

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
INSTITUTO DE FÍSICA

ÁLVARO AUGUSTO TINOCO ESSINGER

**DESENVOLVIMENTO DE PORTA-AMOSTRAS COM CONTROLE DE
TEMPERATURA PARA MEDIDAS DE ESPECTROSCOPIA RAMAN**

Porto Alegre

2023

ÁLVARO AUGUSTO TINOCO ESSINGER

**DESENVOLVIMENTO DE PORTA-AMOSTRAS COM CONTROLE DE
TEMPERATURA PARA MEDIDAS DE ESPECTROSCOPIA RAMAN**

Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Física, a ser apresentado à Escola de Engenharia e ao Instituto de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Física.

Orientador: Prof. Dr. Fabrício Luiz Faita

Porto Alegre

2023

Álvaro Augusto Tinoco Essinger

**DESENVOLVIMENTO DE PORTA-AMOSTRAS COM CONTROLE DE
TEMPERATURA PARA MEDIDAS DE ESPECTROSCOPIA RAMAN**

Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Física, a ser apresentado à Escola de Engenharia e ao Instituto de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Física.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Fabrício Luiz Faita (Orientador)

Prof. Dr. Altair Soria Pereira (UFRGS)

Prof. Dr. Milton Tumelero (UFRGS)

Porto Alegre, 13 abril de 2023.

RESUMO

O presente trabalho de conclusão de curso foi dedicado à pesquisa, desenvolvimento, fabricação e avaliação via testes de desempenho de um porta-amostras com controle de temperatura. Foi implementado um algoritmo de controle proporcional-integral-derivativo (PID) com o uso de placa de desenvolvimento Arduino UNO, resistência de cartucho e termopar como sistema de controle por feedback negativo. Esse acessório busca suprir uma demanda do Laboratório de Altas Pressões e Materiais Avançados (LAPMA) em relação a capacidade investigativa da técnica de espectroscopia Raman em função da temperatura do material. Os resultados obtidos foram compatíveis com as necessidades de aplicação do laboratório. O dispositivo se mostrou capaz de atingir e manter as temperaturas de interesse com precisão de ± 1 °C com flutuação de 0,5 °C. As constantes de ganho foram definidas pela metodologia trial and error. Este projeto foi desenvolvido sob licença GPL-v3 e pode ser replicado, modificado e comercializado segundo os termos descritos em “GNU General Public License”, integralmente sem garantia. O dispositivo se encontra em posse do LAPMA/IF e sob a responsabilidade do professor orientador deste trabalho, Prof. Fabrício Faita. A documentação e códigos desenvolvidos estão disponíveis on-line no GIT do Centro de Tecnologia Acadêmica (CTA).

Palavras-chave: prototipagem; controlador PID; controle de temperatura; análise de materiais.

ABSTRACT

This work was dedicated to the research, development, manufacture and evaluation via performance tests of a temperature-controlled sample holder. A proportional-integrative-derivative control algorithm was implemented in an Arduino UNO development board and a cartridge resistance and thermocouple composed the negative feedback control system. This accessory aims to furnish the demand of the Advanced Materials and High-Pressure Laboratory (LAPMA) in relation to its research capabilities through Raman spectroscopy technique. The results obtained were compatible with Lab's application needs. The device was able to reach and maintain the temperatures of interest with precision of ± 1 °C with 0,5 °C fluctuation. The gain constants were obtained through trial-and-error methodology. This work was developed under GLP-v3 license and can be redistributed, modified and commercialized under the terms of the GNU General Public License, without any warranty. The device is located in LAPMA's facilities under Fabricio Faita's responsibility. All documentation and codes are available online at the GIT of the Center of Academic Technology.

Keywords: prototyping; PID controller; temperature control; material analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Imagens da resistência de cartucho utilizada (a) como adquirida e em (b) destacando o comprimento da região cilíndrica de aquecimento	14
Figura 2 - (a) imagem esquemática do desenho técnico da peça inicialmente projetada. (b) e (c) núcleo de cobre usinado e já na configuração final dos furos para as inserções da resistência de cartucho e termopar	15
Figura 3 - Vista inferior do núcleo de Cobre, destaque para os três pontos de apoio	16
Figura 4 - (a) Desenho técnico do corpo isolante e (b) corpo isolante fabricado em Pirofilita por usinagem	17
Figura 5 - Janela óptica posicionada na tampa do forno, (a) furo com o degrau em evidência, (b) disco de vidro deslocado para melhor visualização e (c) disco de vidro posicionado no furo da tampa	18
Figura 6 - Imagem do termopar do tipo K utilizado nesse trabalho	18
Figura 7 - Forno montado (a) sem a tampa e (b) com a tampa.....	19
Figura 8 - (a) Vista superior do suporte e (b) montagem virtual do forno sobre o suporte no caminho óptico do espectrômetro Raman.....	20
Figura 9 - (a) e (b) Peça de acoplamento do forno ao suporte apresentado na Figura 8(a) e (c) forno acomodado no interior da peça.....	20
Figura 10 - Placa do módulo compensador do termopar com conexão dos pinos do Arduino	23
Figura 11 - Diagrama elétrico da central de controle	24
Figura 12 - Diagrama de blocos para um controlador genérico	32
Figura 13 - Resposta de um controle On/Off	33
Figura 14 - Controle PID <i>set point following</i>	35
Figura 15 - Curvas de aquecimento realizadas para diferentes valores de K_i	37
Figura 16 - Curvas de aquecimento realizadas para: diferentes valores de K_d (a), (b) e (c); diferentes faixas de temperatura com K_d constante (d), (e) e (f)	38
Figura 17 - Curvas de aquecimento realizadas mantendo $K_d = 20$	39
Figura 18 - Curvas de aquecimento realizadas mantendo $K_d = 10$	40
Figura 19 - Curvas de aquecimento para $K_i = 0,001$	41
Figura 20 - (a) Curva de aquecimento em etapas de 50 °C (b) medidas de temperatura na superfície da janela óptica, (c) medidas de temperatura a 2 mm acima da janela óptica.....	42

Figura 21 - Designs 1 (a), 2 (b) e 3 (c) e suas respectivas curvas de aquecimento (d), (e) e (f)	43
Figura 22 - Vista inferior do design 2 com ênfase para os três pontos de apoio.....	44
Figura 23 - (a) sinal PWM original do Arduino UNO (490 Hz) (b) sinal PWM modificado pela biblioteca PWM.h (32 Hz).....	45
Figura 24 - Fotografia capturada da superfície rugosa de uma lâmina de Si em foco no microscópio óptico do espectrometro Raman do LAPMA	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados técnicos de operação do relé utilizado	21
Tabela 2 - Pinos do módulo MAX6675.....	23
Tabela 3 – Custo por item	23
Tabela 4 - Bibliotecas utilizadas no software do controlador	26
Tabela 5 - Configuração de conexão do módulo MAX6675 ao Arduino	26
Tabela 6 - Configuração de conexão do relé ao Arduino	26
Tabela 7 - Configuração de conexão do shield LCD ao Arduino	26
Tabela 8 - Valores MAX_PID_VALUE e suas equivalências.....	31
Tabela 9 - Frequências correspondentes a cada pino da placa Arduino UNO utilizada	45

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 OBJETIVOS	12
1.1.1 Geral	12
1.1.2 Objetivos Específicos	12
2 DESENVOLVIMENTO DO DISPOSITIVO	13
2.1 Forno.....	13
2.1.1 Fonte de calor.....	14
2.1.2 Núcleo de Cobre.....	14
2.1.3 Corpo Isolante.....	16
2.1.4 Janela Óptica	17
2.1.5 Termopar.....	18
2.1.6 Montagem.....	18
2.1.7 Suporte e acoplamento	19
2.2 Central de Controle.....	21
2.2.1 Fonte de Alimentação.....	21
2.2.2 Relé de estado sólido Fortek SSR 40 DD	21
2.2.3 Arduino UNO	22
2.2.4 LCD keypad Shield.....	22
2.2.5 Módulo Compensador MAX6675	22
2.2.6 Montagem.....	23
2.2.7 Diagrama elétrico	24
2.2.8 Custos do Projeto.....	24
2.3 SOFTWARE.....	25
2.3.1 Organização	25
2.3.2 Bibliotecas	25
2.3.3 Configuração de pinos do Arduino	26
2.3.4 Variáveis	26
2.3.4.1 Globais.....	27
2.3.4.2 Variáveis de função	27
2.3.5 Constantes de ganho PID.....	27
2.3.6 Set Up.....	28

2.3.7 Algoritmo Principal.....	28
2.3.8 Funções	30
3 TESTES DE OPERAÇÃO.....	32
3.1 Fundamentação Teórica.....	32
3.2 Testes de aquecimento em bancada.....	35
3.2.1 Curvas de aquecimento	36
3.2.2 Monitoramento da temperatura externa.....	41
3.3 Dificuldades superadas	43
3.3.1 Modificações do núcleo de cobre	43
3.3.2 Frequência do PWM do Arduino.....	44
3.3.3 Distância focal do microscópio	45
4 CONCLUSÃO.....	47
5 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	48
REFERÊNCIAS	49
APÊNDICE A - MANUAL DE OPERAÇÃO.....	50
ANEXO A – Página de informações módulo max6675	58

1 INTRODUÇÃO

Na pesquisa científica ou em processos industriais é sempre buscado o controle sobre as variáveis existentes em experimentos científicos, desenvolvimento de produtos ou linha de produção. Assim, especificamente para a parte científica, dispositivos que permitem ao usuário o controle de variáveis como temperatura e taxa de aquecimento são fundamentais para a execução confiável de experimentos. Após a revolução industrial no séc. XVIII, o desenvolvimento de novos controles de processos foi dedicado a substituição da mão de obra humana por maquinário automatizado diminuindo a intervenção humana e ampliando a capacidade de produção industrial. Flugge-Lotz (1971) comenta que foi apenas no ano de 1922 que o engenheiro Nicolas Minorsky, buscando inspiração para desenvolver um sistema de orientação autônomo para embarcações, desenvolveu a descrição matemática do que seria mais tarde conhecido como controle proporcional-integral-derivativo (PID).

Na área de ciência dos materiais, a pesquisa científica busca produzir e caracterizar materiais acerca de suas propriedades físicas e químicas. Para tais caracterizações são necessários uma série de experimentos em busca da ampla caracterização das propriedades estruturais, eletrônicas e magnéticas. Algumas dessas propriedades são estados dependentes da temperatura em que o material se encontra. Assim, é de suma importância que medições em função da temperatura sejam realizados utilizando equipamentos/dispositivos que apresentem alta precisão e reprodutibilidade para que se tenha confiabilidade de que os resultados são relativos à temperatura especificada.

Após uma breve pesquisa acerca das demandas dentro dos laboratórios do Instituto de Física (IF) da UFRGS, foi identificado junto ao Laboratório de Altas Pressões e Materiais Avançados (LAPMA) a possibilidade de emprego um dispositivo capaz de controlar a temperatura de amostras para realizar medições de espectroscopia Raman. Essa técnica experimental é utilizada para investigar os modos vibracionais/rotacionais dos materiais a partir do espalhamento inelástico da luz após a interação com a matéria. Esses modos Raman possuem dependência tanto das características estruturais (cristalino, amorfo ou defeitos) quanto da temperatura que o material/amostra se encontra. Ainda, existem materiais que sofrem transições estruturais para diferentes fases cristalinas e apresentam modos Raman distintos para cada fase. Ainda, a técnica de espectroscopia Raman pode ser considerada uma técnica rápida quando

comparado à técnica de difração de raios-X e, portanto, torna o processo de investigação mais dinâmico no estudo de possíveis transições em função da temperatura. Assim, busca-se atender a demanda apresentada com a finalidade de ampliar a capacidade de investigação científica do IF/UFRGS.

Existem soluções comerciais para dispositivos de aquecimento de amostras para medidas Raman no mercado, porém, são importados e apresentam elevados custos tanto para aquisição quanto para eventuais manutenções. Assim, é atrativo um equipamento com custo acessível e de fácil manutenção, capaz de aquecer e manter temperaturas constantes com confiabilidade. Então, este foi o desafio que motivou este projeto final de conclusão de curso. Desta forma, o presente trabalho se propõe a projetar, construir e documentar um porta amostras com controle de temperatura confiável a um custo baixo. Esse dispositivo deverá ser capaz de monitorar e controlar a temperatura de um corpo metálica através de uma resistência elétrica controlada por algoritmo de controle PID, com capacidade de estabelecer uma taxa de aquecimento constante e manter a temperatura desejada com pequenas flutuações. A elaboração e execução do projeto reúne elementos importantes desenvolvidos durante o curso de graduação em Engenharia Física como conhecimento sobre as propriedades dos materiais a serem empregados, eletrônica, métodos computacionais, programação, sistemas instrumentados, entre outros.

Destaca-se que toda a documentação e códigos elaborados estarão disponíveis de forma aberta a *download* para reproduções e melhorias na parte de projetos no GIT do Centro de Tecnologia Acadêmica (CTA)¹. Este trabalho está pautado sob a licença GPL-v3 com a finalidade de fomentar o desenvolvimento científico e tecnológico a partir do compartilhamento e troca de conhecimento. Os materiais utilizados possuem *software* aberto e código livre.

Para o melhor entendimento do leitor este trabalho foi organizado da seguinte forma:

- 1) *Hardware*, separados em duas etapas: a) descrição do forno e os componentes utilizados, seus materiais e sua montagem e b) apresentação da central de controle, também descrevendo seus componentes, a maneira de agrupá-los e dispendo seu diagrama elétrico;
- 2) *Software*: onde trechos do código fonte são apresentados por meio de pseudocódigo separados nas seguintes sessões: bibliotecas, configurações de pinagem, variáveis, rotina de inicialização, algoritmo principal e funções;

¹ Disponível em: <https://git.cta.if.ufrgs.br/alvaro.essinger/porta-amostras-com-controle-de-temperatura/-/tree/main/>.

- 3) Teste do dispositivo: nessa seção são apresentados os testes de bancada, discussões sobre as dificuldades encontradas, as melhorias e atualizações do sistema realizadas e os resultados obtidos;
- 4) Por fim, as conclusões acerca do desempenho alcançado pelo dispositivo e potenciais utilizações.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Geral

Construir um porta amostras com controle de temperatura adaptado ao espectrômetro Raman do LAPMA.

Este dispositivo, deverá permitir ao usuário determinar a temperatura de interesse e, a partir dos parâmetros e algoritmo de controle, garantir que este atinja e mantenha a temperatura definida pelo usuário. Ainda, um desvio de cerca de 1 °C da temperatura setada com flutuação próxima a +/- 0,5 °C é aceitável para a utilização. Desta forma, para alcançar o objetivo principal surgem alguns objetivos específicos ao longo da execução deste projeto.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Criar o design e desenho técnico das peças do forno respeitando os limites dimensionais e distância de trabalho das lentes do microscópio acoplado ao espectrômetro Raman do LAPMA;
- Pesquisar e definir os materiais a serem utilizados na fabricação do forno segundo suas propriedades físicas de condutividade e estabilidade térmica;
- Desenvolver o *software* de controle PWM (em inglês *pulse width modulation*) com algoritmo PID implementado em placa de desenvolvimento Arduino modelo UNO;
- Propor e validar uma metodologia de testes de bancada para produção de curvas de aquecimento características e documentar o desempenho do sistema para temperaturas de interesse definindo as constantes de ganho do algoritmo PID para que a flutuação seja próxima a +/- 0,5 °C.

2 DESENVOLVIMENTO DO DISPOSITIVO

Como já mencionado, o dispositivo será apresentado em duas partes, uma sendo a parte do forno, onde efetivamente serão acomodadas as amostras e, outra parte relativa à fonte de alimentação e controle de temperatura via placa Arduíno, denominada na sequência central de controle. As peças do equipamento foram desenhadas e desenvolvidas em conjunto com a infraestrutura de suporte da Oficina Mecânica do Instituto de Física com o apoio do técnico Dirceu Adair Bueno Júnior e supervisão do Professor Fabrício Luiz Fanta, orientador desse trabalho. Buscando tornar o projeto financeiramente viável a baixo custo, foram escolhidos materiais existentes no LAPMA e outros adquiridos no mercado nacional. Assim, neste capítulo apresento os constituintes, fabricação e montagem do conjunto onde as amostras serão aquecidas, aqui simplesmente denominado de *forno*, e a parte elétrica e eletrônica responsável por aplicar e controlar a potência elétrica afim de aquecer e controlar a temperatura do forno, denominada de *módulo de controle*.

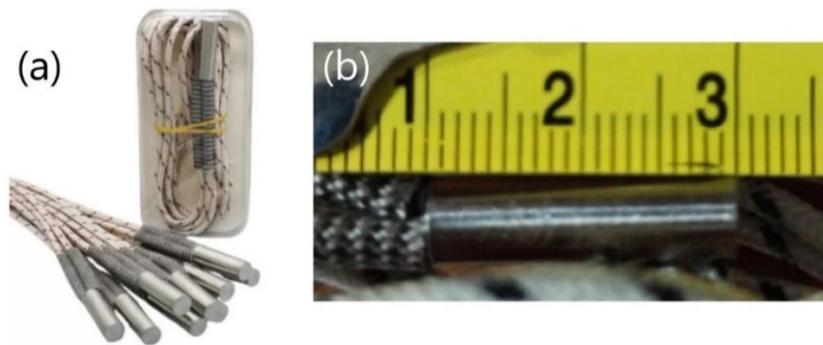
2.1 FORNO

De maneira resumida, o forno é onde a amostra será posicionada e deve ser constituído de duas partes principais, uma fonte de calor e um isolante térmico. Assim, sua principal função é elevar a temperatura até o valor desejado e manter mais estável possível. Para isso, a fonte de calor deve ter taxa de aquecimento maior do que as perdas de calor, desta forma a parte isolante precisa possuir baixa troca de calor com o ambiente externo. Especificamente para este projeto, outro fator precisa ser considerado, que é o calor transferido para as lentes do microscópio usado para as medidas de espectroscopia Raman. Assim, a taxa de transferência de calor para a parte externa precisa ser baixa e a temperatura do topo do forno precisa ser mantida baixa. Além disso, no topo do forno será necessário a existência de uma janela óptica, uma vez que os modos Raman são advindos da interação da luz com a matéria. Então, será utilizado janela de vidro com 1 mm de espessura para garantir o isolamento térmico e o caminho óptico necessário. Na sequência são apresentados todos os componentes constituintes do forno especificando aspectos importantes como material, forma geométrica, como foi produzido e como deverá ser seu desempenho do dispositivo em situação real de utilização.

2.1.1 Fonte de calor

Decidiu-se utilizar como fonte de calor uma resistência elétrica do tipo cartucho de baixa carga, operando com tensão de trabalho de 12 V e potência nominal de 70 W, podendo atingir temperatura máxima de 500 °C. Possuindo um corpo de aquecimento cilíndrico de 6 mm de diâmetro e 20 mm de comprimento, estas dimensões favorece montagem mais compacta. A Figura 1 apresenta fotos com as características da resistência utilizada.

Figura 1 - Imagens da resistência de cartucho utilizada (a) como adquirida e em (b) destacando o comprimento da região cilíndrica de aquecimento



Fonte: Elaborada pelo autor (2023).

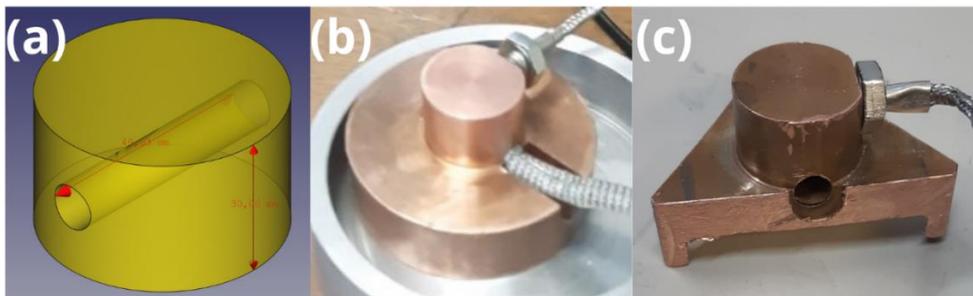
Esta resistência foi acoplada mecanicamente, garantindo boa troca de calor, em um corpo metálico de cobre, chamado a seguir de núcleo de cobre, a fim de garantir o melhor desempenho de estabilidade térmica e estabelecer uma base, de área maior, aquecida para acomodar as amostras a serem analisadas.

2.1.2 Núcleo de Cobre

O núcleo de cobre é o reservatório térmico do forno que também serve como superfície de contato térmico para a amostra. A escolha em utilizar cobre se deu por ser um material com alta condutividade térmica, permitindo um alto fluxo de calor entre a resistência e a amostra. Seu formato foi idealizado a fim de manter-se centrado no corpo isolante para que a janela óptica esteja sempre alinhada com a amostra. A Figura 2(a) mostra a ideia inicial, de formato cilíndrico uniforme, onde o desenho foi realizado utilizando o *software* FreeCAD e apresentado no TCC I. Contudo, por sugestão da banca e observações no decorrer das demais etapas do desenvolvimento, este núcleo teve duas alterações significativas (ver Figura 2 (b) e (c)).

As alterações se justificam em função da necessidade de diminuição da massa do reservatório térmico, logo, da inércia térmica. Outra necessidade para as alterações foi a de gerar espaço tanto para facilitar a instalação do termopar e da resistência, quando para a adição de material isolante no entorno do núcleo. Sendo esta segunda, a fim de melhorar a estabilidade térmica do dispositivo e foi identificado na etapa de testes de bancada. Assim, dois designs diferentes foram testados como porta amostra, design 1 (Figura 2(b)) e design 2 (Figura 2(c)). Os detalhes de desempenho e curvas de aquecimento serão apresentados no item que contempla os testes de bancada.

Figura 2 - (a) imagem esquemática do desenho técnico da peça inicialmente projetada. (b) e (c) núcleo de cobre usinado e já na configuração final dos furos para as inserções da resistência de cartucho e termopar



Fonte: Elaborada pelo autor (2023).

O design 1 seguiu a usinagem cilíndrica, porém foi feito um rebaixo na face superior da peça, abrindo espaço para a inserção do termopar de forma a ficar mais próximo da amostra. Essa versão apresentou algumas características indesejadas na montagem e no desempenho. Um dos problemas, relativo à montagem do núcleo no corpo isolante, foi a dificuldade ou impossibilidade de instalar a resistência e o termopar no núcleo de cobre e retirar os fios pelos orifícios do corpo isolante. Outro problema, relativo ao desempenho, foi observado durante os testes de bancada, onde a peça apresentou inércia térmica muito elevada e baixa eficiência energética. Especificamente para a baixa eficiência térmica, esta ocorria por conta de que a superfície de contato entre o núcleo e o corpo isolante era significativamente grande, resultando em uma elevada região de transferência de calor e no aquecimento de todo o corpo do forno.

Desta forma, o design 2 (Figura 2(c)) teve como principal alteração a retirada de material da base do núcleo de cobre, para diminuir o contato e transferência térmica com a base do corpo isolante. A retirada de material se deu pela realização de três cortes na base, resultando em uma base triangular com apenas três pontos de apoio em cada vértice do triângulo (ver Figura 3).

Figura 3 - Vista inferior do núcleo de Cobre, destaque para os três pontos de apoio



Fonte: Elaborada pelo autor (2023).

Com menos massa e menor área de contato do núcleo de cobre com o corpo isolante, observou-se uma redução na inércia térmica e na temperatura externa das paredes do corpo isolante. A redução do núcleo de cobre possibilitou a inserção de lã de rocha entre o núcleo e as paredes internas do corpo isolante, a Figura 7 mostra o resultado desse passo.

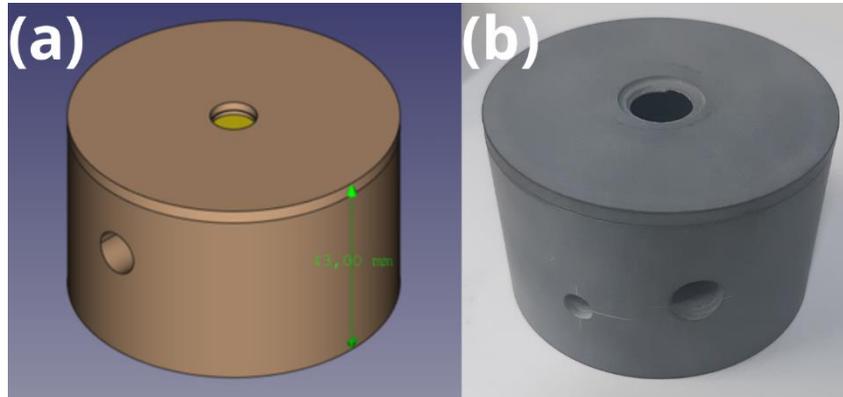
2.1.3 Corpo Isolante

Para esse constituinte optou-se por utilizar o mineral Pirofilita que é um filossilicato hidratado de alumínio, com fórmula química típica $\text{Al}_2(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_2$, apresentando cerca de 28% de Al_2O_3 , 67% de SiO_2 e 5% de H_2O , com propriedades cristalográficas e físicas similares ao talco. Este mineral apresenta baixa condutividade térmica ($\sim 0,013 \text{ cal/s.cm.}^\circ\text{C}$) (CARTE, 1955) e de fácil usinagem, antes de ser recozida à altas temperaturas ($\sim 1100^\circ\text{C}$). Sendo assim, uma boa opção para o uso como invólucro do núcleo de Cobre. Seu uso é comum no LAPMA em configurações em montagem experimental de processamentos de materiais em altas pressões, assim devido suas propriedades físicas e o fácil acesso ao material contribuiu para a sua escolha.

O desenvolvimento do corpo isolante contou com desenhos técnicos desenvolvidos com o uso do FreeCAD (ver Figura 4(a)), propostos e apresentados no TCC I. A peça foi confeccionada via usinagem em torno mecânico de um pedaço maciço do material, sendo que para essa etapa foi recebido o apoio operacional da oficina mecânica do Instituto de Física. Foi incluído um segundo furo passante na lateral, que seria para a passagem dos fios da resistência, contudo este não foi utilizado e foi preenchido com lã de rocha. Cabe destacar que o corpo isolante é constituído de uma espécie de copo e uma respectiva tampa. A tampa, também foi

fabricada de Pirofilita via usinagem, um furo com borda em degrau negativo foi feito no centro dela, onde é fixado um disco de vidro transparente que atua como janela óptica.

Figura 4 - (a) Desenho técnico do corpo isolante e (b) corpo isolante fabricado em Pirofilita por usinagem

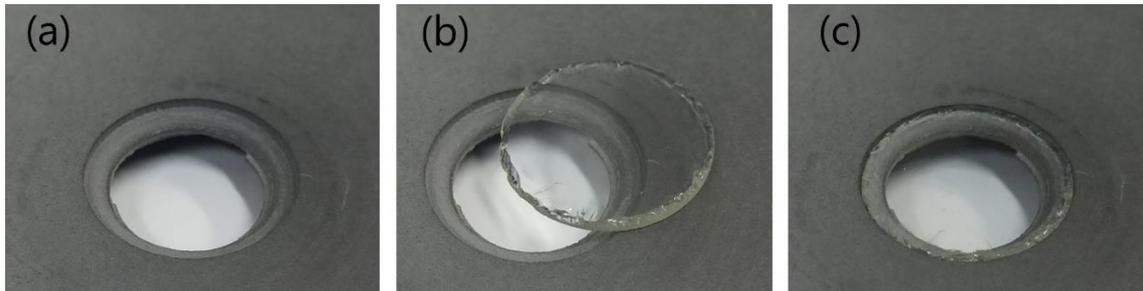


Fonte: Elaborada pelo autor (2023).

2.1.4 Janela Óptica

A passagem do laser para a realização das medidas de espectroscopia Raman, garantindo um isolamento térmico com a atmosfera do interior do forno é garantido por um disco de vidro transparente com 12 mm de diâmetro e 1 mm de espessura. Este disco foi produzido na Oficina de Vidros do Instituto de Física a partir de lâmina de microscópio. Assim, essa janela óptica deverá para proteger a lente objetiva do microscópio do calor proveniente do forno e de possíveis vapores provenientes de amostras mais voláteis. A Figura 5 apresenta fotos em detalhes desse componente do forno.

Figura 5 - Janela óptica posicionada na tampa do forno, (a) furo com o degrau em evidência, (b) disco de vidro deslocado para melhor visualização e (c) disco de vidro posicionado no furo da tampa



Fonte: Elaborada pelo autor (2023).

2.1.5 Termopar

Para leitura e controle da temperatura foi escolhido utilizar um termopar do tipo K, formado pela junção dos condutores Cromel (90% níquel 10% cromo – potencial positivo) e Alumel (95% Níquel, 5% alumínio – potencial negativo) que estabelecem uma diferença de potencial dependente da temperatura. Termopares do tipo K possuem uma faixa de operação entre negativos $-220\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $1260\text{ }^{\circ}\text{C}$ e sensibilidade de aproximadamente $41\text{ }\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$. O termopar adquirido continha uma proteção de aço inox com rosca externa na parte da junção, conforme pode ser observado na Figura 6, essa característica ajuda na fixação do termopar ao núcleo de cobre e garante o contato térmico. Além disso, este termopar possui blindagem eletrostática, permitindo aterramento no cabo, isso evita que campos elétricos externos interfiram no valor da diferença de potencial gerada pela temperatura, ou seja, tende a garantir uma leitura mais precisa.

Figura 6 - Imagem do termopar do tipo K utilizado nesse trabalho



Fonte: Elaborada pelo autor (2023).

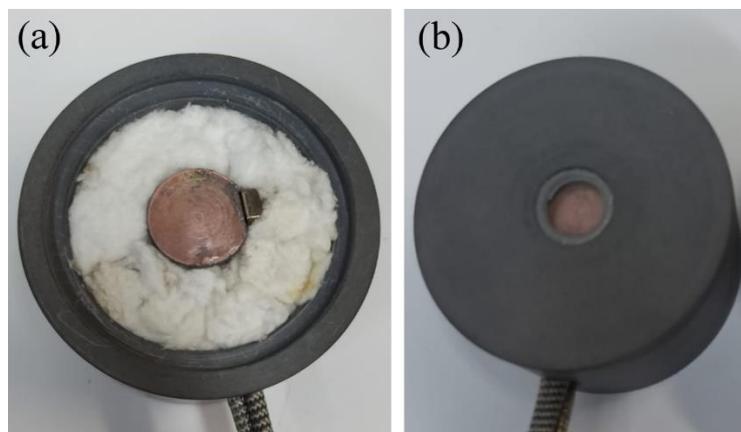
2.1.6 Montagem

Por ser um sistema que permite a completa manipulação de todas as partes, é possível desmontar e remontar todo o forno. Assim, essa seção aborda as informações, etapas e passos

mais relevantes para a montagem do forno partindo do pressuposto que as peças estejam todas separadas e independentes. Desta forma, a montagem do forno pode ser feita seguindo os seguintes passos:

- 1) Passar os fios da resistência e do termopar pelo furo maior do corpo isolante e prendendo o termopar no furo com rosca, este furo está localizado mais próximo a superfície do núcleo de cobre (local de acomodação da amostra) e inserindo a resistência no núcleo de cobre;
- 2) Forrar o fundo do corpo isolante com lã de rocha e posicionar o núcleo de cobre sobre a cama de lã de rocha, rotacionar o núcleo de cobre para tal posição onde os cabos não fiquem tensionados;
- 3) Preencher o restante do volume lateral disponível entre o núcleo de cobre e o corpo isolante com lã de rocha;
- 4) Fixar a janela óptica na tampa com o uso de adesivo silicone ou cola de ação rápida (usar pouca quantidade para não perder a planicidade com relação a tampa e a amostra). Ao final deve-se obter uma montagem do forno de acordo com a Figura 7.

Figura 7 - Forno montado (a) sem a tampa e (b) com a tampa

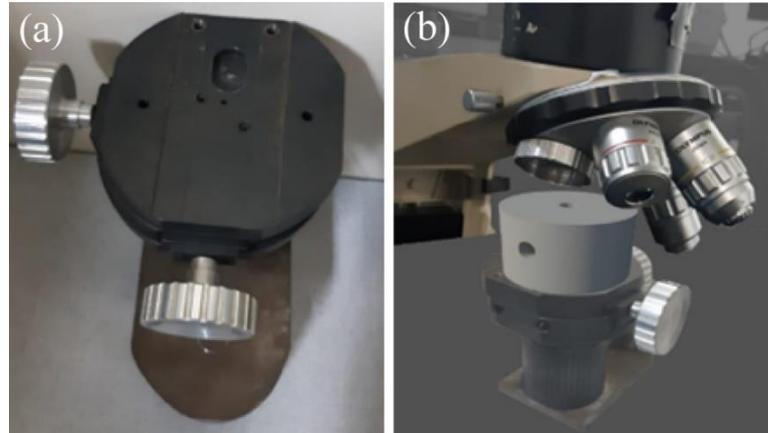


Fonte: Elaborada pelo autor (2023).

2.1.7 Suporte e acoplamento

O suporte que servirá de apoio e fixação do forno é mostrado na Figura 8. Este suporte foi desenvolvido pela oficina mecânica do IF no passado. Este suporte é usado quando desejar colocar aparatos mais pesados para a realização de medidas Raman, tais como câmaras de bigornas de diamante, uma vez que a mesa original não suporta muito peso.

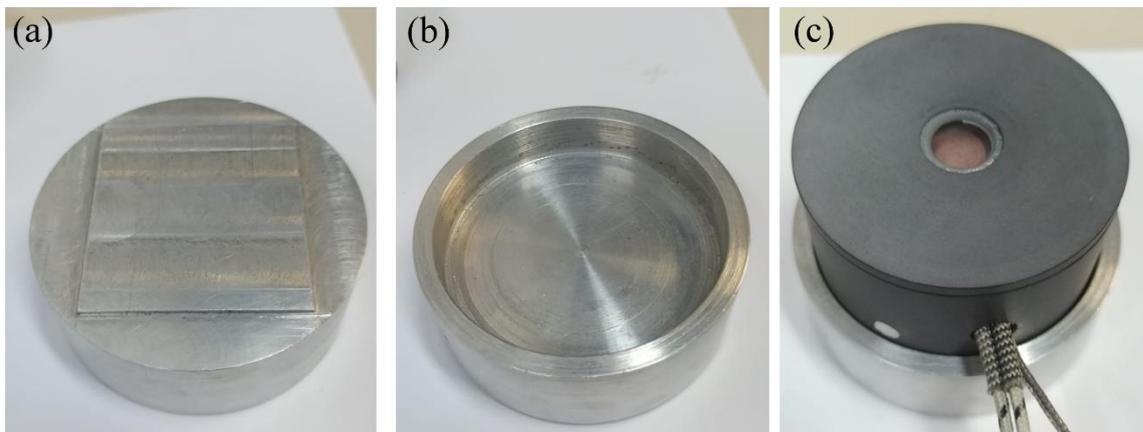
Figura 8 - (a) Vista superior do suporte e (b) montagem virtual do forno sobre o suporte no caminho óptico do espectrômetro Raman



Fonte: Elaborada pelo autor (2023).

Destaca-se que o suporte a ser usado possui regulagem nos eixos x , y e z , proporcionando possibilidade de deslocamento necessário para ajuste tanto da posição quanto do foco nas amostras a serem analisadas. Além disso, foi percebido a necessidade de fixação do forno no suporte e uma peça de acoplamento em alumínio foi usinada. A Figura 9 (a) e (b) mostra os detalhes da peça fabricada e (c) o forno acomodado em seu interior. Uma vez que o suporte possui um rebaixamento com paredes laterais paralelas (ver Figura 8(a)) a peça de acoplamento foi fabricada com um degrau positivo (ver Figura 9(a)) com as mesmas dimensões para encaixar precisamente na depressão do suporte.

Figura 9 - (a) e (b) Peça de acoplamento do forno ao suporte apresentado na Figura 8(a) e (c) forno acomodado no interior da peça



Fonte: Elaborada pelo autor (2023).

2.2 CENTRAL DE CONTROLE

Definiu-se como central de controle o conjunto de componentes responsáveis pela alimentação dos dispositivos elétricos, tais como a placa Arduino que controla a taxa de aquecimento, o relé de estado sólido e a resistência. Sendo nessa parte do equipamento que o usuário acessa os parâmetros de controle do dispositivo, define as temperaturas alvo e consegue monitorar o funcionamento do dispositivo. Assim, a central é composta por cinco peças que são descritas abaixo:

2.2.1 Fonte de Alimentação

Foi utilizada uma fonte de computador resgatada dos pertences do laboratório. A tensão de alimentação da fonte é de 100~240 Vac a 60 Hz. A sua potência nominal é de 800 W e entrega 24 A na linha de 12 V, que alimentará a resistência. O consumo de corrente da resistência representa ~25 % do que a fonte pode fornecer, tendo assim uma margem de segurança para não forçar a fonte.

2.2.2 Relé de estado sólido Fortek SSR 40 DD

O relé chaveia os circuitos de controle e de potência para ligar ou desligar a resistência. O modelo escolhido apresenta as seguintes características:

Tabela 1 - Dados técnicos de operação do relé utilizado

	Input (Vdc)	Input (mA)	Output (V)	Output (A)	Pick-up/Drop- out time (ms)	Temperatura de operação (°C)
SSR 40 DD	3~32	3~25	5~60	40	10 max	-30 a 75

Fonte: Elaborada pelo autor (2023).

Foi escolhido o modelo de relé de estado sólido pela característica do circuito PWM ter uma frequência de chaveamento relativamente alta para relés mecânicos, podendo prejudicar seu funcionamento, causando falhas e eventuais danos à amostra. Uma limitação importante deste modelo de relé é seu *Pick-up/drop-out time*, tempo necessário para o relé trocar do estado ligado para desligado e vice-versa. Portanto um ciclo completo de PWM pode levar no máximo 10 ms, logo a frequência máxima de operação para esse modelo é de 50 Hz.

2.2.3 Arduino UNO

Foi escolhido este modelo pela acessibilidade, baixo custo e por possuir larga documentação e aplicação em projetos de controles diversos na internet. O Arduino está empregado no projeto como o controlador do dispositivo. Nele está carregado o software de controle disponível como material de apoio deste trabalho. O controlador é alimentado pela fonte em sua linha de 5 V. O Arduino compõe o circuito de controle do dispositivo e está conectado a entrada de controle de chaveamento do relé (PWM) e à comunicação serial do módulo de compensação que recebe o sinal de tensão do termopar.

O controlador possui um circuito de PWM de 8-bits, recebendo valores de 0 a 255 como controle percentual do *duty cycle* para o chaveamento do relé. Podendo assim modular a tensão de 12 V aplicada à resistência. O valor de PWM é calculado pelo algoritmo de controle PID a partir do sinal de feedback do módulo compensador MAX6675 que conecta com o termopar.

2.2.4 LCD keypad Shield

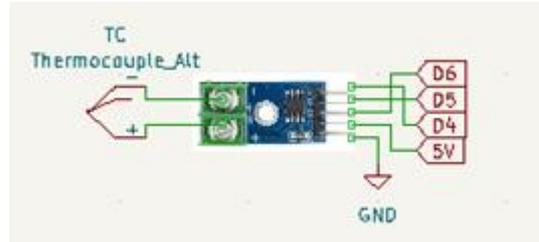
É a interface de interação humana onde o usuário define a temperatura alvo, acompanha os parâmetros de medida e controlar o estado do circuito PWM através dos botões de navegação. Por ser um Shield do Arduino a pinagem é determinada e implementada no código por uma biblioteca já existente, isso torna mais rápida a implementação de display e controle no projeto.

2.2.5 Módulo Compensador MAX6675

O módulo compensador que acompanha o kit do termopar foi implementado no circuito de feedback negativo, seu datasheet está no Anexo A deste documento. Este componente tem como função ser o amplificador que compensa e multiplica os valores de tensão da ordem de micro volts do termopar para um intervalo de leitura compatível como Arduino. A comunicação com o controlador é feita por comunicação serial de 16 bits, desses, 12 bits são referentes a medida de temperatura, ou seja, podendo variar entre 0 e 1023,75°C. A pinagem deste componente segue a tabela 2 e a conexão com o Arduino (Figura 10). Durante os testes realizados foi identificada uma grande susceptibilidade a ruídos por parte do amplificador primário do módulo, o que prejudicou as medidas de temperatura. Para solucionar esse problema foi instalado um capacitor de 0,1 μF como um filtro passa-baixa e foi feita uma

blindagem metálica para evitar ruídos eletromagnéticos provenientes do chaveamento da fonte por esses componentes estarem muito próximos.

Figura 10 - Placa do módulo compensador do termopar com conexão dos pinos do Arduino



Fonte: Elaborada pelo autor (2023).

Tabela 2 - Pinos do módulo MAX6675

Pino	Nome	Função
1	GND	Ground
2	T-	Terminal de Alumel do termopar tipo k. Deve ser conectado ao terra de forma externa
3	T+	Terminal de Cromel do termopar tipo k
4	Vcc	Alimentação positiva. Usar capacitor de 0,1µF com terra
5	SCK	Entrada de Serial Clock
6	CS	Chip Select. Definir CS em LOW para habilitar comunicação serial
7	SO	Saída de comunicação Serial
8	N.C.	Sem conexão

Fonte: Elaborada pelo autor (2023).

2.2.6 Montagem

A montagem foi feita em parceria com a oficina de eletrônica do IF. Um gabinete de um equipamento desativado foi recuperado e adaptado ao projeto. O gabinete possui dois nichos, separados por uma chapa metálica que serve de suporte de fixação do Arduino e do módulo amplificador do termopar. Esses dois componentes foram fixados com o uso de fita dupla-face com preenchimento de espuma para garantir o isolamento elétrico entre seus componentes e o gabinete. No outro nicho estão acomodados a fonte e o relé, fixados com o uso de parafusos diretamente ao gabinete. A chapa de alumínio onde está fixado o relé funciona como dissipador de calor. O gabinete possui uma tampa com abertura vertical que desliza sobre as paredes laterais. Há uma ventoinha alimentada com 12 V pela fonte instalada na tampa para causar um fluxo de ar forçado no gabinete ajudando na refrigeração dos componentes.

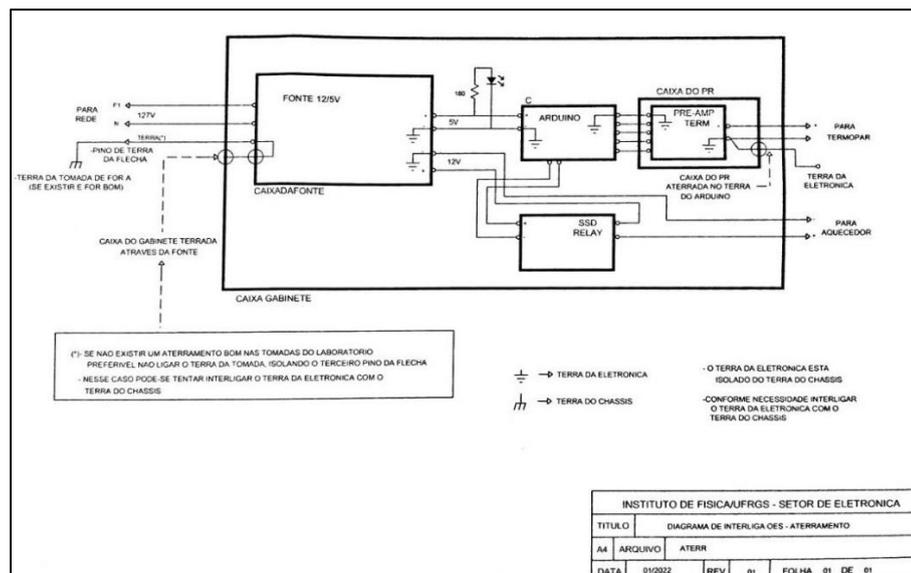
Existem dois circuitos principais na construção deste dispositivo: o circuito de alimentação e o circuito de controle. Os circuitos possuem terras diferentes, uma vez que flutuações e ruídos no terra do circuito de controle podem interferir na medida por serem

amplificados pelo pré-amplificador do módulo de compensação. A montagem do circuito de controle é composta pelo controlador (Arduino UNO), circuito de feedback (termopar tipo K + módulo MAX6675) e circuito de chaveamento (relé de estado sólido). O circuito de alimentação é composto pela fonte, circuito de potência da resistência (12 V), alimentação do Arduino (5 V), botão switch ON/OFF para ligar e desligar a central e um led verde indicador do estado da fonte.

2.2.7 Diagrama elétrico

O diagrama elétrico foi desenhado pelo Eng. Mauro Finn, responsável pela oficina de eletrônica do IF, que auxiliou na montagem final da central de controle.

Figura 11 - Diagrama elétrico da central de controle



Fonte: Elaborado pelo Eng. Mauro Finn, setor de Eletrônica, UFRGS.

2.2.8 Custos do Projeto

Os custos financeiros do projeto estão demonstrados na tabela 3. Vale notar que a infraestrutura do Instituto de Física ajudou a baixar o custo final do projeto, uma vez que os serviços de mecânica com tornos e a consultoria feita por parte do laboratório de eletrônica não oneraram o desenvolvimento do trabalho. Também algumas peças e componentes como o gabinete utilizado, fonte de alimentação, cabos, conectores e ferramentas foram cedidos pelo laboratório.

Tabela 3 – Custo por item

Item	Custo (R\$)
Arduino UNO + Shield LCD com botões	180
Resistência	80
Termopar + módulo	50
Cobre	140
Relé	50

Fonte: Elaborada pelo autor (2023).

2.3 SOFTWARE

O programa do controlador foi desenvolvido em linguagem C++ na IDE (*Integrated Development Environment*) do Arduino. O código está comentado para melhor entendimento das suas características e funcionalidades afim de futuras melhorias e ampliações das suas capacidades. As funções do Shield LCD utilizado e seus botões foram implementados conforme.

Os parâmetros de ganho do algoritmo de controle PID devem ser alterados no código e então atualizados para o hardware via conexão USB.

Abaixo estão comentadas as partes mais importantes do código bem como suas funções.

2.3.1 Organização

O código está organizado em três partes principais: 1) Declaração de bibliotecas; 2) Função/Loop principal; 3) Funções. Algumas dessas seções de código estão separadas aqui para melhor entendimento do leitor. O código está com comentários para identificar as separações aqui propostas.

2.3.2 Bibliotecas

As bibliotecas utilizadas na implementação desse código estão descritas abaixo. Vale notar que foi utilizada uma biblioteca importada para possibilitar a modificação dos valores-base dos pinos de controle PWM do Arduino UNO. Essa biblioteca se encontra referenciada e anexada no GIT do trabalho para possibilitar o download e reprodução do projeto.

Tabela 4 - Bibliotecas utilizadas no software do controlador

Biblioteca	Função
LiquidCrystal.h	Habilita funções de controle como lcd.begin(cols,rows), lcd.setCursor(col,row) e lcd.print(data)
SPI.h	Habilita a comunicação serial e define funções como CS (chip select) e SCK (serial clock)
PWM.h ²	Biblioteca add-on. Possibilita a alteração da frequência de controle nos pinos PWM via função SetPinFrequencySafe(pin, frequency)

Fonte: Elaborada pelo autor (2023).

2.3.3 Configuração de pinos do Arduino

Os dispositivos conectados ao Arduino UNO usam os seguintes pinos:

Tabela 5 - Configuração de conexão do módulo MAX6675 ao Arduino

Módulo do termopar MAX6675	Serial Clock Input (SCK)	Chip Select (CS)	Serial Data Output (SO)
Pino	13	2	12

Fonte: Elaborada pelo autor (2023).

Tabela 6 - Configuração de conexão do relé ao Arduino

Relé de estado sólido SSR	Input (controle)
Pino	3

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Tabela 7 - Configuração de conexão do shield LCD ao Arduino

LCD Shield	Botões direcionais	Controle LCD	Iluminação painel LCD
Pino	A0	4, 5, 6, 7, 8, 9	10

Fonte: Elaborada pelo autor (2023).

2.3.4 Variáveis

As variáveis utilizadas para implementação do código se encontram na seção de código abaixo, separadas em variáveis globais e variáveis de função. Atente que as variáveis globais não devem ser alteradas. As variáveis que o usuário pode vir a alterar para buscar um melhor desempenho estão descritas na seção das constantes de ganho PID.

² Arduino (2016).

2.3.4.1 Globais

As variáveis globais são valores declarados como constantes e utilizadas ao longo de todo o código como referência em diferentes funções. Esses valores definem as seguintes grandezas: a) valor máximo de temperatura (`MAX_TEMP`); b) intervalo de valores do circuito PWM (`pwm_value`); c) valores de limites mínimos e máximos de saída para o controle PID (`MIN/PID_VALUE`); d) valor de frequência do circuito PWM (`frequency`).

Abaixo, fragmento retirado do código-fonte:

```
MAX_TEMP = 490
pwm_value = 255
MIN_PID_VALUE = 0
MAX_PID_VALUE1 = 178.5
MAX_PID_VALUE2 = 229.5
MAX_PID_VALUE3 = 255
frequency = 32
```

2.3.4.2 Variáveis de função

As variáveis de função são valores utilizados e manipulados ao longo do programa. Desempenham funcionalidades para a navegação de menus, estados de operação do circuito PWM, definição de grandezas como temperatura e setpoint. Abaixo, fragmento retirado do código-fonte:

```
int Menu
int estado
int running_mode
float temperature
float temp_setpoint
```

2.3.5 Constantes de ganho PID

As constantes de ganho do algoritmo de controle PID estão declaradas de forma separada para que eventualmente o usuário possa alterá-las buscando melhorar o desempenho. Os valores das constantes apresentados aqui foram obtidos a partir dos testes de bancada

descritos no capítulo 5 deste trabalho. Abaixo, fragmento retirado do código-fonte para as constantes de ganho PID:

```
float Kp = 5;
float Ki = 0.0010;
float Kd = 10;
```

2.3.6 Set Up

O Set Up do código inicializa o sistema quando o dispositivo é ligado. Definindo valores de estado e variáveis. A condição de início deste controlador assegura que o circuito de PWM está desligado por medida de segurança. Abaixo, fragmento retirado do código-fonte das funções necessárias para o funcionamento da biblioteca *add-on* PWM.h

Inicializando temporizadores e definindo frequência do pino de saída PWM:

```
InitTimersSafe();
SetPinFrequencySafe(SSR, frequency);
```

Inicializa o display LCD, escrevendo o menu título e definindo a frequência de comunicação serial:

```
lcd.begin(16, 2);
clearPrintTitle();
Serial.begin(9600);
```

Define os pinos de comunicação do módulo MAX6675:

```
pinMode(MAX6675_CS, OUTPUT);
pinMode(MAX6675_SO, INPUT);
pinMode(MAX6675_SCK, OUTPUT);
```

Define o pino de saída do controle de chaveamento do relé e define como sinal LOW.

```
pinMode(SSR, OUTPUT);
digitalWrite(SSR, LOW);
```

2.3.7 Algoritmo Principal

O algoritmo principal é definido por dois estados de funcionamento. A partir de uma variável de controle “*running_mode*” que pode assumir valores zero ou um, o algoritmo principal passa a ter um ou outro estado e função.

Para o estado de “running_mode” igual a zero o dispositivo apresenta a navegação dos menus de configuração conforme Anexo A.4 e A.5. Nesse estado o PWM fica desligado e é apresentado através do display LCD os menus de navegação ao usuário. Nesse estado é possível, por meio da comunicação serial, ser monitorado via Datalog em tempo real conforme Anexo A.8. Abaixo, fragmento retirado do código-fonte:

```

if(running_mode == 0)
{
    digitalWrite(SSR, LOW);
    MenuPrincipal();

    float temperature = readThermocouple();
    Serial.println(temperature);
}

```

A função “MenuPrincipal” é responsável por iniciar os valores das variáveis de estado (ValEstado) que representa cada um dos menus.

Quando “running_mode” é 1, o controlador passa a executar a parte do código referente ao controle PID e à tela de operação, conforme Anexo A.6.

```

if (running_mode == 1)
{

```

Função que altera set_temp durante operação:

```

readButtonSetTempRUN();

```

Lê e printa a temperatura do termopar na saída serial para plotar gráficos em tempo real:

```

float temperature = readThermocouple();
Serial.println(temperature);

```

Calcula o valor de PID que será a saída do PWM:

```

Calculate_PID();

```

Configura a tela de monitoramento da operação:

```

lcd.clear();
lcd.setCursor(0,0);
lcd.print("ON");

```

Imprime na tela o valor salvo de set_temp

```

lcd.setCursor(10,0);
lcd.print("Ts=");
lcd.print(temp_setpoint);

```

```
lcd.setCursor(0,2);
lcd.print("PWM=");
```

Faz a conversão de valores de 8bit para percentual entre 0 e 100:

```
lcd.print(map(PID_Output,0,255,0,100));
```

Imprime na tela o valor de temperatura atual:

```
lcd.setCursor(8, 2);
lcd.print("T=");
lcd.print(temperature);
```

Monitora se o botão “right” é pressionado para encerrar a operação. Zera o PWM e `running_mode = 0`, voltando para o estado anterior.

```
int x = analogRead (0);
if(x < 10)
{
  lcd.setCursor(0,0);
  lcd.print("OFF");
  digitalWrite(SSR, LOW);
  running_mode = 0;
}
```

2.3.8 Funções

O programa desenvolvido possui 13 funções que estão localizadas ao final do código-fonte. Aqui estão apresentadas apenas as consideradas mais importantes para o entendimento do software. A navegação dos menus e suas funcionalidades não serão apresentadas aqui.

a) O algoritmo PID

A função que calcula o PID é mostrada abaixo:

```
PID_P = Kp*PID_ERROR;
PID_I = PID_I+(Ki*PID_ERROR);
PID_D = Kd * (PID_ERROR-PREV_ERROR);
PID_Output = PID_P + PID_I + PID_D;
```

Contudo os valores de `PID_Output` máximos são distintos dependendo da faixa de temperatura de trabalho. Esses são os termos `MAX_PID_VALUE` descritos na sessão sobre *variáveis globais* e tem os seguintes intervalos.

Tabela 8 - Valores MAX_PID_VALUE e suas equivalências

MAX_PID_VALUE	Intervalo (°C)	Valor (bits)	PWM (%)
1	RT~200	178,5	70
2	200~300	229,5	90
3	300~500	255	100

Fonte: Elaborada pelo autor (2023).

b) Leitura do termopar

Para realizar a leitura do termopar através da comunicação serial feita entre o controlador e o módulo compensador foi definido um inteiro de 16bit para registrar os dados do termopar. Os bits 0 ao bit 3 são bits de status e são descartados da medida. O bit 15 é um dummy bit sempre igual a zero. Os bits restantes são relativos ao sinal de temperatura em unidades de 0.25°C, logo fazendo essa multiplicação temos o valor final de temperatura. Abaixo, fragmento retirado do código-fonte:

```

readThermocouple() {
  uint16_t v;
  digitalWrite(MAX6675_CS, LOW);
  delay(1);
  v = shiftIn(MAX6675_SO, MAX6675_SCK, MSBFIRST);
  v <<= 8;
  v |= shiftIn(MAX6675_SO, MAX6675_SCK, MSBFIRST);
  digitalWrite(MAX6675_CS, HIGH);
  if (v & 0x4)
  {
    return NAN;
  }
  v >>= 3;
  return v*0.25;
}

```

A linha 9 dessa função apresenta um teste sobre o bit 2. Quando o termopar está desconectado, o bit 2 assume valor 1. Caso isso ocorra, o Arduino retorna o valor “Nan” para a leitura do termopar.

3 TESTES DE OPERAÇÃO

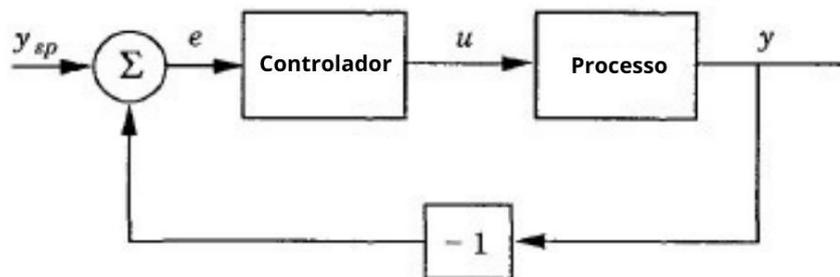
Esta seção está particionada em fundamentação teórica e testes de bancada. A primeira busca justificar a escolha do algoritmo de controle e apresenta os principais índices de desempenho para serem avaliados e comparados nos testes feitos. A segunda parte apresentamos os resultados obtidos dos testes realizados, onde o aquecimento foi monitorado e a partir destes resultados e/ou comportamentos das curvas de aquecimento as constantes PID foram sendo ajustadas.

3.1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O controle de processos pode ser modelado de diferentes formas. Cada técnica desenvolvida supre uma necessidade de aplicação e apresenta graus de complexidade diferentes. A ideia de um sistema de controle que depende de um valor de retorno, ou *feedback*, é relativamente simples, ainda assim, muito poderosa. O princípio de um sistema controlado por sinal de retorno pode ser explicitado da seguinte forma: “Aumenta-se a variável de controle quando a variável de processo é menor do que o valor alvo e diminui-se a variável de controle quando a variável de processo é maior do que o valor alvo” (ASTRÖM; HÄGGGLUND, 1934, p. 60, tradução nossa).

Esse tipo de controle é dito controle de *feedback* negativo, uma vez que a variável manipulada sempre adquire sinal contrário à variável de processo. O diagrama de blocos da figura 12 ilustra esse princípio. As caixas representam o controlador e o processo com flechas indicando entradas (*inputs*) e saídas (*outputs*) de sinal. O sinal de somatório representa a soma dos sinais, como um algoritmo de controle genérico. A presença da caixa representando a inversão de sinal mostra que o feedback é negativo.

Figura 12 - Diagrama de blocos para um controlador genérico



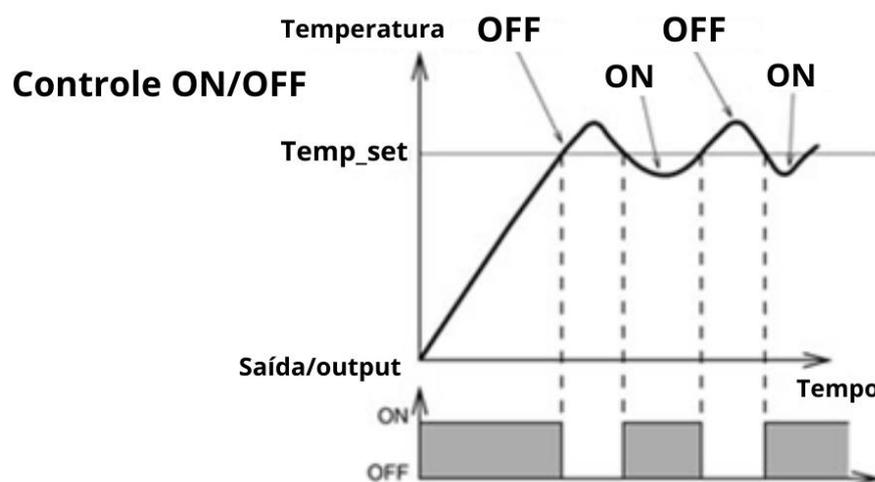
Fonte: Adaptada pelo autor (2023) de Astrom e Häggglund (1934, p. 60).

Para sistemas de controle de temperatura existem algumas técnicas disponíveis como:

1) Controle Liga-Desliga (*On/Off*):

Esse tipo de controle recebe estímulo de um sensor e quando se atinge um valor limite previamente determinado, liga-se ou desliga-se um atuador. Esse tipo de controle tem como principal característica a simplicidade. Contudo, apresenta uma variação significativa em torno do valor alvo. Uma vez que, a utilização do porta-amostras poderá ser feita com amostras sensíveis à temperatura (transição de fase ou degradação), é necessário evitar ao máximo essas variações da temperatura alvo. A figura 13 mostra um gráfico da resposta típica de um controlador *on/off*, onde são indicadas as fases em que o atuador mantém o aquecimento ligado e desligado.

Figura 13 - Resposta de um controle On/Off



Fonte: Adaptada pelo autor (2023) de What... ([2023?]).

2) Uso de autotransformador ‘Variac’

O controle de temperatura pode ser feito alterando o valor de tensão por meio de um autotransformador. Dessa forma se regula a potência dissipada no porta-amostras. O maior limitante nesse tipo de projeto é a operação e calibração manual. Um sensor termopar pode ser usado como feedback para o usuário ajustar a tensão de acordo com o valor de temperatura que deseja estabilizar no porta-amostras. Contudo não há controle de rampas de aquecimento ou limites para evitar transições de fase indesejadas.

3) Controle PWM com algoritmo PID

O controle PID (proporcional – integral – diferencial) minimiza a oscilação da temperatura e faz com que seu valor se estabilize de forma “suave” por uma aproximação do

valor alvo de forma a não ultrapassar. Isso torna possível ter uma maior confiança em não causar transições de fase de forma não proposital. Para tal se monitora a aproximação e gradualmente se diminui a potência dissipada pela resistência até atingir uma situação estacionária. Isso é possível através de uma quantidade chamada erro (diferença entre a temperatura atual e a temperatura alvo) à medida que o erro diminui, o controlador diminui gradualmente a potência.

O PID é um algoritmo de controle de três parâmetros muito utilizado em soluções industriais e científicas em que é necessário controle contínuo. O controlador PID continuamente calcula a quantidade erro $e(t)$, diferença entre o *setpoint* (SP) e a variável do processo (VP), e aplica correções baseado nos termos proporcional, integral e derivativo (respectivamente P, I e D) e suas constantes de ganho K_p , K_i e K_d . Esses termos são somados para ser calculado o valor de saída do controle $u(t)$.

Assim temos que:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

Onde, K_p é o ganho proporcional, K_i é o ganho integrativo, K_d é ganho derivativo, $e(t) = SP - VP(t)$ é o erro, SP e VP são o *setpoint*/valor alvo e valor de processo respectivamente, t é o parâmetro temporal, τ é a variável de integração que integra o intervalo de $t=0$ ao presente $\tau = t$.

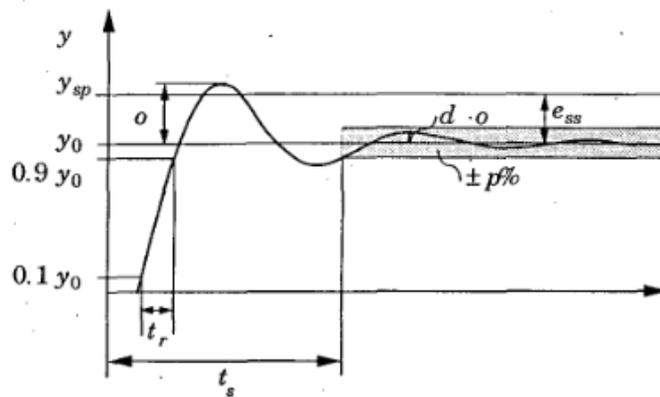
A seleção de constantes de ganho para sistemas de controle PID é uma etapa crucial no processo de design do sistema. Uma das vantagens de controles PID é que cada um de seus parâmetros de controle possui uma clara significância física. A constante proporcional impacta diretamente sobre a velocidade de resposta e taxa de aquecimento, contudo resulta em uma resposta com maior oscilação. Aumentando o valor da constante integral, espera-se uma resposta mais lenta e mais estável do sistema. Por último, a constante derivativa, quando aumentada, possui efeito de amortecimento (*damping effect*) (VISIOLI, 2006, p. 16) podendo criar um estado de controle criticamente amortecido onde o parâmetro de controle não ultrapassa o valor de interesse.

Conforme Astrom e Hägglund (1934, p. 127), entende-se o sistema deste trabalho como um “[...] *set point following PID control*”, logo o sistema genérico desse tipo apresenta uma curva como a da Figura 13, onde podemos identificar e comparar o desempenho em relação a:

- Rise time (t_r): Tempo decorrido para a resposta de controle passar entre 10 e 90% do Set Point (y_{sp});

- Settling time (t_s): Tempo decorrido até a resposta de controle permanecer numa faixa de valores $\pm p\%$ de seu valor estável (y_0);
- Overshoot (o): Valor que a variável de processo (y) ultrapassa o set point (y_{sp}) expressado em percentual do valor estável final (y_0);
- Erro de estado estável (e_{ss}): Diferença entre o valor estável (y_0) e o set point (y_{sp}).

Figura 14 - Controle PID *set point following*



Fonte: Astrom e Häggglund (1934, p. 127).

Os pesquisadores do LAPMA por realizarem estudos das propriedades de materiais utilizam a espectroscopia Raman como técnica de análise/investigação. Por vezes é importante mapear mudanças estruturais ou a variação das características dos materiais investigados em função da temperatura. Desta forma, medidas *in situ* permitem acompanhar essa evolução/alteração e determinar em qual temperatura está ocorrendo a transição observada. Logo é um requisito muito importante ter precisão na obtenção da temperatura desejada, isso implica encontrar as melhores constantes de ganho para ter um sistema criticamente amortecido. Para isso, busca-se zerar o valor de *overshoot* do sistema por meio da constante derivativa, bem como minimizar e_{ss} por meio da constante integrativa. Os valores de *rise time* e *settling time* não são limitantes para a aplicação do projeto, contudo serão analisadas ao longo do desenvolvimento por justificativa de conhecimento e caracterização do sistema.

3.2 TESTES DE AQUECIMENTO EM BANCADA

Para analisar o desempenho do sistema de controle de temperatura foi proposta e aplicada uma metodologia que envolve duas etapas de testes. Primeiramente o dispositivo foi submetido a uma sequência de testes em bancada onde suas capacidades de aquecimento,

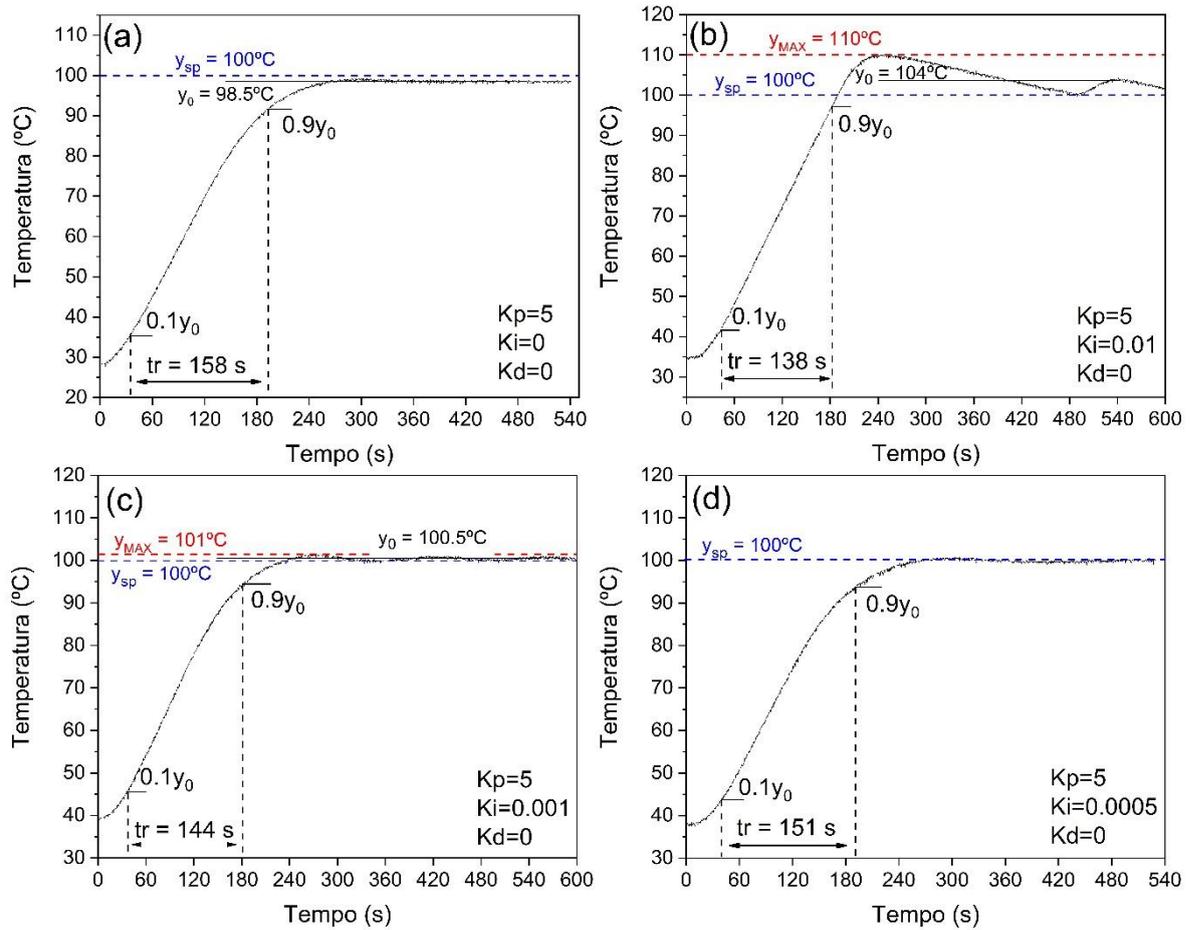
isolamento, design e usabilidade foram analisadas e documentadas, com o intuito de determinar o comportamento geral do sistema e suas limitações. Nessa etapa foram definidas as constantes de ganho do controle PID utilizando da metodologia *trial and error* para obter um sistema criticamente amortecido como explicado no capítulo anterior. Também foram feitas modificações importantes buscando melhoria no design e desempenho. O segundo teste buscou responder aos limites de segurança acerca do aquecimento das lentes objetivas do microscópio. Nessa etapa foram realizadas medidas de temperatura na parte externa do forno em diferentes pontos. Os gráficos foram gerados a partir da comunicação serial do controlador com a conexão via Microsoft Excel conforme (MIKA, 2021; MIKA *et al.*, 2021) presentes no anexo A.8 deste trabalho. Os testes estão organizados nos subitens a seguir.

3.2.1 Curvas de aquecimento

Inicialmente foram feitos alguns testes apenas com valores de K_p para entender o tipo de resposta que temos em relação à taxa de aquecimento e tempo de resposta do sistema. O termo proporcional é ajustado pelo método de tentativa e erro por meio da sensibilidade de resposta sobre o feedback do sistema. Na situação do presente trabalho é em função da inércia térmica do núcleo de cobre e isolamento térmico do forno que o tempo de resposta é influenciado. Um valor condizente para o sistema apresenta uma oscilação coerente com o tempo de resposta, podendo haver *overshoot* e erro de valor estável (e_{ss}). Essas medidas não foram registradas e não estão incluídas neste trabalho. Ao fim dessa série de testes foi definido o valor de $K_p = 5$, que apresentou o melhor resultado.

Para atingir o comportamento de sistema criticamente amortecido, foram zeradas as constantes K_i e K_d e um valor ótimo de K_p foi encontrado (FIGURA 15 a). Nessa situação temos que $e_{ss} = 1,5^\circ\text{C}$, maior do que o limite esperado para a necessidade da aplicação. Então, K_i foi inserida enquanto K_d mantida em zero para buscar zerar o valor de erro de estado estável. Quando K_i foi inserido ocorreu *overshoot*, mostrando que o valor de K_i inicial foi muito alto. Logo foi diminuído até retornar ao comportamento sem *overshoot* e zerando o valor de e_{ss} , conforme Figura 15, gráficos (b), (c) e (d).

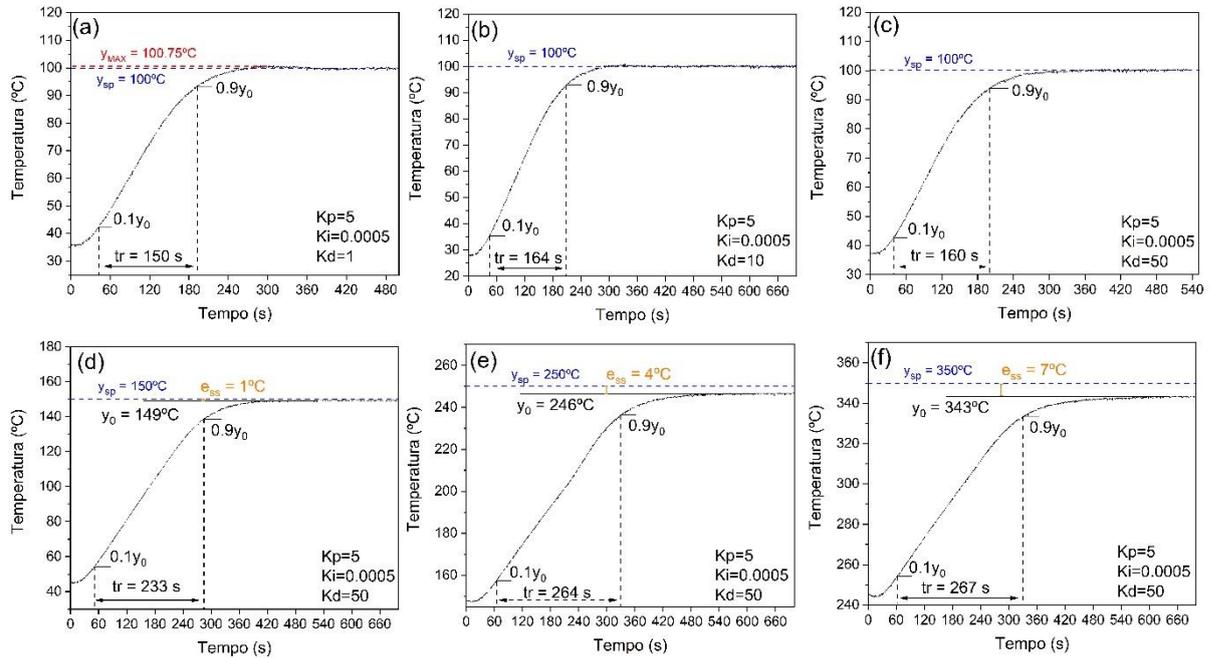
Figura 15 - Curvas de aquecimento realizadas para diferentes valores de Ki



Fonte: Elaborada pelo autor (2023).

Em seguida foi inserida a constante K_d . Como inicialmente não fora notada nenhuma alteração significativa no sistema, foi extrapolado o valor dessa constante conforme os gráficos a, b e c da Figura 15. Mas ainda não resultando em nenhuma alteração de comportamento. A medida foi repetida para diferentes intervalos de temperatura conforme os gráficos d, e, f da Figura 15. Notou-se que para temperaturas mais altas, esse apresentava uma tendência de aumento, chegando a 7°C para $y_{sp} = 350^{\circ}\text{C}$, gráfico f.

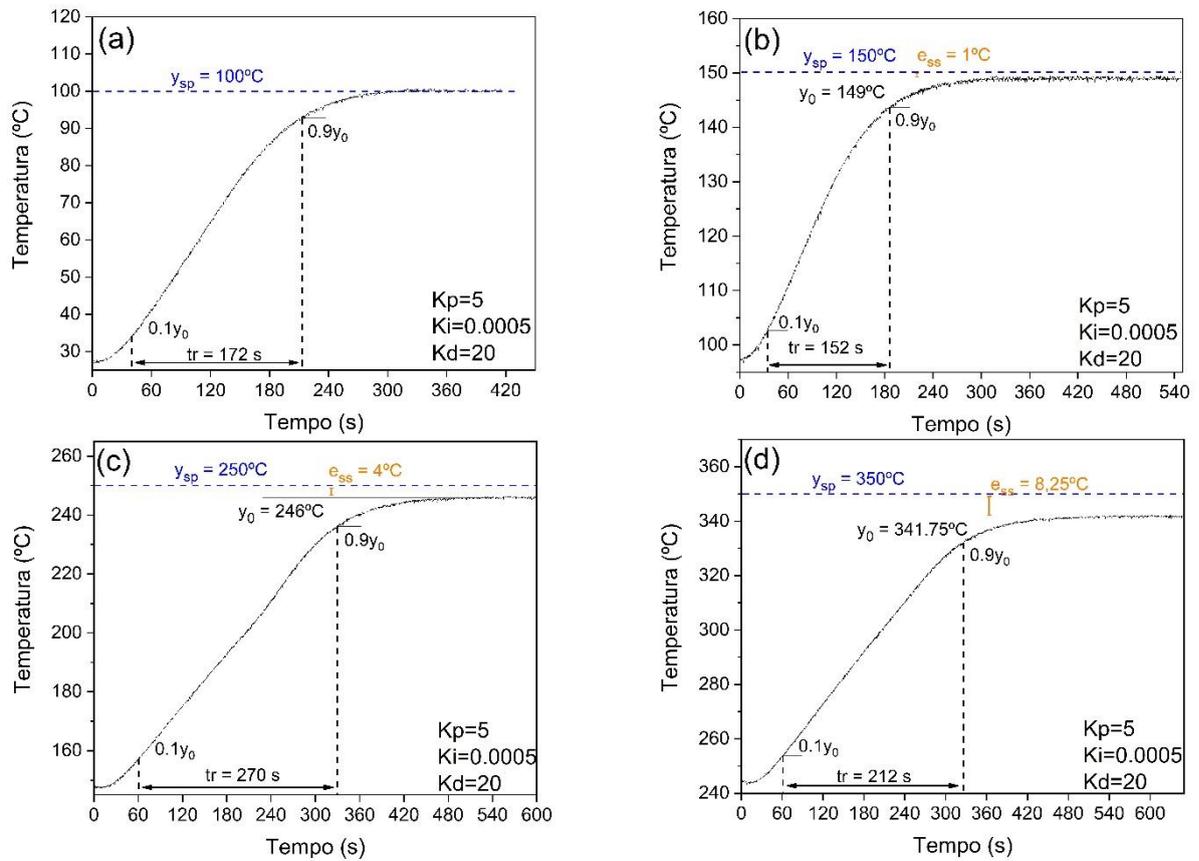
Figura 16 - Curvas de aquecimento realizadas para: diferentes valores de K_d (a), (b) e (c); diferentes faixas de temperatura com K_d constante (d), (e) e (f)



Fonte: Elaborada pelo autor (2023).

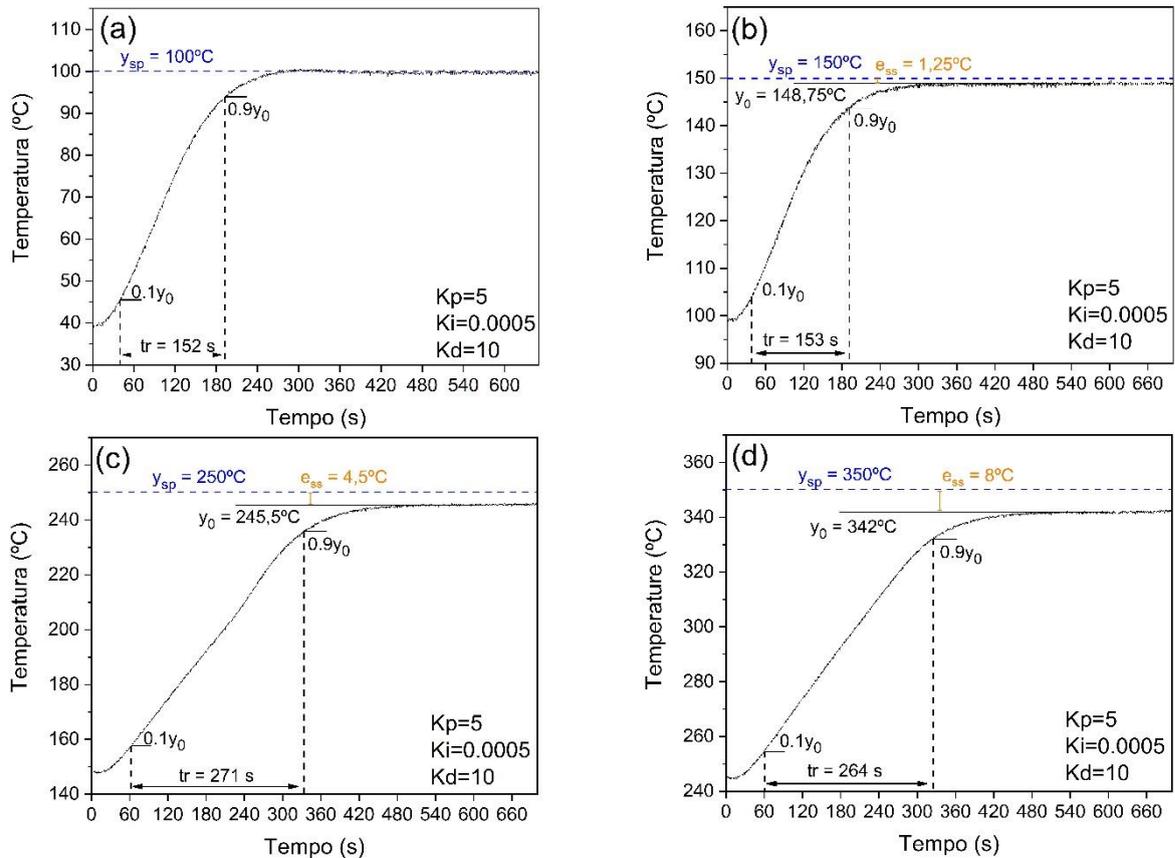
As medidas foram repetidas para quatro faixas de temperatura: RT-100°C, 100-150 °C, 150-250 °C e 250-350 °C. Foram utilizados valores de $K_d = 20$, Figura 16, e $K_d = 10$, Figura 17.

Figura 17 - Curvas de aquecimento realizadas mantendo $K_d = 20$



Fonte: Elaborada pelo autor (2023).

Figura 18 - Curvas de aquecimento realizadas mantendo $K_d = 10$

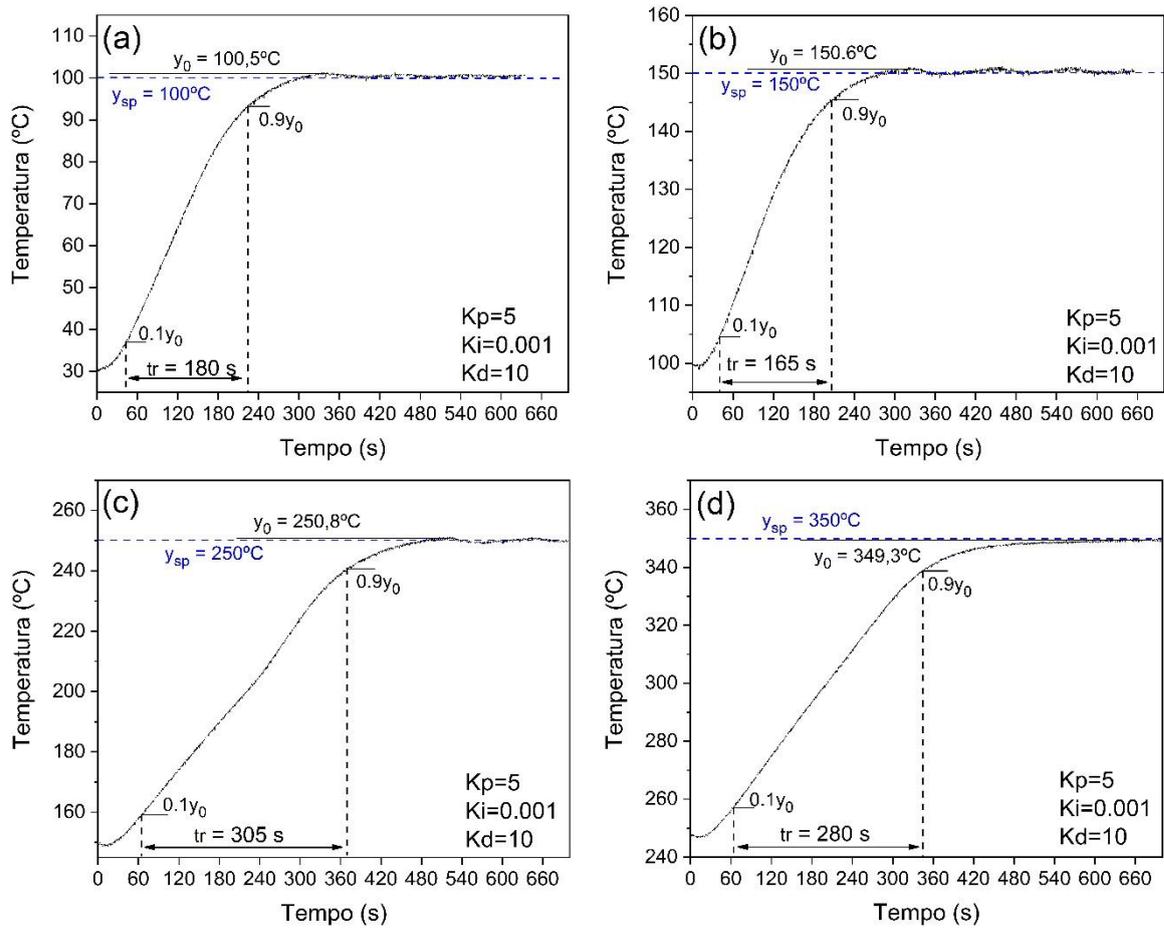


Fonte: Elaborada pelo autor (2023).

Apesar das mudanças de valores de K_d , os comportamentos foram muito semelhantes, inclusive nas taxas de aquecimento e tempos de aquecimento. Como o valor do ganho derivativo foi extrapolado e retornado para o valor utilizado inicialmente sem impacto notável no comportamento do sistema, acabou por ser mantido com valor igual a 10. Então, K_i foi alterado e o resultado obtido está mostrado na Figura 18.

A constante integrativa tem impacto sobre o valor de e_{ss} ao longo do tempo. Ou seja, o termo da somatória referente ao erro aumenta se o erro persiste ao longo do tempo. Isso torna K_i a constante responsável por aproximar y_0 de y_{sp} quando há um estado estável, aumentando a precisão do sistema. Note que para os resultados da Figura 19 já não há valor de e_{ss} indicado, por estar dentro do intervalo de incerteza de medida do termopar.

Figura 19 - Curvas de aquecimento para $K_i = 0,001$



Fonte: Elaborada pelo autor (2023).

Esse último conjunto de resultado contempla todos os requerimentos de desempenho de aquecimento e controle descritos para a aplicação do LAPMA. Logo são essas as constantes de ganho do PID tomadas como adequadas e definidas para o sistema.

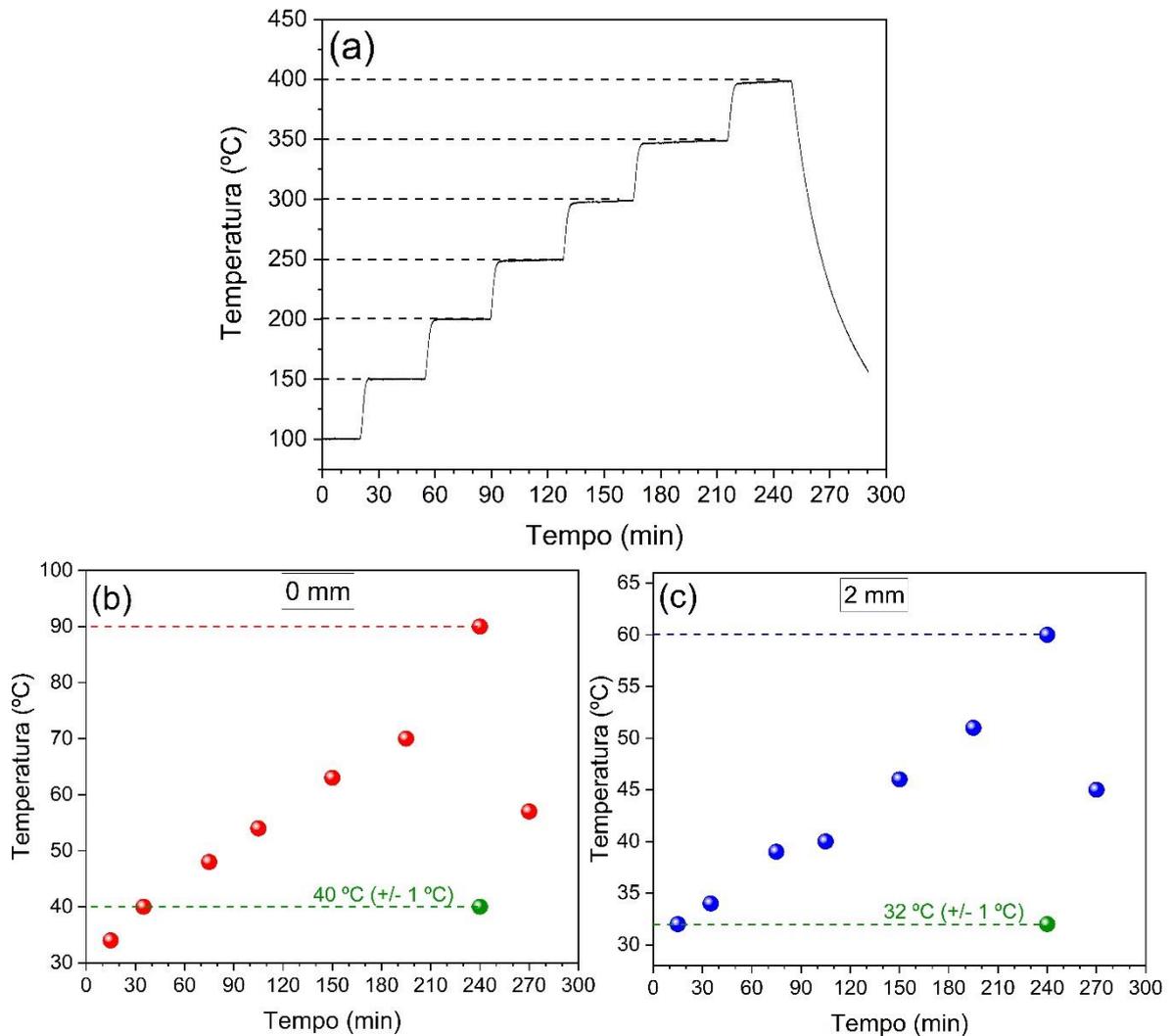
3.2.2 Monitoramento da temperatura externa

Como a instalação e operação do acessório será feita em um microscópio óptico, foi uma preocupação a quantidade de energia transferida para o ambiente e equipamentos próximos. As lentes do microscópio são sensíveis à temperatura e podem ser facilmente danificadas, logo foram feitas medidas da temperatura em dois pontos de interesse. O primeiro ponto de medida foi a superfície da janela óptica. O outro ponto foi 2 mm acima do primeiro, buscando simular a distância de trabalho da lente objetiva.

Foi feito uma curva de aquecimento do forno começando de 100°C e aumentando a temperatura de 50 em 50°C , mantendo em cada valor por ~ 15 minutos a fim de atingir um

equilíbrio térmico do corpo do forno. Ao fim de cada intervalo de tempo foi anotado os valores de temperatura de ambos os pontos e assim por diante. Essa curva é mostrada na Figura 20 (a).

Figura 20 - (a) Curva de aquecimento em etapas de 50 °C (b) medidas de temperatura na superfície da janela óptica, (c) medidas de temperatura a 2 mm acima da janela óptica



Fonte: Elaborada pelo autor (2023).

As medidas de temperatura da superfície e a 2 mm da janela Figura 20 (b) e (c) mostram uma tendência inicialmente linear de transferência de energia, porém para 400 °C as temperaturas medidas foram consideravelmente maiores que as esperadas. Nessa situação foi instalado uma ventoinha de computador de 12 v de 12 mm de diâmetro apontada para a superfície da tampa e as temperaturas medidas nessa situação foram respectivamente 255% e 187% menores na superfície da janela e a 2 mm, mostrado pelos pontos verdes na Figura 20 (b) e (c).

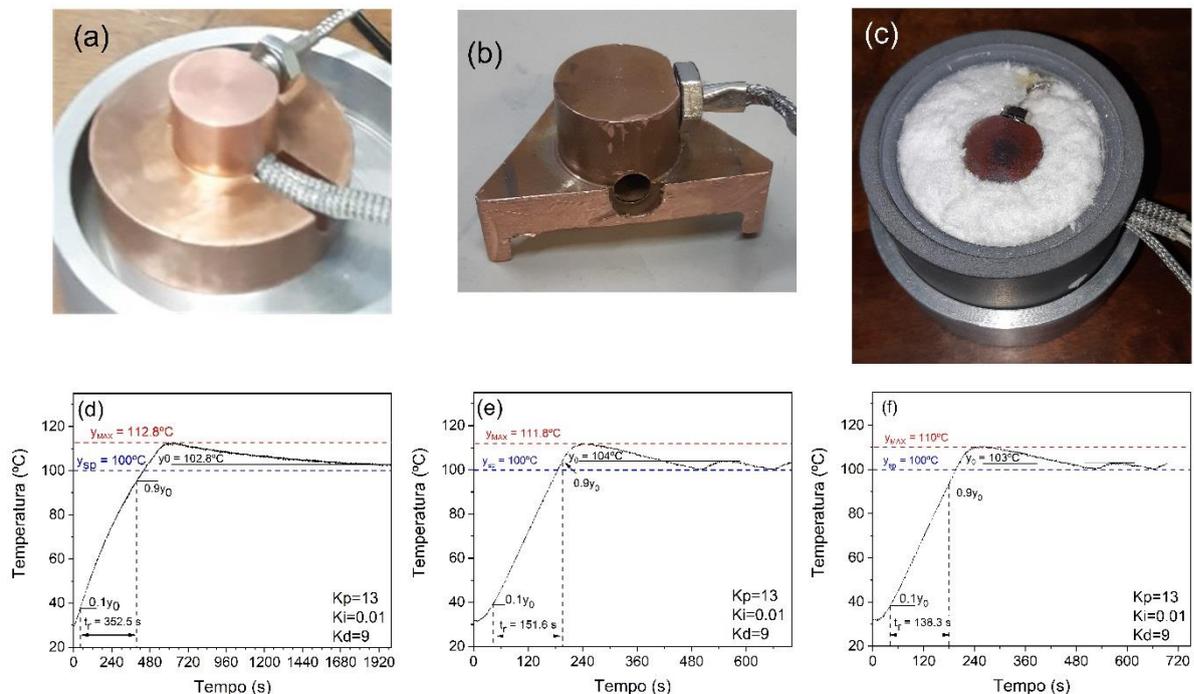
3.3 DIFICULDADES SUPERADAS

A partir das análises dos testes foram identificados pontos de limitação do sistema e implementadas algumas melhorias. Os resultados dos testes anteriores foram possíveis com as alterações feitas nessa seção.

3.3.1 Modificações do núcleo de cobre

Foram feitas três grandes alterações do design do núcleo de cobre ao longo do desenvolvimento desse projeto. Inicialmente o encaixe da peça de cobre no corpo de pirofilita não permitiu que fosse instalado um termopar por falta de espaço. Foi feito nesse momento um rebaixo na peça e foi instalado o termopar logo abaixo da superfície amostral Figura 20 (a). Isso permitiu que as primeiras curvas de aquecimento fossem extraídas. Porém o sistema apresentou uma inércia térmica muito elevada, ao passo que grandes valores de *overshoot* foram registrados apesar de buscar otimizar os valores das constantes. A configuração de constantes de ganho que produziram o melhor resultado para o design 1 está representada na Figura 21 (d).

Figura 21 - Designs 1 (a), 2 (b) e 3 (c) e suas respectivas curvas de aquecimento (d), (e) e (f)



Fonte: Elaborada pelo autor (2023).

A segunda alteração feita foi a redução da massa de cobre por meio de um rebaixo inferior e cortes retos na parte cilíndrica maior, tornando a base triangular. Note que por culpa do rebaixo usinado na parte inferior, ao realizar os cortes, ficaram apenas três pequenos pontos de apoio (FIGURA 22). Isso diminui consideravelmente o contato entre o corpo metálico e a pirofilita, melhorando o isolamento térmico.

Figura 22 - Vista inferior do design 2 com ênfase para os três pontos de apoio



Fonte: Elaborada pelo autor (2023).

Para o mesmo conjunto de constantes, foi realizada uma curva de aquecimento desse novo design, mostrado na Figura 20 (e). O tempo t_r foi reduzido em 132% pela diminuição da massa de cobre. A montagem final, Figura 20 (c), inclui o isolamento de lã de rocha no volume entre o núcleo de cobre e o invólucro de pirofilita. Nessa montagem o tempo reduziu 9% em relação ao design 2, e os valores de *overshoot* foram sequencialmente menores. O design 3 foi o utilizado para o desenvolvimento do projeto e implementando essa montagem foram produzidos os resultados da discussão da seção de testes de bancada.

3.3.2 Frequência do PWM do Arduino

O Arduino UNO, modelo escolhido como controlador deste projeto apresenta valores tabelados de frequência de controle de PWM em seus pinos conforme a tabela abaixo.

Tabela 9 - Frequências correspondentes a cada pino da placa Arduino UNO utilizada

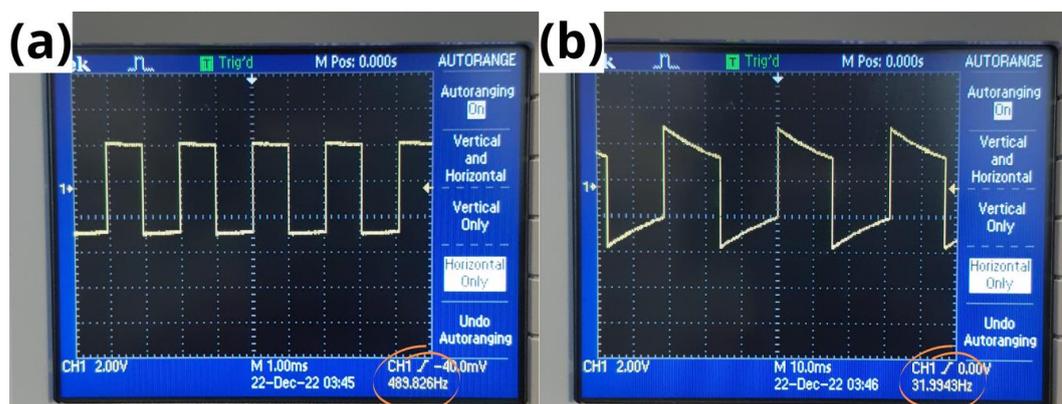
Pino	Frequência (Hz)
3	490
5	980
6	980
9	490
10	490
11	490

Fonte: Elaborada pelo autor (2023).

Foi identificado que a frequência de controle do PWM feita pelo pino escolhido para chavear o relé (pino 3) é incompatível com a montagem. O relé escolhido possui um *Pick-up/Drop-out time* de 10 ms, ou seja, uma frequência máxima de chaveamento de 50Hz. Isso tornava o funcionamento do relé instável, sobretudo para valores abaixo de 15% de *duty cycle* no circuito de PWM.

A biblioteca *add-on PWM.h* foi implementada no código do Arduino, permitindo que fosse reduzida a um valor mínimo de 32 Hz a frequência de controle do PWM no pino 3. Na Figura 23(a) temos o sinal PWM a 50% de *duty cycle* na frequência padrão de 490 Hz. Na Figura 23(b) é o mesmo sinal de PWM porém após a aplicação das funções de divisão de frequência possíveis pela biblioteca implementada.

Figura 23 - (a) sinal PWM original do Arduino UNO (490 Hz) (b) sinal PWM modificado pela biblioteca PWM.h (32 Hz)



Fonte: Elaborada pelo autor (2023).

3.3.3 Distância focal do microscópio

Neste trabalho a validação de aplicação será feita pela capacidade de realizar foco na superfície amostral do porta-amostras com a tampa instalada, obedecendo assim a distância de trabalho da lente objetiva e mostrando que é possível extrair dados usando o novo acessório. A

Figura 24 apresenta um teste realizado com uma lâmina de Si acomodada no núcleo de cobre e registrada uma foto do monitor que projeta a imagem vista pela ocular do microscópio, garantindo que a superfície da lâmina está no foco.

Figura 24 - Fotografia capturada da superfície rugosa de uma lâmina de Si em foco no microscópio óptico do espectrometro Raman do LAPMA



Fonte: Elaborada pelo autor (2023).

4 CONCLUSÃO

O dispositivo desenvolvido conseguiu cumprir os objetivos propostos, apresentando resultados consistentes e confiáveis em relação à precisão e flutuação da temperatura e os valores ficaram dentro da faixa de $\pm 1,0$ °C e $0,5$ °C, respectivamente. Os valores das constantes de ganho, obtidas pelo método de calibração *trial and error*, produziram o comportamento esperado de um sistema criticamente amortecido, sem *overshoot* e com valor de erro de estado estável menor do que a incerteza/precisão do termopar utilizado. As constantes de ganho que apresentaram melhor resultado foram $K_p=5,0$, $K_i=0,001$ e $k_d=10,0$.

O desempenho do isolamento do forno demonstrou ser o suficiente para atingir e manter temperaturas de até 400 °C. Contudo, o usuário deve atentar que, para longos períodos de utilização em altas temperaturas e sem refrigeração externa, a superfície do corpo de pirofilita atinge temperaturas suficientemente altas capazes de causar queimaduras, e não deve ser manuseado durante ou logo após um ciclo de aquecimento. A temperatura externa foi monitorada na superfície da janela óptica e também a uma distância relativa à distância de trabalho da lente do microscópio Raman. Foi constatado que o uso de uma ventoinha para manter um fluxo de ar sobre a tampa é necessário e suficiente para reduzir a temperatura nessa região, esta observação é importante, pois visa manter os componentes sensíveis do microscópio (lentes) operando em temperaturas seguras. As temperaturas observadas sem e com o uso da ventoinha na superfície de vidro foram de 90 e 40 °C respectivamente, uma redução de 225%. A uma distância de 2 mm foram observadas as temperaturas de 60 e 32 °C, diferença de 187%. Ambas as temperaturas acima descritas foram registradas quando a temperatura do corpo de cobre estava à 400 °C por 15 minutos. A temperatura máxima configurada para o sistema é de 490 °C, porém não foi realizada nenhum teste acima de 400 °C. Ainda, cabe destacar que por motivos da falta de nitrogênio líquido necessário para resfriar o detector do espectrômetro Raman não foi possível executar testes de medidas Raman em função da temperatura.

A análise de geração de valor deste projeto não se restringe apenas em função do valor monetário, que nesse quesito é incomparável, mas sim, pelo conhecimento produzido e adquirido pelos envolvidos nesse projeto. Assim, os pesquisadores do LAPMA, professores e alunos, conquistam independência em relação a infraestrutura a partir de um desenvolvimento *open-source*, de baixo custo e de fácil manutenção.

5 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como continuidade do projeto apresentado ficam apontados os itens:

- Implementação no microscópio óptico realizando medidas Raman com o uso da janela óptica para validação experimental da distância de trabalho e materiais utilizados;
- Adaptação de ventoinha próximo a lente objetiva para criar um fluxo de ar acima da tampa do forno.
- Medida de espectroscopia Raman em função da temperatura para amostra padrão com comportamento conhecido e comparar resultados com a literatura.

Com os itens acima validados os pesquisadores e usuários do microscópio de espectroscopia Raman do LAPMA poderão contar com novas possibilidades para suas pesquisas.

REFERÊNCIAS

- ARDUINO. *In*: ARTMELINO. [S. l.]. 22 maio 2016. Disponível em: <https://github.com/atmelino/Arduino/tree/master/libraries/PWM>. Acesso em 03 abr. 2023.
- ASTRÖM, K.; HÄGGLUND, T. **PID controllers: theory, design, and tuning**. Carolina do Norte: Instrument Society of America, 1934.
- CARTE, A. E. Thermal constants of pyrophyllite and their change on heating. **British Journal of Applied Physics**, [s. l.], v. 6 n. 9, p. 326-328, 1955.
- FLUGGE-LOTZ, I. Memorial to N. Minorsky. **IEEE Transactions on Automatic Control**, [s. l.], v. 16, n. 4, p. 289-291, 1971. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1099734>. Acesso em 03 abr. 2023.
- MYKA, D *et al.* Tutorial: visualize streaming data in excel. *In*: LEARN Microsoft. [S. l.], 29 ago. 2021. Disponível em: <https://learn.microsoft.com/en-us/microsoft-365/education/data-streamer/visualize-streaming-data-in-excel>. Acesso em: 07 abr. 2023.
- MYKA, D. Enable data streamer in excel. *In*: LEARN Microsoft. [S. l.], 22 abr. 2021. Disponível em: <https://learn.microsoft.com/pt-br/microsoft-365/education/data-streamer/enable-in-excel>. Acesso em: 07 abr. 2023.
- VIANA, C. Como utilizar o Shield Display 16x02 LCD com Teclado no Arduino. *In*: BLOG da robótica. [S. l.], 12 maio 2021. Disponível em: <https://www.blogdarobotica.com/2021/05/12/como-utilizar-o-shield-display-16x02-lcd-com-teclado-no-arduino/>. Acesso em: 07 abr. 2023.
- VISIOLI, A. **Advances in industrial control: practical PID control**. Londres: Springer, 2006.
- WHAT is On/Off Control. *In*: COULTON. [S. l. 2023?]. Disponível em: https://www.coulton.com/What_is_On_Off_Control.html. Acesso em 03 abr. 2023.

APÊNDICE A - MANUAL DE OPERAÇÃO

Índice Apêndice A

A.1 – Visão geral do equipamento

A.2 – Posicionando a amostra

A.3 – Ligando o controlador

A.4 – Navegando os menus

A.5 – Definindo temperatura alvo

A.6 – Operação controle PID via PWM

A.7 – Encerrar operação

A.8 – Microsoft Data Streamer usando Excel

A.1 – Visão geral do equipamento

O equipamento possui seguintes características elétricas

Tabela 1: Características elétricas.

	Tensão (V)	Frequência (Hz)	Corrente (A)
Fonte da Central	100-240	47-63	~ 8.0
PWM	12	32	~ 6.25
Resistência	12	-	~ 6.25

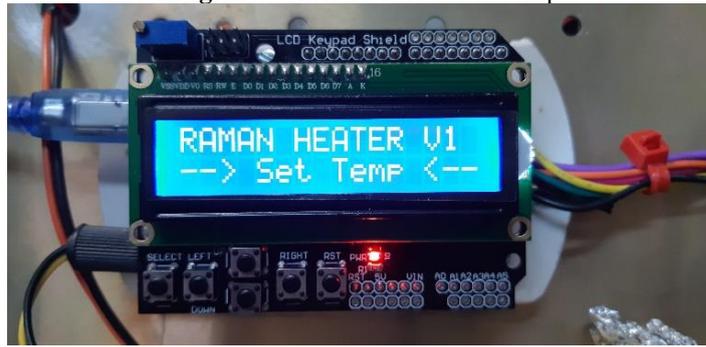
A.2 – Posicionando a Amostra

A amostra deverá ser posicionada sobre a superfície metálica de cobre ao centro do forno. Após o posicionamento da amostra, fecha-se a tampa com até que as faces laterais da tampa e do corpo do forno estejam alinhadas sem espaço entre si.

Imagem 1 – Superfície de contato térmico da amostra



Fonte: Elaborado pelo autor.

Imagem 3 – Tela do menu 'Set Temp'

Fonte: Elaborado pelo autor.

Menu 2 – LIGAR

Menu de inicialização do algoritmo de controle de temperatura PID. Após ter determinado uma temperatura alvo no Menu 1, acesse o Menu 2 para iniciar o aquecimento do forno.

Imagem 4 – Tela do menu LIGAR

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao acessar esse menu clicando no botão SELECT, um submenu de confirmação perguntará se o usuário deseja ligar (*turn on*) ou manter o aquecimento desligado (*turn off*). Utilize as teclas UP/DOWN para confirmar ou cancelar o início da operação conforme as Imagens 5 e 6.

Imagem 5 – Tela de cancelamento de início de operação.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Imagem 6 – Tela de confirmação de início de operação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Pressione o botão SELECT na tela desejada para confirmar a escolha. Na Imagem 7 é mostrada a tela de confirmação de início do sistema de aquecimento.

Imagem 7 – Tela de confirmação de início de operação



Fonte: Elaborado pelo autor.

Menu 3 – NA

Este menu não foi implementado neste trabalho.

Imagem 8 – Tela do menu NA



Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao acessá-lo, o usuário recebe a informação de o submenu não possui função implementada (Imagem 9). É um espaço para futuras implementações e funcionalidades.

Imagem 9 – Tela do submenu NA



Fonte: Elaborado pelo autor.

Menu 4 – INFO

Acessando este menu, detalhes sobre o projeto como autor e semestre de conclusão do trabalho são mostradas na tela.

Imagem 3 – Tela do menu INFO



Fonte: Elaborado pelo autor.

As informações mostradas na Imagem 11 ficam na tela até o usuário clicar no botão SELECT, retornando ao menu principal.

Imagem 4 – Tela do submenu INFO



Fonte: Elaborado pelo autor.

A.5 – Configurando Temperatura Alvo

No submenu do menu 1, Set Temp, temos a página de configuração do valor alvo para a temperatura.

Imagem 5 – Tela de configuração da temperatura alvo (y_{sp}).



Fonte: Elaborado pelo autor.

O usuário deve inserir o valor desejado utilizando os controles descritos na tabela dois.

Tabela 2 – Valores de input dos botões direcionais

Botão	Função
UP	+ 1
DOWN	- 1
LEFT	- 10
RIGHT	+ 10
SELECT	Confirma e salva o valor

Ao salvar o valor o usuário terá uma confirmação como na Imagem 13.

Imagem 6 – Tela de confirmação de registro do valor da temperatura alvo (y_{sp}).



Fonte: Elaborado pelo autor.

A.6 – operação controle PID via PWM

Durante a operação, temos a tela de monitoramento de estado, onde são mostradas informações importantes para o usuário.

Imagem 7 – Tela de monitoramento de estado de operação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A.7 – Encerrar Operação

Para encerrar a operação o usuário tem como opção clicar no botão RIGHT, que irá alterar o estado de operação de ON para OFF e encerrar a medida. Ao clicar em DOWN o controlador retorna para o menu principal mantendo o valor de TempSet salvo. Alternativamente também pode ser utilizado o botão RESET (RST) para reiniciar o dispositivo, retornando assim ao estado inicial, preset OFF, porém assim a temperatura salva anteriormente se perde.

A.8 - Microsoft Data Streamer Usando Excel

O Microsoft Data *Streamer* é uma ferramenta poderosa que permite aos usuários criar tabelas de dados e visualizar informações em tempo real. Com esta ferramenta, você pode importar dados em tempo real do Excel para o PowerPoint e interagir com eles durante uma apresentação. O uso do Excel como Datalog via comunicação serial (USB) conectado ao Arduino dá a funcionalidade de um gerador de gráficos em tempo real. Para criar esse painel de visualização no Microsoft Excel devemos primeiramente habilitar o suplemento ‘*Streamer* de dados’ e, em seguida, configurar os parâmetros de leitura, conforme descrito abaixo.

Para habilitar *Streamer* de Dados em Excel³:

1. Ir para **Opções de > Arquivo**
2. No diálogo **opções Excel** clique em **Complementos**
3. Na parte inferior do diálogo no menu suspenso **Gerenciar**: selecione **Adicionar COM** e clique em **Ir**
4. No diálogo Complementos COM, marque a caixa de *Streamer* de Dados da Microsoft **para** Excel clique em **OK**.

Agora você deve ver a guia *Streamer* de Dados na faixa Excel faixa de opções. Acessando essa nova opção siga os passos⁴:

1. Abra o PowerPoint e selecione a guia "Inserir". Clique em "Tabela de Dados do Microsoft Data *Streamer*" para criar uma nova tabela.
2. Selecione a opção "Conectar Sensores" na barra de ferramentas do Microsoft Data *Streamer*.
3. Selecione o tipo de sensor que você deseja conectar e siga as instruções específicas para esse sensor.
4. Uma vez conectado, os valores do sensor serão exibidos na tabela de dados do Microsoft Data *Streamer* em tempo real.
5. Para visualizar os valores ao longo do tempo, selecione a opção "Gráfico" na barra de ferramentas do Microsoft Data *Streamer*.
6. Personalize o gráfico selecionando as opções disponíveis na guia "Formatar" na barra de ferramentas do Microsoft Data *Streamer*.

Com este tutorial, é possível criar uma tabela de dados e um gráfico personalizado para monitorar e analisar os valores do sensor durante sua operação.

³ Passo a passo retirado de: < <https://learn.microsoft.com/pt-br/microsoft-365/education/data-streamer/enable-in-excel>>. Acesso em: 02 abr 2023.

⁴ Passo a passo retirado de:< <https://learn.microsoft.com/en-us/microsoft-365/education/data-streamer/visualize-streaming-data-in-excel>>. Acesso em: 02 abr 2023.

ANEXO A – PÁGINA DE INFORMAÇÕES MÓDULO MAX6675

19-2235; Rev 1; 3/02



Cold-Junction-Compensated K-Thermocouple-to-Digital Converter (0°C to +1024°C)

MAX6675

General Description

The MAX6675 performs cold-junction compensation and digitizes the signal from a type-K thermocouple. The data is output in a 12-bit resolution, SPI™-compatible, read-only format.

This converter resolves temperatures to 0.25°C, allows readings as high as +1024°C, and exhibits thermocouple accuracy of 8LSBs for temperatures ranging from 0°C to +700°C.

The MAX6675 is available in a small, 8-pin SO package.

Features

- ◆ Direct Digital Conversion of Type -K Thermocouple Output
- ◆ Cold-Junction Compensation
- ◆ Simple SPI-Compatible Serial Interface
- ◆ 12-Bit, 0.25°C Resolution
- ◆ Open Thermocouple Detection

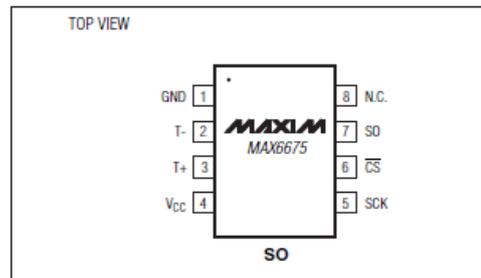
Ordering Information

PART	TEMP RANGE	PIN-PACKAGE
MAX6675ISA	-20°C to +85°C	8 SO

Applications

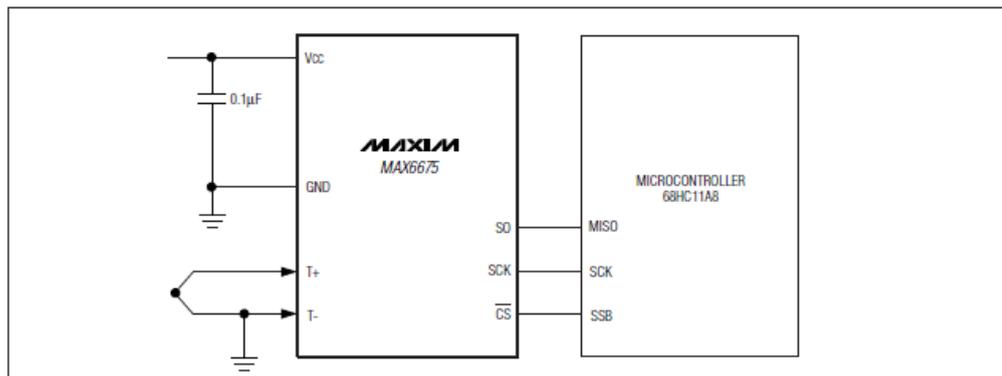
- Industrial
- Appliances
- HVAC
- Automotive

Pin Configuration



SPI is a trademark of Motorola, Inc.

Typical Application Circuit



Maxim Integrated Products 1

For pricing, delivery, and ordering information, please contact Maxim/Dallas Direct! at 1-888-629-4642, or visit Maxim's website at www.maxim-ic.com.

MAX6675

Cold-Junction-Compensated K-Thermocouple-to-Digital Converter (0°C to +1024°C)

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Supply Voltage (V _{CC} to GND)	-0.3V to +6V	Storage Temperature Range	-65°C to +150°C
SO, SCK, CS, T-, T+ to GND	-0.3V to V _{CC} + 0.3V	Junction Temperature	+150°C
SO Current	50mA	SO Package	
ESD Protection (Human Body Model)	±2000V	Vapor Phase (60s)	+215°C
Continuous Power Dissipation (T _A = +70°C)		Infrared (15s)	+220°C
8-Pin SO (derate 5.88mW/°C above +70°C)	471mW	Lead Temperature (soldering, 10s)	+300°C
Operating Temperature Range	-20°C to +85°C		

Stresses beyond those listed under "Absolute Maximum Ratings" may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only, and functional operation of the device at these or any other conditions beyond those indicated in the operational sections of the specifications is not implied. Exposure to absolute maximum rating conditions for extended periods may affect device reliability.

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

(V_{CC} = +3.0V to +5.5V, T_A = -20°C to +85°C, unless otherwise noted. Typical values specified at +25°C.) (Note 1)

PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS	
Temperature Error		T _{THERMOCOUPLE} = +700°C, T _A = +25°C (Note 2)	V _{CC} = +3.3V	-5		+5	LSB
			V _{CC} = +5V	-6		+6	
		T _{THERMOCOUPLE} = 0°C to +700°C, T _A = +25°C (Note 2)	V _{CC} = +3.3V	-8		+8	
			V _{CC} = +5V	-9		+9	
T _{THERMOCOUPLE} = +700°C to +1000°C, T _A = +25°C (Note 2)		V _{CC} = +3.3V	-17		+17		
		V _{CC} = +5V	-19		+19		
Thermocouple Conversion Constant				10.25		μV/LSB	
Cold-Junction Compensation Error		T _A = -20°C to +85°C (Note 2)	V _{CC} = +3.3V	-3.0		+3.0	°C
			V _{CC} = +5V	-3.0		+3.0	
Resolution				0.25		°C	
Thermocouple Input Impedance				60		kΩ	
Supply Voltage	V _{CC}		3.0		5.5	V	
Supply Current	I _{CC}			0.7	1.5	mA	
Power-On Reset Threshold		V _{CC} rising	1	2	2.5	V	
Power-On Reset Hysteresis				50		mV	
Conversion Time		(Note 2)		0.17	0.22	s	
SERIAL INTERFACE							
Input Low Voltage	V _{IL}				0.3 x V _{CC}	V	
Input High Voltage	V _{IH}		0.7 x V _{CC}			V	
Input Leakage Current	I _{LEAK}	V _{IN} = GND or V _{CC}			±5	μA	
Input Capacitance	C _{IN}			5		pF	

Cold-Junction-Compensated K-Thermocouple-to-Digital Converter (0°C to +1024°C)

MAX6675

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (continued)

($V_{CC} = +3.0V$ to $+5.5V$, $T_A = -20^\circ C$ to $+85^\circ C$, unless otherwise noted. Typical values specified at $+25^\circ C$.) (Note 1)

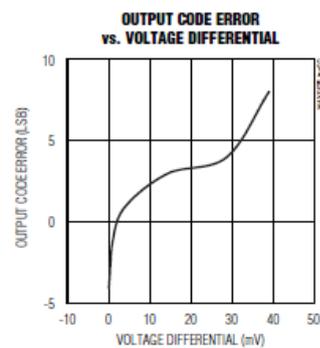
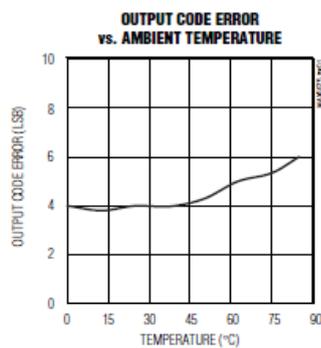
PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
Output High Voltage	V_{OH}	$I_{SOURCE} = 1.6mA$	$V_{CC} - 0.4$			V
Output Low Voltage	V_{OL}	$I_{SINK} = 1.6mA$			0.4	V
TIMING						
Serial Clock Frequency	f_{SCL}				4.3	MHz
SCK Pulse High Width	t_{CH}		100			ns
SCK Pulse Low Width	t_{CL}		100			ns
CSB Fall to SCK Rise	t_{CSS}	$C_L = 10pF$	100			ns
CSB Fall to Output Enable	t_{DV}	$C_L = 10pF$			100	ns
CSB Rise to Output Disable	t_{TR}	$C_L = 10pF$			100	ns
SCK Fall to Output Data Valid	t_{DO}	$C_L = 10pF$			100	ns

Note 1: All specifications are 100% tested at $T_A = +25^\circ C$. Specification limits over temperature ($T_A = T_{MIN}$ to T_{MAX}) are guaranteed by design and characterization, not production tested.

Note 2: Guaranteed by design. Not production tested.

Typical Operating Characteristics

($V_{CC} = +3.3V$, $T_A = +25^\circ C$, unless otherwise noted.)



Cold-Junction-Compensated K-Thermocouple-to-Digital Converter (0°C to +1024°C)

Pin Description

PIN	NAME	FUNCTION
1	GND	Ground
2	T-	Alumel Lead of Type-K Thermocouple. Should be connected to ground externally.
3	T+	Chromel Lead of Type-K Thermocouple
4	VCC	Positive Supply. Bypass with a 0.1µF capacitor to GND.
5	SCK	Serial Clock Input
6	\overline{CS}	Chip Select. Set \overline{CS} low to enable the serial interface.
7	SO	Serial Data Output
8	N.C.	No Connection

Detailed Description

The MAX6675 is a sophisticated thermocouple-to-digital converter with a built-in 12-bit analog-to-digital converter (ADC). The MAX6675 also contains cold-junction compensation sensing and correction, a digital controller, an SPI-compatible interface, and associated control logic.

The MAX6675 is designed to work in conjunction with an external microcontroller (µC) or other intelligence in thermostatic, process-control, or monitoring applications.

Temperature Conversion

The MAX6675 includes signal-conditioning hardware to convert the thermocouple's signal into a voltage compatible with the input channels of the ADC. The T+ and T- inputs connect to internal circuitry that reduces the introduction of noise errors from the thermocouple wires.

Before converting the thermoelectric voltages into equivalent temperature values, it is necessary to compensate for the difference between the thermocouple cold-junction side (MAX6675 ambient temperature) and a 0°C virtual reference. For a type-K thermocouple, the voltage changes by 41µV/°C, which approximates the thermocouple characteristic with the following linear equation:

$$V_{OUT} = (41\mu V / ^\circ C) \times (T_R - T_{AMB})$$

Where:

V_{OUT} is the thermocouple output voltage (µV).

T_R is the temperature of the remote thermocouple junction (°C).

T_{AMB} is the ambient temperature (°C).

Cold-Junction Compensation

The function of the thermocouple is to sense a difference in temperature between two ends of the thermocouple wires. The thermocouple's hot junction can be read from 0°C to +1023.75°C. The cold end (ambient temperature of the board on which the MAX6675 is mounted) can only range from -20°C to +85°C. While the temperature at the cold end fluctuates, the MAX6675 continues to accurately sense the temperature difference at the opposite end.

The MAX6675 senses and corrects for the changes in the ambient temperature with cold-junction compensation. The device converts the ambient temperature reading into a voltage using a temperature-sensing diode. To make the actual thermocouple temperature measurement, the MAX6675 measures the voltage from the thermocouple's output and from the sensing diode. The device's internal circuitry passes the diode's voltage (sensing ambient temperature) and thermocouple voltage (sensing remote temperature minus ambient temperature) to the conversion function stored in the ADC to calculate the thermocouple's hot-junction temperature.

Optimal performance from the MAX6675 is achieved when the thermocouple cold junction and the MAX6675 are at the same temperature. Avoid placing heat-generating devices or components near the MAX6675 because this may produce cold-junction-related errors.

Digitization

The ADC adds the cold-junction diode measurement with the amplified thermocouple voltage and reads out the 12-bit result onto the SO pin. A sequence of all zeros means the thermocouple reading is 0°C. A sequence of all ones means the thermocouple reading is +1023.75°C.

Cold-Junction-Compensated K-Thermocouple-to-Digital Converter (0°C to +1024°C)

Applications Information

Serial Interface

The *Typical Application Circuit* shows the MAX6675 interfaced with a microcontroller. In this example, the MAX6675 processes the reading from the thermocouple and transmits the data through a serial interface. Force \overline{CS} low and apply a clock signal at SCK to read the results at SO. Forcing \overline{CS} low immediately stops any conversion process. Initiate a new conversion process by forcing \overline{CS} high.

Force \overline{CS} low to output the first bit on the SO pin. A complete serial interface read requires 16 clock cycles. Read the 16 output bits on the falling edge of the clock. The first bit, D15, is a dummy sign bit and is always zero. Bits D14–D3 contain the converted temperature in the order of MSB to LSB. Bit D2 is normally low and goes high when the thermocouple input is open. D1 is low to provide a device ID for the MAX6675 and bit D0 is three-state.

Figure 1a is the serial interface protocol and Figure 1b shows the serial interface timing. Figure 2 is the SO output.

Open Thermocouple

Bit D2 is normally low and goes high if the thermocouple input is open. In order to allow the operation of the open thermocouple detector, T- must be grounded. Make the ground connection as close to the GND pin as possible.

Noise Considerations

The accuracy of the MAX6675 is susceptible to power-supply coupled noise. The effects of power-supply noise can be minimized by placing a 0.1 μ F ceramic bypass capacitor close to the supply pin of the device.

Thermal Considerations

Self-heating degrades the temperature measurement accuracy of the MAX6675 in some applications. The magnitude of the temperature errors depends on the thermal conductivity of the MAX6675 package, the

mounting technique, and the effects of airflow. Use a large ground plane to improve the temperature measurement accuracy of the MAX6675.

The accuracy of a thermocouple system can also be improved by following these precautions:

- Use the largest wire possible that does not shunt heat away from the measurement area.
- If small wire is required, use it only in the region of the measurement and use extension wire for the region with no temperature gradient.
- Avoid mechanical stress and vibration, which could strain the wires.
- When using long thermocouple wires, use a twisted-pair extension wire.
- Avoid steep temperature gradients.
- Try to use the thermocouple wire well within its temperature rating.
- Use the proper sheathing material in hostile environments to protect the thermocouple wire.
- Use extension wire only at low temperatures and only in regions of small gradients.
- Keep an event log and a continuous record of thermocouple resistance.

Reducing Effects of Pick-Up Noise

The input amplifier (A1) is a low-noise amplifier designed to enable high-precision input sensing. Keep the thermocouple and connecting wires away from electrical noise sources.

Chip Information

TRANSISTOR COUNT: 6720

PROCESS: BICMOS

Cold-Junction-Compensated K-Thermocouple-to-Digital Converter (0°C to +1024°C)

MAX6675

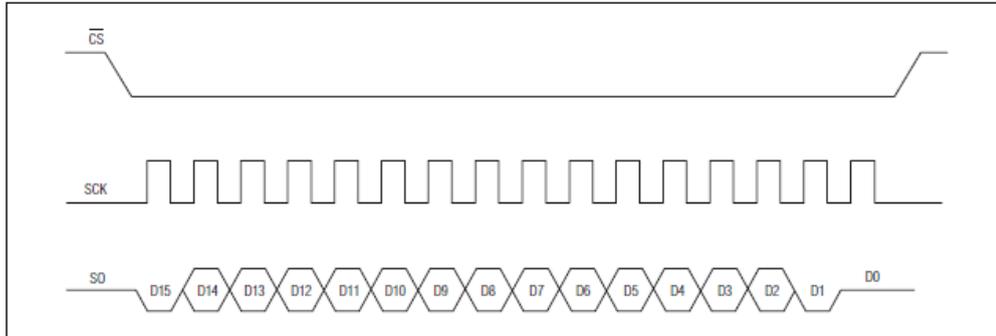


Figure 1a. Serial Interface Protocol

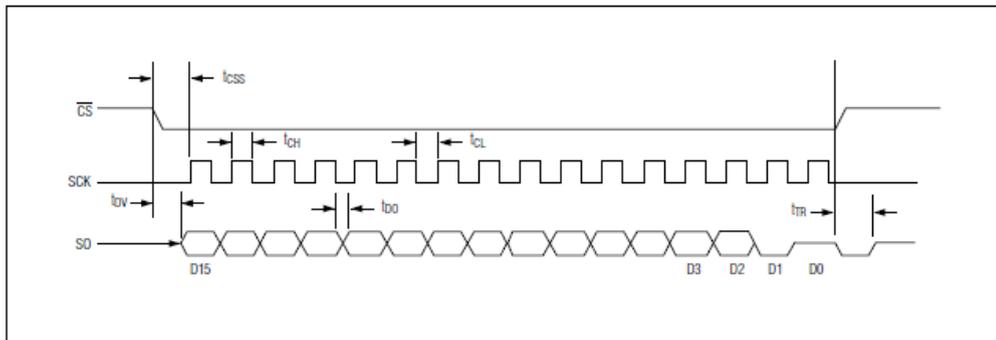


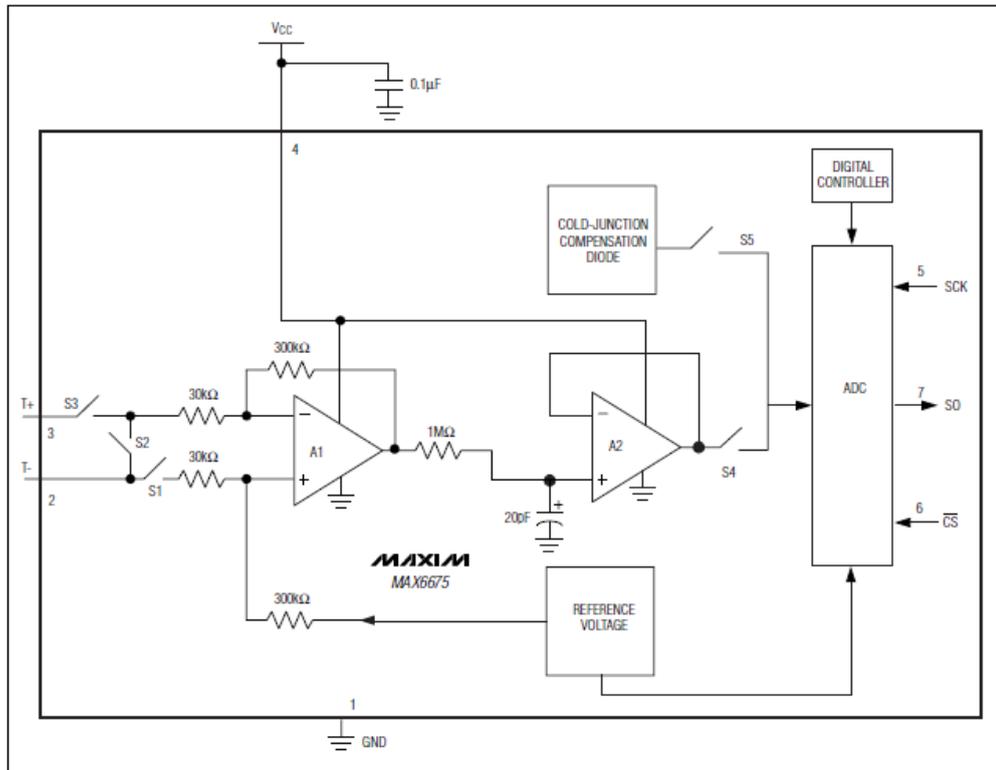
Figure 1b. Serial Interface Timing

BIT	DUMMY SIGN BIT	12-BIT TEMPERATURE READING											THERMOCOUPLE INPUT	DEVICE ID	STATE	
		14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4				3
Bit	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
	0	MSB											LSB		0	Three-state

Figure 2. SO Output

Cold-Junction-Compensated K-Thermocouple-to-Digital Converter (0°C to +1024°C)

Block Diagram



MAX6675

Cold-Junction-Compensated K-Thermocouple-to-Digital Converter (0°C to +1024°C)

MAX6675

Package Information

	INCHES		MILLIMETERS	
	MIN	MAX	MIN	MAX
A	0.053	0.069	1.35	1.75
A1	0.004	0.010	0.10	0.25
B	0.014	0.019	0.35	0.49
C	0.007	0.010	0.19	0.25
e	0.050		1.27	
E	0.150	0.157	3.80	4.00
H	0.228	0.244	5.80	6.20
h	0.010	0.020	0.25	0.50
L	0.016	0.050	0.40	1.27

	INCHES		MILLIMETERS		N	MS012
	MIN	MAX	MIN	MAX		
D	0.189	0.197	4.80	5.00	8	A
D	0.337	0.344	8.55	8.75	14	B
D	0.386	0.394	9.80	10.00	16	C

NOTES:
 1. D&E DO NOT INCLUDE MOLD FLASH
 2. MOLD FLASH OR PROTRUSIONS NOT TO EXCEED .15mm (.006")
 3. LEADS TO BE COPLANAR WITHIN .102mm (.004")
 4. CONTROLLING DIMENSION: MILLIMETER
 5. MEETS JEDEC MS012-XX AS SHOWN IN ABOVE TABLE
 6. N = NUMBER OF PINS

MAXIM
AN ANALOG AND DIGITAL IC MANUFACTURER

PACKAGE FAMILY OUTLINE: SOIC .150"

1/1

21-0041 A

DOCUMENT CONTROL NUMBER REV

Maxim cannot assume responsibility for use of any circuitry other than circuitry entirely embodied in a Maxim product. No circuit patent licenses are implied. Maxim reserves the right to change the circuitry and specifications without notice at any time.