**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS**

Arthur Rosa Raposo

**Medição de esforços dinâmicos em eixo-árvore via
sensores sem fio**

São Carlos

2018

Arthur Rosa Raposo

**Medição de esforços dinâmicos em eixo-árvore via
sensores sem fio**

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Mestre em Ciências - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Dinâmica das Máquinas e Sistemas

Orientador: Prof. Dr. Leopoldo P.R. de Oliveira

ESTE EXEMPLAR TRATA-SE DA
VERSÃO CORRIGIDA.
A VERSÃO ORIGINAL ENCONTRA-SE
DISPONÍVEL JUNTO AO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
MECÂNICA DA EESC-USP.

São Carlos
2018

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da
EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

R219m Raposo, Arthur Rosa
 Medição de esforços dinâmicos em eixo-árvore via
 sensores sem fio / Arthur Rosa Raposo; orientador
 Leopoldo Pisanelli Rodrigues de Oliveira. São Carlos,
 2018.

 Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação
 em Engenharia Mecânica e Área de Concentração em
 Dinâmica das Máquinas e Sistemas -- Escola de
 Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo,
 2018.

 1. Usinagem. 2. Sensoriamento. 3. Indústria 4.0. 4.
 Extensômetro. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **ARTHUR ROSA RAPOSO**.

Título da dissertação: "Medição de esforços dinâmicos em eixo-árvore via sensores sem fio".

Data da defesa: 14/08/2018.

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. **Leopoldo Pisanelli Rodrigues de Oliveira**
(Orientador)
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Prof. Dr. **Gustavo Franco Barbosa**
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

Prof. Dr. **Raphael Galdino dos Santos**
(INSPEP)

Resultado:

APROVADO

Aprovado

APROVADO

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica:
Prof. Associado **Gherhardt Ribatski**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado **Luís Fernando Costa Alberto**

AGRADECIMENTOS

Essa dissertação não poderia ter sido concluída sem o suporte e auxílio de outras partes. Gostaria de agradecer o Professor Doutor Leopoldo de Oliveira e o Professor Doutor Reginaldo Teixeira Coelho pela paciência e cuidado que apresentaram, além do conhecimento teórico e prático necessários para a conclusão deste trabalho. Também agradeço ao apoio das Indústrias Romi S.A. e da FIPAI - Fundação para o Incremento da Pesquisa e do Aperfeiçoamento Industrial - pela bolsa concedida. Além disso, os protótipos e testes realizados não poderiam ter ocorrido sem a capacidade prática dos técnicos do laboratório da dinâmica da EESC-USP e LAPRAS. Finalmente, sou grato pela motivação e ajuda dados pela minha família e amigos.

RESUMO

RAPOSO, A. **Medição de esforços dinâmicos em eixo-árvore via sensores sem fio.** 2018. 67p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

Propostas de melhorias em processos de usinagem buscam não somente a redução do tempo de ociosidade da máquina como também a melhoria da qualidade das peças fabricadas e do tempo de vida da ferramenta e da máquina em si. Falhas durante um processo de usinagem podem levar a atrasos que seguem até o fim do processo produtivo, refugo ou perda da peça usinada, fazendo com que todo o processo precise ser refeito. Além disso, técnicas de monitoramento sem fio de máquinas de usinagem, que consistem principalmente de um eixo em rotação, podem ser aplicadas em diversas áreas, dado que muitas outras tecnologias são semelhantes e se beneficiariam de monitoramento direto e em tempo real. Propõe-se o monitoramento de certas características de uma máquina ferramenta, como força de corte e vibração do eixo-árvore a partir da implementação de um sistema de aquisição de dados que devem ser transmitidos a um computador responsável pela leitura e processamento dos sinais. Essas medições podem ser feitas em posições estacionárias, como nos mancais, ou diretamente no eixo-árvore de uma máquina ferramenta, uma opção pouco explorada por envolver o sensoriamento de um componente em constante rotação. Para isso, a utilização de um sistema de transmissão de dados baseado em sinais de luz pode ser uma solução inovadora para a dificuldade intrínseca desta tarefa. Ainda, no contexto de uma máquina ferramenta com sensores em operação de forma sem fio, oferecem-se os subsídios básicos para a implementação dos conceitos de Indústria 4.0.

Palavras-chave: Usinagem. Sensoriamento. Indústria 4.0. Extensômetro.

ABSTRACT

RAPOSO, A. **Spindle load estimation via wireless sensing**. 2018. 67p.
Dissertação (Mestrado) - School of Engineering of São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, 2018.

Possible enhancements of the machining process strive not only for the reduction of machine downtime but also for the increased quality of the finished products and lifespan of both the machine and its tool. Failures during a machining process can lead to delays that endure until the end of the production but also damaged machinery or the destruction of the workpiece, forcing the entire machining process to be restarted. Wireless monitoring techniques aimed at machine tools can also be repurposed for other types of equipment, as many machines consist of a main rotating part and would benefit from real-time monitoring. This document proposes the monitoring of certain characteristics of a machine tool by implementing a data acquisition system that will output the measurements to a computer responsible for their analysis. These measurements can be done from a stationary position such as atop of a bearing, or directly in the spindle of the machine tool, a rarely explored option due to the technical difficulties of installing sensors in an axis that is constantly rotating. With this goal in mind, a data transmission system based on light signals can be an innovative solution for the current difficulties involved in this task. The creation of a wireless data transfer system capable of working during the operation of a machine tool equipped with sensors allows for the implementation of the concepts of Industry 4.0.

Keywords: Machining. Sensing. Industry 4.0. Strain gauges.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Pitágoras conduzindo experimentos com cordas tracionadas.	19
Figura 2 – Diagrama explicando o funcionamento de uma fibra com <i>Bragg Grating</i>	23
Figura 3 – Sinal de um sensor de vibração ao longo da vida de uma peça.	24
Figura 4 – Espectro de velocidades medidas no mancal da fresadora após 12 (a) e 18 (b) meses de operação.	25
Figura 5 – Representação da deformação de uma barra utilizando realidade aumentada.	29
Figura 6 – Extensômetro em formato V, ou extensômetro espinha de peixe.	32
Figura 7 – Diagrama do posicionamento dos sensores no eixo (a) e do circuito elétrico resultante (b).	33
Figura 8 – Circuito do sistema de aquisição de dados.	34
Figura 9 – Ilustração de um <i>slip ring</i> com destaque às escovas (a) e de um sistema de transmissão de energia sem fio utilizando uma bobina (b).	35
Figura 10 – Circuito do sistema de transmissão de dados.	36
Figura 11 – Valores experimentais obtidos por dinamômetro durante a usinagem de um eixo de aço.	38
Figura 12 – Análise de diferentes diâmetros internos e externos e a tensão de saída de uma ponte de extensômetros.	39
Figura 13 – Modelo em CAD do eixo de testes.	40
Figura 14 – Desenho técnico do eixo com dimensões de maior importância e apoios.	40
Figura 15 – Análise de elementos finitos realizado no modelo em CAD do eixo.	41
Figura 16 – Desenho técnico do eixo mostrando a barra de alumínio.	42
Figura 17 – Representação do eixo mostrando o posicionamento dos acelerômetros (destacados em vermelho) durante o ensaio estacionário de torção.	42
Figura 18 – Foto mostrando o posicionamento dos acelerômetros sobre o apoio do eixo-árvore (a) e no porta-ferramenta (b).	43
Figura 19 – Barra de testes para a aquisição de dados de um extensômetro.	45
Figura 20 – Medição experimental de uma barra em vibração livre.	46
Figura 21 – Ilustração em CAD da montagem do eixo de testes para a sua calibração.	47
Figura 22 – Resultados da calibração dos extensômetros do eixo de testes.	48
Figura 23 – Protótipo de transmissão de dados.	49
Figura 24 – Esquema do eixo de testes destacando a posição dos acelerômetros e a sua nomenclatura.	50
Figura 25 – Função de resposta em frequência dos pontos L2, B2 e P1.	50
Figura 26 – Gráfico de densidade espectral de potência dos extensômetros.	51
Figura 27 – Visualização dos modos de vibrar do eixo de testes em 90Hz (Plano XZ).	52

Figura 28 – Visualização dos modos de vibrar do eixo de testes em 90Hz (Plano XY).	52
Figura 29 – Visualização dos modos de vibrar do eixo de testes em 90Hz (Vista isométrica).	53
Figura 30 – Visualização dos modos de vibrar do eixo de testes em 186,6Hz (Plano XZ).	53
Figura 31 – Visualização dos modos de vibrar do eixo de testes em 186,6Hz (Plano XY).	54
Figura 32 – Visualização dos modos de vibrar do eixo de testes em 186,6Hz (Vista isométrica).	54
Figura 33 – Comparação entre os resultados dos extensômetros (a) e dinamômetro (b) durante a usinagem do <i>blank</i> .	55
Figura 34 – Resultados do ensaio de usinagem após aplicação de filtro passa-baixa: Extensômetro (a) Dinamômetro (b) Comparação entre Extensômetro após ajuste para Newton e Dinamômetro (c).	56
Figura 35 – Resultados da calibração para 3 passes da ferramenta: Ensaio mostrado na Fig. 34 #1 (a) Medição normal #2 (b) Medição com <i>chatter</i> (c).	57
Figura 36 – Comparação entre ensaios de usinagem com e sem <i>chatter</i> , dados obtidos pelos extensômetros do eixo de testes.	58
Figura 37 – Comparação entre ensaios de usinagem com e sem <i>chatter</i> , dados obtidos pelos extensômetros do eixo de testes e convertidos para força de corte.	59
Figura 38 – Comparação entre ensaios de usinagem com e sem <i>chatter</i> , dados obtidos pelos extensômetros do eixo de testes e mostrados no domínio da frequência.	59

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Objetivos	17
1.2	Estrutura do documento	18
2	REVISÃO LITERÁRIA	19
2.1	Vibração	19
2.2	Transmissão de dados	21
2.3	Tipos de Manutenção	23
2.4	Internet das Coisas	25
2.5	Indústria 4.0	26
2.6	<i>Virtual sensing</i>	28
3	MATERIAIS E MÉTODOS	31
3.1	Leitura de tensão;deformação via extensômetros	31
3.2	Transmissão de energia	35
3.3	Transmissão de dados sem fio	36
3.4	Eixo de testes	37
3.4.1	Projeto da Seção Circular com os Sensores	37
3.4.2	Descrição das Seções Circulares do Eixo	39
3.4.3	Análise de Elementos Finitos do Eixo	40
3.5	Ensaio estacionário de torção	41
3.6	Ensaio durante processo real de usinagem	43
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
4.1	Leitura experimental de tensão;deformação via extensômetros	45
4.2	Calibração dos extensômetros no eixo de testes	46
4.3	Transmissão de dados sem fio	47
4.3.1	Ensaio de transmissão no eixo protótipo	48
4.3.2	Ensaio de transmissão no eixo final	49
4.4	Ensaio estacionário de torção	49
4.5	Ensaio durante processo real de usinagem	55
5	CONCLUSÃO	61
5.1	Trabalhos Futuros	62
	REFERÊNCIAS	63

1 INTRODUÇÃO

A automação de uma máquina ferramenta depende da qualidade do seu sensoria-mento. Para que a usinagem seja bem sucedida, atingindo a qualidade final esperada para a peça, é necessário que vários tipos diferentes de sensores funcionem em conjunto para realizar o monitoramento das diversas variáveis do processo. O tópico da automação de máquinas ferramentas, tal qual o monitoramento do processo de usinagem, tem crescido em importância devido ao advento da Indústria 4.0, uma tendência que vem impulsionado inovação em diversas áreas da indústria ([GROUP, 2013](#)). Em um projeto funcional, baseado na Indústria 4.0, os diferentes componentes da linha de produção, sejam esses máquinas ferramentas, robôs para alimentação de máquinas, montagem do produto ou até sistemas de embalagem, precisam ser capazes de comunicarem o seu estado atual para permitir que essa fábrica inteligente possa decidir como prosseguir sua operação. Dessa forma, é importante que todos os sistemas possuam sensores e sejam automatizados, um pré-requisito para que eles possam se comunicar e atuar de forma eficiente e, até certo ponto, autônoma.

Outro fator de interesse na melhoria da eficiência do setor industrial é a redução do tempo de ociosidade dos diversos elementos que compõem a cadeia produtiva. Uma das causas de ociosidade é a necessidade da manutenção das diversas máquinas presentes, seja ela feita em intervalos pré-determinados de uso, preventivamente, ou apenas no caso de uma falha no equipamento, de forma corretiva. Outra abordagem para a manutenção pode ser feita através do auxílio de sensores instalados no equipamento, que monitoram componentes que são mais prováveis de sofrerem falhas, como, por exemplo, os rolamentos em uma máquina rotativa ([LAD; KULKARNI, 2012](#)). A presença desses sensores possibilita a determinação preditiva de quando o componente está prestes a falhar, permitindo que a quantidade de manutenções seja reduzida, mas, ao mesmo tempo, impedindo que falhas desastrosas ocorram. Essa manutenção preditiva é feita apenas quando ela é necessária, antes que a falha crítica ocorra e possivelmente depois do período de manutenção preventiva estipulado.

A produção de máquinas ferramentas é um mercado em crescimento que gera mais de 60 bilhões de euros anualmente ([STATISTA, 2015](#)) e o uso dessas máquinas constitui uma indústria ainda maior, gerando 413 bilhões de dólares somente nos EUA em 2011 ([SELECTUSA, 2017](#)). Dessa forma, a busca pela otimização do processo produtivo é muito importante, visando reduzir o tempo de ociosidade das máquinas e ao mesmo tempo aumentar a qualidade das peças usinadas e o tempo de vida da ferramenta e da máquina em si. Um atributo do processo que pode ser medido, na tentativa de monitorar o processo e alguns subsistemas da máquina, é a vibração do sistema durante a usinagem,

podendo ser feito em posições estáticas, como nos mancais, ou rotativas, como no próprio eixo-árvore (GOYAL; PABLA, 2015). Embora a vibração excessiva durante um processo de usinagem seja indesejável, o seu monitoramento pode ser usado para determinar, por exemplo, quando os rolamentos do eixo-árvore estão prestes a falhar, permitindo a sua troca antes que acarretem danos mais severos à máquina ou mesmo à peça sendo usinada. Para isso, pode-se analisar a relação entre os valores de pico e *Root Mean Square* da vibração, obtendo o fator de crista do sinal, que, ao passar de um certo valor limite, indica que uma falha está para ocorrer (IGBA et al., 2016).

Para realizar o monitoramento de um torno, por exemplo, geralmente são utilizados sensores montados em posições não rotativas, como no apoio dos mancais, ou no porta-ferramentas (SHAKYA; DARPE; KULKARNI, 2013; LAURO et al., 2014; DIMLA; LISTER, 2000; KHARCHE, 2014). Instrumentar todo o magazine de um torno, além de uma tarefa dispendiosa, pode ser inviável, uma vez que a instrumentação deve permitir a troca de ferramentas e a conexão dos sensores de forma também automática. Por outro lado, um sensor em uma posição fixa, como o apoio dos mancais, não permite determinar com precisão grandezas como torque efetivo e a força de corte. Uma alternativa a esses dois métodos é a instalação de um conjunto de sensores diretamente no eixo-árvore, juntamente com a implementação de um sistema de comunicação sem fio capaz de conectá-lo ao meio externo. Essa abordagem permitiria que a força de corte fosse determinada, e.g., utilizando-se extensômetros, sem exigir mudanças após a sua instalação, como seria o caso de um dinamômetro no porta-ferramentas.

Esse sistema, que apresenta sensores para o monitoramento de um eixo rotativo, com transmissão sem fio desses dados em tempo real, pode ser utilizado em uma série de aplicações que apresentam componentes em rotação. Além da implementação desse sistema em um eixo-árvore de um torno, que é o principal foco desse projeto, alguns exemplos de aplicações que poderiam se beneficiar com o uso desse sistema de aquisição e transmissão de dados sem fio são, hélices e asas rotativas, pás de turbinas eólicas, componentes automotivos (eixos, semi-eixos, virabrequins, rodas, etc.), nos quais a rotação dos componentes impede o uso de cabos convencionais para a transmissão de dados. O monitoramento desses componentes permite a maior segurança no uso desses equipamentos, uma vez que habilitam a avaliação contínua de sua integridade estrutural enquanto reduzem a quantidade de manutenções desnecessárias.

Outra aplicação para um sistema de sensores que enviam seus dados de forma sem fio é no Monitoramento de Integridade Estrutural (SHM na sigla em inglês para *Structural health monitoring*). Convencionalmente, SHM é feito usando-se acelerômetros conectados a um computador por meio de cabos com a intenção de medir vibrações em uma estrutura e conseguir detectar defeitos que possam levar a falha do sistema. Entretanto, essa técnica possui alto custo e pode afetar o funcionamento normal da estrutura devido aos cabos

que são necessários para conectar todos os sensores a uma central de processamento (KIM et al., 2006). Em aplicações de engenharia civil e outras grandes estruturas, um sistema SHM geralmente requer uma instalação que envolve vários andares, tornando a instalação convencional muito cara e trabalhosa. Uma solução é o uso de uma rede de sensores sem fio, já que eles teriam apenas que serem instalados no local correto e seriam capazes de mandar informações para o computador que irá processar os dados (PAEK et al., 2004; SEVERINO et al., 2010).

Este projeto foi realizado com a intenção de desenvolver um sistema de aquisição de dados no qual o sensor é posicionado diretamente no eixo-árvore de uma máquina ferramenta. Utilizando um sistema de transmissão de dados sem fio, os dados obtidos por este sensor em tempo real podem ser usados para a determinação de possíveis falhas nos rolamentos, ocorrência de *chatter* e parâmetros de corte.

Esse capítulo introdutório apresenta uma descrição do trabalho desenvolvido, os seus objetivos em 1.1 e a estrutura geral desta dissertação em 1.2.

1.1 Objetivos

O objetivo principal desse projeto é o desenvolvimento de um sistema de medição de vibração, que possa ser utilizado no contexto de detecção de falhas em máquinas, detecção de *chatter* ou monitoramento de parâmetros de usinagem, como a força de corte. Este sistema deve ser permitir a montagem de sensores em partes rotativas de uma máquina ferramenta, e funcionar durante a usinagem, realizando a transmissão de dados sem fio. Para isso, é preciso atingir os seguintes objetivos específicos:

- Desenvolver um sistema de transmissão de dados sem fio que funcionaria em um eixo durante altas rotações.
- Escolher um tipo de sensor capaz de obter as medidas de vibração do eixo.
- Desenvolver um sistema compacto de aquisição de dados do sensor que possa ser montado no eixo e seja compatível com o sistema de transmissão de dados sem fio.
- Testar um protótipo do sistema e avaliá-lo quanto as condições de usinagem.
- Avaliar as medições obtidas e, com um modelo do eixo, obter os parâmetros de usinagem através de *virtual sensing*.
- Comparar as medições obtidas pelo sistema com medições realizadas em posições estáticas.

1.2 Estrutura Geral

Este documento está organizado de forma a apresentar as seguintes seções:

- [Revisão Literária](#), que discute os trabalhos encontrados na literatura que foram utilizados como base no desenvolvimento desse projeto.
- [Materiais e Métodos](#) que apresenta como foram feitos os sistemas utilizados no projeto até então.
- [Resultados e Discussão](#) onde os resultados dos testes já concluídos podem ser encontrados.
- [Conclusão](#), examina o progresso desse projeto e os seus resultados significativos.

2 REVISÃO LITERÁRIA

Nesse capítulo se encontram as referências que motivaram e possibilitaram esse trabalho. Na seção 2.1, descrevem-se brevemente artigos relacionados a vibração, focados em aplicações de máquinas ferramentas e *chatter*; em 2.2, é feito um estudo sobre métodos de transferência de dados que poderiam ser implementados no projeto; a seção 2.3 analisa os tipos de manutenção e as suas vantagens; a seção 2.4 introduz o conceito de Internet das Coisas; a seção 2.5 trata dos recentes avanços sobre Indústria 4.0 e, finalmente, 2.6 apresenta o conceito de *virtual sensing* e os seus possíveis usos.

2.1 Vibração

O interesse pelo tópico de vibrações iniciou-se na Antiguidade com a criação de instrumentos musicais em diversas civilizações, como, na Índia, China, Japão e Egito (RAO; YAP, 2011). Entretanto, o estudo próprio sobre música, e portanto vibração, se iniciou apenas quando o filósofo grego Pitágoras conduziu experimentos com cordas de um mesmo material, sujeitas a mesma tensão, mas que possuíam comprimentos diferentes. Ao excitar essas cordas, ele percebeu que o som emitido por cada uma era diferente, com a corda mais curta emitindo um som mais agudo. Além disso, ele determinou que, quando a corda menor possui exatamente metade do comprimento da maior, o som emitido por ela é uma oitava acima do som emitido pela corda maior. Outro experimento realizado por Pitágoras envolve o uso de cordas idênticas submetidas a tensões diferentes, como pode ser visto na Fig. 1, levando a frequências de vibração distintas.

Figura 1: Pitágoras conduzindo experimentos com cordas tracionadas.

Fonte: Franchino Gafori, *Theorica Musice* (Milan, 1492)

Apesar do uso e estudo de instrumentos musicais, e indiretamente de vibrações, tenha se iniciado há milhares de anos, grandes avanços no entendimento da vibração só foram obtidos a partir do século XVII. Durante esse período, Galileo Galilei escreveu e publicou textos que discutem tópicos como a frequência de vibração de um pêndulo e de uma corda tensionada. A partir dessa época, o progresso no estudo vibracional foi rápido, sendo avançado por nomes como Robert Hooke, que encontrou experimentalmente a relação entre o tom e a frequência, Joseph Sauveur, que cunhou o termo acústica e, simultaneamente a John Wallis, que observou a existência de modos de vibrar (RAO; YAP, 2011).

Outro cientista com grandes colaborações para a área de vibrações e acústica é o físico inglês John William Strutt, também conhecido como Lord Rayleigh. Famoso, entre outras façanhas, por ter descoberto o elemento químico argônio, feito que o levou a receber um Prêmio Nobel em 1904. Lord Rayleigh também estudou vibrações em cordas, membranas, placas, colunas de ar e ressonadores e a relação entre modos de vibrar e radiação acústica, com a sua mais importante publicação na área sendo "*The Theory of Sound*" (WELLS, 2007).

Atualmente, o estudo vibracional é relevante, entre outras áreas, em máquinas ferramentas. A vibração em uma máquina ferramenta é resultado da (falta de) rigidez dinâmica entre o sistema composto por máquina, ferramenta, porta-ferramentas e peça, e pode ocorrer de três formas principais: (i) na vibração livre, o corpo é excitado de forma transiente e deixado para vibrar até que o seu amortecimento interno faça com que o movimento pare; (ii) já a vibração forçada, que ocorre quando a excitação é contínua, mas não necessariamente constante, pode ocorrer em estruturas que possuem motores, na qual o motor é a causa da excitação e, finalmente, (iii) existe a vibração auto-alimentada, na qual imperfeições na superfície da peça usinada geram vibrações no sistema, causando mais imperfeições, que, por sua vez, levam a vibrações mais exaltadas, se mantendo e amplificando durante o processo de usinagem, desde que precauções corretas não sejam tomadas (QUINTANA; CIURANA, 2011).

Um tipo de vibração especialmente problemática para o processo de usinagem é o *chatter*. Trata-se de uma vibração auto-alimentada que, devido à oscilações da peça ou da ferramenta durante a usinagem, gera variações no acabamento da peça e, por sua vez, um aumento na vibração. Essa instabilidade, que pode ocorrer durante a usinagem, pode ser associada com a diferença de fase entre as frequências de vibração e rotação (ZHANG et al., 2015). Consequências negativas da ocorrência do *chatter* podem ser o acabamento de baixa qualidade, ruído excessivo da máquina, desgaste e dano da ferramenta, taxa reduzida de remoção de material e desperdício de material e energia (QUINTANA; CIURANA, 2011). Apesar de qualquer operador de máquina bem treinado conseguir perceber que o *chatter* está ocorrendo, ele ainda é o maior obstáculo para a automatização de processos de

usinagem (SIDDHPURA; PAUROBALLY, 2012). Algumas soluções vem sendo propostas, como o uso de sensores piezoelétricos embarcados no porta-ferramenta, conectados a um circuito elétrico de *shunt* passivo que provê um maior amortecimento do sistema, diminuindo a instabilidade causada pelo *chatter* (SILVA et al., 2015). Também pode ser realizada a obtenção de um vetor de características, com a transformada *wavelet*, capaz de analisar sinais tanto no domínio do tempo quanto na frequência simultaneamente, e pacotes de energia *wavelet*, que podem ser usados para a previsão da ocorrência de *chatter* através da classificação de padrões usando *Support Vector Machine* (YAO; MEI; CHEN, 2010).

Diversos tipos de sensores podem ser usados na medição da vibração de uma estrutura, como acelerômetros, dinamômetros e extensômetros. O dinamômetro disponível no *Laboratory for Advanced Process and Sustainability* (LAPRAS), da EESC-USP, está instalado no porta-ferramentas de um torno para testes e possui frequência de aquisição máxima de 100Hz, desta forma, o sistema proposto neste trabalho precisa ser projetado de forma a possuir uma taxa de aquisição igual a, no mínimo, 100Hz para se equiparar ao dinamômetro que será usado como *benchmark* para os resultados obtidos.

2.2 Transmissão de dados

Qualquer aplicação que requer a comunicação entre dois ou mais sistemas precisa fazer uso de algum tipo de transmissão de dados. Na situação em que um dos sistemas que se deseja comunicar com está em um eixo em rotação, um equipamento simples que pode ser usado é o *slip ring*. *Slip rings* consistem de dois elementos básicos: uma fita metálica que forma um anel, montada ao redor do eixo circular que estará em rotação e um conjunto de escovas condutoras que são posicionados para formar um contato elétrico com a fita metálica (ARTHUR; MORRIS; TERHUNE, 1949). Dessa forma, qualquer valor de tensão que deseja-se transferir do eixo rotativo para o meio externo ou vice-versa pode ser medido diretamente. Apesar da sua simplicidade, esse método de conversão sofre de desgaste durante o uso contínuo e também introduz ruído no sinal elétrico transmitido, gerando a necessidade de se fazer a manutenção do *slip ring* e reduzindo a qualidade do sinal transmitido (LEWIS et al., 1973) quando a quantia de interesse é proporcional a tensão transferida.

Durante o processo de transmissão, a informação a ser enviada é normalmente dividida em pacotes de tamanho específico, medidos em bits. Esses pacotes são enviados um por vez, podendo conter bits adicionais para especificar o endereço de envio ou a paridade da mensagem, que é um atributo utilizado para verificar se a troca de informações foi bem sucedida. Apesar de que pacotes são geralmente enviados um por vez, como cada pacote é enviado pode variar entre duas abordagens distintas: a comunicação paralela e a serial. Na comunicação paralela, os dois sistemas que realizarão essa comunicação precisam possuir

N canais para a transferência dessa mensagem, onde N é o comprimento da mensagem em bits, e todos os canais são enviados simultaneamente e lidos simultaneamente. No caso da comunicação serial, é necessário apenas um canal para enviar os dados de um sistema para o outro, ou dois canais no caso de que os dois sistemas devem enviar e receber dados. Assim, na comunicação serial, esses bits do pacote são enviados um por vez, em ordem, para que quando lidos sejam agrupados e formem o pacote novamente (CLARK, 1983).

Para a implementação do sistema de comunicação proposto nesse projeto, os dados obtidos durante a operação de usinagem devem ser transmitidos para um computador, responsável pela leitura e análise dessas informações. Como a usinagem trata de um processo de rotação contínua, o sistema de transmissão de dados a ser construído deve ser sem fio. Assim, a comunicação entre o sistema de aquisição, que está em movimento, e o computador, que se encontra em uma posição estacionária, se torna possível. Atualmente, a comunicação sem fio é feita, de forma geral, a partir de ondas eletromagnéticas, com destaque para tecnologias que usam ondas de rádio, infravermelho e luz.

As tecnologias sem fio baseadas em *WiFi* e *Bluetooth* apresentam alta taxa de transferência de dados. Porém, a alta velocidade de rotação do eixo, no qual o sistema de transmissão seria posicionado, pode causar interferência nessas ondas de rádio devido ao efeito Doppler. Em (PARK, 2010), o autor mostra que, mesmo para velocidades baixas, como as de um veículo em movimento, é possível que sinais de *WiFi* e *Bluetooth* sofram interferência pelo efeito Doppler. Pode ocorrer a inversão de bits, fazendo com que a informação a ser transmitida seja errada. Além disso, uma máquina ferramenta moderna usa motores elétricos que podem também causar interferência eletromagnética.

Um método interessante para a medição de deformações em um corpo, que pode ser usado em um eixo em rotação, é a utilização de sensores de deformação com *Bragg Grating*, feito com fibras ópticas cujas seções marcadas refletem apenas algumas frequências de luz, como é exemplificado na Fig. 2. Ao esticar ou contrair essas fibras, a frequência de onda refletida muda, permitindo a detecção dessa variação de comprimento. Por utilizar luz e não eletricidade na transmissão de informações, esse tipo de equipamento é praticamente imune a interferência eletromagnética, ao contrário de extensômetros convencionais (HILL; MELTZ, 1997). É possível desenvolver um sistema para transportar a informação vinda desse tipo de sensor, de um meio rotativo para um estático, como descrito em (HAYAT; HA, 2012). Algumas desvantagens desse método são a sua velocidade de rotação limitada e a necessidade de que o centro do eixo de rotação esteja livre, algo que não é possível em uma máquina de usinagem, pois material é, em geral, passado pelo centro desse eixo.

De forma semelhante ao funcionamento de um acoplador óptico em um circuito eletrônico, luz pode ser usada para transmitir dados sem fio. Um conjunto de LEDs posicionado no eixo em movimento pode enviar sinais de luz a serem detectados por um fotodiodo em posição fixa. Essa alternativa de comunicação usando luz está presente na

Figura 2: Diagrama explicando o funcionamento de uma fibra com *Bragg Grating*.

Fonte: (SARKAR et al., 2015)

literatura (NITTA et al., 1998), mas é pouco explorada.

Desta forma, para o projeto foi escolhida a transmissão de dados utilizando o protocolo serial, devido a sua alta taxa de transmissão que é necessária para a aplicação, e ao fato que, dado a transmissão unidirecional, apenas uma via é necessária, permitindo a instalação sem fio utilizando um anel de LEDs na peça rotativa e um sensor de luminosidade estacionário.

2.3 Tipos de Manutenção

Atualmente, a manutenção de máquinas, principalmente no setor de produção de uma fábrica, é considerada essencial por garantir a qualidade dos produtos e diminuir as paradas da produção devido a uma falha inesperada. Vários métodos de manutenção podem ser aplicados como, por exemplo, a manutenção corretiva na qual o reparo da máquina só ocorre depois que um componente falhe (KAISER, 2007). Já a manutenção preventiva se preocupa em fazer inspeções ou reparos nas máquinas em certos intervalos fixos de tempo baseados no histórico de ciclos de vida dos componentes a fim de prevenir ou consertar problemas antes que a máquina falhe. Como esse tipo de manutenção não leva em consideração a atual condição dos componentes da máquina, torna-se impossível prever falhas catastróficas, e reparos, possivelmente desnecessários, são realizados em máquinas em perfeita condição, levando a paradas na produção.

Uma solução mais viável é a manutenção preditiva, feita com o auxílio de sensores que permitem a medição e o monitoramento de determinadas características de cada componente da máquina, como temperatura e vibração. Ao comparar esses valores com

modelos já conhecidos de degradação, como mostrado na Fig. 3, na qual a fase 1 mostra a operação ideal da máquina e a fase 2 mostra o fim da vida útil, é possível prever a falha de uma parte do sistema, permitindo que medidas necessárias sejam tomadas. Dessa forma, as manutenções podem ser agendadas de maneira ótima quanto à disponibilidade, confiabilidade, segurança e eficiência da máquina, reduzindo consideravelmente a chance de falhas repentinas e catastróficas (UGECHI et al., 2009).

Figura 3: Sinal de um sensor de vibração ao longo da vida de uma peça.

Fonte: (KAISER, 2007)

Além disso, a manutenção preditiva pode ser usada, por exemplo, em rolamentos através da medição e da análise da sua vibração de forma contínua. Usando técnicas numéricas pode-se decidir se a operação desse rolamento está aceitável ou se ele deve ser reparado ou substituído. Algumas dessas técnicas são conhecidas como *Normalized Information Entropy*, *J-Divergence* e *Kurtosis* e permitem a avaliação da variação de um sinal proveniente de sensores, podendo indicar possíveis problemas na operação da máquina (YANG; COURT, 2013). *Normalized Information Entropy* é um critério adimensional que mede a incerteza de um evento ou variável aleatória, já *J-Divergence* descreve a distância entre duas distribuições de probabilidade, e *Kurtosis* informa qual a probabilidade de aparecer um ponto fora da curva.

O estudo realizado por Renwick e Babson (1985) trata da análise da resposta em frequência em uma fresadora ao longo do tempo. Segundo o autor, o espectro de velocidades de um conjunto de engrenagens do redutor dessa fresadora foi medido a cada dois meses na tentativa de observar defeitos nos rolamentos. Nos primeiros 10 meses de medição, os resultados não apresentaram problemas; mas, após 1 ano, foi detectado um pico superior ao *threshold* determinado pelo autor, de 0.2 in/s , na frequência de 76.6 Hz , que é a frequência fundamental desse engrenamento. Foi recomendado que a operação

continuasse; até que, no 18º mês, foi detectado um pico na frequência de 230Hz , a terceira ressonância da frequência fundamental desse engrenamento. Esse pico também apresentava *sidebands* de 3.3Hz (correspondente à frequência de rotação do eixo), o que indica um mal alinhamento. Fez-se uma inspeção e encontrou-se que os 4 parafusos que seguram o rolamento estavam soltos. Após serem reapertados, a resposta desse pico foi reduzida em 20%, permitindo que esse rolamento fosse usado por 3 meses adicionais. O espectro de velocidades para os meses 12 e 18 desse sistema podem ser vistos na Fig. 4.

Figura 4: Espectro de velocidades medidas no mancal da fresadora após 12 (a) e 18 (b) meses de operação.

Fonte: (RENWICK; BABSON, 1985)

Geralmente, trabalhos focados na detecção de falha em rolamentos fazem o sensoriamento em posições estáticas, como pode ser visto em (DIAZ et al., 2017). Isso se deve a maior facilidade de instalação e por não necessitar de um sistema de transmissão de dados sem fio. Entretanto, um sistema instalado diretamente no eixo-árvore permite que a medição seja feita continuamente, não necessitando de adaptações quando o porta-ferramentas for alterado dependendo da peça a ser usinada mas ainda permitindo a medição da força de corte. Uma vez que os dados foram transmitidos do referencial rotativo para o sistema estacionário, o processamento dos dados pode ser realizado para fins de manutenção desse sistema.

2.4 Internet das Coisas

Avanços recentes realizados na miniaturização de componentes e dispositivos eletrônicos, redução de seu consumo elétrico e melhoria nas tecnologias de comunicação sem fio permitiram o desenvolvimento de objetos conhecidos por sistemas ciber-físicos. Eles se tratam de uma nova geração de dispositivos embarcados que são projetados desde o início do desenvolvimento do produto com a intenção de integrar os componentes físicos do produto com os eletrônicos, permitindo maior eficiência do produto final. Sistemas ciber-físicos podem possuir uma infinidade de formatos e funções, desde sensores de medição de trânsito em uma via e estações meteorológicas portáteis à relógios inteligentes capazes de determinar as condições do seu usuário (BORGIA, 2014).

Unindo diversos sistemas ciber-físicos distintos e com funções diferentes, é possível criar uma rede que apresenta funcionalidades maiores do que a soma de suas partes. Esse conceito é denominado de Internet das Coisas, uma rede conectando uma infinidade de dispositivos e que não possui uma única intenção ou função, mas sim juntando os dados obtidos por todos os dispositivos nela presente. O resultado disso é algo conhecido como *Big Data* que pode ser então analisada para diversos fins e aplicada na melhoria e aumento da eficiência dos sistemas envolvidos. Esse tipo de sistema pode ser usado no escopo de uma cidade inteligente, com a obtenção de dados em tempo real de trânsito, condição climática, utilização de lixeiras e sistemas de transporte público, possibilitando que esse sistema calcule rotas alternativas para motoristas, altere a duração de semáforos, aumente ou diminua a frequência da coleta de lixo de certas áreas, inicie reparos de seções de ruas que possam estar danificadas. Utilizando sensores posicionados nos sistemas de transmissão de água é possível determinar futuros alagamentos e se preparar para preveni-los (BORGIA, 2014).

Outra aplicação para um sistema baseado na Internet das Coisas são os sistemas de saúde personalizados, que utilizam dispositivos vestíveis (*weareables*) como relógios inteligentes, dispositivos de diagnóstico portáteis para a detecção de níveis de glicose, colesterol, entre outros, para a determinação de quando um paciente deve procurar auxílio médico, seja este emergencial ou preventivo. Esse tipo de sistema pode também oferecer recomendações ao paciente quando a visita médica não é essencial, reduzindo a carga no sistema de saúde enquanto mantendo o diagnóstico e assistência médica de alta qualidade. Finalmente, também é possível que o auxílio de emergência seja contactado para o paciente quando este não se encontra em condições de fazê-lo, possivelmente salvando a vida deste usuário (QI et al., 2017).

A área de conhecimentos que inclui Internet das Coisas é considerada de grande potencial, com estudos prevendo um enorme impacto social e econômico até o ano 2025. O estudo realizado por McKinsey Global (MANYIKA; DOBBS, 2013) expõe 12 inovações consideradas as de maior viabilidade e relevância para os próximos anos, incluindo Internet das Coisas e veículos automatizados, que são beneficiados por Internet das Coisas.

O conceito de Internet das Coisas está intrinsecamente conectado ao conceito de sistemas ciber-físicos, e o objetivo principal desse projeto facilitaria a criação de uma máquina ferramenta que pode ser considerada como um sistema ciber-físico, por permitir a aquisição dos dados relevantes ao seu controle de forma contínua e estável.

2.5 Indústria 4.0

Um princípio que tem se provado verdadeiro, de uma forma ou outra, nos últimos 350 anos, é que o sucesso econômico de uma nação é dependente do seu avanço industrial. Exceto por fatores externos como desastres naturais ou guerras, é uma certeza de qualquer

região que tenha passado por um processo de industrialização que a sua população vai, a cada geração, experimentar condições de vida, consumo e produção superior à anterior. Esse processo de industrialização pode tomar várias formas, mas quando um país passa por ele, alguns fatores em comum geralmente estão presentes: a aplicação ampla de conhecimento científico na produção, o foco na produção para a sua venda em mercados nacionais e externos e a mudança da população do campo para cidades (DEANE, 1979).

A primeira revolução industrial, como o termo é conhecido, iniciou-se no Reino Unido, tendo ocorrido entre os anos de 1760 e 1840. Nela foram desenvolvidos novos métodos de manufatura, principalmente na indústria têxtil, novos processos de produção de ferro, desenvolvimento de máquinas ferramenta e utilização de máquinas movidas a água e vapor. Esses avanços foram desenvolvidos principalmente no Reino Unido, mas foram também implementados em outras nações durante o século XIX, como Alemanha, Estados Unidos, França e Japão (DEANE, 1979).

Apesar de os avanços tecnológicos realizados durante a primeira revolução terem mudado o mundo e a sua influência ainda podendo ser sentida hoje, as inovações foram feitas de forma prática e com pouca base científica. Devido a isso, muitas vezes quando um sistema funcionava, não se sabia o porquê ele funcionava, e, portanto, muitas vezes não se sabia que uma ideia que aparentava inovadora não poderia funcionar, causando buscas fúteis por tecnologias impossíveis ou inviáveis. A segunda revolução industrial, tendo ocorrido aproximadamente entre 1870 e 1914, teve seus avanços tecnológicos geralmente mapeados anteriormente por avanços científicos. Em outras palavras, boa parte das inovações práticas que levaram a segunda revolução industrial foram aplicações de pesquisas científicas, fazendo com que o seu funcionamento fosse conhecido e entendido, permitindo assim avanços e melhorias mais rápidos e certos (MOKYR, 1998). Dentre esses avanços estão a linha de montagem e peças intercambiáveis, a rápida expansão de linhas de trem e telégrafo, novos métodos para a produção de aço, o desenvolvimento e implementação da energia elétrica e do telefone.

A terceira revolução industrial teve seu início em 1970, mas está ocorrendo até os dias de hoje. O seu princípio básico é a utilização de componentes eletrônicos e tecnologia da informação, fazendo com que as máquinas não só assumam uma porcentagem considerável do trabalho que anteriormente era manual, mas também permite que os processos de produção realizem tarefas de forma automática, simplificando o trabalho mental envolvido em várias atividades industriais. Um dos indicadores óbvios dessa mudança é a presença universal de controladores lógicos programáveis em praticamente qualquer setor da indústria. Especificamente na manufatura, várias tarefas anteriormente realizadas por operadores em máquinas ferramenta manuais hoje são realizadas por máquinas de comando numérico computadorizado, permitindo maior velocidade e precisão na usinagem (GROUP, 2013).

Seguindo essas ideias, o mais novo avanço na indústria é chamado de Indústria 4.0, sendo considerado como a quarta revolução industrial. A Indústria 4.0 é, basicamente, a aplicação dos conceitos de sistemas ciber-físicos e Internet das Coisas em um ambiente industrial. Nele, os diversos sistemas como máquinas ferramentas, braços robóticos, esteiras e máquinas de embalagem estão conectados entre si. Com isso, é possível o aumento da eficiência da produção, especialmente na fabricação de produtos individualizados. A Indústria 4.0 também facilita adaptações rápidas na linha de produção, uma necessidade que está aumentando junto com a redução no ciclo de vida dos produtos (LEE; BAGHERI; KAO, 2015).

O termo Indústria 4.0 foi introduzido no ano 2011 em uma associação entre o governo alemão, universidades e indústrias. Desde então, este tem sido um dos tópicos mais abordados na área de manufatura, parcialmente devido a esta ser a primeira revolução industrial que foi prevista por especialistas, e não estudada após ter ocorrido (HERMANN; PENTEK; OTTO, 2016).

No caso de uma indústria baseada em máquinas ferramentas, cada um desses equipamentos individuais precisa ser monitorado e controlado, com sensores responsáveis pela força de corte, estado da operação, monitoramento da vida de rolamento e ferramenta, níveis de óleo e fluido de corte, entre outros atributos.

2.6 Virtual sensing

Outra linha de pesquisa em voga, que tem interface com este trabalho, é a de *Virtual sensing*, ou sensoriamento virtual, um conceito que une um modelo (teórico ou experimental) do sistema em questão com medições realizadas nesse sistema para estimar uma quantia de interesse que, por uma série de motivos, não pode ser medida diretamente (BRETTEL et al., 2014). O modelo do sistema fornece uma previsão, mesmo que imprecisa, do seu comportamento, que é utilizada em conjunto com as medições para se obter uma estimativa de grandeza desejada. Por depender do modelo do sistema para realizar as suas medições, é preciso confiar na qualidade do modelo ou do método de estimação utilizado, caso contrário as medições também irão possuir erros (KUO; ZHOU, 2009).

Técnicas de sensoriamento virtual podem ser necessárias quando o sensor real para a quantia necessária não é preciso o bastante, não realiza medições em uma frequência suficientemente alta para a aplicação, ou ele é demasiadamente caro. Outros problemas relacionados são a posição desejada para o sensor ser de difícil acesso para a sua instalação ou manutenção, o ambiente em questão ser hostil para o sensor que se deseja utilizar ou a instalação de um sensor físico naquela região do sistema pode alterar o seu funcionamento, geralmente em partes muito leves (ROVERSO, 2009).

Existe uma diversidade de técnicas para a aplicação do conceito de sensoriamento

virtual, mas elas geralmente podem ser divididas em dois tipos: técnicas analíticas ou empíricas. Técnicas analíticas utilizam os princípios físicos relacionados a quantia que se deseja medir para criar uma relação entre o seu valor e os valores que podem ser medidos. No caso de vibrações e deformações mecânicas, modelos de elementos finitos são uma solução amplamente aplicada. Esse tipo de solução depende grandemente da precisão e complexidade do modelo. Um modelo pouco complexo pode ser rápido o bastante para ser usado em tempo real, mas também pode levar a aproximações menos precisas, um fato que deve ser considerado durante a construção de sensores utilizando essa técnica. Técnicas empíricas para a criação de um sensor virtual apresentam algumas possibilidades, podendo ser feitas a partir de um histórico da medição desejada utilizando um sensor temporário. Outra possibilidade é a utilização de modelos de alta complexidade que não poderiam ser simulados em tempo real para criar uma relação entre os valores que se desejam medir com os que serão medidos. Esse tipo de sensor virtual emprega técnicas matemáticas para a aproximação de funções e conceitos da estatística, com a intenção de relacionar os valores que podem ser obtidos com aqueles que deseja-se medir indiretamente (ROVERSO, 2009).

Sensoriamento virtual foi utilizado por (NAETS; COSCO; DESMET, 2017), no qual uma barra engastada de comprimento indeterminado é excitada e, com os dados de um extensômetro posicionado nessa barra e um modelo, é possível determinar o seu comprimento e também a sua deformação em qualquer posição. Além disso, um sistema de realidade aumentada é construído, permitindo que a força aplicada e a intensidade da deformação possam ser visualizados com o auxílio de uma câmera, como pode ser visto na Fig. 5.

Figura 5: Representação da deformação de uma barra utilizando realidade aumentada.

Fonte: (NAETS; COSCO; DESMET, 2017)

Outro exemplo de aplicação é dado por ([WANG et al., 2017](#)) para determinar a condição de ferramentas de corte, utilizando a medição de acelerômetros e dinamômetros em tempo real e, durante a calibração do sistema, comparando esses resultados aos valores de desgaste da ferramenta obtidos com o auxílio de um microscópio. Feita essa calibração, a medição dos acelerômetros e dinamômetros foi capaz de, com o auxílio de algoritmos computacionais, determinar a condição da ferramenta.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O experimento principal deste trabalho foi realizado em um eixo que contém sensores, a eletrônica para a aquisição de dados desses sensores, um sistema de transferência de dados desse eixo para o meio externo e um *blank* de usinagem. Este eixo representa uma montagem típica (*mock-up*) de um eixo-árvore, pois contém o conjunto de sensoramento e aquisição primários, montados no referencial girante, além de permitir a troca do *blank* de usinagem sem requerer acesso ao eixo-árvore da máquina, que traria complicações técnicas a este projeto.

Este capítulo é dividido nas seguintes partes: a leitura de dados de um extensômetro detalhada na seção 3.1, a transmissão de energia para um sistema em rotação, como apresentada na seção 3.2, a transmissão de dados sem fio que pode ser encontrada seção 3.3, o projeto e a construção do eixo que possui esses dois sistemas funcionando juntos, na seção 3.4, a descrição de um ensaio estacionário de torção realizado nesse eixo pode ser lida na seção 3.5 e, finalmente, as características do ensaio durante um processo real de usinagem estão contidas na seção 3.6.

3.1 Leitura de tensão;deformação via extensômetros

Para obter as informações desejadas de um eixo rotativo, é necessária a construção de um circuito de aquisição de dados pequeno e leve, que possa ser posicionado no próprio eixo, mas que, ao mesmo tempo, seja capaz de amplificar o sinal de extensômetros ao ponto de ele ser lido pelo conversor analógico para digital (ADC). Além disso, é necessário que esse processo de aquisição exporte os dados no formato serial, para que a transmissão sem fio seja bem sucedida. Dessa forma, o circuito de aquisição apresenta um amplificador de instrumentação, que é um circuito integrado feito com uma série de amplificadores operacionais e resistências, e o seu ganho, que é determinado por um resistor externo R_G . O amplificador de instrumentação usado é da marca Texas Instruments e do modelo INA128 (TEXAS INSTRUMENTS, 2018), e o seu ganho G , em função do resistor de ganho externo R_G , é dado por

$$G = 1 + \frac{50k\Omega}{R_G}. \quad (3.1)$$

Com esse amplificador, é possível deixar o sinal obtido pelos extensômetros em um nível legível pelo ADC embutido em uma placa Arduino. Este ADC é de 10 bits e a sua entrada pode variar de 0V a 5V, permitindo uma resolução de 4,9mV.

Foram escolhidos dois extensômetros em formato V, ou espinha de peixe, como o ilustrado na Fig. 6. Esse tipo de extensômetro possui duas grades de medição, sendo que

elas estão a 90° entre si e devem ser posicionadas de maneira que formem um ângulo de 45° com a linha de centro do eixo. Quando dois desses extensômetros são posicionados em lados opostos do eixo, esse arranjo permite a detecção da torção desse eixo sem que as outras deformações, como flexão e tensão/compressão, interfiram (HOFFMANN, 1989). Esse arranjo também ignora efeitos de variação térmica no eixo e, por estar montado em ponte cheia, maximiza a tensão de saída do sinal dos extensômetros, facilitando a sua medição.

Figura 6: Extensômetro em formato V, ou extensômetro espinha de peixe.

Fonte: HBM

O arranjo de 2 extensômetros utilizado é semelhante ao da Fig. 7, de maneira que as resistências R_1 e R_4 fazem parte de um único extensômetro espinha de peixe enquanto as R_2 e R_3 fazem parte do outro. A relação entre a tensão de saída V_O e a tensão da fonte V_S pode ser descrita por

$$V_O = V_S \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right). \quad (3.2)$$

Além disso, uma ponte está balanceada, ou seja, a tensão de saída V_O é nula, se

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}. \quad (3.3)$$

Quando os extensômetros estão instalados e o sistema está sob condições reais de funcionamento, cada extensômetro está em uma área sujeita a deformação, e, portanto, o valor de suas resistências é alterado por um valor chamado de ΔR_i , com i variando entre 1 e 4. Substituindo R_i por $(R_i + \Delta R_i)$ na Eq. 3.2, obtém-se que

$$V_O = V_S \left(\frac{R_1 + \Delta R_1}{R_1 + \Delta R_1 + R_2 + \Delta R_2} - \frac{R_4 + \Delta R_4}{R_3 + \Delta R_3 + R_4 + \Delta R_4} \right). \quad (3.4)$$

Figura 7: Diagrama do posicionamento dos sensores no eixo (a) e do circuito elétrico resultante (b).

Fonte: HBM

Dadas simplificações (HOFFMANN, 1989), a Eq. 3.4 pode ser reescrita da forma

$$\frac{V_O}{V_S} = \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right). \quad (3.5)$$

A partir da simplificação obtida na Eq. 3.5, é possível transformar cada termo com resistências como

$$\frac{\Delta R_i}{R_i} = k_i \varepsilon_i, \quad (3.6)$$

onde a variável k_i representa o fator-k de um extensômetro e ε_i representa a deformação medida por ele. Como as 4 grades de medição dos 2 extensômetros usados apresentam as mesmas propriedades, o fator-k de todas é igual a $k_1 = k_2 = k_3 = k_4 = k$. Dessa forma, a Eq. 3.5 pode ser resumida em

$$\frac{V_O}{V_S} = \frac{k}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4). \quad (3.7)$$

As direções principais de deformação de um eixo circular sob torção estão à $\pm 45^\circ$ dos planos cilíndricos, que são linhas paralelas ao eixo do cilindro e estão sobre a sua área externa. Tomando vantagem deste fato, a montagem do sistema, feita como indicado na Fig. 7, posiciona as grades de medição dos dois extensômetros espinha de peixe coincidentes com as direções principais de deformação deste eixo. Dessa forma, os valores de deformação

ε_i medidos por cada grade de medição são iguais em módulo, mas, as grades inclinadas a $+45^\circ$ e a -45° possuem sinais opostos. Portanto, os elementos do par R_1 e R_4 possuem sinais opostos, e o mesmo pode ser dito para os elementos do par R_2 e R_3 . Além disso, R_1 e R_3 apontam para a mesma direção, tendo assim o mesmo sinal. Sendo assim, substituindo a seguinte relação $\varepsilon_1 = -\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = -\varepsilon_4 = \varepsilon$ na Eq. 3.7, obtemos o resultado

$$\varepsilon = \left(\frac{1}{4}\right)\left(\frac{4}{k}\right)\left(\frac{V_O}{V_S}\right). \quad (3.8)$$

Dado que a constante k do extensômetro e a tensão de alimentação V_S são conhecidas, essa equação permite que a medição da tensão de saída da ponte V_O leve ao valor de deformação ε apresentado no eixo. Entretanto, o sinal de saída V_O deve ser multiplicado pelo ganho G do amplificador de instrumentação, como descrito na Eq. 3.1, levando a uma equação final no formato

$$\varepsilon = \left(\frac{1}{k}\right)\left(\frac{V_O}{V_S}\right)\left(1 + \frac{50k\Omega}{R_G}\right). \quad (3.9)$$

Isolando V_O , obtemos finalmente

$$V_O = \frac{\varepsilon k V_S}{\left(1 + \frac{50k\Omega}{R_G}\right)}. \quad (3.10)$$

O circuito que une os extensômetros montados em ponte cheia, o amplificador de instrumentação, o resistor de ganho desse amplificador e o Arduino responsável pela leitura dos dados pode ser visto na Fig. 8, onde cada um dos resistores mostrados na ponte são uma das grades de medição do extensômetro apresentado na Fig. 6, sendo que dois destes foram instalados no eixo.

Figura 8: Circuito do sistema de aquisição de dados.

3.2 Transmissão de energia

Para realizar a alimentação desse sistema, alguns métodos são viáveis, como por exemplo, a utilização de *slip rings* (AMIRAT et al., 2009), uma bateria montada no próprio eixo, uma bobina de indução (TOH et al., 2014; GARRAUD et al., 2014) ou um sistema de colheita de energia (PRIYA; INMAN, 2009).

Slip rings são escovas estacionárias posicionadas sobre trilhos de cobre para manter o contato elétrico entre um eixo em rotação e o meio externo, como pode ser visto na Fig. 9(a). Apesar de serem suficientes para a transmissão de energia e de simples instalação, *slip rings* podem causar problemas quando usados na transmissão de dados devido a ruídos elétricos vindos do contato das escovas com os trilhos. Uma solução mais rapidamente implementada seria o uso de baterias, que são de fácil instalação, requerendo componentes simples e baratos para que possam alimentar o sistema, tornando-as especialmente úteis para testes de curta duração. No caso de um sistema que deve permanecer funcionando por uma longa duração, métodos mais permanentes são preferíveis. Bobinas de indução, como a apresentada na Fig. 9(b), e colheita de energia possibilitam a alimentação do sistema sem baterias e sem contato físico, mas são métodos tecnicamente mais complexos, tornando-se opções para uma futura melhoria do sistema.

Figura 9: Ilustração de um *slip ring* com destaque às escovas (a) e de um sistema de transmissão de energia sem fio utilizando uma bobina (b).

Fonte: traduzido de (SYSTEMS, 2015) (a) e de (TOH et al., 2014) (b)

Como os testes efetuados são provas de conceito, ou seja de curta duração para avaliar o funcionamento do sistema, a forma de alimentação escolhida é através de baterias instaladas diretamente no eixo. Como é necessária uma tensão entre 12 e 15V para realizar a alimentação do anel de LEDs, foram montadas em série 8 pilhas AAA com 1,5V cada. O sistema pode ser alimentado completamente por essa fonte, já que o Arduino UNO instalado suporta tensões de até 20V. Além disso, mesmo na maior velocidade de rotação atingida nos testes, de 1200RPM, as baterias funcionaram perfeitamente. É possível que,

para rotações mais elevadas, elas deixem de funcionar, necessitando a implementação de outros métodos de alimentação do sistema. Outra questão importante é a massa do conjunto de baterias, que pode oferecer riscos se sujeita a rotação elevada.

3.3 Transmissão de dados sem fio

Para realizar a transmissão de dados sem fio entre o eixo rotativo e um computador estacionário, foi desenvolvido um sistema que faz a leitura dos dados diretamente no eixo. Utilizando um protocolo serial, os dados lidos pelo Arduino são usados para chavear um anel de LEDs dispostos ao redor desse eixo. Assim, quando o circuito de aquisição envia um valor *HIGH* para os LEDs, todos eles acendem simultaneamente, e no caso de um sinal *LOW*, todos os LEDs ficam apagados.

Já no circuito estático, um sensor de luminosidade, mais especificamente um fotodiodo, é responsável por interpretar o sinal vindo dos LEDs em rotação. Um comparador traduz os níveis de tensão do sinal do sensor de luminosidade para uma tensão compatível com um outro Arduino, que, finalmente, envia as informações obtidas do eixo para um computador, por meio de um cabo USB. O comparador é necessário pois a tensão de saída do fotodiodo é dependente da intensidade da fonte luminosa, e nesse caso, ela é muito inferior ao valor esperado pelo Arduino para um sinal *HIGH*. Dessa forma, uma tensão de referência que é inferior ao valor *HIGH* de saída do fotodiodo é usada no comparador, fazendo com que a sua saída seja 5V para entradas maiores que esse sinal de referência e 0V para valores inferiores, permitindo que o Arduino possa interpretar esse sinal como uma mensagem serial (RAPOSO et al., 2017). O circuito, que pode ser visto na Fig. 10, descreve como é feita a transmissão de dados sem fio; o bloco denominado por ‘Sistema de Aquisição de Dados’ corresponde ao circuito descrito na Fig. 8.

Figura 10: Circuito do sistema de transmissão de dados.

O código utilizado na leitura e comunicação desses dados é simples e separado em duas partes, uma que está contida no Arduino UNO em rotação e a outra no Arduino Mega que está estacionário, mas ambos realizam a comunicação serial à 57600 *baud*. O código contido no Arduino UNO realiza a leitura da sua entrada analógica, determinando o valor de tensão dos extensômetros que está contido entre 0V e 5V, convertendo-o para uma

escala de 0 a 1023, levando a uma resolução de 4,9mV. Esse processo leva aproximadamente 100 microssegundos, permitindo uma taxa de leitura de 10kHz (ARDUINO, 2017). O próximo e último passo desse código é o envio do valor obtido utilizando o protocolo serial. O código contido no Arduino Mega primeiro procura se uma mensagem está disponível na entrada serial conectada ao fotodiodo, se sim, ele faz a aquisição dessa mensagem. Quando uma mensagem é recebida, ele prontamente a envia utilizando protocolo serial para o computador responsável pelo armazenamento e processamento desses dados.

3.4 Eixo de testes

Com os subsistemas da leitura dos sensores e da transmissão de dados projetados, é necessário criar um protótipo que pode ser testado em um torno em operação durante condições reais. Para isso, precisa-se estimar quais esforços ocorrem no eixo-árvore de um torno durante a usinagem, de forma a projetar um eixo que é capaz de resistir condições comuns de usinagem enquanto ao mesmo tempo maximizando o alcance dinâmico dos sensores posicionados nesse eixo.

3.4.1 Projeto da Seção Circular com os Sensores

Foi projetada uma seção circular de um eixo para o posicionamento dos sensores com a intenção de maximizar a deformação, facilitando a aquisição de dados pelos extensômetros e garantindo que a conversão analógico para digital teria resolução suficiente para as análises propostas no escopo deste trabalho. Para isso, leva-se em consideração que

$$\tau = \frac{Tr}{J}, \quad (3.11)$$

onde τ é a tensão mecânica, T é o torque aplicado, r é o raio externo e J é o momento de inércia polar da seção transversal do eixo. O momento de inércia polar J de um tubo circular é dado por

$$J = \frac{\pi(D^4 - d^4)}{32}, \quad (3.12)$$

onde D é o diâmetro externo do tubo e d é o diâmetro interno.

Assim, para calcular o valor teórico da tensão em um tubo circular para uma certa posição, combinam-se as Eq. 3.11 e 3.12. O valor máximo teórico de tensão τ_{max} corresponde a tensão encontrada na superfície externa do tubo ($r = D/2$), tal que

$$\tau_{max} = \frac{16 D T}{\pi(D^4 - d^4)}. \quad (3.13)$$

Para definir essa tensão τ_{max} , primeiro é necessário obter o torque que está sendo aplicado no eixo durante a usinagem. Foi realizado um ensaio, em um eixo de aço, usinado

em um torno Romi GL 240M, no qual foi instalado um dinamômetro no porta-ferramenta para encontrar o valor das forças envolvidas. Para obter o valor do torque, utiliza-se a força obtida pelo dinamômetro durante o teste de usinagem, mostrado na Fig. 11 como sendo aproximadamente 400N, e aplicando-a no raio inicial estimado para o *blank* de usinagem, de 0,05m. Assim, podemos obter um valor de torque T ,

$$T = F r = 400 [N] * 0,05 [m] = 20Nm. \quad (3.14)$$

Figura 11: Valores experimentais obtidos por dinamômetro durante a usinagem de um eixo de aço.

A partir disso, foram analisados diferentes valores de d e D para encontrar qual combinação levaria a uma maior deformação, que pode ser traduzida em uma maior tensão elétrica na saída quando medida usando-se extensômetros em ponte cheia. Essa análise pode ser vista na Fig. 12 e, para o eixo de testes, foram escolhidos diâmetros que levam a um V_{out} elevado. O valor escolhido está ao longo do pico no gráfico, com $R_I = d/2 = 7mm$ e $R_O = D/2 = 10mm$. Os extensômetros instalados nessa seção circular do eixo são 1-XY41-1.5/350, da empresa HBM, e apresentam resistência no valor de 350Ω e fator $k = 1,95$.

Figura 12: Análise de diferentes diâmetros internos e externos e a tensão de saída de uma ponte de extensômetros.

3.4.2 Descrição das Seções Circulares do Eixo

Um eixo capaz de conter todos os componentes desejados, cujo esboço pode ser visto na Fig. 13, foi projetado e construído. As dimensões principais do sistema, em milímetros, montado entre a placa de castanhas e um contraponto, podem ser vistas na Fig. 14. Esse eixo possui as seguintes características, numeradas de acordo com as regiões na Fig. 13:

1. Um diâmetro inicial pequeno o bastante para ser fixado na castanha de um torno.
2. Uma seção livre para a instalação de faixas de cobre caso um *slip ring* seja necessário.
3. Uma seção para instalação dos extensômetros.
4. Uma seção na qual a eletrônica de aquisição foi instalada, dentro de uma estrutura construída com o auxílio de uma impressora 3D e representada no desenho com uma cor diferente.

5. Uma seção protegida por duas flanges onde foram instalados os LEDs para a transmissão de dados.
6. Um flange para a proteger os LEDs de cavacos durante a usinagem.
7. Uma região onde são instalados *blanks* de fácil substituição, permitindo que esse eixo seja reutilizado para vários testes.
8. Um trecho roscado para a fixação do *blank* de testes.

Figura 13: Modelo em CAD do eixo de testes.

Figura 14: Desenho técnico do eixo com dimensões de maior importância e apoios.

3.4.3 Análise de Elementos Finitos do Eixo

Também foram realizadas análises de elementos finitos, como visto na Fig. 15, no eixo proposto. Essa análise é importante pois leva em conta outros tipos de esforços (além

do torque exercido pela força de corte) presentes durante o processo, como componentes axiais, transversais e tangenciais à peça, que, apesar de não serem o foco da medição com extensômetros, devem ser consideradas para evitar possíveis falhas do eixo de testes. Apesar de presentes e de, eventualmente solicitarem a região de interesse com momentos fletores, cabe ressaltar que a montagem em ponte cheia, com os extensômetros espinha de peixe, oferece um sistema de medida com sensibilidade praticamente nula para estes esforços, sensível apenas a deformações provenientes da torção da seção de testes. As tensões principais, resultados de uma análise estática, podem ser vistas na Fig. 15. Nota-se que há, como esperado, uma concentração de tensões na região desejada, que será instrumentada com extensômetros. A tensão nesta região é homogênea, o que significa que a posição axial na qual o conjunto de extensômetros espinha de peixe for instalada não afeta significativamente os resultados.

Figura 15: Análise de elementos finitos realizado no modelo em CAD do eixo.

3.5 Ensaio estacionário de torção

Este ensaio foi realizado em um torno Nardini convencional, modelo 350, encontrado no Laboratório de Metrologia da EESC-USP. Nele, uma barra curta de alumínio foi fixada na superfície livre do *blank* de usinagem, como pode ser visto na Fig. 16. Na superfície inferior dessa barra, a 75,5mm do centro do eixo, foi posicionado um *shaker* inercial 2002E da empresa *The modal shop*, tendo intervalo de vibração entre 20Hz e 3kHz e força senoidal de excitação de 9N, para excitar o sistema. Isso permite que os acelerômetros, posicionados segundo a Fig. 17, o transdutor de força, posicionado na superfície inferior da ponta da barra de alumínio, oposto a um acelerômetro, e os extensômetros, posicionados como descrito na seção 3.4, possam obter a resposta do sistema. O modelo dos acelerômetros

usados é o 352A24 da marca PCB, com sensibilidade de 100mV/g medindo até $\pm 50g$ e frequência variando de 1Hz à 8000Hz, e o transdutor de força é o 208C01, com intervalo de medição de 10lb, sensibilidade de 500mV/lb e frequência podendo variar de 0,01Hz à 36000Hz, também da PCB. Para fazer a aquisição de dados nesse ensaio, foi utilizado o sistema de transmissão de dados proposto para a leitura dos extensômetros e um sistema de aquisição Quattro da empresa *Data Physics* para o restante dos sensores. Durante toda a duração desse ensaio, o eixo do torno permaneceu travado.

Figura 16: Desenho técnico do eixo mostrando a barra de alumínio.

Figura 17: Representação do eixo mostrando o posicionamento dos acelerômetros (destacados em vermelho) durante o ensaio estacionário de torção.

3.6 Ensaio durante processo real de usinagem

O ensaio final desse projeto foi realizado em um torno CNC Romi, modelo GL 240M, que está localizado no *Laboratory for Advanced Process and Sustainability* (LAPRAS) da EESC-USP. Nesse ensaio, o eixo de testes foi preso na castanha do torno e o *blank* foi usinado diversas vezes. Além dos extensômetros do próprio eixo, foram utilizados dois acelerômetros 352A24 da marca PCB, um deles posicionado sobre o mancal do eixo-árvore e o outro no porta-ferramenta, como visto na Fig. 18. Os dados dos extensômetros foram lidos pelo sistema de transmissão e aquisição de dados proposto nesse projeto, enquanto os dados dos acelerômetros foram obtidos por um sistema de aquisição Quattro da empresa *Data Physics*. Finalmente, no porta-ferramentas está montado um dinamômetro Kistler Type SN que é lido pelo sistema de aquisição Type 5019 da Kistler.

Figura 18: Foto mostrando o posicionamento dos acelerômetros sobre o apoio do eixo-árvore (a) e no porta-ferramenta (b).

Esse ensaio é importante pois permite a comparação dos resultados obtidos a partir dos extensômetros instalados no eixo com um dinamômetro montado no porta-ferramentas, um sistema que mede uma quantidade (força) diretamente relacionada com aquela medida pelo sistema proposto nesse trabalho (torque). Dessa forma, os resultados desse teste podem ser usados para validar o sistema proposto.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo é dividido em cinco seções. Os resultados obtidos na leitura de dados de extensômetros utilizando um amplificador de instrumentação e um Arduino UNO são apresentados na seção 4.1; a calibração dos extensômetros posicionados no eixo de teste foi realizada como descrito na seção 4.2; os resultados da transmissão de dados sem fio podem ser encontrados na seção 4.3; os resultados obtidos no teste estacionário de torção estão na seção 4.4 e os resultados do teste final, durante um processo real de usinagem, estão na seção 4.5.

4.1 Leitura experimental de tensão;deformação via extensômetros

Para realizar testes do sistema de aquisição de dados citado na seção 3.1, foi realizado um ensaio no qual uma barra fina e longa de alumínio foi engastada em um sistema fixo em uma estrutura de concreto, como pode ser visto na Fig. 19. Essa barra foi instrumentada com um único extensômetro próximo ao engaste e foi excitada e deixada para vibrar livremente. O extensômetro foi, por sua vez, montado em uma ponte, com 3 resistores que possuem o mesmo valor de resistência, alimentada com 5V. Os seus terminais de saída foram conectados ao amplificador de instrumentação e a saída desse amplificador foi conectada diretamente à porta analógica de um Arduino UNO, cujo código continuamente lê essa porta e envia o seu valor pela porta serial com um *baudrate* de 19200. Finalmente, um computador executando o programa MATLAB, que realiza a aquisição dos dados enviados, foi conectado ao Arduino por meio de um cabo USB.

Figura 19: Barra de testes para a aquisição de dados de um extensômetro.

O resultado desse ensaio pode ser visto na Fig. 20. Esse gráfico apresenta ruídos, facilmente vistos no início da curva, onde o sistema está em repouso. Uma das causas desses ruídos são os cabos utilizados para esta medição, que não são blindados e portanto estão mais suscetíveis à interferência eletromagnética.

Figura 20: Medição experimental de uma barra em vibração livre.

O objetivo inicial de verificar a capacidade do sistema de ler dados provenientes de um circuito piezo-resistivo foi atingido, contudo fica claro que deve-se cuidar da faixa dinâmica da cadeia de medidas e da blindagem do sistema, uma vez que o nível de sinal/ruído presente neste teste, realizado numa estrutura flexível, é relativamente baixo. Este resultado, em parte, motivou o refinamento do projeto do *mock-up*, no que tange a geometria da seção de testes, descrita na seção 3.4.

4.2 Calibração dos extensômetros no eixo de testes

Antes de realizar medições práticas com o eixo de testes, é necessário garantir que o valor de saída dos extensômetros seja linear em relação ao torque aplicado no eixo. Para isso, foi realizada uma calibração estática do eixo, na qual foi presa uma das extremidades do eixo a uma base fixa, de forma a deixar o eixo vertical. Na extremidade livre, foi fixada uma barra de comprimento conhecido perpendicularmente a este eixo, como visto na Fig. 21. Além disso, na ponta dessa barra foi conectado um cabo que é tracionado com o auxílio de um sistema de polias e um conjunto de pesos padronizados.

A calibração foi realizada adicionando-se pesos de forma incremental, até atingir um limite máximo, com a massa total e o valor de leitura do sistema sendo anotados a cada passo. Em seguida, esses pesos foram removidos um à um para realizar o descarregamento do sistema e garantir que o sistema não sofre com histerese, tendo a massa total aplicada

Figura 21: Ilustração em CAD da montagem do eixo de testes para a sua calibração.

no cabo e a leitura do sistema anotados a cada passo do descarregamento.

A Fig. 22 apresenta o resultado da calibração realizada, na qual o eixo vertical apresenta o valor da medição obtido pelo sistema de testes, sendo que este varia entre 0 e 1023, em que 0 representa 0V e 1023 representa 5V, e no eixo horizontal está a força em newtons aplicada para gerar torção no sistema. Esses resultados mostram que o sistema se comporta linearmente, com a curva de carregamento e descarregamento se aproximando de retas. Além disso, o carregamento e descarregamento apresentam curvas muito semelhantes, mostrando que o sistema não possui histerese considerável. Devido à montagem de extensômetros utilizada, com dois extensômetros espinha de peixe montados em lados opostos do eixo, esses sensores ignoram esforços cortantes ou fletores (HOFFMANN, 1989).

4.3 Transmissão de dados sem fio

Um aspecto essencial para esse projeto é a transmissão de dados utilizando o anel de LEDs no eixo rotativo e o fotodiodo estacionário. Dois testes foram realizados para comprovar a validade desse sistema. O primeiro, discutido em 4.3.1, foi feito antes da construção do eixo de testes final, utilizando um protótipo simples, no qual o eixo foi substituído por um tubo de PVC onde os outros componentes foram montados. Após a ideia ter sido validada nesse teste, o eixo foi construído, segundo os planos apresentados na seção 3.4. Com esse eixo feito em aço, foi possível instalá-lo em um torno real para um teste de transmissão de dados em condições mais realistas, discutido em 4.3.2.

Figura 22: Resultados da calibração dos extensômetros do eixo de testes.

4.3.1 Ensaio de transmissão no eixo protótipo

O protótipo de transmissão de dados foi construído a partir dos componentes especificados em 3.3, usando como eixo um tubo de PVC, como pode ser visto na Fig. 23. Esse experimento utilizou um cordão de LEDs para a transmissão de dados, um *slip ring* para realizar a alimentação do sistema e, montado em uma *protoboard*, está o circuito responsável pela leitura dos LEDs.

Com esse sistema, foi possível realizar um teste de transmissão de dados utilizando um *baudrate* de até 57600, valor superior ao usado na aquisição dos dados dos sensores. Nenhuma medição foi realizada durante este teste, ao invés disso, uma mensagem gravada na memória do Arduino embarcado no eixo era transmitida para o sensor externo. Vale ressaltar que essa transferência foi realizada enquanto o eixo estava conectado a um motor elétrico girando em uma rotação superior a 2000RPM. Os dados obtidos apresentam uma taxa de erro de transmissão de aproximadamente 2%, e é possível que isso se dê a movimentos exagerados do eixo, pois o protótipo de testes foi feito de forma simples, sem

Figura 23: Protótipo de transmissão de dados.

rolamentos e mancais apropriados para auxiliar a estabilidade. Esse teste mostra que esse sistema de transmissão é robusto o suficiente para levar os dados do eixo girando para um computador estacionário, permitindo então que seja aplicado no eixo que foi instalado no torno para a próxima parte dos testes.

4.3.2 Ensaio de transmissão no eixo final

Utilizando o eixo de testes na sua versão final, como descrito em 3.4, foi possível realizar um ensaio de transmissão de dados durante a rotação em um torno real. Esse ensaio foi realizado em diversas rotações, partindo de 30RPM a até 1200RPM. A transmissão utilizou um *baudrate* de 57600 e, transmitindo todas as informações dos extensômetros, obteve uma taxa de transmissão de 760Hz, validando esta ideia.

4.4 Ensaio estacionário de torção

No ensaio realizado com o eixo de testes em posição estacionária, como descrito na seção 3.5, um *shaker* inercial foi posicionado na face inferior da barra, oposto ao sensor em L1, como pode ser visto na Fig. 24.

Com a excitação realizada pelo *shaker* na direção z, foi possível obter função de resposta em frequência, visível na Fig. 25. Nesse gráfico, se encontram as respostas de aceleração em relação à entrada do *shaker*, as 3 curvas representando os pontos P1, B2 e L2, todas no sentido z negativo. Nele podemos ver algumas frequências específicas demonstrando picos, como 90Hz, onde as 3 curvas apresentam ressonância (mesmo que menos evidente na posição P1); ou 186,6Hz, onde apenas o ponto L2 mostra uma grande excitação. Finalmente, algumas frequências maiores também demonstram amplitudes elevadas, principalmente no ponto L2 e P1, sendo elas 318Hz e 567Hz. Como a figura mostra a parte imaginária das FRFs, é possível observar simultaneamente os picos de ressonância (em escala linear) e seus respectivos ângulos de fase, o que evidencia os modos de vibrar. Os dados dos acelerômetros foram obtidos para todos os pontos ensaiados e

Figura 24: Esquema do eixo de destes destacando a posição dos acelerômetros e a sua nomenclatura.

Figura 25: Função de resposta em frequência dos pontos L2, B2 e P1.

podem ser usados para obter diagramas dos modos de vibrar da estrutura do eixo, como será demonstrado a seguir.

Também foi realizada a análise da densidade espectral de potência dos dados

obtidos pelos extensômetros posicionados no eixo, que demonstram um pico no valor de frequência de 120Hz, como pode ser visto na Fig. 26. Este gráfico vai até a frequência de 380Hz, devido ao fato que a taxa de aquisição do sistema é de 760Hz.

Figura 26: Gráfico de densidade espectral de potência dos extensômetros.

As Fig. 27, Fig. 28 e Fig. 29 mostram uma representação do modo de vibrar que ocorre na frequência de 90Hz no eixo de testes. Nelas, a curva em azul apresenta a silhueta do eixo, com a linha preta traço-ponto destacando o seu eixo de simetria. Os círculos verdes indicam a posição dos acelerômetros estacionária na superfície desse eixo enquanto os círculos vermelhos mostram o deslocamento deles nessa frequência. Esse deslocamento foi multiplicado por um fator de escala para permitir a sua visualização. Finalmente as flechas em vermelho mostram o deslocamento dos pontos com sensores da sua posição original para a excitada. A Fig. 27 mostra essa representação de forma bidimensional no plano XZ enquanto a Fig. 28 utiliza o plano XY e finalmente a Fig. 29 apresenta uma vista isométrica, possibilitando a visualização de mais detalhes. Já as Fig. 30, Fig. 31 e Fig. 32 mostram uma representação do modo de vibrar que ocorre na frequência de 186,6Hz no eixo de testes.

Figura 27: Visualização dos modos de vibrar do eixo de testes em 90Hz (Plano XZ).

Figura 28: Visualização dos modos de vibrar do eixo de testes em 90Hz (Plano XY).

Figura 29: Visualização dos modos de vibrar do eixo de testes em 90Hz (Vista isométrica).

Figura 30: Visualização dos modos de vibrar do eixo de testes em 186,6Hz (Plano XZ).

Figura 31: Visualização dos modos de vibrar do eixo de testes em 186,6Hz (Plano XY).

Figura 32: Visualização dos modos de vibrar do eixo de testes em 186,6Hz (Vista isométrica).

4.5 Ensaio durante processo real de usinagem

No teste realizado durante uma operação de usinagem real em um torno Romi, descrito na seção 3.6, o *blank* foi usinado, enquanto os dados dos extensômetros posicionados no eixo e do dinamômetro no porta-ferramentas foram obtidos e podem ser vistos na Fig. 33. A escala usada na curva (a) desta figura vai de 0 a 1023, devido ao fato que o ADC utilizado é de 10bits. O valor de 0 indicaria que a entrada do ADC é equivalente ao terra do circuito e um valor de 1023 indica um valor de entrada de 5V no ADC, dessa forma, cada unidade de variação da deformação nessa escala se equivale a 4,9mV. O perfil dos gráficos é semelhante, fato que mostra o bom resultado dos dados obtidos pelo sistema de testes. A taxa de aquisição desses dois testes foram obtidas empiricamente, com a do sistema de extensômetros coincidindo com os 760Hz esperados enquanto o dinamômetro operou em uma taxa de aquisição de 66,9Hz.

Figura 33: Comparação entre os resultados dos extensômetros (a) e dinamômetro (b) durante a usinagem do *blank*.

Essa comparação também prova a capacidade do sistema de obter os dados de força de corte durante a usinagem, e, como pode ser visto na Fig 34, é possível realizar a calibração dos sensores de tensão;deformação para que a sua leitura seja em termos de torque ou mesmo força (combinando informações deste sensor com os dados do CNC, como o raio atual da peça). Para isso, os dois sinais foram submetidos a um filtro passa-baixa e o valor médio do seus estados permanentes antes e durante a usinagem foram usados para encontrar uma equação de conversão, assim como o raio médio durante esse passe. Com essa conversão aplicada, temos o gráfico (c), onde os dois sinais são praticamente idênticos. Essa relação mostra que esse sistema é capaz de ser usado como um sensor indireto para a obtenção de força de corte, baseado no conceito de *virtual sensing*.

Figura 34: Resultados do ensaio de usinagem após aplicação de filtro passa-baixa: Extensômetro (a) Dinamômetro (b) Comparação entre Extensômetro após ajuste para Newton e Dinamômetro (c).

Para verificar a calibração do sistema de extensômetros feita na Fig. 34, a mesma constante linear foi aplicada em dois outros ensaios realizados, como pode ser visto na Fig. 35, que compara o resultado dessa calibração para três processos. Além disso, o valor obtido pelos extensômetros foi também dividido pelo raio médio durante o respectivo processo de usinagem. A curva azul de cada gráfico mostra o valor medido pelos extensômetros já calibrado e a curva verde mostra o valor obtido pelo dinamômetro que mede a força tangencial ao eixo que está sendo usinado, chamado pelo dinamômetro como Y. O primeiro deles, (a), foi o mesmo conjunto de dados utilizado para a Fig. 34, e como a calibração foi realizada em relação à essas duas curvas, o erro é mínimo. No caso das outras duas

curvas (b) onde não ocorre *chatter* e (c) onde existe a ocorrência de *chatter*, ainda assim podemos ver que, desde que o raio da usinagem seja levado em consideração, a calibração realizada ainda é válida.

Figura 35: Resultados da calibração para 3 passes da ferramenta: Ensaio mostrado na Fig. 34 #1 (a) Medição normal #2 (b) Medição com *chatter* (c).

A Fig 36 mostra a comparação entre três testes de usinagem distintos obtidos pelos extensômetros do eixo de testes. As curvas em verde e vermelho mostram processos de usinagem com níveis de vibração aceitáveis. Por outro lado, a curva em azul permite a visualização de uma usinagem com a ocorrência de *chatter*, no qual fica claro que os níveis de vibração são extremos, havendo inclusive reversão no torque medido pelos extensômetros.

Figura 36: Comparação entre ensaios de usinagem com e sem *chatter*, dados obtidos pelos extensômetros do eixo de testes.

Utilizando os resultados de calibração encontrados na Fig. 35, é possível transformar os valores de deformação vistos na Fig. 36 para força de corte em newton, como pode ser visto na Fig. 37. Como pode ser visto na Tabela 1, diferentes diâmetros foram usados nas usinagens apresentadas nesse capítulo. Devido ao diâmetro da usinagem que apresentou *chatter* ser consideravelmente maior que das outras duas, a sua força de corte não é tão elevada em comparação as outras usinagens, mostradas na Fig. 37, quando considerando a mesma comparação para as deformações.

A partir dos resultados obtidos na Fig 36, é possível obter algumas métricas que podem ser usadas na detecção de *chatter* em tempo real. Algo que visivelmente ocorre nesse gráfico, no caso da usinagem com *chatter*, é o fato de os níveis de deformação se tornarem inferiores à deformação de regime permanente, ou seja, há reversão no torque. O valor médio da região de regime permanente foi zerado nessa análise, enquanto o valor de mínimo da deformação com *chatter* chega a -100 na escala usada pelo ADC, onde cada unidade vale 4,9mV, atingindo valores inferiores a 0 durante o processo da usinagem. Esse fato indica uma grande variação da torção aplicada no eixo, sendo consistente com a ocorrência de *chatter*. Outra mudança na resposta do sistema que pode ser observado no caso de *chatter* é o deslocamento da frequência de pico, como pode ser visto na Fig. 38. Esse fato pode também ser utilizado para a determinação de *chatter*, desde que se saiba a frequência de pico para uma situação onde *chatter* não ocorra.

Figura 37: Comparação entre ensaios de usinagem com e sem *chatter*, dados obtidos pelos extensômetros do eixo de testes e convertidos para força de corte.

Figura 38: Comparação entre ensaios de usinagem com e sem *chatter*, dados obtidos pelos extensômetros do eixo de testes e mostrados no domínio da frequência.

Uma métrica já utilizada em processos industriais para a detecção de falhas em rolamentos é a observação do fator de crista do sinal em sinais de vibração (ROBINSON et al., 2017). O fator de crista de um sinal é obtido através da relação entre o seu valor de pico e o seu valor RMS, onde o valor de pico é o ponto de maior amplitude atingido pelo sinal e o valor RMS, que representa a raiz do valor quadrático médio ou valor eficaz, é obtido através da média do quadrado de cada um dos valores em um vetor, e a sua subsequente radiciação. Após a obtenção do fator de crista, ele é comparado de forma simples com um valor limite para a determinação de falhas em rolamentos. Na Tabela 1, pode-se observar vários atributos, incluindo os fatores de crista, para as curvas mostradas na Fig. 36, e podemos ver que esse número também varia com a intensidade da usinagem: A usinagem com *chatter* possui o maior fator de crista em 2,52, a usinagem sem *chatter* #1 possui um fator de 2,03, levemente superior ao fator da usinagem sem *chatter* #2, que foi realizada com força de corte reduzida. Um atributo que aparenta ser um melhor indicador da ocorrência de *chatter* é o Valor RMS, sendo dobrado na usinagem onde ocorreu *chatter*.

Tabela 1: Atributos medidos em diferentes usinagens.

Medição	Diâmetro (mm)	Mínimo	Máximo	Valor RMS	Fator de Crista
com <i>chatter</i>	91	-109	318	126,12	2,52
sem <i>chatter</i> #1	59	-12	138	67,71	2,03
sem <i>chatter</i> #2	63	3	117	61,38	1,90

Nesse ensaio, também foram instalados dois acelerômetros, um no porta-ferramenta e um no mancal do eixo. Apesar de que esse tipo de sensor pode ser usado para determinar a ocorrência de vários fenômenos, eles não são capazes de medir a força de corte, devido a sua capacidade de obter apenas valores dinâmicos e não estáticos.

5 CONCLUSÃO

Esse projeto teve como intenção a construção de um sistema de sensoriamento sem fio a ser posicionado diretamente no eixo rotativo de uma máquina ferramenta, capaz de medir esforços dinâmicos e transmitir esses valores para um computador em tempo real para a sua análise, possibilitando a detecção de *chatter* e possíveis falhas em rolamentos.

O primeiro passo foi a escolha e desenvolvimento de um sistema capaz de realizar a transmissão sem fio de dados a partir de um eixo que está girando em altas frequências para um receptor estacionário. O sistema escolhido foi o que envolve o uso de um anel de LEDs posicionados no eixo que são controlados pelo sinal serial contendo a informação a ser transmitida. Um sensor de luminosidade estacionário detecta e traduz essa informação luminosa de volta para um sinal serial no computador responsável pela leitura.

Quanto ao sensor a ser utilizado, decidiu-se utilizar um conjunto de extensômetros, pois esses conseguem obter as informações dinâmicas mesmo em altas frequências mas também são capazes de determinarem a deformação, e portanto, o torque sendo aplicado no eixo.

Para que os dados obtidos pelos extensômetros possam ser transmitidos como planejado, utilizando protocolo serial, é necessário que eles sejam digitalizados. Um sistema capaz dessa digitalização, e escolhido parcialmente pelo seu baixo custo e fácil utilização, é o Arduino. Ele é capaz de realizar a leitura de dados analógicos desde que esses variem de 0 a 5V, podendo então processá-los e enviá-los no formato serial. Além de um Arduino também é necessário um amplificador, pois o sinal de saída dos extensômetros é de baixa intensidade. Com esse amplificador configurado corretamente, torna-se possível que o Arduino leia os valores dos sensores corretamente.

Com um protótipo do sistema construído foram realizados diversos testes, como a verificação da comunicação de dados e a sua frequência de transmissão, a análise da resposta do sistema para uma entrada conhecida e o seu uso durante um processo de usinagem real, incluindo a presença de *chatter*.

Os resultados mostraram que o sistema é capaz de realizar medições em tempo real durante um processo de usinagem, permitindo a aquisição de dados diretamente de sensores posicionados no eixo em rotação. Esses sensores se mostraram capazes de diferenciar uma usinagem na qual ocorreu *chatter* de uma usinagem normal. Também podem ser usados para a determinação da força de corte, como pode ser visto claramente na Fig. 35 e possivelmente a detecção de falhas em rolamentos para a aplicação de manutenção preditiva.

5.1 Trabalhos Futuros

Possíveis trabalhos que podem ser realizados no futuro de forma a validar o protótipo construído neste projeto:

- Utilização do protótipo para a avaliação da vida da ferramenta e identificação de falhas em rolamentos.
- Aplicação do sistema diretamente em um eixo-árvore de uma máquina ferramenta.
- Utilização do sistema desenvolvido nesse projeto, em conjunto com outros sensores, para a incorporação em uma fábrica inteligente.

REFERÊNCIAS

AMIRAT, Y. et al. A brief status on condition monitoring and fault diagnosis in wind energy conversion systems. **Renewable and sustainable energy reviews**, Elsevier, v. 13, n. 9, p. 2629–2636, 2009.

ARDUINO. **analogRead Arduino Reference**. 2017. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/reference/en/language/functions/analog-io/analogread/>>.

ARTHUR, H.; MORRIS, S.; TERHUNE, E. A. **Slip ring**. [S.l.]: Google Patents, 1949. US Patent 2,473,526.

BORGIA, E. The internet of things vision: Key features, applications and open issues. **Computer Communications**, Elsevier, v. 54, p. 1–31, 2014. ISSN 01403664. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.comcom.2014.09.008>>.

BRETTEL, M. et al. How Virtualization, Decentralization and Network Building Change the Manufacturing Landscape: An Industry 4.0 Perspective. **International Journal of Information and Communication Engineering**, v. 8, n. 1, p. 37–44, 2014. ISSN 22128271. Disponível em: <<http://waset.org/publications/9997144>>.

CLARK, A. **Principles of digital data transmission**. John Wiley & Sons Canada, Limited, 1983. ISBN 9780470274583. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=FVBrAAAAMAAJ>>.

DEANE, P. **The First Industrial Revolution**. Cambridge University Press, 1979. ISBN 9780521296090. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=eMBG_soDdNoC>.

DIAZ, M. et al. Stability-based system for bearing fault early detection. **Expert Systems with Applications**, Elsevier, v. 79, p. 65–75, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2017.02.030>>.

DIMLA, D.; LISTER, P. On-line metal cutting tool condition monitoring. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 40, n. 5, p. 769–781, 2000. ISSN 08906955.

GARRAUD, A. et al. Electrodynamic wireless power transmission to rotating magnet receivers. In: IOP PUBLISHING. **Journal of Physics: Conference Series**. [S.l.], 2014. v. 557, n. 1, p. 012136.

GOYAL, D.; PABLA, B. S. Condition based maintenance of machine tools — A review. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, v. 10, p. 24–35, 2015. ISSN 1755-5817. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cirpj.2015.05.004>>.

GROUP, I. . W. **Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0**. 2013. Disponível em: <http://www.acatech.de/fileadmin/user_upload/Baumstruktur_nach_Website/Acatech/root/de/Material_fuer_Sonderseiten/Industrie_4.0/Final_report___Industrie_4.0_accessible.pdf>.

HAYAT, K.; HA, S. K. **Noncontact Sensing with Rotary Optical Radial Coupler (RORC) using C Radial Coupler Coupler (RORC) using C-lens**. 2012. Disponível em: <http://wwwr.kanazawa-it.ac.jp/MSRL/Proceedings_cdw/Session\%2011/11-3\%20Khazar\%20Hayat.pdf>.

HERMANN, M.; PENTEK, T.; OTTO, B. Design principles for industrie 4.0 scenarios. **Proceedings of the Annual Hawaii International Conference on System Sciences**, v. 2016-March, p. 3928–3937, 2016. ISSN 15301605. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1109/HICSS.2016.488>>.

HILL, K. O.; MELTZ, G. Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview. **Journal of Lightwave Technology**, v. 15, n. 8, p. 1263–1276, 1997. ISSN 07338724. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1109/50.618320>>.

HOFFMANN, K. An introduction to measurements using strain gauges. Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, 1989.

IGBA, J. et al. Analysing rms and peak values of vibration signals for condition monitoring of wind turbine gearboxes. **Renewable Energy**, Elsevier, v. 91, p. 90–106, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.01.006>>.

KAISER, K. M. **A simulation study of predictive maintenance policies and how they impact manufacturing systems**. [S.l.]: The University of Iowa, 2007.

KHARCHE, P. P. Review of Fault Detection in Rolling Element Bearing. **International Journal of Innovative Research in Advanced Engineering**, v. 1, n. 5, p. 169–174, 2014.

KIM, S. et al. Wireless sensor networks for structural health monitoring. In: **ACM. Proceedings of the 4th international conference on Embedded networked sensor systems**. 2006. p. 427–428. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1145/1182807.1182889>>.

KUO, S. M.; ZHOU, M. Virtual sensing techniques and their applications. **2009 International Conference on Networking, Sensing and Control**, p. 31–36, 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1109/ICNSC.2009.4919241>>.

LAD, B. K.; KULKARNI, M. S. Optimal maintenance schedule decisions for machine tools considering the user's cost structure. **International Journal of Production Research**, Taylor & Francis, v. 50, n. 20, p. 5859–5871, 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/00207543.2011.632503>>.

LAURO, C. H. et al. Monitoring and processing signal applied in machining processes - A review. **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation**, v. 58, p. 73–86, 2014. ISSN 02632241.

LEE, J.; BAGHERI, B.; KAO, H.-A. A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems. **Manufacturing Letters**, Elsevier, v. 3, p. 18–23, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2014.12.001>>.

LEWIS, N. et al. Friction, wear, and noise of slip ring and brush contacts for synchronous satellite use. **IEEE Transactions on Parts, Hybrids, and Packaging**, IEEE, v. 9, n. 1, p. 15–22, 1973. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/TPHP.1973.1136708>>.

MANYIKA, J.; DOBBS, R. **Disruptive technologies: Advances that will transform life, business, and the global economy**. McKinsey Global Institute San Francisco, CA, 2013. Disponível em: <<https://www.mckinsey.com/business-functions/digital-mckinsey/our-insights/disruptive-technologies>>.

MOKYR, J. **The Second Industrial Revolution, 1870-1914**. 1998. Disponível em: <<https://cpb-us-e1.wpmucdn.com/sites.northwestern.edu/dist/3/1222/files/2016/06/The-Second-Industrial-Revolution-1870-1914-Aug-1998-1ubah7s.pdf>>.

NAETS, F.; COSCO, F.; DESMET, W. Improved human-computer interaction for mechanical systems design through augmented strain/stress visualisation. **International Journal of Intelligent Engineering Informatics**, Inderscience Publishers (IEL), v. 5, n. 1, p. 50–66, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1504/IJIEI.2017.082565>>.

NITTA, Y. et al. United States Patent (5,818,188). n. 19, 1998. Disponível em: <<http://patents.com/us-5818188.html>>.

PAEK, J. et al. The performance of a wireless sensor network for structural health monitoring. **Center for Embedded Network Sensing**, 2004. Disponível em: <<https://escholarship.org/uc/item/9bf7f3n5>>.

PARK, K. **Impact of mobility: Doppler frequency shift and fading**. 2010. Disponível em: <https://www.cs.purdue.edu/homes/park/cs422-datalink_wireless-2-11f.pdf>.

PRIYA, S.; INMAN, D. J. **Energy harvesting technologies**. [S.l.]: Springer, 2009. v. 21.

QI, J. et al. Advanced internet of things for personalised healthcare systems: A survey. **Pervasive and Mobile Computing**, Elsevier B.V., v. 41, p. 132–149, 2017. ISSN 15741192. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.pmcj.2017.06.018>>.

QUINTANA, G.; CIURANA, J. Chatter in machining processes: A review. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, Elsevier, v. 51, n. 5, p. 363–376, 2011. ISSN 08906955. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2011.01.001>>.

RAO, S. S.; YAP, F. F. **Mechanical vibrations**. [S.l.]: Prentice Hall Upper Saddle River, 2011. v. 4.

RAPOSO, A. R. et al. A comparison between on-axis and off-axis measurements during machining operations. 11 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.26678/ABCM.COBEM2017.COB17-1697>>.

RENEWICK, J. T.; BABSON, P. E. Vibration analysis—a proven technique as a predictive maintenance tool. **IEEE Transactions on Industry Applications**, IEEE, n. 2, p. 324–332, 1985. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1109/TIA.1985.349652>>.

ROBINSON, J. et al. **IMI Sensors Bearing Fault Detector Model 682B05**. 2017. Disponível em: <http://www.pcb.com/ContentStore/mktg/Downloads/TN-14_BFD_682B05_White_Paper.pdf>.

ROVERSO, D. Empirical ensemble-based virtual sensing—a novel approach to oil-in-water monitoring. In: **Oil-in-Water Monitoring Workshop, Aberdeen, UK**. [s.n.], 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.1.2350.8009>>.

SARKAR, B. et al. Condition monitoring of high voltage transformers using Fiber Bragg Grating Sensor. **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation**, Elsevier Ltd, v. 74, p. 255–267, 2015. ISSN 02632241. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2015.07.014>.

SELECTUSA. **Machinery and equipment spotlight: The Machinery and Equipment Industry in the United States**. 2017. Disponível em: <https://www.selectusa.gov/machinery-and-equipment-industry-united-states>.

SEVERINO, R. et al. A wireless sensor network platform for structural health monitoring: enabling accurate and synchronized measurements through cots+ custom-based design. **IFAC Proceedings Volumes**, Elsevier, v. 43, n. 17, p. 375–382, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.3182/20100908-3-PT-3007.00084>.

SHAKYA, P.; DARPE, a. K.; KULKARNI, M. S. Vibration-based fault diagnosis in rolling element bearings : ranking of various time , frequency and time-frequency domain data-based damage identification parameters. **The International Journal of Condition Monitoring**, v. 3, n. 2, p. 1–10, 2013.

SIDDHPURA, M.; PAUROBALLY, R. A review of chatter vibration research in turning. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, Elsevier, v. 61, p. 27–47, 2012. ISSN 08906955. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2012.05.007>.

SILVA, M. M. da et al. Experimental results on chatter reduction in turning through embedded piezoelectric material and passive shunt circuits. **Mechatronics**, Elsevier, v. 29, p. 78–85, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2015.06.002>.

STATISTA. **Global production value of machine tools from 2011 to 2015 (in billion U.S. dollars)**. 2015. Disponível em: <https://www.statista.com/statistics/264211/world-production-of-machine-tools/>.

SYSTEMS, R. **3 Amps to 150 VDC Separates**. 2015. Disponível em: <https://rotarysystems.com/slip-rings/product/12-circuits-to-3-amps-separates/>.

TEXAS INSTRUMENTS. **INA12x Precision, Low-Power Instrumentation Amplifiers**. [S.l.], 2018. Disponível em: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina129.pdf>.

TOH, T. et al. Inductive energy harvesting for rotating sensor platforms. In: IOP PUBLISHING. **Journal of Physics: Conference Series**. [S.l.], 2014. v. 557, n. 1, p. 012034.

UGECHI, C. et al. Condition-based diagnostic approach for predicting the maintenance requirements of machinery. **Engineering**, Scientific Research Publishing, v. 1, n. 03, p. 177, 2009.

WANG, J. et al. A virtual sensing based augmented particle filter for tool condition prognosis. **Journal of Manufacturing Processes**, The Society of Manufacturing Engineers, v. 28, p. 472–478, 2017. ISSN 15266125. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.04.014>.

WELLS, P. N. Lord rayleigh: John william strutt, third baron rayleigh. **IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control**, IEEE, v. 54, n. 3, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TUFFC.2007.281>.

YANG, W.; COURT, R. Experimental study on the optimum time for conducting bearing maintenance. **Measurement**, Elsevier, v. 46, n. 8, p. 2781–2791, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2013.04.016>>.

YAO, Z.; MEI, D.; CHEN, Z. On-line chatter detection and identification based on wavelet and support vector machine. **Journal of Materials Processing Technology**, Elsevier, v. 210, n. 5, p. 713–719, 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2009.11.007>>.

ZHANG, S. et al. A review of machine-tool vibration and its influence upon surface generation in ultra-precision machining. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, Elsevier, v. 91, p. 34–42, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2015.01.005>>.