

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE CONTROLE TÉRMICO ATIVO  
PARA GABINETES DE IMPRESSORA 3D

por

Tales Boniatti

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, Fevereiro de 2024.

## DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO

BONIATTI, TALES

PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE CONTROLE  
TÉRMICO ATIVO PARA GABINETES DE IMPRESSORA 3D / TALES  
BONIATTI. -- 2024.

26 f.

Orientador: EDUARDO ANDRÉ PERONDI.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de  
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto  
Alegre, BR-RS, 2024.

1. Controle Térmico. 2. PID. 3. Impressora 3D. 4.  
Manufatura Aditiva. 5. Ziegler Nichols. I. PERONDI,  
EDUARDO ANDRÉ, orient. II. Título.

Tales Boniatti

PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE CONTROLE TÉRMICO ATIVO  
PARA GABINETES DE IMPRESSORA 3D

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
**ENGENHEIRO MECÂNICO**  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Ignácio Iturrioz  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Energia e Fenômenos de Transporte

Orientador: Prof. Dr. Eduardo André Perondi

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Mário Roland Sobczyk Sobrinho

Prof. Dr. Fabiano Disconzi Wildner

Prof. Dr. Tiago Becker

Porto Alegre, Fevereiro de 2024

## DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Francisco e Maria, fontes inesgotáveis de incentivo e inspiração.

## AGRADECIMENTOS

A minha família pelo apoio e ensinamentos durante toda minha vida. Em especial aos meus pais, por todo apoio e dedicação durante essa jornada.

A todos os amigos formados durante o curso, pelo apoio e ensinamentos, certamente essa jornada seria mais difícil sem vocês.

Aos amigos engenheiros da Comil, Cassiano, Felipe, Natalia e Otavio, pelo apoio técnico, incentivo e valiosos conselhos.

Boniatti, Tales. **Projeto e Desenvolvimento De Sistema De Controle Térmico Ativo Para Gabinetes De Impressora 3d**. 2024. 24 páginas. Monografia de Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2024.

## RESUMO

O presente trabalho destaca a importância do controle automático na ciência e engenharia, particularmente em sistemas de controle térmico. Explora-se a aplicação dessa tecnologia na manufatura aditiva, notadamente na impressão 3D, e os desafios enfrentados devido à contração térmica, que afeta a integridade dimensional das peças produzidas. Diante da limitação no uso de materiais avançados na manufatura aditiva devido à falta de controle térmico nos gabinetes de impressão 3D, propõe-se o desenvolvimento de um sistema de controle térmico ativo em malha fechada para gabinetes de baixo e médio custo. Destaca-se a importância desse controle, especialmente ao lidar com materiais suscetíveis a contrações térmicas, visando a assegurar a qualidade das peças e evitar deformações. A pesquisa não apenas atende a uma demanda prática na manufatura aditiva, mas também contribui significativamente para a evolução dessa tecnologia. Ao superar a barreira do controle térmico, abre-se a possibilidade de utilizar materiais mais avançados, demonstrando sua relevância tanto para a academia quanto para a indústria e profissionais envolvidos na vanguarda da Engenharia Mecânica. O trabalho abrange os fundamentos do controle térmico, introduzindo sistemas de controle e controladores PID, e apresenta um caso de estudo detalhado sobre o sistema proposto. Como conclusões pode-se destacar e detalhar como opção mais desejada a aplicação de um sistema de controle PID com laço anti-windup como o sistema que atende todos os requisitos de operação desejados.

**PALAVRAS-CHAVE:** Impressão 3D, Sistema de controle, PID, gabinete

Boniatti, Tales. **Design and Development of an Active Thermal Control System for 3D Printer Enclosures**. 2024. 24 pages. Mechanical Engineering End of Course Monography – Mechanical Engineering degree, The Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, year.

#### ABSTRACT

This work highlights the importance of automatic control in science and engineering, particularly in thermal control systems. The application of this technology in additive manufacturing, notably in 3D printing, and the challenges faced due to thermal contraction, which affects the dimensional integrity of the produced parts, are explored. Given the limitation in using advanced materials in additive manufacturing due to the lack of thermal control in 3D printing enclosures, the development of an active thermal control system in a closed loop for low and medium-cost enclosures is proposed. The importance of this control is highlighted, especially when dealing with materials susceptible to thermal contractions, aiming to ensure the quality of the parts and prevent deformations. The research not only meets a practical demand in additive manufacturing but also significantly contributes to the evolution of this technology. By overcoming the barrier of thermal control, the possibility of using more advanced materials is surpassed, demonstrating its relevance to academia, industry, and professionals at the forefront of Mechanical Engineering. The work covers the fundamentals of thermal control, introducing control systems and PID controllers, and presents a detailed case study on the proposed system. It is concluded that the most suitable option is the application of a PID control system with anti-windup loop as the system that meets all the desired operational requirements.

**KEYWORDS:** 3D Printing, Control System, PID, Enclosure

## NOMENCLATURA

### Símbolos

$R$	Sinal de referência	
$e$	Erro do sistema	
$Y$	Sinal de saída	
$K_p$	Coefficiente do controlador proporcional	
$K_i$	Coefficiente do controlador integral	
$K_d$	Coefficiente do controlador derivativo	
$T_i$	Tempo integral	[s]
$T_d$	Tempo derivativo	[s]
$\tau$	Constante de tempo do sistema	[s]
$\theta$	Tempo morto (delay)	[s]
$K$	Ganho do sistema	
$Q$	Taxa de troca de calor	[W]
$k$	Condutividade térmica	[W/m.K]
$A$	Área de face	[m <sup>2</sup> ]
$\Delta T$	Diferença de temperatura	[°C]
$d$	Espessura da parede	[mm <sup>2</sup> ]
$T$	Temperatura interna	[°C]
$T_a$	Temperatura do ambiente externo	[°C]
$R$	Resistência térmica	[K/W]
$C$	Capacitância térmica	[J/K]

### Abreviaturas e acrônimos

PID	<i>Proporcional Integrativo e Derivativo</i>
-----	--

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Descrição simplificada de um sistema de Controle.....	2
Figura 2 - Sistema em malha fechada com controlador PID.....	3
Figura 3: Resposta de um sistema no qual é aplicável o primeiro método de Ziegler-Nichols e Hägglund.....	4
Figura 4 - Resposta de um sistema na qual é aplicável o método de Smith.....	5
Figura 5 - Esquema do sistema utilizado no estudo de caso.....	7
Figura 6 - Representação do modelo.....	8
Figura 7 - Componentes selecionados.....	9
Figura 8 - Modelo utilizado.....	9
Figura 9 - Diagrama do modelo em malha aberta.....	10
Figura 10 - Diagrama do modelo em malha fechada ON/OFF.....	11
Figura 11 - Diagrama do modelo PID.....	11

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	1
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	2
2.1.	Sistemas de controle .....	2
2.2.	Sintonia de controladores PID.....	3
2.2.1.	Primeiro método de Ziegler-Nichols e método Hägglund .....	4
2.2.2.	Método de Smith .....	5
2.3.	Saturação do integrador e método anti-windup.....	5
2.4.	Desenvolvido atual e pesquisas recentes.....	6
3.	CASO DE ESTUDO .....	6
3.1.	Critérios de projeto .....	6
3.1.1.	Critérios térmicos .....	6
3.1.2.	Funcionamento e integração com demais fontes de calor .....	7
3.2.	Definição do sistema .....	7
3.4.	Estimativa de Potência e seleção da Resistência Térmica.....	8
3.5.	Equacionamento Do Sistema Térmico .....	9
3.6.	Definição Dos Parâmetros Físicos Do Sistema .....	10
3.7.	Sistemas Modelados .....	10
3.7.1.	Modelo em Malha Aberta.....	10
3.7.2.	Modelo ON/OFF .....	11
3.7.3.	Modelo PID .....	11
4.	RESULTADOS .....	11
4.1.	Comportamento Dos Modelos Em Malha Aberta .....	12
4.2.	Comportamento em malha fechada .....	14
4.3.	Análise dos resultados .....	14
5.	CONCLUSÕES .....	15
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA .....	16

## 1. INTRODUÇÃO

A manufatura aditiva, também conhecida como impressão 3D, representa um marco inovador na produção de peças complexas e customizadas. Esse método cria objetos adicionando material, camada por camada, seguindo instruções geradas por um código de programação via computador, proporcionando possibilidades únicas na construção de estruturas com geometrias complexas (MICALLEF, 2015). A evolução significativa na tecnologia de impressão 3D e a disponibilidade crescente de equipamentos avançados no mercado consumidor marcam um período promissor para a aplicação generalizada desta técnica.

Entretanto, mesmo diante dos importantes avanços tecnológicos, um desafio substancial persiste para aqueles que buscam explorar plenamente os benefícios da manufatura aditiva para fabricação de peças funcionais. Essa barreira está relacionada à limitação no uso de materiais com propriedades mecânicas superiores, uma restrição muitas vezes imposta pela falta de um controle térmico adequado nos sistemas de impressão. A ausência de precisão térmica muitas vezes gera uma diferença de temperatura elevada entre a peça e o ambiente de impressão, causando desta forma contração térmica do material, a qual emerge como um fator crítico, impactando diretamente na integridade dimensional e viabilidade de uso prático das peças produzidas. Esse efeito provoca tensões que podem resultar em distorções na peça final, especialmente onde a taxa de polimerização é maior. Portanto, compreender e gerenciar a contração térmica torna-se uma tarefa vital para a impressão 3D (COELHO, 2016). Esse efeito pode ser mitigado com o controle térmico da massa de ar ambiente que entra em contato com a peça, evitando grandes diferenças de temperatura. Atualmente, há no mercado a disponibilidade de máquinas com controle térmico que mitigam esse efeito. No entanto, tal tecnologia ainda se limita a um mercado restrito, profissionalizado e de alto custo de aquisição, o que restringe o amplo acesso à tecnologia de materiais por grande parte do público consumidor.

Neste contexto, o presente trabalho surge como uma resposta a essa necessidade, propondo o desenvolvimento de um sistema de controle térmico ativo em malha fechada destinado aos gabinetes de manufatura aditiva de baixo e médio custo disponíveis no mercado. O controle preciso do ambiente de impressão assegura a manutenção uniforme da temperatura da peça ao longo do processo, o que contribui para mitigar possíveis deformações (GREGÓRIO, 2019).

Para tal o trabalho se objetiva:

1. Definir os parâmetros físicos e geométricos do sistema
2. Comparar os métodos de Ziegler-Nichols, Hägglund e Smith para definição de função de transferência para a planta
3. Comparar a efetividade dos sistemas de controle em malha aberta, malha fechada ON/OFF, malha fechada PID e malha fechada PID acrescida de sistema anti-windup

Deste modo, além de atender a uma demanda prática na manufatura aditiva, esta pesquisa contribui para o aprimoramento contínuo desta tecnologia. Ao superar a barreira do controle térmico, abre-se a uma significativa parcela do mercado um novo horizonte de possibilidades para a utilização de materiais mais avançados, destacando a relevância deste trabalho não apenas para a comunidade acadêmica, mas também para a indústria e os profissionais envolvidos na vanguarda da Engenharia Mecânica.

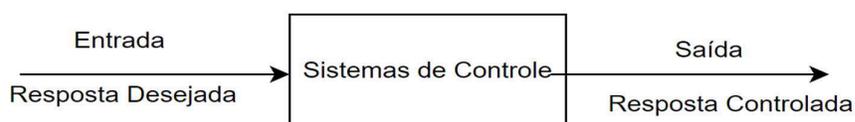
## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção, apresentam-se e discutem-se os principais métodos de controle de sistemas físicos, destacando sua funcionalidade e aplicação ao problema em questão. Além disso, são abordadas considerações sobre as especificidades do sistema físico a ser controlado.

### 2.1. Sistemas de controle

Um sistema de controle consiste em um conjunto de subsistemas e processos (ou plantas) construídos com o objetivo de obter uma saída esperada com um desempenho desejado, dada uma entrada especificada (NISE, 2011). O esquema apresentado na Figura 1 mostra o diagrama básico que caracteriza um sistema de controle.

Figura 1 - Descrição simplificada de um sistema de controle.



Fonte: Autor, 2024.

Sistemas de controle são diferenciados pela forma como processam e corrigem erros. Eles operam primariamente em duas configurações de malha: aberta e fechada. Em uma malha aberta, o processo é linear e direto, sem realimentação para ajustes de erro. Em contraste, um sistema de malha fechada incorpora um mecanismo de realimentação, onde os sinais controlados são continuamente monitorados e ajustados. Essa realimentação permite uma resposta dinâmica às variações do sistema, resultando em uma maior precisão e eficiência no controle do processo.

Dentre os controles em malha fechada o modelo ON-OFF é o mais simples entre os controladores abordados, sendo composto por um circuito que compara o sinal de entrada com dois valores de referência (limite inferior e superior). Quando o sinal de entrada fica abaixo do limite inferior, a saída do controlador é ativada, acionando o atuador com potência máxima. Por outro lado, quando o sinal de entrada ultrapassa o limite superior, a saída é desligada e o atuador é desativado. A limitação desse sistema é evidente, uma vez que o atuador opera sempre com potência máxima ou está desligado, impedindo um controle preciso sobre a potência inserida no sistema.

Dentre os tipos de controladores mais precisos, podemos destacar os controladores PID, os quais minimizam o sinal de erro por meio da ação proporcional, tendendo a eliminá-lo totalmente através da ação integral, além de antecipar a tendência do processo por meio de ações derivativas. O uso de controladores PID é aplicado às mais diversas variáveis, como pressão, temperatura, velocidade, entre outras (OGATA, 2011). Para um melhor entendimento, abaixo segue uma breve descrição de cada ação de um sistema com controlador:

**Ação de controle Proporcional:** O controle proporcional serve para ajuste da saída, baseado em diferenciais entre constantes simplificadas ciclicamente, respondendo rapidamente a variações e distúrbios do ponto de ajuste. Este método auxilia a reduzir o erro proporcional para estabilização do sistema, porém aplicado isoladamente pode oferecer um resultado oscilante (OGATA, 2011). Uma das limitações deste sistema se dá pelo fato de o mesmo introduzir um desvio permanente na variável controlada, que para corrigir se necessita de um ganho significativamente grande o que pode causar a instabilidade do sistema.

**Ação de controle Integral:** Este método baseia-se na compilação dos erros acumulados durante o processo com o decorrer do tempo. Atua no sistema para que este erro seja minimizado ao longo do processo, fazendo com que seja alcançado os valores desejados, suavemente. Com a aplicação combinada à ação de controle proporcional obtém-se resultados com menores oscilações, geralmente melhorando o resultado obtido (OGATA, 2009). A ação de controle integral tem como limitação uma tendência de tornar a resposta do sistema lenta e criar o risco de saturação do sinal de controle.

**Ação de controle Derivativa:** Esta ação leva em consideração a taxa de oscilação da saída do processo. Atua prevendo a tendência de aumento ou diminuição do erro, tendo como base seus últimos comportamentos. Evita assim que a resposta seja exageradamente rápida, o que pode ocorrer devido a mudanças não previstas (ou perturbações) (LOURENÇO, 1997). A limitação do controle derivativo está ligada ao aumento da suscetibilidade a ruído do sistema de aquisições de dados.

**Controle Proporcional, Integral e Derivativo (PID):** O algoritmo resultante da utilização combinada dos três métodos pode apresentar uma resposta precisa e controlada do processo, evitando que distúrbios repentinos afetem significativamente o resultado e andamento do processo (OGATA, 2011).

Seu cálculo e aplicação é comumente baseado no tempo, conforme a Equação (1) abaixo:

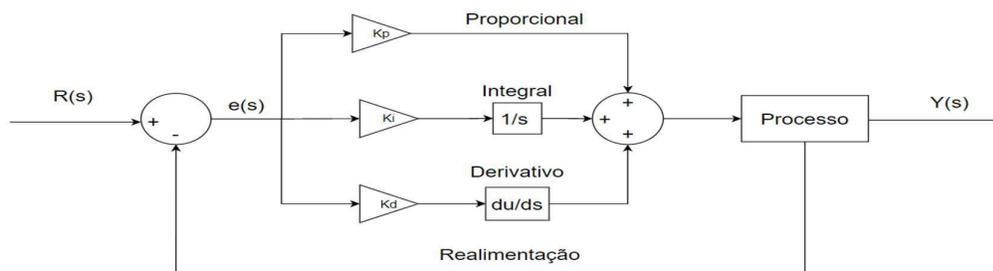
$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t)dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

onde  $e$  é o sinal do erro,  $t$  é o tempo,  $K_p$  é o coeficiente do controlador proporcional,  $K_i$  o coeficiente do controlador integrativo e  $K_d$  o coeficiente do controlador derivativo.

Após a escolha do controlador para a malha de realimentação, precisa-se ajustar os parâmetros que melhor se enquadram às características da malha, sendo o principal critério a estabilidade do sistema. Esse processo é chamado de sintonização de controladores (STEPHANOPOULOS, 1984).

A Figura 2 apresenta um diagrama de blocos de um controlador PID construído de acordo com a Equação (1).

Figura 2 - Sistema em malha fechada com controlador PID.



Fonte: Autor, 2024.

## 2.2. Sintonia de controladores PID

A Equação (2) descreve o mesmo controlador PID, em função do parâmetro proporcional e de parâmetros temporais.

$$U(t) = u(t) = K_p \left( e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t)dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (2)$$

Esses parâmetros, além do ganho proporcional  $K_p$ , são o tempo integral  $T_i$  e o tempo derivativo  $T_d$ .

Com base nessa equação, é necessário obter os valores de cada um dos parâmetros para garantir um desempenho satisfatório do sistema em malha fechada. Para atingir esse objetivo, são empregadas diretrizes para definir os valores do ganho proporcional, do tempo integral e do tempo derivativo, levando em consideração as características da resposta transitória de uma planta específica. Existem diversos métodos desenvolvidos e documentados para a sintonia de parâmetros de um controlador PID, neste trabalho, serão considerados os principais métodos de sintonia baseados em pulsos de malha aberta, o que nos permite obter os parâmetros e caracterizar o sistema de modo prévio à implementação do controlador.

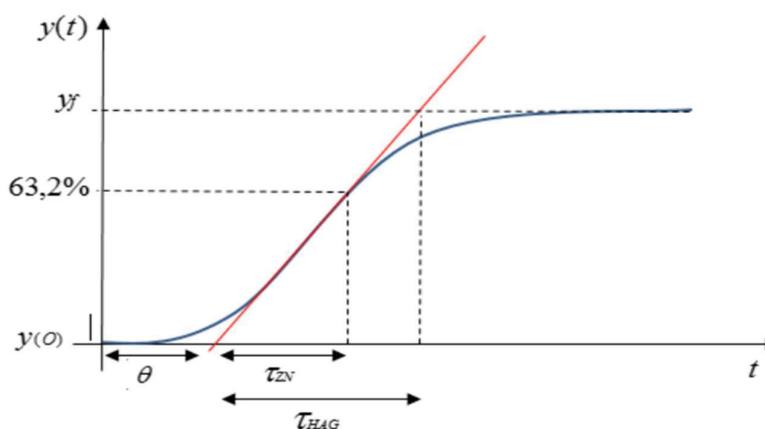
### 2.2.1. Primeiro método de Ziegler-Nichols e método Hägglund

O primeiro método de Ziegler-Nichols, conhecido como o método do teste em degrau ou método de malha aberta, inicia com o sistema físico real em estado estacionário. Em seguida, é aplicado um pequeno distúrbio do tipo degrau na entrada do sistema. No entanto, o distúrbio não deve ser tão pequeno a ponto de não ser possível ser mensurável, e o valor do sinal de entrada deve permanecer constante até o sistema atingir novamente o estado estacionário (SMITH E CORRIPIO, 1997; SEBORG et al, 2011).

Neste método, os parâmetros de resposta do processo,  $K$ ,  $\tau$  e  $\theta$  são calculados conforme ilustrado na figura, onde  $K$  é o ganho do controlador,  $\tau$  é a constante de tempo do sistema, caracterizada pelo tempo necessário para o sistema atingir 63,2% do valor da estabilização térmica, e  $\theta$  é tempo morto, que pode ser descrito como o atraso até a ativação do sistema definindo a inercia do sistema até sua resposta, conforme Figura 3.

De acordo com o procedimento proposto por Hägglund, a constante de tempo é calculada pela intersecção da reta tangente com o valor de regime da saída, observado na Figura 3 como  $\tau_{HAG}$ .

Figura 3: Resposta de um sistema no qual é aplicável o primeiro método de Ziegler-Nichols e Hägglund



Fonte: SENA, 2011.

O ganho  $K$  do sistema é descrito pela Equação (3), que é a razão entre a variação de saída e a amplitude do degrau na entrada.

$$K = \frac{y_f - y_{(0)}}{u_f - u_{(0)}} \quad (3)$$

A partir dos valores  $K$ ,  $\tau$  e  $\theta$ , utiliza-se a Tabela 1 para calcular o ganho proporcional  $K_p$  e as constantes de tempo integral e derivativa,  $T_i$  e  $T_d$ , respectivamente.

Tabela 1 – Parâmetros de controlador

Controlador	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$\frac{\tau}{K\theta}$	-	-
PI	$0.9 \frac{\tau}{K\theta}$	$3.33\theta$	-
PID	$1.2 \frac{\tau}{K\theta}$	$2\theta$	$0.5\theta$

Fonte: CAMPOS (2006).

### 2.2.2. Método de Smith

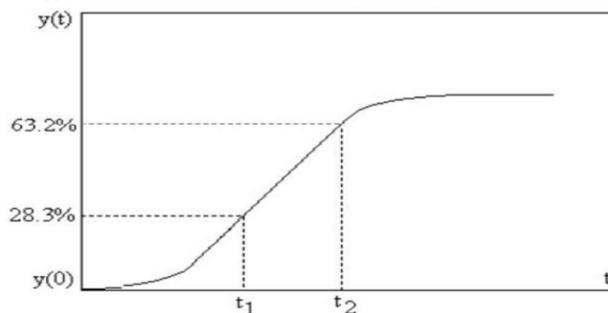
Para este método, o ganho  $K$  do sistema é descrito pela Equação (3). O que distingue este método do primeiro, é o cálculo do tempo morto  $\theta$  e a constante de tempo  $\tau$ . Para o cálculo destes parâmetros, deve-se utilizar as equações (4) e (5),

$$\tau = 1,5(t_2 - t_1) \quad (4)$$

$$\theta = t_2 - \tau \quad (5)$$

onde,  $t_1$  representa o instante onde a saída atinge o percentual de 28,3% e  $t_2$  representa o instante no qual a saída atinge percentual de 63,2% conforme pode ser observado na Figura 4.

Figura 4 - Resposta de um sistema na qual é aplicável o método de Smith.



Fonte: Coelho & Coelho (2004).

Os cálculos dos ganhos do controlador PID também são realizados utilizando a Tabela 1.

### 2.3. Saturação do integrador e método anti-windup

Mesmo com a aplicação cuidadosa de métodos de sintonia e com parâmetros de ganho adequadamente ajustados, um desafio persistente nos sistemas de controle PID é a saturação do ganho integral. Esse fenômeno ocorre quando o atuador do sistema alcança seu limite operacional, resultando em um acúmulo excessivo no integrador, que pode levar à instabilidade e a uma resposta inesperada do sistema. Para mitigar esse problema, é necessário implementar um laço anti-windup no modelo de controle. O laço anti-windup atua como um mecanismo preventivo contra o aumento contínuo do ganho integral, mesmo quando o atuador está saturado.

## **2.4. Desenvolvido atual e pesquisas recentes**

Em sua maioria, os sistemas de controle de gabinete são desenvolvidos por empresas privadas. Deste modo os projetos e considerações acerca do tema são de propriedade das empresas e não estão disponíveis ao público em geral. Contudo, existem desenvolvimentos de artigos similares no âmbito, os quais consideram a influência térmica do gabinete nas impressoras FDM. Gonzales, 2023, desenvolveu um estudo acerca do controle da umidade na qualidade de impressão 3D. Utilizando dinâmica de fluidos computacional e testes práticos, estudou-se designs de ambientes controlados para impressoras 3D, identificando que ambientes controlados aumentam a qualidade da impressão.

De modo similar ao aplicado no estudo proposto, Ermolai, 2021, descreve o desenvolvimento de uma cobertura para impressoras 3D de mesa, utilizando design axiomático, sendo assim equacionando as necessidades do usuário, para melhorar a qualidade de impressão em polímeros. A cobertura otimizada proporcionou menor variação de temperatura e umidade, redução de ruído e segurança aprimorada. Os resultados indicaram uma melhoria nas condições de impressão 3D. Contudo, ainda existem oportunidades de aprimoramento e melhoria para este tipo de aplicação, adicionando um elemento controlável de fonte calor e realizando o devido controle térmico, de modo a garantir um melhor controle do sistema, conforme proposto neste trabalho.

## **3. CASO DE ESTUDO**

Nesta seção, são apresentadas as características do problema em questão, destacando quais são os parâmetros de projeto que devem ser atendidos. Além disso, são discutidas as abordagens teóricas que melhor se encaixam no caso descrito, juntamente com a descrição de como o problema será resolvido.

### **3.1. Critérios de projeto**

Os critérios de projeto são definidos antes da execução do projeto do sistema, sendo esses os parâmetros que guiam e definem o desempenho que o sistema deve alcançar.

#### **3.1.1. Critérios térmicos**

Considerando que a proposta do sistema é viabilizar a utilização de materiais mais avançados, um dos casos desejados para obter sucesso durante o processo de impressão é o uso de materiais com compostos de poliamida, em específico o PolyMide PA612-CF, cujo fabricante recomenda uma temperatura ambiente de 80°C. Essa temperatura será utilizada como referência para os parâmetros de operação do sistema.

Existem alguns componentes originais de impressoras 3D que certamente teriam seu funcionamento afetado quando expostos as temperaturas ambientes que se pretendem atingir, sendo que, na medida do possível, os componentes serão realocados para fora do gabinete aquecido. É considerada a realocação de todos os circuitos lógicos, como placa de controle da máquina, além da fonte energia e tela de controle.

Entretanto, não é possível realizar a realocação de todos os componentes da máquina para o exterior do gabinete. Nesse contexto, motores de passo, sensores térmicos originais, sensores de fim de curso e ventoinhas deverão suportar o aumento de temperatura do considerado.

Os motores de passo utilizados na máquina base para o projeto são NEMA 17 com classe de isolamento H, capazes de atingir uma temperatura de operação de até 180°C. Contudo, de acordo com o fornecedor, pode haver um acréscimo de até 80°C devido ao uso do motor. Portanto a temperatura ambiente à qual o motor pode ser exposto não deve passar de 100°C. Para a temperatura da ventoinha (Digikey - OD6020-24HB) e dos sensores de fim de curso (Digikey - D2F-01L), não se deve superar os 85°C de acordo com o fabricante.

Baseado nas considerações descritas acima, o sistema a ser controlado possui seu *setpoint* (ponto de trabalho desejado) em 80°C, sendo que a temperatura limite de operação é definida em 85°C.

### 3.1.2. Funcionamento e integração com demais fontes de calor

Existem demais sistemas térmicos necessários para o funcionamento de uma impressora 3D além do proposto no trabalho, sendo os de aquecimento da base de impressão e do bico extrusor. Por definição, o escopo do projeto é implementar o controle apenas no gabinete, onde o controle térmico dos demais sistemas será gerenciado por controladores já presentes na máquina. Deste modo, todo ganho gerado por esses elementos é considerado como perturbação externa do sistema de controle da temperatura do gabinete.

Como princípio de operação, a máquina parte de um estado de equilíbrio térmico com o ambiente externo. É, então, acionado o sistema para ajuste da temperatura do gabinete, após a estabilização, os demais sistemas da máquina serão acionados. Durante o aquecimento, o sistema de controle do gabinete deve compensar o ganho de calor das demais fontes para garantir que os parâmetros térmicos antes definidos sejam mantidos. Os ganhos gerados por estas fontes são considerados como perturbação externa no modelo do controlador.

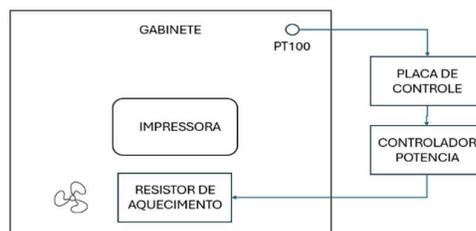
Seguindo os critérios acima, também é desejável que o sistema possua o menor tempo de acomodação possível, proporcionando uma melhor utilização e disponibilidade da máquina.

### 3.2. Definição do sistema

O caso proposto consiste em um gabinete envolvendo a máquina, atuando como barreira térmica e criando um ambiente isolado onde se realizara o controle térmico. Como fonte de calor é utilizada uma resistência aletada, onde a troca de calor com o ar ambiente é feita por meio de convecção forçada, através de uma ventoinha situada próxima ao elemento resistivo.

O processamento do controle do sistema é realizado através de uma placa SRK V1.4 ARM 32-bit, onde a aquisição de dados térmicos é feita por um sensor do tipo PT100. Por fim, a regulação da potência fornecida à resistência é efetuada por meio de um TRIAC BTA41, selecionado por sua capacidade de manejar altas cargas de energia de forma confiável. A Figura 5 representa o esquema básico do sistema.

Figura 5 - Esquema do sistema do utilizado no estudo de caso.



Fonte: Autor, 2024.

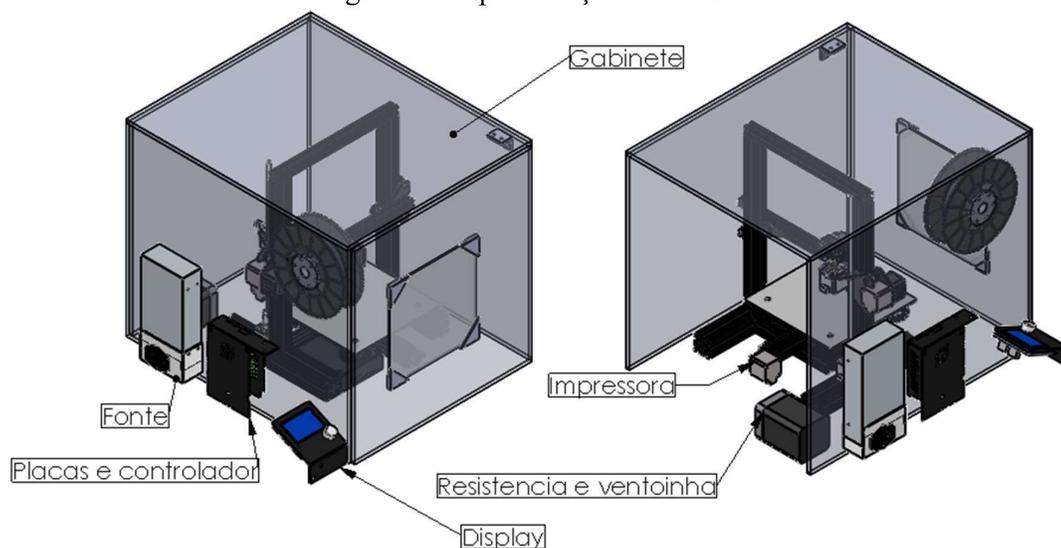
### 3.3. Gabinete e montagem

Como base para o trabalho, e de acordo com a proposta de se manter um sistema de baixo custo, optou-se por utilizar a impressora 3D modelo Ender 3 V2 como referência na construção do gabinete. Ao definir as dimensões externas do gabinete, considerou-se uma margem de folga de 50 mm em cada uma das três dimensões, já contando o deslocamento das partes móveis da máquina.

Após estabelecer as características geométricas do gabinete, buscou-se um material de construção que satisfizesse critérios específicos: baixa condutividade térmica para eficiência aprimorada do sistema e redução da potência requerida, custo acessível, ampla disponibilidade no mercado e rigidez estrutural. Levando em conta esses parâmetros, o compensado naval de 15 mm de espessura emergiu como boa alternativa, considerando também que havia-se estoque do material em questão, para futuras aplicações, outros materiais com propriedades similares podem ser considerados.

Devido às temperaturas que se deseja atingir no interior do gabinete, é necessário realocar as placas de controle e o sistema elétrico da impressora para fora do gabinete. Para auxílio de projeto e como método de estudo, foi desenvolvido um modelo CAD (computer-aided design) para representação gráfica dos itens e desenvolvimento de furações específicas. O modelo representado na Figura 6 apresenta os componentes utilizados e uma representação inicial do sistema.

Figura 6 - Representação do modelo.



Fonte: Autor, 2024.

### 3.4. Estimativa de Potência e seleção da Resistência Térmica

Como estimativa e ponto de partida para seleção da potência da resistência térmica a ser selecionada, pode-se estimar a quantidade de calor perdida para o ambiente no estado de máxima temperatura interna desejada, sendo que a fonte de calor do sistema deve superar as perdas e possuir uma margem extra de garantia para viabilizar o rápido aquecimento.

Para uma análise inicial, o modelo de cálculo considera apenas a transferência de calor nas paredes do gabinete, com simplificações quanto ao regime de escoamento, gradientes de temperatura e demais fenômenos físicos. Assim, utilizou-se a equação da taxa de transferência

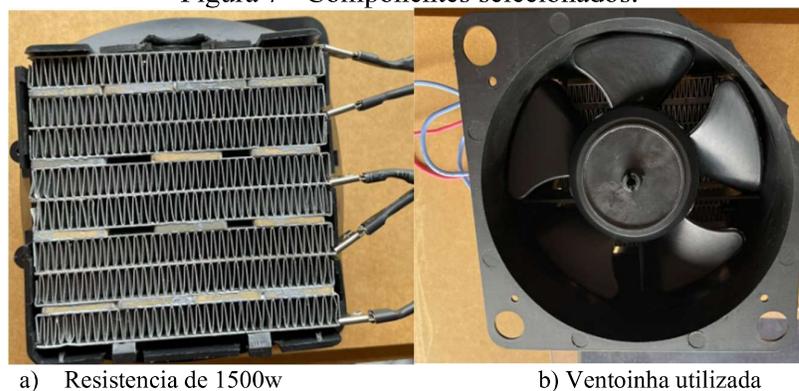
de calor por condução em estado estacionário, adotando condições de temperaturas máximas, através da Equação (8):

$$Q = 6 \left( \frac{kA\Delta T}{d} \right) \quad (8)$$

onde  $Q$  é a taxa de troca de calor do sistema,  $k$  é a condutividade térmica do material selecionado,  $A$  representa a área das faces,  $\Delta T$  a diferença de temperatura entre a região interna do gabinete e o ambiente externo e  $d$  é a espessura da parede. Como para o valor de área é considerado apenas uma parede, se faz necessário o termo multiplicador da equação para a consideração das seis paredes da estrutura. Para simplificação, é considerado que a troca térmica da base é similar a dos demais lados.

Considerando que o sistema deve permanecer funcional durante todos os dias do ano, de modo conservativo, a temperatura do ambiente externo é definida em  $0^\circ$ . Assim, foi possível obter uma taxa de transferência de calor aproximada de 799W. Com estes dados em mãos, foi selecionada uma resistência aletada de 1500W e uma ventoinha que força o ar sobre a mesma, apresentada na Figura 7.

Figura 7 - Componentes selecionados.

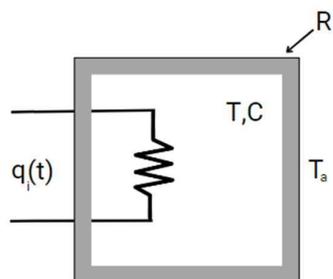


Fonte: Autor, 2024.

### 3.5. Equacionamento Do Sistema Térmico

Para a simulação do sistema térmico, buscou-se relacionar um modelo matemático que representa a função entre calor fornecido pela resistência e a temperatura do ambiente a ser controlado. A representação do sistema simplificado pode ser observada na Figura 8.

Figura 8 - Modelo utilizado.



Fonte: Autor, 2024.

Adaptando a primeira lei da termodinâmica para nosso modelo, obtém-se a Equação (9), que define a taxa de transferência de calor do sistema. Onde  $p(t)$  é a potência da resistência,  $R$  e  $C$  são a resistência e capacitância térmica global do sistema,  $T(t)$  a temperatura interna do gabinete e  $T_a$  a temperatura do ambiente externo. Manipulando a equação tem-se a Equação (10), onde a taxa de variação da temperatura é isolada.

$$\frac{dQ(t)}{dt} = C \frac{dT(t)}{dt} = p(t) - \frac{T(t) - T_a}{R} \quad (9)$$

$$RC \frac{dT(t)}{dt} + T(t) = Rp(t) + T_a \quad (10)$$

A seguir, realiza-se a determinação das constantes térmicas do sistema e parametriza-se a equação térmica que representa a planta física. Essa atividade geralmente demanda tempo e depende de vários testes experimentais, além de dados dos elementos, muitas vezes não disponíveis. Portanto, a caracterização geral do sistema é realizada medindo a resposta no tempo da temperatura após a aplicação de um degrau de entrada. Essa metodologia é aplicada aos três métodos de sintonia de ganhos de controladores PID citados anteriormente, e, por meio de comparação, determina-se o método mais adequado para o sistema.

### 3.6. Definição Dos Parâmetros Físicos Do Sistema

A obtenção dos parâmetros físicos do sistema, bem como da equação característica da planta dá-se de forma experimental, sendo utilizadas as metodologias anteriormente descritas.

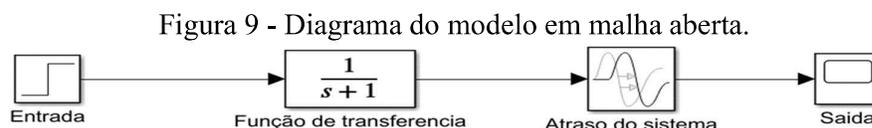
Para tal, foi aplicado ao sistema um pulso de 25% da potência total disponível, neste caso 375W, onde os dados de temperatura do sistema foram coletados durante o tempo dispendido até a nova estabilização térmica.

### 3.7. Sistemas Modelados

A implementação numérica dos modelos do sistema de controle é realizada no ambiente de simulação do Matlab/Simulink utilizando diagramas de blocos presentes no software. São implementados modelos de malha aberta, malha fechada ON/OFF e PID.

#### 3.7.1. Modelo em Malha Aberta

A Figura 9 representa o modelo em malha aberta desenvolvido, composto por fonte de ganho, função de transferência e bloco responsável pelo atraso do sistema.



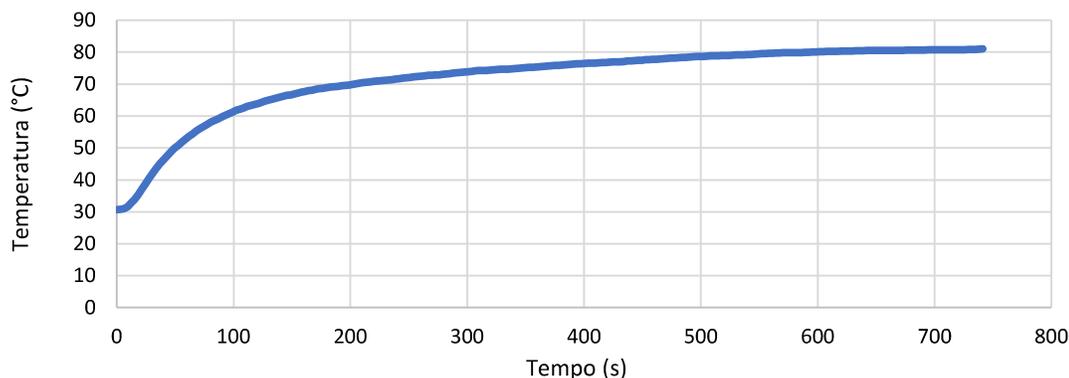
Fonte: Autor, 2024.

O modelo representado na Figura 12 permite verificar a resposta ao degrau do sistema, o qual deve-se aproximar ao máximo aos dados experimentais obtidos da planta e nos auxilia a definir qual método melhor caracteriza a planta.

#### 4.1. Comportamento Dos Modelos Em Malha Aberta

Como primeira etapa são adquiridos os dados após excitação em degrau do sistema em malha aberta até sua estabilização, os quais estão apresentados no Gráfico 1.

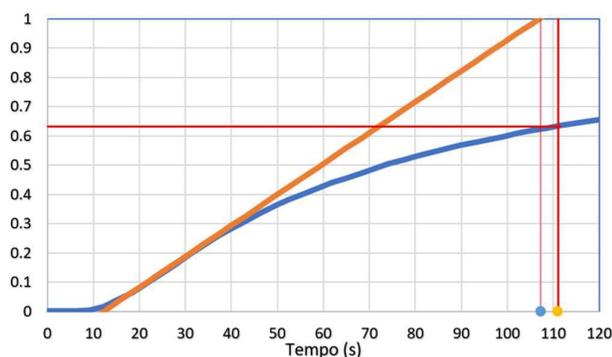
Gráfico 1: Curva de reação do sistema



Fonte: Autor, 2024.

Na análise dos dados utiliza-se o gráfico de resposta no tempo. O tratamento dos dados parte da normalização da temperatura, em seguida, é traçada linha tangente à curva de resposta no ponto de inflexão. A interseção desta linha tangente com o eixo vertical e com a linha que indica a temperatura máxima permite o cálculo da constante de tempo, ganho do sistema e do atraso na resposta térmica. Estes pontos são representados no Gráfico 2.

Gráfico 2: Curva parametrizada do sistema.



Fonte: Autor, 2024.

De posse destes valores experimentais é possível “alimentar” os modelos representativos ao sistema em malha aberta, resultando nos valores apresentados na Tabela 2.

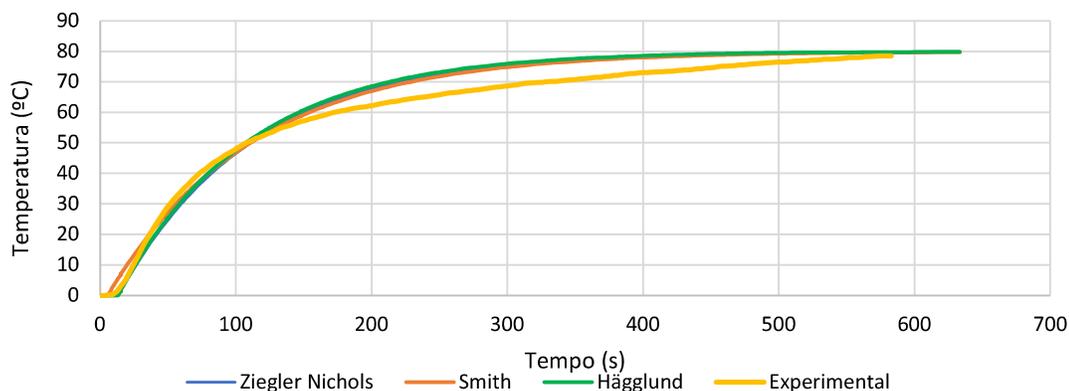
Tabela 2: Parâmetros dos modelos

MODELO	CONSTANTE DE TEMPO (S)	ATRASO (S)
Ziegler Nichols	101.5	9.5
Smith	102.3	2.9
Hägglund	98.4	9.5

Fonte: Autor, 2024.

Com a implementação dos valores de parâmetros no modelo numérico, realiza-se simulações que permitem comparar a resposta medida do sistema proveniente dos dados experimentais com os dos modelos, conforme apresentado no Gráfico 3.

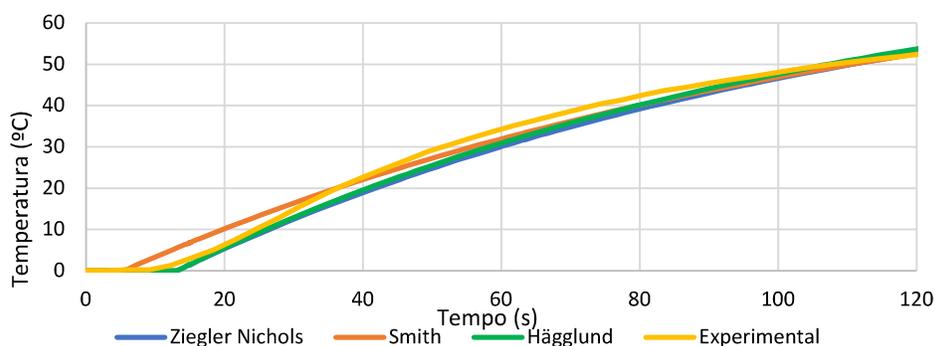
Gráfico 3: Respostas dos modelos em malha aberta e resposta medida no sistema físico.



Fonte: Autor, 2024.

O Gráfico 4 representa o comportamento dos modelos durante os 120 segundos iniciais, onde se observa a proximidade dos modelos com a resposta experimental.

Gráfico 4: Comportamento inicial dos modelos analisados, detalhando Gráfico 4.



Fonte: Autor, 2024.

Para determinar o modelo mais adequado que descreve a planta, é realizada análise comparativa entre os dados experimentais e as previsões de cada modelo, onde se utiliza o método de mínimos quadráticos, que quantifica as discrepâncias entre os dados observados e os estimados pelos modelos. A eficácia de cada modelo é avaliada pela soma dos quadrados das diferenças entre os dados experimentais e os valores modelados, com os resultados apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Erros quadráticos dos modelos em relação aos dados experimentais

MODELO	ERRO ACUMULADO
Ziegler Nichols	161.76
Smith	180.68
Hägglund	178.33

Fonte: Autor, 2024.

Levando em conta estas análises e comparações, conclui-se que a aplicação do modelo de Ziegler Nichols é a mais adequada para a aproximação do sistema e será utilizado de base para a análise em malha fechada, pois apresenta o menor erro acumulado e tem boa fidelidade na representação do atraso do sistema.

## 4.2. Comportamento em malha fechada

A aplicação do controle em malha fechada utiliza o método de Ziegler Nichols para definição dos parâmetros de controle, conforme apresentados na Tabela 4.

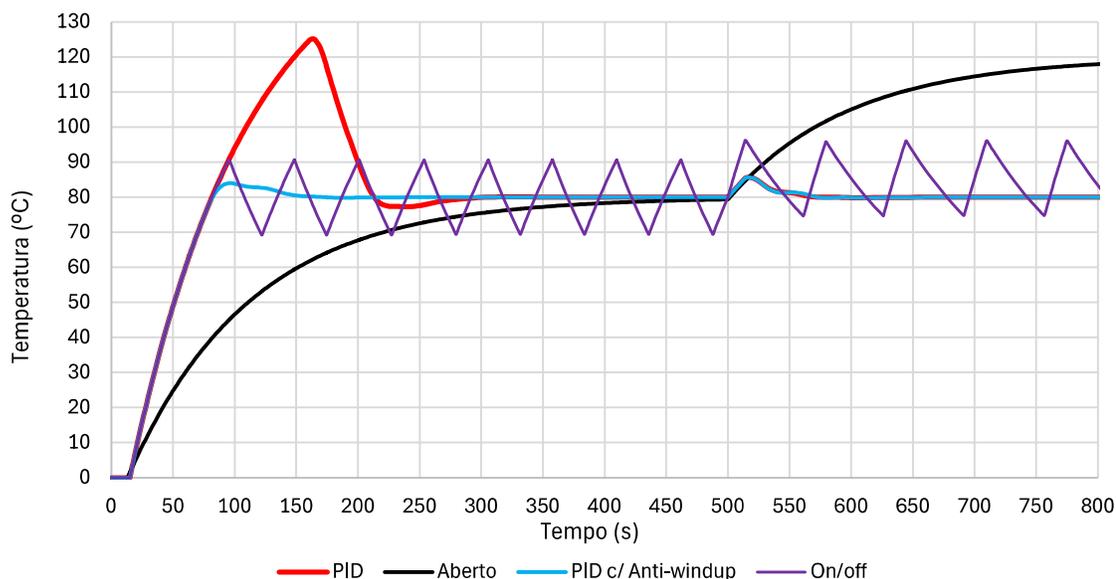
Tabela 4: Parâmetros dos modelos

$K_p$	$T_i$	$T_d$
9.76	24.4	6.1

Fonte: Autor, 2024.

Com os parâmetros e modelos definidos para o sistema, é feita comparação entre os possíveis modelos de controle para o sistema. Sendo que é considerado um modelo em malha aberta, modelo em malha fechada ON/OFF, e dois modelos PID, com e sem o laço anti-windup.

Gráfico 5: Comparação dos resultados dos controles.



Fonte: Autor, 2024.

## 4.3. Análise dos resultados

A análise do Gráfico 5 revela diferenças significativas entre os modelos de controle testados. Em relação ao critério de temperatura máxima permitida, somente o sistema equipado com o laço anti-windup atendeu às expectativas, com um overshoot controlado e uma temperatura máxima de 84.5°C. Em contraste, os outros sistemas não conseguiram manter a temperatura dentro dos limites estabelecidos.

Quanto ao tempo de acomodação, o sistema PID com laço anti-windup demonstrou superioridade, alcançando o estado estável em aproximadamente 30% do tempo necessário para o sistema de malha aberta. Em comparação ao sistema sem o laço de compensação de saturação da ação integral, houve uma resposta 50% mais rápida, ganho que pode ser atribuído ao fato de se ter um overshoot reduzido.

Uma análise detalhada do sistema ON/OFF indica que ele não cumpre os critérios estabelecidos, mostrando um ganho de temperatura excessivo e um comportamento oscilatório. As temperaturas oscilaram entre 70°C e 90°C, ultrapassando o limite estabelecido.

Ao examinar a resposta dos sistemas a perturbação externa, ocorrida aos 500 segundos, observamos que os controladores PID responderam satisfatoriamente, mantendo o sistema dentro dos limites aceitáveis. Enquanto o sistema de malha aberta experimentou um aumento de temperatura equivalente ao ganho adicional de calor no sistema, que devido à falta de realimentação, só pode ser compensado por um ajuste externo. O sistema ON/OFF, por outro lado, não conseguiu compensar adequadamente a perturbação externa resultando em uma variação de temperatura que permaneceu similar à anterior, porém deslocada em 8°C positivos devido ao ganho das demais fontes.

## 5. CONCLUSÕES

Por meio da análise dos resultados obtidos entende-se que o desenvolvimento de um sistema de controle térmico ativo para gabinetes de impressora 3D é possível dentro dos requisitos desejáveis. A atividade principal ao trabalho se concentrou em modelar o sistema e definir os parâmetros e métodos de implementação do controle, bem como analisar os efeitos da sua aplicação no sistema.

A definição de resistência térmica e itens físicos se mostrou eficaz, uma vez que a verificação em malha fechada mostrou que o sistema, com metade da potência estimada, teve capacidade de atingir a temperatura desejada de operação.

Quanto aos métodos de determinação das características térmicas do sistema, a implementação do primeiro método de Ziegler Nichols apresentou melhor compatibilidade com os resultados observados na prática, se mostrando uma aproximação considerada adequada. Já os métodos de Smith e Hägglund mostraram limitações em termos de precisão e aplicabilidade prática para o contexto específico deste trabalho.

Quando aos métodos de controle, pode-se observar clara vantagem na utilização de método PID com a implementação de laço anti-windup, sendo o único método que garantiu a operação do sistema dentro dos requisitos estabelecidos, mantendo o sistema dentro da faixa de temperatura adequada, compensando perturbações externas e reduzindo o tempo de acomodação do sistema.

Devido a desafios técnicos, infelizmente não foi possível realizar a implementação prática do controle. A implementação prática do sistema pode vir a revelar algumas limitações e imprecisões inerentes ao sistema físico, ocasionando, possivelmente, um tempo de estabilização mais prolongado do que o previsto, por exemplo.

Considera-se que o presente estudo oferece uma base sólida para implementação de sistema de controle ativo de temperatura em gabinetes de impressoras 3D de baixo custo, sendo um passo importante para a expansão e viabilização da tecnologia.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA

ALVES, José Luiz L. Instrumentação, Controle e Automação de Processos, 2ª edição. Grupo GEN, 2010. E-book. ISBN 978-85-216-1917-8. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/978-85-216-1917-8/>.

COELHO, Arthur Wilson Fonseca. **Estudo do Processo e da Qualidade de Peças Fabricadas por Estereolitografia**. UFRJ/ Escola Politécnica, Rio de Janeiro, 2016.

ERMOLAI, V.; IRIMIA, A. I. Development of Fused Filament Fabrication desktop 3D printer enclosure using axiomatic design principles. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2021. p. 012017.

GONZALEZ LUGO, Carlos A. et al. **Design and development of an environmentally controlled enclosure for a commercial 3D printer**. Rapid Prototyping Journal, v. 29, n. 4, p. 780-791, 2023.

GREGÓRIO, Gabriela F P.; LOZADA, Gisele. Simulação de sistemas produtivos. Grupo A, 2019. E-book. ISBN 9788595029194. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788595029194/>.

KATSUHIKO, Ogata. **Modern control engineering**. Editorial Félix Varela, 2009.

LIRA, Valdemir. **Processos de fabricação por impressão 3D: Tecnologia, equipamentos, estudo de caso e projeto de impressora 3D**. Editora Blucher, 2021. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9786555062960/>.

LOURENÇO, João. **Sintonia de controladores PID**. Escola superior de tecnologia, p. 55, 1997.

NISE, Norman S. Engenharia de Sistemas de Controle. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

OGATA, K. Engenharia de Controle Moderno, Prentice Hall, 5a. Edição, 2011.

RIBEIRO, Estefana Alves. **Controle de temperatura com utilização de controlador neural**. Araxá, Minas Gerais, 2016.

SMITH, C. A.; CORRIPIO, A. B. **Principles and Practice of Automatic Process Control**. 2st ed., Nova Iorque: John Wiley & Sons, 1997.

STEPHANOPOULOS, George. **Chemical process control**. Englewood Cliffs, NJ: Prentice hall, 1984.

SENA, Renan Lima. Controlador PDI aplicado a uma malha de controle de temperatura de um forno resistivo. Vitória, Espírito Santo, 2017.