

# CONTROLE DOS SINAIS DE SENSORES PIEZO-ELÉTRICOS APLICADO NA MEDIÇÃO DAS FORÇAS DE CORTE NO TORNEAMENTO DURO

Marco A. A. de Melo<sup>1,2</sup>, Sérgio Delijaicov<sup>1</sup>, Hae Yong Kim<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidade de São Paulo, Escola Politécnica;  
Av. Prof. Luciano Gualberto, tr. 3, 158, 05508-900;  
São Paulo, SP, Brasil.  
marco.melo@poli.usp.br

<sup>2</sup>Centro Universitário da FEI, Dept. Eng. Elétrica;  
Av. Humberto A. de Castelo Branco, 3142, 09850-901;  
São Bernardo do Campo, SP, Brasil.

E-mails: mant@fei.edu.br, sergiode@fei.edu.br, hae@lps.usp.br

**Abstract**—Turning forces in lathe of hard steels are difficult to quantify numeric and analytically. Transducers orchestrated with sensor piezo-electric they are used in the acquisition of the turning forces, producing signs that are good as feedback information for the attack of the tool in a piece during the turning process. During the turning, an alteration in the amplitude of the signal occurs, spoiling the precision of the dimensions of the parts that are being worked. This work has as objective the control of the width of coming signs of these sensor ones for the analysis of these forces, through an experimentation in court high-speeds. We propose a method of controlling the width with the use of non lineal filter using the diffusion anisotropic of form adaptive through the lineal regression. The process of syntony of the filters is made automatically, obtaining the parameters adapted for the control of the width of the piezo-electric signs of the sensor.

**Keywords**—Control of signs of sensor piezo-electric, lathe of hardened steels, anisotropic diffusion, non linear filter.

**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 análise 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 usando a difusão anisotrópica 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**— Controle de sinais de sensores piezo-elétricos, 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, (Fleming 1998). 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 (Abrão 1996).

Infelizmente o sinal não representa a ação das forças cortantes corretamente, uma vez que o sinal apresenta um decaimento com o tempo, mostrado na figura 1, 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 sensoriamto 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 (Liu 1976).

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 2 abaixo, ilustra o transdutor utilizados em cada um dos 3 eixos, e a figura 3 abaixo mostra os esforços de usinagem aplicados a peça. As componentes da força de usinagem incluem a força de Fc, a de avanço Ff e a de penetração Fp.

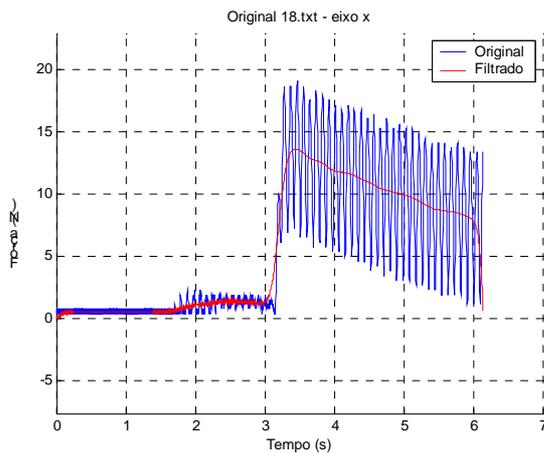


Figura 1. Sinal do transdutor piezo-elétrico (eixo x).



Figura 2 Transdutor piezo-elétrico

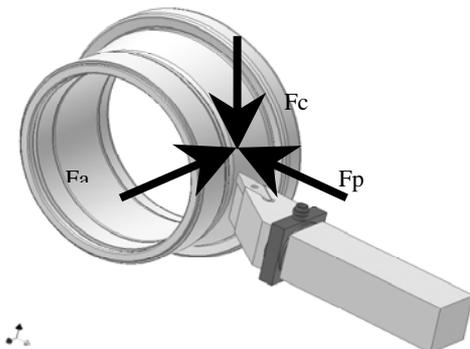


Figura 3 Esforços de usinagem

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. (Matsumoto 1986). 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, (Gobbo (2001), (Ramsden 2003). O espaço de escala é uma teoria que lida com o problema de multiresolução. Essa teoria foi formulada originariamente por Witkin (Witkin, 1983) e utiliza filtros lineares gaussianos para obter sinais/imagens em escalas grossas. Por exemplo, em (Lyon, 1987), o espaço de escala foi usado para o reconhecimento de voz.

Perona e Malik (Perona, 1990) 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. Em (Krim, 1999), a difusão anisotrópica de Perona e Malik foi usada para elaboração de um filtro estocástico aplicado em sinais sintetizados artificialmente, contaminados por uma grande variedade de tipos de ruído. Em (Shih, 2003) foi implementado um filtro wavelet baseado na difusão anisotrópica, para fazer uma difusão anisotrópica seletiva em frequência. 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 1, 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

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

ao 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 3 eixos. Um para o eixo X, um para o eixo Y, e um para o eixo 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, Box(6). 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.(Box, G.E. 1978)

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 piezoelétrico foi o Spider8 da Hottinger Baldwin Mess-technik (HBM) com o Catman HBM Software (catman V 4.0). A aquisição dos dados foi feita numa frequência de 200 Hz.

### 3 Filtros não Lineares

Perona e Malik apresentam sua equação não linear discreta de difusão anisotrópica em (Perona, 1990):

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

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. (Black, 1998). Esta terceira função está baseada em estatística robusta. (Heikkilä 2003). 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 (Black, 1998).

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

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

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  $1/1,4826$ .

Com o cálculo da escala descrito anteriormente, podemos ajustar os filtros, fazendo pequenas variações no valor da escala que foi inicialmente calculada para se ter a resposta desejada dos filtros não lineares.

É mostrado abaixo os sinais dos eixos X,Y e Z, controlados, figura 4, figura 6 e figura 8, e os sinais dos transdutores piezo-elétricos, figura 1, figura 5 e figura 7.

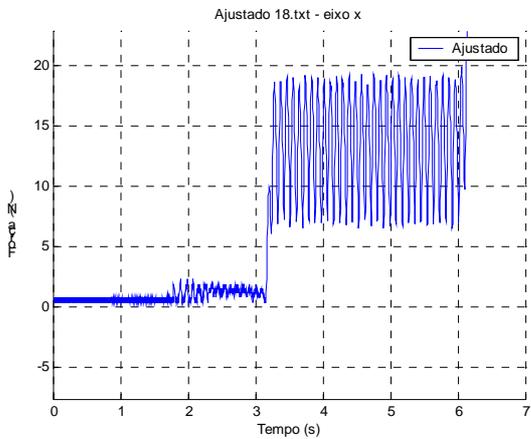


Figura 4. – O sinal (eixo x) filtrado pela difusão anisotrópica usando função de Perona e Malik ( $g_1$ ).

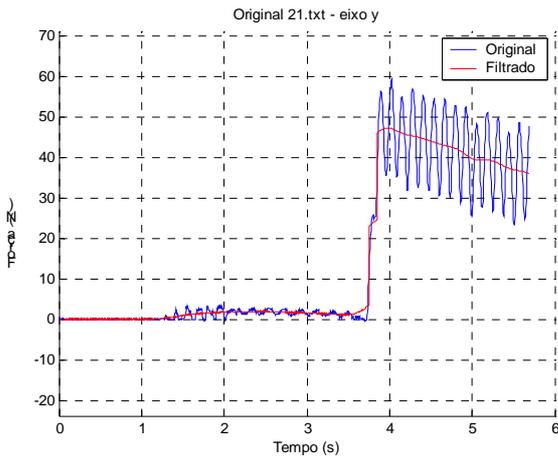


Figura 5. – Sinal do transdutor piezo-elétrico (eixo y).

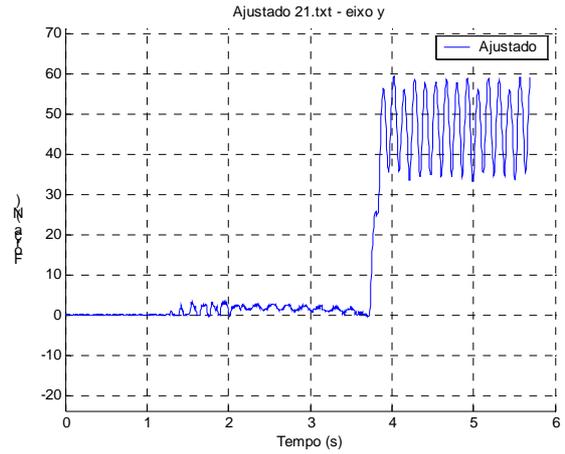


Figura 6. – O sinal (eixo y) filtrado pela difusão anisotrópica usando função de Perona e Malik ( $g_1$ ).

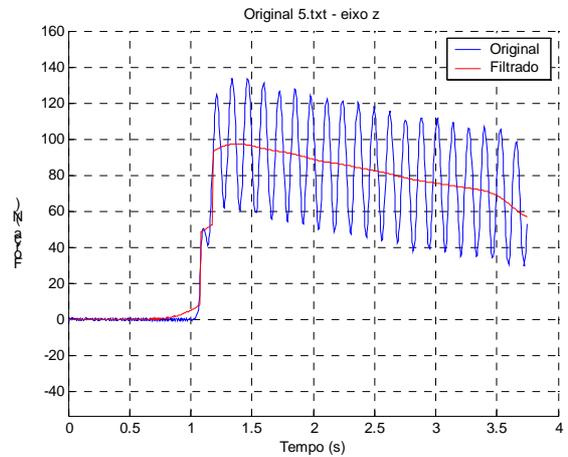


Figura 7. – Sinal do transdutor piezo-elétrico (eixo z).

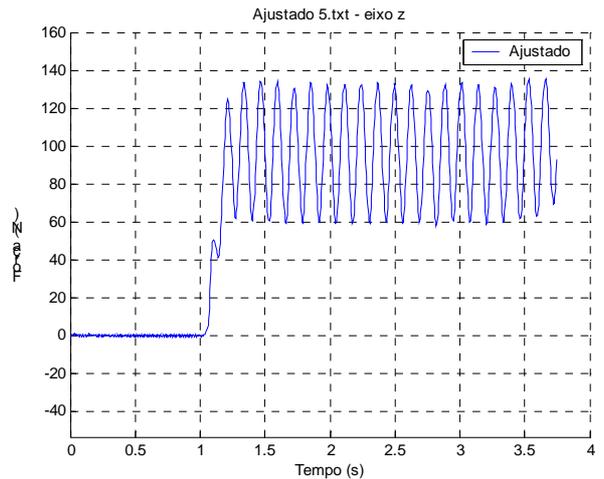


Figura 8. – O sinal (eixo z) filtrado pela difusão anisotrópica usando função de Perona e Malik ( $g_1$ ).

## 4 Conclusões

A difusão anisotrópica foi aplicada com sucesso para filtrar os sinais provenientes dos sensores piezo-elétricos. Testamos três funções parada-na-aresta 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. 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, que reflete a aplicação de esforço sobre a ferramenta, que resultou nos sinais mostrados pela figura 4, figura 6 e figura 8, para descrever a dependência da força de penetração com o avanço e a profundidade de penetração, para um excelente grau de confiança de 90% na identificação dos fatores mais significativos.

## Agradecimentos

Gostaríamos de agradecer ao Centro Universitário da FEI, e a Universidade de São Paulo, que disponibilizou recursos para este trabalho.

## Referências Bibliográficas

- Abrão, A.M. (1996). O desgaste de ferramenta, as forces e a temperatura de corte na usinagem do aço-rolamento temperado. *Máquinas e Metais*, v.364, p.84-97.
- Box, G. E., Hunter, W.G., Hunter, J.S. (1978). *Statistics of experimenters an introduction to designs, data analysis and model building*. Wiley, New York.
- Basseville, M. and Nikiforov, I. V. (1993). *Detection of Abrupt Changes: Theory and Application*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- Black, M. J; Sapiro, G; Marimont, D. H. and Heeger, D. (1998). Robust Anisotropic Diffusion. *IEEE Transaction on Image Processing*, Vol. 7, No. 3; pp. 421-432.
- Carlson, A. B. (1986). *Communication Systems, Probability, Random Variables and Random Signal Principles*. McGraw-Hill.
- Fleming, M.A. (1998). PCBN hard turning and workpiece surface integrity. *Industrial Diamond Review*, p.128 – 133. 1998.
- Gobbo, D. D; Napolitano, M; Famouri, P. and Innocenti, M. (2001). Experimental Application of Extended Kalman Filtering for Sensor Validation. *IEEE Transaction on Control Systems Technology*, Vol. 9, No. 2; pp. 376-380.
- Heikkilä, J. (2003). *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.
- Krim, H. and Bao, Y. (1999). A Stochastic Diffusion Approach to Signal Denoise. *IEEE International Conference on ICASSP '99*, Vol. 4; pp. 1773-1776.
- Liu, C. R.; Barash, M.M. (1976). 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.
- Lyon, R. F. (1987). Speech Recognition in Scale Space. *IEEE International Conference on ICASSP '87*, Vol. 12; pp. 1265-1268.
- Matsumoto, Y. (1986). Effect of hardness on the surface integrity of AISI 4340 steel. *V. 108*, p.169 – 175.
- Montgomery, D.C. (1984). *Design and analysis of experiments*. John Wiley & Sons, New York.
- Perona, P. and Malik, J. (1990). Scale-Space and Edge Detection Using Anisotropic Diffusion. *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, Vol. 12; No. 7; pp. 629–634.
- Ramsden, E. and Dix, C. (2003). “Low-Pass Filtering for Vibration Sensors” - *Sensor Technology and Design*, Sensormag 2003, Article 3; pp. 1-8.
- Shih, C. C. A. and Liao, H. Y. M. (2003). A New Iterated Two-Band Diffusion Equation: Theory and its Application. *IEEE Transaction on Image Processing*, Vol. 12, No. 4; pp. 466-476.
- Thiele, J. D. (2000). Effect of cutting-edge geometry and workpiece hardness on surface residual stresses in finish hard turning of AISI 52100 steel. *Transactions of the ASME*, v.122, p. 642-649.
- Witkin, A. P. (1983). “Scale Space Filtering: A New Approach to Multi-Scale Description” - *Int. Joint Conf. Artificial Intell*; pp. 1019-1021.