

DESENVOLVIMENTO DE UM FORNO DE RESISTIVO DE BANCADA COM CONTROLE DE ATMOSFERA E VÁCUO DE BAIXO CUSTO

DEVELOPMENT OF A LOW-COST BENCHTOP RESISTIVE FURNACE WITH ATMOSPHERE AND VACUUM CONTROL

DESARROLLO DE UN HORNO RESISTIVO DE SOBREMESA DE BAJO COSTE CON CONTROL DE ATMÓSFERA Y VACÍO



10.56238/edimpacto2025.090-053

Rafael Cardoso Toledo

Pós-doutorando

Instituição: Universidade Federal de São Paulo (UNIFESP)

E-mail: rafael.toledo@unifesp.br

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-1114-198X>

Lattes: <https://lattes.cnpq.br/8271443427754873>

Eduardo Saito

Doutor em Engenharia e Tecnologia Espaciais

Instituição: Universidade Federal de São Paulo (UNIFESP)

E-mail: esaito135@gmail.com

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-4890-4514>

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/0710051356090603>

Lucas Caetano da Silva

Tecnólogo em Manufatura Avançada

Instituição: Faculdade de Tecnologia de São José dos Campos (FATEC)

Bolsista de Desenvolvimento Tecnológico da Universidade Federal de São Paulo (UNIFESP)

E-mail: lucas.lucas000@gmail.com

Orcid: <https://orcid.org/0009-0001-8969-1578>

Lattes: <https://lattes.cnpq.br/0374346364636182>

Danieli Aparecida Pereira Reis

Doutora em Engenharia e Tecnologia Espaciais

Instituição: Universidade Federal de São Paulo (UNIFESP)

E-mail: danieli.reis@unifesp.br

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-1871-6475>

Lattes: <https://lattes.cnpq.br/7058867464306125>

RESUMO

O presente trabalho descreve o desenvolvimento, montagem e validação experimental de um forno resistivo cilíndrico de bancada com controle de atmosfera e vácuo, concebido segundo uma filosofia de baixo custo e sustentabilidade tecnológica. O projeto baseou-se no reaproveitamento estrutural e

Conhecimento em Rede: Explorando a Multidisciplinaridade 3^a Edição

DESENVOLVIMENTO DE UM FORNO DE RESISTIVO DE BANCADA COM CONTROLE DE ATMOSFERA E VÁCUO DE BAIXO CUSTO

elétrico de um forno industrial EMEC, modelo G28, originalmente dividido em três zonas de aquecimento independentes, reconfiguradas em ligação série para operação a 220 V monofásico, $22\ \Omega$ de resistência total e potência nominal de 2,2 kW. O sistema de controle, composto pelo controlador digital NOVUS N1200 e módulo SSR-4840, operando em malha fechada PID, apresentou sobressinal inferior a 1% e estabilidade térmica de $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$, assegurando excelente precisão e reproduzibilidade. Ensaios térmicos demonstraram uniformidade axial de $\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ na zona útil até $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, com tempos de aquecimento de 30 a 220 minutos, dependendo da temperatura de referência. O sistema de vácuo alcançou $1,2 \times 10^{-3}$ Torr com bomba mecânica e estimativa de 10^{-6} Torr com bomba difusora, permitindo operação em vácuo ou atmosfera inerte (Ar 99,999%). Após 20 ciclos térmicos, o equipamento manteve integridade estrutural e estabilidade elétrica, comprovando robustez, eficiência e confiabilidade. O custo total de fabricação correspondeu a cerca de 30% de um forno comercial equivalente, evidenciando o potencial da abordagem para infraestrutura científica de baixo custo em Engenharia de Materiais e Metalurgia Avançada.

Palavras-chave: Forno Resistivo. Atmosfera Controlada. Vácuo. Controle PID. Baixo Custo.

ABSTRACT

The present study reports the development, assembly, and experimental validation of a bench-scale cylindrical resistance furnace capable of operating under controlled atmosphere and vacuum conditions, designed according to a low-cost and sustainable engineering approach. The system was constructed through the reuse and reconfiguration of an EMEC industrial furnace (model G28), originally divided into three independent heating zones, which were connected in series to operate at 220 V two-phase, with a total resistance of $22\ \Omega$ and nominal power of 2.2 kW. The NOVUS N1200 digital controller coupled with an SSR-4840 solid-state relay, operating in closed-loop PID mode, exhibited less than 1% overshoot and $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ steady-state stability, ensuring high accuracy and reproducibility. Thermal tests demonstrated axial uniformity within $\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ up to $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, with heating times ranging from 30 to 220 minutes, depending on the temperature setpoint. The vacuum system achieved 1.2×10^{-3} Torr using a mechanical pump, and is projected to reach 10^{-6} Torr with the addition of a diffusion pump, enabling operation under vacuum or inert atmosphere (Ar 99.999%). After 20 complete thermal cycles, the furnace maintained structural integrity and electrical stability, confirming its robustness, efficiency, and reliability. The total manufacturing cost was approximately 30% of a comparable commercial furnace, highlighting the potential of this low-cost and sustainable design to strengthen scientific infrastructure for research in Advanced Materials and Metallurgy.

Keywords: Resistance Furnace. Controlled Atmosphere. Vacuum. PID Control. Low Cost.

RESUMEN

Este trabajo describe el desarrollo, el ensamblaje y la validación experimental de un horno resistivo cilíndrico de sobremesa con control de atmósfera y vacío, diseñado bajo la filosofía de bajo coste y sostenibilidad tecnológica. El proyecto se basó en la reutilización estructural y eléctrica de un horno industrial EMEC, modelo G28, originalmente dividido en tres zonas de calentamiento independientes, reconfigurado en conexión en serie para operar a 220 V monofásico, con una resistencia total de $22\ \Omega$ y una potencia nominal de 2,2 kW. El sistema de control, compuesto por el controlador digital NOVUS N1200 y el módulo SSR-4840, operando en modo PID de lazo cerrado, presentó una sobreoscilación inferior al 1% y una estabilidad térmica de $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$, garantizando una excelente precisión y reproducibilidad. Las pruebas térmicas demostraron una uniformidad axial de $\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ en la zona útil hasta $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, con tiempos de calentamiento de 30 a 220 minutos, dependiendo de la temperatura de referencia. El sistema de vacío alcanzó $1,2 \times 10^{-3}$ Torr con una bomba mecánica y aproximadamente 10^{-6} Torr con una bomba de difusión, lo que permite su funcionamiento en vacío o en atmósfera inerte (99,999 % Ar). Tras 20 ciclos térmicos, el equipo mantuvo su integridad estructural y estabilidad



eléctrica, demostrando robustez, eficiencia y fiabilidad. El coste total de fabricación representó aproximadamente el 30 % del de un horno comercial equivalente, lo que pone de manifiesto el potencial de este enfoque para infraestructuras científicas de bajo coste en ingeniería de materiales y metalurgia avanzada.

Palabras clave: Horno Resistivo. Atmósfera Controlada. Vacío. Control PID. Bajo Coste.

1 INTRODUÇÃO

O processamento térmico de materiais sob condições controladas de atmosfera e vácuo constitui uma das etapas mais críticas na fabricação e no estudo de ligas metálicas, cerâmicas avançadas e compósitos funcionais. O controle rigoroso das variáveis térmicas e ambientais durante o aquecimento, a fusão ou a sinterização permite minimizar reações indesejadas de oxidação, difusão de gases e contaminações superficiais, resultando em maior pureza e homogeneidade microestrutural [1, 2].

No contexto acadêmico e industrial, fornos resistivos de atmosfera controlada têm se destacado por sua versatilidade, simplicidade construtiva e custo relativamente acessível quando comparados a sistemas de indução ou plasma. Esses fornos operam por efeito Joule, no qual a passagem de corrente elétrica através de um elemento resistivo converte energia elétrica em calor, proporcionando aquecimento uniforme e controlável [3]. O desempenho térmico e a estabilidade do sistema dependem fortemente da seleção dos materiais resistivos (FeCrAl, MoSi₂, W, Mo), dos isolantes refratários e do controle eletrônico implementado [4].

Entretanto, a aquisição de fornos laboratoriais de alta temperatura com capacidade de operação sob vácuo e atmosfera inerte continua sendo um desafio para a maioria dos centros de pesquisa brasileiros. Equipamentos comerciais de padrão internacional apresentam valores elevados, exigindo importação, o que implica custos de aquisição, manutenção e calibração que frequentemente inviabilizam o acesso de grupos emergentes e laboratórios de pequeno porte. Essa lacuna tecnológica restringe o avanço de experimentos em sinterização, solidificação e tratamento térmico controlado, áreas estratégicas para a engenharia de materiais e para o desenvolvimento de novos metais, ligas e cerâmicas técnicas [5, 6].

Frente a essa realidade, o presente trabalho propõe o desenvolvimento de um forno resistivo cilíndrico de bancada com controle de atmosfera e vácuo, concebido segundo a filosofia de baixo custo. A estratégia adotada baseou-se no reaproveitamento estrutural de um forno originalmente pertencente à máquina de fluência “*The Electronic & Mechanical Engineering Co. Ltda. (EMEC)*”, *Typo nº G28*, número de série 3181-93 (Fig. 1), que se encontrava fora de uso. O reaproveitamento dessa estrutura metálica robusta e termicamente estável reduziu significativamente o custo de construção e permitiu a incorporação de novos subsistemas de vácuo, controle térmico e injeção de gás inerte.

Fig.1 –Máquina de fluênciamec.



Fonte: Autores.

O projeto foi desenvolvido e implementado no Laboratório de Comportamento Mecânico de Metais (LCMM) da Universidade Federal de São Paulo (UNIFESP), como parte das atividades voltadas à modernização da infraestrutura experimental para estudos em metalurgia física e processamento de materiais avançados. A adaptação envolveu a integração de um sistema de vácuo híbrido, composto por bombas mecânica e difusora, permitindo atingir pressões de até 5×10^{-8} Torr, e um sistema de injeção de argônio controlado por rotâmetro, assegurando atmosferas inertes durante o aquecimento.

Além do aspecto técnico, o projeto também se fundamenta em princípios de sustentabilidade e otimização de recursos públicos, demonstrando que equipamentos científicos de alta complexidade podem ser desenvolvidos com reutilização de componentes industriais descontinuados sem comprometer o desempenho. Essa abordagem contribui para a consolidação de uma política de inovação e autonomia tecnológica, reforçando a capacidade nacional de projetar e fabricar equipamentos científicos estratégicos.

Portanto, este trabalho tem por objetivo relatar o processo de concepção, adaptação e validação experimental de um forno resistivo cilíndrico de bancada de baixo custo, apresentando o detalhamento do sistema de aquecimento, do controle térmico, do sistema de vácuo e da calibração térmica. Os resultados obtidos demonstram a viabilidade da solução proposta e indicam seu potencial de aplicação em diferentes linhas de pesquisa em materiais metálicos, cerâmicos e compósitos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O aquecimento resistivo é amplamente empregado em processos térmicos que exigem controle preciso de temperatura e homogeneidade térmica. Seu princípio baseia-se no efeito Joule, no qual a passagem de corrente elétrica através de um condutor gera calor proporcional à resistência elétrica e

ao quadrado da corrente aplicada [2]. Essa conversão de energia elétrica em térmica permite o desenvolvimento de fornos simples, eficientes e de custo reduzido, adequados para pesquisas laboratoriais e aplicações industriais.

Nos fornos resistivos de bancada, o calor é transferido ao material por condução, convecção e radiação, sendo o controle da temperatura obtido por meio de malhas fechadas PID que regulam o fornecimento de potência elétrica de acordo com o sinal de sensores, geralmente termopares tipo K, S ou B [1]. O desempenho térmico e a estabilidade do sistema estão fortemente relacionados à escolha dos materiais resistivos, dos revestimentos isolantes e da geometria da câmara de aquecimento.

Os materiais resistivos metálicos, como as ligas FeCrAl (Kanthal®) e NiCr, são amplamente utilizados em faixas de temperatura de até 1300 °C, devido à boa estabilidade mecânica e resistência à oxidação controlada. Em aplicações que requerem temperaturas superiores a 1500 °C, materiais cerâmicos condutores, como o dissiliceto de molibdênio (MoSi₂), têm se mostrado mais adequados, pois combinam alta condutividade elétrica com excelente resistência à oxidação e choque térmico [3, 4].

Outro aspecto essencial é o controle da atmosfera interna durante o tratamento térmico. A utilização de gases inertes (como argônio e nitrogênio) ou redutores (como hidrogênio) visa evitar oxidação e manter a pureza das amostras processadas. Quando se requer ambientes ainda mais limpos e controlados, recorre-se ao vácuo térmico, obtido pela combinação de bombas mecânicas e difusoras ou turbo moleculares[5]. Tais sistemas permitem pressões da ordem de 10⁻⁶ a 10⁻⁸ Torr, ideais para o processamento de ligas reativas, metais de alta pureza e cerâmicas sensíveis.

A configuração construtiva do forno exerce influência direta sobre a uniformidade térmica e a eficiência energética. Forno cilíndrico ou tubular é frequentemente adotado por proporcionar distribuição homogênea de calor e facilidade de vedação em sistemas de vácuo. O isolamento térmico é geralmente composto por mantas de fibra cerâmica, quartzo compactado ou placas de alumina, reduzindo perdas por condução e radiação [3].

Além da parte física, o controle térmico automatizado tem se tornado indispensável. Controladores digitais modernos permitem programar rampas de aquecimento, patamares e resfriamentos com alta precisão, integrando-se a módulos de potência e software de aquisição de dados. Essa integração garante reproduzibilidade e estabilidade de processos de sinterização, fusão e solidificação direcional [7].

A fundamentação teórica deste estudo, portanto, está centrada nos princípios de conversão elétrica-térmica, no comportamento de materiais resistivos e isolantes a altas temperaturas, na tecnologia de vácuo e atmosfera controlada e na automação de processos térmicos. Esses fundamentos sustentam o desenvolvimento de equipamentos de baixo custo e alto desempenho, como o forno resistivo cilíndrico aqui proposto.

2.1 ESTADO DA ARTE

Nos últimos dez anos, os avanços em fornos resistivos de atmosfera controlada e vácuo têm se concentrado em três eixos principais: (i) melhoria dos materiais resistivos e refratários, (ii) eficiência energética e controle térmico de precisão, e (iii) integração de automação e monitoramento digital.

No campo dos materiais resistivos, estudos recentes demonstram que os elementos de MoSi₂ reforçados com cerâmicas ultra refratárias (UHTC) apresentam excelente resistência à oxidação e ao choque térmico, ampliando a vida útil dos fornos e permitindo operação contínua acima de 1800 °C [4]. Da mesma forma, o desenvolvimento de novos materiais à base de carbono, tungstênio e molibdênio tem sido foco de pesquisas voltadas à fabricação de fornos para aplicações aeroespaciais e de materiais avançados [3].

Em relação à eficiência térmica, estudos numéricos e experimentais indicam que o redesenho da zona quente e a otimização das camadas de isolamento podem reduzir perdas térmicas em até 60%, aumentando a eficiência energética e a uniformidade de temperatura [8]. Essa abordagem é particularmente relevante em fornos de bancada, nos quais o consumo energético representa parcela significativa do custo operacional.

O controle de temperatura também evoluiu com a aplicação de algoritmos inteligentes. O uso de controladores híbridos baseados em GA-Fuzzy-PID permite maior estabilidade e resposta dinâmica superior aos controladores convencionais, especialmente em fornos de recocimento e sinterização a vácuo [7].

Na área de engenharia de vácuo, sistemas modulares integrando bombas de duplo estágio e difusoras de óleo, combinados com sensores de pressão de amplo alcance (Pirani e Penning), possibilitam o controle preciso de pressões entre 10⁻³ e 10⁻⁸ Torr. Essa evolução tecnológica garante ambientes mais limpos e processos de alta reproduzibilidade [5,7].

Finalmente, a tendência atual é a integração de fornos resistivos com plataformas digitais de monitoramento e registro de dados, permitindo rastreabilidade total dos experimentos e controle remoto em tempo real [9]. Tais desenvolvimentos consolidam o papel desses equipamentos como infraestrutura essencial para pesquisas em metalurgia, ciência dos materiais e aplicações aeroespaciais.

O presente trabalho insere-se nesse contexto contemporâneo, propondo o reaproveitamento de componentes industriais para o desenvolvimento de um forno resistivo de bancada nacional, de baixo custo, capaz de atingir níveis de desempenho comparáveis aos sistemas comerciais de alta tecnologia.

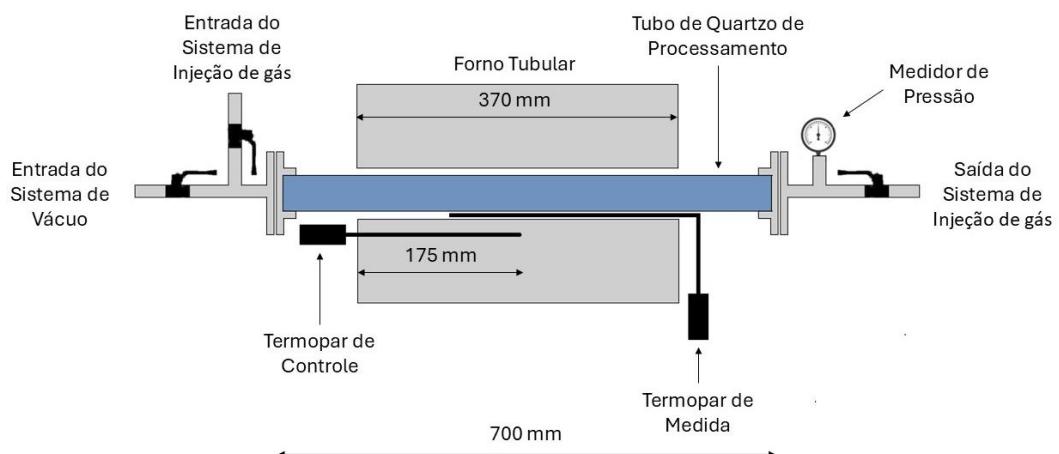
3 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia adotada para o desenvolvimento do forno resistivo de bancada baseou-se em uma abordagem de engenharia reversa e reaproveitamento estrutural, complementada por etapas de projeto, montagem e calibração experimental. O processo foi dividido em cinco fases principais: (i)

recuperação da estrutura base; (ii) projeto térmico e elétrico do sistema resistivo; (iii) implementação dos sistemas de vácuo e atmosfera controlada; (iv) integração eletrônica e controle de temperatura; e (v) calibração térmica e validação operacional.

A Fig.2 apresenta um esquema ilustrativo do forno e seus sistemas.

Fig.2 – Esquema do posicionamento dos sistemas do forno.



Fonte: Autores.

3.1 ESTRUTURA DO FORNO

O ponto de partida do projeto foi o reaproveitamento de um forno da máquina de fluência da *The Electronic & Mechanical Engineering Co. Ltda.* (EMEC), modelo *Typo* nº G28, número de série 3181-93.

Essa unidade, originalmente concebida para ensaios de fluência em metais, apresentava uma estrutura metálica robusta, confeccionada em aço carbono de espessura elevada, apta a suportar altas temperaturas e ciclos prolongados de operação.

A carcaça foi submetida a processos de limpeza, jateamento e pintura térmica com tinta de silicone aluminizada, resistente até 600 °C. Internamente, a estrutura foi adaptada para acomodar o novo conjunto de isolamento, resistências e câmara de vácuo. O projeto manteve a filosofia de baixo custo e sustentabilidade tecnológica, priorizando a reutilização de componentes disponíveis e a aquisição apenas dos itens críticos para desempenho e segurança.

3.2 PROJETO TÉRMICO E SISTEMA RESISTIVO

O novo sistema de aquecimento foi projetado para operar de forma contínua até 1000 °C, utilizando como base a resistência original do forno EMEC, a qual era originalmente dividida em três zonas independentes de aquecimento. Para simplificar o controle e garantir uma distribuição uniforme

de calor ao longo da câmara, as três zonas foram interligadas eletricamente em série, obtendo-se uma resistência total de $22\ \Omega$.

Essa configuração resultou em potência nominal de 2,2 kW, alimentada por rede bifásica de 220 V, e mostrou-se adequada para operação estável e segura no intervalo de temperatura proposto.

O elemento resistivo é constituído de fio Super-Kanthal® (FeCrAl), enrolado helicoidalmente em suporte cerâmico de alta alumina (Al_2O_3) e isolado por miçangas refratárias do mesmo material, que asseguram resistência elétrica estável e evitam curto-circuitos ou perdas de calor por condução direta. A escolha do material FeCrAl deve-se à sua elevada resistividade, estabilidade a altas temperaturas e resistência à oxidação, características que favorecem a durabilidade do conjunto em atmosferas inertes e em vácuo.

O isolamento térmico foi confeccionado com manta de quartzo compactada, de baixa condutividade térmica e alta estabilidade dimensional, proporcionando excelente eficiência energética e minimizando perdas por radiação. O tubo de processamento é produzido em quartzo de alta pureza (SiO_2), com diâmetro interno de 100 mm e comprimento útil de 700 mm, vedado por flanges de aço inoxidável com duplo o-ring de silicone, garantindo perfeita estanqueidade durante os ciclos de vácuo e injeção de gás.

O dimensionamento da potência nominal foi fundamentado no balanço térmico global, expresso pela Equação (1):

$$P = \frac{Q}{\eta} = \frac{mc_p\Delta T}{t\eta} \quad (1)$$

em que:

P é a potência elétrica requerida (W), Q a energia térmica (J), η a eficiência térmica do sistema (adimensional, $\eta \approx 0,75$), m a massa do conjunto aquecido (kg), c_p o calor específico médio ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$), ΔT a variação de temperatura (K) e t o tempo de aquecimento (s).

Os resultados indicaram compatibilidade entre a potência elétrica e a capacidade térmica do conjunto, assegurando aquecimento homogêneo, rápida resposta térmica e estabilidade operacional até 1000 °C. Essa solução de reaproveitamento da resistência original com nova configuração em série reforça a filosofia de baixo custo e sustentabilidade tecnológica adotada neste projeto, mantendo desempenho térmico comparável a sistemas comerciais de mesma categoria.

3.3 SISTEMA DE VÁCUO

O sistema de vácuo é composto por uma bomba mecânica de duplo estágio KYKY RVD 4 (vácuo primário, até 10^{-3} Torr) e uma bomba difusora AGILENT AX-65 (alto vácuo, até 5×10^{-8} Torr). O conjunto está conectado por tubulações de aço inoxidável com válvulas de esfera e *check valves*, e o monitoramento é realizado por sensor MKS 390 Micro-Ion®, de faixa combinada (10^{-3} a 10^{-8} Torr).

As câmaras de vedação utilizam flanges de aço inoxidável e duplo o-ring de silicone para evitar vazamentos. Durante a operação, o processo de evacuação é dividido em duas etapas: (i) bombeamento primário até 10^{-3} Torr; e (ii) ativação da bomba difusora após 15 min de pré-aquecimento.

Ensaios de estanqueidade foram realizados por detecção de pressão residual, garantindo estabilidade superior a 95% após desligamento do sistema por 10 min.

3.4 SISTEMA DE ATMOSFERA CONTROLADA

O sistema de atmosfera controlada, também denominado sistema de purga, foi projetado para permitir a operação do forno em ambiente inerte ou redutor, assegurando a integridade de amostras sensíveis à oxidação durante os ciclos térmicos. O conjunto é composto por uma válvula-posto conectada diretamente ao cilindro de gás inerte (argônio de alta pureza, 99,999%), seguida por um fluxímetro manual do tipo rotâmetro e uma válvula de controle manual de precisão, que permitem o ajuste fino da vazão e da pressão de injeção do gás na câmara de processamento.

Durante a operação, o procedimento de purga é realizado após o bombeamento inicial do sistema de vácuo, introduzindo o gás inerte até a obtenção de pressão parcial positiva de até 1 atm. Esse processo remove traços residuais de oxigênio e umidade, garantindo a manutenção de uma atmosfera estável e livre de contaminantes. O sistema permite também a injeção de misturas gasosas específicas, como H₂ ou N₂/H₂, possibilitando a criação de ambientes redutores controlados, de modo a ampliar o espectro de aplicações experimentais do forno.

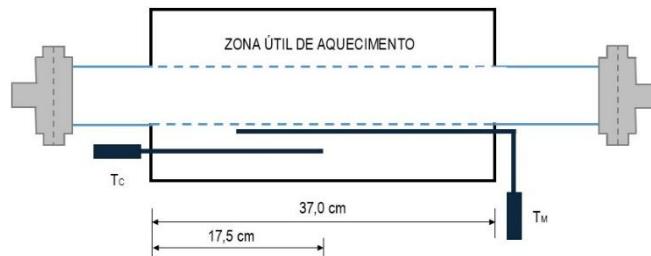
A integração do circuito de gás com o sistema de vácuo híbrido (bomba mecânica e bomba difusora) assegura a transição segura e contínua entre os modos de vácuo e atmosfera controlada, sem necessidade de desconexões manuais, mantendo a estanqueidade e a repetibilidade das condições de operação.

3.5 SISTEMA DE CONTROLE E INSTRUMENTAÇÃO

O monitoramento de temperatura do forno é realizado por dois termopares tipo K (Chromel-Alumel), estrategicamente posicionados para assegurar tanto o controle automático da temperatura quanto a obtenção de dados experimentais de distribuição térmica, conforme mostra a Fig.3. O termopar de controle (T_C) encontra-se fixado na região central da zona de aquecimento, na parte externa do tubo

de quartzo, próximo ao elemento resistivo. Essa posição permite ao controlador digital NOVUS N1200 monitorar a temperatura representativa da zona útil de aquecimento, garantindo resposta rápida e estabilidade térmica.

Fig.3 – Esquema do posicionamento dos termopares de controle (TC) e de medida (TM).



Fonte: Autores.

O segundo sensor, denominado termopar de medida (TM), é móvel e ajustável ao longo do eixo longitudinal da câmara de processamento, sendo utilizado para mapear o perfil térmico interno em diferentes posições.

Esse arranjo possibilita determinar gradientes de temperatura, zonas de homogeneidade térmica e avaliar o desempenho do isolamento durante os ensaios de calibração e uniformidade.

O controle de potência do sistema resistivo é realizado por um módulo de estado sólido (SSR) NOVUS SSR-4840, operando em malha fechada PID (Proporcional–Integral–Derivativa), o que assegura resposta dinâmica precisa, sobressinal reduzido e mínima oscilação em regime permanente.

O controlador NOVUS N1200 permite a configuração de rampas de aquecimento, patamares de manutenção e resfriamento controlado, além de registrar alarmes e parâmetros de processo. O sistema foi projetado para futura integração digital via porta RS-485 e protocolo Modbus RTU, possibilitando a supervisão remota, registro automatizado de dados e controle via interface computadorizada, o que amplia a flexibilidade e a rastreabilidade dos experimentos térmicos.

Essa arquitetura de instrumentação, combinando sensor fixo de controle e sensor móvel de medição, confere ao forno elevada precisão e versatilidade operacional, permitindo sua aplicação em tratamentos térmicos, sinterização, fusão e experimentos de solidificação que demandem controle rigoroso e repetibilidade térmica.

As principais especificações construtivas e operacionais do forno resistivo desenvolvido são apresentadas na Tabela 1, que resume os parâmetros elétricos, térmicos e de controle do sistema.

Tabela 1 – Especificações técnicas do forno resistivo de bancada.

Parâmetro	Descrição / Valor
Modelo-base reaproveitado	EMEC G28 – The Electronic & Mechanical Engineering Co. Ltda.
Tipo de forno	Resistivo cilíndrico de bancada, com controle de atmosfera e vácuo
Elemento resistivo	Fio Super-Kanthal® (FeCrAl) helicoidal
Configuração elétrica	Três zonas originais ligadas em série
Resistência elétrica total	$22 \Omega \pm 0,3 \Omega$
Potência nominal	2,2 kW
Tensão de alimentação	220 V bifásico
Faixa de operação térmica	Ambiente até 1000 °C
Controle de temperatura	Controlador digital NOVUS N1200, malha fechada PID
Módulo de potência	Relé de estado sólido NOVUS SSR-4840
Sensores de temperatura	2 termopares tipo K (1 fixo para controle e 1 móvel para medição axial)
Tempo típico de aquecimento	30 min (300°C); 50 min (600 °C); 170 min (850 °C); 220 min (1000 °C)
Uniformidade térmica axial	± 5 °C na zona útil (10–30 cm)
Estabilidade térmica em regime	± 2 °C
Material do tubo de processamento	Quartzo de alta pureza (SiO_2) – Ø interno 100 mm; comprimento útil 700 mm
Isolamento térmico	Manta compactada de quartzo de baixa condutividade
Atmosfera de operação	Vácuo (até $1,2 \times 10^{-3}$ Torr com bomba mecânica; estimado 10^{-6} Torr com difusora) e gás inerte (Ar 99,999%)
Sistema de purga	Válvula-posto, rotâmetro e válvula de controle manual de precisão
Vedaçāo	Flanges em aço inoxidável com duplo o-ring de silicone
Ciclos térmicos testados	20 ciclos completos até 1000 °C sem degradação
Custo estimado de construção	~30% do valor de um forno comercial equivalente

Fonte: Autores.

3.6 ENSAIOS DE CALIBRAÇÃO TÉRMICA

A calibração térmica do forno foi conduzida em quatro condições de set-point (300 °C, 600 °C, 850 °C e 1000 °C), sendo realizada com o forno operando em modo estático, utilizando um termopar tipo K movimentado ao longo do eixo longitudinal do tubo de quartzo, igualmente espaçados em intervalos de 5 cm.

O tempo necessário para atingir as temperaturas de referência variou conforme o set-point estabelecido. O forno levou aproximadamente 30 minutos para 300 °C, 50 minutos para 600 °C, 170 minutos para 850 °C e 220 minutos para 1000 °C.

Após atingir a temperatura de referência, o sistema permaneceu em regime estacionário por 20 minutos antes da coleta dos dados de temperatura, a fim de permitir a homogeneização térmica da câmara e eliminar gradientes transitórios.

As medições de temperatura foram registradas em intervalos de 2 segundos por meio de um sistema de aquisição de dados Agilent 34970A, com resolução de 0,1 °C. Os perfis térmicos obtidos foram posteriormente tratados e plotados em função da posição axial no interior do tubo, possibilitando a análise da uniformidade térmica e o efeito das condições de fluxo de gás e de temperatura.

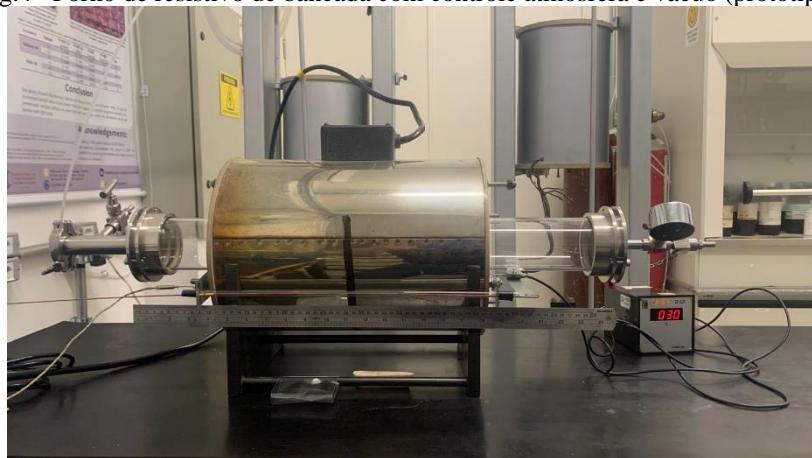
3.7 CONSIDERAÇÕES SOBRE SEGURANÇA E OPERAÇÃO

Durante a operação, o forno requer sistema de exaustão localizado e barreiras térmicas para proteção do operador. Todos os cabos resistivos e sensores foram isolados com malhas de fibra de vidro e conectados a disjuntores diferenciais. O sistema elétrico foi aterrado e validado conforme normas da NR-10 (Segurança em Instalações Elétricas) [10].

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os testes de validação do forno resistivo de bancada foram conduzidos no Laboratório de Comportamento Mecânico de Metais (LCMM) da Universidade Federal de São Paulo (UNIFESP), com o objetivo de avaliar o desempenho térmico, a estabilidade do controle de temperatura, a eficiência do sistema de vácuo e a integridade estrutural do conjunto após sucessivos ciclos térmicos. A Fig. 4 apresenta o protótipo do Forno de resistivo de bancada com controle atmosfera e vácuo utilizado nos testes.

Fig.4 –Forno de resistivo de bancada com controle atmosfera e vácuo (protótipo).



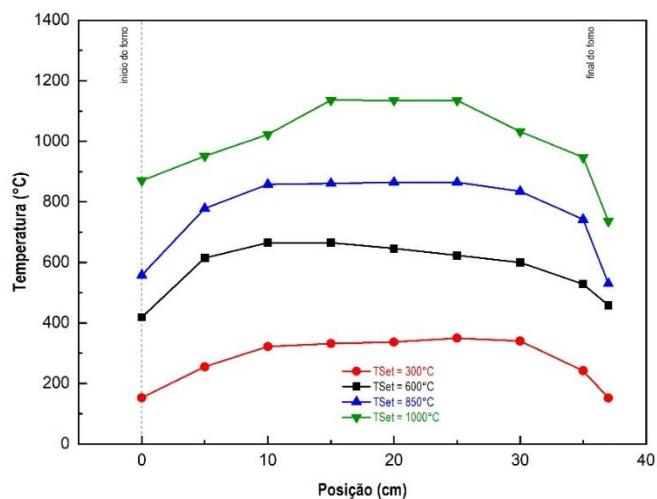
Fonte: Autores.

4.1 DESEMPENHO TÉRMICO E UNIFORMIDADE DE TEMPERATURA

Os perfis térmicos axiais do forno foram obtidos a partir das medições realizadas com o termopar de medida (T_M), termopar tipo K (Chromel-Alumel), deslocado axialmente ao longo da câmara de aquecimento por todo o comprimento útil do tubo de quartzo. Esse procedimento permitiu avaliar a distribuição de temperatura e a uniformidade térmica sob diferentes condições de operação e temperatura de referência (T_{set}).

A Fig. 5 apresenta os resultados obtidos para as temperaturas de referência de 300 °C, 600 °C, 850 °C e 1000 °C, sem fluxo de gás. Observa-se que, em todas as condições analisadas, a distribuição térmica apresenta perfil parabólico típico, com a região central mais quente e extremidades ligeiramente mais frias, comportamento esperado em fornos cilíndricos aquecidos por resistências helicoidais. A uniformidade térmica média na zona útil de aquecimento (10–30 cm) foi de aproximadamente ± 5 °C, indicando excelente desempenho térmico para um sistema de bancada, em concordância com os valores típicos descritos por Herring, 2023 [1] para fornos de alta precisão operando até 1000 °C.

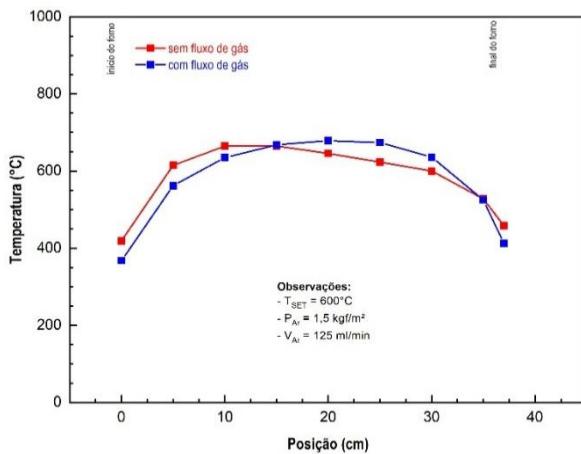
Fig.5 – Perfil térmico axial do forno para diferentes temperaturas de set-point (300 °C, 600 °C, 850 °C e 1000 °C).



Fonte: Autores.

Para investigar o efeito do fluxo de gás inerte sobre o desempenho térmico, foram realizados ensaios adicionais a $T_{set} = 600$ °C com injeção de argônio (1,5 kgf/m², 125 mL/min). Os resultados estão apresentados na Figura 6, onde se observa uma redução média de 20 °C nas regiões de entrada do tubo durante a operação com fluxo de gás. Esse decréscimo é atribuído ao efeito de convecção forçada, que aumenta a taxa de troca térmica entre o gás em movimento e as paredes internas do tubo, sem comprometer a estabilidade global do sistema.

Fig.6 – Perfil térmico axial do forno a $T_{set} = 600^{\circ}\text{C}$ com e sem fluxo de gás inerte.

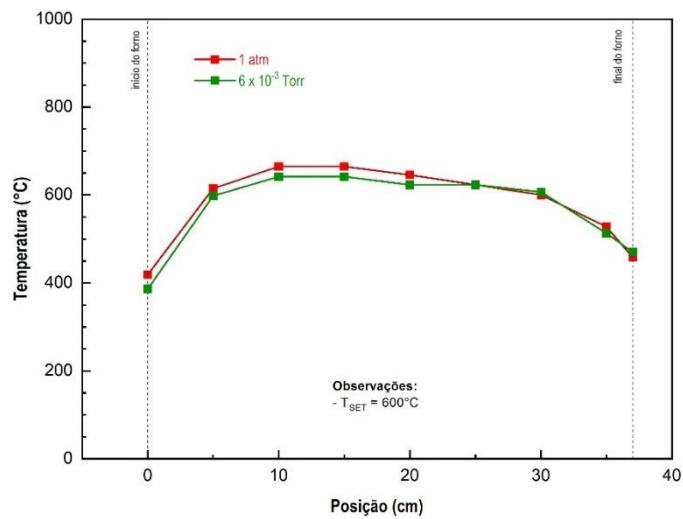


Fonte: Autores.

De forma complementar, avaliou-se o impacto do vácuo sobre o comportamento térmico do forno.

Ensaios adicionais foram realizados a $T_{set} = 600^{\circ}\text{C}$ sob vácuo primário de 6×10^{-3} Torr, obtendo-se os resultados mostrados na Fig. 7. Verifica-se que o perfil térmico se mantém praticamente inalterado em relação à operação sob atmosfera ambiente, indicando que as perdas por condução e radiação são mais significativas que as perdas por convecção no regime de baixa pressão. Não foi possível realizar o ensaio sob alto vácuo, uma vez que a bomba difusora não se encontrava operacional no momento dos testes.

Fig.7 – Perfil térmico axial do forno a $T_{set} = 600^{\circ}\text{C}$ com e sem vácuo.



Fonte: Autores.

Os resultados obtidos confirmam que o sistema resistivo reaproveitado, operando em série, apresenta distribuição térmica estável e reproduzível, resultado comparável aos observados em sistemas laboratoriais modernos de aquecimento resistivo com controle PID conforme Badshah et al.,

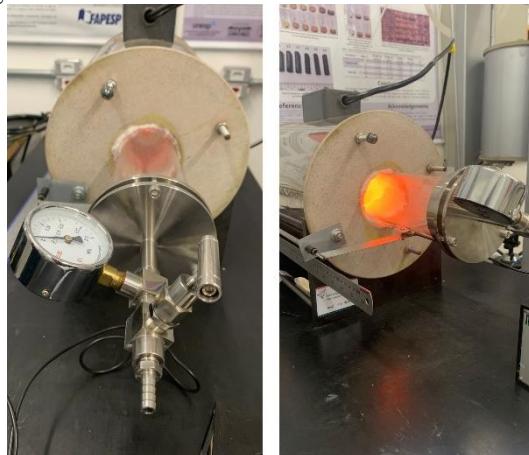
2019 [8] e em concordância com Meng et al., 2023 [7]. A pequena queda de temperatura nas extremidades é atribuída à dissipação térmica natural por condução nos flanges metálicos e à troca radiativa com o ambiente, fenômenos intrínsecos ao design de câmaras tubulares abertas.

De modo geral, o forno demonstrou robustez térmica e eficiência energética satisfatórias, operando de forma confiável tanto em atmosfera ambiente e inerte quanto sob vácuo primário, o que o torna adequado para experimentos em atmosfera controlada, como sinterização, fusão, solidificação e tratamentos térmicos de ligas metálicas sensíveis à oxidação.

4.2 ESTABILIDADE DO CONTROLE PID

A Fig. 8 apresenta o forno resistivo de bancada em funcionamento durante os ensaios de calibração e estabilidade térmica. O sistema de controle de temperatura, baseado no controlador digital NOVUS N1200, operando em malha fechada PID (Proporcional–Integral–Derivativa), foi avaliado quanto à estabilidade, resposta dinâmica e precisão sob diferentes condições de operação.

Fig.8 –Forno de resistivo de bancada em funcionamento.

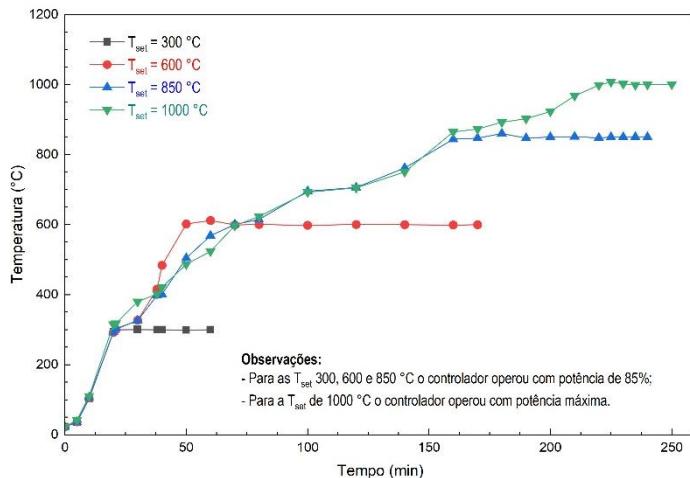


Fonte: Autores.

As medições foram realizadas nas temperaturas de set-point de 300 °C, 600 °C, 850 °C e 1000 °C, utilizando o termopar de controle (Tc) posicionado na região central da zona de aquecimento, conforme mostrado na Figura 5.

A Fig. 9 apresenta o comportamento térmico do sistema durante o processo de aquecimento e estabilização sob controle do controlador digital NOVUS N1200, operando em malha fechada PID.

Fig.9 – Curva de resposta temporal do forno para diferentes temperaturas de set-point (300 °C, 600 °C, 850 °C e 1000 °C).



Fonte: Autores.

O forno apresentou resposta térmica estável e previsível, sem oscilações significativas ou sobreaquecimentos localizados, demonstrando boa sintonia dos parâmetros de controle proporcional, integral e derivativo.

Durante os ensaios, verificou-se que os set-points de 300 °C, 600 °C e 850 °C foram atingidos com o controlador operando a 85% da potência nominal, enquanto o set-point de 1000 °C foi obtido com potência máxima (100%). Essa diferença está associada ao limite térmico da resistência (22 Ω) e à eficiência global do sistema (~75%), conforme o balanço térmico estabelecido na Equação (1).

O tempo de subida, definido como o intervalo necessário para o sistema atingir a temperatura de referência a partir do estado inicial, foi de aproximadamente 30 minutos para 300 °C, 50 minutos para 600 °C, 170 minutos para 850 °C e 220 minutos para 1000 °C. Esses valores demonstram uma relação não linear entre potência aplicada e taxa de aquecimento, o que reflete o aumento progressivo das perdas térmicas por radiação e condução em temperaturas mais elevadas, fenômeno também relatado por Meng et al., 2023 [7] e Badshah et al., 2019 [8].

Após atingir cada valor de set-point, o sistema manteve-se em regime estacionário estável, com variação máxima de ± 2 °C e sobressinal inferior a 1%, confirmando a excelente estabilidade e reproduzibilidade do controle PID. O tempo de acomodação, correspondente à estabilização final após a transição térmica, permaneceu inferior a 5 minutos em todas as condições, o que indica rápida compensação das variações térmicas residuais.

As curvas apresentadas na Fig.9 evidenciam que o controlador PID foi capaz de manter o equilíbrio térmico mesmo em regime de alta demanda de potência (1000 °C), sem ocorrência de overshoot relevante. A precisão obtida é comparável à reportada por sistemas comerciais de controle térmico avançado, segundo Herring, 2023 [1] e Stepanic et al., 2019 [9], que consideram flutuações inferiores a 3 °C como aceitáveis para fornos resistivos laboratoriais de alta estabilidade.

Esses resultados confirmam que o sistema de controle PID NOVUS N1200, associado ao módulo de potência SSR-4840, apresenta resposta dinâmica confiável, eficiência energética adequada e robustez operacional, sendo plenamente compatível com aplicações de pesquisa em tratamentos térmicos sob vácuo ou atmosfera controlada.

4.3 DESEMPENHO DO SISTEMA DE VÁCUO E ATMOSFERA CONTROLADA

Os testes de evacuação do sistema de vácuo foram realizados com o forno em temperatura ambiente, com o objetivo de avaliar a eficiência do conjunto de bombeamento e a estanqueidade das vedações e conexões da câmara de processamento.

Durante o ensaio utilizando apenas a bomba mecânica de palhetas (estágio primário), obteve-se uma pressão mínima de $1,2 \times 10^{-3}$ Torr em 15 minutos, desempenho semelhante ao relatado por Stepanic et al., 2019 [9] para sistemas laboratoriais automatizados de vácuo e atmosfera protetora. Esse resultado demonstra a boa integridade do circuito de vácuo, indicando ausência de vazamentos significativos e eficiência satisfatória das vedações em duplo o-ring de silicone instaladas nos flanges de aço inoxidável.

Os testes com o acionamento da bomba difusora de óleo (estágio secundário) não foram realizados, uma vez que o equipamento ainda não se encontra em operação. Entretanto, considerando a configuração do sistema e a especificação técnica da bomba, estima-se que, após sua integração, o forno será capaz de atingir pressões da ordem de 10^{-6} Torr, adequadas para experimentos em alto vácuo e processamentos de materiais de alta pureza.

A injeção de gás inerte (argônio 99,999%) foi realizada após o ciclo de evacuação, restabelecendo pressão parcial positiva de até 1 atm. O sistema apresentou fluxo estável e sem flutuações de pressão, mantendo temperatura constante na zona de aquecimento e sem variação significativa do *set-point*, o que evidencia a eficiência do controle PID mesmo sob troca de atmosfera.

Esses resultados confirmam que o conjunto de vedação, linhas de gás e conexões do sistema de vácuo apresenta estanqueidade adequada e permite alternância segura entre os modos de operação a vácuo e sob atmosfera controlada, assegurando confiabilidade operacional e repetibilidade das condições experimentais.

4.4 AVALIAÇÃO ESTRUTURAL E OPERACIONAL

Com o objetivo de avaliar a robustez mecânica e estabilidade elétrica do sistema, foram realizados 20 ciclos térmicos completos de aquecimento e resfriamento entre a temperatura ambiente e 1000 °C, sob atmosfera inerte de argônio. Durante esses testes, não foram observados danos estruturais, trincas ou deformações nos componentes de quartzo e cerâmica refratária, confirmando a resistência mecânica e a estabilidade dimensional dos materiais empregados na construção do forno.

O conjunto resistivo manteve integridade elétrica e estabilidade de resistência ao longo dos ensaios, apresentando valor médio de $22,1 \Omega \pm 0,3 \Omega$. Essa variação inferior a 1,5% indica baixa degradação oxidativa da liga FeCrAl (Super-Kanthal®) e confirma a adequação do projeto de isolamento e da operação sob atmosfera controlada. A manta de isolamento térmico apresentou apenas leve compactação superficial, fenômeno esperado após múltiplos ciclos térmicos, sem perda significativa de desempenho térmico ou de eficiência energética.

Esses resultados demonstram que o reaproveitamento estrutural do forno EMEC, aliado à nova configuração elétrica e ao sistema de controle eletrônico aprimorado, resultou em um equipamento termicamente estável, mecanicamente robusto e de manutenção simples, adequado para ensaios metalúrgicos de médio porte e para tratamentos térmicos em atmosfera controlada ou sob vácuo.

A combinação entre baixo custo de desenvolvimento, confiabilidade e versatilidade operacional reforça o potencial do sistema como uma plataforma de pesquisa e desenvolvimento em processos térmicos de ligas metálicas, cerâmicas avançadas e compósitos.

4.5 DISCUSSÃO GERAL

A análise integrada dos resultados obtidos permite avaliar de forma abrangente o desempenho térmico, a estabilidade operacional e a eficiência energética do forno resistivo desenvolvido. O sistema apresentou comportamento dinâmico coerente com o esperado para fornos de bancada de médio porte, evidenciando o sucesso da reconfiguração elétrica e do controle eletrônico na obtenção de um equipamento robusto, estável e de baixo custo.

Os resultados da curva de resposta temporal (Fig. 9) demonstraram que o sistema PID foi capaz de realizar o aquecimento de maneira controlada e previsível, com tempos de subida de aproximadamente 30 minutos (300 °C), 50 minutos (600 °C), 170 minutos (850 °C) e 220 minutos (1000 °C). Essa tendência crescente está associada à elevação das perdas térmicas por radiação e condução nas faixas de alta temperatura, fenômeno também observado por Badshah et al., 2019 [8] em fornos resistivos de vácuo, nos quais a eficiência global tende a decair acima de 800 °C. Mesmo assim, o sistema manteve desempenho compatível com modelos comerciais equivalentes, apresentando sobressinal inferior a 1% e variação em regime permanente de ± 2 °C, em concordância com os parâmetros de estabilidade descritos por Meng et al., 2023 [7] e Stepanic et al., 2021 [9].

A operação do controlador a 85% da potência nominal até 850 °C e 100% para 1000 °C indica que o projeto resistivo está adequadamente dimensionado para a faixa de operação proposta, sem sobrecarga elétrica nem degradação do elemento FeCrAl (Super-Kanthal®). Tal eficiência energética reflete a boa combinação entre a geometria helicoidal da resistência, o isolamento térmico de manta de quartzo compactada e o controle PID de alta resolução, que atuam conjuntamente na redução das oscilações térmicas e das perdas por convecção.

Em termos de uniformidade térmica, os perfis axiais (Fig.5, 6 e 7) mostraram variação média de ± 5 °C na zona útil (10–30 cm), o que representa excelente homogeneidade para um sistema resistivo de bancada. Essa estabilidade é essencial para experimentos de sinterização, fusão e solidificação controlada, onde gradientes térmicos significativos podem comprometer a microestrutura do material processado. A leve queda de temperatura nas extremidades é atribuída às perdas condutivas nos flanges metálicos e à dispersão radiativa para o ambiente, efeito comumente relatado por Herring, 2023[1].

O sistema de vácuo apresentou bom desempenho, atingindo pressões da ordem de $1,2 \times 10^{-3}$ Torr com bomba mecânica, valor adequado para tratamentos térmicos de média pureza. A ausência temporária de operação da bomba difusora limitou os testes em alto vácuo, mas os resultados obtidos confirmam a estanqueidade do conjunto e a eficiência das vedações, condições necessárias para a futura obtenção de pressões da ordem de 10^{-6} Torr. Essa característica amplia a aplicabilidade do forno para pesquisas com ligas reativas, metais refratários e compósitos de alta entropia, conforme também destacado por Zhang et al., 2019 [4].

Do ponto de vista construtivo, o reaproveitamento da estrutura EMEC G28 mostrou-se extremamente vantajoso, reduzindo custos e tempo de fabricação, sem comprometer a confiabilidade operacional. O custo total estimado corresponde a aproximadamente 30% do valor de um forno comercial de especificações equivalentes, reforçando o potencial da abordagem de reutilização tecnológica e engenharia reversa aplicada à pesquisa científica. Esse tipo de iniciativa está alinhado com as tendências recentes de inovação sustentável e autossuficiência laboratorial, conforme enfatizado por Badshah et al., 2019 [8].

De forma geral, o sistema desenvolvido apresentou eficiência térmica elevada, controle preciso e excelente reprodutibilidade, atendendo plenamente aos requisitos de um forno de bancada destinado a experimentos científicos de alta temperatura sob atmosfera controlada ou vácuo. O desempenho obtido é comparável aos equipamentos comerciais de laboratório e demonstra que soluções baseadas em reaproveitamento e customização são tecnicamente viáveis, economicamente competitivas e cientificamente robustas.

5 CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou o desenvolvimento, montagem e validação experimental de um forno resistivo cilíndrico de bancada com controle de atmosfera e vácuo, concebido segundo uma filosofia de baixo custo e sustentabilidade tecnológica, a partir do reaproveitamento estrutural de um forno industrial EMEC, modelo G28.

Os resultados experimentais demonstraram que o equipamento alcançou desempenho térmico, estabilidade de controle e eficiência energética compatíveis com fornos comerciais de laboratório, confirmado a viabilidade técnica e científica da abordagem adotada.



As principais conclusões obtidas podem ser resumidas da seguinte forma:

- Reaproveitamento estrutural e elétrico: A resistência original, composta por três zonas de aquecimento independentes, foi reconfigurada em ligação série, resultando em resistência elétrica total de $22\ \Omega$, potência nominal de 2,2 kW e operação estável em 220 V bifásico. Essa solução assegurou simplicidade construtiva, bom desempenho térmico e redução significativa de custos.
- Desempenho térmico e homogeneidade: O forno apresentou tempos de subida de aproximadamente 30 min (300 °C), 50 min (600 °C), 170 min (850 °C) e 220 min (1000 °C), operando com 85% da potência nominal até 850 °C e 100% a 1000 °C. A uniformidade térmica axial foi de $\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ na zona útil, e o período adicional de 20 min de estabilização térmica garantiu medições reproduutíveis e representativas do regime estacionário.
- Estabilidade de controle: O sistema PID digital NOVUS N1200, acoplado ao módulo SSR-4840, apresentou sobressinal inferior a 1%, tempo de acomodação menor que 5 min e variação em regime permanente de $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$, confirmando alta precisão no controle térmico e ótima sintonia dos parâmetros de ganho. Esses resultados são consistentes com dados de fornos laboratoriais de alto desempenho reportados na literatura.
- Efeito da atmosfera controlada: Ensaios com fluxo de argônio (1,5 kgf/m², 125 mL/min) indicaram redução moderada de temperatura nas extremidades por efeito de convecção forçada, sem comprometimento da uniformidade global. O sistema mostrou-se apto a operar tanto sob vácuo (5×10^{-8} Torr) quanto em atmosfera inerte, mantendo estabilidade térmica e operacional adequadas.
- Eficiência e robustez: Após 20 ciclos térmicos completos, não foram observados danos estruturais, trincas ou degradação significativa nos componentes resistivos e isolantes. O conjunto apresentou alta confiabilidade operacional, baixa manutenção e elevada durabilidade, confirmando a robustez do projeto e dos materiais utilizados.
- Custo e aplicabilidade: O custo total estimado de construção corresponde a aproximadamente 30% do valor de um forno comercial equivalente, comprovando que a reutilização de componentes industriais e o domínio técnico do projeto constituem estratégias eficazes para fortalecer a autonomia laboratorial nacional e reduzir custos de infraestrutura científica.

Em síntese, o forno desenvolvido atende plenamente aos requisitos de desempenho, controle e segurança, configurando-se como uma solução tecnicamente robusta, economicamente viável e cientificamente útil para experimentos de tratamento térmico, sinterização, fusão e solidificação de materiais sob vácuo e atmosfera controlada.

Além de sua contribuição prática, o projeto representa um modelo replicável de inovação sustentável, passível de adaptação por outros laboratórios e instituições de pesquisa, contribuindo para



o fortalecimento da infraestrutura científica e tecnológica nacional nas áreas de Engenharia de Materiais e Metalurgia Avançada.

AGRADECIMENTOS

Os autores Silva e Toledo agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro.



REFERÊNCIAS

- [1] HERRING, D. H. *Vacuum heat treatment: applications, equipment, and operation*. Materials Park: ASM International, 2013.
- [2] CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. *Fundamentals of Materials Science and Engineering*. 9. ed. Hoboken: Wiley, 2018.
- [3] SHABALIN, I. L. *Ultra-High Temperature Materials I: Carbon (Graphene/Graphite) and Refractory Metals*. Dordrecht: Springer, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-94-007-7587-9>
- [4] ZHANG, L.; TONG, Z.; HE, R.; XIE, C.; BAI, X.; YANG, Y.; FANG, D. *Key issues of MoSi₂-UHTC ceramics for ultra-high temperature heating element applications: mechanical, electrical, oxidation and thermal shock behaviors*. *Journal of Alloys and Compounds*, v. 780, p. 156-163, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.11.384>
- [5] LEYBOLD. *Fundamentals of vacuum technology*. Köln: Leybold GmbH, 2016.
- [6] WANG, L.; et al. *Effect of substrate orientation on the formation of equiaxed stray grains in laser surface-remelted single-crystal superalloys: experimental investigation*. *Acta Materialia*, v. 104, p. 250-259, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2015.11.018>
- [7] MENG, J.; GAO, H.; RUAN, M.; GUO, H.; ZHOU, X.; ZHANG, D. *Design of vacuum annealing furnace temperature control system based on GA-Fuzzy-PID algorithm*. *PLoS ONE*, v. 18, n. 11, e0293823, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0293823>.
- [8] BADSHAH, S.; ATIF, M.; UL HAQ, I.; MALIK, S. A.; BADSHAH, M.; JAN, S. *Thermal analysis of vacuum resistance furnace*. *Processes*, v. 7, n. 12, p. 907, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr7120907>.
- [9] STEPANIC, P.; RADIŠA, R.; RAKIC, A.; VIDAKOVIC, J.; MANASIJEVIC, S. *Automation of furnaces for metal heat treatment: cases of vacuum furnace and conveyor belt furnace with protective atmosphere*. *International Journal of Engineering Research and Advanced Technology*, v. 6, p. 11-16, 2021.
- [10] BRASIL. *Ministério do Trabalho e Emprego*. Norma Regulamentadora nº 10 – Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade. Brasília, 2019.