

ESTIMATIVA DE FORÇAS NO PROCESSO DE TORNEAMENTO VIA MONITORAMENTO DE SINAIS DE VIBRAÇÃO.

Tatiana Meola

Universidade Federal de Uberlândia
tatiana.meola@gmail.com

Marcus Duarte

Universidade Federal de Uberlândia
mvduarte@mecanica.ufu.br

Marcio da Silva Bacci

Universidade Federal de Uberlândia
mbacci@mecanica.ufu.br

Resumo: O conhecimento das forças de usinagem é de primordial importância nos diversos processos de corte. Em certas situações, as forças excitadoras podem ser medidas diretamente com o auxílio de transdutores de força. Porém, devido às dimensões dos transdutores e dificuldades de montagem nem sempre é viável medir as forças de usinagem no processo produtivo para fins de monitoramento em tempo real. Nestes casos devem-se utilizar técnicas de identificação indireta. Neste trabalho foi estudada a viabilidade de se utilizar uma técnica de identificação indireta de forças via medição de vibrações no processo de torneamento. A partir de medições de aceleração realizadas nas direções radial e axial do processo de corte, foram utilizadas técnicas de identificação no domínio do tempo e da frequência para estimar a força de corte no processo de torneamento. A comparação dos valores estimados e os medidos com um dinamômetro Kystler resultaram em erros da ordem de 10%, o que valida o procedimento estudado.

Palavras-chave: estimativa de forças, processo de torneamento, sinais de vibração, técnica de identificação.

1. INTRODUÇÃO

A determinação das componentes da força que atuam sobre o gume de corte da ferramenta durante o processo de usinagem sempre foi uma área importante, tanto na prática quanto na pesquisa, relativa às operações de corte com ferramentas de geometria definida. (Souza, 2004).

O estudo tem se mostrado muito importante tanto do ponto de vista prático quanto do ponto de vista da pesquisa.

O conhecimento da força de usinagem e o estudo do comportamento de suas componentes são de grande importância, não somente porque a potência requerida para executar o corte pode ser estimada, mas também, porque elas devem ser consideradas nos projetos das máquinas ferramentas e de seus elementos. Ela pode ser responsável direta pelo colapso da ferramenta de corte por deformação plástica da aresta, além de influenciar no desenvolvimento de outros mecanismos e processos de desgaste, (Rocha e Silva, 2004). A medição da força de usinagem mostra-se eficaz na detecção de falhas transitórias no gume da ferramenta. Em geral, uma mudança brusca no nível de amplitude do sinal das componentes da força de usinagem indica lascamento ou quebra na ferramenta. (Souza, 2004).

Em certas situações, essas forças excitadoras podem ser medidas diretamente com o auxílio de transdutores de força, (Silva, 2000). Porém, devido às dimensões dos transdutores e dificuldades de

montagem nem sempre é viável medir as forças de usinagem no processo produtivo para fins de monitoramento em tempo real. Nestes casos devem-se utilizar técnicas de identificação indireta.

A identificação indireta de forças busca estimar as forças excitadoras (entradas), a partir das respostas dinâmicas medidas da estrutura (saída) e de um modelo matemático do sistema. Diversos tipos de modelos podem ser empregados, tais como: um conjunto de funções de resposta em frequência (FRFs), funções de resposta ao impulso (FRIs), auto-soluções (frequências naturais, fatores de amortecimento modais, massas generalizadas e componentes de modos de vibração) ou ainda diversos tipos de modelos estruturais representados por matrizes de inércia, rigidez e amortecimento, (Silva, 2000).

Existem técnicas de identificação de forças nos domínios da frequência e do tempo. As técnicas no domínio da frequência buscam determinar os espectros de frequência das forças excitadoras, ao passo que as técnicas no domínio do tempo buscam caracterizar as variações das excitações externas em função do tempo. Ambas as técnicas serão utilizadas neste trabalho.

2. OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo estimar a força de corte de um processo de torneamento de uma barra de aço ABNT 1045, via medição de sinais de vibração e técnicas de identificação indireta nos domínios da frequência e do tempo.

3. METODOLOGIA

Para desenvolvimento deste trabalho, o Laboratório de Estudo e Pesquisa em Usinagem (LEPU) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU) disponibilizou um torno mecânico ROMI. Utilizou-se uma ferramenta de metal duro do tipo SPUN120308, com revestimento TIN. Foram empregadas duas condições de corte na usinagem a seco de uma barra de aço ABNT 1045 com diâmetro externo $\phi = 78.5$ mm, apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Condições de corte utilizadas.

Parâmetros de Corte	Condição 1	Condição 2
Velocidade de Corte (m/min)	345	345
Profundidade de Corte (mm)	1.5	1.5
Avanço (mm/volta)	0.138	0.298

Foram adquiridos sinais de vibração e de força para ambas as condições de corte. Os sinais de vibração foram obtidos para o desenvolvimento da identificação indireta da força de corte, ao passo que a medição direta desta força foi realizada com o intuito de se comparar os resultados obtidos e validar a metodologia proposta.

Os sinais de vibração foram adquiridos com uma frequência de 8192 Hz, sendo amostrados 10 segundos de sinal, na faixa de frequência de 10 Hz a 3 kHz. Para isso, foram utilizados:

- Um condicionador de sinais da B&K, do tipo 2692;
- Um micro-computador;
- Um acelerômetro, da B&K, do tipo 4371;
- Uma placa A/D, da National Instruments, USB 9162;
- Um calibrador de acelerômetro, da B&K, tipo 4294, com frequência de 159.2 Hz e nível de 10 m/s^{-2} .

Os sinais de força foram adquiridos com uma frequência de 8192 Hz, sendo amostrados 4 segundos de sinal e utilizados:

- Um condicionador de sinais Kistler, tipo 5019;
- Um micro computador;
- Um dinamômetro Kistler, tipo 9265B;

- Uma placa A/D, da National Instruments, BNC 2110;

A cadeia de instrumentação para a aquisição dos dados está mostrada na Fig. 1.

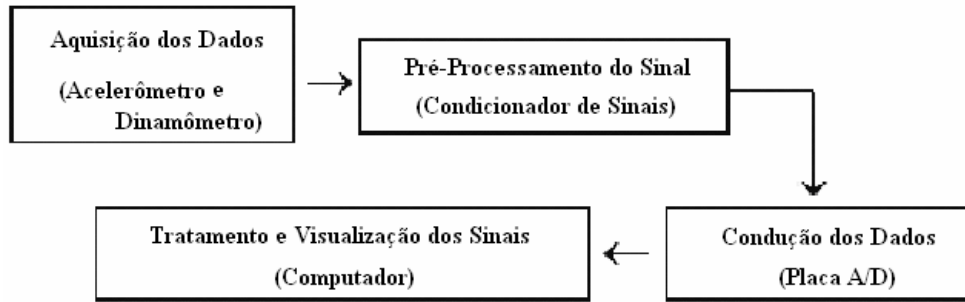


Figura 1. Cadeia de instrumentação para a aquisição dos dados de vibração e força.

Na Figura 2 estão indicados os sensores de força e aceleração utilizados.

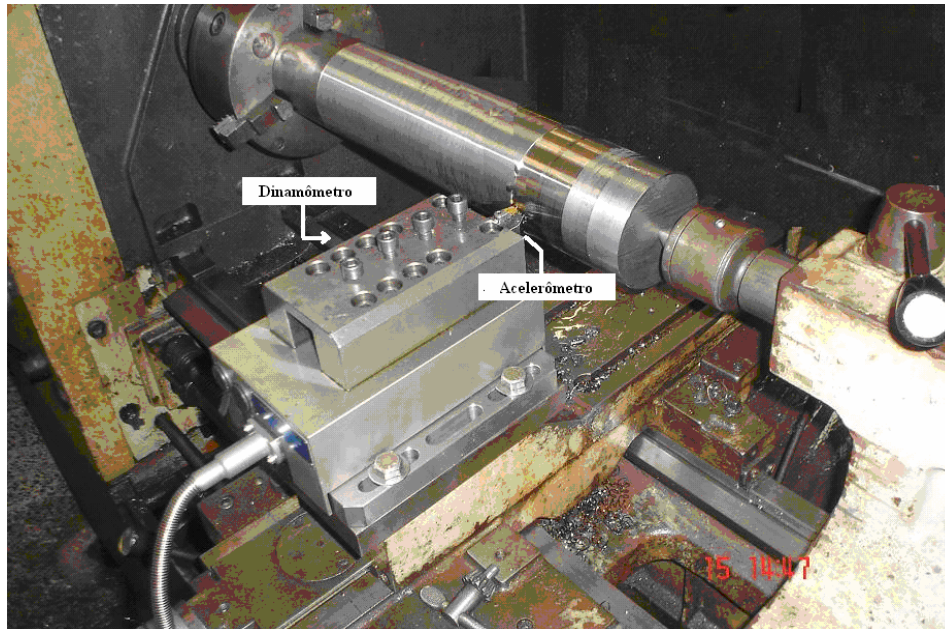


Figure 2. Sistema contendo as posições dos sensores de vibração e força utilizados.

Foram determinadas as Funções de Resposta ao Impulso (FRI) do sistema da Figura 1, uma vez que são necessárias para o desenvolvimento da técnica de identificação indireta de forças em ambos os domínios, da frequência e do tempo. Realizaram-se as aquisições com uma frequência de 16384 Hz, sendo amostrados 16384 pontos para um valor de 100 médias de sinal impulsivo. Para tanto, utilizou-se um martelo de impacto da B&K, tipo 4294. Excitou-se a ponta da ferramenta na posição vertical, medindo-se a resposta de aceleração também na direção vertical.

Neste trabalho serão utilizadas as FRIs do sistema e medições dos sinais de aceleração para a identificação indireta da força de corte no processo de torneamento do aço ABNT 1045. O método do domínio da frequência utilizado é baseado na inversão direta da matriz de Função Resposta em Frequência, de acordo com a Equação 1.

$$\{F(\omega)\} = ([H(\omega)]^T [H(\omega)])^{-1} [H(\omega)]^T \{X(\omega)\} \quad (1)$$

onde $\{X(\omega)\} \in \mathbb{R}^N$ é o vetor das amplitudes das respostas e $\{F(\omega)\} \in \mathbb{R}^N$ é o vetor das forças excitadoras.

Dois problemas ocorrem quando é utilizado o método de identificação no domínio da frequência:

- Grandes erros podem ser observados nas regiões de ressonância (Silva, 2000).
- Não pode ser aplicado em tempo real.

De acordo com as especificações do dinamômetro Kistler, tipo 9265B, a frequência natural de montagem do aparelho na direção vertical é de 2500 Hz. Portanto, segundo a Brüel & Kjaer (1980), a faixa de resposta em frequência a ser utilizada para um determinado transdutor é de aproximadamente 1/3 da frequência de ressonância do mesmo. Com isso, as análises foram efetuadas para uma faixa de frequência inferior a 833 Hz, aplicando-se um filtro passa baixa com frequência de corte de 800 Hz.

O outro método de identificação utilizado é baseado na deconvolução no domínio do tempo. Com isso, seja $f(t)$ a entrada (força) para um sistema dinâmico linear, caracterizado por sua FRI $h(t)$ e admitindo condições iniciais não nulas, a correspondente saída (resposta) $x(t)$ é dada pela integral de convolução da Equação 2 (Silva, 2000).

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t - \tau) f(\tau) d\tau \quad (2)$$

Para sistemas mecânicos fisicamente realizáveis (causais) a FRI é nula para todos os valores de $t \geq 0$ e a Equação 2 pode ser substituída por:

$$x(t) = \int_0^t h(t - \tau) f(\tau) d\tau \quad (3)$$

Tratando numericamente a Equação 3, considerando os valores de $\{x(t)\}$ e $\{f(t)\}$ amostrados no tempo, pode-se obter o problema inverso da integral de convolução. Com isso, seja Δt a taxa de amostragem uniforme das funções $x(t)$, $h(t)$ e $f(t)$, as amostras obtidas em p instantes de tempo são designadas por $x(i\Delta t)$, $h(i\Delta t)$ e $f(i\Delta t)$, $i=0,1,2,\dots,p-1$. Assim, a discretização temporal da Equação 4 é dada por:

$$x(k\Delta t) = \sum_{i=0}^k h[(k-i)\Delta t] f(i\Delta t) \Delta t, \text{ com } k=0,1,2,\dots,p-1. \quad (4)$$

Expandindo a Equação 3, tem-se:

$$\begin{aligned} \text{Para } k = 0: & \quad x_0 = f_0 h_0 \\ \text{Para } k = 1: & \quad x_1 = f_1 h_0 + f_0 h_1 \\ \text{Para } k = 2: & \quad x_2 = f_2 h_0 + f_1 h_1 + f_0 h_2 \\ \text{Para } k = p-1: & \quad x_{p-1} = f_{p-1} h_0 + f_{p-2} h_1 + \dots + f_0 h_{p-1} \end{aligned} \quad (5)$$

Matricialmente a Equação 5 é dada por:

$$\{x\} = [h] \{f\} \quad (6)$$

O problema inverso da Equação 6 é dado por:

$$\{f\} = ([h]^T [h])^{-1} [h]^T \{x\} \quad (7)$$

4. RESULTADOS

As amplitudes das forças de corte medidas com o dinamômetro em função do tempo para ambas as condições de corte (Condição 1 e Condição 2 da Tabela 1) estão mostradas nas Figuras 3 e 4, respectivamente.

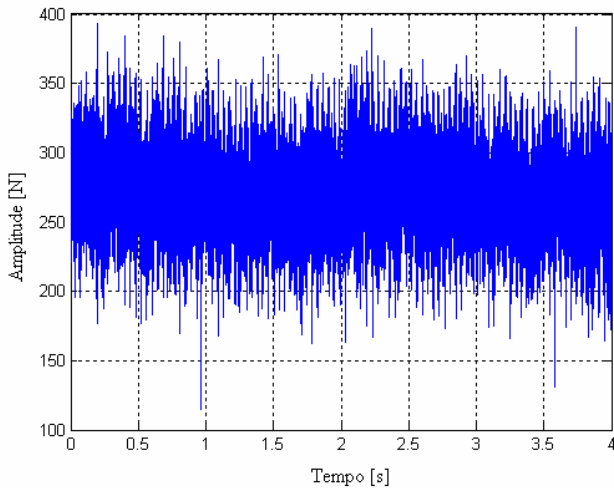


Figura 3. Amplitude da força de corte em função do tempo para a condição de corte 1.

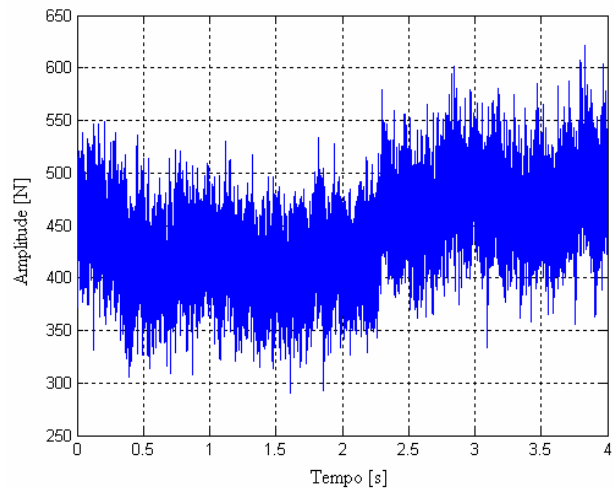


Figura 4. Amplitude da força de corte em função do tempo para a condição de corte 2.

Pode-se verificar nas Figuras 3 e 4 que a amplitude da força de corte aumentou cerca de 50 % da condição de corte com o avanço de 0.138 mm/volta para a condição com o avanço de 0.298 mm/volta. Estes resultados estão de acordo com a teoria, a qual propõe que a ascensão da força ocorre de maneira proporcional ao aumento do avanço. Tal fato também pode ser visualizado no domínio da frequência, onde há um aumento de cerca de 10 dB da magnitude da força na condição 2 em relação à condição 1 como visto na Figura 5.

A amplitude da Função Resposta ao Impulso em função do tempo para o sistema da Figura 2. está mostrada na Figura 6 onde se observa que o sistema é altamente amortecido. Com isso, para estimativa da força aplicando-se a técnica de deconvolução no domínio do tempo, apresentada na seção 3, utilizou-se uma discretização de $p = 64$ pontos.

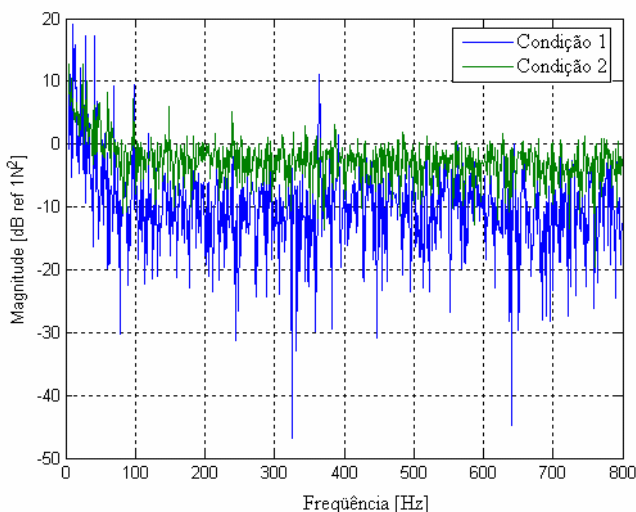


Figure 5. Autoespectro das forças de corte medidas com dinamômetro, para as condições de corte 1 e 2.

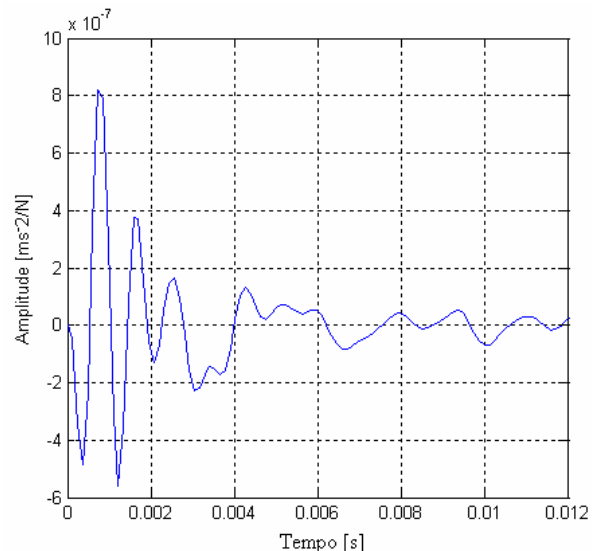


Figure 6. Amplitude da Função Resposta ao Impulso em função do tempo.

4.1. Resultados da Identificação nos Domínios do Tempo e da Frequência para a Condição 1.

Na Figura 7 estão mostrados os espectros de potência para a força medida via dinamômetro e para a força estimada por meio da técnica de identificação no domínio do tempo, para a Condição 1.

Verifica-se que não há diferenças explícitas entre as magnitudes das forças da Figura 7, exceto na região de anti-ressonância da Função de Resposta em Frequência (FRF), a qual se dá em torno de 400 Hz. Tal região pode ser observada na Figura 8, a qual representa a magnitude da FRF do sistema.

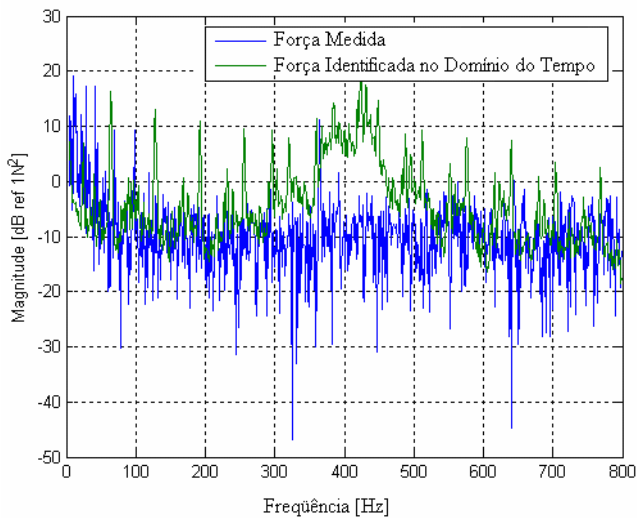


Figura 7. Autoespectros da força medida e da força estimada no domínio do tempo, para a Condição 1.

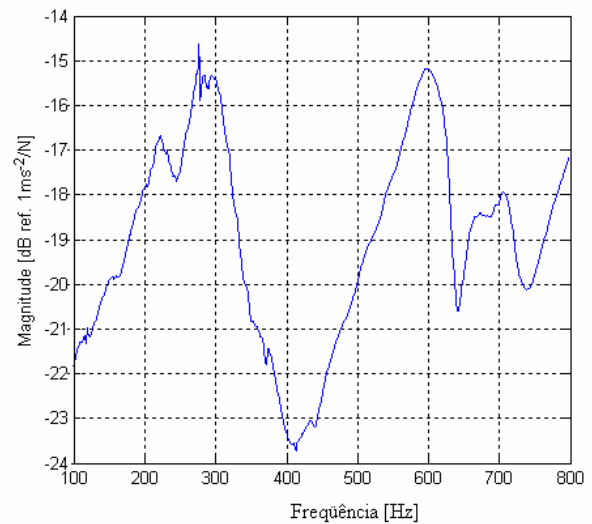


Figura 8. Função de Resposta em Frequência (FRF) do sistema

Antagonicamente ao que ocorre com o resultado da identificação da força no domínio do tempo, se observa nos valores de magnitude da força identificada no domínio da frequência, como visto na Figura 9.

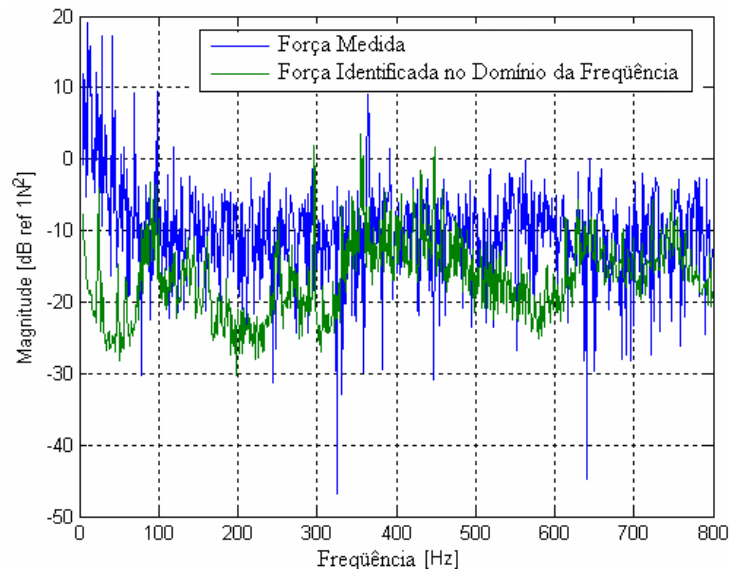


Figure 9. Autoespectros da força medida e da força estimada no domínio da frequência, para a Condição 1.

Pode-se verificar que, da comparação entre a força medida via dinamômetro e a força identificada pela inversão direta da matriz de FRF, há semelhança nos valores de magnitude apenas nas regiões de anti-ressonância. Nas ressonâncias estes valores chegam a diferenças de aproximadamente 15 dB na região de 220 Hz e de 20 dB na região de 600 Hz, por exemplo. Os erros na identificação da força via domínio da frequência nas regiões de ressonância foram observados por Silva (2000).

A ocorrência dos erros na identificação via domínio do tempo, em regiões de anti-ressonância, pode ser minimizada através da aplicação de vários sensores. Isso deve ao fato de as anti-ressonâncias não variarem com a mudança de posição dos sensores.

4.2. Resultados da Identificação nos Domínios do Tempo e da Frequência para a Condição 2.

Nas Figuras 10 e 11 estão mostrados os espectros de potência para a força medida via dinamômetro e para as forças estimadas por meio das técnicas de identificação nos domínios do tempo e da frequência, respectivamente, para a Condição 2.

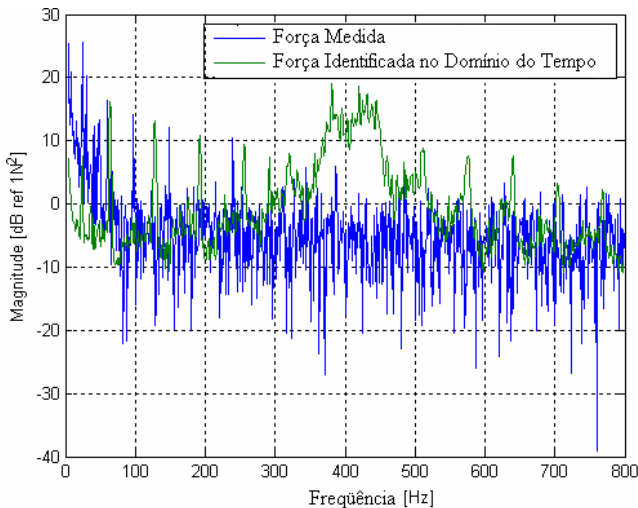


Figure 10. Autoespectros da força medida e da força estimada no domínio do tempo, para a Condição 2.

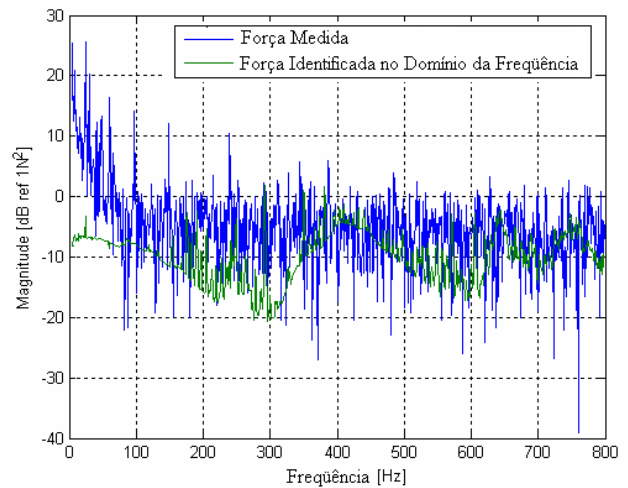


Figure 11. Autoespectros da força medida e da força estimada no domínio da frequência, para a Condição 2.

Os resultados obtidos para esta condição de corte, quando da comparação da força medida via dinamômetro com as forças identificadas em ambos os domínios, são bastante semelhantes aos da Condição 1. Observa-se nas Figuras 10 e 11 que as regiões de anti-ressonância para a identificação da força no domínio da frequência e as regiões de ressonância para a identificação no domínio do tempo apresentaram melhores resultados.

As Figuras 12 e 13 representam a comparação dos resultados das forças identificadas para ambas as condições de corte, nos domínios do tempo e da frequência, respectivamente.

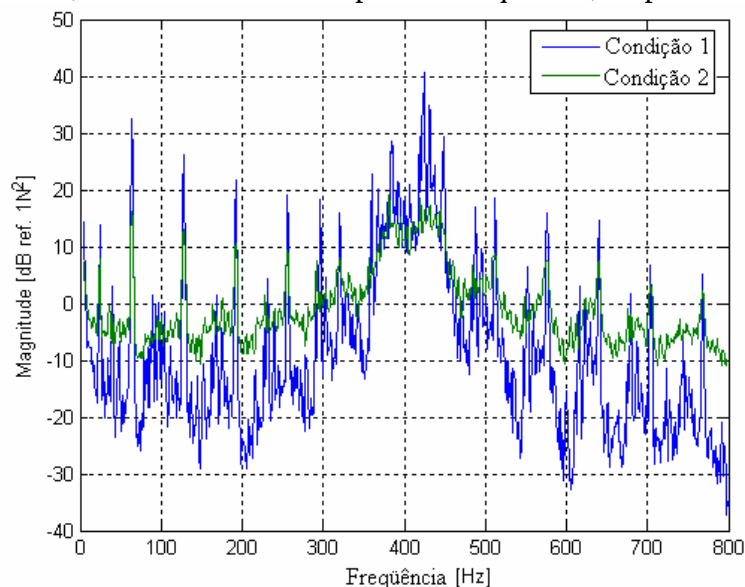


Figure 12. Autoespectros das forças estimadas no domínio do tempo, para ambas as condições de corte.

Observa-se na Figura 12 que a magnitude da força para a condição com um avanço de 0.298 mm/volta (Condição 2) é cerca de 10 dB acima da magnitude da força para a condição com um avanço de 0.138 mm/volta, exceto na região de anti-ressonância. Os resultados estão coerentes com a teoria, em que a força de corte aumenta com o aumento do avanço. Com relação os valores das forças serem coincidentes na anti-ressonância de 400 Hz, explica-se pelo fato de ser uma região onde há erros de identificação para o domínio do tempo.

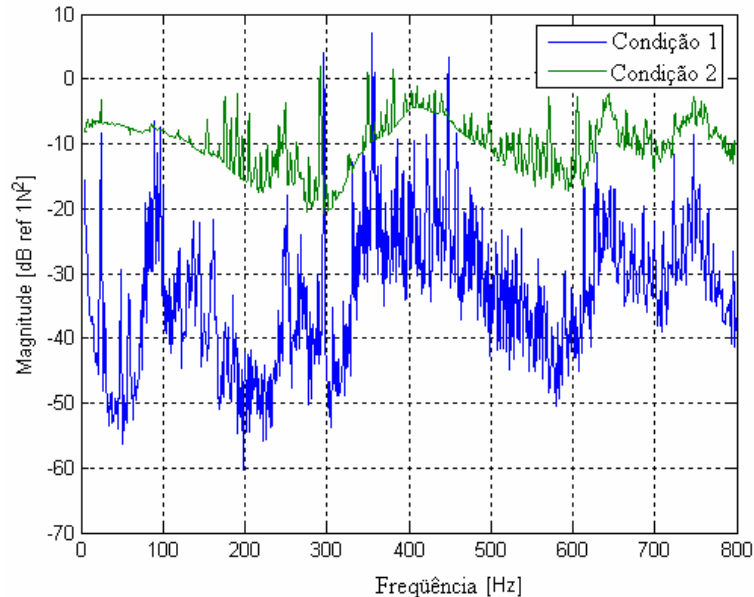


Figure 13. Autoespectros das forças estimadas no domínio da frequência, para ambas as condições de corte.

Analisando-se a Figura 13, verificam-se diferenças de até aproximadamente 40 dB nas regiões de ressonância, devido ao fato de apresentarem erros de identificação no domínio da frequência. Porém na região de anti-ressonância, as magnitudes distam-se cerca de 15 dB, como era de se esperar, uma vez que o aumento do avanço, por aumentar as áreas dos planos de cisalhamento primário e secundário, causam um aumento da força de usinagem, numa proporção quase que linear (Rocha e Silva, 2004)

5. CONCLUSÃO

As principais conclusões deste trabalho são:

- Não se verificaram diferenças explícitas entre as magnitudes das forças medidas e identificadas no domínio do tempo, exceto na região de anti-ressonância da Função de Resposta em Frequência (FRF), para ambas as condições de corte.
- Da comparação entre a força medida e as identificada no domínio da frequência, há semelhança nos valores de magnitude apenas nas regiões de anti-ressonância, para ambas as condições de corte.
- A ocorrência dos erros na identificação via domínio do tempo, em regiões de anti-ressonância, pode ser minimizada através da aplicação de vários sensores. Isso deve ao fato de as anti-ressonâncias não variarem com a mudança de posição dos sensores.
- Tanto as forças medidas diretamente via dinamômetro quanto as forças identificadas nos domínio do tempo e da frequência, apresentaram aumentos nos valores de suas amplitudes e magnitudes, com aumentou do avanço.
- As forças medidas apresentaram 50 % de aumento da condição com avanço de 0.138 mm/volta para a de 0.298 mm/volta, de acordo com o que é proposto pela teoria.

- A magnitude da força para a condição com um avanço de 0.298 mm/volta (Condição 2) é cerca de 10 dB acima da magnitude da força para a condição com um avanço de 0.138 mm/volta, exceto na região de anti-ressonância, onde os valores são coincidentes devido à presença de erros na identificação da força para o domínio do tempo.
- Há diferenças de até aproximadamente 40 dB nas regiões de ressonância, devido aos erros de identificação no domínio da frequência. Porém na região de anti-ressonância, as magnitudes distam-se cerca de 15 dB.

3. AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pelo apoio financeiro.

4. REFERÊNCIAS

- Bendat, J. S. and Piersol, A. G., 2000. "Random Data, Analysis and Measurements Procedures", John Wiley & Sons, ISBN 0-471-31733-0. pp 586.
- Brüel & Kjaer, 1980. "Measuring Vibration". pp 40.
- Meola, T., Duarte, M. A. V., Costa, e. S., Machado, A. R. "Monitoramento Da Vida Da Ferramenta No Processo De Furação Utilizando Medições De Pressão Sonora E Vibrações.", In: National Congress of Mechanical Engineering, 2004, Belém.
- Rocha, A. M. and Silva, M. B., 2004, "Usinagem dos metais", 8ª edição, Uberlândia, MG.
- Silva, L. A., 2000, "Técnicas de Identificação de Forças no Domínio do Tempo". Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG.
- Souza, A. J., 2004, "Aplicação de Multisensores no Prognóstico da Vida da Ferramenta de Corte no Torneamento". Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC.

ESTIMATE OF FORCES IN THE TURNING PROCESS USING VIBRATION MONITORING

Meola Tatiana

Federal University of Uberlândia
tatiana.meola@gmail.com

Duarte Marcus

Federal University of Uberlândia
mvduarte@mecanica.ufu.br

Bacci Marcio

Universidade Federal de Uberlândia
mbacci@mecanica.ufu.br

Abstract: *The knowledge of the manufacturing forces is useful in the cut processes to monitoring purposes. Unfortunately, the direct forces measurement is not so easy in a real time productive process monitoring. It is occurred due to the dimensions of the transducers and difficulties of them assembly. In these cases indirect measurements techniques can be used to monitoring purpose. In this work the viability of the use of indirect identification forces by vibration measurements in a turning process was studied. Through acceleration measurements at the vertical directions of the cutting process, a classical frequency domain procedures and a time purposed technique, based on single value decomposition, were tested. A good agreement was observed when the Power Spectrum Density PSD of the estimated forces was compared with the measured vertical forces with a Kystler dynamometer one. Expected errors on estimated PSD at anti-ressonance regions for indirect identified forces in time domain were obsered such as ressonance errors in frequency domain.*

Keywords: *estimated forces, turning process, signal vibrations, identification techniques*