



## IV Encontro de Iniciação Científica e Tecnológica

IV EnICT

ISSN: 2526-6772

IFSP – Câmpus Araraquara

24 e 25 de outubro de 2019



### DESENVOLVIMENTO DE UM CONTROLADOR PID APLICADO NO CONTROLE DE TEMPERATURA DE UMA IMPRESSORA 3D

EUZIVAM SOUSA SILVA JUNIOR<sup>1</sup>, JONAS DE CARVALHO<sup>2</sup>, NELSON FERREIRA DA SILVA JUNIOR<sup>3</sup>, ALESSANDRO MÁRCIO HAKME DA SILVA<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Graduando em Engenharia Elétrica, Universidade de Araraquara - UNIARA, euzivamjunior@hotmail.com

<sup>2</sup>Professor colaborador, Departamento de Engenharia Mecânica, Centro de Engenharia Aplicada à Saúde-CEAS, Escola de Engenharia de São Carlos EESC/USP, Universidade de São Paulo, prjonas@sc.usp.br

<sup>3</sup>Pesquisador colaborador, Centro de Engenharia Aplicada à Saúde-CEAS, Escola de Engenharia de São Carlos EESC/USP, Universidade de São Paulo, nelsonjr@sc.usp.br

<sup>4</sup>Orientador, Doutor em Ciências com ênfase em Bioengenharia, Docente do curso de Engenharia Elétrica, Universidade de Araraquara – UNIARA, Pesquisador em nível de pós-doc do Centro de Engenharia Aplicada à Saúde-CEAS, Escola de Engenharia de São Carlos EESC/USP, Universidade de São Paulo, amhakme@uniara.com.br, alhakme@sc.usp.br

**Área de conhecimento** (Tabela CNPq): Engenharia Elétrica – 3.04.00.00-7

**RESUMO:** A utilização de impressoras 3D nos setores industriais e centros de pesquisa de manufatura aditiva, tem se tornado cada vez maior devido à redução de custos para sua montagem, alinhando-se também a ampla difusão de conhecimento da técnica. Há diversas técnicas utilizadas na impressão 3D, sendo a modelagem por deposição fundida a mais empregada devido à sua facilidade de operação, além de ser também a mais comum para aplicações envolvendo polímeros. Para que a extrusão e deposição dos materiais sejam realizadas da melhor forma, é necessário que alguns parâmetros sejam adequadamente controlados, dentre eles o de temperatura. Neste estudo realizou-se o desenvolvimento e ajuste de um controlador PID aplicado ao ambiente de temperatura de uma impressora 3D, a ser utilizado para aplicações envolvendo ácido poliláctico como material de extrusão, o qual apesar do ruído presente na aquisição do valor de temperatura via sensor, ainda se mostrou um controlador rápido e estável, tendo um tempo de resposta de temperatura aproximada de 200 segundos na mesa aquecida, e 130 segundos no bico extrusor, além de manter a temperatura no valor desejado. Assim, variações de temperatura que seriam prejudiciais a um processo de produção de *Scaffolds* em biomateriais poliméricos serão reduzidas.

**PALAVRAS-CHAVE:** controlador pid; impressão 3d; manufatura aditiva; sintonia pid; temperatura; ziegler-nichols;

### INTRODUÇÃO

Popularmente conhecida como impressão 3D, ou também como Prototipagem Rápida (PR), a manufatura aditiva (MA) é um processo de produção que forma um dos pilares da indústria 4.0, pois por meio dela tem-se a possibilidade de produção sob demanda, customização, fácil desenvolvimento de objetos de alta complexidade geométrica e redução de desperdício, uma vez que utiliza durante o processo somente o material necessário.

Dentre as várias técnicas de impressão 3D, a que mais se destaca é a de Modelagem por Deposição Fundida (MDF), ou do inglês FDM (*Fused Deposition Modeling*) devido seu baixo custo, alta compatibilidade com vários materiais, além da sua facilidade de customização para aspectos e parâmetros específicos de uma dada aplicação (VOLPATO, 2017). Pode ainda ser adaptada para processos envolvendo injeção de materiais biológicos em estruturas heterogêneas com multicamadas, como é o caso da fabricação de *scaffolds* para uso na área de saúde.

Para qualquer aplicação utilizando-se da técnica de MDF, deve-se haver um ajuste e controle de vários parâmetros, dentre eles o parâmetro de temperatura, que segundo Azevedo (2013), interfere diretamente na

espessura, densidade e adesão das camadas depositadas, além de influenciar na conformidade de impressão e propriedades mecânicas da peça final obtida, como pode ser observado em ensaios de resistência à tração, compressão e flexão.

Uma vez estabelecida a importância do controle do ambiente de temperatura na MA, faz-se necessário então a utilização de um sistema de controle adequado para esta aplicação, devendo possuir estabilidade e faixa restrita de variação. De forma a atender aos requisitos citados, pode utilizar-se de um controlador do tipo Proporcional, Integral e Derivativo (PID).

Este trabalho visa abordar o desenvolvimento e ajuste de um controlador PID de temperatura de uma impressora 3D, pois este controlador se destaca ao atuar de forma a eliminar o erro proporcional de relação entre magnitude esperada e obtida, além de ser capaz de prever possíveis variações no sistema de forma rápida e eficaz de forma com que a estabilidade do sistema controlado seja mantida (FRANKLIN et al,2013).

## **FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **Manufatura Aditiva**

A manufatura aditiva (MA) comumente conhecida como impressão 3D, é uma técnica de fabricação de produtos que se faz por meio da adição sucessiva de material na forma de camadas, a qual é feita sucessivamente de forma a constituir um objeto. Tal adição é feita a partir da referência de uma representação tridimensional do objeto desejado, desenvolvida por meio de sistemas computacionais de desenho assistido por computador, também conhecido como CAD (*Computer Aided Design*) (VOLPATO, 2017).

### **Controle do ambiente de temperatura numa impressora 3D**

O controle deste parâmetro em uma impressora 3D é dado pelo controle de temperatura referente ao envelope interno da máquina, à mesa de impressão e ao bico de extrusão (PRUSA, 2019). Neste trabalho será considerado o controle de temperatura da mesa e do bico de extrusão.

O controle da mesa é necessário, pois ela é responsável pela aderência das primeiras camadas de impressão, de forma que o objeto a ser impresso não seja movido de lugar de forma inesperada, evitando assim um erro de impressão. A temperatura neste componente da impressora se dá por volta da temperatura vítrea do filamento a ser utilizado na impressão, cujos valores são tabelados por seus respectivos fabricantes.

Já o bico de extrusão, deve possuir temperatura de operação correspondente à faixa do processo de fusão do material utilizado, cujo valor também deve ser obedecido segundo seu respectivo fabricante. O controle adequado deste componente de impressão resulta na conformidade esperada com relação à espessura da camada depositada no processo de impressão, garante as boas características mecânicas da peça impressa e também é responsável por garantir que haja de fato a deposição do material e adesão entre camadas, pois caso não seja atingido o valor de temperatura necessária para fusão, o mesmo se encontraria em estado sólido, impossibilitando assim o processo.

### **Sistema de Controle PID**

O controle PID, também conhecido como controlador de três termos, é uma técnica de controle utilizada para tratamento do erro de um sistema baseado em três análises diferentes. Tal controle é feito pela soma dos três controles, sendo o Proporcional (P), Integral (I), e o Derivativo (D).

O controle Proporcional (P) é utilizado para o tratamento do erro do sistema, quando o sinal de realimentação é proporcionalmente linear ao erro. O controle Integral (I) tem a função de trabalhar na correção das perturbações constantes que afetam o sistema, sendo possível assim a manutenção da estabilidade após a magnitude de uma grandeza alcançar o valor desejado. O controle Derivativo (D) possui a função de suavizar a forma com que o valor desejado para uma variável física do sistema seja alcançado (FRANKLIN et. al, 2013). Devida a essa função, este tipo de controle é extremamente importante em aplicações de temperatura controlada com magnitudes elevadas, pois devido à dificuldade de resfriamento do sistema caso a magnitude de temperatura ultrapasse valor desejado a aplicação, utiliza-se então o controle D.

### Método de ajuste Ziegler-Nichols para um controlador PID

Para garantir que um controlador obtenha um desempenho esperado, faz-se necessário o ajuste das constantes referentes a cada controle presente no mesmo, no caso do PID, tal ajuste é realizado pela definição das constantes proporcional (Kp), integral (Ki) e derivativa (Kd), de forma a ajustar o grau de pertinência de cada controle no controlador PID.

Tal ajuste pode-se ser feito utilizando as regras do método de resposta ao degrau da planta, propostas por Ziegler e Nichols no início da década de 1940. Tal método consiste em obter experimentalmente a curva de resposta do sistema, quando aplicado um sinal degrau. Assim, se a curva obtida possuir o aspecto de S, pode-se então obter as constantes de atraso e tempo e então utilizar as fórmulas propostas na tabela 1 para escolha das constantes proporcional (Kp), integral (Ki) e derivativa (Kd) (OGATA, 2010).

**TABELA 1. Regra de Sintonia Ziegler-Nichols baseada na resposta em degrau da planta.**  
Fonte: OGATA com adaptações, 2010.

Constantes	Kp	Ki	Kd
PID	1,2T/L	0,5/L	0,5L

### METODOLOGIA

Para possibilitar a obtenção dos dados necessários para a realização deste trabalho, foi montado um protótipo, no qual foi possível simular o controle de temperatura de um bico extrusor e mesa aquecida de uma impressora 3D.

Elaborado um ambiente de temperatura ideal e propício à realização dos testes, foi instalada uma placa de desenvolvimento (ARDUINO) para possibilitar à aquisição de dados de temperatura via sensor, e atuação no sistema através de um circuito de potência controlado por Modulação de Largura de Pulso (MLP).

Os dados relativos à temperatura foram obtidos utilizando-se de termistores do tipo NTC 100 kΩ 3950, instalados na mesa aquecida e no bico extrusor. Para que estes dados fossem convertidos em valores reais de magnitude de temperatura, utilizou-se a equação simplificada de parâmetro Beta, o qual descreve a temperatura de um termistor do tipo NTC em função de sua resistência, conforme a equação 1.

$$T = \left( \left( \frac{1}{25+273,15} + \frac{1}{B} \ln \left( \frac{R}{R0} \right) \right)^{-1} - 273,15 \right) [^{\circ}C] \quad (1)$$

Onde,

$R0$  – valor de resistência do termistor a 25 °C

$R$  – valor de resistência medido no termistor

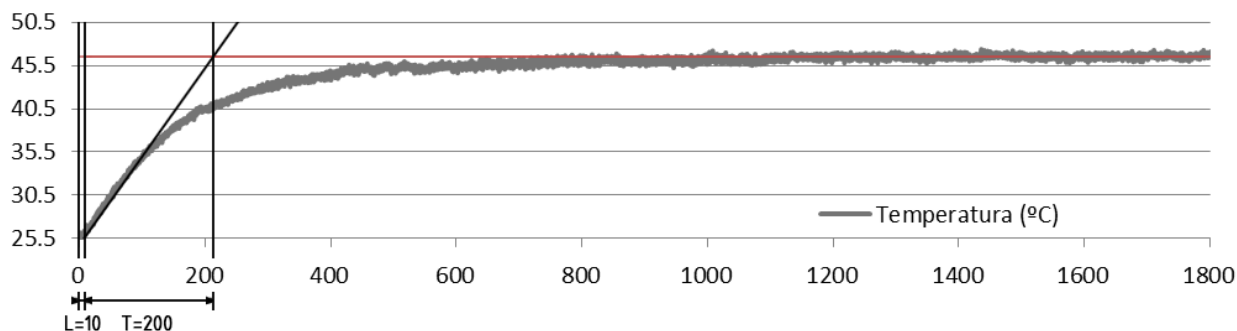
$B$  – coeficiente Beta fornecido pelo fabricante

Posteriormente, foi desenvolvido e instalado um circuito de potência controlado para alimentação (12 VCC) do protótipo e então implementado um código na placa de desenvolvimento para possibilitar a aplicação de tensão de alimentação constante neste, com o intuito de se obter a curva de resposta do sistema. Para análise gráfica de tal curva, foi utilizado o Excel (via comunicação serial com o ARDUINO), a fim de se obter os parâmetros necessários para cálculo das constantes PID utilizando o método de resposta do sistema de Ziegler-Nichols. Com as constantes obtidas, foi implementado um código PID no ARDUINO e analisada a resposta do controlador para um determinado valor de temperatura esperado.

### RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### Curva de resposta da mesa aquecida

Para análise experimental da mesa aquecida, foi aplicado um sinal do tipo degrau com valor de 45% da energia total que o sistema poderia fornecer, obtendo assim a curva do gráfico 1 para análise dos parâmetros de Ziegler-Nichols:



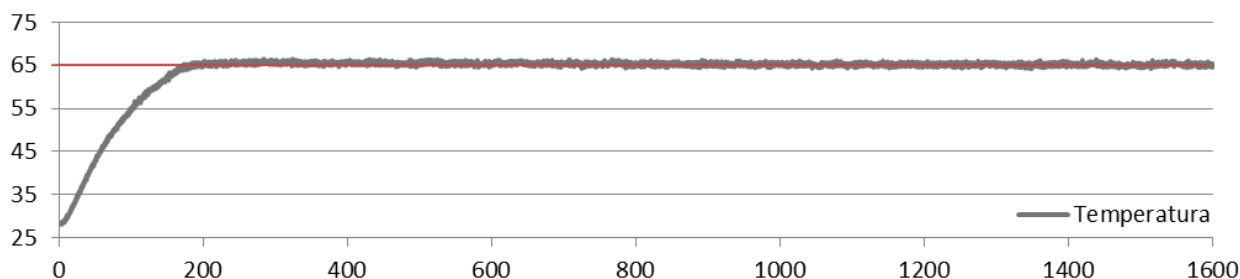
**GRÁFICO 1. Curva de resposta ao degrau - Mesa aquecida.**  
**Fonte: Elaborada pelo autor.**

Mediante observação da curva de resposta obteve-se as constantes de atraso (L) e tempo (T), e assim utilizando a regra de sintonia Ziegler-Nichols, pôde-se calcular as constantes do controlador, obtendo os seguintes resultados:

**TABELA 2. Constantes do controlador PID - Mesa Aquecida.**  
**Fonte: Elaborada pelo autor.**

Constantes	$K_p$	$K_i$	$K_d$
PID	24	0,05	5

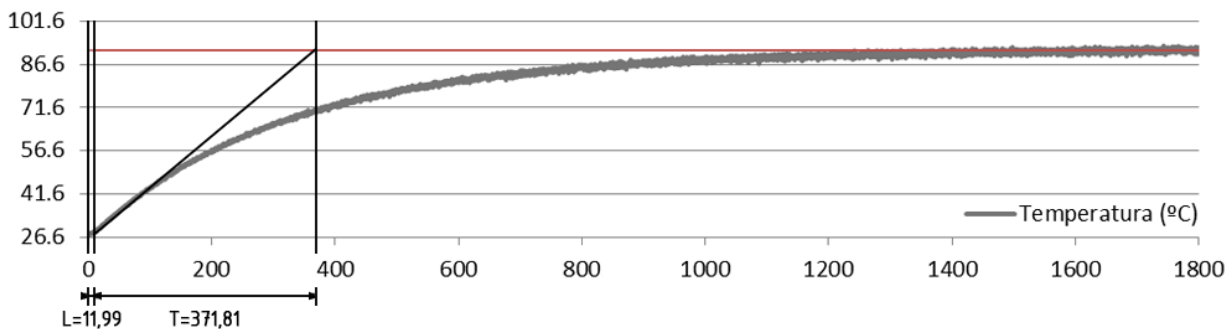
Uma vez que, havendo o entendimento do comportamento referente a cada constante, realizou-se a alteração do valor da constante  $K_i$ , aumentando-o para 0,075 com a finalidade de aumentar o grau de pertinência da integral de forma a diminuir o tempo necessário para que o sistema atinja a referência. Com as constantes devidamente ajustadas tem-se então a implementação do controlador PID, configurado para a temperatura desejada de 65 °C, assim, obteve-se a seguinte curva de resposta do sistema:



**GRÁFICO 2. Curva de resposta de temperatura controlada em função do tempo (s) - Mesa aquecida.**  
**Fonte: Elaborada pelo autor.**

Mediante ao gráfico 2, podemos observar que o controlador PID foi capaz de manter a temperatura da mesa aquecida no valor desejado, tendo ainda um tempo de resposta próximo de 200 segundos, se mostrando satisfatório.

Com a mesa aquecida devidamente ajustada deu-se início ao ajuste do controlador do bico extrusor: para tal aplicou-se um sinal do tipo degrau com valor de 39% da energia total que o sistema poderia fornecer, obtendo-se a seguinte curva de resposta:



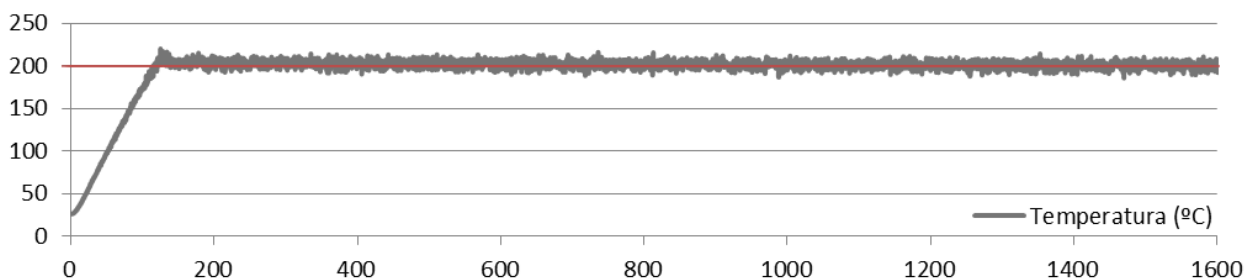
**GRÁFICO 3. Curva de resposta ao degrau – Bico extrusor.**  
**Fonte: Elaborada pelo autor.**

Utilizando o gráfico obtido podem-se obter os valores das constantes de atraso (L) e tempo (T), e então se utilizou novamente das regras de Ziegler-Nichols para obter os valores das seguintes constantes:

**TABELA 3. Constantes do controlador PID - Bico extrusor.**  
**Fonte: Elaborada pelo autor.**

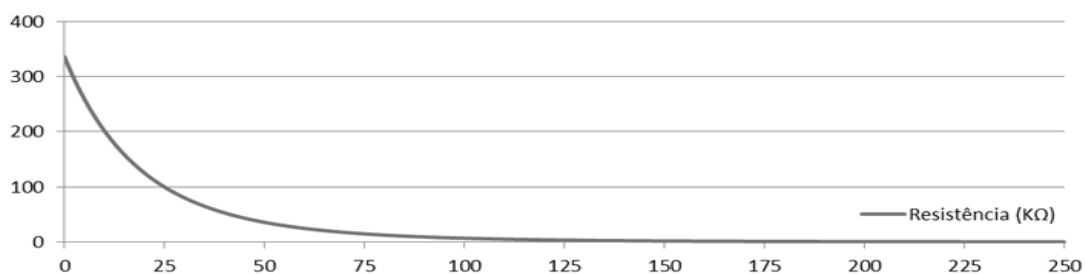
Constantes	Kp	Ki	Kd
PID	37,21	0,042	6

Com as constantes calculadas, programou-se o controlador PID do bico extrusor e foi configurado o valor de temperatura desejado em 200 °C, obtendo-se a seguinte resposta do sistema controlado:



**GRÁFICO 4. Curva de resposta de temperatura controlada em função do tempo (s) – Bico extrusor.**  
**Fonte: Elaborada pelo autor.**

O controlador PID ajustado para o bico extrusor obteve um tempo de resposta de aproximadamente 130 segundos e também foi capaz de manter a estabilidade do sistema por volta do valor desejado, apesar de apresentar maior variação no sinal obtido de temperatura. Tal variação é resultante de ruídos presentes nos sinais do sensor termistor, o qual se torna mais significativo conforme a temperatura obtida aumenta devido a sua curva característica de variação de resistência em função da temperatura, que pode ser observada abaixo:



**GRÁFICO 5. Curva de variação Resistência (KΩ) x Temperatura (°C) – Termistor NTC 100K 3950.**  
**Fonte: Elaborada pelo autor.**

Assim, ao se trabalhar em altas temperaturas, uma pequena variação do valor de resistência resulta numa grande variação obtida, portanto, como ressaltam Azevedo (2013) e Cabreira (2018) a abordagem de mapeamento da temperatura na impressão tem grande influência na análise de parâmetros da impressão final. Em suma, torna-se necessário avaliar o controle de temperatura no processo, pois caso tal controle não seja feito de forma adequada a peça obtida não atenderá aos requisitos desejados no processo.

## CONCLUSÕES

O controlador PID de temperatura proposto neste trabalho alcançou o objetivo de manter a estabilidade do sistema, ainda que para altas temperaturas tenha ocorrido uma grande variação na resposta gráfica devido ao ruído nos valores de temperatura obtidos com o sensor utilizado.

Tal ruído não foi tão prejudicial ao processo, pois os testes realizados foram orientados para impressão do material polimérico ácido polilático, o qual possui larga faixa de temperatura de fusão para ser trabalhado na impressão 3D.

Entretanto, para processos mais sensíveis como a bioimpressão de bio-vidro (bio-glass) com injeção de hidroxiapatita (HA) bovina (biomateriais para melhoria da qualidade óssea em regeneração de fraturas) ou outros *scaffolds* com injeção de material biológico, tal ruído pode resultar em uma variação de temperatura prejudicial ao processo. Portanto a próxima etapa do trabalho consta no desenvolvimento de melhorias para a obtenção de valores de temperatura adequados para a produção de *scaffolds* de HA, utilizando sensores de maior precisão e também modelos matemáticos para tratamento estatístico de tais ruídos.

## AGRADECIMENTOS

Agradecimento aos meus pais, Euzivam Sousa e Poliana Oliveira, meu orientador Alessandro Hakme, colaboradores, Jonas de Carvalho e Nelson Ferreira, e companheiros de classe e pesquisa, Danilo Augusto, Filipe do Prado, Michel Soares e Giovani Biteli, cada um destes representam uma parte desse trabalho, devido a toda ajuda, conselhos e apoio fornecidos. Agradeço também ao laboratório de imagens médicas do Centro de Engenharia Aplicada à Saúde – USP São Carlos pela disponibilização dos recursos necessários para desenvolvimento da pesquisa.

## REFERÊNCIAS

- AZEVEDO, Fábio M. D. **Estudo e projeto de melhoria em máquina de impressão 3D** – Universidade de São Paulo, 2013
- CABREIRA, Vinicius. **Avaliação dos parâmetros de processamento em impressão 3D nas propriedades do poliácido láctico**. 2018. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- FRANKLIN, Gene F.; POWEL, J. David; EMANI-NAEINI, Abbas. **Sistemas de Controle para Engenharia**. 6ª edição. Porto Alegre – Bookman, 2013.
- OGATA, Katsuhiko. **ENGENHARIA DE CONTROLE MODERNO**. 5ª edição. São Paulo – Pearson Prentice Hall, 2010.
- PRUSA, Josef. **3D PRINTING HANDBOOK – User Manual for 3D printers**. Versão 3.1. Partyzánská – República Tcheca: Prusa Research, 2019.
- VOLPATO, Neri. **MANUFATURA ADITIVA – Tecnologia e aplicações da impressão 3D**. 1ª edição. São Paulo – SP – Editora Bluercher, 2017.