

ANÁLISE DOS SINAIS DE PRESSÃO SONORA E CORRENTE ELÉTRICA DO EIXO-ÁRVORE PARA MONITORAR DUREZA DE PEÇAS NO FRESAMENTO

Karoline Conceição da Fonseca Santos

Joel Martins Crichigno Filho

Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade do Estado de Santa Catarina, Campus Universitário, Joinville-SC

karoline.conceicao27@gmail.com, joel.crichigno@udesc.br

Resumo: Este trabalho tem como objetivo investigar a sensibilidade dos parâmetros dos sinais de pressão sonora e de corrente elétrica do eixo árvore devido à variação da dureza do material de peças empregando o processo de fresamento. O sistema de aquisição de dados utilizado foi de baixo custo. Um microcontrolador ESP8266 com sensor de efeito hall foi utilizado para monitorar os sinais de corrente do motor do eixo-árvore de um centro de usinagem. Uma placa Raspberry Pi Zero foi empregada com um microfone omnidirecional na aquisição dos sinais de pressão sonora. Os dados foram enviados por wifi e analisados off-line. Os parâmetros analisados no domínio do tempo para o sinal de pressão sonora foram o valor de pico, RMS, fator de Crista, Curtose e coeficiente de assimetria. Já para o sinal da corrente elétrica foi avaliado o valor de RMS. Peças de aço AISI 4340 com 4 valores de dureza diferentes foram usinadas. Como resultado, constatou-se que os parâmetros monitorados foram sensíveis à variação de dureza da peça.

Palavras-chave: Fresamento; Monitoramento; Microcontroladores.

1. INTRODUÇÃO

A propriedade do material de peças tem influência significativa em sua usinabilidade. A variação no tratamento térmico em lotes diferentes de peças pode resultar em variações dos resultados de qualidade da peça usinada, bem como na vida da ferramenta de corte. Isso acontece porque o tratamento térmico influencia na microestrutura e tamanho de grão, determinando a dureza do material. Por isso é importante detectar a variação da propriedade do material entre lotes de peças. Diferentes abordagens foram desenvolvidas no intuito de identificar, durante a usinagem, materiais específicos, classe e subclasse do material bem como o lotes de materiais Lutz et al. (2021), Lutz et al. (2021)b.

No monitoramento são utilizadas medições diretas ou indiretas de sinais ou grandezas geradas durante o processo de usinagem para verificar o estado da ferramenta de corte, da máquina-ferramenta ou da peça usinada, etc. Na medição direta podem-se obter resultados mais precisos, porém interrompe-se o processo várias vezes para realizar as medições. Utiliza-se, por exemplo, microscópio ótico para a medição de desgaste da ferramenta, ou o rugosímetro para a medição da qualidade superficial de peças. Por outro lado, na medição indireta se acompanha o mensurando em tempo real e o processo não é interrompido, Mohanraj (2020). As medições são realizadas por sensores como: de potência, dinamômetros, acelerômetro, de temperatura, de emissão acústica, etc, Souza (2015), Kothuru (2018).

Nos métodos indiretos empregam os recursos extraídos de sinais como, por exemplo, força de corte, corrente do motor e sinais sonoros. Diante disso, Zhou et al. (2018) abordaram em sua pesquisa vantagens e desvantagens de se utilizar um dinamômetro para medir a força de corte. O seu lado positivo é que a medição da força de corte é sensível à condição da ferramenta e pode estimar com maior precisão o estado de desgaste da ferramenta. Em contrapartida, a aplicação de dinamômetros não é viável para ambientes de chão de fábrica, pois influenciam na rigidez do sistema e com isso na precisão da usinagem e o são muito caros, aumentando o custo total de processo Zhou (2020), Koike (2016).

Zhou et al. (2022) afirmam que os sensores de medição de corrente elétrica, são mais prático para serem empregados em ambientes industriais do que os dinamômetros para medir a força de corte. Portanto, estimar a força de corte através da medição da corrente do motor do eixo-árvore poderia ser uma solução mais viável que a utilização de um dinamômetro Liu (2022). Silva et al. (2010) monitorou o desgaste da ferramenta no processo de fresamento medindo os sinais de potência. O mesmo observou que existem dois efeitos possíveis sobre a potência de corte na usinagem. O primeiro efeito estava relacionado com a redução da potência consumida devido ao aumento da temperatura na interface de corte e consequentemente na diminuição da resistência do material, facilitando o processo de corte do material. Por outro lado, o segundo efeito estava relacionado ao aumento da área de contato entre a ferramenta e a peça em decorrência do desgaste da ferramenta. Este aumento da área de contato resulta no aumento da força e da potência de corte, se sobrepondo à diminuição da resistência do material devido à elevação da temperatura na interface de corte. Eles chegaram a conclusão que esse método é viável para o monitoramento do processo, apesar do

aumento potência de corte consumida durante a usinagem devido ao desgaste da ferramenta Silva (2010), Campidelli (2020).

Com relação à dureza da peça usinada, existem alguns trabalhos na literatura relacionando os parâmetros de corte com a microdureza induzida na superfície da peça. Por exemplo, Zurita-Hurtado *et al.* (2017) avaliaram a variação da dureza superficial de aço AISI 1020 com base em parâmetros de corte no torneamento. O estudo mostrou que os parâmetros de corte, profundidade de corte e avanço, tem influência na microdureza da superfície do material. Em outro estudo, Krolczyk *et al.* (2014) relatou que a velocidade de corte e o raio da aresta de corte influenciam na microdureza do material usinado.

Entretanto, poucos estudos foram realizados para detectar a não uniformidade da dureza de peças em lotes diferentes, em um mesmo lote, ou em partes diferentes da peça. Problemas durante o tratamento térmico levam à variação da propriedade mecânica, o que impacta diretamente na variação da vida da ferramenta de corte, nas tolerâncias e qualidade superficial das peças usinadas. Deste modo, essa problemática tem atraído a atenção da indústria, pois deve-se detectar o problema antes que peças defeituosas sejam fabricadas ou se tenha um desgaste acentuado da ferramenta de corte. Nesse sentido, Kothuru *et al.* (2017) propôs a implementação do monitoramento inteligente utilizando três microfones. Eles chegaram à conclusão que os sinais sonoros são eficazes para detectar o desgaste da ferramenta e a variação de dureza da peça. O objetivo desse trabalho é investigar a utilização do sinal de corrente elétrica do eixo-árvore, bem como o sinal sonoro gerado durante o fresamento para monitorar a variação de dureza de peças, utilizando sistemas de baixo custo, como microcontroladores para aquisição de sinais e sensores baratos. Com isso, a questão principal a ser respondida é se os parâmetros a serem extraídos dos sinais monitorados são sensíveis à variação da dureza do material da peça no processo de fresamento de topo.

2. MONITORAMENTO DO PROCESSO

2.1. Através da corrente elétrica

O monitoramento através da medição corrente elétrica do motor do eixo-árvore tem a vantagem de não influenciar diretamente no processo de usinagem, sendo de fácil utilização. Isso é confirmado por artigos apresentados por alguns autores investigando a relação entre a corrente elétrica do motor do eixo-árvore e os resultados de processos. Por exemplo, Liu *et al.* (2022) demonstraram que o aumento do sinal de corrente do motor está relacionado com o desgaste da ferramenta. Silva *et al.* (2021) estudaram a potência no fresamento frontal utilizando um sistema de baixo custo. Eles observaram que o aumento da profundidade de corte e do avanço levou ao aumento da potência, pois maior força de corte é necessário para remover uma maior quantidade de material.

As máquinas-ferramenta modernas apresentam motores de acionamento independentes para os movimentos de corte e avanço, com isso a potência de corte pode ser diretamente medida no motor elétrico do eixo-árvore da máquina. Segundo Alexander (2013) a corrente elétrica I em uma fase do motor trifásico pode ser calculada da seguinte forma:

$$I = \frac{P_m}{V \cdot \sqrt{3} \cdot \cos\theta} \quad (1)$$

onde, V é a tensão, P_m é a potência de acionamento do motor elétrico e $\cos\theta$ é o fator de potência. A Potência de acionamento é calculada considerando a potência de corte P_c é dada pela por $P_m = P_c / \eta$, sendo η o rendimento mecânico. Por sua vez, a relação da potência de corte, força de corte e velocidade de corte é dada por $P_c = F_c \cdot v_c$. No fresamento, a força de corte em é calculada pela equação de Kinzle

$$F_c = K_{c11} \cdot b \cdot h^{1-m_c} \cdot z_c \quad (2)$$

onde K_{c11} é a pressão específica de corte, m_c é expoente da equação de Kinzle, b o comprimento da aresta ativa de corte, z_c número de dentes ativos no corte e h a espessura do cavaco. Substituindo a Eq. (2) na relação de P_c e P_m na Eq. (1) obtém-se a corrente do motor elétrico do eixo-árvore consumida durante o corte, Equação 3.

$$I = \frac{K_{c11} \cdot b \cdot h^{1-m_c} \cdot z_c \cdot v_c}{V \cdot \sqrt{3} \cdot \cos\theta} \quad (3)$$

O aumento relativo da força de corte pode influenciar significativamente na variação da corrente do motor do eixo árvore. Por exemplo, se existirem alterações nas propriedades do material, isso irá impactar no K_{c11} e consequentemente na força de corte, alterando os valores da corrente.

2.1. Monitoramento através da pressão sonora

Os sinais sonoros gerados durante a remoção de material podem dar indicativos do estado do processo ou da ferramenta de corte. Segundo Wegener *et al.* (2021), a emissão de sons ou ruídos das máquinas-ferramentas em funcionamento são causadas pelo sistema de acionamento elétrico, hidráulico, pneumático e pelo processo. Essas fontes sonoras podem ser diretas, quando são causadas por mecanismos fluidodinâmicos, como, por exemplo, pulsação da vazão de fluidos hidráulicos, turbulência, jato de ar, choque de compressão, processos térmicos, etc. Ou indiretos, quando a emissão sonora é resultado da radiação do som transmitido pela estrutura, causadas por vibrações estruturais devido à excitação mecânica, por exemplo, choque mecânico, desbalanceamento, inércia, forças magnéticas, dentre outras.

O engajamento do dente da ferramenta no material da peça é uma fonte sonora, gerando ruído de duas maneiras. Na primeira, o impacto do dente da fresa excita a estrutura do sistema ferramenta/peça/sistema de fixação/máquina-ferramenta fazendo com que este vibre. A vibração do sistema pode provocar uma variação nas propriedades do fluido no contorno da peça produzindo as variações de pressão e densidade que irão provocar a propagação do som. A característica dinâmica do sistema mecânico e a característica da força de corte são fundamentais para o surgimento do ruído no processo de corte. A Figura 1 exemplifica um sinal de força de corte no fresamento, que devido a uma baixa penetração radial, atua como uma força impulsiva, de curta duração, excitando a estrutura em uma ampla faixa de frequência. Deste modo, as frequências excitadas ou seus harmônicos podem coincidir com algumas frequências de ressonância da estrutura, amplificando a vibração da estrutura, e com isso a pressão sonora. A variação de dureza da peça tende a modificar as forças de corte e com isso a amplitude das frequências de excitação, influenciando na pressão sonora, He (2022).

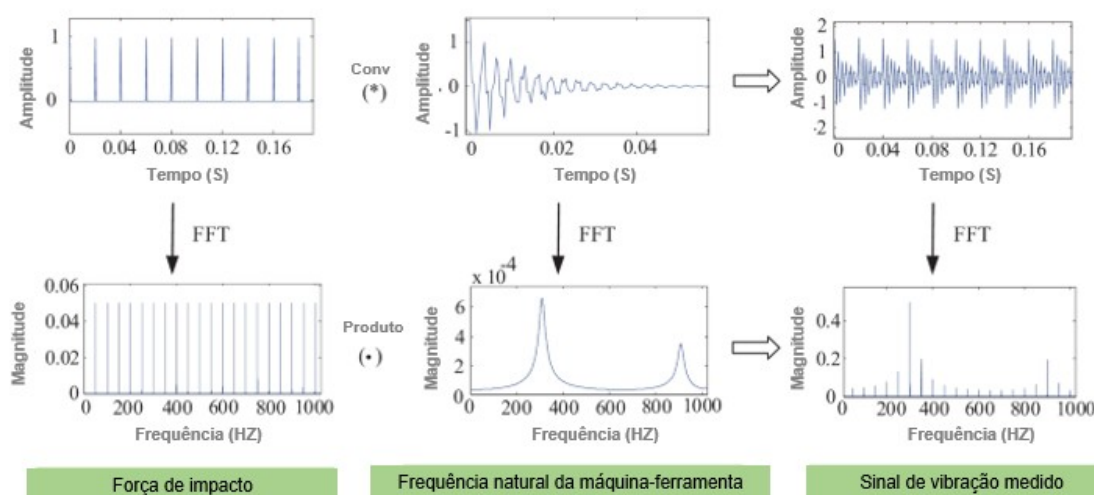


Figura 1. Exemplo do processo de produção de um sinal de vibração simplificado.

A outra fonte sonora é devido à formação do cavaco, por exemplo, o efeito do atrito, adesão e descolamento do cavaco sobre a ferramenta, deformação plástica do material, fratura, colisão do cavaco, bem como possível a mudança de fase. Esses efeitos geram o que são chamados de “emissão acústica”, que são entendidas como ondas elásticas que se propagam na superfície do sistema na faixa de frequência em torno de 20-2000 kHz. Essas ondas podem ser captadas por sensores de emissão acústica instalados diretamente na estrutura do sistema, ou é possível também capturar com microfones algumas faixas de frequência que são propagadas para o ar, Pandiyan (2022).

Fontes de emissão acústica incluem os mecanismos de deformação e fratura, tais como: crescimento de trincas, movimento de discordâncias, maclação, deslocamento de contornos de grão, fratura e decoação de inclusões, que por sua vez, tem relação direta com a propriedade do material da peça.

Portanto, a variação na dureza da peça terá influência tanto na frequência e na amplitude de vibração do som emitido Wegener (2021). Neste contexto, Kothuru *et al.* (2017) e Raja *et al.* (2011), estudaram o monitoramento da condição da ferramenta utilizando as informações adquiridas através do som. Por exemplo, Lu *et al.* (2012), desenvolveram uma técnica para o monitoramento do desgaste da ferramenta com base na análise do sinal sonoro. Eles trabalharam com uma faixa de frequência entre 20 kHz e 80 kHz. A faixa de frequência em torno de 40 KHz foi mais apropriada para detectar o desgaste da ferramenta. Em contrapartida, a frequência abaixo de 20 kHz não apresentou bons resultados.

Por outro lado, Rafezi *et al.* (2012), desenvolveram uma técnica para análise do desgaste da ferramenta e observaram que os componentes de frequência menores que 10 kHz são afetados pelo desgaste da ferramenta. Eles também analisaram a influência do ruído na análise do sinal, chegaram a conclusão que espectro de frequência nas proximidades da máquina- ferramenta tem componentes de frequência menores que 2 kHz.

Além disso, Zhou *et al.* (2020), investigou o monitoramento da condição de desgaste da ferramenta usando som proveniente do processo de fresamento. Chegaram a conclusão que, os recursos extraídos no domínio do tempo e da frequência estão relacionadas com a condição de desgaste da ferramenta e a técnica que ele utilizou é viável para verificar o estado da ferramenta de corte.

3. AQUISIÇÃO DE SINAL

3.1. Microcontroladores

Um microcontrolador pode ser considerado como um pequeno computador num único circuito integrado o qual contém um núcleo de processador, memória e periféricos programáveis de entrada e saída, Santos (2020). A Figura 2 apresenta a estrutura básica de um microcontrolador tais como, processador baseado na arquitetura RISC, memória ROM, sistema de *clock* e uma unidade de controle para entrada e saída, conversor A/D, conversor D/A, etc, Lima (2021).

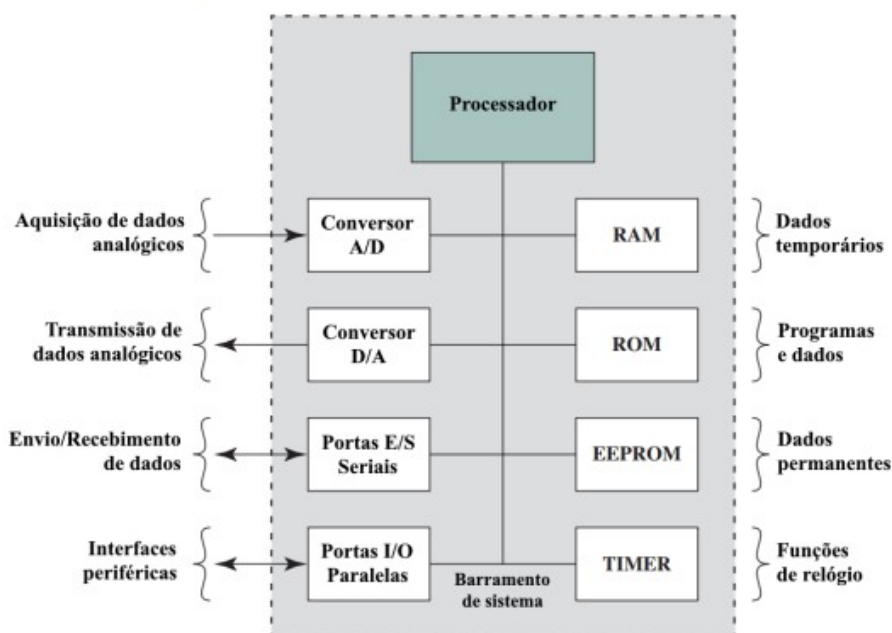


Figura 2. Estrutura comum de um microcontrolador Lima (2021)

Pelo fato de serem de baixo custo, ter conversor A/D, capacidade de processamento e tamanho reduzido fazem com que microcontroladores a exemplo do Arduino, ESP8266, Raspberry Pi se tornem bastante atrativos para serem empregados no monitoramento de processos de usinagem.

O arduino possui menor velocidade de processamento comparado ao Raspberry Pi e ao ESP8266. O Raspberry Pi Zero tem uma alta taxa de processamento, em relação aos outros dois, além de ter a vantagem de armazenamento de dados em cartões de memória. Seus dados podem ser acessado através de wi-fi e a programação recomendada é o Python Lima (2021). Por outro lado, o micro controlador ESP8266, como por exemplo, o módulo NodeMcu ESP-12E com Wi-Fi. tem funcionalidades semelhantes ao Raspberry Pi, mas de custo menor e menor poder de processamento e de armazenamento, Lima (2021). Tanto o arduino como o ESP8266 são programado na linguagem C/C++.

3.1. Processamento dos sinais

A estratégia de processamento do sinal é uma etapa obrigatória antes de selecionar ou extrair parâmetros, pois o alto nível de ruído relacionado ao sinal produzidos devido ao ruído mecânico, elétrico e acústico na indústria pode influenciar nos resultados de classificação Kothuru (2018). Neste contexto, Abellan-Nebot (2010) dividiu o processamento do sinal em 5 etapas. Conforme pode ser observado na Figura 5 essas etapas são:

- **Filtragem analógica:** O processamento do sinal bruto. Por exemplo, o sinal adquirido é filtrado para ser mantido na faixa de resposta frequência do sensor, evitando *aliasing* (distorção do sinal na aquisição).
- **Filtragem digital:** Selecionar a faixa de frequência de interesse. Costa, (2018) aponta que a filtragem digital é uma rotina matemática em hardware ou software que opera sobre um sinal discreto e tem como resultado uma saída discreta. A mesma é requisitada em muitas aplicações quando se deseja filtrar o sinal adquirido para evitar ruídos de alta frequência e oscilações do sinal, provocado por algum evento mecânico transitório, tais como, quebra de uma aresta ou variação da dureza da peça em determinados pontos. A depender da característica do espectro selecionado, o filtro pode ser: passa-baixa, passa-alta, passa-faixa ou rejeita-faixa.
- **Segmentação:** Selecionar o intervalo de sinal de interesse. Por exemplo, pode ser aplicada para extrair informações adquiridas do sinal da força de corte durante a remoção do material.
- **Geração de recursos:** Transforma o sinal digital em recursos. Existem diferentes técnicas para geração de recurso tais como domínio do tempo, da frequência e Wavelet, Kothuru (2018).
- **Seleção e extração de parâmetros:** Esta etapa, está relacionada com a extração dos recursos adquiridos depois do pré-processamento de sinal resultando em um modelo de previsão mais simples e mais confiável. Por exemplo, as técnicas de análise de sinais no domínio do tempo destacam-se, devido à sua aplicabilidade em facilitar a análise do sinal e igualmente útil na análise do desgaste de ferramentas de corte, rugosidade, falhas nos mancais de rolamento, etc.

3.2. Parâmetros extraídos no domínio do tempo

A utilização de parâmetros no domínio do tempo dos sinais monitorados para correlacionar com o estado do processo de usinagem ou da ferramenta tem a vantagem da capacidade de fornecer informações sobre tendências gerais, simplicidade de implementação, com baixo custo computacional, necessitando de pouca memória para calculá-los. Valor médio quadrático RMS (*Root Mean Square*), desvio padrão, valor de pico, fator de crista, média do sinal, desvio padrão, variância, curtose, coeficiente de assimetria (*Skewness*) e curtose são exemplo de parâmetros extraídos dos sinais monitorados no domínio do tempo. Como exemplo de emprego desses parâmetros, pode-se citar os trabalhos de Vitoria (2016), Silva (2010), Almeida (2007) no monitoramento do desgaste da ferramenta de corte na usinagem. A Tabela 1 apresenta alguns parâmetros que foram empregados nesse trabalho.

Tabela 1. Alguns parâmetros estatísticos no domínio empregados nesse trabalho

Parâmetro	Formulação
RMS	$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2}$
Variância	$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}$
Valor de Pico	$P = \frac{1}{2}(\max(x(t)) - \min(x(t)))$
Fator de crista	$FC = \frac{P}{RMS}$
Coeficiente de assimetria	$S = \frac{\sum[(x_i - \bar{x})^3]}{\sigma^3}$
Curtose	$K = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^4}{(N - 1)\sigma^4}$

Onde x_i é a amplitude instantânea do sinal, $\bar{x}$ é a média do sinal temporal, σ é o desvio padrão do sinal e N é o tamanho amostra.

O RMS está relacionado com o nível de energia de um dado sinal, ou de vibrações de um dado sistema. O mesmo pode ser considerado como a medida mais relevante para definir a amplitude de vibração. A variância quantifica a dispersão do sinal em torno de um valor médio. O valor de pico P é o nível máximo registrado no sinal. Trata-se da diferença entre o pico e o vale. Ele é importante quando se tem valores críticos de folgas, ou para indicar o valor máximo de sinais transientes (de curta duração) na ocorrência de choques e impactos, Almeida (2007). O fator de crista é a razão entre o valor de pico e o RMS do sinal. Este parâmetro caracteriza a “impulsividade” existente numa forma de

onda Caesarendra (2017), Almeida (2007). A curtose varia com base na dispersão dos dados e indica o grau de achatamento da função de distribuição de probabilidade do sinal. Valores altos de curtose indicam a presença de grandes picos no sinal de vibração, que têm componentes de alta frequência, Vitoria (2016), Souza (2019), Caesarendra (2017).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Os experimentos foram realizados no Laboratório Dinâmica da Usinagem na UDESC de Joinville em um centro de usinagem vertical Romi D600. A máquina-ferramenta possui rotação máxima do fuso de 10.000 rpm e potência de 15 KW. A Figura 3 apresenta o aparato experimental utilizado no qual é possível ver o conjunto peça/ferramenta, o sistema de aquisição de dados da corrente do motor do eixo-árvore e de pressão sonora.

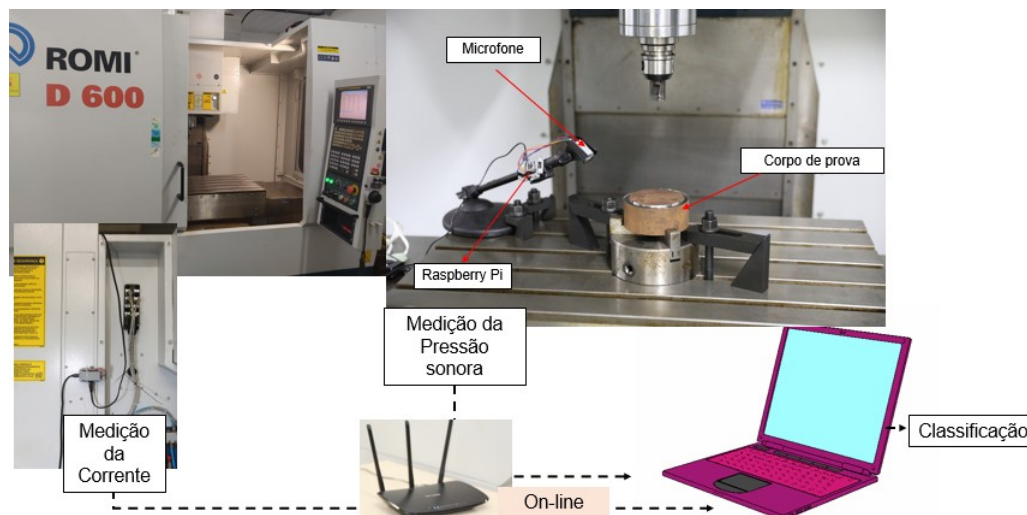


Figura 3. Aparato experimental

Corpos de prova de aço AISI 4340 foram empregados neste trabalho. Este material possui uma excelente combinação de propriedade mecânica quando tratado termicamente, tais como, altas tenacidade, resistência e dureza mecânica. Ele é amplamente utilizado como material de peças como virabrequim automotivo, eixo de transmissão, engrenagens, cubo de hélices, componentes de trem de pouso, entre outros. Os corpos de provas de formato cilíndrico com diâmetro de 114,3 mm foram cortados em comprimentos de 50 mm de altura. A dureza do material, antes do tratamento térmico, variou entre 17 HRC e 20 HRC. Os mesmos foram tratados termicamente na empresa Tecnotempera. O tratamento térmico normalmente empregado para esse tipo de material é a têmpera e o revenimento foi empregado para reduzir a fragilidade.

Para a realização do tratamento por têmpera foi necessário realizar uma austenitização à uma temperatura variando de 850°C - 870 °C. O revenimento foi realizado imediatamente após a têmpera. As durezas obtidas para os corpos de prova foram 32HRC, 36HRC, 42HRC e 45HRC.

Os corpos de prova foram usinados com uma fresa de topo de diâmetro 32 mm modelo R390-032B32-11 do fabricante Sandvik Coromant, com dois inserto de metal duro do fabricante R390-11T308M-PM1010 (Sandvik Coromant), com recobrimento de TiAlN depositado pelo processo PDV (Physical Vapor Deposition). O inserto montado tem ângulo de saída do cavaco de 20° e de posição da aresta de corte de 90°. O comprimento em balanço foi de 64.5mm de comprimento. Esta ferramenta foi escolhida com o intuito de se ter um sistema o mais rígido possível para minimizar a ocorrência de vibração regenerativa.

Os corpos de prova foram usinados na face plana do cilindro, percorrendo uma trajetória circular com raio constante. Os parâmetros de corte utilizados para realizar os ensaios foram, velocidade de corte v_c 200 m/min, avanço f 0,1 mm/dente, profundidade do corte axial a_p 2mm e profundidade radial a_e 10mm. Para o melhor aproveitamento do material dos corpos de prova, decidiu-se usar somente 25% da circunferência da trajetória circular. O sentido de corte foi concordante, iniciando com espessura máxima de cavaco até essa espessura chegar ao seu valor mínimo.

Para a aquisição dos sinais monitorados foram utilizados dois microcontroladores. Decidiu-se utilizar uma placa ESP8266 NodeMCU DEVKIT 1.0. NodeMCU é uma plataforma de internet das coisas, de baixo custo e open-source. Esta placa permite, ainda, que o microcontrolador se conecte a uma rede sem fio. A placa conta com CPU 32-bit RISC Tensilica Xtensa LX106 rodando a 80 MHz, o que é o suficiente para adquirir os sinais de corrente do motor do eixo-árvore, processar e enviar os resultados. A placa conta ainda com armazenamento 4 MBytes. Um sensor de efeito hall

SCT-013-100 da Beijing Yaohuadechang Electronic Co., ligada a placa ESP8266 para a medição da corrente. O sinal foi adquirido no domínio do tempo e utilizando a biblioteca EmonLib (Energy Monitoring Library) o valor de RMS foi calculado em cada ciclo, utilizando a linguagem C no arduino idle. Esse procedimento de medição de corrente utilizando arduino segue de maneira análoga ao experimento apresentado Souza *et al.* (2017). O sinal de corrente adquirido pela placa é processado, sendo calculado o valor de RMS em cada ciclo e enviado em tempo real para o PC via Wifi, utilizando o protocolo de comunicação MQTT (*MQ Telemetry Transport*).

Para a captação do sinal sonoro foi utilizado um microfone omnidirecional modelo INMP441 da InvenSense conectado diretamente a um Raspberry Pi Zero, a frequência de amostragem de 44,1 KHz.

Essa placa foi utilizada porque tem maior capacidade de processamento e pelo fato de ser possível armazenar o sinal adquirido em cartão SD instalado na própria placa. INMP441 é um microfone omnidirecional de alto desempenho que possui interfase de comunicação I2S, que é um padrão de barramento serial utilizado na conexão de dispositivos com áudio digital. O algoritmo desenvolvido por Hrisko, J. (2020), que utiliza a biblioteca Pyaudio, foi adaptado para ser utilizado neste trabalho. Decidiu-se utilizar o sinal digital fornecido pelo microfone em escala digital. Durante o experimento, os dados da pressão sonora são gravados no cartão SD na placa. Após cada experimento esses dados são enviados para o computador via WiFi para tratamento utilizando o software Python.

As condições de corte foram as mesmas para os quatro corpos de prova. A região utilizada para análise, foi a qual a ferramenta se encontrava em regime, ou seja, no período em que se manteve constante, em torno da metade da trajetória. Nesse intervalo, 8 janelas de dados dos sinais de pressão sonora foram escolhidas. Valores de RMS da corrente elétrica correspondentes nesses intervalos também foram considerados. Os parâmetros estatísticos no domínio do tempo para cada região escolhida para o sinal de pressão sonora são calculados e utilizados para análise.

5. RESULTADOS

A seguir são analisados os sinais adquiridos de corrente elétrica do motor do eixo-árvore e da pressão sonora, variando a dureza do material da peça usinada, tendo como base os parâmetros no domínio no tempo de ambos sinais.

5.1. Corrente do motor do eixo-árvore

A Figura 4 apresenta o comportamento da corrente RMS do motor do eixo-árvore em função do tempo. Esse resultado é apresentado para o aço AISI 4340 com a dureza de 32 HRC. A mesma tendência é observada para as outras durezas de material da peça usinada. Esse comportamento é semelhante ao observado por outros autores, caracterizados por um pico de corrente nas regiões de entrada e saída da ferramenta da região de corte e valores de corrente RMS proporcionais à área média da seção transversal dos dentes da fresa que estão engajados Sousa et al. (2017).

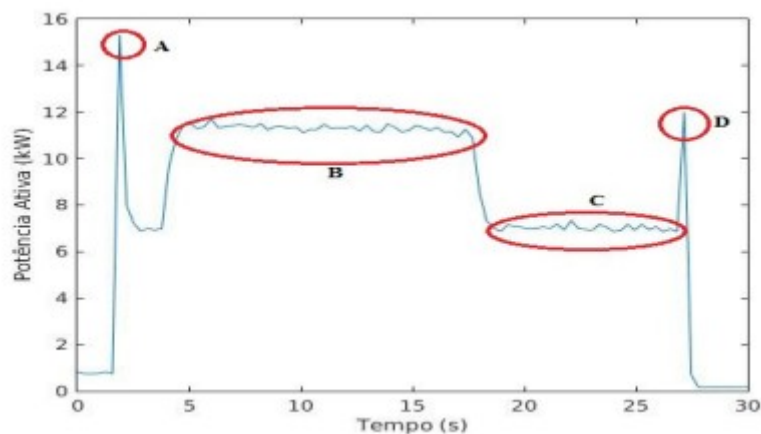


Figura 4. Sinal da potência em função do tempo de usinagem Sousa (2017)

A-entrada da ferramenta, B- regime de corte, C- saída da ferramenta da peça, D- desligamento do motor.

Da Figura é possível ver 4 regiões da curva da corrente:

- Região A: corresponde a entrada da ferramenta no corpo de prova;
- Região B: corpo de prova está sendo usinado;
- Região C: saída do corte e usinagem em vazio;
- Região D: ocorre desligamento do motor.

Os picos de corrente não serão utilizados como parâmetro para o monitoramento da variação da dureza porque sofrem influência do momento da aquisição. Ou seja, não se tem o controle da quantidade de pontos adquiridos antes e depois do pico. Como o cálculo do valor do RMS é integrado ao longo do tempo, este depende do instante inicial, o que pode incorrer em erros. O mesmo procedimento é adotado para o pico de corrente na saída da ferramenta. Com isso, a região de análise dos gráficos para os valores de dureza diferentes é a B da Figura 4.

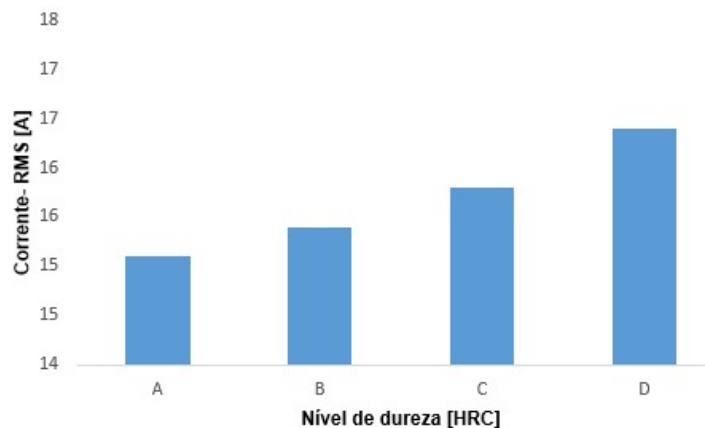


Figura 5. Sinal de corrente RMS do primeiro ponto para diferentes durezas do material da peça A-32HRC, B-36HRC, C-42HRC e D-45HRC.

O valor médio da corrente RMS na região B é então analisado para diferentes durezas como pode ser observado na Figura 5. Como pode ser visto existe uma clara tendência de aumento da corrente do motor do eixo-árvore com o aumento da dureza do material da peça de 32 HRC (corpo de prova A) para 45 HRC (corpo de prova D). Essa variação corresponde ao conceito apresentado na seção 2.1 Equação (3) que relaciona a corrente do motor do eixo-árvore com K_{c11} este, que por sua vez, depende da propriedade do material. Um ponto que deve ser considerado é que a variação da corrente RMS pode não ser sensível o bastante com a variação da dureza ou até mesmo sofrer influência de ruídos elétricos e magnéticos. Por isso, outra grandeza deve ser analisada, como é o caso da pressão sonora, sendo facilmente adquirida e de fácil implementação no espaço da máquina-ferramenta.

5.2. Pressão Sonora

A Figura 6 apresenta um gráfico típico do sinal da pressão sonora em função do tempo. A primeira região é caracterizada pela rotação da ferramenta, sem a remoção de material da peça (corte em vazio). Logo em seguida é observado um aumento rápido do sinal sonoro devido à entrada da ferramenta na região de corte. Em relação ao corpo de prova apresentado na seção Materiais e Métodos, a ferramenta penetra na peça na direção radial, aumentando progressivamente a_e , enquanto a_p é mantido constante.

A terceira região do sinal (região de análise) é obtida quando a ferramenta percorre o caminho do arco de circunferência de raio R, mantendo a_e e a_p constantes. Nesta trajetória, os dados da pressão sonora são analisados. Logo em seguida, a ferramenta sai do corte, se afastando da peça na direção radial (saída da ferramenta).

Os resultados dos parâmetros extraídos no domínio do tempo para diferentes durezas pode ser visto na Figura 7. Analisando a influência da variação da dureza da peça no valor de RMS do sinal sonoro pode ser visto na Figura 7 a), percebe-se que, a medida que a dureza aumenta, aumenta o valor de RMS. Uma vez que o RMS está relacionado com a energia do sinal, pode-se, com isso, concluir que o sistema vibra com mais intensidade a medida que o material da peça se torna mais duro.

Outro fator a observar é que a relação entre o RMS do sinal e a dureza da peça tem uma tendência linear de crescimento. A mesma tendência é observada com a análise da variância do sinal sonoro com o aumento da dureza do material da peça. O aumento da dureza leva ao aumento da variância do sinal, como observado na Figura 7 b). Em relação ao valor de pico, Figura 7 c), nota-se, também, que com aumento da dureza do material da peça, o valor de pico do sinal sonoro aumenta.

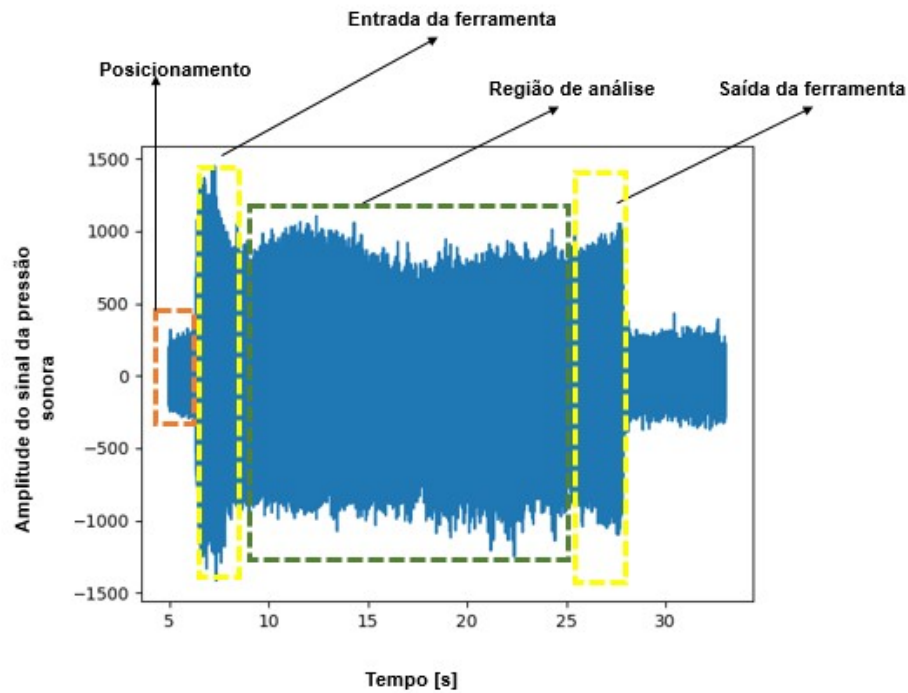


Figura 6. Sinal da pressão sonora no domínio do tempo para a dureza 17 HRC.

O valor de pico, como discutido na seção 3.2, está relacionado com o valor máximo do sinal. Com isso, quanto mais duro for o material da peça, maior será o impacto da ferramenta e deste modo, os picos do sinal. O sinal também apresenta uma tendência linear de aumento do valor do pico com o aumento da dureza do material da peça.

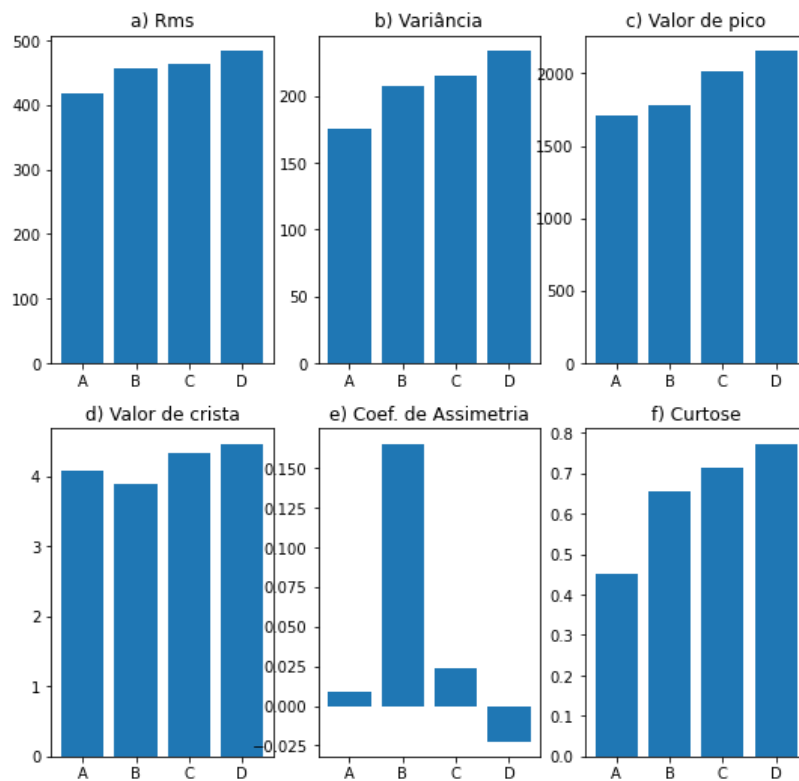


Figura 7. Resultado dos parâmetros extraídos no domínio do tempo para diferentes durezas.

O fator de crista indica quão extremos são os picos em uma onda. Observando os resultados em função da dureza, pode-se observar uma leve tendência de aumento. A exceção da dureza de 36 HRC (nível B), com valor menor do que para a dureza de 32 HRC (nível A), Figura 7 d). Já o coeficiente de assimetria apresenta um comportamento no qual não parece ter uma explicação lógica para a influência da dureza do material no sinal, Figura 7 e). Com relação à curtose do sinal sonoro é observado, de novo, uma tendência de aumento, com o aumento da dureza do material da peça, como é constatado na Figura 7 f).

O coeficiente de correlação foi calculado para os parâmetros extraídos do sinal sonoro, resultando em 0.99, 0.95, 0.80 e 0.94 para o valor de pico, RMS, fator de crista e curtose, respectivamente. Percebe-se que existe uma correlação para cada parâmetro extraídos analisado com a variação da dureza do material. Portanto, foi possível avaliar que quanto maior dureza do material maior a pressão sonora.

6. CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo investigar a sensibilidade de sinais de pressão sonora e corrente elétrica do eixo árvore no fresamento de topo de peças com diferentes durezas, utilizando sensores e placas de aquisição de baixo custo e software open-source. O sinal de corrente foi transmitido para um PC em tempo real, já o de pressão sonora após o término do ensaio, ambos via WiFi. Para o sinal de corrente elétrica do eixo árvores o valor de RMS foi analisado, já para a pressão sonora os valores de pico, RMS, fator de crista, curtose e coeficiente de assimetria foram analisados.

Finalmente, os seguintes pontos podem ser concluídos:

- O sensor de medição de corrente do eixo-árvore se mostrou sensível à variação de dureza das peças
- Os parâmetros extraídos da pressão sonora se mostraram sensíveis à variação de dureza das peças
- O sistema de baixo custo se mostrou eficaz para monitorar a variação de dureza

7. AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001. Estende-se ainda os agradecimentos à FAPESC no atendimento a pesquisa pelo edital PAP/FAPESC Nº 2019TR779.

8. REFERÊNCIAS

- Abellan-Nebot, J.V. e Subiron, F.R., 2010. A review of machining monitoring systems based on artificial intelligence process models. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Springer, v. 47, n. 1, p. 237–257.
- Alexander, C. K., Sadiku, M. , 2013. Fundamentos de circuitos eletricos. [S.l.]: AMGH Editora.
- Almeida, F. R. V., 2007. Análises estatísticas e reconhecimento de padrão aplicados em diagnósticos de defeitos em rolamentos através da análise de vibração. Universidade Federal de Itajubá, Tese de Doutorado.
- Caesarendra, W. e Tjahjowidodo, T., 2017. A review of feature extraction methods in vibration-based condition monitoring and its application for degradation trend estimation of low-speed slew bearing. *Machines*, v. 5, n. 4, p. 21.
- Campidelli, A.F.V. et al. 2020. Desenvolvimento de um sistema de monitoramento de corrente elétrica para o estudo da usinabilidade do aço uns s32760. Universidade Federal de Minas Gerais,
- He, D., Ni, Z., wang, x., 2022. Online grinding chatter detection based on minimum entropy deconvolution and autocorrelation function. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Springer, p. 1–11.
- Koike, r., Ohnishi, k., Aoyama, T.. 2016. A sensorless approach for tool fracture detection in milling by integrating multi-axial servo information. *CIRP Annals*, Elsevier, v. 65, n. 1, p. 385–388.
- Kothuru, A., et al., 2018. Audio-based tool condition monitoring in milling of the workpiece material with the hardness variation using support vector machines and convolutional neural networks. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, American Society of Mechanical Engineers, v. 140, n. 11, 111006 (9 pages) .
- Krolczyk, G., Nieslony, P., Legutko, S., 2014. Microhardness and surface integrity in turning process of duplex stainless steel (dss) for different cutting conditions. *Journal of Materials Engineering and Performance*, Springer, v. 23, n. 3, p. 859–866.
- IvenSense INMP441 11 Sep 2022 <<https://www.invensense.com/products/digital/inmp441/>>
- Hrisko, J. (2020). Recording Stereo Audio on a Raspberry Pi. *Maker Portal*. <<https://makersportal.com/blog/recording-stereo-audio-on-a-raspberry-pi>>
- Liu, Y.-P., Kilic, Z.M., Altintas, Y., 2022. Monitoring of in-process force coefficients and tool wear. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, Elsevier, v. 38, p. 105–119.

- Lutz, B., Howell, P., Regulin, D., Engelmann, B., & Franke, J. 2021. Towards Material-Batch-Aware Tool Condition Monitoring. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 5(4), 103.
- Lutz, Benjamin et al. Material Identification for Smart Manufacturing Systems: A Review. In: 2021 4th IEEE International Conference on Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS). IEEE, 2021. p. 353-360.
- Mohanraj, T. et al. 2020. Tool condition monitoring techniques in milling process—a review. *Journal of Materials Research and Technology*, Elsevier, v. 9, n. 1, p. 1032–1042.
- Pandiyar, V. et al. 2022. Identification of abnormal tribological regimes using a microphone and semi-supervised machine-learning algorithm. *Friction*, Springer, v. 10, n. 4, p. 583–596.
- Raja, E. et al. 2011. Tool flank wear condition monitoring during turning process by svd analysis on emitted sound signal. *European Journal of scientific research*, v. 49, n. 4, p. 503–509.
- Souza, J. A. 2015. Apostila: ENG03082 – Monitoramento De Processos De Usinagem. [S.l.]: Porto Alegre,
- Souza, J. S., 2019. Análise de atributos de classificação para o diagnostico de falhas em rolamentos baseado em svm. Universidade Federal do Para.
- Silva, R.G. et al. 2021. Aquisicao da potência ativa no fresamento frontal utilizando um sistema de baixo custo. *Brazilian Journal of Development*, v. 7, n. 5, p. 51597–51610.
- Silva, R.H.L. et al. 2010. Monitoramento do desgaste de ferramentas no fresamento de topo através dos sinais de potencia e emissao acustica e redes neurais. Universidade Federal de Uberlândia.
- Suchmann, P., Martinek, P. (2014) Influence of Small Deviations in Steel Chemical Composition on Hardenability. In: *Proceedings of materials science and technology 2014*. Vol 1, pp 493-499.
- Vitoria, B.C.R., 2016. Analise do sinal de vibracao no fresamento do aco AISI 4340 com ferramentas desgastadas. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Dissertação de Mestrado.
- Zhou, Y., Xue, W., 2018. Review of tool condition monitoring methods in milling processes. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Springer, v. 96, n. 5, p. 2509–2523.
- Zurita-hurtado, O.J., Graci-tiralongo, veronica carmen di; capaceaguirre, maria cristina. 2017. Surface hardness prediction based on cutting parameters in turning of annealed AISI 1020 steel. *Dyna*, 2006, Revista DYNA, v. 84, n. 203, p. 31–36.
- Wegener, K. et al. 2021. Noise and vibrations in machine tools. *CIRP Annals*, Elsevier, v. 70, n. 2, p. 611–633.

5. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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

ANALYSIS OF SOUND PRESSURE AND ELECTRIC CURRENT SIGNALS OF THE SPINDLE MOTOR TO MONITOR HARDNESS OF PARTS IN MILLING

Karoline Conceição da Fonseca Santos

Joel Martins Crichigno Filho

Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade do Estado de Santa Catarina, Campus Universitário, Joinville-SC

karoline.conceicao27@gmail.com, joel.crichigno@udesc.br

Abstract. *This work aims to investigate the sensitivity of parameters of the sound pressure and electrical current signals of the spindle due to the hardness variation of parts during the milling process. A low cost data acquisition system was used. An ESP8266 microcontroller was used with a hall effect sensor to monitor the current signals from the spindle motor of a machining center. A Raspberry Pi Zero board with an omnidirectional microphone acquired the sound pressure signals. Data were sent via wifi and analyzed offline. The parameters analyzed in the time domain for the sound pressure signal were the peak value, RMS, crest factor, kurtosis and asymmetry coefficient. Only the RMS value was evaluated for the electrical current signal of the spindle motor. AISI 4340 steel workpieces with 4 different hardness values were machined. As a result, it was found that the monitored parameters were sensitive to the hardness variation of the workpiece.*

Keywords: *Milling; Monitoring; Microcontroller.*

RESPONSIBILITY NOTICE

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