

## **CONTROLE DOS SINAIS DE SENSORES PIEZO-ELÉTRICOS APLICADO NA MEDIÇÃO DAS FORÇAS DE CORTE NO TORNEAMENTO DURO USANDO COMBINAÇÃO DE FILTROS NÃO LINEARES**

Marco A. A. de Melo, Universidade de São Paulo, Escola Politécnica marco.melo@poli.usp.br  
Sérgio Delijaicov, Centro Universitário da FEI, sergiode@fei.edu.br  
Hae Yong Kim, Universidade de São Paulo, Escola Politécnica hae@lps.usp.br

**Resumo:** — Forças de usinagem em torneamento de aços duros são difíceis de quantificar numérica e analiticamente. Transdutores instrumentados com sensores piezo-elétricos são utilizados na aquisição das forças de usinagem, produzindo sinais que servem como informação de realimentação para o ataque da ferramenta em uma peça durante o processo de usinagem. Durante a usinagem ocorre uma alteração na amplitude do sinal, deteriorando a precisão das dimensões das peças que estão sendo trabalhadas. Este trabalho tem como objetivo o controle da amplitude de sinais provenientes destes sensores para a medição destas forças, através de uma experimentação em altas velocidades de corte, permitindo um corte preciso. Propomos um método de controlar a amplitude com o uso de filtragem não linear combinando difusão anisotrópica com filtro Mediana de janela três, de forma adaptativa através da regressão linear. O processo de sintonia dos filtros é feito automaticamente, obtendo os parâmetros adequados para o controle da amplitude dos sinais do sensor piezo-elétrico.

**Palavras chave:** Sensores piezo-elétricos, medição no torneamento de aços endurecidos, difusão anisotrópica, filtro não linear.

### **1 Introdução**

Durante a operação de usinagem os esforços de corte devem ser mantidos constantes durante toda a operação, para obter um corte preciso, [1]. O processo a controlar é difícil de modelar, devido aos fatores que afetam a força de corte serem variantes no tempo e conseqüentemente difíceis de prever.

O processo do torneamento duro é entendido como torneamento de materiais com dureza entre 50 e 70 HRc. Para as medidas dos esforços de usinagem são utilizados transdutores piezo-elétrico.

Durante a usinagem, estes transdutores fornecem um sinal para o sistema de controle da máquina, através de um sistema de realimentação que permite compensar os indesejáveis distúrbios que ocorrem durante o processo de corte [2].

Infelizmente o sinal não representa a ação das forças cortantes corretamente, uma vez que o sinal apresenta um decaimento com o tempo, impedindo sua leitura e processamento de forma correta para as forças de avanço, corte e de penetração. Erros deste tipo no processo de usinagem danificam as peças, devido aos altos níveis de tensões residuais de compressão na superfície e sub-superfície dos corpos usinados.

Em geral o modelamento deste processo é simplificado, e transdutores instrumentados com sensores piezo-elétricos são utilizados para o sensoriamento das forças de corte. Em alta velocidade o processo é muito mais crítico, e não admite simplificações no modelamento do sistema de controle de forças de corte no torneamento duro [3].

O transdutor para a medida dos esforços de usinagem usado neste trabalho é do tipo piezo-elétrico PCB-260A01

com fundos de escalas de 4,45 kN para as forças de avanço e corte, e de 5,87 kN para a força de penetração.

A figura 1 abaixo mostra os esforços de usinagem aplicados a peça. As componentes da força de usinagem incluem a força de  $F_c$ , a de avanço  $F_f$  e a de penetração  $F_p$ .

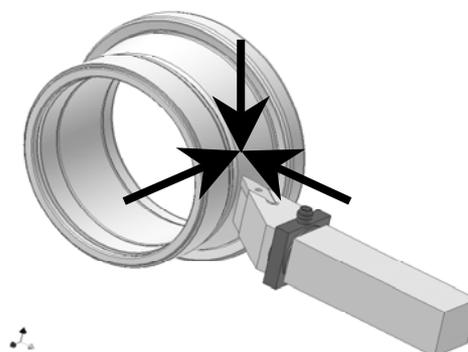


Figura. 1 Esforços de usinagem

Os experimentos foram todos realizados com peças em aço DIN 100 CrMn6, submetidos a tratamento de têmpera e revenimento para dureza entre 62 e 64 HRc. [4]. Os valores das durezas dos 32 corpos de prova em escala Vickers e Rockwell, foram obtidos através de um durômetro digital do fabricante SHIMADZU, modelo HMV2 – Micro Hardness tester.

Para solucionar o problema da precisão do corte em alta velocidade, propomos primeiro um algoritmo baseado na difusão anisotrópica para filtrar sinais reais dos sensores piezo-elétricos, em seguida usar a informação do instante de tempo de pico, onde ocorre a transição do sinal já filtrado.

Subtrai-se o sinal filtrado do sinal original, obtendo-se a dinâmica do sistema. Em seguida soma-se o valor do nível médio obtido em função do máximo valor da curva filtrada.

O controle da amplitude do sensor é obtido em uma janela de tempo, por exemplo de 3 segundos, necessários para o procedimento em tempo real. O uso dos filtros não lineares é de fundamental importância, devido apresentar propriedades de preservar as arestas do sinal, o que não ocorre com o uso de filtros lineares, [5], [6]. O espaço de escala é uma teoria que lida com o problema de multiresolução. Essa teoria foi formulada originariamente por Witkin [7] e utiliza filtros lineares gaussianos para obter sinais/imagens em escalas grossas. Perona e Malik [8] propuseram substituir o filtro linear (difusão isotrópica) pela difusão anisotrópica na obtenção de sinais/imagens em escalas grossas do espaço de escala. Em imagens, a difusão anisotrópica é utilizada para restauração, segmentação e detecção de arestas. A difusão anisotrópica também é utilizada com sucesso para filtrar sinais.

Na formulação de difusão não linear de Perona e Malik, existe uma função chamada parada-na-aresta (edge stopping function)  $g(\cdot)$ , que controla a intensidade da difusão de acordo com o valor do gradiente do ponto que deve sofrer a difusão. A função parada-na-aresta possui um parâmetro de escala  $\sigma$  que, em conjunto com o valor do gradiente, indica se a difusão deve ser forte ou fraca. A correta escolha da função parada-na-aresta e escala afetam de forma decisiva o resultado da filtragem do sinal. Os resultados obtidos mostram que a difusão anisotrópica consegue remover o ruído sem deslocar os instantes de ocorrência e as amplitudes dos eventos do sinal.

## 2 Algoritmo de Controle aplicado nos Sinais dos Sensores piezo-elétricos.

As curvas dos sinais dos sensores utilizados, são mostradas na figura 2, onde sofrem uma queda de nível médio ao longo do tempo devido a características do sensor. O sensor piezo-elétrico indica uma queda de seu nível médio de referência na forma de uma exponencial negativa. Deve-se então realizar um acerto do nível médio das curvas ao longo do tempo logo após a transição de subida que reflete a aplicação de esforço sobre a ferramenta e, consequentemente, sobre o sensor. A correção do sinal foi realizada em duas etapas:

1. Primeiro passa-se o sinal original por um filtro não linear com o objetivo de obter-se em sua saída o nível médio do sensor que equivale a exponencial negativa.
2. A partir do pico de transição do sinal filtrado, subtrai-se o sinal filtrado do sinal original, obtendo-se a dinâmica do sistema. Em seguida soma-se o valor do nível médio obtido em função do máximo valor da curva filtrada.

O filtro não linear é ajustado conforme o seguinte processo:

1. Através de regressão, ajusta-se uma curva do tipo

$$y = c \cdot e^{-t/\tau} \quad (1)$$

Aplicada no sinal original, obtendo-se os parâmetros  $C$  e  $\tau$ .

2. Em seguida usa-se essa curva como referência num segundo processo de regressão para ajuste do filtro. Aplica-se o sinal original a partir da transição na entrada do filtro e a resposta do filtro deverá seguir o mais próximo possível o sinal da curva ajustada

3. Uma vez ajustado o filtro utiliza-se o mesmo para o ajuste do nível médio desejado.

Observa-se que foram feitos os procedimentos acima para os três eixos, X, Y, e Z.

A verificação dos resultados foi planejada para uma análise estatística, seguindo metodologia estruturada de projeto de experimentos, de forma a reduzir com isso os custos e o tempo dos ensaios, [9]. A análise foi feita levando-se em consideração a influência dos parâmetros de usinagem (velocidade de corte, avanço, profundidade de penetração e raio da ponta da ferramenta), sobre a força de penetração decorrente do processo.

A máquina-ferramenta usada nos ensaios é um torno CNC – OKUMA LB300 (origem Okuma – Japão), com as seguintes especificações nominais: Potência do motor do fuso: VAV 15/11 [kW], Velocidade do fuso: 45 – 4500 [rpm], Torre: doze posições para a ferramenta, Máximo diâmetro torneável: 370 [mm], Máximo comprimento de corte: 250 [mm], Alta pressão de refrigeração.

O equipamento usado na aquisição dos sinais do transdutor piezo-elétrico foi o Spider8 da Hottinger Baldwin Messtechnik (HBM) com o Catman HBM Software (catman V 4.0). A aquisição dos dados foi feita numa frequência de 200 Hz.

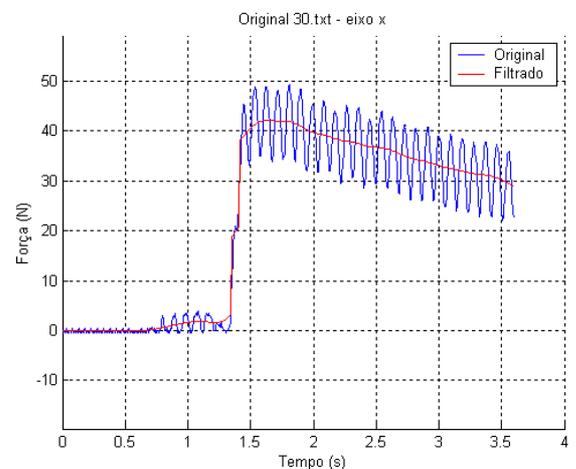


Figura 2. Sinal do transdutor piezo-elétrico (eixo x).

### 3 Filtros não Lineares

Perona e Malik apresentam sua equação não linear discreta de difusão anisotrópica em [8]:

$$I_s^{t+1} = I_s^t + \frac{\lambda}{|\eta_s|} \sum_{p \in \eta_s} g(\nabla I_{s,p}) \nabla I_{s,p}, \quad i \geq 0 \quad (2)$$

onde:

- $I_s^0$  é o sinal original no ponto  $s$  e  $I_s^t$  é o valor do sinal discretizado na iteração  $t$  no ponto  $s$ .
- $\lambda \in [0,1]$  é um constante escalar que controla a taxa de difusão.
- $\eta_s$  é o conjunto de vizinhos do ponto  $s$ .
- $|\eta_s|$  é o número de vizinhos de  $s$ , geralmente dois para sinais e quatro para imagens.

Perona e Malik aproximaram o gradiente  $\nabla I_{s,p}$  ( $p \in \eta_s$ ) do sinal como:

$$\nabla I_{s,p} = I_p - I_s \quad (3)$$

Listamos a seguir três possíveis funções parada-na-aresta  $g$ . Duas foram propostas por Perona e Malik e a terceira por Black et al. [10]. Esta terceira função está baseada em estatística robusta, [11]. A primeira função parada-na-aresta de Perona e Malik:

$$g_1(x) = \frac{1}{1 + \frac{5x^2}{\sigma^2}} \quad (4)$$

A segunda função de Perona e Malik:

$$g_2(x) = \exp\left[\frac{-2,5x^2}{\sigma^2}\right] \quad (5)$$

A função “Tukey’s biweight” proposta por Black:

$$g_3(x) = \begin{cases} \left[1 - \frac{x^2}{\sigma^2}\right]^2, & |x| \leq \sigma \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (6)$$

As constantes 5 e 2,5 foram inseridas para normalizar as funções  $g_1$  e  $g_2$  e facilitar a comparação das três funções. Para isso, foram calculadas as funções de influência definida como  $\psi(x) = xg(x)$ , das três funções parada-na-aresta  $g$ . As duas constantes foram escolhidas de forma a deixar as três funções de influência terem o máximo local no mesmo ponto  $x = \sqrt{0,2}$ .

Para estimar automaticamente a escala  $\sigma$ , usada nos filtros não lineares, aplicamos a equação abaixo, para ajustar as escalas dos filtros não lineares [10].

$$\sigma = 1.4826 \text{media}_I(\|\nabla I - \text{media}_I(\|\nabla I\|)\|) \quad (7)$$

$$\sigma = 1.4826 \text{MAD}(\nabla I) \quad (8)$$

O termo "MAD" na equação (8), denota o desvio absoluto mediano. A constante multiplicativa contida na equação (8), é derivado ao fato que o desvio absoluto mediano tem zero-mean e distribuição normal com variância unitária de 0,6745, que equivale ao cálculo de  $1/1,4826$ .

Para melhorar o desempenho global de filtro, usamos um filtro Mediana com de janela três após cada filtragem anisotrópica não linear. O Filtro Mediana preserva a borda e remove ruídos impulsivos. Nós usamos escala  $\sigma$  como fator de limitação do filtro Mediana.

É mostrado abaixo os sinais dos eixos X,Y e Z, controlados, figura 3, figura 5 e figura 7, e os sinais dos transdutores piezo-elétricos, figura 2, figura 4 e figura 6.

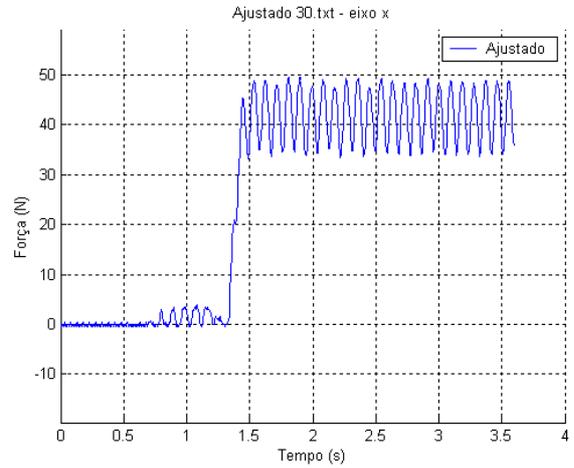


Figura 3. – O sinal (eixo x) filtrado pela difusão anisotrópica usando função de Perona e Malik ( $g_1$ ).

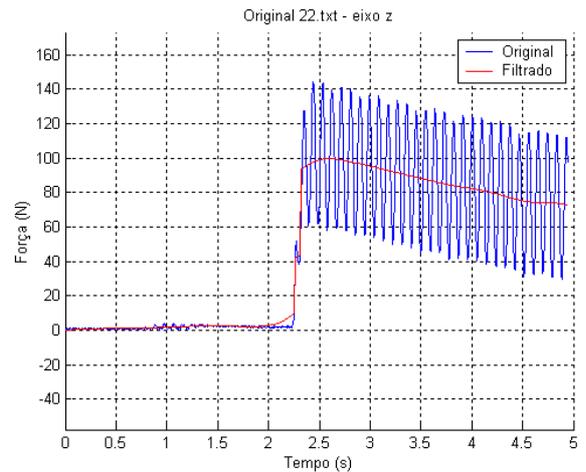


Figura 4. – Sinal do transdutor piezo-elétrico (eixo y).

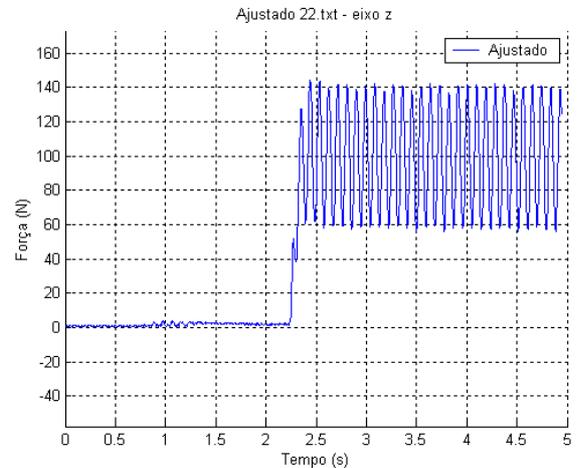


Figura 5. – O sinal (eixo y) filtrado pela difusão anisotrópica usando função de Perona e Malik ( $g_1$ ).

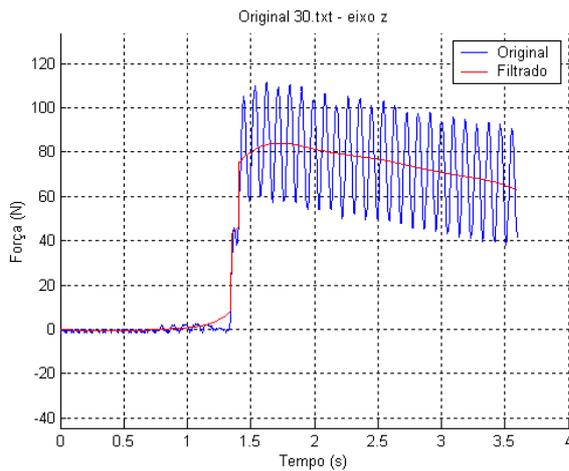


Figura 6. – Sinal do transdutor piezo-elétrico (eixo z).

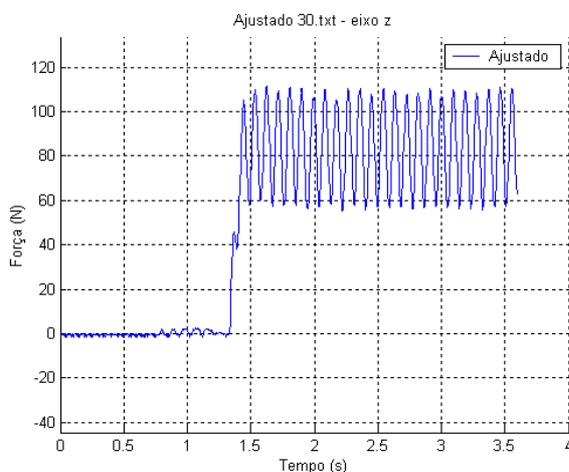


Figura 7. – O sinal (eixo z) filtrado pela difusão anisotrópica usando função de Perona e Malik ( $g_1$ )

#### 4 Conclusões

A difusão anisotrópica foi aplicada com sucesso para filtrar os sinais provenientes dos sensores piezo-elétricos. Testamos três funções parada-na-aresta com filtro mediana de janela três, e concluímos que a primeira função de Perona e Malik ( $g_1$ ), para ser usada na difusão anisotrópica é a mais adequada. Mostramos neste trabalho como é possível calcular automaticamente uma escala adequada para a difusão anisotrópica, usando a regressão linear e calculando de modo adaptativo para cada sinal de corte, os parâmetros do filtro. O efeito de melhoria de filtragem com filtro Mediana de janela três é muito pequeno, sendo conveniente o seu uso somente quando existir ruído impulsivo. Baseado nos valores experimentais e nos resultados das análises fatoriais, propôs-se, com o auxílio do programa Matlab, um Algoritmo de Controle para aplicação nos sinais dos sensores piezo-elétricos, realizando o acerto do nível médio das curvas ao longo do tempo logo após a transição de subida do sinal.

Em nossos ensaios, onde aplicamos esforços sobre a ferramenta, obtivemos os sinais filtrados mostrados pela figura 3, figura 5 e figura 7, que descrevem a dependência

da força de penetração com o avanço e a profundidade de penetração, para um excelente grau de confiança na medição de 90% na identificação dos fatores mais significativos.

#### Referências Bibliográficas

- [1] Fleming, M.A. (1998). PCBN hard turning and workpiece surface integrity. *Industrial Diamond Review*, p.128 – 133, 1998.
- [2] Abrão, A.M. O desgaste de ferramenta, as forças e a temperatura de corte na usinagem do aço-rolamento temperado. *Máquinas e Metais*, v.364, p.84-97, 1996.
- [3] Liu, C. R.; Barash, M.M. The mechanical state of the sublayer or a surface generated by chip-removal process. *Transactions of the ASME – Journal of Engineering for Industry*, p.1202 – 1208, 1976.
- [4] Matsumoto, Y. Effect of hardness on the surface integrity of AISI 4340 stell. *V. 108*, p.169 – 175, 1986.
- [5] Gobbo, D. D; Napolitano, M; Famouri, P. and Innocenti, M. Experimental Application of Extended Kalman Filtering for Sensor Validation. *IEEE Transaction on Control Systems Technology*, Vol. 9, No. 2; pp. 376-380, 2001.
- [6] Ramsden, E. and Dix, C. “Low-Pass Filtering for Vibration Sensors” - *Sensor Technology and Design*, Sensomag, Article 3; pp. 1-8, 2003.
- [7] Witkin, A. P. “Scale Space Filtering: A New Approach to Multi-Scale Description” - *Int. Joint Conf. Artificial Intell*; pp. 1019-1021, 1993.
- [8] Perona, P. and Malik, J. Scale-Space and Edge Detection Using Anisotropic Diffusion. *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell*, Vol. 12; No. 7; pp. 629–634, 1990.
- [9] Box, G. E., Hunter, W.G., Hunter, J.S. *Statistics of experimenters an introduction to designs, data analysis and model building*. Wiley, New York, 1978.
- [10] Black, M. J; Sapiro, G; Marimont, D. H. and Heeger, D. Robust Anisotropic Diffusion. *IEEE Transaction on Image Processing*, Vol. 7, No. 3; pp. 421-432, 1998.
- [11] Heikkilä, J. *Robust Regression*, Graduate Course on Advanced Statistical Signal Processing. Information Processing Laboratory, Department of Electrical Engineering, P.O. Box 4500, 90014 University of Oulu, [jth@ee.oulu.fi](mailto:jth@ee.oulu.fi), 2003.