

PROJETO DE UM CONTROLADOR DE TEMPERATURA PID DE ALTA RESOLUÇÃO PARA USO EM UM SISTEMA DE TERMOLUMINESCÊNCIA DE HARDWARE E SOFTWARE ABERTO¹

POMA, Dair Callisaya²
ROCHA, Carlos Antônio da³

RESUMO

Em diversos campos da pesquisa científica e industrial, a medição e o controle de variáveis como a temperatura, pressão, vazão etc. são essenciais. No entanto, o custo elevado de instrumentação de alta precisão é frequentemente um obstáculo. Para contornar essa questão, arquitetou-se o desenvolvimento de um controlador de temperatura de alta precisão com foco em aplicações de Termoluminescência (TL), uma técnica de grande interesse para a caracterização de polímeros e nanomateriais, especialmente na dosimetria de radiações. O projeto propõe a criação de um sistema de baixo custo, utilizando hardware e software de código aberto. Isso garante não apenas a redução de despesas, mas também transparência e facilidade de acesso. O controlador PID (Proporcional-Integral-Derivativo) será capaz de operar em uma faixa de temperatura de 25 °C a 500 °C, com uma resolução de $\pm 0,5$ °C e taxas de aquecimento ajustáveis de 0,1 a 10 °C/s. Além de atender às necessidades específicas das medições de TL, a versatilidade do equipamento permite sua adaptação para outros processos laboratoriais que também requerem controle rigoroso de temperatura. Os resultados esperados do projeto incluem a criação de um protótipo funcional, a publicação de artigos científicos e o compartilhamento do projeto como *open source*, contribuindo para a inovação em instrumentação científica de forma acessível e colaborativa.

Palavras-chave: controlador de temperatura, termoluminescência, open source, PID, código aberto, instrumentação científica.

INTRODUÇÃO

O controle preciso de temperatura é essencial em várias aplicações científicas e industriais, incluindo a dosimetria de radiação. Este campo investiga os efeitos e as propriedades das radiações ionizantes por meio da análise de materiais dosimétricos que, quando aquecidos, emitem luz proporcional à dose absorvida. A precisão no controle da taxa de aquecimento e da temperatura absoluta é fundamental para garantir resultados reproduzíveis e confiáveis, especialmente em experimentos envolvendo a termoluminescência (TL).

A TL é a emissão de luz de um material isolante ou semicondutor em resposta a uma absorção de energia ionizante à medida que ele é aquecido (Chen; McKeever, 1997). As radiações ionizantes comumente encontradas são partículas α , partículas β , raios γ , raios X, radiação UV e nêutrons. As emissões de resposta TL seguem uma distribuição que é característica da amostra. Em princípio, tudo o que um instrumento de TL precisa fazer é

¹ Projeto de Iniciação Científica.

² Aluno de Eng. Mecânica; IFSP Campus São Paulo; São Paulo, SP; e-mail: dair.c@aluno.ifsp.edu.br.

³ Doutor em Ciências; IFSP Campus São Paulo; São Paulo- SP; e-mail: carlosrocha@ifsp.edu.br.

variar a temperatura de uma amostra entre dois limiares enquanto monitora a intensidade da saída de luz da amostra.

Na prática, porém, há muitos desafios técnicos que precisam ser identificados e resolvidos. É bastante difícil controlar a temperatura em amplas faixas de variação com boa resolução e precisão de medição, em particular para as amostras de pequenas dimensões e ainda mais se as amostras estiverem em forma de pó.

Vários projetos de instrumentos de TL “*custom-made*” foram propostos nas últimas três décadas, com níveis variados de complexidade e facilidade de uso, levando a soluções que variam de tecnologia relativamente baixa a alta tecnologia. Como o controle de aquecimento é a parte principal desses sistemas, nessa revisão iremos abordar apenas esse tópico.

Lyamayev (2006) criou um sistema de aquecimento e resfriamento com ampla faixa de controle, regulação mais fina da temperatura, simplicidade e baixo custo utilizando um *microchip* antigo, o IC7 ATmega16. Quilty et al. (2007), usaram resistores de termopilha de platina (PT100) tanto para aquecimento quanto para detecção, utilizando um microcontrolador “*custom-made*”. Mbongo e Ocaya (2012) relatam o uso do microcontrolador PIC18F2520 na construção de um sistema de aquecimento de baixo custo, no qual as amostras podem ser sólidas ou em pó, utilizando um sensor de fotodiodo e um circuito controlador PID acoplado ao firmware. Um sistema de aquecimento prático e moderno foi mostrado recentemente por Nunes et al. (2024), baseado no processador Arduino, em conjunto com um controlador universal de ângulo de fase (FC11AL/2), um termopar tipo K ligado a um microcontrolador MAX6675. Esse sistema permitiu leituras de até 1024°C, com resolução de 0,25°C.

Com base nesse contexto, este projeto de pesquisa tem como objetivo desenvolver um controlador de temperatura preciso e de baixo custo para ser integrado a um futuro medidor de TL. O trabalho envolverá o projeto do aquecedor, simulações computacionais e a implementação do algoritmo de controle digital.

OBJETIVOS

GERAL: Projetar e desenvolver um controlador de temperatura altamente preciso, capaz de operar em uma faixa de aquecimento de 25 °C até 500 °C, com uma resolução de $\pm 0,5$ °C e com taxas de aquecimento de 0,1 a 10 °C/s.

ESPECÍFICOS:

- Definição de materiais para uso no projeto e confecção da bandeja de aquecimento;
- Pesquisa e escolha do sensor com melhor relação custo/benefício, como termopares tipo K ou RTDs, para monitoramento em tempo real;
- Projeto e elaboração do circuito eletrônico de controle, baseado em controladores PID (Proporcional-Integral-Derivativo) e microcontroladores modernos, como o Arduino ou plataformas mais robustas como Raspberry Pi;
- Validar o sistema em condições reais de operação, comparando-o com padrões comerciais.

METODOLOGIA

A metodologia deste projeto é eminentemente prática, focada na integração de sistemas e na sua caracterização experimental rigorosa.

Componentes Utilizados:

A tabela 1 resume as especificações dos principais componentes do sistema.

Tabela 1: Principais componentes do sistema de aquecimento PID.

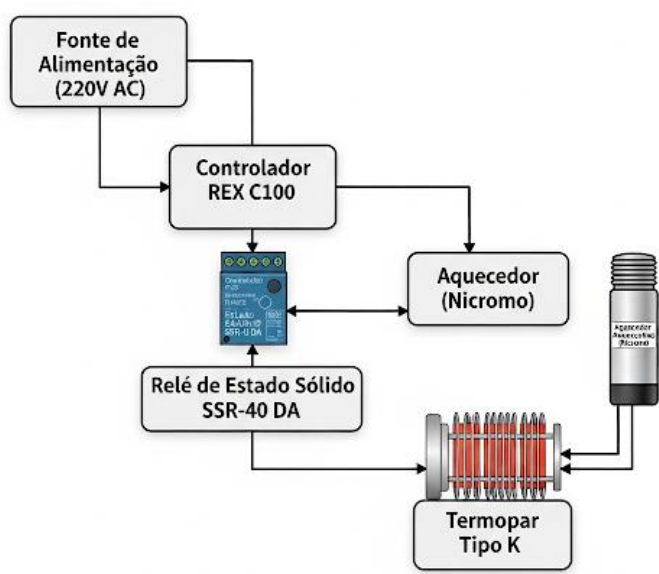
Componente	Modelo/Tipo	Especificações Chave
Controlador PID	REX C100	Tensão: 100-240V AC; Tamanho: 48x48mm; Precisão: $\pm 0,5\%$ FS; Display: Duplo (PV/SV); Saída: para SSR.
Atuador de Potência	SSR-40 DA	Tensão de Controle: 3-32V DC; Carga: 24-380V AC, 40A max; Trigger: Cruzamento por Zero; Resposta: $\leq 10\text{ms}$.
Sensor de Temperatura	Termopar Tipo K	Sonda: 100mm, Aço Inox, Rosca M6; Faixa: 0-400°C; Sensibilidade: $\sim 41 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$; Cabo: 1m.
Elemento Aquecedor	Fio de Nicromo (Ni80Cr20)	Diâmetro: 1 mm; Resistividade: $\sim 1.1 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$; Material: Liga de Níquel-Cromo.

Projeto do Suporte de Amostras (Porta-Amostras): Para garantir o posicionamento repetível da amostra e uma transferência de calor eficiente, será fabricado um suporte dedicado em Aço Inoxidável AISI 304. O material foi escolhido por seu ótimo balanço entre custo, disponibilidade, resistência à oxidação (até 870°C) e boa usinabilidade. O suporte será um disco de 10 mm de diâmetro e 1 mm de espessura, com um rebaixo circular de 0,5 mm para acomodar de forma estável amostras em pó ou pastilhas.

Projeto e Construção do Módulo de Aquecimento: O módulo será construído com um fio de Nicromo enrolado em espiral sobre uma placa de cerâmica refratária de 50x50 mm para assegurar aquecimento uniforme. O comprimento do fio será calculado para a potência desejada em 220V. O conjunto será montado em uma caixa de alumínio, que funcionará como dissipador de calor e blindagem elétrica.

Montagem do Sistema e Diagrama Elétrico: o sistema será montado em um painel de controle. O diagrama de conexões elétricas seguirá o esquema mostrado na Figura 1, com atenção especial à segurança na fiação de alta potência.

Figura 1: Diagrama de Blocos Simplificado



Fonte: arquivos do autor.

Implementação do Circuito de Controle PID e Mecanismo de Atuação: O controle de temperatura do sistema será realizado diretamente pelo controlador PID comercial REX C100. É fundamental esclarecer como este sistema modula a temperatura. Ele não varia o nível da tensão ou da corrente que chega ao aquecedor. Em vez disso, ele emprega a técnica de Controle Proporcional no Tempo para regular a potência média entregue.

O processo ocorre da seguinte forma:

1. O algoritmo PID interno do REX C100 calcula a potência necessária em porcentagem (ex: 60%).
2. O controlador opera com um tempo de ciclo configurável (tipicamente ajustado para 2 segundos para saídas SSR).
3. O REX C100 ativa sua saída de controle DC por uma fração do tempo de ciclo correspondente à potência necessária (no exemplo, por 60% de 2s = 1,2 segundos).
4. Durante este período, o sinal DC ativa o Relé de Estado Sólido SSR-40 DA, que fecha o circuito de alta potência, entregando a tensão total da rede (220V AC) ao aquecedor de Nicromo, que opera em sua potência máxima.
5. Após 1,2 segundos, o REX C100 desativa sua saída de controle pelo resto do ciclo (0,8 segundos). O SSR desliga imediatamente, cortando toda a energia do aquecedor.
6. Este ciclo de ligar e desligar se repete continuamente, e a rápida alternância resulta em uma potência *média* precisa entregue ao aquecedor, que, devido à sua inércia térmica, percebe isso como um aquecimento contínuo e estável.

Este método de modulação por tempo é extremamente eficiente e permite um controle de temperatura muito fino, mesmo utilizando componentes de chaveamento binário.

RESULTADOS PRELIMINARES

Considerações Parciais e Próximos Passos: O projeto encontra-se na fase de planejamento e especificação, com a arquitetura do sistema e a metodologia de trabalho já definidas. A decisão estratégica de utilizar o controlador comercial REX C100 como núcleo do sistema de controle foi tomada, direcionando o foco do trabalho da criação de hardware para a integração, otimização e caracterização de um sistema completo e robusto. Os componentes principais, como o controlador, o relé de estado sólido (SSR-40 DA) e o termopar tipo K, foram especificados, assim como o plano para a confecção do aquecedor customizado.

Os próximos passos para a execução do projeto seguem um cronograma claro e sequencial:

1. **Aquisição e Fabricação:** A primeira etapa prática consistirá na aquisição do kit de controle (REX C100, SSR, termopar) e na fabricação da bandeja de aquecimento customizada com fio de Kanthal, conforme projetado.
2. **Montagem e Integração do Sistema:** Realizar a montagem física de todos os componentes em um gabinete ou painel de controle. Esta fase inclui a instalação mecânica e a fiação elétrica segura entre a fonte de alimentação, o controlador REX C100, o relé SSR e a unidade de aquecimento.
3. **Configuração e Sintonia (Tuning):** Após a montagem, o sistema será energizado para a configuração inicial do REX C100. A etapa mais crítica será a execução do procedimento de **autoajuste (auto-tuning)**, que permitirá ao controlador otimizar seus parâmetros PID internos especificamente para a carga térmica do nosso aquecedor.

4. **Caracterização e Validação Experimental:** Com o sistema sintonizado, iniciar-se-á a fase de testes rigorosos para caracterizar o desempenho do conjunto. Serão coletados dados para analisar a precisão, estabilidade, linearidade das taxas de aquecimento e outros parâmetros dinâmicos, validando se o sistema atende aos objetivos de performance estabelecidos.

Ao final do cronograma, espera-se obter um sistema de aquecimento de precisão totalmente montado, caracterizado, validado e pronto para ser empregado de forma confiável em futuras aplicações de pesquisa.

REFERÊNCIAS

CHEN, R.; MCKEEVER, S. W. S. **Theory of thermoluminescence and related phenomena**. Singapore: World Scientific, 1997.

LYAMAYEV, V. I. A low-cost microcontroller-based measurement system for a fractional glow technique. **Measurement Science and Technology**, v. 17, p. N75, 2006.

MBONGO, M.; OCAYA, R. O. Design of a high-resolution PID temperature controller for use in a low-cost thermoluminescence system. In: **Proceedings of The 57th Annual Conference of the SA Institute of Physics**, 2012, Pretória. Disponível em: [https://events.saip.org.za/event/14/papers/1059/files/594-Mbongo SAIP 2012 paper2 - reviewed and corrected.pdf](https://events.saip.org.za/event/14/papers/1059/files/594-Mbongo_Saip_2012_paper2_-_reviewed_and_corrected.pdf). Acessado em 15 ago. 2025

NUNES, M. C. S. et al. A custom-made integrated system for thermoluminescence and radioluminescence spectroscopy. **Applied Radiation and Isotopes**, v. 214, p. 111516, 2024.

QUILTY, J. W. et al. Thermoluminescence apparatus using PT100 resistors as the heating and sensing elements. **Review of Scientific Instruments**, v. 78, p. 083905, 2007.