

## OTIMIZAÇÃO DE DISPOSITIVOS PIEZOELÉTRICOS PARA CONTROLE PASSIVO DE *CHATTER* EM PROCESSOS DE TORNEAMENTO

**Pedro Henrique Fernandes Cecilio, pedrofernandes@estudante.ufscar.br**  
**Adailton Gomes Pereira, adailton.goh@gmail.com**  
**Sidney Bruce Shiki, bruce@ufscar.br**  
**Armando Ítalo Sette Antonialli, antonialli@ufscar.br**

Universidade Federal de São Carlos, Rod. Washington Luís km 235 - SP-310 - São Carlos CEP 13565-905

**Resumo.** *O chatter regenerativo em processos de usinagem é um problema de difícil resolução que gera dificuldades para vários setores da indústria. Neste escopo, o objetivo deste artigo é propor um método para mitigar esse fenômeno utilizando-se materiais piezoelétricos acoplados a um circuito shunt como um absorvedor de vibrações mecânicas, cujos parâmetros serão determinados por meio de um algoritmo híbrido de otimização para se obter o menor deslocamento do porta-ferramentas com a maior profundidade de corte possível. Portanto, com os parâmetros otimizados, conclui-se que é possível calcular o DLE e achar as áreas de estabilidade do processo.*

**Palavras chave:** *Chatter. Materiais Piezoelétricos. Otimização.*

**Abstract.** *The regenerative chatter in machining process is a hard to solve problem which generates difficulties for several industry sectors. In this way, the main objective of this article is to propose a method to alleviate this phenomenon by using piezoelectric materials coupled to a shunt circuit as a mechanical vibration absorber. The circuits parameters will be determined through a hybrid optimization algorithm to obtain minimal displacement of the tool holder with maximum cut depth. Nevertheless, with the optimized parameters it is implied that is possible to calculate the ELD and to find the stability areas of the process.*

**Keywords:** *Chatter. Piezoelectric materials. Optimization.*

### 1. INTRODUÇÃO

O processo de usinagem consiste em dar forma a uma determinada peça através da remoção de material (ALTINTAS, 2012). Existem alguns tipos de processos como torneamento, furação, fresamento, esmerilhamento, entre outros. Apesar de algumas dessas técnicas serem conhecidas a centenas de anos, problemas com vibrações mecânicas, mais especificamente as auto-excitadas, chamadas também de *chatter* regenerativo, causam problemas graves no acabamento superficial das peças usinadas. Além disso, implica na queda de produtividade do processo (ALTINTAS; WECK, 2004) e aumento de custos. A Renault S.A.S estimou que o custo devido ao *chatter* em um bloco de cilindro de um Renault 2.0 l DCi é por volta de 0.35€ por peça, gerando custos anuais de aproximadamente 6 milhões de reais (QUITANA; CIURANA, 2011).

Para mitigar esses problemas, algumas pesquisas têm explorado o desenvolvimento e aplicação de materiais inteligentes visando mitigar efeitos de vibrações em processos de corte (MATSUBARA et al., 2014; YIGIT et al., 2017). Dentre os materiais inteligentes, os que ganham destaque são os piezoelétricos por possuírem um acoplamento eletromecânico. Isso significa que esses materiais geram carga elétrica ao sofrerem deformações (efeito direto), e sofrem deformação ao serem submetidos a uma tensão elétrica (efeito inverso) (LEO, 2007). Tornando-se um material extremamente útil, podendo ser utilizado como sensor e atuador mecânico, devido à sua propriedade eletromecânica (Park et al 2007).

No controle passivo de *chatter* o piezoelétrico pode ser aplicado fazendo uso do seu efeito direto, no qual, ao sofrer deformação devido às vibrações mecânicas gera carga elétrica que ao ser dissipada aumenta o amortecimento da estrutura mitigando as vibrações. Dessa forma, um circuito elétrico *shunt* é acoplado ao piezoelétrico com o intuito de dissipar a carga elétrica gerada pelas vibrações. Na qual, de acordo com Viana Jr (2006), o dispositivo piezoelétrico *shunt* pode atuar de diversas formas dependendo dos componentes do circuito *shunt*, e principalmente, dos parâmetros selecionados para o dimensionamento do mesmo.

Sendo assim, este trabalho propõe um método para mitigar esse fenômeno utilizando-se materiais piezoelétricos acoplados a um circuito *shunt* resistivo como um absorvedor de vibrações mecânicas, cujos parâmetros serão determinados por meio de um algoritmo híbrido de otimização para se obter o menor deslocamento do porta-ferramentas com a maior profundidade de corte possível.

Conforme Rivin (2002), as vibrações mecânicas em processos de remoção de material podem ser atribuídas à 5 principais causas:

1. Descontinuidades no material da peça a ser usinada: crostas ou pontos duros no material causam choques contra a ferramenta de corte, acarretando vibrações transientes;
2. Distúrbios devido à imperfeições na máquina-ferramenta: desbalanceamento, irregularidades em rolamentos, desbalanceamento magnético do motor elétrico, entre outros, podem causar vibrações forçadas na usinagem;
3. Cargas dinâmicas geradas por rápidas acelerações/desacelerações de componentes da máquina-ferramenta com grande inércia;
4. Vibrações transmitidas pelo ambiente: choques e vibrações vindas de outras máquinas podem ser transmitidas a partir da fundação de oficinas mecânicas afetando as máquinas-ferramenta;
5. Vibrações auto-excitadas: devido à interação entre ferramenta de corte e material da peça a ser usinado.

Enquanto as 4 primeiras fontes mencionadas podem ser facilmente mitigadas por soluções comuns na área de vibrações mecânicas, a quinta classe tem uma natureza mais complexa. As vibrações auto-excitadas são denominadas de *chatter* pela literatura e o seu tipo mais comum é o *chatter* regenerativo, que ocorre devido ao impacto da ferramenta de corte nas ondulações deixadas anteriormente ao local de corte mais recente (ALTINTAS; WECK, 2004).

A forma mais comum de se minimizar *chatter* nos processos de corte tem sido a utilização dos diagramas de lóbulos de estabilidade (DLE) (ALTINTAS, 2012), dessa forma é possível ver os limites nos quais o processo de corte deixa de ser estável (livre de *chatter*) e passa a ser instável. Porém, esse processo demanda uma modelagem precisa do sistema, ou de resultados experimentais representativos do comportamento vibratório da peça e da ferramenta de corte (ALTINTAS; WECK, 2004). Além disso, essas cartas de estabilidade são válidas em condições muito estreitas do processo.

Uma das formas de controlar *chatter* e aumentar o limite de estabilidade que vem sendo explorada na literatura reside na aplicação de materiais piezoelétricos. Existem duas formas de controlar esse efeito, a primeira se utilizando do controle passivo do material e a segunda do controle ativo. No controle passivo esses materiais são utilizados para absorver as vibrações mecânicas transformando a energia mecânica do processo em energia elétrica (LEO, 2007). Já no controle ativo, esse dispositivo é utilizado como um atuador eletromecânico que recebe sinais elétricos para anular as vibrações (PU et al., 2019).

Dentro da abordagem passiva o piezoelétrico é acoplado com um circuito *shunt*, conhecido como *shunt* piezoelétrico, composto neste caso por apenas uma resistência. Conforme apresentado por Viana Jr 2006, quando utilizado o circuito puramente resistivo o dispositivo *shunt* piezoelétrico atua de forma similar a um absorvedor viscoelástico. A quantidade de energia que será convertida depende diretamente do coeficiente de acoplamento do material piezoelétrico a ser utilizado, tal parâmetro é adimensional e varia de 0 a 1.

## 2. METODOLOGIA

### 2.1. Modelo Dinâmico do Sistema

Para um circuito resistivo (R), tem-se a equação do movimento e a equação de Kirchoff do circuito elétrico que podem ser dadas por (LEO, 2007):

$$\begin{cases} m\ddot{y}(t) + c\dot{y}(t) + ky(t) + k_a y(t) - g_{33}q(t) = f_c(t) \\ R\dot{q}(t) + \frac{1}{C_p}q(t) - g_{33}y(t) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

sendo  $k_a$  a rigidez adicional fornecida pelo PZT ao sistema,  $g_{33}$  é um coeficiente relacionado ao acoplamento eletromecânico fornecido pelo PZT na direção 33,  $C_p$  é a capacitância equivalente do PZT,  $y$  é o deslocamento do porta-ferramentas,  $f_c$  é a força de corte e  $q(t)$  é a carga elétrica gerada durante a deformação do piezoelétrico.

Realizando a transformada de Laplace da Eq. (1) é possível obter a função de transferência (FT) relacionando o deslocamento do porta-ferramentas com a força de corte  $\frac{Y}{F_c}(s)$ :

$$\frac{Y}{F_c}(s) = \frac{1}{ms^2 + cs + (k + k_a) - \frac{g_{33}^2}{Rs + 1/C_p}} \quad (2)$$

sendo  $Y(s)$  e  $F_c(s)$  o deslocamento e a força de corte representados no domínio  $s$ . A equação (2) pode ser utilizada para se calcular a FRF do porta-ferramentas substituindo  $s = j\omega$ . A partir disso, pode-se calcular a parte real da FRF  $G(j\omega) = \text{real}\left(\frac{Y}{F_c}(s = j\omega)\right)$  para se calcular o DLE do processo de corte a partir da Eq. (3) (ALTINTAS, 2012):

$$a_{lim} = -\frac{1}{2K_f G(j\omega)} \quad (3)$$

onde  $a_{lim}$  é a equação da profundidade limite de usinagem. O modelo do porta-ferramentas com o piezoelétrico pode ser representado pela fig. 1:

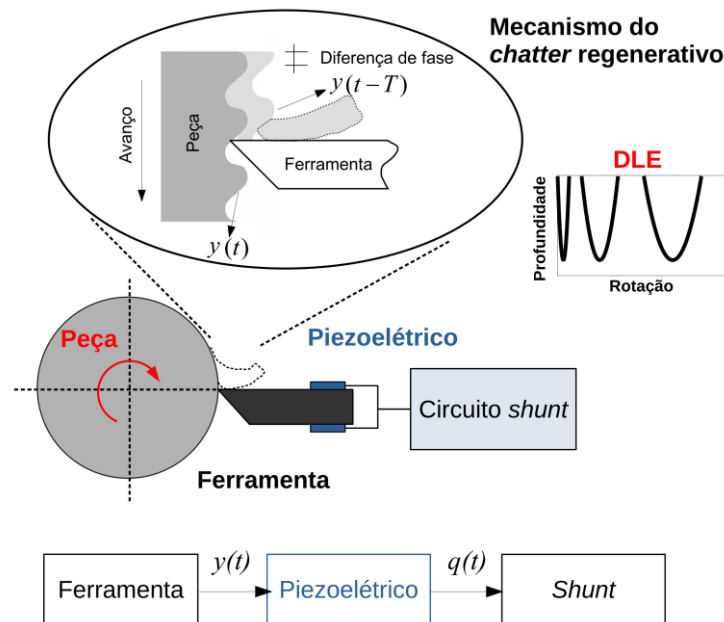


Figura 1. Representação do circuito *shunt* acoplado ao porta-ferramentas (autoria própria)

## 2.2. Algoritmo de Otimização

O algoritmo de otimização nesse projeto irá visar manter a estabilidade do processo para a maior profundidade de corte possível. A equação (4) será usada para se calcular a FRF do sistema vibratório que junto com a Eq. (2) será empregada para prever a estabilidade do processo a partir dos DLEs. A função objetivo ( $J$ ) para este estudo será baseada na norma da parte real da FRF do porta-ferramenta, sendo ela:

$$J(R) = \min \|G(j\omega, R)\| \quad (4)$$

Além disso, foram usados algoritmos de otimização numérica de biblioteca do software MATLAB. Para este trabalho foi testada uma abordagem híbrida, sendo inicialmente aplicado um algoritmo genético para a busca de um mínimo global (MITCHELL, 1998). Em seguida, um algoritmo clássico para busca local de programação quadrática sequencial (SQP) foi empregado (NOCEDAL; WRIGHT, 2006). Dessa forma, o risco de mínimos locais serem encontrados diminuiu, favorecendo a solução otimizada do problema.

Esse procedimento foi realizado a partir da função *fmincon*, na qual utilizou-se uma função contendo os parâmetros físicos do material, do material piezoelétrico e os parâmetros equivalentes do porta-ferramentas, uma faixa de busca dos valores de resistência de [10000 1000000] e as opções estabelecidas. Nas opções estabelecidas foram utilizadas várias opções padrões do MATLAB e o método de busca SQP. Houve 33 iterações e o valor de convergência foi de 1694,3  $\Omega$ .

## 3. RESULTADOS

Foram realizadas simulações do sistema do caso resistivo (R) representado pela Eq. (2), que mostra a relação do deslocamento do porta-ferramentas pela força de corte, no software MATLAB. Calculou-se a função de resposta em frequência de forma analítica para diferentes valores de resistência.

Os parâmetros do porta-ferramentas usados para simular as FTs foram a massa equivalente  $m = 10[\text{kg}]$ , a razão de amortecimento  $\zeta = 0,002$ , a rigidez equivalente  $k = 5,98 \cdot 10^6 [\text{N/m}]$ , a frequência natural não-amortecida  $\omega_n =$

$5,89 \cdot 10^3$  [rad/s] e o coeficiente de amortecimento  $c = 4,06$  [N.s/m] (CHIARADIA, 2021). Já os parâmetros do piezoelétrico utilizado foram, capacitância equivalente  $C_p = 10^{-7}$  [F] e o coeficiente relacionado ao acoplamento piezoelétrico  $g_{33} = 3,1 \cdot 10^5$ . Além disso, a constante de corte relacionada ao processo de usinagem foi  $K_f = 10^9$  [N/m<sup>2</sup>].

Para o cálculo da resposta em frequência a resistência variou entre três valores,  $10^{-4}$  ( $\Omega$ ), 1694,3 ( $\Omega$ ) e  $10^6$  ( $\Omega$ ). Para o caso em que a resistência tem valor muito pequeno o sistema simulado era relativo a um curto-circuito, já no caso em que o valor foi bem alto o sistema simulado era relativo a um circuito aberto e o valor intermediário é mais próximo do circuito otimizado. O resultado obtido está na fig. 2.

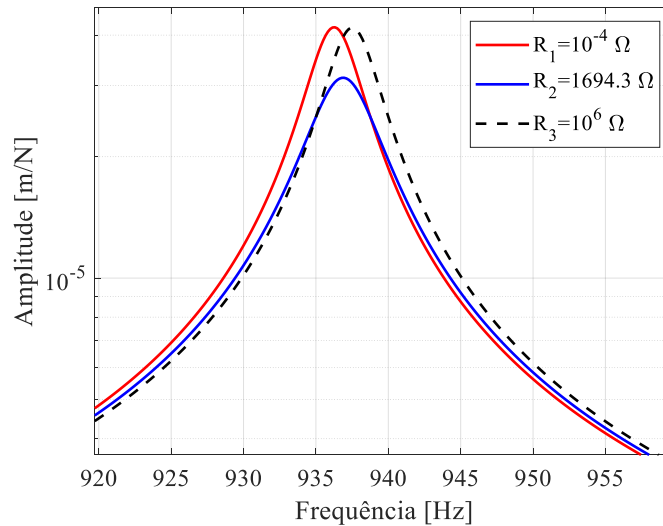


Figura 2. Gráfico da amplitude pela frequência (autoria própria)

Pode-se observar que, para diferentes valores de resistência, o deslocamento do porta-ferramentas varia, sendo que o valor é máximo quando a frequência de vibração coincide com a frequência natural do sistema.

Além disso, foi calculado o diagrama de lóbulo de estabilidade (DLE) do sistema, mostrado na fig. 3. Em um DLE as curvas delimitam a parte estável do processo, tudo o que está situado dentro dos lóbulos representa a parte instável e o que está abaixo representa a parte estável. Sendo assim, para uma resistência elétrica muito baixa o circuito shunt funciona como um curto-circuito, logo não há nenhuma energia sendo dissipada pela resistência que deveria gerar o amortecimento do sistema de modo que as faixas de estabilidade são menores. O mesmo ocorre quando a resistência é muito alta, porém neste caso o shunt funciona como um circuito aberto, causando um baixo amortecimento, visto que a corrente que passa no sistema é muito baixa. Contudo a resistência otimizada (1694.3 ( $\Omega$ )) provoca um DLE com maior áreas de estabilidade, possibilitando utilizar parâmetros de usinagem mais agressivos (com rotações mais elevadas e maiores profundidades de usinagem).

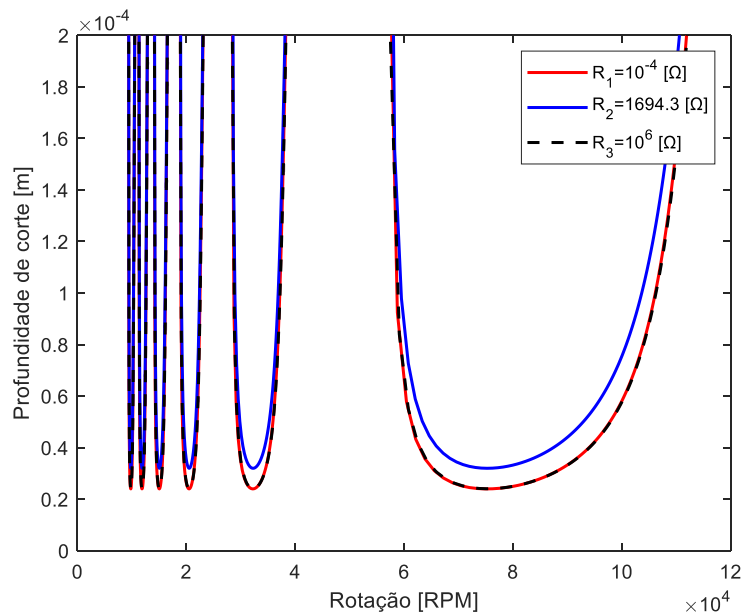


Figura 3. Diagrama de lóbulo de estabilidade (autoría própria)

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Visando mitigar de forma mais efetiva o problema do *chatter* regenerativo no processo de torneamento este artigo propõe uma abordagem diferente para a sua solução, o uso de um algoritmo de otimização para determinar os parâmetros do circuito. Estes materiais são interessantes nesse contexto pela sua capacidade de transformar as vibrações mecânicas em energia elétrica, dessa maneira amortecendo o sistema.

De acordo com os resultados obtidos é possível afirmar que dependendo dos parâmetros do circuito *shunt* pode haver uma redução considerável das vibrações mecânicas durante o processo. Logo, o uso de algoritmos de otimização se fazem necessários para que de forma fidedigna sejam encontrados os melhores parâmetros para o problema. O fenômeno do *chatter* não será solucionado, mas será minimizado, podendo trazer muitas vantagens e economia para diversos setores de produção de peças.

#### 5. REFERÊNCIAS

- ALTINTAS, Y. Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design. [S.l.]: Cambridge University Press, 2012.
- ALTINTAS, Y.; WECK, M. Chatter stability of metal cutting and grinding. CIRP annals, Elsevier, v. 53, n. 2, p. 619--642, 2004.
- LEO, D. J. Engineering analysis of smart material systems. [S.l.]: Wiley Online Library, 2007.
- MATSUBARA, A.; MAEDA, M.; YAMAJI, I. Vibration suppression of boring bar by piezoelectric actuators and lr circuit. CIRP Annals, Elsevier, v. 63, n. 1, p. 373--376, 2014.
- MITCHELL, M. An introduction to genetic algorithms. [S.l.]: MIT press, 1998.
- NOCEDAL, J.; WRIGHT, S. Numerical optimization. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2006.
- PU, Y.; ZHOU, H.; MENG, Z. Multi-channel adaptive active vibration control of piezoelectric smart plate with online secondary path modelling using pzt patches. Mechanical Systems and Signal Processing, Elsevier, v. 120, p. 166--179, 2019.
- PARK, Gyuhae. The use of active materials for machining processes: A review. International Journal of Machine Tools and Manufacture, Los Alamos National Laboratory, The Engineering Institute, Los Alamos, NM 87545, USA, v. 47, ed. 15, p. 2189-2026, 6 jul. 2007.
- QUINTANA, G.; CIURANA, J. Chatter in machining processes: A review. International Journal of Machine Tools and Manufacture, Elsevier, v. 51, n. 5, p. 363--376, 2011.
- RIVIN, E. Machine-tool vibration. In: Harris' shock and vibration handbook. [S.l.]: McGraw-Hill, 2002.
- SIDDHPURA, M.; PAUROBALLY, R. A review of chatter vibration research in turning. International Journal of Machine tools and manufacture, Elsevier, v. 61, p. 27--47, 2012.
- VIANA, F. A. C.; JR, V. S. Multimodal vibration damping through piezoelectric patches and optimal resonant shunt circuits. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, SciELO Brasil, v. 28, n. 3, p. 293--310, 2006.

## **6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES**

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.