

Desenvolvimento de Sistema Multisensores para Monitoramento Remoto de Desgastes em Ferramentas de Corte

Development of a Multi-sensor System for Remote Monitoring of Wear in Cutting Tools

Izabela Larissa Araújo da Silva Pinto¹

 orcid.org/0009-0009-0208-4723

Rogério Pontes de Araújo¹

 orcid.org/0000-0001-9045-6762

Ricardo Ataíde de Lima¹

 orcid.org/0000-0001-9870-2286

Felipe Mendes da Cruz¹

 orcid.org/0000-0002-0163-465X

Gustavo Rogério da Silva Barbosa¹

 orcid.org/0009-0005-1441-3142

Petrus Candido de Lorena²

 orcid.org/0009-0005-8964-8085

¹Escola Politécnica de Pernambuco, Universidade de Pernambuco, Recife, Brasil. E-mail: ilasp@poli.br

²Parque Tecnológico de Eletroeletrônicos e Tecnologias Associadas, Secretaria de Ciência, Tecnologia e Inovação de Pernambuco, Recife, Brasil.

DOI: 10.25286/rep.v9i3.2767

Esta obra apresenta Licença Creative Commons Atribuição-Não Comercial 4.0 Internacional.

Como citar este artigo pela NBR 6023/2018: Izabela L. Araújo da Silva Pinto; Rogério Pontes de Araújo; Ricardo Ataíde de Lima; Felipe Mendes da Cruz; Gustavo Rogério da Silva Barbosa; Petrus Candido de Lorena. Desenvolvimento de Sistema Multisensores para Monitoramento Remoto de Desgastes em Ferramentas de Corte. Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada, v.9, n. 3, p. 1-10, 2024

RESUMO

Desde a primeira revolução industrial, a evolução das máquinas tem sido vital para o progresso tecnológico em diversas indústrias, acompanhada da necessidade constante de manutenção e obtenção de dados de processo em tempo real para tomadas de decisão mais assertivas. Com a ascensão da indústria 4.0 e o processo de transformação digital cada vez mais presente nas organizações, este projeto propõe um sistema multisensores para monitoramento remoto de desgastes em ferramentas de corte, objetivando contribuir com o setor de manufatura através da implementação de uma ferramenta inteligente capaz de auxiliar nas tomadas de decisão, visando otimizar processos manufatureiros, aumentar a produtividade e reduzir custos associados a substituições prematuras de ferramentas de corte. O sistema inclui um *dashboard* dinâmico para visualização, em tempo real, de sinais de vibração no domínio da aceleração em função do tempo. Após testes, pôde-se constatar que os resultados obtidos com o sistema proposto foram coerentes com o que aponta a literatura da área.

PALAVRAS-CHAVE: Monitoramento; Multisensores; Desgaste; Usinagem;

ABSTRACT

Since the first industrial revolution, the evolution of machines has been vital for technological progress in various industries, accompanied by the constant need for maintenance and obtaining real-time process data for more assertive decision-making. With the rise of industry 4.0 and the digital transformation process increasingly present in organizations, this project proposes a multi-sensor system for remote monitoring of wear on cutting tools, aiming to contribute to the manufacturing sector through the implementation of an intelligent tool capable of to assist in decision making, aiming to optimize manufacturing processes, increase productivity and reduce costs associated with premature replacements of cutting tools. The system includes a dynamic dashboard for visualizing, in real time, vibration signals in the acceleration domain as a function of time. After testing, it was verified that the results obtained with the proposed system were consistent with what the literature in the area points out.

KEY-WORDS: Monitoring; Multisensors; Wear on Cutting Tools; Machining;

1 INTRODUÇÃO

A partir da criação das primeiras máquinas até os dias atuais, associados as revoluções tecnológicas envolvendo a modernização, os equipamentos mecânicos em sua totalidade necessitam, em um certo momento da sua vida útil, de alguma forma de reparo ou atualização [1, 7]. Desta forma, com as inovações no setor técnico-industrial, necessitou-se do desenvolvimento de ações que englobem um sistema consistente e eficiente para garantir a funcionalidade constante das máquinas em operação, sendo este, o princípio da manutenção [2,11]. Baseado no estilo de intervenção nos equipamentos e sistemas, foram criados diversos tipos de manutenção que atendessem uma ordem para mitigar as falhas nos processos de operação, sendo as manutenções corretivas, preventivas, preditivas e detectivas as mais usuais [3,14].

A manutenção de equipamentos e infraestruturas pode representar uma parcela significativa, superando 60%, dos gastos totais associados a um sistema de manufatura ao longo de seu ciclo de vida, contribuindo também com mais de 30% dos custos operacionais totais. Dentro das diversas modalidades de manutenção, a manutenção preditiva assume um papel de extrema relevância [1-6].

Segundo MOBLEY (2002), a manutenção preditiva pode ser definida como o conjunto de práticas para o monitoramento periódico das condições de operação do sistema utilizando-se de diversos indicadores (temperatura, vibração etc.). Para assegurar a eficiência desta categoria de manutenção, trazendo o máximo intervalo entre os reparos e redução de custos, o monitoramento de parâmetros das máquinas está entre as técnicas mais aplicadas [4, 12, 21].

Na era da transformação digital e com o advento da indústria 4.0, dispositivos portáteis como smartphones e tablets vêm se incorporando cada vez mais às práticas industriais de chão de fábrica, como ferramentas essenciais no controle e gestão de dados, para tomadas de decisão inteligentes [5, 13].

A implementação de indicadores de manutenção a partir de dados coletados, toma como base os conceitos de Manutenção Centrada na Confiabilidade (MCC), objetivando evitar a ocorrência de falhas inesperadas nos sistemas e/ou equipamentos, através de rotinas de inspeção,

indicadores de desempenho, cronogramas de reposição de peças, planos de calibração, etc. [6, 7, 10].

Portanto, este artigo tem como objetivo apresentar um sistema multisensores para monitoramento remoto de desgastes em ferramentas de corte, buscando auxiliar o setor fabricante através da aplicação de uma ferramenta inteligente capaz de auxiliar nas tomadas de decisão, de modo a otimizar processos produtivos, elevar os níveis de produtividade e reduzir custos associados a trocas prematuras de ferramentas de corte. O sistema é composto por um *dashboard* dinâmico para visualização, em tempo real, de sinais de vibração no domínio da aceleração em função do tempo.

2 METODOLOGIA

O projeto de pesquisa é parte integrante de uma dissertação de mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas da Escola Politécnica de Pernambuco – PPGES, e o seu desenvolvimento se deu na Escola Politécnica de Pernambuco – POLI/UPE, no Instituto de Inovação Tecnológica da Universidade de Pernambuco – IIT/UPE e no Parque Tecnológico de Eletroeletrônicos e Tecnologias Associadas – PARQTEL, da Secretaria de Ciência, Tecnologia e Inovação do Estado de Pernambuco – SECTI-PE.

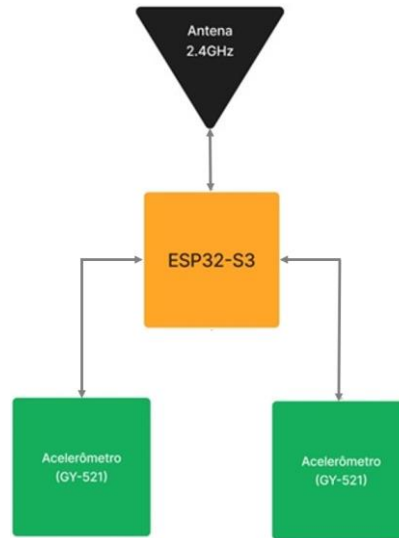
O sistema de monitoramento consiste em quatro etapas conforme descritas abaixo:

- Coleta de dados dos sensores;
- Processamento dos sinais coletados;
- Geração de gráficos dinâmicos dos sinais processados;
- Apresentação dos gráficos em *dashboard* dinâmico para auxiliar nas tomadas de decisão.

Na literatura especializada, é amplamente reconhecido que diversos parâmetros de processo desempenham um papel crucial na detecção e previsão do estado da ferramenta de corte em operações de usinagem. Esses parâmetros abrangem alguns dos aspectos, principalmente a vibração mecânica e a corrente elétrica.

Nesse contexto, elaborou-se um esquema de blocos simplificado, ilustrado na Figura 1, que serve como introdução ao sistema desenvolvido para a realização do monitoramento através de sinais de vibração mecânica.

Figura 1 - Diagrama de blocos do circuito

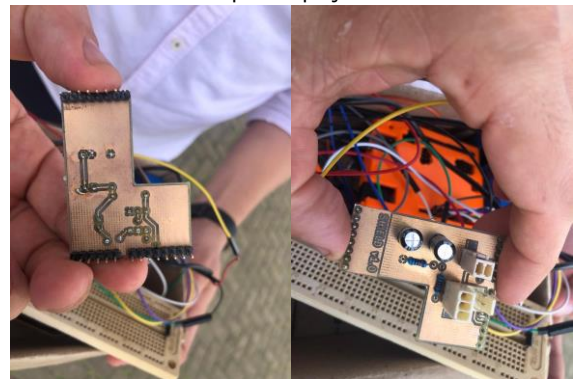


Fonte: Os Autores.

Este esquema destaca os componentes essenciais que compõem o sistema, incluindo o ESP32-S3, um regulador de tensão e acelerômetros, conforme lista apresentada na Tabela 1, além de leds, micro USB e leitor de cartão SD.

Com o projeto desenvolvido, o circuito eletrônico foi prototipado, conforme apresentado na Figura 2.

Figura 2 - Imagens do circuito eletrônico após etapa de prototipação



Fonte: Os Autores.

Tabela 1 – Lista dos principais componentes do circuito.

Componente Principal	Função	Faixa de Operação	Quant.
ESP32-S3	Microcontrolador + WiFi	3.3v	1
AMS1117	Regulador Tensão	± 2v	1
MPU6050	Acelerômetro	± 16g	2

Vale salientar que no desenvolvimento da primeira versão do sistema proposto foi utilizado um Arduino Uno, porém, com este dispositivo, era necessário utilizar um cabo *USB* para realizar a interface com o computador, o que ia de encontro com a proposta do projeto. Logo, optou-se por utilizar um ESP32-S3 devido à possibilidade de comunicação via *Wi-fi* extinguindo a necessidade de utilização de cabo para comunicação.

Assim, foi elaborado o projeto do circuito eletrônico que inclui tanto um esquemático do circuito quanto a placa PCI (Padrão de Componentes Periféricos Interconectados). Este circuito foi projetado para acomodar os componentes essenciais pré-estabelecidos do projeto.

Para fins de instalação do sistema na máquina ferramenta, foi necessário prototipar dispositivos de fixação através de manufatura aditiva, utilizando uma impressora 3D do fabricante Sethi3D, modelo S3, pertencente ao Laboratório Space Maker da Escola Politécnica de Pernambuco – POLI/UPE. A Figura 3 apresenta os dispositivos de fixação produzidos por manufatura aditiva, cujo material utilizado a princípio foi o PLA na cor laranja.

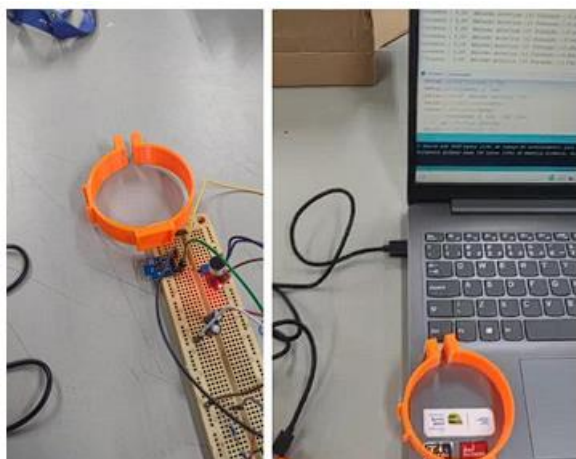
Figura 3 – Dispositivos de fixação produzidos por manufatura aditiva



Fonte: Os Autores.

Com o circuito montado, foi necessário desenvolver um algoritmo utilizando linguagem de programação *Python*. Em seguida, realizou-se testes de bancada para verificar o funcionamento do sistema e realizar os devidos ajustes. A Figura 4 apresenta imagens referentes à etapa de testes de bancada.

Figura 4 – Imagens da etapa de testes de bancada do sistema de supervisão e monitoramento



Fonte: Os Autores.

Após realização de testes, o sistema foi instalado numa *router CNC* pertencente ao Laboratório de Manufatura Avançada do Instituto de Inovação Tecnológica da Universidade de Pernambuco – IIT/UPE. A Figura 5 mostra a primeira versão do sistema proposto instalada na *router CNC*.

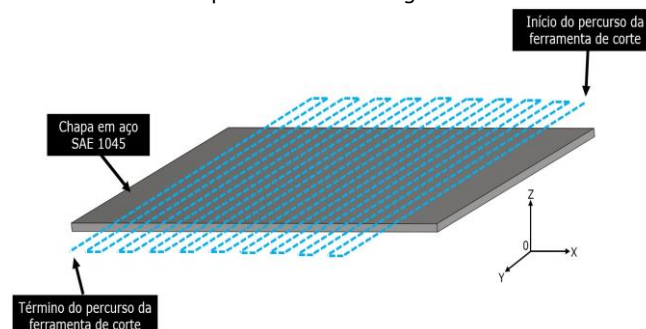
Figura 5 – Primeira versão do sistema de supervisão e monitoramento instalado na *Router CNC*



Fonte: Os Autores.

Com auxílio do *software CAM HSM* do *Inventor* foi possível elaborar o código de programação em linguagem G para realização do processo de usinagem, como parte dos procedimentos experimentais. O percurso da ferramenta de corte foi determinado de acordo com as linhas pontilhadas, conforme mostrado na Figura 6.

Figura 6 – Percurso da ferramenta de corte durante o processo de usinagem



Fonte: Os Autores.

Foi utilizada uma fresa de topo de aço rápido com 4 arestas de corte e o processo de usinagem foi realizado a seco. Os parâmetros de corte utilizados estão apresentados na Tabela 2. As ferramentas também foram avaliadas por microscopia óptica com auxílio de um microscópio óptico da marca Olympus, modelo BX60.

Tabela 2 – Parâmetros de corte.

Parâmetro de corte	Valor
a_p	0,2 mm
f	0,1 mm/rot
n	3000 rpm
V_c	94,25 m/min
Nº de passadas (N_p)	2
L_f	13000 mm

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após todas as etapas de desenvolvimento, testes e ajustes, o sistema foi concebido em sua versão final, o qual é mostrado na Figura 7.

Figura 7 – Versão final do sistema de supervisão e monitoramento instalado na Router CNC



Fonte: Os Autores.

Para a etapa de validação do sistema foi realizada a fixação de uma chapa de aço SAE 1045 na router CNC para posterior usinagem, conforme mostrado na Figura 8. As dimensões da chapa são: 300 mm x 250 mm x 5 mm.

Figura 8 – Fixação da chapa de aço SAE 1045 na Router CNC



Fonte: Os Autores.

Com o sistema instalado, foi possível realizar testes para validação, cujo procedimento se deu através de processos de usinagem por fresamento de topo, de modo a captar dados dos sensores para posterior avaliação dos níveis de desgastes de flanco da ferramenta de corte. Um dos grandes

resultados da pesquisa foi a coleta de dados, processamento e plotagem de gráficos em tempo real, através de um *dashboard* dinâmico com comunicação *Wi-fi*.

A Figura 9 mostra a etapa de usinagem por fresamento de topo da chapa de aço SAE 1045 com plotagem de gráfico em tempo real através de *dashboard* dinâmico.

Figura 9 – Fresamento de topo da chapa de aço SAE 1045 com plotagem de gráfico em tempo real através de dashboard dinâmico



Fonte: Os Autores.

A Figura 10 apresenta um *print* da tela do *dashboard* dinâmico contendo um gráfico com os sinais de vibração dos eixos X, Y e Z, no domínio da aceleração em função do tempo. Neste gráfico o eixo X (vertical) está representado na cor azul, o eixo Y (horizontal) está representado na cor verde e o eixo Z (horizontal) está representado na cor laranja.

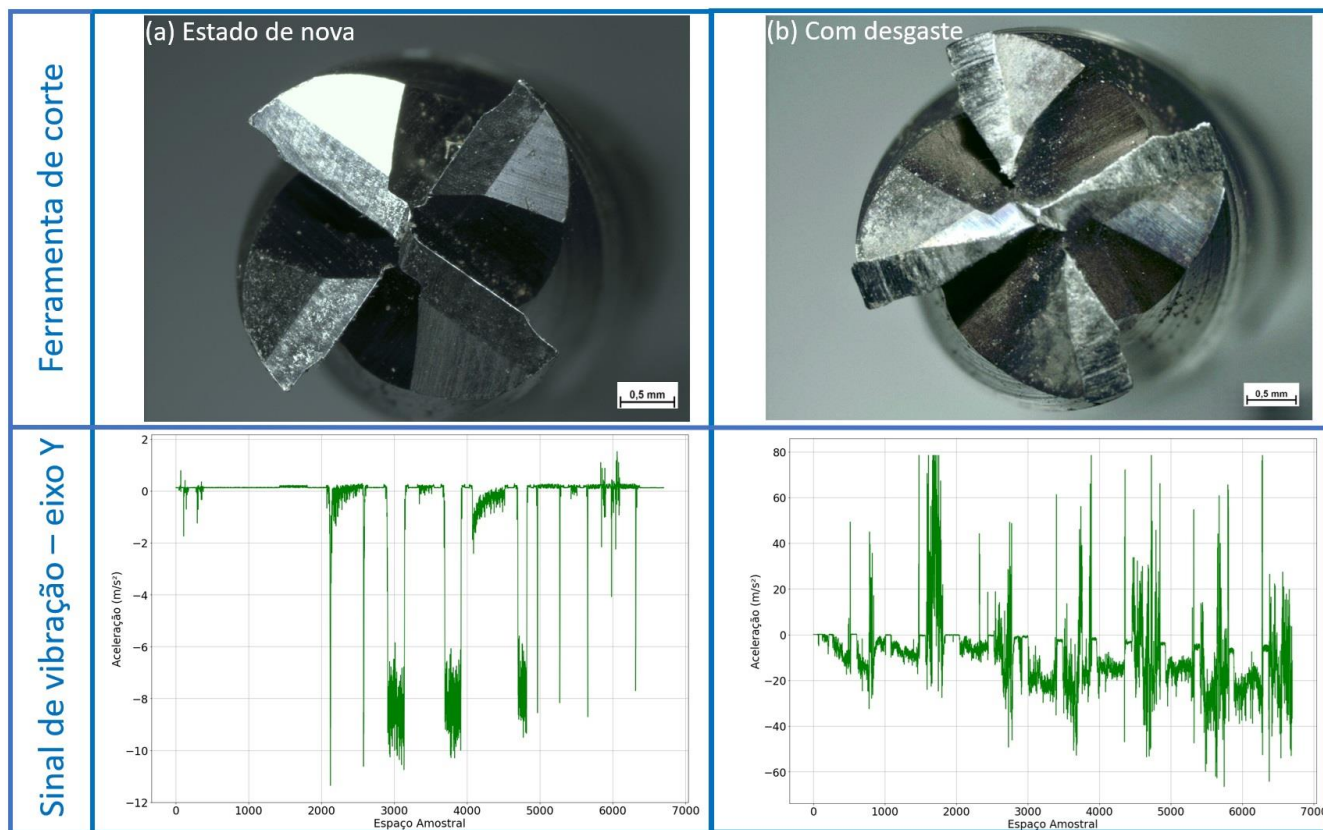
Buscando validar a eficácia do sistema proposto, foram coletados sinais de vibração em duas condições distintas: (a) durante o processo de usinagem com a ferramenta de corte no estado de nova e (b) durante o processo de usinagem com a ferramenta de corte apresentando desgaste elevado. Com isso, a partir dos dados obtidos no *dashboard* dinâmico e utilizando o *Matplotlib*, foram plotados gráficos dos sinais de vibração do eixo Y para cada uma das condições avaliadas (a e b), levando em consideração um espaço amostral de 6701 pontos de dados para cada. A Figura 11 mostra os gráficos dos sinais de vibração do eixo Y captados durante o processo de usinagem com a ferramenta de corte no estado de nova (condição a) e com a ferramenta de corte com desgaste elevado (condição b), além das imagens microscópicas das respectivas condições da ferramenta de corte.

Figura 10 – Print da tela do *dashboard* dinâmico contendo um gráfico com os sinais de vibração dos eixos X, Y e Z, no domínio da aceleração em função do tempo



Fonte: Os Autores.

Figura 11 – Gráficos dos sinais de vibração do eixo Y captados durante o processo de usinagem com a ferramenta de corte no estado de nova (condição a) e com a ferramenta de corte com desgaste elevado (condição b)

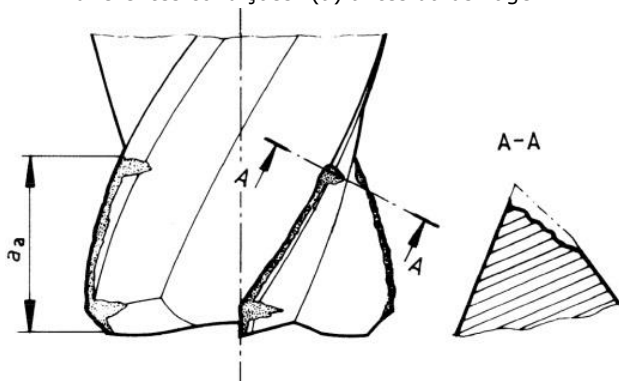


Fonte: Os Autores.

A partir de uma análise dos gráficos apresentados na Figura 11, é possível observar que os maiores valores dos sinais de vibração estão associados à condição que utilizou a ferramenta de corte com desgaste elevado, chegando a 80 m/s^2 , enquanto o maior valor (em módulo) obtido na condição que utilizou a ferramenta de corte no estado de nova foi de aproximadamente $11,5 \text{ m/s}^2$, evidenciando coerência dos dados apresentados pelo sistema proposto, visto que as vibrações mecânicas surgem devido às variações cíclicas nos componentes da máquina e às interações dinâmicas entre a ferramenta de corte e a peça de trabalho e os sinais de vibração mecânica tendem a apresentarem valores (em módulo) maiores a medida em que o desgaste da ferramenta de corte aumenta [15,16]. Para fins de validação foi considerada a análise do eixo Y, porém, é possível observar na Figura 10 que os eixos x e Z também apresentaram sinais de vibração em função do tempo.

A norma ABNT NBR ISO 8688-2:2020 – Ensaio de vida de ferramentas no fresamento – Parte 2: fresa de topo, estabelece as diretrizes para avaliação de desgastes e avarias, bem como os critérios para determinação do fim de vida de fresas de topo [17]. A Figura 12 mostra uma das imagens presentes na ABNT NBR ISO 8688-2:2020 para orientação sobre regiões a serem avaliadas na detecção de desgaste em fresas de topo.

Figura 12 – Microscopia da ferramenta de corte sob diferentes condições: (a) antes da usinagem

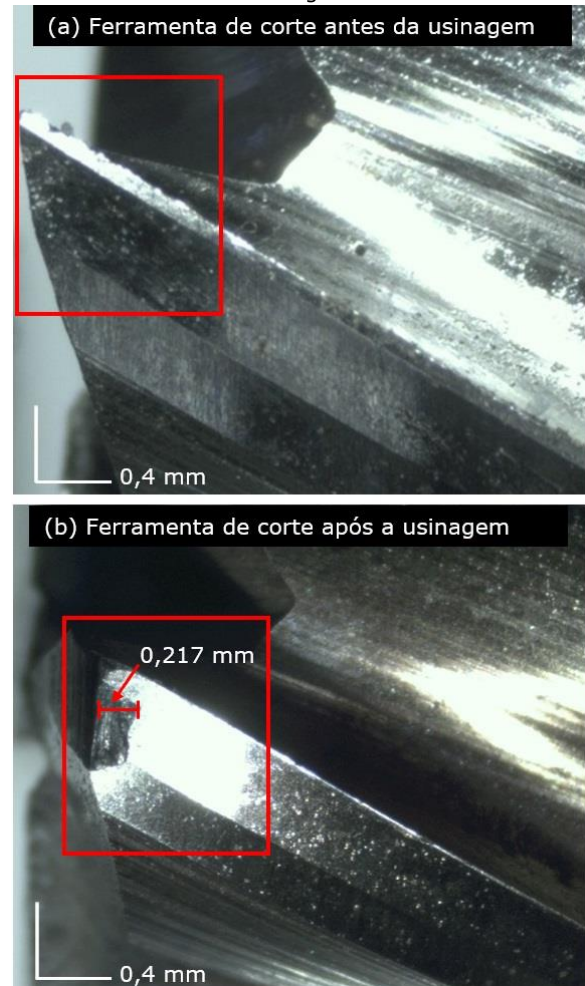


Fonte: [17].

Buscando avaliar o estado da ferramenta de corte após o término do procedimento experimental, foram obtidas imagens microscópicas da ferramenta de corte sob as seguintes condições: (a) antes da usinagem e (b) após a usinagem, conforme apresentado na Figura 13. Tanto o procedimento de captura das imagens quanto a avaliação da morfologia da ferramenta de

corte foram baseadas no que é indicado pela norma ABNT NBR ISO 8688-2:2020.

Figura 13 – Microscopia da ferramenta de corte sob diferentes condições: (a) antes da usinagem e (b) após a usinagem



Fonte: Os Autores.

Através das microscopias apresentadas na Figura 13 pôde-se avaliar a morfologia da ferramenta de corte antes da usinagem (a) e após a usinagem (b). Assim, é possível observar na Figura 13 (b) a presença de desgaste localizado de flanco, medindo aproximadamente $0,217 \text{ mm}$ e que está presente em uma das arestas de corte ativas da ferramenta. Por outro lado, na Figura 13 (a) observa-se que a aresta de corte ativa da ferramenta está íntegra. Provavelmente, os sinais de vibração captados durante a usinagem com a ferramenta de corte “com desgaste”, Figura 11 (a), estão associados ao fenômeno do desgaste [18,19,22]. De acordo com SHAW (2005), o aumento da vibração mecânica à medida que o desgaste da ferramenta aumenta nos processos de

fresamento pode ser atribuído a vários fatores inter-relacionados:

- **Alterações na geometria da ferramenta de corte:** conforme a ferramenta de corte se desgasta, sua geometria pode mudar, resultando em uma distribuição desigual de forças durante o corte. Isso pode levar a vibrações não desejadas devido à mudança na interação entre a ferramenta e a peça de trabalho;
- **Variação nas condições de corte:** o desgaste da ferramenta pode alterar as condições de corte, como a taxa de avanço, a velocidade de corte e a profundidade de corte. Essas mudanças nas condições de corte podem resultar em instabilidade no processo de fresamento e aumento das vibrações;
- **Perda de rigidez e estabilidade:** conforme a ferramenta se desgasta, sua rigidez e estabilidade podem ser comprometidas. Isso pode levar a uma maior tendência de deflexão da ferramenta sob carga, o que por sua vez pode resultar em vibrações indesejadas durante o processo de fresamento;
- **Aumento da temperatura:** o desgaste da ferramenta pode levar a um aumento da temperatura durante o processo de fresamento, especialmente se o atrito entre a ferramenta e o material da peça aumentar devido ao desgaste. A variação da temperatura pode afetar as propriedades mecânicas da ferramenta e do material da peça, contribuindo para vibrações adicionais.
- **Menor eficiência de corte:** à medida que a ferramenta se desgasta, sua capacidade de cortar eficientemente o material pode diminuir. Isso pode resultar em forças de corte desequilibradas e instáveis, levando a um aumento das vibrações.

De acordo com os resultados obtidos, o sistema proposto apresentou informações coerentes com a literatura, o que indica ser uma importante ferramenta para monitoramento remoto de desgastes em ferramentas de corte, contribuindo para as tomadas de decisão em ambientes de chão de fábrica, proporcionando um acompanhamento

em tempo real das condições de usinagem e do desempenho das ferramentas de corte.

4 CONCLUSÃO

Durante as operações de usinagem, o sistema proposto captou dados de vibração e gerou gráficos através de *dashboard* dinâmico, permitindo um acompanhamento em tempo real das condições vibracionais associadas às operações de usinagem, demonstrando-se eficaz para aplicação em condições reais.

Os dados obtidos com a utilização do sistema proposto demonstraram-se coerentes e de acordo com a literatura, onde os sinais de vibração aumentaram a medida em que o desgaste da ferramenta de corte tornou-se mais pronunciado.

Através de microscopia óptica foi possível avaliar as morfologias da ferramenta de corte antes de ser utilizada na operação de usinagem e após ter sido usada na operação de usinagem, sendo possível realizar uma análise comparativa, constatando-se a presença de desgaste localizado de flanco, medindo aproximadamente 0,217 mm, o que evidencia uma das possíveis causas para o aumento dos níveis de vibração.

O sistema apresentado neste estudo, apresenta-se como uma ferramenta de auxílio no controle da eficiência operacional e qualidade de usinagem, podendo ser utilizado na predição de desgastes em ferramentas de corte.

REFERÊNCIAS

- [1] LOTTERMANN, Adriano Antônio. **Elaboração de um plano de manutenção para máquinas de usinagem de laboratório de estudos da FAHOR.** Trabalho de conclusão (Graduação em Engenharia Mecânica) - Faculdade Horizontina, Horizontina, Rio Grande do Sul, 2014.
- [2] FREITAS, Laís Fulgêncio. **Elaboração de um plano de manutenção em uma pequena empresa do setor metal mecânico de Juiz de Fora com base nos conceitos da manutenção preventiva e preditiva.** Trabalho de conclusão (Graduação em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Federal Juiz de Fora, Minas Gerais, 2016.

- [3] GUO, L.; YU, Y.; GAO, H.; FENG, T.; LIU, Y. **Online Remaining Useful Life Prediction of Milling Cutters Based on Multisource Data and Feature Learning**. Em: IEEE 16 Transactions on Industrial Informatics 18.8 (2022), pp. 5199–5208. DOI: 10.1109/TII.2021.3118994.
- [4] MOBLEY, R. K. **An introduction to predictive maintenance**. 2ed. New York, Butterworth-Heinemann, 2002.
- [5] SCHWAB, K. The Fourth Industrial Revolution. **World Economic Forum**. <https://doi.org/10:1944835016>. 2016.
- [6] BARAN, Leandro R. **Manutenção Centrada em Confiabilidade aplicada na redução de falhas: um estudo de caso**. UTFPR – Universidade de Tecnologia Federal do Paraná, 2011.
- [7] ABUTHAKEER, S. S.; MOHANRAM, P. V.; KUMAR, G. M. **Prediction and control of cutting tool vibration in CNC lathe with ANOVA and ANN**. International Journal of Lean Thinking, Volume 2, jun. 2011.
- [8] CHU, W.L.; XIE, M.J.; CHANG, Q.W.; YAU, H.T. **Research on the Recognition of Machining Conditions Based on Sound and Vibration Signals of a CNC Milling Machine**. IEEE Sensors Journal, v. 22, 2022, pp. 6364–6377. DOI: 10.1109/JSEN.2022.3150751.
- [9] ELANGOVAN, M.; SUGUMARAN, V.; RAMACHANDRAN K. I.; RAVIKUMAR, S. **Effect of SVM kernel functions on classification of vibration signals of a single point cutting tool**. Expert Systems with Applications, Louisiana, 2011.
- [10] VICARI, *et al.* **Modeling of the 2001 lava flow at etna volvano by a cellular automata approach**. Environmental Modelling & Software, n. 22, p. 1465-1471, 2007. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/280573253_vicari_et_al_2007.
- [11] FILHO, Gil Branco. **A Organização, o Planejamento e o Controle da Manutenção**. 1. ed. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2008.
- [12] GÉRON, A. **Hands-on Machine Learning with Scikit-Learn and TensorFlow Concepts, Tools, and Techniques to Build Intelligent Systems**. O’Reilly Media, Inc., Sept. 2019.
- [13] GHASEMPOOR, A.; JESWIET, J., MOORE, T.N. **Real time implementation of on-line tool condition monitoring in turning**. International Journal of Machine Tools & Manufacture, Nottingham, 1999.
- [13] MOURA, ALEX ELTON DE. **Controle e automação de Router CNC com dispositivo embarcado paramonitoramento de vibrações mecânicas**. 2021. 147 f. Tese (Doutorado em engenharia mecânica) – Universidade Federal de Pernambuco, Pernambuco, 2021.
- [14] O’DONNELL, G.; YOUNG, P.; KELLY, K.; BYRNE, G. **Toward the improvement of tool condition monitoring system in manufacturing environment**. Journal of Materials Processing and Technology, Illinois, 2001.
- [15] SUSANTO, A.; LIU, C.-H.; YAMADA, K.; HWANG, Y.-R.; TANAKA, R.; SEKIYA, K. **Milling Process Monitoring Based on Vibration Analysis Using Hilbert-Huang Transform**. Int. J. of Automation Technology Vol.12 No.5, 2018. DOI: 10.20965/ijat.2018.p0688.
- [16] ZHOU, C.; JIANG, Z.; SUN, C.; ZHU, Z. **The Monitoring of Milling Tool Tipping by Estimating Holder Exponents of Vibration**. IEEE ACCESS, Special section on advances in machine learning and cognitive computing for industry applications, Vol. 8, 2020, pp. 96661-96668. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2996607.
- [17] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 8688-2:2020 – Ensaio de vida de ferramentas no fresamento – Parte 2: fresa de topo**, 1ª edição, 2020.
- [18] SAGLAM, H.; UNUVAR, A. **Tool condition monitoring in milling based on cutting forces by a neural network**, Int. J. Prod.

Res., vol. 41, no. 7, pp. 1519–1532, 2003,
DOI: 10.1080/0020754031000073017.

- [19] NOURI, M.; FUSSELL, B. K.; ZINITI, B. L.; LINDER, E. **Real-time tool wear monitoring in milling using a cutting condition independent method**, Int. J. Mach. Tools Manuf., vol. 89, pp. 1–13, Feb. 2015. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2014.10.011.
- [20] SHAW, M.C. **Metal Cutting Principles**, Oxford: Oxford University Press, 2005.
- [21] SUSANTO, A.; YAMADA, K.; MANI, K; TANAKA, R.; SEKIYA, K. **Vibration Analysis in Milling of Thin-Walled Workpieces using HilbertHuang Transform**, Proc. 9th Int. Conf. on Leading Edge Manufacturing in the 21st Century, Hiroshima, Japan, 2017. DOI: 10.1299/jsmelem.2017.9.031.
- [22] BUTT, M. A.; YANG, Y.; PEI, X.; LIU, Q. **Five-axis milling vibration attenuation of freeform thin-walled part by eddy current damping**, Precision Engineering, Vol.51, pp. 682-690, 2018.