na Ref. (3):

$$\nabla^2 \vec{E} - \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = -\mu_0 \frac{\partial^2 \vec{P}}{\partial t^2} \quad (4)$$

A resolução da equação de onda, considerando a polarização não-linear dada pela Eq.3, leva à expressão para a intensidade do segundo harmônico $I_{2\omega}$, conforme apresentada na Ref. (4).

$$I_{2\omega}(\Delta k) = \frac{8d_{\text{eff}}^2 \omega^2 I_{\omega}^2}{n_{\omega}^2 n_{2\omega} \varepsilon_0 c^3} L^2 \text{sinc}^2 \left(\frac{\Delta k L}{2} \right). \quad (5)$$

onde d_{eff} é o coeficiente não-linear do cristal, I_{ω} a intensidade do feixe de entrada, c_0 a velocidade da luz no vácuo, ε_0 permitividade do vácuo, L o comprimento do cristal, λ o comprimento de onda da luz de entrada e Δk é a diferença entre o vetor de onda do foton gerado e a soma dos vetores de onda dos fotons incidentes que se combinam.

Para maximizar essa eficiência, é necessário que $\Delta k = 0$, ou seja, que o número de onda da segunda harmônica seja exatamente o dobro do número de onda da onda fundamental. Essa condição garante que as ondas geradas em diferentes regiões do meio permaneçam em fase, permitindo que suas amplitudes se somem de maneira construtiva ao longo da propagação. Esse regime é o que se denomina *phase-matching* (casamento de fase).

Existem três principais estratégias para alcançar o casamento de fase:

- **Casamento de fase por birrefringencia (BPM):** Explora a birrefringência natural de certos cristais, utilizando diferentes polarizações para as ondas fundamental e gerada. A direção de propagação é ajustada para que os índices de refração das ondas envolvidas coincidam. Apesar de eficiente, exige alinhamento preciso e pode limitar a orientação do cristal.
- **Casamento de fase não-crítico (NCPM):** Obtido via ajuste da temperatura do cristal. A alteração da temperatura modifica os índices de refração, permitindo alcançar diferença de fase nula. Entretanto, normalmente exige temperaturas elevadas ($\approx 200^\circ\text{C}$), o que pode ser um desafio para a estabilidade mecânica e óptica.
- **Quasi-phase matching (QPM):** Em vez de anular a diferença de fase, permite que

ela oscile controladamente ao longo do cristal. Isso é feito invertendo periodicamente a orientação dos domínios não-lineares do material (Periodically Poling). A cada meio-período, a fase acumulada é "resetada", mantendo uma média construtiva da conversão ao longo da propagação.

Cristais *periodically poled*, como o PPKTP, são projetados especificamente para esse último tipo de interação. O período de inversão dos domínios, Λ , é ajustado de modo que um vetor adicional de correção $k_{QPM} = \frac{2\pi}{\Lambda}$ compense o desajuste natural de fase $\Delta k = k_{2\omega} - 2k_{\omega}$. Para a conversão de 842 nm em 421 nm, esse período é tipicamente da ordem de 4 a 5 micrômetros. A precisão na fabricação de Λ é essencial para manter alta eficiência no processo.

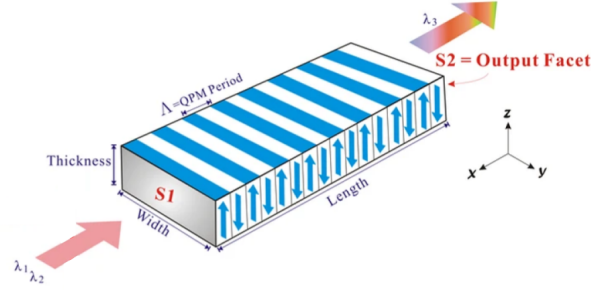


Figura 1: Ilustração de um cristal com *periodically poling*. Inverte-se periodicamente o domínio com período Λ , o que cria um vetor de onda adicional de módulo $k_{QPM} = \frac{2\pi}{\Lambda}$, gerando uma interação de Quasi-Phase Matching (QPM). Fonte: Adaptada de (5).

A figura 2 compara os três tipos de interação não-linear e mostra como a eficiência de conversão se acumula de forma distinta em cada um. No QPM, embora a fase não seja constante, a inversão periódica do domínio (sinal de $\chi^{(2)}$) compensa a defasagem e permite crescimento contínuo da potência gerada.

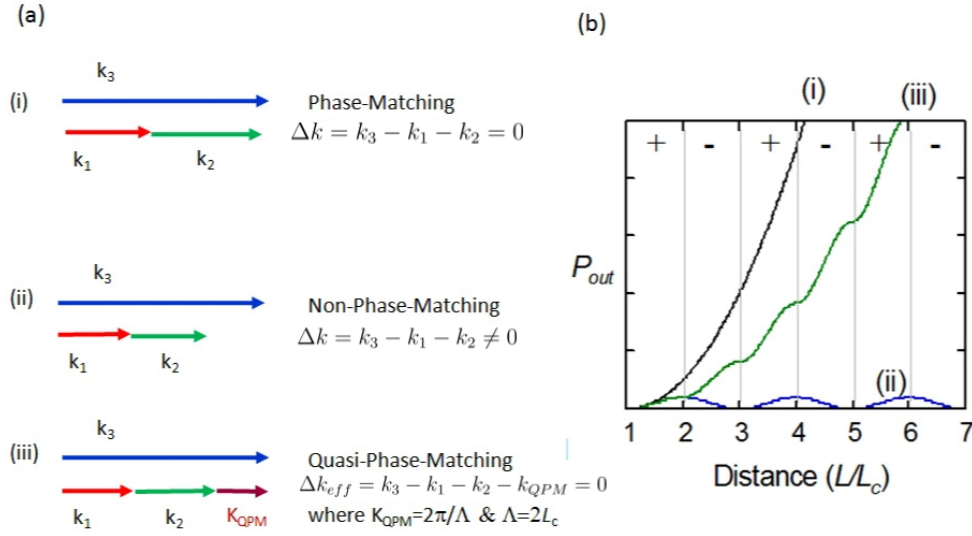


Figura 2: (a) Deslocamento de fase Δk e (b) crescimento da potência convertida para os casos de (i) casamento de fase, (ii) ausência e (iii) quasi-phase matching. Os sinais indicam a polaridade (sinal de $\chi^{(2)}$). Fonte: Adaptada de (5).

1.3 Impacto da Temperatura na Eficiência de Conversão

Como discutido na seção 1.2, a alta eficiência na geração de segundo harmônico exige o cumprimento da condição de casamento de fase, que envolve a correspondência entre os vetores de onda das ondas fundamental e gerada. Esses vetores dependem dos índices de refração, os quais variam com a temperatura. Assim, pequenas instabilidades térmicas podem comprometer o phase-matching e reduzir a eficiência do processo, tornando essencial a estabilização térmica do cristal.

No caso de cristais *periodically poled*, a temperatura afeta não apenas os índices de refração envolvidos na interação não-linear, mas também o próprio período Λ de inversão da polaridade que define o vetor adicional $k_{QPM} = \frac{2\pi}{\Lambda}$, responsável por compensar a defasagem natural entre os feixes fundamental e gerado. Com a dilatação térmica do cristal, o valor de Λ pode variar ligeiramente, alterando k_{QPM} e, conseqüentemente, o desvio de fase efetivo Δk_{eff} (6). Assim, a estabilidade térmica do sistema torna-se ainda mais crítica em cristais do tipo PP, já que qualquer flutuação impacta simultaneamente dois fatores-chave da condição de casamento de fase.

1.4 Uso de Cavidades Ópticas na Conversão de Frequência

O uso de cristais como o PPKTP permite eficiências de conversão elevadas, especialmente quando integrados a cavidades ópticas ressonantes. A geometria da cavidade é essencial para que o feixe fundamental (842 nm) seja reciclado eficientemente, aumentando a interação com o cristal. Cavidades como a proposta por Danekar (1) demonstram eficiências superiores a 70% sob condições ideais.

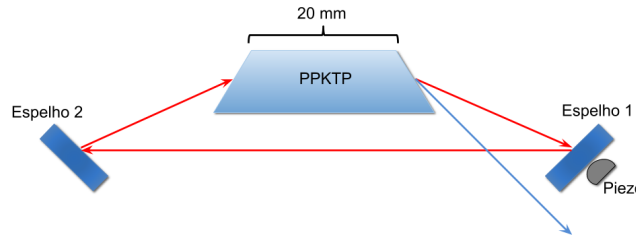


Figura 3: Cavidade de dobramento de frequência em nosso laboratório inspirada no trabalho descrito na Ref.(1).

A cavidade de Danekar emprega dois espelhos côncavos, em contraste com a configuração *bow-tie* tradicional de quatro espelhos, reduzindo a complexidade, perdas ópticas e custo. Ela utiliza cristais com corte de Brewster, cuja inclinação das faces minimiza reflexões para polarização $p^\dagger$, sem necessidade de revestimento antirreflexo. Essa geometria, no entanto, introduz uma assimetria no caminho óptico, exigindo análise separada dos planos tangencial e sagital para o cálculo da cintura do feixe e da estabilidade da cavidade.

1.5 Objetivo do Trabalho

Como discutido anteriormente, a eficiência de conversão de um cristal de PPKTP, atuando como meio não-linear para geração de segundo harmônico, depende criticamente da manutenção de uma temperatura de operação bem definida. Em nosso laboratório, essa temperatura ideal foi identificada, por meio de uma caracterização prévia em regime de passagem simples, como estando em torno de 46 °C (ver Fig. 4a). No entanto, o sistema térmico então utilizado, baseado em aquecimento resistivo e sem isolamento adequado (Fig.4b), apresentou instabilidade e baixa reprodutibilidade, comprometendo diretamente o desempenho óptico da cavidade.

[†]A polarização p ocorre quando o campo elétrico está no plano de incidência; nesse caso, ao incidir no ângulo de Brewster, a luz não é refletida.

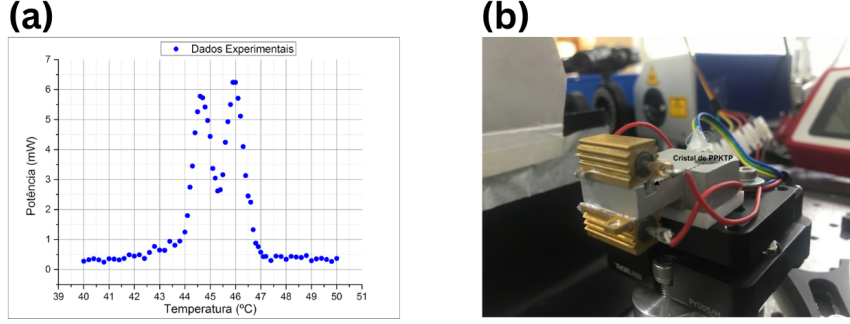


Figura 4: (a) Caracterização da potência de luz em 421 nm gerada por passagem simples de luz em 842 nm pelo cristal de PPKTP como função da temperatura. A presença de dois picos é associada à incapacidade de estabilizar corretamente a temperatura do cristal não-linear. (b) Sistema de aquecimento antigo com o cristal de PPKTP sanduichado por dois resistores de potência.

Diante dessa limitação, tornou-se necessário replanejar o sistema térmico, tanto em sua estrutura física quanto em seu controle eletrônico. Este trabalho propõe o desenvolvimento de um forno customizado, fabricado por impressão 3D, com geometria otimizada para acoplamento ao cristal, e a reestruturação do sistema de controle térmico para integrá-lo de forma eficiente ao novo conjunto. O objetivo é atingir uma estabilidade de temperatura em torno de $\pm 0,1^\circ\text{C}$, assegurando as condições necessárias para o funcionamento ideal da cavidade e a máxima eficiência na geração de luz em 421 nm.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Desenvolvimento do Forno

O projeto de um forno deve equilibrar critérios térmicos, ópticos e mecânicos para garantir bom desempenho (7). É essencial otimizar o contato térmico com o cristal, evitando gradientes que prejudiquem o casamento de fase. O design deve manter acesso óptico livre e permitir fixação firme, sem tensões mecânicas. O sensor de temperatura deve ser posicionado de modo a refletir fielmente a temperatura real do cristal, preferencialmente em contato direto com ele.

Nesse contexto, a opção por fabricar o forno por impressão 3D se justifica pela flexibilidade no design, que permite a criação de uma estrutura personalizada adaptada às dimensões do cristal e dos elementos de controle térmico. Essa abordagem facilita a integração entre aquecimento, monitoramento e fixação mecânica, ao mesmo tempo em que reduz perdas térmicas

por encaixes imprecisos e contribui para a reprodutibilidade do experimento, já que o modelo pode ser facilmente replicado ou modificado conforme necessário.

O forno foi projetado utilizando o software *Autodesk Fusion 360*, com ênfase na integração térmica, compacidade e viabilidade de fabricação. O modelo inclui uma cavidade dimensionada especificamente para acomodar o cristal de PPKTP com encaixe justo, eliminando a necessidade de fixadores adicionais e promovendo bom contato térmico.

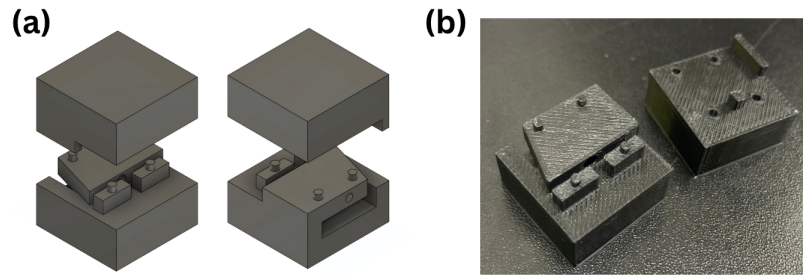


Figura 5: (a) Modelo 3D do forno no *Autodesk Fusion 360*, com destaque para a cavidade do cristal (esquerda) e o slot do módulo Peltier (direita). O design compacto otimiza o acoplamento térmico e facilita a montagem. (b) Fotografia do forno impresso em *PLA Premium* na impressora *Creality K1 MAX*, evidenciando o acabamento superficial e os encaixes do cristal.

Imprimiu-se a estrutura em PLA Premium (3D Lab), que apresenta tolerância de $\pm 0,05 \text{ mm}$ e resistência térmica de cerca de 55°C (8), utilizando a impressora *Creality K1 MAX*, baseada em tecnologia FDM e com precisão de $\pm 0,1 \text{ mm}$ (9). A impressão foi feita a 198°C , com mesa aquecida a 50°C . Devido às dimensões reduzidas ($24 \times 23,6 \times 24 \text{ mm}$), ajustes iterativos foram necessários para garantir o encaixe preciso dos componentes.

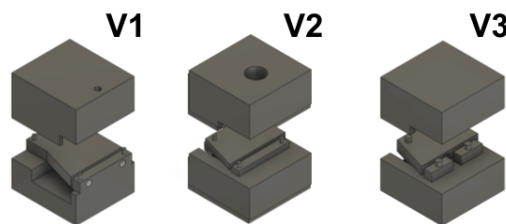


Figura 6: Evolução das versões do forno ao longo do desenvolvimento. As modificações envolveram o reposicionamento do cristal, ajustes dimensionais e adaptações aos novos componentes.

A primeira versão do forno, de caráter prototípico, visou testar a qualidade de impressão e a estrutura geral da peça, utilizando dimensões estimadas na ausência de alguns componentes. Com a chegada dos elementos reais, versões subsequentes passaram por ajustes iterativos que aprimoraram a integração entre as partes e a eficiência térmica do conjunto.

As principais modificações realizadas ao longo do desenvolvimento estão resumidas na Tabela 1, que reúne os aprimoramentos do protótipo à versão final.

Tabela 1: Resumo das principais modificações realizadas nas versões do forno.

Versão	Modificações principais	Justificativa
V1	Protótipo inicial; dimensões estimadas; posição preliminar do Peltier e do cristal	Avaliar a viabilidade da impressão, encaixes e integridade mecânica; primeiros testes sem componentes reais disponíveis
V2	Redimensionamento e centralização da cama do cristal; reposicionamento da entrada do Peltier; redimensionamento do canal do sensor; inclusão de chanfro superior	Melhorar o acoplamento térmico com o Peltier e a fixação do cristal; liberar as laterais de fixação; melhorar contato do LM35; reduzir tensões mecânicas e perdas térmicas
V3	Substituição do LM35 pelo termistor NTC; aumento da espessura dos pinos de encaixe da tampa	Aumentar precisão térmica e melhorar resistência mecânica dos encaixes, evitando quebras após múltiplos ciclos

Com a adoção do termistor NTC na versão final (V3), foram necessários ajustes contínuos no alojamento do sensor. Nas primeiras impressões, as cavidades saíram estreitas demais; após correções, ficaram largas, comprometendo o contato térmico. A solução adotada foi envolver o sensor com uma micromola de diâmetro externo 2,5 mm, que, ao ser comprimida, o mantinha pressionado contra o cristal. Isso garantiu fixação firme e leitura precisa, sem risco de dano mecânico.

2.2 Sistema de Controle Térmico

O sistema de controle térmico consiste em três partes: sensor, aquecedor e controlador eletrônico. O sensor monitora a temperatura próxima ao cristal, enquanto o aquecedor fornece a potência térmica necessária para aquecê-lo. O controlador compara a leitura com o *setpoint* (temperatura alvo) e ajusta a potência via algoritmo de malha fechada, garantindo a estabilidade térmica essencial para a eficiência da conversão óptica.

No sistema, como o encontramos, a medição da temperatura era realizada por meio de um sensor LM35, escolhido por sua simplicidade de uso e saída linear em tensão proporcional à temperatura. No entanto, durante os testes iniciais de integração desse sistema com o forno, observou-se que sua resolução e precisão — com incerteza típica de $\pm 0,25^\circ\text{C}$ — eram insuficientes para atender à exigência de estabilidade térmica que tínhamos para o sistema (flutuações

inferiores a $\pm 0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Diante dessas limitações, optou-se por substituir o LM35 por um termistor NTC de $10k\Omega$ modelo *RL0503-5820-97-MS*, que apresenta maior sensibilidade térmica na faixa de operação desejada. O termistor foi acoplado ao cristal em contato lateral, em uma cavidade projetada especialmente para ele na estrutura do forno, e conectado a uma rede divisor de tensão com resistor fixo de mesmo valor ($10k\Omega$), permitindo a leitura analógica do valor de temperatura pelo microcontrolador[§]. Essa substituição exigiu a adaptação do circuito original e ajustes no código para converter corretamente a leitura em temperatura.

Os resistores que originalmente realizavam o aquecimento do sistema foram substituídos por um módulo termoelétrico Peltier, posicionado abaixo do cristal. Essa mudança foi motivada por sua maior eficiência, estabilidade e capacidade de controle dinâmico, o que favorece a integração com sistemas de realimentação térmica de maior precisão.

O controle de temperatura, realizado por um *Arduino Nano*, foi reprogramado utilizando um algoritmo PID com constantes ajustadas empiricamente. Estratégias semelhantes de controle térmico com módulo Peltier e controle PID em microcontroladores já foram empregadas com sucesso em outras aplicações experimentais (10).

O *Arduino* lê continuamente a tensão do divisor com o termistor, converte esse valor na temperatura real do cristal e a compara com o *setpoint* ajustado pelo usuário por meio de um potenciômetro. Ambas as temperaturas — a medida e a de referência — são exibidas no visor *LCD JHD 162A*. A saída do controle aciona um *MOSFET IRLZ24N*, que modula a corrente fornecida ao módulo Peltier por uma fonte *DC R&S HMP4040*, configurável quanto aos limites de tensão e corrente. Esse sistema integrado garante a manutenção da temperatura próxima ao ponto ótimo, com alta estabilidade.

2.3 Testes de Estabilidade Térmica

Para avaliar a performance do sistema de controle térmico, realizaram-se testes de estabilização com *setpoint* fixo em $46\text{ }^{\circ}\text{C}$, valor correspondente à temperatura ideal de operação do cristal de PPKTP segundo experimentos anteriores de conversão de frequência (Fig.5).

Durante os testes, o sistema partia da temperatura ambiente e o controle PID era acionado para conduzir o cristal até o *setpoint*. Uma vez atingido, o sistema era mantido em regime

[§]Essa leitura, no entanto, é sujeita à quantização, impondo um limite de resolução térmica da ordem de $0,06\text{ }^{\circ}\text{C}$ nas condições de operação empregadas.

estacionário por tempo prolongado, com monitoramento contínuo da temperatura.

As medições de temperatura foram realizadas utilizando o próprio termistor NTC conectado ao *Arduino*, com leitura contínua via comunicação serial. Os dados foram registrados diretamente em um arquivo *.csv* por meio de um script Python, permitindo a análise posterior da estabilidade térmica. Não foram utilizados sensores externos para verificação. Avaliou-se a estabilidade com base na variação da temperatura em torno do *setpoint*, considerando-se satisfatório o controle com desvio inferior a $\pm 0,1^\circ\text{C}$ em regime permanente.

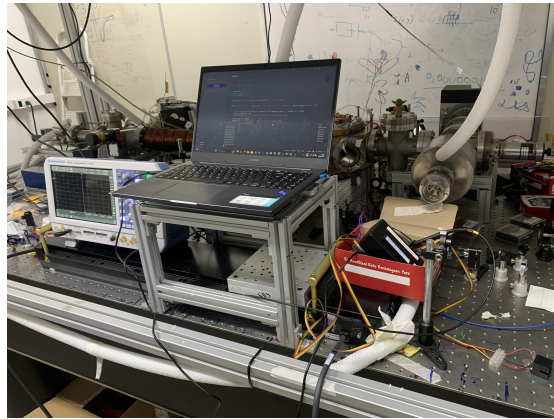


Figura 7: Fotografia do experimento completo. Da esquerda para a direita: osciloscópio para monitoramento auxiliar, notebook com software de aquisição em Python, sistema de controle térmico com visor LCD (*Arduino Nano* interno) e, no canto inferior direito, o forno com o cristal, o módulo Peltier e o termistor.

Após o estabelecimento do regime estacionário, incrementos manuais de $0,1^\circ\text{C}$ foram aplicados ao *setpoint* para verificar a resposta do controle PID a pequenas perturbações. O teste evidenciou a capacidade do sistema em acompanhar suavemente essas variações.

Por fim, realizaram-se **quatro** ciclos completos de aquecimento, a partir da temperatura ambiente, com o objetivo de avaliar a reprodutibilidade do sistema. Em cada ciclo, analisaram-se o tempo de subida, o tempo de estabilização dentro da faixa especificada e o comportamento térmico no regime estacionário. Esses parâmetros permitiram quantificar tanto o desempenho do controle quanto a consistência térmica do forno impresso em 3D.

Os resultados obtidos a partir desses procedimentos serão discutidos em detalhe na Seção 3.

3 RESULTADOS

3.1 Avaliação do sistema original

Os resultados apresentados a seguir referem-se à primeira tentativa de integração do forno com o sistema de controle térmico original, baseado em *Arduino* e sensor LM35. Embora o código não estivesse disponível, a resposta térmica observada indica um controle puramente proporcional, com desempenho insuficiente para a estabilidade requerida. As limitações tanto no sensor quanto no controle motivaram o redesenho do sistema.

Para verificar o desempenho térmico nesse arranjo original, configurou-se a fonte de alimentação com tensão limitada a 2,8 V (tensão máxima suportada pelo módulo Peltier (11)). As medições da temperatura foram feitas por meio de um osciloscópio *Rohde & Schwarz RTB2004*, que monitorava a tensão de saída do sensor. Quando o *setpoint* foi fixado em 46,0°C, observou-se que o sistema não conseguia atingir essa temperatura, estabilizando-se em torno de $42,2 \pm 0,25^\circ\text{C}$ (Fig.8). Esse comportamento indica que, nas condições de alimentação fornecidas e sem um controle mais robusto, o sistema era incapaz de vencer a inércia térmica e as perdas de calor para o ambiente.

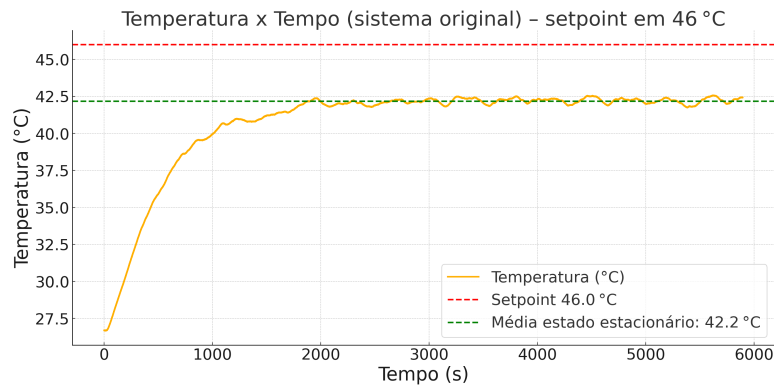


Figura 8: Evolução da temperatura com *setpoint* fixado em 46,0°C e tensão de alimentação limitada a 2,8 V. Observa-se que o sistema estabiliza em torno de $42,2 \pm 0,25^\circ\text{C}$, não atingindo a temperatura alvo

Como o sistema havia estabilizado abaixo da temperatura desejada (46,0°C) no teste anterior, realizou-se uma nova tentativa com o *setpoint* ajustado para 48,0°C. O objetivo não era atingir esse novo valor em si, mas sim forçar o sistema a operar com maior potência média, a fim de verificar se ele seria capaz de alcançar os 46,0°C. Essa abordagem permitiu investigar se a limitação observada estava relacionada à potência efetiva fornecida pelo sistema ou à dinâmica

do controle original.

Nessa condição, com a tensão de alimentação ainda limitada a 2,8 V, o sistema conseguiu atingir os 46,0°C. No entanto, observou-se uma oscilação significativa em torno desse valor, da ordem de $\pm 0,5^\circ\text{C}$ (Fig.9). Esse comportamento reforça a hipótese de que o sistema de controle empregado era puramente proporcional, sem mecanismos integrativo ou derivativo capazes de amortecer adequadamente as variações em torno do *setpoint*.

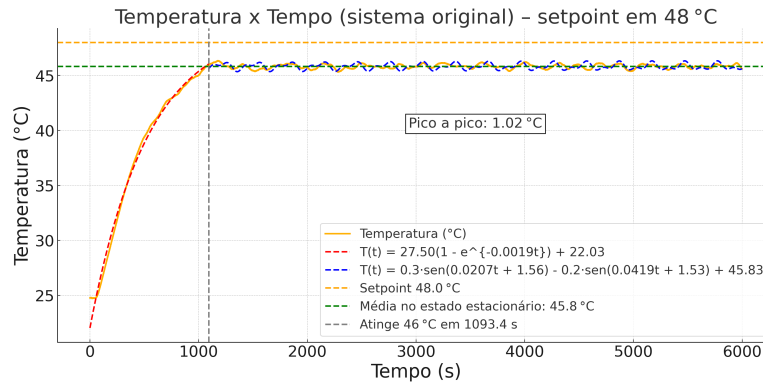


Figura 9: Evolução da temperatura com *setpoint* ajustado para 48,0°C. O sistema atinge 46,0°C, mas com oscilação térmica de aproximadamente $\pm 0,5^\circ\text{C}$, evidenciando limitações do controle proporcional.

Para investigar se o problema estava relacionado à programação do controle original, realizou-se um novo teste com o módulo Peltier alimentado diretamente pela fonte, operando em modo de corrente constante limitada a aproximadamente 575 mA — valor semelhante ao observado no regime estacionário durante os testes anteriores com o controlador.

Sem o controle eletrônico, o sistema atingiu temperatura média de 48,3°C com oscilação de $\pm 0,4^\circ\text{C}$ — melhor que os 45,8°C e $\pm 0,5^\circ\text{C}$ observados com o controlador original. Isso indica que as limitações estavam no controle, não na capacidade térmica do arranjo. Além disso, o ruído nas medições sugere que parte das flutuações vinha da baixa resolução do sensor LM35, cuja saída de 10 mV/°C gerava discretizações incompatíveis com a precisão desejada. Esses fatores motivaram a adoção de um termistor NTC de 10 kΩ e a implementação de um controle PID, conforme discutido na Seção 2.2.

3.2 Estabilização térmica com o PID otimizado

Com as constantes do controlador PID definidas conforme descrito na Seção 2.2, realizou-se um teste completo para avaliar o desempenho térmico do sistema. A fonte de alimentação

foi configurada com limites de 2,6 V — respeitando a margem de segurança em relação ao limite suportado pelo módulo Peltier (11) — e 400 mA. O objetivo foi monitorar a evolução da temperatura desde as condições ambiente até o estabelecimento do regime estacionário, com o *setpoint* fixado em 46,0°C.

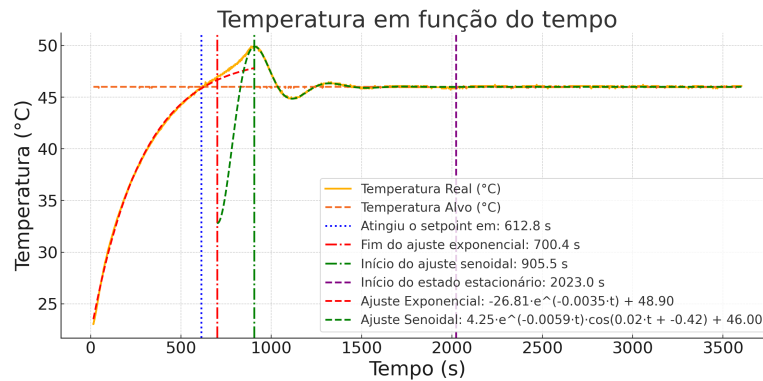


Figura 10: Evolução térmica do sistema desde a temperatura ambiente até o regime estacionário sob controle PID otimizado, com marcação dos instantes de mudança de regime e ajustes teóricos (fittings) para cada etapa.

Durante o aquecimento inicial, a corrente permaneceu constante no limite imposto, enquanto a tensão se elevava gradualmente. Já na fase de estabilização, a tensão se fixou em 2,6 V e a corrente passou a oscilar suavemente em torno de 279 mA, comportamento típico do controle fino de temperatura.

A curva de temperatura (Fig. 10) foi analisada por meio de ajustes teóricos: a fase de aquecimento foi bem descrita por uma exponencial crescente, e o regime oscilatório posterior, por um seno amortecido. Entre essas fases, há um intervalo de transição em que nenhum dos modelos se ajusta bem, o que é compatível com a mudança de regime da fonte de alimentação, que passa de limitação por corrente para limitação por tensão.

Os valores de temperatura foram registrados continuamente por uma hora. Para avaliar a estabilidade no regime estacionário, utilizou-se o trecho final da aquisição, no qual mais de 99% das medições permaneceram entre 45,96°C e 46,08°C — critério adotado para desconsiderar flutuações pontuais sem impacto significativo sobre o comportamento térmico do sistema. A Figura 11 apresenta esse recorte, com duração aproximada de 26 minutos, evidenciando a reduzida amplitude de variação da temperatura em torno do *setpoint* de 46,0°C.

A análise do gráfico corrobora a eficácia do controle térmico: a temperatura manteve-se estável dentro da faixa operacional estipulada, com variações predominantemente inferiores a $\pm 0,1^\circ\text{C}$ e desvios pontuais dentro de limites aceitáveis para a aplicação. As flutuações ocasionais

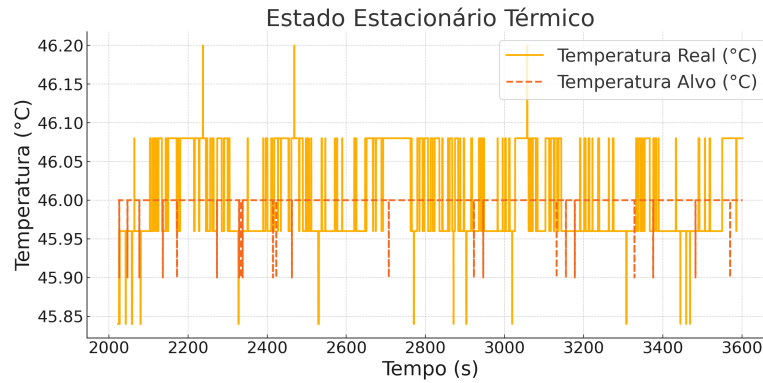


Figura 11: Comportamento térmico no regime estacionário com controle PID otimizado. A temperatura permaneceu predominantemente entre 45,96 e 46,08°C, com menos de 1% dos dados fora desse intervalo (variando entre 45,84 e 46,20°C). Pequenas quedas no valor do *setpoint* são atribuídas a oscilações no potenciômetro de ajuste manual.

estão associadas a oscilações no potenciômetro responsável pelo ajuste manual do *setpoint*, sem impacto significativo na estabilidade geral. Esse desempenho atende aos critérios estabelecidos para o experimento com cristal não linear, confirmando a efetividade do ajuste empírico das constantes do PID na faixa de operação desejada.

3.3 Resposta térmica a pequenas variações do *setpoint*

Após o estabelecimento do regime estacionário, foram aplicados incrementos de 0,1°C no *setpoint*, conforme descrito na seção de 2.3. A Figura 12 mostra a resposta térmica do sistema a essas variações.

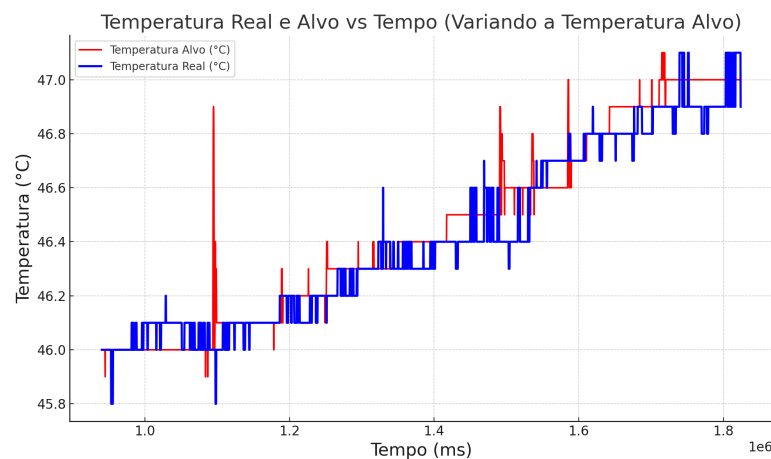


Figura 12: Resposta térmica a incrementos manuais de 0,1°C no *setpoint* após atingir o regime estacionário. A estabilidade em torno dos novos valores demonstra a precisão do sistema, apesar das flutuações abruptas do *setpoint* devido a resolução e sensibilidade do ajuste via potenciômetro.

Observa-se que o controle PID foi capaz de acompanhar as mudanças de *setpoint* com transições suaves, rápido assentamento e flutuações mínimas em torno da nova referência. Pequenos *overshoots*[¶] ocorreram em alguns passos, mas o sistema se estabilizou rapidamente.

As flutuações abruptas visíveis na curva de *setpoint* são atribuídas à limitação do potenciômetro utilizado para ajuste manual, não representando falha do controle em si.

3.4 Avaliação da reprodutibilidade da estabilidade térmica

Para avaliar a reprodutibilidade do sistema de controle térmico, realizaram-se quatro ciclos completos de aquecimento desde a temperatura ambiente até o regime estacionário. A Figura 13 mostra a sobreposição das curvas obtidas, permitindo comparar o comportamento térmico entre os ciclos.

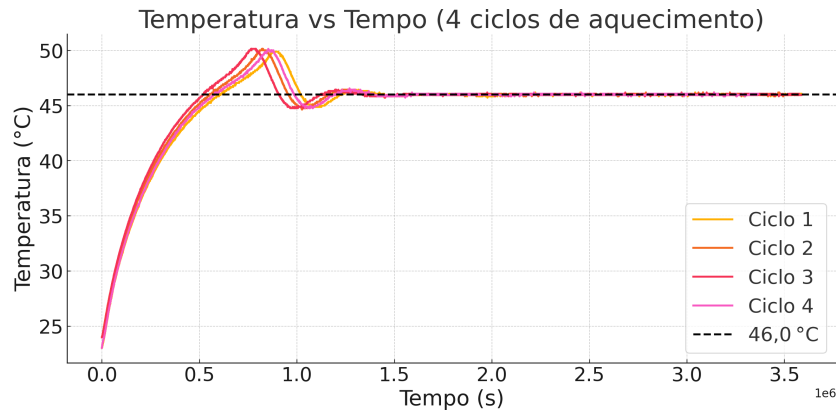


Figura 13: Comparação entre os quatro ciclos de aquecimento desde a temperatura ambiente até o estado estacionário. A sobreposição das curvas evidencia a reprodutibilidade do controle térmico implementado.

Embora haja pequenas variações nos tempos de resposta térmica durante o aquecimento inicial — possivelmente causadas por flutuações ambientais —, o comportamento no regime estacionário mostra-se altamente consistente entre os ciclos. Os parâmetros extraídos dos ajustes (Tabela 2) reforçam essa regularidade, com valores praticamente idênticos para o tempo característico de subida (τ), a amplitude (A) e o coeficiente de amortecimento (γ), evidenciando a robustez e a confiabilidade do sistema.

[¶]O termo *overshoot* designa a tendência de um sistema ultrapassar momentaneamente o valor desejado (como a temperatura alvo), antes de se estabilizar.

Tabela 2: Resumo dos parâmetros extraídos dos 4 ciclos de aquecimento

Parâmetro	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Ciclo 4
Tempo para <i>setpoint</i> (s)	612,8	563,4	529,6	583,4
Início do estacionário (s)	2023,0	2189,4	1475,9	3314,2
τ (s)	275032	280514	269157	277479
Ajuste senoidal — A	4,53	4,57	4,75	4,46
Ajuste senoidal — γ	$6,00 \times 10^{-6}$	$6,00 \times 10^{-6}$	$6,00 \times 10^{-6}$	$6,00 \times 10^{-6}$

3.5 Limitações e próximas etapas

Apesar dos bons resultados, foram identificadas limitações, como flutuações no *setpoint* causadas pelo uso de potenciômetro analógico e a ausência de calibração externa do termistor. Esta última pode gerar um desvio sistemático na leitura absoluta da temperatura, sem afetar a estabilidade nem a reprodutibilidade, que dependem apenas de variações relativas. Já as flutuações no *setpoint*, induzidas por ruídos do potenciômetro, podem impactar diretamente o desempenho do sistema.

Como melhorias futuras, propõe-se a adoção de uma interface digital para ajuste do *setpoint* e a calibração do sensor com referência externa, visando maior precisão. Além disso, o uso da tensão de referência interna de 1,1 V no microcontrolador — em substituição à padrão de 5 V — permitiria melhorar a resolução das leituras, reduzindo o erro de quantização sem alterar o circuito. No entanto, isso exigiria nova calibração do PID, devido à mudança na sensibilidade da leitura analógica.

Embora o sistema tenha sido desenvolvido com foco em conversão de frequência óptica, como a geração de segundo harmônico (SHG), não foi possível realizar testes ópticos nesta etapa, pois o único cristal PPKTP disponível está danificado. A expectativa é integrá-lo à cavidade óptica previamente modelada assim que um novo cristal for adquirido. Essa modelagem, realizada como extensão deste trabalho com base em métodos de óptica gaussiana e análise matricial (12), orientará a usinagem de uma base metálica para a montagem definitiva. Com essa integração, será possível validar experimentalmente a eficiência de conversão e o desempenho térmico em operação real.

4 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho apresentou o desenvolvimento de um sistema de controle térmico de alta precisão para estabilização de um cristal não linear de PPKTP, com vistas à sua aplicação em processos de conversão de frequência óptica. O projeto incluiu a modelagem e fabricação, por impressão 3D, de um forno customizado, a substituição do sistema de aquecimento resistivo por um módulo Peltier e a adoção de um termistor NTC como sensor de temperatura. A estabilidade térmica foi garantida por um algoritmo PID implementado em microcontrolador *Arduino Nano*, com parâmetros ajustados empiricamente com base na resposta do sistema.

Os testes realizados demonstraram que a nova configuração foi capaz de manter a temperatura do cristal com variação inferior a $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$, mesmo sob perturbações externas. Além disso, o sistema apresentou boa reprodutibilidade e capacidade de resposta a variações graduais no *setpoint*. Algumas limitações — como o uso de um potenciômetro analógico e a ausência de calibração do termistor com sensor de referência — foram identificadas e discutidas, apontando caminhos para aprimoramentos futuros. O conjunto de resultados obtidos valida a viabilidade da solução proposta como etapa fundamental para futuras integrações com sistemas ópticos de conversão não linear.

Referências

- 1 DANEKAR, K. *Blue Laser via IR Resonant Doubling with 71% Fiber to Fiber Efficiency*. Tese (Doutorado) — University of North Texas, Denton, TX, 2011. Tese de Doutorado. Disponível em: <<https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc68023/>>.
- 2 RAMOS, R. V. **Antenas:** uma introdução à radiação eletromagnética. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 26, n. 1, p. 53–61, 2004. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S1806-11172004000100008>>.
- 3 JACKSON, J. D. *Classical Electrodynamics*. 3. ed. New York: Wiley, 1998. Cap. 6: Electromagnetic Waves.
- 4 BOYD, R. W. *Nonlinear Optics*. 3. ed. Burlington, MA: Academic Press, 2008. Cap. 2: The Nonlinear Optical Susceptibility. ISBN 978-0-12-369470-6.
- 5 HC Photonics Corp. *PPLN Guide - Overview*. 2025. Acesso em: 14 maio 2025. Disponível em: <<https://www.hcphotonics.com/ppln-guide-overview>>.
- 6 LIU, H. et al. **Thermal effects of the quantum states generated from the isomorphs of PPKTP crystal**. *npj Quantum Information*, Nature Publishing Group, v. 4, n. 1, p. 1–7, 2018. Disponível em: <<https://www.nature.com/articles/s41534-018-0102-0>>.
- 7 PASCHOTTA, R. *Crystal Ovens*. RP Photonics AG, 2012. RP Photonics Encyclopedia. Disponível em: <https://www.rp-photonics.com/crystal_ovens.html>.
- 8 3D Lab. *Filamento PLA Premium – Ficha Técnica*. 2023. <<https://3dlab.com.br/produto/filamento-pla-premium/>>. Acesso em: mai. 2025.
- 9 Creality. *K1 Max 3D Printer User Manual*. [S.l.], 2023. Manual do usuário da impressora Creality K1 Max. Disponível em: <<https://wiki.creality.com/en/k1-flagship-series/k1-max/quick-start-guide/users-manual>>.
- 10 BERNARDO, R. T. *Desenvolvimento de uma plataforma para aplicação de técnicas de controle de temperatura por efeito Peltier*. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal de Ouro Preto. Disponível em: <<https://www.monografias.ufop.br/handle/35400000/1211>>.
- 11 Termo-Gen. *BiTe Thermoelectric Modules Specification*. 2020. <<https://www.termo-gen.com/pdf/BiTeModulesspecification.pdf>>. Acesso em: mai. 2025.
- 12 FALKENAU, M. *Chromium Atoms in a Deep Optical Dipole Trap*. Dissertação (Master's thesis) — Universität Stuttgart, February 2008.