

AVALIAÇÃO INDIRETA DA TEMPERATURA DE UMA FERRAMENTA DE TORNEAR UTILIZANDO UM FILTRO DE KALMAN

Gabriel Henrique de Paula Ferreira¹

Flávio Augusto Silva Mundim²

Alexandre Mendes Abrão³

Antônio Augusto Torres Maia⁴

Universidade Federal de Minas Gerais, Avenida Presidente Antônio Carlos, 6627

¹gabrielhpf@ufmg.br, ²fmundim@ufmg.br, ³abrao@demec.ufmg.br, ⁴aamaia@demec.ufmg.br

Resumo: A potência consumida no processo de usinagem está intrinsecamente associada com a geração de calor na ferramenta. O estudo de como o fluxo de calor e a temperatura se distribuem durante o processo de usinagem na região próxima à aresta de corte é essencial, já que o aumento da temperatura nesta região está relacionado com eventos como o desgaste da ferramenta, a alteração das propriedades mecânicas da peça e a dilatação térmica da ferramenta. Estes aspectos influenciam diretamente a produtividade, o custo e a qualidade final do produto. Assim, devido a sua importância, vários métodos foram desenvolvidos para mensurar a temperatura na aresta de corte. Dentre estes métodos importa mencionar a inserção de termopares na ferramenta, o uso do conjunto ferramenta-peça como elemento de medição, medição por metalografia, vernizes termossensíveis e o uso de câmera infravermelha apresentam-se como métodos de medição da temperatura. Contudo, algumas destas técnicas muitas vezes não são práticas e nem sempre garantem uma aceitável precisão nos resultados. Desse modo, como consequência dos desafios decorridos pela medição direta da temperatura da aresta de corte, surge a necessidade de fazer tal medição utilizando métodos indiretos. Sendo assim, neste trabalho propõe-se estimar a temperatura da ferramenta de corte utilizando um filtro de Kalman. Um modelo matemático será elaborado utilizando-se os resultados obtidos em testes experimentais. Este modelo será utilizado para correlacionar a temperatura próxima à aresta de corte e a temperatura na base da ferramenta. Esta informação será utilizada no desenvolvimento de um filtro de Kalman. Como resultado desse trabalho foi possível aproximar a dinâmica do sistema por uma função de transferência de segunda ordem, com 89,44 % de precisão. Além disso, a partir do filtro de Kalman, foi possível estimar indiretamente a temperatura da aresta de corte da ferramenta de tornear. Nos instantes iniciais, durante a parte mais severa da resposta transiente, as estimativas feitas usando o filtro de Kalman apresentaram um erro máximo de 8,89%, enquanto que na parte menos severa do regime transiente as estimativas do filtro de Kalman apresentaram um erro máximo de 1,89%.

Palavras-chave: Medição de temperatura; ferramenta de corte; filtro de Kalman

1. INTRODUÇÃO

A usinagem é uma das operações mais realizadas no processo de fabricação. Desde que começou a ser amplamente utilizada, vários problemas foram surgindo, sendo necessário novas soluções para melhorar e otimizar esse processo. Nesse sentido, o trabalho de Silva e Wallbank (1999) mostrou que o aumento da taxa de remoção do material e a redução do custo do processo configuram-se como objetivos prioritários. Por isso, diversas pesquisas vêm sendo realizadas na área de usinagem visando a melhoria desses aspectos.

O aumento na capacidade de remover material em um menor intervalo de tempo aumenta a geração de calor próximo à aresta de corte da ferramenta e a potência consumida no processo de usinagem. Essa potência é, em quase sua totalidade, convertida em calor, como afirmaram Dogu et al. (2006). Abukhshim et al. (2005) e Shouckry (1981) verificaram que apesar de aumentar a usinabilidade do material, a elevação da temperatura durante a usinagem resulta em graves consequências para a ferramenta de corte, assim como para a peça de trabalho. É possível mencionar a influência direta no desgaste da ferramenta e no seu tempo de vida, a redução da integridade superficial da peça de trabalho, alterações em suas propriedades mecânicas, além do próprio erro dimensional devido a dilatação térmica de ambos.

Em função disso, a distribuição de calor e temperatura durante a usinagem tem recebido destaque de pesquisadores nas últimas décadas. Komanduri e Hou (2000), Komanduri e Hou (2001a) e Komanduri e Hou (2001b) mostraram que diversos métodos analíticos foram desenvolvidos baseados em leis físicas e pressupostos que influenciam na precisão dos resultados. Nos trabalhos de Dogu et al. (2006), Muraka et al. (1979), Tieu et al. (1998) e Ramesh et al. (1999) foram pontuados métodos numéricos que estão sendo amplamente utilizados. Testes experimentais são utilizados para obter informações necessárias em ambos os métodos. Esses métodos podem ser encontrados em Komanduri and Hou (2001) e Dinc et al. (2008), em que os autores validaram o modelo de temperatura de diferenças finitas realizando a medição da

temperatura por meio de uma câmera infravermelha de alta precisão. Além disso, Grzesik (1999) usou um termopar padrão tipo K embutido na peça de trabalho para se obter os valores de temperatura. Com a utilização de uma câmera termográfica, Abukhshim et al. (2006) realizaram a medição de temperatura durante um processo de usinagem com alta velocidade de corte em uma liga de alta resistência. Campidelli et al. (2019) propuseram um sistema de medição sem fio, empregando uma conexão Bluetooth, e utilizando um termopar embutido. Lima et al. (2018) utilizaram termopares implantados em um processo de fresamento de topo. E, por fim, Filice et al. (2006) usaram termopar e uma análise termográfica para medir a temperatura na aresta da ferramenta.

A previsão da temperatura permanece um desafio devido à complexidade do fenômeno que envolve o processo de usinagem, segundo Abukhshim et al. (2006). Isso ocorre pelo fato de os métodos analíticos assumirem muitas simplificações do processo, refletindo em resultados menos realistas. Além do disso, em geral os métodos experimentais não são práticos e nem sempre capazes de gerar dados precisos. Em virtude disso, trabalhos de Yvonnnet et al. (2006) e Umbrello et al. (2007) mostraram que os métodos numéricos que se baseiam em elementos finitos estão sendo cada vez mais aplicados para o estudo do processo de usinagem. Nesse sentido, Jiang et al. (2013) aplicaram métodos numéricos e experimentais para avaliarem a influência dos parâmetros de corte na temperatura em um corte ortogonal. Ainda mais, Brandão et al. (2008) compararam os valores de temperatura fornecidos por abordagens experimentais (termopar implantado) e numéricas (elementos finitos) no fresamento de aço ferramenta AISI H13 e AISI D2. Por fim, Dai et al. (2018) compararam as temperaturas obtidas experimentalmente e numericamente em um processo de retificação. Os resultados indicaram uma diferença significativa entre as duas abordagens.

Filice et al. (2007) evidenciaram que os modelos numéricos mais recentes, há significativos avanços correlacionando problemas térmicos e mecânicos. Entretanto, a previsão numérica se torna insuficiente quando se analisa a temperatura na aresta de corte. Lei et al. (1999) e Mamalis et al. (2001) destacaram distintos modos de abordagem desenvolvidos para contornar esse problema. Contudo essas abordagens solucionaram parcialmente o problema, pois não foram capazes de considerar adequadamente a física do processo.

Considerando a importância da usinagem para o processo de fabricação, a necessidade de mensurar a temperatura na aresta de corte é crucial para aperfeiçoar esta operação. Neste contexto, o principal objetivo deste trabalho é estimar a temperatura da ferramenta de corte por meios indiretos. Para isso, foram realizados testes experimentais que foram utilizadas para correlacionar a temperatura na aresta de corte com a temperatura na base do inserto na forma de uma função de transferência. Este modelo foi utilizado juntamente com um Filtro de Kalman para se estimar a temperatura na aresta do inserto a partir de medições de temperatura realizada na base do inserto.

2. METODOLOGIA

Foram realizados testes experimentais para se obter dados de temperatura nos pontos de interesse da ferramenta de corte. Em seguida, foi desenvolvida uma função de transferência que correlaciona os dados de temperatura na base e na aresta do inserto. Um filtro de Kalman foi elaborado e utilizado para estimar a temperatura na ponta da ferramenta de corte a partir da temperatura medida em sua base. Por fim, outros testes experimentais foram executados, com o objetivo de validar os resultados obtidos nas duas primeiras etapas.

2.1. Filtro de Kalman

Criado por Rudolf Kalman, em 1960, o filtro de Kalman é um estimador de estados capaz de estimar valores de medições ao longo do tempo, baseando-se em medições com presença de ruídos e outras incertezas.

Para implementar o filtro de Kalman, uma série de equações são necessárias para descrever o comportamento do fenômeno, realizar um processo iterativo e gerar uma estimativa da variável de interesse. Nem sempre é possível medir o parâmetro de interesse. Neste caso, modelos matemáticos podem ser utilizados para se estimar a grandeza desejada. O Filtro de Kalman é aplicado para tornar a estimativa da grandeza de interesse mais próxima do valor verdadeiro mesmo com a presença de ruído de medição e das incertezas do modelo matemático desenvolvido.

Para o desenvolvimento do filtro de Kalman, inicialmente é necessário descrever a dinâmica do sistema utilizando uma representação no espaço de estado. Os parâmetros $[A]$, $[B]$ e $[C]$ representam a matriz de estado, a matriz de entrada e a matriz de saída do sistema, respectivamente. A representação em espaço de estados foi obtida a partir da função de transferência que correlaciona a temperatura na base e na aresta de corte da ferramenta. A função de transferência foi obtida a partir dos dados experimentais da temperatura da aresta de corte e da respectiva temperatura na base da ferramenta. Foi utilizado o toolbox de identificação de sistemas do MATLAB para correlacionar os dados de temperatura medidos na base da ferramenta e na aresta de corte na forma de uma função de transferência. Assim, as equações no espaço de estado que descrevem a dinâmica do sistema podem ser definidas através das Eq. (1) e Eq. (2) a seguir.

$$\dot{x} = [A]x + [B]u + w_d \quad (1)$$

$$y_t = [C]x + w_n \quad (2)$$

Onde, u é a saída, y_t a observação, w_d o ruído do sistema, w_n o ruído do sensor, x a variável do estado e $\dot{x}$ a saída do filtro de Kalman.

Em seguida, com as equações que descrevem a dinâmica do sistema foi possível aplicar um processo iterativo no filtro de Kalman. Para isso, algumas equações são necessárias. O processo iterativo ocorre do tempo $t-1$ até o tempo t . Inicialmente são definidas as equações de previsão, conforme apresentadas na Eq. (3) e Eq. (4).

$$x_{t/t-1} = F_t \cdot x_{t-1} \quad (3)$$

$$P_{t/t-1} = F_t \cdot P_{t-1} \cdot F_t^T + W_d \quad (4)$$

Onde, F_t é a matriz do sistema e W_d é a matriz de covariância.

Após obter o novo valor da observação, calcula-se novamente o novo valor de x , a partir da Eq. (5).

$$x_t = x_{t/t-1} + K_t \cdot (y_t - H_t \cdot x_{t/t-1}) \quad (5)$$

Onde K_t é o ganho de Kalman. O ganho de Kalman pode ser definido como o peso da medição. Dessa forma, quando o ganho de Kalman aproxima do seu valor máximo, o filtro de Kalman utiliza mais os dados da medição para estimar o próximo valor. Quando se aproxima do seu valor mínimo, o filtro de Kalman utiliza mais os valores da estimativa. O ganho de Kalman é dado pela Eq. (6) a seguir. A matriz H_t é denominada matriz de observação, que deve ser determinada antes da execução do filtro. Também é necessário a incerteza da medição (R).

$$K_t = P_{t/t-1} \cdot H_t^T \cdot (H_t \cdot P_{t/t-1} \cdot H_t^T + R)^{-1} \quad (6)$$

Finalmente, o novo valor da matriz de covariância do estado desconhecido x é dado pela Eq. (7), conforme pode ser observada a seguir.

$$P_t = (I - K_t \cdot H_t) \cdot P_{t/t-1} \quad (7)$$

Com isso, o filtro de Kalman é capaz de fazer um processo iterativo e estimar a temperatura da aresta de corte da ferramenta. Para este trabalho, o algoritmo do filtro de Kalman foi desenvolvido no software MATLAB.

2.3. Metodologia experimental

Com o objetivo de obter as curvas de temperatura na base e na ponta da pastilha de corte para identificar a função de transferência que relaciona a temperatura na aresta da ferramenta e a temperatura na base e, também, para validar os dados estimados pelo Filtro de Kalman, foram realizados um total de três testes experimentais. Três termopares do tipo K foram utilizados, sendo o primeiro deles soldado próxima à aresta de corte, por solda capacitiva. O segundo foi posicionado na base da ferramenta através de um furo passante, desde a parte inferior do porta ferramenta até a parte superior do calço. O furo realizado mede 1 mm de diâmetro e foi executado pelo processo de eletroerosão. O terceiro termopar foi utilizado para medir a temperatura ambiente. A Fig. 1 ilustra o canal e o furo para a passagem do termopar. Na Fig. 2 é possível visualizar a ponta do termopar utilizado para medir a temperatura na base da pastilha de corte. Por fim, é possível verificar os dois termopares posicionados na ferramenta na Fig. 3.

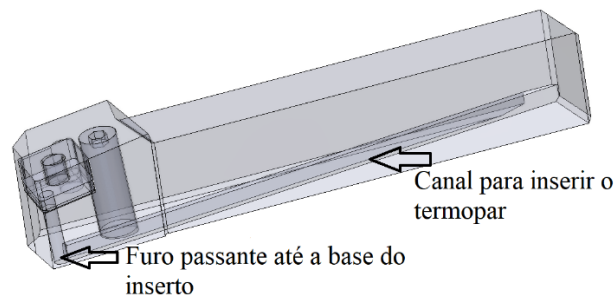


Figura 1. Canal e furo para a passagem do termopar



Figura 2. Termopar utilizado para medir a temperatura na base da pastilha de corte



Figura 3. Posicionamento dos termopares na ferramenta

Para aquecer a ferramenta de corte, foi utilizado um ferro de solda do modelo Hikari HK – 930. Para a medição dos dados utilizados na identificação da função de transferência que relaciona a temperatura da base e da aresta de corte da ferramenta, foi utilizado uma sequência aleatória de temperatura a fim de gerar uma curva de resposta que permitisse melhor avaliar a resposta dinâmica do sistema.

Para a validação do filtro de Kalman, as curvas geradas foram com a temperatura de 520°C. O posicionamento do ferro de solda foi realizado conforme mostrado na Fig. 4.



Figura 4. Posicionamento do ferro de solda

Para a medição das temperaturas foi utilizado o módulo NI 9122 da National Instruments. Os dados medidos foram registrados em uma arquivo utilizando um programa escrito em linguagem G (Labview).

3. RESULTADOS E ANÁLISES

A curva de resposta da temperatura da base e da aresta de corte utilizada para a identificação do sistema, juntamente com os valores utilizados no ferro de solda para provocar a excitação do sistema, são mostradas conforme a Fig. 5.

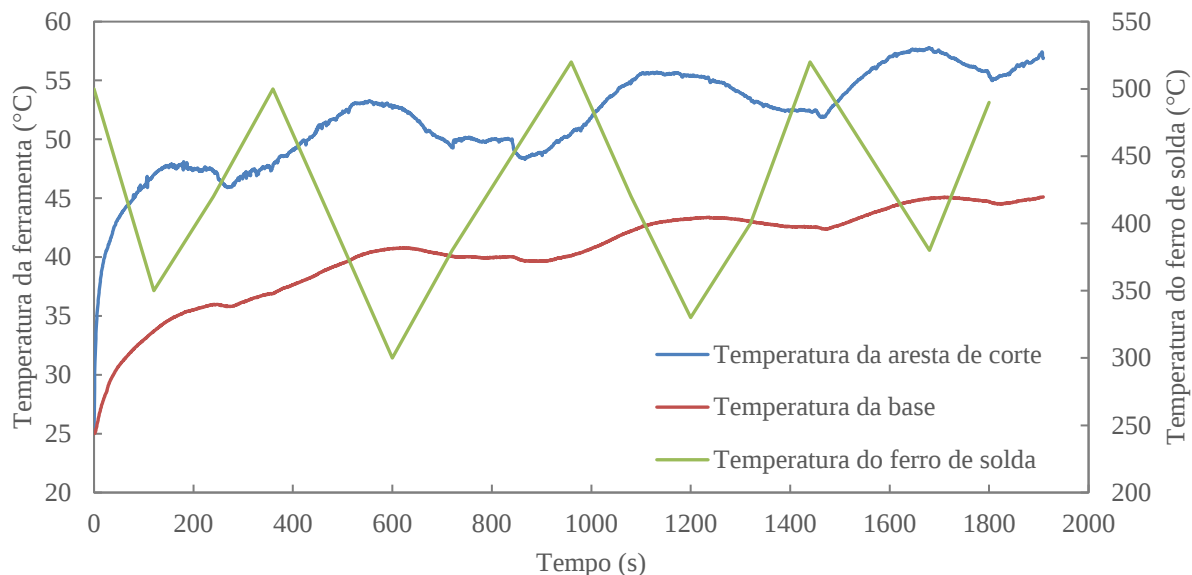


Figura 5. Curva de temperatura da aresta de corte, base e ferro de solda

Foi utilizado o toolbox de identificação de sistemas do MATLAB para determinar a função de transferência ($G(s)$) que correlaciona a temperatura na aresta e a temperatura da base do inserto. Foram consideradas funções de transferência de ordem 1 até ordem 7. Na Fig. 6 são comparados os valores singulares obtidos para cada ordem de modelo. O modelo com o valor singular mais próximo de zero foi o de ordem 2.

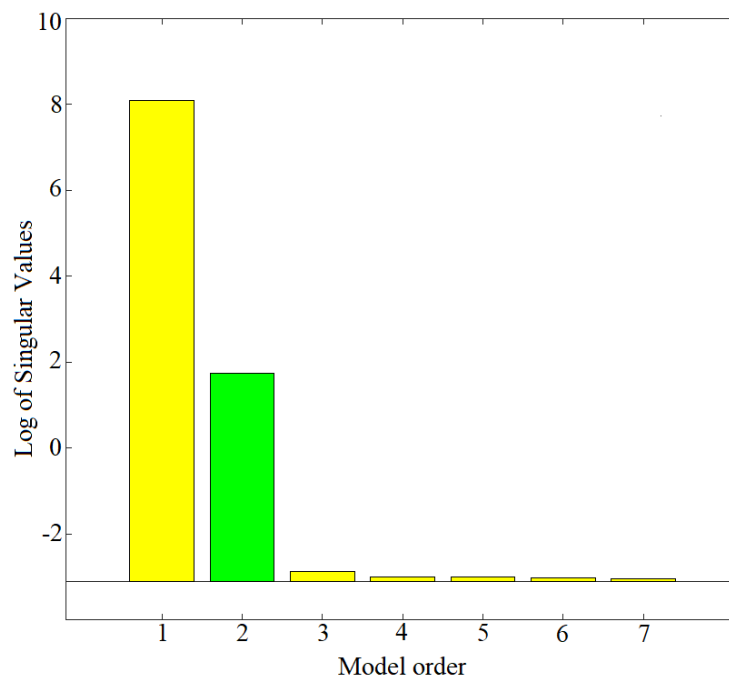


Figura 6. Análise do grau da função de transferência que melhor correlaciona as curvas experimentais

Foram analisadas as combinações da função de transferência variando o número de zeros de 0 a 2, mantendo fixo em dois o número de pólos. O número de zeros foi no máximo igual ao número de pólos para preservar a relação causa-efeito do sistema. Os qualidade de cada modelo pode ser conferida na Tab. 1.

Tabela 1. Qualidade das aproximações das funções de transferência

Número de zeros	Qualidade da aproximação (%)
0	31,28
1	77,92
2	89,44

Assim, foi escolhido a função de transferência com dois pólos e dois zeros. A função de transferência $G(s)$ com 89,44% de aproximação da dinâmica do sistema real é descrita conforme a Eq. (8).

$$G(s) = \frac{11,43 s^2 + 0,2326 s + 0,000289}{s^2 + 0,08734 s + 0,0001875} \quad (8)$$

A partir da função de transferência foi obtida a representação no espaço de estados equivalente e a determinação dos parâmetros $[A]$, $[B]$, $[C]$, conforme as Eq. 9, Eq. 10 e Eq. 11 respectivamente.

$$A = \begin{bmatrix} -0,0873 & -0,0002 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$C = [-0,7657 \quad -0,0019] \quad (11)$$

Em seguida, o filtro de Kalman foi aplicado em duas análises experimentais. Para as duas análises, todos os parâmetros do filtro se mantiveram iguais. Além disso, uma curva de erro foi obtida, fazendo a diferença entre os valores obtidos pelo filtro de Kalman e os valores experimentais. A curva de resposta e da diferença entre os valores da temperatura do filtro de Kalman e experimental, da primeira análise, podem observadas nas Fig. 7 e Fig. 8, respectivamente.

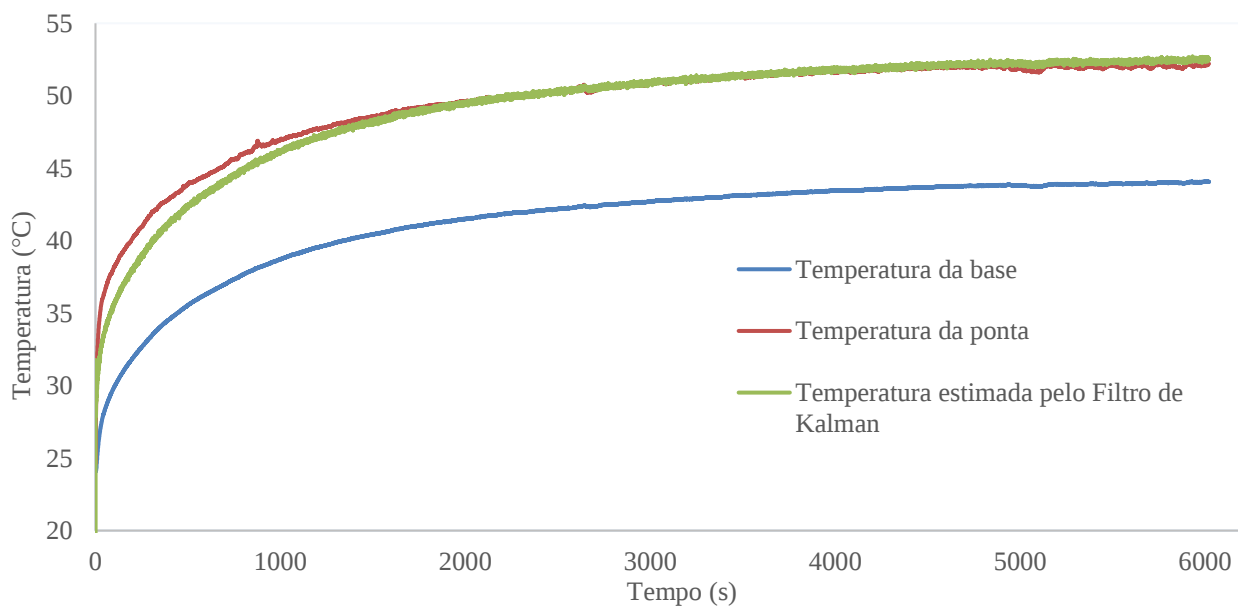


Figura 7. Curvas de resposta com o filtro de Kalman – análise 01

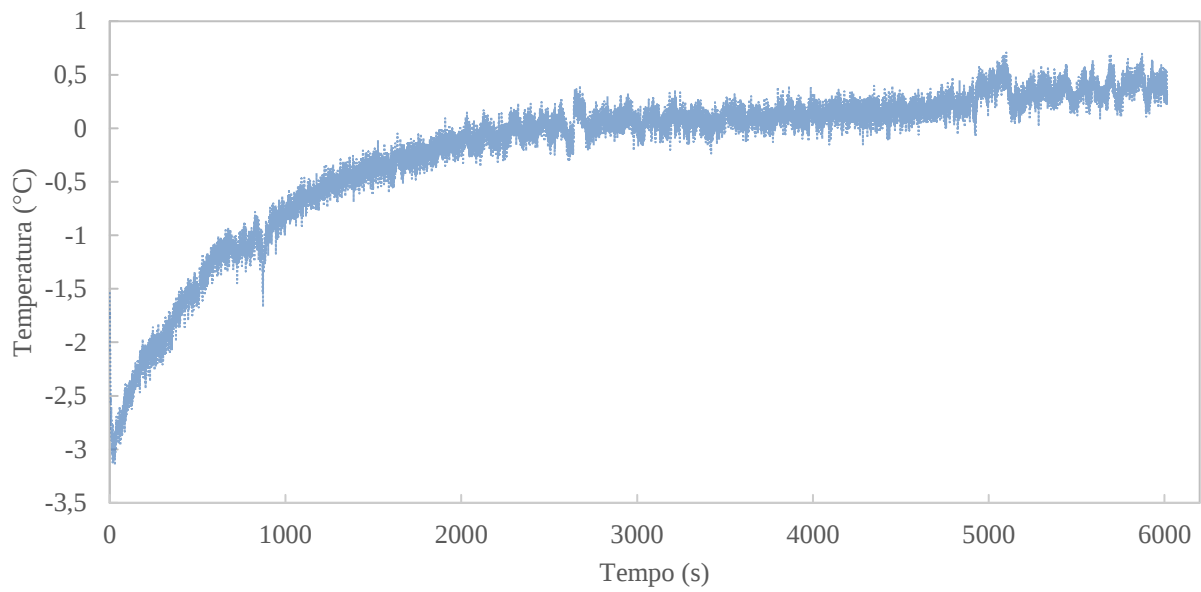


Figura 8. Diferença da temperatura entre o filtro de Kalman e modelo experimental – análise 01

Da mesma forma, a curva de resposta e da diferença entre os valores da temperatura do filtro de Kalman e experimental, da segunda análise, podem ser observadas nas Fig. 9 e Fig. 10, respectivamente.

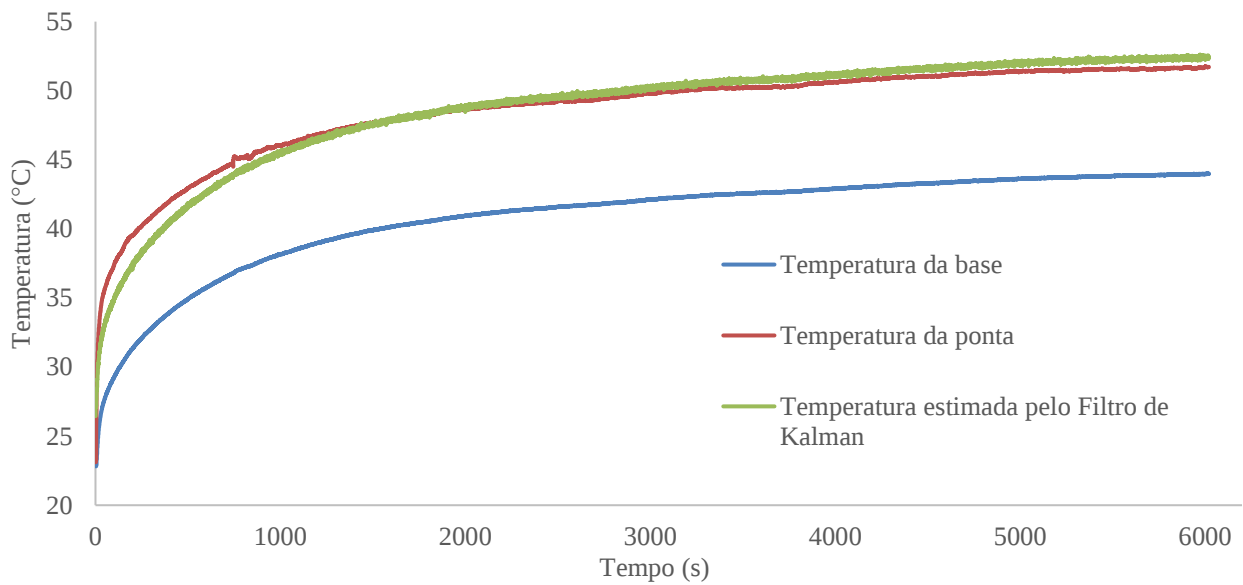


Figura 9. Curvas de resposta com o filtro de Kalman – análise 02

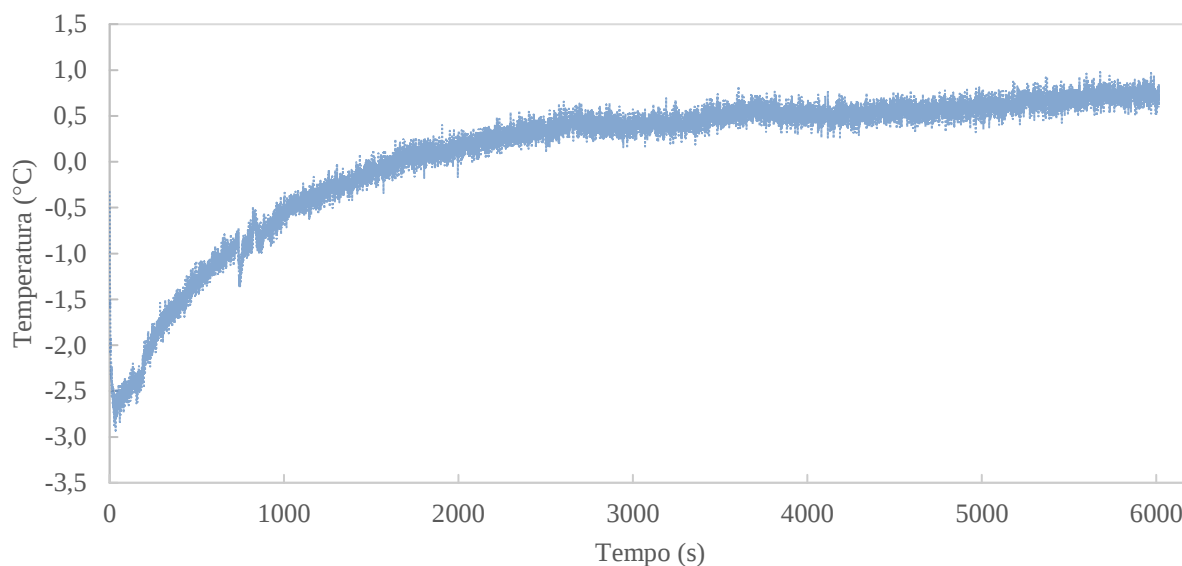


Figura 10. Diferença da temperatura entre o filtro de Kalman e modelo experimental – análise 02

Para analisar o erro dos resultados do filtro de Kalman em relação aos resultados experimentais, a curva de resposta foi dividida em duas partes. A primeira correspondente aos 2500 segundos iniciais em que a temperatura apresenta variação mais rápida e acentuada, caracterizando um transiente mais severo. A partir de 2500 segundos, a variação na temperatura se torna mais lenta e menos intensa, caracterizando uma resposta transiente moderada. O erro entre o valor medido experimentalmente e as previsões feitas pelo filtro de Kalman apresentou um valor máximo de $-3,15^{\circ}\text{C}$ (Fig. 8) e $-2,93^{\circ}\text{C}$ (Fig.10). Estes valores foram obtidos no instante inicial das medições, na região onde tem-se uma variação rápida e intensa da temperatura. Após este período, para $t > 2500$ s, o erro observado ficou menor, correspondendo a $0,71^{\circ}\text{C}$ (Fig. 8) e $0,98^{\circ}\text{C}$ (Fig.10). Por se tratar de um método iterativo, o filtro de Kalman precisa de algumas leituras de dados para ajustar os seus parâmetro e melhor estimar a grandeza de interesse. A partir da Fig. 11, é possível observar a convergência do filtro de Kalman. Como a convergência foi muito semelhante para ambas as análises apresentadas, foi feito um estudo apenas para os resultados da primeira análise.

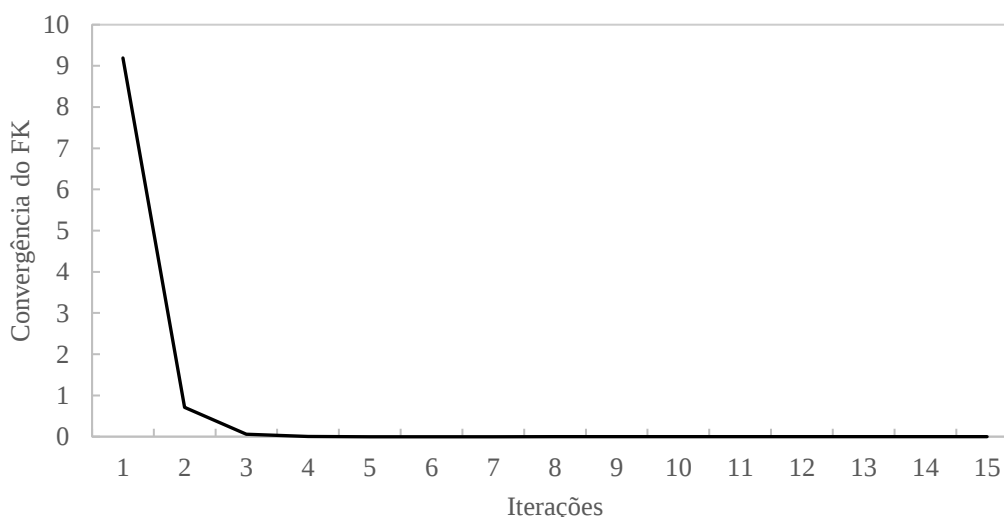


Figura 11. Convergência do filtro de Kalman – análise 01

A partir da Fig. 11 é possível concluir que inicialmente o erro do filtro é maior, mas, a partir da quinta iteração o filtro de Kalman já convergiu. Como foi realizado cerca de 12000 iterações no filtro de Kalman, é possível afirmar que os resultados obtidos no filtro possuem baixa incerteza.

4. CONCLUSÕES

Devido às dificuldades em realizar medições diretas, foi apresentado neste trabalho um método indireto para estimar a temperatura na aresta de corte de uma ferramenta de torneamento. Para isso foram realizados testes experimentais para obter o comportamento da temperatura na aresta de corte e na base do inserto. Em seguida, com a utilização do filtro de Kalman, foi possível prever de forma indireta a temperatura da aresta de corte, com um erro máximo de $-3,15^{\circ}\text{C}$ na região onde a resposta transiente apresenta variações mais rápidas e de maior intensidade, e de $0,98^{\circ}\text{C}$ na região onde a resposta transiente apresenta variações moderadas. Os erros obtidos não são significativos para a aplicação que se propõem. Dessa forma, do ponto de vista prático, das soluções atuais existentes, a proposta desse artigo é uma das mais viáveis tecnicamente, sendo possível a implementação dessa solução em um processo real. Isso pode ocorrer devido à necessidade de utilizar apenas termopares e um sistema de aquisição de dados e porque toda a instrumentação está posicionada no porta ferramenta, em um local protegido no processo de usinagem, não correndo riscos de danos.

5. AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

6. REFERÊNCIAS

- Abukhshim N.A., Mativenga P.T., Sheikh M.A. (2006) Heat generation and temperature prediction in metal cutting: A review and implications for high speed machining. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 46:782–800.
- Abukhshim N.A., Mativenga P.T., Sheikh M.A. (2005) Investigation of heat partition in high speed turning of high strength alloy steel. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 45:1687–1695
- Brandão L. C., Coelho R. T., Rodrigues A. R. (2008) Experimental and theoretical study of workpiece temperature when end milling hardened steels using (TiAl)N-coated and PcbN-tipped tools. *Journal of Materials Processing Technology* 199:234-244.
- Campidelli A.F.V., Lima H.V., Abrão A.M., Maia A.A.T. (2019) Development of a wireless system for milling temperature monitoring. *Int J Adv Manuf Technol* 104:1551-1560. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04088-0>
- Dai C. W., Ding W. F., Zhu Y. J., Xu J. H., Yu H. W. (2018) Grinding temperature and power consumption in high speed grinding of Inconel 718 nickel-based superalloy with a vitrified CBN wheel. *Precision Engineering* 52:192-200.
- Dinc C., Lazoglu I., Serpenguzel A. (2008) Analysis of thermal fields in orthogonal machining with infrared imaging. *Journal of materials processing technology* 198:147-154.
- Dogu Y., Aslan E., Camuscu N. (2006) A numerical model to determine temperature distribution in orthogonal metal cutting. *Journal of Materials Processing Technology* 171:1–9.
- Filice L., Micari F., Rizzuti S., Umbrello D. (2007) A critical analysis on the friction modelling in orthogonal machining. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 47:709–714
- Filice L., Umbrello D., Beccari S., Micari F. (2006) On the FE codes capability for tool temperature calculation in machining processes. *Journal of Materials Processing Technology* 174:286–292.
- Grzesik W. (1999) Experimental investigation of the cutting temperature when turning with coated indexable inserts. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 39:355–369.
- Jiang F., Yan L., Rong Y. (2013) Orthogonal cutting of hardened AISI D2 steel with TiAlN-coated inserts—simulations and experiments. *Int J Adv Manuf Technol* 64:1555–1563.
- Komanduri R., Hou Z.B. (2001) A review of the experimental techniques for the measurement of heat and temperatures generated in some manufacturing processes and tribology. *Tribology International* 34:653–682.
- Komanduri R., Hou Z. B. (2000) Thermal modeling of the metal cutting process Part I - Temperature rise distribution due to shear plane heat source. *International Journal of Mechanical Sciences* 42:1715-1752.
- Komanduri R., Hou Z. B. (2001) Thermal modeling of the metal cutting process Part II - Temperature rise distribution due to frictional heat source at the tool-chip interface. *International Journal of Mechanical Sciences* 43:57-88.
- Komanduri R., Hou Z. B. (2001) Thermal modeling of the metal cutting process – Part III: temperature rise distribution due to the combined effects of shear plane heat source and the tool-chip interface frictional heat source. *International Journal of Mechanical Sciences* 43:89-107.
- Lei S., Shin Y. C., Incropera F. P. (1999) Thermo-mechanical modeling of orthogonal machining process by finite element analysis. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 39:731–750.
- Lima H.V., Campidelli A.F.V., Maia A.A.T., Abrão A.M. (2018) Temperature assessment when milling AISI D2 cold work die steel using tool-chip thermocouple, implanted thermocouple and finite element simulation. *Appl Therm Eng.* <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.07.107>
- Mamalisa A. G., Horváth M., Branis A. S., Manolakis D.E. (2001) Finite element simulation of chip formation in

- orthogonal metal cutting. *Journal of Materials Processing Technology* 110:19-27.
- Muraka P. D., Barrow G., Hinduja S. (1979) Influence of the process variables on the temperature distribution in orthogonal machining using the finite element method. *Int. J. Mech. Sci.* 21:445-456
- Ramesha M. V., Seetharamua K. N., Ganesanb N., Kuppaswamy G. (1999) Finite element modelling of heat transfer analysis in machining of isotropic materials. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 42:1569-1583.
- Shouckry A. S. (1981) The effect of cutting conditions on dimensional accuracy. *Wear*, 80:197 – 205.
- Silva M.B., Wallbank J. (1999) Cutting temperature: prediction and measurement methods - a review. *Journal of Materials Processing Technology* 88:195–202.
- Tieu A. K., Fang X. D, Zhang D. (1998) FE analysis of cutting tool temperature field with adhering layer formation. *Wear* 214:252-258.
- Umbrello D., Filice L., Rizzuti S., Micari F. (2007) On the evaluation of the global heat transfer coefficient in cutting. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 47:1738–1743.
- Yvonnet J., Umbrello D., Chinesta F., Micari F. (2006) A simple inverse procedure to determine heat flux on the tool in orthogonal cutting. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 46:820–827.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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

INDIRECT EVALUATION OF THE TEMPERATURE OF A TOOL TURNING USING A KALMAN FILTER

Gabriel Henrique de Paula Ferreira¹

Flávio Augusto Silva Mundim²

Alexandre Mendes Abrão³

Antônio Augusto Torres Maia⁴

Federal University of Minas Gerais, Avenida Presidente Antônio Carlos, 6627

¹gabrielhpf@ufmg.br, ²fmundim@ufmg.br, ³abrao@demec.ufmg.br, ⁴aamaia@demec.ufmg.br

Abstract: The power consumed in the machining process is intrinsically connected with heat generation on the tool. The study of how the heat flux and temperature are distributed during the machining process in the region next to the cutting edge is essential since the increase of the temperature in this region is related to events such as tool wear, change in the mechanical properties of the part and the thermal expansion of the tool. These aspects directly influence the productivity, cost and quality of the final product. Thus, due to its importance, several methods have been deployed to measure the temperature at the cutting edge. Among these methods, it is worth mentioning the insertion of the thermocouple on the tool, the use of the tool-piece set as a measurement element, metallographic measurement, thermosensitive varnishes, and the use of the infrared camera. However, these techniques oftentimes are not practical and do not guarantee acceptable accuracy in the results. Thus, as a consequence of the challenges incurred by the direct measurement of the cutting-edge temperature, the need arises to make such a measurement using indirect methods. Therefore, this work proposes to estimate the temperature of the cutting tool indirectly, utilizing a Kalman filter. A mathematical model will be elaborated by using the results obtained through experimental tests. This model will be utilized to correlate the temperature next to the cutting edge and the temperature in the tool base. This information will be in a Kalman Filter to estimate the temperature in the tool cutting edge having as input parameter the temperature at the insert base. As a result of this work, it was possible to approximate the dynamics of the system by a second order transfer function, with 89,44% accuracy. Furthermore, using Kalman's filter as a base, it was possible to indirectly estimate the temperature at the edge of the turning tool. Initially, at the most severe part of the transient response, the estimates done with Kalman's filtering displayed a maximum error of 8.89%, whereas at the least severe part of the transient regime Kalman's filter estimates showed a maximum error of 1.89%.

Keywords: Temperature measurement; Cutting tool; Kalman filter

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.