

## ANÁLISE DE SINTONIAS DE CONTROLADORES PID APLICADOS NO CONTROLE DO EIXO-ÁRVORE DE UMA PLATAFORMA DE ENSAIOS DE USINAGEM

**Lucas Cardoso Dias** – lucas.cd@live.com  
**Ricardo Teixeira Alves Filho** – ricardopiox@gmail.com  
**Francisco Sales Ferreira Neto** – francisco\_sales97@hotmail.com  
**Yago Wanderley Simões** – yagwanderleysimoes@hotmail.com  
**Maísa Lauriane Ferreira Santos** – maisalfsantos@gmail.com  
**Laurivan da Silva Diniz** – lasiniz@hotmail.com  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba  
Av. Primeiro de Maio, 720 - Jaguaribe  
CEP - 58015-435 – João Pessoa – Paraíba

**Resumo:** *O estudo dos processos de fabricação mecânica é abordado em diferentes cursos da área de engenharia e tecnologia. A formação profissional do projetista moderno requer que o mesmo utilize conhecimentos teóricos, junto a ferramentas computacionais, na solução de problemas reais. Este trabalho aborda a análise de diferentes técnicas de controlador PID digital apresentadas na literatura, sendo aplicadas na solução da queda de rotação do eixo-árvore de uma fresadora ocorrente na usinagem de materiais por meio do fresamento. São realizadas simulações matemáticas via software MATLAB, e implementação do controlador digital na plataforma Arduino UNO. Os resultados mostram as relações do comportamento dinâmico do sistema sob diferentes condições de ensaios experimentais. A sintonia pelo método IMC apresenta os melhores resultados computacionais e práticos, apresentando-se como uma solução aplicável em produtos comerciais.*

**Palavras-chave:** *controle digital, fabricação mecânica, sistemas embarcados.*

### 1 INTRODUÇÃO

A usinagem de materiais é um dos processos de fabricação mecânica mais antigos já criado pelo ser humano. Consiste em dar forma a uma determinada matéria bruta, previamente selecionada, através da remoção de material por meio de uma ferramenta de corte, sendo esta manipulada por intermédio de movimentos coordenados realizados manualmente por um operador (GRIGORIEV; MARTINOV, 2014).

O desenvolvimento constante das indústrias culminou na exigência de sistemas de manufatura mais robustos para suprir as necessidades da demanda manufatureira. Desta forma, o surgimento das máquinas operatrizes (M.O), também conhecidas como máquinas ferramentas, possibilitou que a fabricação de peças e produtos através da usinagem ocorresse de forma mais rápida e em maior escala de produção. As M.O são constituídas de um sistema de movimentação mecânica que possibilita o operador condicionar o mecanismo proposto para realizar as operações com a ferramenta de corte aplicadas na matéria prima, e desta forma diminuindo o esforço humano (MA et al., 2007).

Com os avanços tecnológicos surgiram máquinas operatrizes automatizadas, no qual grande parte dos movimentos feitos pela ferramenta de corte deixaram de ser realizados

manualmente e passaram a ser feitos através de comando numérico computadorizado (CNC), sendo estas conhecidas como máquinas CNC (WANG; LEE; ZHENG, 2019).

Dentre os diferentes tipos de máquinas CNC, podemos citar a fresadora CNC que é amplamente utilizada na indústria na produção de diferentes tipos de peças, como por exemplo na fabricação de matrizes. A usinagem é realizada através do fresamento, que efetua a remoção de material por meio de uma ferramenta de corte chamada fresa. A fresa é acoplada em um sistema eletromecânico chamado de eixo-árvore, no qual possui como elemento principal um motor elétrico responsável por proporcionar o movimento giratório da ferramenta no decorrer da usinagem.

O contato entre a fresa e o matéria prima durante a operação de remoção de material provoca uma queda na rotação fornecida pelo eixo-árvore. Isto ocorre devido ao aumento de carga na ponta do eixo do motor provocado pelo choque mecânico recorrente do contato da ferramenta e o material a ser usinado. Esta queda de rotação é prejudicial ao fresamento, uma vez que a mesma é previamente calculada pelo operador levando em consideração o tipo da fresa e do material a ser usinado. Sendo assim alterações na velocidade do movimento rotacional da fresa durante a usinagem podem provocar danos ao produto e/ou a própria ferramenta (DINIZ et al, 2008).

Para cada tipo de matéria prima e de ferramenta de corte é necessário manter um sistema de velocidade rotacional estável durante toda a fabricação. Desta forma o domínio do controle da rotação do eixo-árvore desperta interesse científico e comercial. Projetos de algoritmos de controle digital de processos apresentam-se como uma opção para solucionar o problema apresentado. Na literatura, são propostos diversos tipos de projetos de controladores digitais, dentre eles o Proporcional Integral Derivativo (PID) digital é comumente utilizado na indústria e em produtos comerciais. Segundo Junior et al (2016), o PID digital é uma solução de baixa complexidade aplicada em diversas áreas do controle, onde têm sido desenvolvidas muitas técnicas para sintonia de controladores PID com a finalidade de aperfeiçoar o desempenho do mesmo.

Diante do exposto, este trabalho investiga o comportamento de controladores do tipo PID digital aplicados no controle da rotação do eixo-árvore de uma plataforma para ensaios de usinagem de materiais por meio do fresamento. O eixo-árvore possui como elemento principal um motor elétrico DC sem escovas (*Brushless Direct Current Motor* - BLDCM) responsável por fornecer o movimento rotacional da fresa. Os controladores digitais serão implementados junto a plataforma de prototipagem eletrônica Arduino UNO.

## 2 CONTROLADORES PID

Um controlador compara o valor real da saída do processo com o valor desejado, determina o desvio (erro), e produz um sinal de controle que reduz o desvio a um valor nulo ou muito pequeno. O controlador PID é assim chamado devido à sua estrutura, composta de 3 ações elementares ou básicas de controle, denominadas de ação proporcional, ação integral e ação derivativa (OGATA, 2011).

Diversos métodos são apresentados na literatura a fim de calcular os valores referentes a cada ação do PID. Dentre elas podemos citar as baseadas em função de transferência no domínio complexo 's', também conhecido como domínio de Laplace (OGATA, 2011). Uma função de transferência trata-se de uma equação que modela a relação entre a saída e a entrada de um determinado sistema dinâmico. Existem diferentes técnicas utilizadas para obter a função de transferência de um sistema, como os métodos de Ziegler-Nichols, Smith de 1º Ordem, Broida, e Sundaresan – Krishnaswamy, no qual são extraídas as informações do ganho natural (K) do

sistema, a constante de tempo ( $\tau$ ), e o tempo de atraso ou tempo morto ( $\theta$ ) que compõem o modelo de 1º Ordem definido pela Equação (1) (COELHO; COELHO, 2004).

$$Ft(s) = \frac{K}{1 + \tau s} e^{-\theta s} \quad (1)$$

Dentre as diferentes topologias de controlador PID apresentadas na literatura, a estrutura PID acadêmico (Equação (2)) é a topologia utilizada neste trabalho. Os parâmetros que compõem um controlador PID na estrutura acadêmica podem ser obtidos através de métodos baseados em tabela, no qual necessitam apenas dos valores de  $K$ ,  $\tau$  e  $\theta$ . Para o bom funcionamento do controlador, é necessário ajustar os seus parâmetros, para isso, damos o nome de sintonia. Este trabalho aborda uma análise de desempenho entre cinco métodos de sintonia baseados em tabela apresentados em Campos e Teixeira (2010): método de Chien-Hrones-Reswick (CHR) com 0% e com 20% de sobressinal (CAMPOS; TEIXEIRA, 2010, p. 54-55), *Integral Absolute Error* (IAE) e *Integral Time Absolute Error* (ITAE) (CAMPOS; TEIXEIRA, 2010, p. 58), além do *Internal Model Control* (IMC) (CAMPOS; TEIXEIRA, 2010, p. 62).

$$PID(s) = Kp \left( 1 + \frac{1}{sTi} + sTd \right), \quad (2)$$

em que  $Kp$  é o ganho proporcional,  $Ti$  é o tempo da ação integral e  $Td$  o tempo da ação derivativa. O parâmetro  $Ti$  atua na minimização do erro de regime permanente,  $Td$  atua na velocidade de resposta do sistema, e  $Kp$  faz com que o sistema reaja ao erro presente. Para a implementação em sistemas embarcado utiliza-se o PID digital definido na Equação (3) (ALVES FILHO, 2019).

$$pid(k) = u(k-1) + q0 \cdot e(k) + q1 \cdot e(k-1) + q2 \cdot e(k-2), \quad (3)$$

em que  $k$  é número da iteração;  $e(k)$ ,  $e(k-1)$ ,  $e(k-2)$ , são os erros ocorrentes na iteração atual, anterior e anterior a anterior, respectivamente;  $u(k-1)$  é referente ao sinal de controle aplicado no sistema na interação anterior; os parâmetros  $q0$ ,  $q1$ ,  $q2$ , são definidos pela Equação (4), Equação (5), Equação (6), sendo necessário definir o tempo de amostragem  $Ta$  (ALVES FILHO, 2019).

$$q0 = Kp \left( 1 + \frac{Ta}{2} \cdot Ti + \frac{Td}{Ta} \right) \quad (4)$$

$$q1 = -Kp \left( 1 - \frac{Ta}{2} \cdot Ti + 2 \cdot \frac{Td}{Ta} \right) \quad (5)$$

$$q2 = Kp \cdot \frac{Td}{Ta} \quad (6)$$

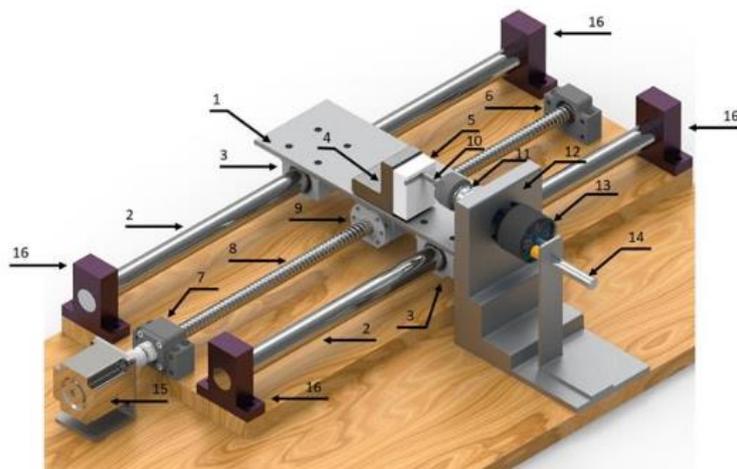
### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção é apresentada a descrição dos componentes elétricos e mecânicos que compõem a plataforma de usinagem utilizada neste trabalho, além da metodologia utilizada para projetar e implementar os controladores PID.

### 3.1 Plataforma de ensaios de usinagem

O sistema eletromecânico desenvolvido neste trabalho simula o comportamento do corte de uma fresadora CNC. São realizados ensaios de usinagem utilizando uma fresa de topo HSS de 1/4" de dois canais, corpos de prova em madeira foram utilizados para operação de fresamento desbaste. A plataforma é melhor detalhada na Figura 4.

Figura 1 – Estrutura da plataforma de usinagem.



#### Descrição de materiais:

1. Mesa de Corte
2. Guia linear retificada de 25mm
3. Pillow Block 25mm
4. Auxiliar de fixação do material que será usinado
5. Material que será usinado
6. Mancal BF12 – mancal com rolamento radial
7. Mancal BK12 – Mancal com par de rolamento contato axial
8. Fuso de esferas 16x5mm
9. Castanha SFSR 16x5mm
10. Fresa 1/4" aço rápido com 2 canais
11. Pinça ER20
12. Mancal/Suporte do motor Brushless
13. Motor Brushless
14. Sensor indutivo
15. Motor de passo
16. Suporte SK25

Fonte: Acervo Pessoal.

A estrutura consiste em um sistema de movimentação horizontal e um sistema que é responsável pela revolução da fresa de topo, através da união desses dois movimentos será executado fresamento dos materiais.

O movimento horizontal da mesa de corte, é dado pela rotação do motor de passo (15) que transmite a rotação para o fuso de esferas (8), o mancal BF12 (6) e BK12(7) serve de suporte para o fuso de esferas(8), a castanha (9) muda o sentido da força de rotação para movimento linear que por fim é aplicado na mesa de corte (1) que movimenta-se apoiada na guia linear retificada de 25mm (2), através dos Pillow Block (3). O suporte SK25 (16) serve de suporte para a guia linear retificada de 25mm (2), o suporte para fixação dos materiais que serão usinados (4) fica preso na mesa de corte (1) e prende o material que será usinado (5).

A pinça ER20 (11) transmite para a fresa de topo HSS de 1/4", de dois canais (10) a rotação do BLDCM (13). O BLDCM (13) gira na velocidade pré-determinada pelo operador, e o sensor indutivo (14) faz a leitura da velocidade em rotações por minuto (RPM) do motor.

O sensor indutivo é utilizado em uma lógica "conta pulsos" que é a base para medir a rotação do motor. Este sensor foi escolhido por poder operar numa frequência de chaveamento extremamente alta, além do sensor necessitar de contato físico com o motor.

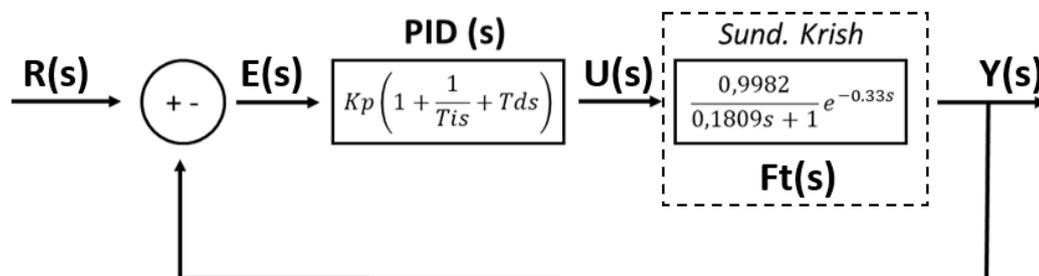
Existe três pontos metálicos presentes na carcaça traseira do BLDCM que são detectados (um de cada vez) pelo sensor indutivo. Toda vez que o sensor detecta um ponto é emitido um sinal do tipo pulso para o Arduino UNO. Por meio de um programa no Arduino, converte-se os pulsos em rotação, onde para cada três pulsos contabiliza-se uma rotação. Por fim o programa executa outra lógica para emitir o valor em rotações por minuto (RPM).

### 3.2 Sintonia e implementação dos controladores PID

Esta etapa do trabalho é iniciada com o estudo experimental do comportamento do sistema dinâmico, e na aquisição de dados para obter a curva característica da plataforma de usinagem. A faixa de trabalho em que o BLDCM irá operar possui um range de 5000 RPM, sendo a velocidade mínima de 3500 RPM e a máxima de 8500 RPM. Desta forma, aplica-se uma entrada do tipo degrau e obtém-se a resposta apresentada pelo sistema nestas condições. Em posse destes dados, a função de transferência de 1º Ordem é calculada pelo método de identificação proposto por Sundaresan – Krishnaswamy (COELHO; COELHO, 2004, p.83), sendo obtidos os valores referentes a  $K$ ,  $\tau$  e  $\theta$ .

Em posse dos parâmetros, a sintonia do controlador PID é realizada utilizando os métodos avaliados neste trabalho, sendo obtidos os valores referentes a  $K_p$ ,  $T_i$  e  $T_d$ , além dos parâmetros  $q_0$ ,  $q_1$ ,  $q_2$  para um  $T_a$  de 0.156 segundos estabelecido com base no teorema da amostragem proposto em Isermann e Munchhof (2011), os resultados são apresentados na Tabela 1. De acordo com Campos e Teixeira (2010), o método IMC utiliza um fator de ajuste  $\lambda$  que é definido empiricamente pelo projetista. Neste trabalho utilizou-se dois controladores IMC na avaliação, sendo no primeiro  $\lambda = 0.28$  e o segundo  $\lambda = 0.33$ . Estes valores foram estabelecidos após análises de simulações no software MATLAB®. A estrutura utilizada nas simulações do sistema em malha fechada (COELHO; COELHO, 2004) é ilustrada no diagrama de blocos apresentado na Figura 6.

Figura 2 – Diagrama de blocos para simulação.



Fonte: Acervo Pessoal.

Tabela 1 – Parâmetros calculados pelas sintonias analisadas.

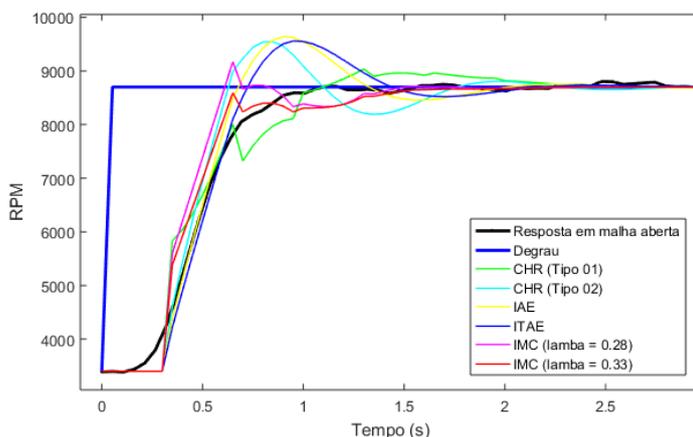
Método	$K_p$	$T_i$	$T_d$	$q_0$	$q_1$	$q_2$
CHR – 0%	0.3289	0.1809	0.1650	1.4198	-2.3689	1.0436
CHR – 20%	0.5208	0.2455	0.1561	1.4333	-2.1803	0.8573
IAE	0.8249	0.3232	0.0440	1.1718	-1.5209	0.4681
ITAE	0.5789	0.2529	0.0319	1.0052	-1.2598	0.3691
IMC $\lambda = 0.28$	0.7764	0.3459	0.0863	2.1725	-3.4003	1.3400
IMC $\lambda = 0.33$	0.6988	0.3459	0.0863	1.9553	-3.0603	1.2060

Fonte: Acervo Pessoal.

#### 4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Os primeiros resultados foram obtidos de forma computacional utilizando o software MATLAB®. Após calcular os valores de  $K_p$ ,  $T_i$  e  $T_d$ , foram feitas simulações para observar o comportamento do sistema em malha fechada, conforme apresentado na Figura 7.

Figura 3 – Simulação do sistema em malha fechada.



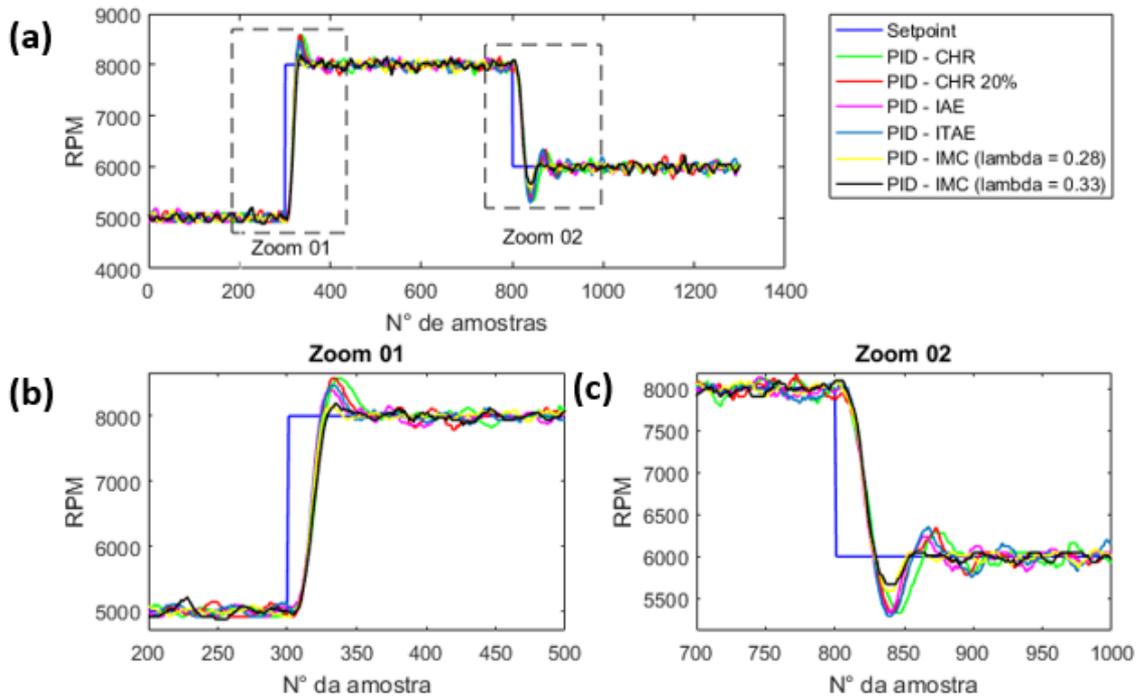
Fonte: Acervo Pessoal.

O PID digital foi implementado no Arduino UNO aplicando a Equação (3), no qual os parâmetros  $q_0$ ,  $q_1$ ,  $q_2$  apresentados na Tabela 1 foram utilizados. São realizados dois ensaios experimentais a fim de observar o comportamento do eixo-árvore controlado pelo PID digital: ensaio em vazio e usinagem. O primeiro consiste em observar a resposta dinâmica do motor em diferentes velocidades. No segundo é feita a usinagem de um corpo de prova de madeira, com dimensões 50x50x15, sendo utilizada uma fresa de topo HSS de ¼” de dois canais, e aplicada uma profundidade de corte de 2 mm, definida a velocidade do eixo-árvore em 6000 RPM, com avanço da mesa de 200 mm/min. Para mensurar o desempenho dos controladores foi aplicado o índice estatístico *Integral of Square Error* (ISE) para análise de sistemas discretos, sendo este definido pela Equação (8), no qual  $n$  é o número da amostra,  $N$  a quantidade de amostras, e  $e(n)$  o erro rastreamento (*setpoint* – sinal de saída do sistema) (ARAÚJO et al., 2017).

$$ISE = \sum_{n=1}^{N-1} [e(n)]^2 \quad (8)$$

A Figura 8 apresenta os resultados do comportamento dinâmico do eixo-árvore para o primeiro ensaio. Nota-se que dentre os controladores atuando sobre o sistema, os sintonizados pelo método IMC com  $\lambda = 0.28$  e  $\lambda = 0.33$  apresentam sinal de saída com menor sobressinal, tanto na resposta dinâmica para uma entrada degrau positiva (5000 RPM – 8000 RPM), quanto para um degrau negativo (8000 RPM – 6000 RPM). A fim de explicitar melhor a dinâmica do sistema controlado, a Figura 8 – (b) e Figura 8 – (c) apresenta um detalhamento da resposta ao degrau positivo e negativo, respectivamente.

Figura 4 – Ensaios em vazio.



Fonte: Acervo Pessoal.

A Tabela 2 apresenta os resultados do índice ISE para o sistema em malha fechada simulado e para os ensaios em vazio, além do ensaio de usinagem, sendo este evidenciado na Figura 9. Durante o cálculo do ISE todos os valores foram divididos por 10000 afim de normalizar a escala dos dados em uma faixa de 0 a 10.

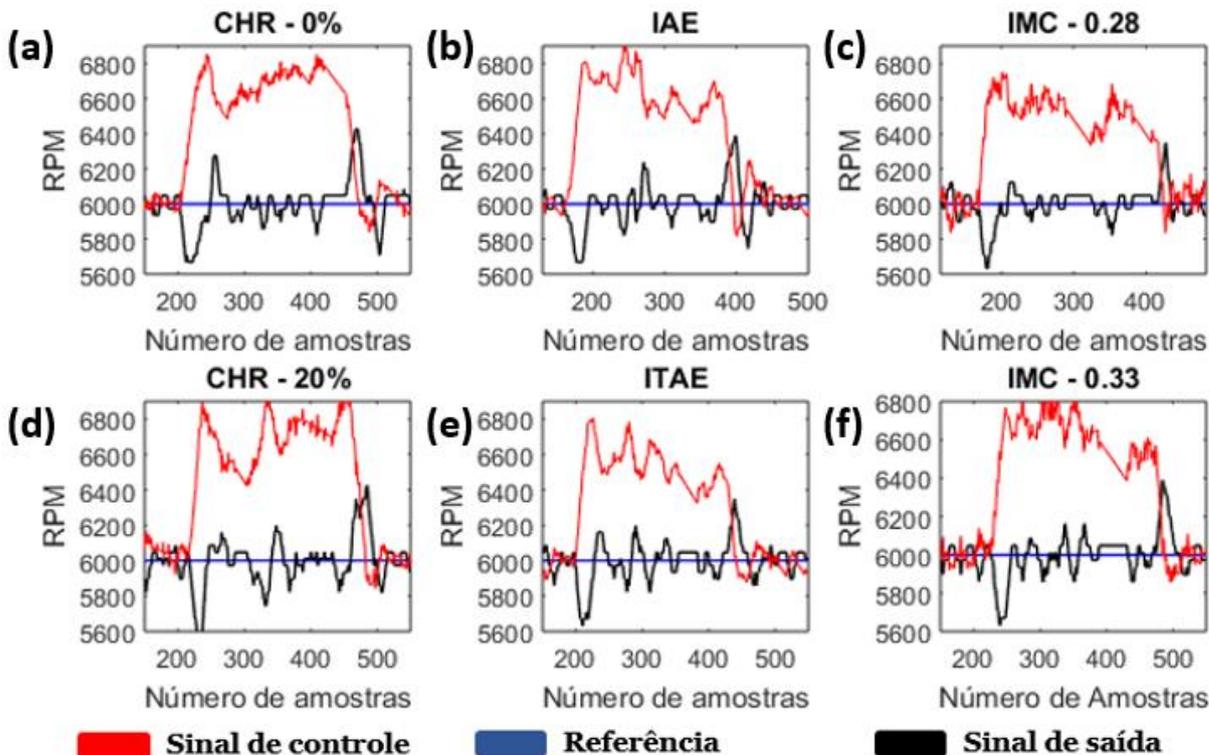
Tabela 2 – Resultados do ISE.

Método	ISE Simulação	ISE Ensaio em vazio	ISE Ensaio de usinagem
CHR – 0%	2.4636	7.9626	6.8944
CHR – 20%	2.0402	7.5974	7.0894
IAE	2.2197	7.7013	2.9196
ITAE	2.2961	7.8354	4.2355
IMC $\lambda = 0.28$	<b>1.9140</b>	<b>7.4834</b>	<b>2.3565</b>
IMC $\lambda = 0.33$	1.9885	8.3466	4.5175

Fonte: Acervo Pessoal.

Diante dos resultados apresentados na Tabela 2, tem-se que os melhores desempenhos na simulação e no ensaio em vazio foram obtidos pelas sintonias de controlador PID feitas pelo método IMC com  $\lambda = 0.28$ , tendo em vista que o melhor resultado é dado pelo menor valor mensurado pelo índice ISE. A Figura 9 apresenta o comportamento da dinâmica do sistema durante o processo de fresamento sob as condições definidas para o ensaio de usinagem.

Figura 5 – Ensaio de usinagem.



Fonte: Acervo Pessoal.

A Figura 9 mostra o PID digital atuando sobre o processo, a fim de compensar a queda de rotação recorrente pelo contanto da ferramenta de corte com o corpo de prova durante a usinagem, desta forma superando os efeitos da perturbação ocasionada pela carga. Observa-se na Figura 9 que ambos os controladores conseguem superar tal perturbação e retomam a minimização do erro de rastreamento. Nota-se que a resposta dinâmica do sistema com controlador sintonizado pelo método IMC com  $\lambda = 0.28$  (Figura 9 – (c)), o sinal de saída do sistema apresenta menores variações de velocidade durante o fresamento.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esse artigo abordou a análise de técnicas de sintonia de controladores PID aplicadas na compensação da queda de rotação do eixo-árvore durante a usinagem de materiais por meio do fresamento. As análises matemáticas e gráficas evidenciaram o desempenho de cada técnica avaliada, possibilitando a visualização de peculiaridades que cada método ocasiona nas simulações e nos ensaios experimentais. Além de ser um resultado perceptível perante a análise gráfica, o controlador sintonizado pelo método IMC com  $\lambda = 0.28$  apresenta o melhor desempenho no ISE (Tabela 2). Portanto, tal metodologia de sintonia adequa-se as condições estabelecidas para as operações realizada neste projeto, uma vez que a técnica apresentou os melhores resultados em todas as condições avaliadas neste trabalho. Explicou-se a importância da utilização do controlador PID digital em processos de usinagem, apresentando desta forma soluções factíveis no desenvolvimento de máquinas aplicadas a este tipo de processo de fabricação. Além disso, este trabalho mostra a união de conhecimentos de diferentes áreas estudadas nos cursos de engenharia e tecnologia, aplicando o conhecimento teórico

disponibilizado na literatura técnica na solução de problemas reais, sendo este um ponto fundamental no desenvolvimento de profissionais projetistas.

### *Agradecimentos*

Agradecemos ao Instituto Federal da Paraíba – *Campus* João Pessoa por disponibilizar laboratórios, equipamentos e ferramentas necessárias para o desenvolvimento deste projeto.

### REFERÊNCIAS

ALVES FILHO, Ricardo Teixeira. **Análise de controladores PID aplicados em motor Brushless DC utilizado em plataforma de usinagem CNC**. 2019. 73 f. TCC (Graduação) - Curso de Tecnologia em Automação Industrial, Instituto Federal da Paraíba, João Pessoa, 2019.

CAMPOS, Mario Cesar M. Massa de; TEIXEIRA, Herbert C. G.. **Controles típicos de equipamentos e processos industriais**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2010. 397 p.

COELHO, Antonio Augusto Rodrigues; COELHO, Leandro dos Santos. **Identificação de Sistemas Dinâmicos Lineares**. Florianópolis: Editora Ufsc, 2004. 181 p.

GRIGORIEV, Sergej N.; MARTINOV, Georgi M.. Research and Development of a Cross-platform CNC Kernel for Multi-axis Machine Tool. **Procedia Cirp**. [s. L], p. 517-522. mar. 2014.

ISERMANN, Rolf; MUNCHHOF, Marco. **Identification of Dinamic Systems**. Berlin: Springer, 2011. 705 p.

MA, Xiong-bo et al. Development of a PC-based Open Architecture Software-CNC System. **Chinese Journal Of Aeronautics**. [s. L], p. 272-281. mar. 2007

S.ARAÚJO, Maryson da et al. **Projeto de controladores digitais PID e I-PD via RST: uma análise de desempenho**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AUTOMAÇÃO INTELIGENTE, 18., 2017, Porto Alegre. Anais do XIII Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente. Porto Alegre: [s.e], 2017. p. 2171 - 2176.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. [S.l.]: PEARSON, 2011.

WANG, Fu-cheng; LEE, Chung-hao; ZHENG, Run-qian. Benefits of the inerter in vibration suppression of a milling machine. **Journal Of The Franklin Institute**. [s. L], p. 1-6. fev. 2019.

## ANALYSIS OF PID CONTROLLER SYNONYMS APPLIED TO THE AXLE-TREE CONTROL OF A MACHINING TEST PLATFORM

**Abstract:** *The study of mechanical manufacturing processes is approached in different courses in the area of engineering and technology. The professional training of the modern designer requires that he use theoretical knowledge, along with computational tools, in solving real problems. This work deals with the analysis of different digital PID controller techniques presented in the literature applied in the solution of the problem of spindle rotation drop of a milling machine occurring in the machining of materials through milling. Mathematical simulations are performed through MATLAB software, and digital controller implementation in the Arduino UNO platform. The results show the relationships of the dynamic behavior of the system under different conditions of experimental tests. Tuning by the IMC method presents the best computational and practical results, showing itself as a solution applicable in commercial products.*

**Key-words:** *digital control, embedded systems, mechanical manufacturing.*