

**UNIVERSIDADE NOVE DE JULHO-UNINOVE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
PRODUÇÃO**

THYAGO BACHIM

**PROPOSIÇÃO DE UM SISTEMA IOT (*INTERNET OF THINGS*) PARA
GERENCIAMENTO DE SPINDLES EM OPERAÇÃO**

SÃO PAULO

2020

**UNIVERSIDADE NOVE DE JULHO-UNINOVE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
PRODUÇÃO**

THYAGO BACHIM

**PROPOSIÇÃO DE UM SISTEMA IOT (*INTERNET OF THINGS*) PARA
GERENCIAMENTO DE SPINDLES EM OPERAÇÃO**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Nove de Julho - UNINOVE, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Produção.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Fernando Rodrigues Pinto

SÃO PAULO

2020

Bachim, Thyago.

Proposição de um sistema IoT (Internet of Things) para gerenciamento de spindles em operação. / Thyago Bachim. 2020. 138 f.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Nove de Julho - UNINOVE, São Paulo, 2020.

Orientador (a): Prof. Dr. Luiz Fernando Rodrigues Pinto.

1. Máquinas-ferramentas. 2. Manutenção. 3. Spindle e internet das coisas. 4. Indústria 4.0.

I. Rodrigues Pinto, Luiz Fernando. II. Título

CDU 658.5



PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE

Thyago Bachim

Título da Dissertação: Proposição de um Sistema IOT (Internet Of Things) para Gerenciamento de Spindles em Operação.

A Comissão examinadora, composta pelos professores abaixo, considera o(a) candidato(a) Thyago Bachim **aprovado**.

São Paulo, 26 de novembro de 2020.

Prof(a). Dr(a). Luiz Fernando Rodrigues Pinto (UNINOVE / PPGEP) - Orientador

Prof(a). Dr(a). Rodrigo Franco Gonçalves (UNIP / PPGEP) - Membro Externo

Prof(a). Dr(a). Fabio Henrique Pereira (UNINOVE / PPGEP) - Membro Interno

Dedico este trabalho aos meus amados filhos Thomás e Pedro que participaram ativamente deste trabalho, com suas brincadeiras durante a escrita. E em especial para a minha esposa Priscila, sem ela, não seria possível.

AGRADECIMENTOS

A toda minha família, em especial minha esposa Priscila e aos meus filhos Thomás e Pedro pelo tempo cedido para realização desta dissertação e concretização de um sonho. Eu amo vocês.

DEUS, por nos dar saúde, paz e sabedoria para continuarmos caminhando em direção a um propósito maior.

Ao meu orientador e amigo Prof. Dr. Mauro Luiz Martens por literalmente me transformar e tornar realidade a minha dissertação, dedicando muito do seu tempo para dirimir minhas inconsistências. Meu eterno agradecimento a sua parceria e com certeza estaremos juntos em novos projetos.

Ao Prof. Dr. Luiz Fernando Rodrigues Pinto por acreditar no projeto e me apoiar na caminhada desta dissertação. O meu muito obrigado por aceitar o desafio.

Aos Prof. Dr. Rodrigo Franco Gonçalves, Prof. Dr. Fábio Henrique Pereira e Prof. Dr. Walter Sátyro que foram fundamentais para o refinamento da dissertação com suas perfeitas sugestões de melhorias.

A SKF, empresa a qual tenho muito orgulho de fazer parte e que sempre contribuiu para o meu desenvolvimento acadêmico e profissional permitindo-me estar na vanguarda da tecnologia.

Ao meu amigo MSc. Ernani J. F. L. Enke, grande companheiro nas disciplinas e que mostrou os caminhos do mundo acadêmico.

A UNINOVE por toda a estrutura disponibilizada durante o curso bem como aos professores e colegas aos quais tive oportunidade de aprender.

A POLITECNICO DI BARI pela ótima recepção durante a realização do módulo internacional.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior – CAPES, pela concessão da bolsa de estudos durante a realização desta dissertação.

“Não se amoldem ao padrão deste mundo, mas transformem-se pela renovação da sua mente, para que sejam capazes de experimentar e comprovar a boa, agradável e perfeita vontade de Deus.”

A Bíblia - Romanos 12:2 NVI

RESUMO

Com o desenvolvimento dos processos produtivos ao longo das últimas décadas, as máquinas-ferramentas foram evoluindo e hoje é impossível não visualizar no dia-a-dia as novas facilidades oriundas das evoluções tecnológicas, a mais atual, chamada de Quarta Revolução Industrial ou Indústria 4.0 (I 4.0). Por ser algo tão relevante, se tornou um diferencial competitivo em todos os mercados e não será diferente na indústria nem tão pouco em suas áreas operacionais. Estimar quando haverá a falha prévia de qualquer máquina é fundamental para a maximização dos resultados da companhia e conseqüentemente a minimização dos custos operacionais. Neste sentido, esta pesquisa teve como objetivo propor um sistema IoT (internet das coisas) para gerenciamento online de spindles em operação, para prover dados confiáveis para a gestão da manutenção no contexto da indústria 4.0. A avaliação da aplicação do artefato em uma indústria automotiva se deu por meio do método *design science research*, a qual foi definida como método de pesquisa. Desta forma, foi desenvolvido um artefato do tipo método através da revisão sistemática da literatura e criado uma proposta para implementação de um sistema de monitoramento online em spindles o qual foi demonstrado e avaliado chegando-se à validação do artefato tipo método na indústria automotiva. Os resultados desta pesquisa contribuem teoricamente com uma extensa revisão sistemática da literatura, com os modelos e métodos aplicados além de desenvolver um artefato do tipo método que pode ser utilizado como instrumento para implantação da indústria 4.0 com a entrega de um planejamento detalhado. Além disso, é demonstrado o comportamento normal do spindle em operação contribuindo tanto para academia como para indústria, no sentido de avanço do conhecimento e prevenção de falhas catastróficas. Pode-se mencionar os trabalhos futuros oriundos da pesquisa que estão relacionados a outro importante conceito da I 4.0, que é a inteligência artificial para realização de prognósticos além, obviamente da replicação do estudo em modelos diferentes de máquinas-ferramentas.

Palavras-chaves: Máquinas-Ferramentas, Indústria 4.0, Manutenção, Spindle e Internet das coisas.

ABSTRACT

With the development of production processes over the last decades, machine tools has been evolving and today it is impossible not to visualize on a daily basis the new facilities arising from technological developments, the most current, called the Fourth Industrial Revolution or Industry 4.0 (I 4.0). Because it is so relevant, it has become a competitive differential in all markets and will not be different in the industry nor in its operational areas. Knowing when there will be the previous failure of any machine is fundamental for the maximization of the company's results and consequently the minimization of operational costs. This research aimed to evaluate a proposal for a IoT (internet of things) system for online management of spindles in operation, to provide reliable data for maintenance management in the context of industry 4.0. The evaluation of the application of the method-type artifact in an automotive industry took place through design science research, which was defined as a research method. Thus, a artifact was developed through the systematic review of the literature and a proposal was created for the implementation of an online monitoring system in spindles, which was demonstrated and evaluated arriving at the validation of the method-type artifact in the automotive industry. The results of this application contribute theoretically with an extensive systematic review of the literature, with the models and methods applied besides developing a method-type artifact that can be used as a tool for the implementation of the 4.0 industry with the delivery of a detailed planning. In addition, the normal behavior of the spindle in operation is demonstrated, contributing to both academia and industry in the sense of advancing knowledge and preventing catastrophic failures. It is possible to mention the future works arising from the research are related to another important concept of I 4.0, which is the artificial intelligence to perform prognostics in addition, obviously, to the replication of the study in different models of machine tools

Keywords: Machine Tools, Industry 4.0, Maintenance, Spindle, Internet of things

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fases de Pesquisa da DSR.....	25
Figura 2 - Evolução das máquinas-ferramentas	38
Figura 3 - Sensores em Máquinas-Ferramentas	42
Figura 4 - Principais Componentes do Spindle.....	45
Figura 5 - Frequência de Falhas de Componentes.....	49
Figura 6 - Componentes do teste monitoramento de Holub e Hammer.....	52
Figura 7 - Modelo de Rastegari, Archenti e Mobinet.....	53
Figura 8 - Modelo de Żabiński <i>et al.</i>	54
Figura 9 - Modelo de Liu <i>et al.</i>	55
Figura 10 - Componentes utilizados por Diaz-Rozo, Bielza e Larrañaga.....	56
Figura 11 - Arquitetura SOA desenvolvida por Zhong, Wang e Xu.....	57
Figura 12 - Estrutura HSM-CMPT de Deng <i>et al.</i>	58
Figura 13 - Extração de dados de Frieß <i>et al.</i>	59
Figura 14 - Modelo de medição com a máquina em operação.....	60
Figura 15 – Proposta teórica do Sistema IoT para gerenciamento de spindles em operação (SIGSO).....	61
Figura 16 - Máquina Chiron DZ 18	69
Figura 17 - Biela e região de usinagem	70
Figura 18 - Posicionamento do spindle e Servo motor	70
Figura 19 - Imagem Interna dos Spindles Chiron DZ 18.....	72
Figura 20 - Cabos dos Sensores com 15 metros.....	73
Figura 21 - Dispositivo de Fixação do Sensor	74
Figura 22 - Sensor de Vibração SKF CMSS 2200	75
Figura 23 - Comprimento do cabo inadequado.....	76
Figura 24 - Dispositivo de Fixação do Sensor	76
Figura 25 - Indicação do Cabo, Dispositivo e sensor.....	77
Figura 26 - Spindles com Sensores Posicionados.....	78
Figura 27 - SKF Multilog IMx-8	78
Figura 28 - Local ideal de posicionamento IMx-8	80
Figura 29 - IMx-8 no painel da máquina	80
Figura 30 - Comunicação com a rede internet.....	81
Figura 31 - Pontos de Coleta de dados de monitoramento.....	82

Figura 32 - Indicação do início do monitoramento Spindle 1 e Spindle 2	83
Figura 33 - <i>Dashboard</i> de gestão à vista	84
Figura 34 - Conexão do usuário com a plataforma	85
Figura 35 - Evidência de Alteração do Comportamento do Spindle 1	87
Figura 36 - Evidência de Alteração do Comportamento do Spindle 2	88
Figura 37 - Sistema IoT para gerenciamento de spindles em operação validado (SIGSO)	89
Figura 38 - Fluxo para planejamento e aplicação do sistema de monitoramento <i>on-line</i> (SIGSO)	93
Figura 39 - Artigos publicados por ano	116
Figura 40 - Países dos autores presentes nas publicações dos artigos	117
Figura 41 - Autores com mais publicações	117
Figura 42 - Journals dos artigos	118
Figura 43 - Afiliações dos artigos	119
Figura 44 - Análise de Cluster dos Artigos por Citação	120
Figura 45 - Rede de Ocorrência de Palavras	124

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Procedimento de Pesquisa.....	28
Tabela 2 – Critério utilizados na busca de artigos	31
Tabela 3 – Descrição das Etapas do sistema IoT para gerenciamento de spindles em operação	63
Tabela 4 – Contribuições práticas	91
Tabela 5 - Possibilidades de trabalhos de pesquisas futuras	92
Tabela 6 - Modelos de Indústria 4.0 em máquinas-ferramentas identificadas na revisão da literatura.....	126

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1 Justificativa do tema	18
1.2. Problema de pesquisa	20
1.3. Objetivos.....	21
1.3.1 Objetivo geral.....	21
1.3.2 Objetivos específicos.....	21
1.4 Estrutura da dissertação	22
2. MÉTODO DE PESQUISA.....	23
2.1 <i>Design Science Research</i>	24
2.2 Procedimento e Fases da Pesquisa	26
2.2.1 Fase 1 – Investigação do Problema e Motivação.....	27
2.2.2 Fase 2 - Definir o objetivo da solução	30
2.2.3 Fase 3 - Projeto e Desenvolvimento do Artefato	35
2.2.4 Fase 4 – Demonstração	35
2.2.5 Fase 5 – Avaliação.....	36
2.2.6 Fase 6 – Comunicação	36
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	37
3.1 A Indústria 4.0 em máquinas-ferramentas.....	37
3.1.1 Utilização de Internet das Coisas (IoT)	40
3.1.2 Aplicação de sensores em máquinas-ferramentas.....	41
3.1.3 Computação em Nuvem.....	43
3.2 Spindles e sua manutenção.....	44
3.3 Modelos de aplicação de IoT em spindles na indústria	51

4. PROPOSTA TEÓRICA DE SISTEMA IOT PARA GERENCIAMENTO DE SPINDLES EM OPERAÇÃO - SIGSO	61
4.1. Detalhamento das etapas.....	62
4.1.1 Etapa 1: Instalação de Sensores no equipamento.....	62
4.1.2 Etapa 2: Interface entre Equipamento e Nuvem.....	66
4.1.3 Etapa 3: Computação em Nuvem	66
4.1.4 Etapa 4: <i>Software</i> de monitoramento.....	66
4.1.5 Etapa 5: <i>Dashboard</i> para gestão à vista	66
4.1.6 Etapa 6: Integração do usuário Final.....	67
5. APLICAÇÃO DO SISTEMA IOT PARA GERENCIAMENTO DE SPINDLES EM OPERAÇÃO - SIGSO	68
5.1. Demonstração do artefato - Estudo de caso – Aplicação do Sistema IoT na prática 68	
5.1.1 Descrição da Empresa-alvo do estudo de caso.....	68
5.1.2 Demonstração da aplicação do artefato	71
5.1.2.1 Etapa 1: Instalação de Sensores no equipamento.....	71
5.1.2.2 Etapa 2: Interface entre Equipamento e Nuvem	78
5.1.2.3 Etapa 3: Computação em Nuvem.....	80
5.1.2.4 Etapa 4: <i>Software</i> de monitoramento.....	82
5.1.2.5 Etapa 5: <i>Dashboard</i> para gestão à vista.....	84
5.1.2.6 Etapa 6: Integração do usuário final	85
6. RESULTADOS E AVALIAÇÃO DO ARTEFATO	86
7. CONCLUSÕES	94

REFERÊNCIAS.....	96
APÊNDICE A – DADOS ADICIONAIS DE REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA	116
APÊNDICE B – MODELOS DE INDÚSTRIA 4.0 EM MÁQUINAS-FERRAMENTAS IDENTIFICADOS NA REVISÃO DA LITERATURA	126
ANEXO 1 – DECLARAÇÃO DA EMPRESA.....	138

1. INTRODUÇÃO

Com o desenvolvimento dos processos produtivos ao longo das últimas décadas, as máquinas de usinagem foram evoluindo e chegaram ao conceito de máquinas de usinagem *Computer Numerical Control* (CNC) com alto desempenho, além de elevada produtividade na indústria de uma forma geral. Xu (2017) apresenta a evolução dessas máquinas em cada uma das revoluções industriais e propõe o modelo de *Machine Tools 4.0* indicando-o como a transformação necessária, no parque atual de máquinas, para a implantação de *smart factories* com conceitos da indústria 4.0.

Contudo é preciso entender a evolução da indústria brasileira nos últimos anos. Segundo um levantamento realizado por Simon (2015), à revista *Máquinas & Metais*, para o XIII Inventário: as máquinas-ferramentas para usinagem instaladas no parque industrial brasileiro, haviam 25.532 centros de usinagem instalados em um universo de 10.209 empresas consultadas. Deste volume de máquinas, cerca de 68% possuíam idade entre 0 a 10 anos; e o restante, de 10 a 20 anos. Com isso, pôde-se observar uma quantidade interessante de máquinas-ferramentas que precisará se adequar à quarta revolução industrial.

No contexto do parque de máquinas, Mourtzis, Milas e Athinaios (2018) mencionam sobre a vida útil de um equipamento industrial ser em torno de 30 anos e, conseqüentemente, essas máquinas não foram concebidas com tecnologia para integração de dados em outras plataformas, sendo necessário o esforço de todos em transformar cada máquina ou subcomponente em um dispositivo IoT (*Internet of things*) para se obter a conectividade necessária para estabelecimento deste novo conceito de máquinas 4.0. Liu *et al.* (2017) fazem considerações similares porque entendem que é preciso realizar mais pesquisas em ambientes industriais para entender quais máquinas realmente possuem capacidade de se comunicar. Sobretudo, comentam que existem muitas máquinas-ferramentas sendo operadas com sistemas desatualizados.

Entre as indústrias que mais possuem máquinas-ferramentas em seus processos produtivos estão as fábricas de produção de motores a combustão para automóveis, máquinas agrícolas e geradores. Na indústria automotiva, principalmente, com a evolução dos materiais, foram desenvolvidos motores em

alumínio e alguns com apenas 3 cilindros, assim, entregando o mesmo desempenho com uma redução de peso significativa e subcomponentes com alto desempenho. Curcio (2016) indica, na Revista *Automotive Business*, que as empresas Renault, Volkswagen, Ford, Hyundai, Nissan, FCA e Grupo PSA migraram para essa nova tecnologia.

Para a usinagem do alumínio é necessário que uma máquina CNC trabalhe com rotações e velocidades de corte bem superiores às da usinagem dos tradicionais blocos de ferro fundido. Com isso, faz-se necessário máquinas que sejam rápidas para atender à exigência de processo. Os fabricantes nacionais, até então, possuem poucas soluções em máquinas *high speed* com esta *performance* e, conseqüentemente, é preciso que sejam importadas de países como Alemanha, Estados Unidos, Japão, Itália ou China, com custos elevados. Dentro das linhas de fabricação de motores e subcomponentes, a maioria das máquinas-ferramentas foi importada ou montada no Brasil com desenvolvimento de empresa estrangeira (BERTASSO, 2012).

Para atingir as necessidades de processo, um dos componentes principais das máquinas-ferramentas é o spindle. O spindle é o responsável pela fixação da ferramenta de corte, rotação de trabalho, torque e acabamento da peça, entre outras funcionalidades, conforme citado por Abele, Altintas e Brecher (2010). Trata-se de um componente altamente complexo, pois em um só equipamento estão reunidos conhecimentos em elétrica, eletrônica, mecânica de alta precisão, lubrificação, fixação de ferramentas, hidráulica e pneumática. Por ser imprescindível à máquina-ferramenta, Cao, Zhang e Chen (2017) propõem o conceito de spindles inteligentes, que se poderão autoajustar para as necessidades de processo, bem como indicar necessidades de manutenção por meio de prognósticos baseados em sua condição real, o que será observado por meio de sensores provenientes da internet das coisas e computação na nuvem.

Para atingir a esses requisitos em parques já existentes, Holub e Hammer (2017) desenvolveram testes de monitoramento *on-line* de vibração em spindles, eles verificaram, durante os testes, um comparativo em bancada para identificar a diferença entre a medição *on-line* e *off-line*, mas com testes em vazio, ou seja, sem carga de usinagem. Tais testes indicam um caminho para apresentar aos times de manutenções a possibilidade de analisar a condição remotamente, mediante o

monitoramento *on-line* e, assim, obter previsão de parada de máquinas. O monitoramento *on-line* é algo que, na indústria automotiva, é pouco aplicado por ser uma tecnologia que se vem desenvolvendo nos últimos anos, constatando-se aqui um *gap* de pesquisa a ser explorado, especialmente, em spindles em operação. Ayad, Terrissa e Zerhouni (2017) apresentam como a internet das coisas apoiará o time de manutenção para realização do *Prognostics and health management* – Gerenciamento da saúde e prognósticos (PHM), tratando-o como chave para a manutenção preditiva dos ativos de uma *smart factory*.

Observa-se uma grande preocupação com a vida útil dos spindles, Deng *et al.* (2018) indicam que, com o rápido desenvolvimento das tecnologias habilitadoras da indústria 4.0, haverá coleta simultânea de diferentes dados, tais como velocidade e vibração para auxiliar na tomada de decisão sobre a condição do spindle em um sistema ciberfísico. Segundo Nagy *et al.* (2018), um sistema ciberfísico é responsável por mapear o mundo físico e o virtual, assim, monitorado os processos físicos e viabilizando a descentralização da tomada de decisão da operação.

Dessa forma, os times de manutenção das empresas serão responsáveis tanto pela implementação de novas tecnologias nos parques quanto pelo gerenciamento dos ativos nesse novo cenário. Cabe aos gestores de manutenção entenderem como poderão ser implementadas as novas tecnologias e como serão realizadas as análises de condição dos spindles. Contudo não há caminhos desenhados para esses gestores se apoiarem e desenvolverem soluções dentro dessas fábricas.

1.1 Justificativa do tema

Com a entrada de novos fabricantes de veículos nos últimos anos, no Brasil, e com os incentivos governamentais para a produção de motores e subcomponentes nacionais, o número de máquinas CNC em território nacional aumentou consideravelmente. Além disso, a origem dos fabricantes é diversa, mantendo e trazendo ao mercado brasileiro diferentes tipos de fabricantes de máquinas e, conseqüentemente, dificultando a vida da equipe de manutenção de máquinas.

É importante observar a constante evolução e empregabilidade de conceitos provenientes da quarta revolução industrial, em que haverá o emprego de novas tecnologias em um parque já existente, para, assim, adaptar-se às condições de

mercado e ser competitivo. Essas atualizações são realizadas também pelo time de manutenção das empresas.

Nesse cenário, em que se observa um parque existente sem as tecnologias da indústria 4.0, é imprescindível o desenvolvimento de novas formas de atuar na gestão da manutenção, mormente, promovendo maior vida útil ao principal componente da máquina-ferramenta, que é o spindle.

Dessa forma, este estudo visa proporcionar, aos gestores de manutenção das linhas de usinagem, alternativas de implantação de soluções relacionadas à indústria 4.0 para o monitoramento da condição do spindle, principalmente, utilizando conceitos de internet das coisas (IoT), sistemas ciberfísicos e computação em nuvem para ser realizada toda a gestão da manutenção com aumento da confiabilidade.

Para que as empresas mantenham sua competitividade no ramo de atuação é inevitável o desenvolvimento de suas operações e integrá-las às tecnologias provenientes da indústria 4.0. Como mencionado no XIII Inventário da Máquinas & Metais, apresentado por Simon (2015), há um parque de centro de usinagem relevante que permanecerá em operação por pelo menos mais 10 anos. Com isso, é preciso desenvolver modelos para implementação das tecnologias provenientes na indústria 4.0, em um cenário já existente, e não apenas em futuros projetos de produto/processo.

Outro anseio constante da comunidade industrial está relacionado à redução constante dos custos de manutenção a partir da melhoria da gestão das operações. Reconhecer quando um spindle iniciará um processo de falha ainda não é uma realidade, porém, se desenvolvido um modelo de monitoramento que possa indicar os indícios de falha, haverá contribuição para a comunidade e avanço na possibilidade de diagnosticar falhas durante a usinagem.

Para que seja atingido tal propósito, é fundamental avançar em um modelo que possa realizar a coleta dos dados *on-line*, com o spindle em operação e com carga de usinagem. Esta é uma dificuldade mencionada por Holub e Hammer (2017) e Rastegari, Archenti e Mobinet (2017) a respeito da qual se pretende avançar no desenvolvimento deste trabalho. Carvalho *et al.* (2019) reforçam a necessidade sobre desenvolver técnicas de sensoriamento para melhorar a quantidade e a qualidade dos dados obtidos, assim, tornando mais clara a implementação de

técnicas preditivas para evitar falhas. Ziada, Yang e DeGroat-Ives (2017) explanam que a obtenção de dados do interior de um spindle é extremamente complexa e ocorre apenas com a sua desmontagem do conjunto ou com o apoio dos fabricantes.

Além disso, a utilização dos conceitos de internet das coisas e computação em nuvem precisa acontecer. Entende-se que, para a indústria 4.0 realmente ser habilitada, os dados precisam fluir da origem, que, neste caso, é o spindle, e seguir até a sala do responsável pelo monitoramento dos dados, sem a intervenção humana no meio desse processo. Lenz, Wuest e Westkämper (2018) mencionam que há várias investigações em curso, em diferentes ambientes, partindo das plataformas *Industrial Internet of Thing* (IIoT) e ambientes em nuvem, porém precisam ser estudadas de forma crítica para justificar os requisitos necessários. Aliás o conhecimento adquirido no chão de fábrica, com a definição dos materiais utilizados para cada aplicação, é extremamente importante para a obtenção de uma visão relevante sobre o tema.

Atualmente, além de não haver a coleta de dados de vibração, sempre, há intervenção humana para qualquer análise relacionada à condição do spindle. Assim, esta pesquisa pretendeu atuar também neste *gap* para reduzir a intervenção humana direta no chão de fábrica. Isso reflete em aumentar a segurança do time de manutenção. Hoje é indispensável uma intervenção humana direta para identificação de possíveis falhas na máquina, muitas vezes, posicionando sensores no spindle e acionando-o com a porta parcialmente aberta. Esse processo, todavia, gera risco ao técnico de manutenção. Já com o monitoramento *on-line*, o risco do time de manutenção da máquina-ferramenta reduzirá significativamente.

1.2. Problema de pesquisa

Como mencionado por Xu (2017), a evolução das máquinas-ferramentas é imprescindível para que seja possível a conexão entre máquinas autônomas e inteligentes. E, como ressaltado por Thoppil, Vasu e Rao (2019), o componente mais crítico de uma máquina-ferramenta é o spindle. Nesse sentido, Cao, Zhang e Chen (2017) indicam, em sua pesquisa, o conceito ideal de spindle inteligente que futuramente será integrado a máquinas-ferramentas, que incluem diversas tecnologias que permitem a integração com fábricas inteligentes. Contudo, hoje,

precisa-se avançar no desenvolvimento do parque atual de máquinas instaladas e entender como podem ser minimizados os custos com a manutenção de spindles, com isso, dando um passo importante no caminho da indústria 4.0, a partir do monitoramento *on-line* de spindles em operação. Holub e Hammer (2017) e Rastegari, Archenti e Mobinet (2017) apresentam testes nesse sentido, porém relatam a dificuldade em identificar possíveis falhas com o spindle em operação.

Dessa forma, esta pesquisa visou avaliar uma proposta de sistema de monitoramento *on-line* em spindle, visto que a utilização de novas tecnologias nos diversos ambientes da indústria é fundamental para o desenvolvimento da quarta revolução industrial, assim, facilitando a implantação dessas tecnologias em larga escala. Por isso é apresentada a questão de pesquisa que foi aplicada ao desenvolvimento deste trabalho: Como um sistema de monitoramento *on-line* de spindle pode identificar a variação no comportamento normal durante o processo de usinagem?

1.3. Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

Propor e testar um sistema *Internet of Things* (IoT) para gerenciamento *on-line* de spindles em operação.

1.3.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos:

- identificar o estado da arte e analisar os conceitos teóricos da indústria 4.0 associados ao gerenciamento de spindles;
- examinar modelos e métodos propostos na literatura sobre sistemas de gerenciamento aplicados a spindles;
- identificar tecnologias da Indústria 4.0 relativas aos sistemas de gerenciamento de spindles;
- desenvolver uma proposta de sistema IoT para gerenciamento *on-line* de spindles em operação;
- avaliar o sistema IoT para gerenciamento *on-line* de spindles em operação proposto.

1.4 Estrutura da dissertação

O texto deste trabalho consiste na dissertação para o mestrado em Engenharia de Produção que está organizado conforme relatado a seguir:

Capítulo 1 – Introdução: apresenta o tema proposto da dissertação com sua contextualização, seguido pela justificativa e o problema de pesquisa, além de indicar os objetivos principal e específicos.

Capítulo 2 – Método de Pesquisa: relata o método utilizado para desenvolvimento da pesquisa, em que é mencionada a Design Science Research incluindo seis fases detalhadas para a sua aplicação que abrangem uma revisão sistemática da literatura e um estudo de caso único com observação participativa.

Capítulo 3 - Fundamentação Teórica: trata dos textos dos principais autores relacionados ao tema da dissertação, correlacionando-os para obtenção do modelo teórico desta pesquisa a partir dos 125 artigos localizados na revisão sistemática da literatura.

Capítulo 4 - Proposta Teórica de Sistema Internet das Coisas (IoT) para Gerenciamento de Spindles em Operação – SIGSO: apresenta o modelo teórico desenvolvido com base na literatura para realização da DSR.

Capítulo 5 – Aplicação do sistema IoT para gerenciamento de spindles em operação- SIGSO: descreve a aplicação do artefato em campo a partir do estudo de caso único com observação participativa.

Capítulo 6 - Resultados e avaliação do artefato: apresenta os resultados da aplicação do artefato, bem como a correlação com os objetivos da pesquisa atingidos.

Capítulo 7 – Conclusões: sintetiza o encadeamento entre teoria e prática, bem como as suas contribuições teóricas e práticas, as oportunidades de trabalhos futuros e as limitações existentes.

2. MÉTODO DE PESQUISA

Nesta seção, apresenta-se a metodologia de pesquisa, sendo a *Design Science Research* (DSR) baseado em Peffers *et al.* (2007), o método que foi utilizado neste trabalho. Trata-se de uma pesquisa com abordagem qualitativa e as fases de pesquisa foram definidas e reforçadas com os conceitos estabelecidos por Dresch, Lacerda e Júnior (2015), Hevner *et al.* (2004) e Peffers *et al.* (2007).

Esse método foi definido como meio para realização da pesquisa, pois abrange tanto o ponto de vista acadêmico como o organizacional, conforme citado por Lacerda *et al.* (2013). Além disso, Dresch, Lacerda e Júnior (2015) destacam que a DSR busca construir e avaliar artefatos com foco na melhoria do estado atual, assim, solucionando problemas específicos e visando diminuir o distanciamento entre a teoria e prática.

Na fase 1 de investigação do problema e motivação, foi realizada uma revisão sistemática da literatura conforme Alcantara e Martens (2019) e a análise de redes feita de acordo com Van Eck e Waltman (2010).

Na fase 2, para definição do objetivo da solução, apoiou-se no desenvolvimento da fundamentação teórica, desse modo, identificando as lacunas de pesquisa para que se direcionasse ao desenvolvimento do artefato.

Na fase 3, que trata do projeto e desenvolvimento do artefato, definiu-se que se trata de um artefato do tipo método, conforme descrito por Dresch, Lacerda e Júnior (2015), em que foram desenvolvidas as etapas para aplicação em campo e a busca por atingir o objetivo proposto.

Na fase 4 expõe-se a demonstração do artefato em campo, assim, seguindo as etapas desenvolvidas no artefato, logo, buscando cumprir e descrever detalhadamente o que ocorreu em cada etapa desta aplicação. Para esta construção, foi utilizado um estudo de caso único com observação participante, conforme relatado por Yin (2015).

Na fase 5 são apresentados os resultados e a avaliação do artefato; e na fase 6 é realizada a comunicação à comunidade, que se dá por meio deste trabalho de dissertação, além de artigos que serão publicados.

2.1 Design Science Research

A DSR tem base na *Design Science* (DS), que é citada por Simon (1996), assim, diferenciando as ciências naturais da ciência artificial. Ele ainda menciona que a artificial é tudo que já foi manipulado pelo homem, dando exemplos de máquinas e organizações. Hevner *et al.* (2004) comentam a DS como uma pesquisa voltada para as necessidades das empresas em determinado ambiente e que acrescentam conteúdo à base do conhecimento além de promover pesquisas futuras.

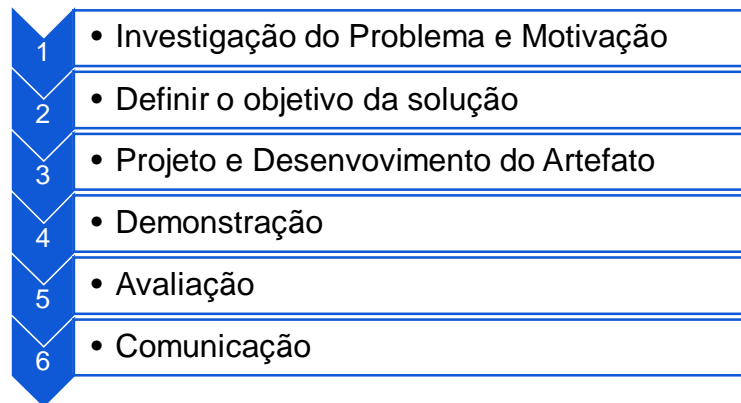
Peppers *et al.* (2007) indicam os três estudos de autores da década de 1990 que iniciaram trabalhos dentro da DS baseados em pesquisas anteriores. São eles: Nunamaker *et al.* (1991), com foco no desenvolvimento de integração de sistemas em que suas etapas incluem construção da teoria, desenvolvimento do sistema, experimentação e observação; Walls, Widmeyer e El Sawy (1992) definiram que a teoria de *design* é uma classe de pesquisa que busca a construção e os testes de teoria na ciência social; e March e Smith (1995) indicam que a pesquisa de *design* pode facilitar a aplicação e melhorar a abordagem nos tipos de problemas dos profissionais.

Dresch, Lacerda e Júnior (2015) ainda mencionam Vaishnavi e Kuechler (2004), Van Aken, Berends e Van der Bij (2012), Cole *et al.* (2005), Manson (2006), os próprios Peppers *et al.* (2007), já citados neste texto, Baskerville, Pries-Heje e Venable (2009) e Alturki, Gable e Bandara (2011) como importantes obras para o desenvolvimento da DSR.

Peppers *et al.* (2007), em particular, avançam na proposição de um modelo de DSR, o que foi utilizado como base para o desenvolvimento deste trabalho. Eles reforçam a DSR como um meio para resolução de problemas, no contexto organizacional baseado em estudos anteriores, com o objetivo de produzir uma metodologia na busca pelo consenso e com elementos muito bem-aceitos.

Assim, segue o modelo do processo DSR desenvolvido por Peppers *et al.* (2007) e adaptado para este trabalho, conforme figura 1.

Figura 1 - Fases de Pesquisa da DSR



Fonte: Adaptado de Peffers *et al.* (2007, p.10)

A Fase 1 – Investigação do Problema e Motivação – consiste em entender o problema com o intuito de desenvolver um artefato (que pode ser um método) que efetivamente proveja uma solução. A importância desta fase está em justificar o quanto relevante é o problema para a pesquisa e, assim, motivar o pesquisador e também o público que está participando e avaliando os resultados. A investigação ocorrida em ambientes de negócio pode resultar em desenvolvimento e implementações baseadas em novas tecnologias (PEFFERS *et al.*, 2007; DRESCH; LACERDA; JÚNIOR, 2015; HEVNER *et al.*, 2004).

A Fase 2 – Definir o Objetivo da Solução – tem como propósito compreender soluções viáveis a partir do problema proposto. Esses objetivos podem ser quantitativos ou qualitativos. Os objetivos qualitativos têm como exemplo a descrição de como um novo artefato ofereceria suporte a soluções para problemas não resolvidos (PEFFERS *et al.*, 2007).

A Fase 3 – Projeto e Desenvolvimento do Artefato – é a fase efetiva de criação do artefato que, conceitualmente, pode ser qualquer objeto projetado que contribua para a pesquisa na qual está incorporado. Um artefato pode ser do tipo constructo, método, modelo ou instanciação, dependendo da classe de problema na qual está inserido. Artefatos caminham para inovações que definem novas ideias, práticas, capacidades técnicas e produtos por meio da análise, do *design* e da implementação e do uso dos sistemas. Nesta fase, a revisão da literatura realizada

pode apoiar o pesquisador no sentido de evidenciar artefatos existentes, bem como problemas até então não solucionados (PEFFERS *et al.*, 2007; HEVNER *et al.*, 2004; DRESCH; LACERDA; JÚNIOR, 2015).

A Fase 4 – Demonstração – tem como foco a aplicação do artefato no ambiente para o qual foi desenvolvido no sentido da resolução do problema. Esta etapa pode compreender a utilização de experimentos, estudo de casos, simulação, algoritmos computacionais, protótipos, maquetes, representações gráficas ou outra atividade adequada para a realização da demonstração. Importante ressaltar que não necessariamente é criado um produto nesta fase, pois a *design science research* tem o objetivo de gerar conhecimento útil e aplicável para resolver problemas, melhorar sistemas atuais, além de indicar novas soluções (PEFFERS *et al.*, 2007; DRESCH; LACERDA; JÚNIOR, 2015).

A Fase 5 – Avaliação – tem como finalidade observar e medir o artefato proposto no ambiente em que foi submetido para obtenção de dados capazes de validar os objetivos propostos para o problema. Dessa forma, são comparados os objetivos com os resultados que fornecem base para corroboração da pesquisa. Esta avaliação pode ocorrer em um ambiente experimental ou real, sendo que, para o ambiente real, pode ser utilizado o estudo de caso como meio de verificar a interação do artefato entre o pesquisador, os usuários do sistema e o time da organização na qual está sendo aplicado o artefato (PEFFERS *et al.*, 2007; DRESCH; LACERDA; JÚNIOR, 2015).

A Fase 6 – Comunicação – é a última fase do método e tem como premissa apresentar a pesquisa e seus resultados ao meio acadêmico e organizacional, assim, relatando o problema encontrado, o artefato utilizado, bem como as soluções providas pelo trabalho. Esta apresentação pode ocorrer por meio de publicações em artigos acadêmicos, assim, utilizando o processo de pesquisa empírica. Outro ponto importante nesta fase é a verificação da possibilidade de generalizar a solução para uma classe de problema, desse modo, permitindo o avanço do conhecimento em *design science* (PEFFERS *et al.*, 2007; DRESCH; LACERDA; JÚNIOR, 2015).

2.2 Procedimento e Fases da Pesquisa

Com a definição das fases de pesquisa, foi realizada a preparação do procedimento baseado nelas para que fosse possível identificar quais ações e qual

foco seriam dados à pesquisa. Como pode ser observado na tabela 1, o objetivo principal da pesquisa e os objetivos específicos estão vinculados diretamente às fases de pesquisa, de acordo com o estabelecido na figura 1.

A tabela 1 ainda relaciona as fases com o foco da pesquisa para cumprimento dos objetivos, além de indicar o instrumento de pesquisa e a forma como foi realizada a coleta de dados ou qual técnica de análise foi empregada.

2.2.1 Fase 1 – Investigação do Problema e Motivação

A Fase 1 da pesquisa, denominada Investigação do Problema e Motivação, conforme Peffers *et al.* (2007), foi realizada a partir de uma revisão sistemática da literatura para identificar as lacunas existentes nesta, bem como buscar a conscientização sobre o problema. Para a realização da revisão sistemática da literatura foi adotado o protocolo utilizado por Alcantara e Martens (2019). Além disso, foi observada, em revistas do meio empresarial, a relevância em termos de volume de máquinas-ferramentas no mercado brasileiro.

A revisão sistemática da literatura foi efetuada por meio da combinação das palavras-chave, expostas na tabela 2, que foram empregadas para as pesquisas nas bases científicas Web of Science, Scopus, ScienceDirect, Emerald Insight e Scielo.ORG, conforme estabelecido por Alcantara e Martens (2019). Além da pesquisa realizada com palavras em inglês, foram feitas a busca em espanhol e português, na base de dados da Scielo.

Dessa pesquisa, surgiram 573.639 artigos potenciais para análise, dos quais foram verificados, em cada seção, os cem primeiros artigos mais citados para as bases Scopus e Web of Science, para as demais foram analisados os artigos mais relevantes mediante suas palavras-chaves, seu resumo e seu título para identificação de possíveis artigos que seriam selecionados. Dessa análise, chegou-se a 106 artigos para verificação mais detalhada. Durante o processo de análise, foram adicionados 19 artigos pelo processo de *snowball*, por meio do qual foram localizados novos artigos, durante a leitura dos artigos selecionados, chegando-se a uma amostra de 125 artigos. O resultado da execução desta análise consta na tabela 2.

Tabela 1 - Procedimento de Pesquisa

Objetivo Principal	Objetivo Específico	Fases de Pesquisas (Peffer et al., 2007)	Foco da Pesquisa	Instrumento de Pesquisa	Coleta de dados / Técnica de análise
Propor e testar um sistema IoT (<i>Internet of things</i>) para gerenciamento online de spindles em operação.	- Identificar o estado da arte e analisar os conceitos teóricos da indústria 4.0 associados ao gerenciamento de spindles;	Fase 1 - Investigação do Problema e Motivação	Identificar lacunas	Revisão sistemática da literatura	Artigos
	- Examinar modelos e métodos propostos na literatura sobre sistemas de gerenciamento aplicados a spindles		Conscientização do problema		Artigos e revistas do meio empresarial
	- Identificar tecnologias da Indústria 4.0 relativas aos sistemas de gerenciamento de spindles.	Fase 2 - Definir o objetivo da solução	Identificar artefatos	Revisão da literatura	Identificar, comparar e selecionar modelos
	- Desenvolver uma proposta de sistema IoT para gerenciamento online de spindles em operação		Premissas da solução	Revisão da literatura	Análise de conteúdo
		Fase 3 - Projeto e Desenvolvimento do Artefato	Criação do artefato	Modelo teórico	Artigos e estudo de caso

Tabela 1 - Procedimento de Pesquisa (Continuação)

Objetivo Principal	Objetivo Específico	Fases de Pesquisas (Peppers et al., 2007)	Foco da Pesquisa	Instrumento de Pesquisa	Coleta de dados / Técnica de análise
Propor e testar um sistema IoT (<i>Internet of Things</i>) para gerenciamento online de spindles em operação.	Avaliar o sistema IoT para gerenciamento online de spindles em operação proposto.	Fase 4 - Demonstração	Etapa 1 - Instalação de Sensores no equipamento	Estudo de caso com observação participante	Análise de conteúdo
			Etapa 2 - Interface entre Equipamento e Nuvem		
			Etapa 3 - Computação em Nuvem		
			Etapa 4 - Software de monitoramento		
			Etapa 5 - Dashboard para gestão à vista		
		Etapa 6 - Integração do usuário Final			
		Fase 5 - Avaliação	Análise resultado das 6 etapas da demonstração	Estudo de caso com observação participante	Análise de conteúdo
		Fase 6 - Comunicação	Apresentação dos Resultados	Dissertação de mestrado e artigos	-

Fonte: Elaborado pelo Autor

Para a análise de redes de citação e ocorrência de autores foi utilizada a ferramenta VOSviewer, conforme sugerido por Van Eck e Waltman (2010). Essa ferramenta permite a realização de mapas bibliométricos, além de ser comumente utilizada. Para análise dos *clusters* de palavras foram considerados os artigos que possuem ao menos uma citação. A análise de conteúdo foi utilizada para entender os estudos que atuaram com tecnologias para a manutenção de spindles. Os resultados da revisão sistemática da literatura com a identificação das lacunas, conscientização do problema, identificação de modelos aplicados e premissas do problema são relatados ao longo do **Capítulo 3 – Fundamentação Teórica**. Adicionalmente, a bibliometria é apresentada no **Apêndice A – Dados Adicionais de Revisão Sistemática da Literatura**.

2.2.2 Fase 2 - Definir o objetivo da solução

Os objetivos da solução foram definidos com base na identificação da necessidade de realizar testes de um sistema de monitoramento *on-line* de spindle enquanto realiza usinagem, ou seja, enquanto está em operação atuando com uma carga de usinagem. Esses objetivos são apresentados na seção **1.3 – Objetivos** – e ressaltados na **tabela 1**.

No **Capítulo 2 – Fundamentação Teórica** – são apontados diversos autores indicando a necessidade de integração de sistemas, coleta de dados, mas destaca-se os autores Holub e Hammer (2017) e Rastegari, Archenti e Mobinet (2017), que ressaltam a necessidade de realizar mais testes em spindles durante a carga de usinagem para entender se existe um comportamento normal do spindle para previsão de falhas.

Dessa forma, teve-se como objetivo principal propor e testar um sistema IoT capaz de coletar dados do spindles durante o processo de usinagem e disponibilizar esses dados em uma plataforma em nuvem para que o time de manutenção tenha acesso remoto e em tempo real.

Tabela 2 – Critério utilizados na busca de artigos

n°	Base	N° sec	Palavras-Chaves	Tipo de Pesquisa	Período	Artigos Potenciais	Artigos Selecionados	Snowball
1	Web of Science	1.1	Machine Tools	TIT-ABS-KEY	All	55.784	2	0
		1.2	Machine Tools + Powertrain	TIT-ABS-KEY	All	26	0	0
		1.3	Machine Tools + Powertrain + Spindle	TIT-ABS-KEY	All	1	1	0
		1.4	Machine Tools + Industry 4.0	TIT-ABS-KEY	All	155	9	7
		1.5	Machine Tools + Industry 4.0 + Maintenance	TIT-ABS-KEY	All	26	0	0
		1.5.1	Machine Tools + Industry 4.0 + Maintenance	TIT-ABS-KEY	2012 a 2020	25	4	0
		1.5.2	Machine Tools + Industry 4.0 + Maintenance + Spindle	TIT-ABS-KEY	2012 a 2020	1	0	0
		1.5.3	Machine Tools + Industry 4.0 + Spindle	TIT-ABS-KEY	2012 a 2020	7	0	0
		1.6	Machining Center + spindle + Industry 4.0	TIT-ABS-KEY	All	2	0	0
		1.7	Machine Tools + Industry 4.0 + Internet of things	TIT-ABS-KEY	All	34	0	0
2	Scopus	2.1	Machine Tools	TIT-ABS-KEY	All	83.614	1	0
		2.2	Machine Tools + Powertrain	TIT-ABS-KEY	All	184	0	0
		2.3	Machine Tools + Powertrain + Spindle	TIT-ABS-KEY	All	13	0	0
		2.4	Machine Tools + Industry 4.0	TIT-ABS-KEY	All	483	9	4
		2.5	Machine Tools + Industry 4.0 + Maintenance	TIT-ABS-KEY	All	150	0	0
		2.5.1	Machine Tools + Industry 4.0 + Maintenance	TIT-ABS-KEY	2012 a 2020	146	31	6
		2.5.2	Machine Tools + Industry 4.0 + Maintenance + Spindles	TIT-ABS-KEY	2012 a 2020	27	0	0
		2.5.3	Machine Tools + Industry 4.0 + Spindle	TIT-ABS-KEY	2012 a 2020	45	14	2
		2.6	Machining Center + spindle + Industry 4.0	TIT-ABS-KEY	All	10	0	0
		2.7	Machine Tools + Industry 4.0 + Internet of things	TIT-ABS-KEY	All	162	1	0
2.8	Machine Tools + Industry 4.0 + Smart Sensors	TIT-ABS-KEY	All	136	3	0		
2.9	Smart Factory + Spindle	TIT-ABS-KEY	2012 a 2020	16	1	0		
2.10	Smart Factory + Maintenance	TIT-ABS-KEY	2012 a 2020	202	11	0		

Tabela 2 – Critério utilizados na busca de artigos (Continuação)

n°	Base	N° sec	Palavras-Chaves	Tipo de Pesquisa	Período	Artigos Potenciais	Artigos Selecionados	Snowball
3	ScienceDirect	3.1	Machine Tools	TIT-ABS-KEY	All	339.323	2	0
		3.2	Machine Tools + Powertrain	TIT-ABS-KEY	All	1.058	0	0
		3.3	Machine Tools + Powertrain + Spindle	TIT-ABS-KEY	All	92	0	0
		3.4	Machine Tools + Industry 4.0	TIT-ABS-KEY	All	16.326	2	0
		3.5	Machine Tools + Industry 4.0 + Maintenance	TIT-ABS-KEY	All	4.684	3	0
		3.5.1	Machine Tools + Industry 4.0 + Maintenance	TIT-ABS-KEY	2012 a 2020	3.643	2	0
		3.5.2	Machine Tools + Industry 4.0 + Maintenance + Spindle	TIT-ABS-KEY	2012 a 2020	236	4	0
		3.5.3	Machine Tools + Industry 4.0 + Spindle	TIT-ABS-KEY	2012 a 2020	951	1	0
		3.6	Machining Center + spindle + Industry 4.0	TIT-ABS-KEY	All	1.043	2	0
		3.7	Machine Tools + Industry 4.0 + Internet of things	TIT-ABS-KEY	All	2.083	1	0
3.8	Machine Tools + Industry 4.0 + Smart Sensors	TIT-ABS-KEY	All	2.183	0	0		
3.9	Smart Factory + Spindle	TIT-ABS-KEY	2012 a 2020	213	0	0		
3.10	Smart Factory + Maintenance	TIT-ABS-KEY	2012 a 2020	2.331	0	0		
4	Emerald Insight	4.1	Machine Tools	TIT-ABS-KEY	All	34.383	0	0
		4.2	Machine Tools + Powertrain	TIT-ABS-KEY	All	94	0	0
		4.3	Machine Tools + Powertrain + Spindle	TIT-ABS-KEY	All	8	0	0
		4.4	Machine Tools + Industry 4.0	TIT-ABS-KEY	All	12.476	1	0
		4.5	Machine Tools + Industry 4.0 + Maintenance	TIT-ABS-KEY	All	4.604	0	0
		4.5.1	Machine Tools + Industry 4.0 + Maintenance	TIT-ABS-KEY	2012 a 2020	1.853	0	0
		4.5.2	Machine Tools + Industry 4.0 + Maintenance + Spindles	TIT-ABS-KEY	2012 a 2020	45	0	0
		4.5.3	Machine Tools + Industry 4.0 + Spindle	TIT-ABS-KEY	2012 a 2020	713	0	0
		4.6	Machining Center + spindle + Industry 4.0	TIT-ABS-KEY	All	595	0	0
		4.7	Machine Tools + Industry 4.0 + Internet of things	TIT-ABS-KEY	All	1.574	0	0
4.8	Machine Tools + Industry 4.0 + Smart Sensors	TIT-ABS-KEY	All	661	0	0		
4.9	Smart Factory + Spindle	TIT-ABS-KEY	2012 a 2020	52	0	0		
4.10	Smart Factory + Maintenance	TIT-ABS-KEY	2012 a 2020	911	0	0		

Tabela 2 – Critério utilizados na busca de artigos (Continuação)

n°	Base	N° sec	Palavras-Chaves	Tipo de Pesquisa	Período	Artigos Potenciais	Artigos Selecionados	Snowball
5	Scielo.O RG	5.1	Machine Tools	TIT-ABS-KEY	All	149	0	0
		5.2	Machine Tools + Powertrain	TIT-ABS-KEY	All	0	0	0
		5.3	Machine Tools + Powertrain + Spindle	TIT-ABS-KEY	All	0	0	0
		5.4	Machine Tools + Industry 4.0	TIT-ABS-KEY	All	2	0	0
		5.5	Machine Tools + Industry 4.0 + Maintenance	TIT-ABS-KEY	All	1	0	0
		5.5.1	Machine Tools + Industry 4.0 + Maintenance	TIT-ABS-KEY	2012 a 2020	1	0	0
		5.5.2	Machine Tools + Industry 4.0 + Maintenance + Spindles	TIT-ABS-KEY	2012 a 2020	0	0	0
		5.5.3	Machine Tools + Industry 4.0 + Spindle	TIT-ABS-KEY	2012 a 2020	0	0	0
		5.6	Machining Center + spindle + Industry 4.0	TIT-ABS-KEY	All	0	0	0
		5.7	Machine Tools + Industry 4.0 + Internet of things	TIT-ABS-KEY	All	0	0	0
6	Scielo.O RG	6.1	Herramientas de máquina	TIT-ABS-KEY	All	0	0	0
		6.2	Herramientas de máquina + Tren motriz	TIT-ABS-KEY	All	0	0	0
		6.3	Herramientas de máquina + Tren motriz + Husillo	TIT-ABS-KEY	All	0	0	0
		6.4	Herramientas de máquina + Industria 4.0	TIT-ABS-KEY	All	0	0	0
		6.5	Herramientas de máquina + Industria 4.0 + mantenimiento	TIT-ABS-KEY	All	0	0	0
		6.5.1	Herramientas de máquina + Industria 4.0 + mantenimiento	TIT-ABS-KEY	2012 a 2020	0	0	0
		6.5.2	Herramientas de máquina + Industria 4.0 + mantenimiento + husillo	TIT-ABS-KEY	2012 a 2020	0	0	0
		6.5.3	Herramientas de máquina + Industria 4.0 + husillo	TIT-ABS-KEY	2012 a 2020	0	0	0
		6.6	Centro de mecanizado + husillo + Industria 4.0	TIT-ABS-KEY	All	0	0	0
		6.7	Herramientas de máquina + Industria 4.0 + Internet of things	TIT-ABS-KEY	All	0	0	0
6.8	Herramientas de máquina + Industria 4.0 + Sensores inteligentes	TIT-ABS-KEY	All	0	0	0		
6.9	Fábrica Inteligente + Husillo	TIT-ABS-KEY	2012 a 2020	0	0	0		
6.10	Fábrica Inteligente + mantenimiento	TIT-ABS-KEY	2012 a 2020	0	0	0		

Tabela 2 – Critério utilizados na busca de artigos (Continuação)

n°	Base	N° sec	Palavras-Chaves	Tipo de Pesquisa	Período	Artigos Potenciais	Artigos Selecionados	Snowball
7	Scielo.O RG	7.1	Máquinas-Ferramentas	TIT-ABS-KEY	All	28	0	0
		7.2	Máquinas-ferramentas + Powertrain	TIT-ABS-KEY	All	0	0	0
		7.3	Máquinas-ferramentas + Powertrain + Cabeçotes	TIT-ABS-KEY	All	0	0	0
		7.4	Máquinas-ferramentas + Indústria 4.0	TIT-ABS-KEY	All	0	0	0
		7.5	Máquinas-ferramentas + Indústria 4.0 + Manutenção	TIT-ABS-KEY	All	0	0	0
		7.5.1	Máquinas-ferramentas + Indústria 4.0 + Manutenção	TIT-ABS-KEY	2012 a 2020	0	0	0
		7.5.2	Máquinas-ferramentas + Indústria 4.0 + Manutenção + Cabeçotes	TIT-ABS-KEY	2012 a 2020	0	0	0
		7.5.3	Máquinas-ferramentas + Indústria 4.0 + Cabeçotes	TIT-ABS-KEY	2012 a 2020	0	0	0
		7.6	Centro de usinagem + cabeçote + indústria 4.0	TIT-ABS-KEY	All	0	0	0
		7.7	Máquinas-ferramentas + Indústria 4.0 + Internet of things	TIT-ABS-KEY	All	0	0	0
7.8	Machine Tools + Industry 4.0 + Smart Sensors	TIT-ABS-KEY	All	0	0	0		
7.9	Fábrica Inteligente + Cabeçote	TIT-ABS-KEY	2012 a 2020	0	0	0		
7.10	Fábrica Inteligente + Manutenção	TIT-ABS-KEY	2012 a 2020	0	0	0		
						573.639	106	19
Total Selecionados							125	

Fonte: Elaborado pelo Autor

2.2.3 Fase 3 - Projeto e Desenvolvimento do Artefato

O projeto e o desenvolvimento do artefato foram organizados, conforme as indicações relatadas nas etapas anteriores, com a intenção de obter um artefato do tipo método para que fosse possível implantar e testar o sistema. Um artefato tipo método, como relatado por Dresch, Lacerda e Júnior (2015), trata-se de um conjunto de etapas capazes de desempenhar certa atividade. Os autores completam mencionando que os métodos são favoráveis tanto na construção quanto na representação de melhoria de determinados sistemas, além de colaborarem para a transformação de sistemas.

Com isso, foi observado como poderia ser implantado um sistema de monitoramento *on-line* de spindles e, por meio da revisão da literatura, foram verificados quais autores seriam base para as etapas determinadas. Estas etapas bem como a construção do artefato tipo método são apresentadas no **Capítulo 4 – Proposta teórica de sistema IoT para gerenciamento de spindles em operação - SIGSO**.

2.2.4 Fase 4 – Demonstração

A fase de demonstração é quando se coloca o artefato em teste no ambiente para o qual foi projetado. Nesse sentido, é apresentado no **Capítulo 5 – Aplicação do sistema IoT para gerenciamento de spindles em operação - SIGSO**. A aplicação das etapas desenvolvidas foi demonstrada em um ambiente real para coleta de dados com ulterior avaliação do atingimento dos objetivos propostos.

Esta fase foi conduzida a partir de estudo de caso único com observação participante. O estudo de caso único pode ser aplicado para determinar se um conjunto de proposições teóricas está correto ou se pode ser mais relevante. Além disso, o estudo de caso único pode ser aplicado quando existe a possibilidade de o pesquisador observar e analisar um evento não investigado previamente (YIN, 2015).

Com relação à observação participante, Yin (2015) menciona que, nesta modalidade, o pesquisador pode assumir atividades em campo e participar efetivamente das ações durante o estudo de caso. Com essa técnica, Yin (2015) reforça a oportunidade de ter acesso a eventos aos quais, em outras observações, não seria possível e a capacidade de captar a visão de organizações nas quais se

realiza o estudo de caso. O estudo de caso da aplicação é apresentado no **Capítulo 5 - Aplicação do sistema IoT para gerenciamento de spindles em operação – SIGSO**, seguindo, como protocolo, as seis etapas definidas no desenvolvimento do artefato do tipo método.

2.2.5 Fase 5 – Avaliação

A fase 5, de Avaliação, é apresentada no **Capítulo 6 – Resultados e avaliação do artefato**, no qual são discutidos os resultados do estudo de caso com observação participativa a fim de ressaltar e avaliar os resultados obtidos com a aplicação em campo do **sistema IoT para gerenciamento de spindles em operação – SIGSO**, assim, trazendo representações gráficas do comportamento normal do spindles e outras variáveis oriundas de todo o processo de emprego do método.

A avaliação dos resultados foi realizada verificando se todas as etapas de aplicação do artefato foram cumpridas durante a realização do estudo de caso com observação participativa. Além disso, verificou-se no *software* SKF @ptitude analyst os dados coletados para identificar se realmente se deu variação da condição normal do spindle. Essa análise da variação foi realizada no período de 45 dias, quando, existindo variação dos níveis vibracionais, foi possível identificar nos gráficos de tendência do *software*.

2.2.6 Fase 6 – Comunicação

A fase de Comunicação consiste na apresentação desta dissertação com suas contribuições práticas e teóricas expostas no **Capítulo 6 – Resultados e avaliação do artefato** e também a indicação de trabalhos futuros e as limitações encontradas durante a pesquisa, que é apresentada na seção **7 - Conclusões**.

Além da dissertação, tem-se o objetivo de avançar na elaboração de artigos para apresentação em *journals* com foco na revisão sistemática da literatura e outro artigo com os resultados da demonstração do artefato.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

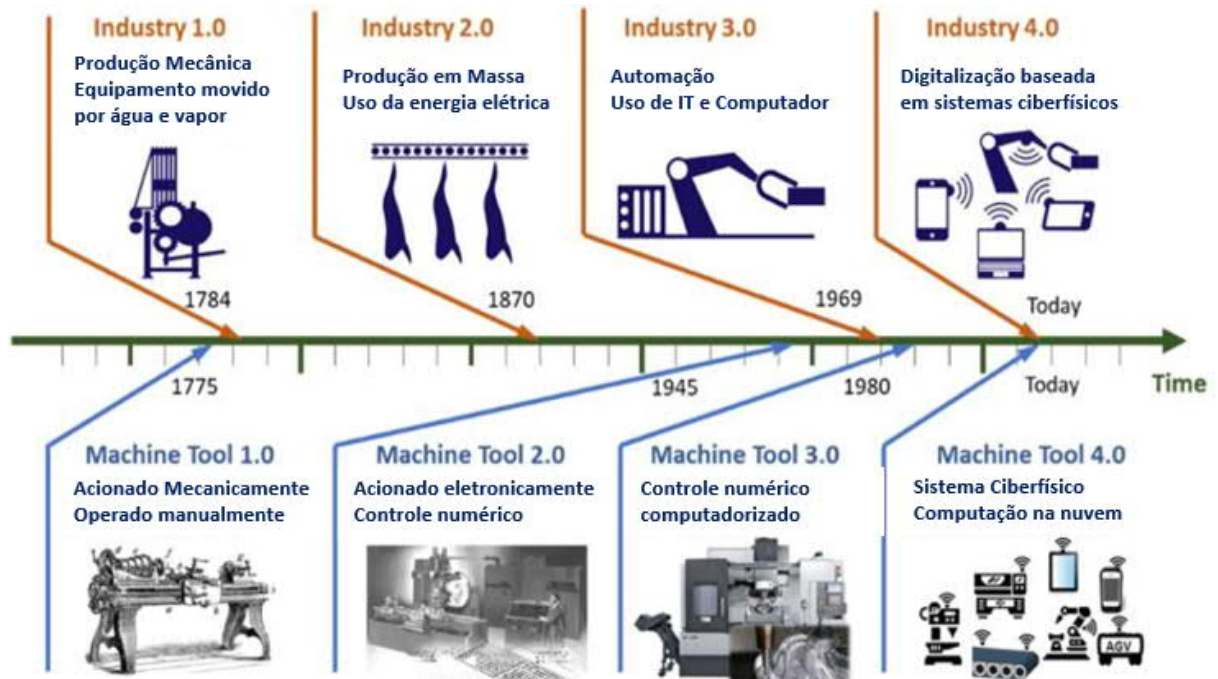
Neste capítulo é apresentada a fundamentação teórica desta dissertação baseada na revisão da literatura realizada, conforme demonstrado no capítulo 2. Dessa forma, o capítulo é composto por três subtítulos com o objetivo de identificar o estado da arte e analisar os conceitos teóricos da indústria 4.0 associados ao gerenciamento de spindles, avaliar modelos e métodos relacionados a esse conceito e identificar tecnologias da I 4.0 que podem ser utilizadas para o gerenciamento de spindles.

3.1 A Indústria 4.0 em máquinas-ferramentas

As máquinas-ferramentas estão em constante evolução ao longo da história, assim, aliando novas tecnologias que, cada vez mais, agregam conhecimento a todo sistema produtivo. Nesse sentido, Sadasivam, Archenti e Sandberget (2018, p. 3) entendem que “a máquina-ferramenta se tornou um sistema mecatrônico complexo, composto por mais de milhares de componentes mecânicos e eletrônicos, agrupados em vários subsistemas”.

Para diferenciar as evoluções ao longo do tempo, Xu (2017) refere como devem ser as máquinas-ferramentas 4.0, indicando-as como ativos necessários para a implantação de fábricas inteligentes na indústria de usinagem. Na figura 2 são apresentadas as características das máquinas-ferramentas em cada uma das revoluções industriais (XUN XU, 2017), sendo que a chamada *Machine Tool* 1.0, que foi desenvolvida durante a primeira revolução industrial, possuía acionamento mecânico e era operada manualmente. Já a *Machine Tool* 2.0, que aparece na segunda revolução industrial, caracteriza o surgimento do comando numérico nas máquinas. Durante a terceira revolução, que está sendo finalizada no momento, a *Machine Tool* 3.0 é conhecida pelos, até então modernos, comandos numéricos computadorizados. E, por fim, oriundas das tecnologias habilitadoras da I 4.0, a *Machine Tool* 4.0, que Xu (2017) define como um dos pilares que proporcionará uma visão dos sistemas ciberfísicos, no qual a internet das coisas e a computação em nuvem desempenham papel fundamental no desenvolvimento de novos estudos.

Figura 2 - Evolução das máquinas-ferramentas



Fonte: Adaptado Xu (2017, p.2)

Essa evolução de conceito, nos últimos anos, somente foi possível em virtude dos diversos avanços em torno da chamada Indústria 4.0, também conhecida como Quarta Revolução Industrial, conforme relatado por Canizares e Valero (2018). Sadasivam, Archenti e Sandberget (2018) mencionam que diversas transformações estão ocorrendo rapidamente nas fábricas, tornando-as mais inteligentes em consequência das iniciativas como "*Produktion2030*", da Suécia, "*Industrie 4.0*", da Alemanha, "*Factory 2050*", do Reino Unido, "*Horizon2020*", da União Europeia, "*Revitalize Manufacturing Plan*", dos Estados Unidos da América e "*4th Science and technology plan*", do Japão. Já Mourtzis, Milas e Athinaios (2018) incluem iniciativas como a da China, chamada de "*Made in China 2025*", e da indústria europeia, denominada "*Factories of the Future*". Todas essas iniciativas alimentam ainda mais a necessidade da divulgação de iniciativas brasileiras para a implantação de tais tecnologias em território nacional.

Com o intuito de conceituar o que é a I 4.0, Nagy *et al.* (2018) definem que essa é a busca pelo desenvolvimento de novos meios de automação aliados à eficiência e à eficácia operacional. Para isso, é necessária a inclusão das tecnologias habilitadoras oriundas da I 4.0, como Sistemas Ciberfísicos (CPS), Internet das Coisas (IoT), Internet dos Serviços (IoS), Robótica, *Big Data*,

Computação em Nuvem e Realidade Aumentada. Todas essas tecnologias permitem a integração de diferentes interfaces, máquinas e dispositivos que serão capazes de coletar e disponibilizar dados para tornar qualquer ambiente mais inteligente, por meio da aplicação de inteligência artificial com os dados obtidos. Para validar esse conceito, é importante também entender como os responsáveis nas companhias pelos investimentos necessários para implantação das tecnologias entendem a I 4.0. Nagy *et al.* (2018, p.14-15) coletaram os seguintes entendimentos durante sua pesquisa com quatro empresas:

- Empresa V1: “Uma revolução da informação no setor.”
- Empresa V2: “Usar e interpretar a enorme quantidade de dados e usá-los para prever o futuro. Esse é o segredo do sucesso.”
- Empresa V3: “Dados e comportamento da I 4.0. Todo mundo obtém todas as informações relevantes, permitindo que elas reajam e decidam sobre elas de diferentes maneiras.”
- Empresa V4: “Vinculando a uma rede mais inteligente que abrange o setor”.

Em contrapartida, todos caminham na mesma direção da utilização de dados em rede para entendimento do comportamento das máquinas, sendo possível a tomada de decisão rapidamente ou até mesmo a realização de previsões baseadas em dados *on-line*. Mosyurchak *et al.* (2017) percebem esse fato como digitalização, pelo qual há diversas máquinas conectadas em um sistema ciberfísico, dessa forma, gerando dados que serão compartilhados em um ambiente de rede em todos os níveis. Nagy *et al.* (2018) ponderam que, para uma fábrica ser totalmente inteligente, é necessário que toda a planta permaneça digitalmente conectada, e não apenas uma linha de produtos. Além disso, eles mencionam que uma das grandes barreiras para as companhias implantarem a I 4.0 é a lacuna localizada na estratégia das próprias empresas para trabalhos em ambientes digitais pertinente à criação de valor ao negócio. Já Liu e Xu (2017) inferem que para existir uma *smart factory* é fundamental que o ambiente esteja preparado para tomar decisões de engenharia em tempo real, que todos os recursos do processo produtivo sejam monitorados pela internet e haja capacidade de entender suas características e auto-organizar as atividades relacionadas à produção.

3.1.1 Utilização de Internet das Coisas (IoT)

O apoio das novas tecnologias, como a internet das coisas, permite a obtenção de dados em tempo real e é um dos principais meios para a realização da digitalização. Para Nagy *et al.* (2018), os dispositivos da internet das coisas (IoT) são instrumentos tecnológicos capazes de adquirir diferentes tipos de informação para compartilhá-los em uma rede corporativa ou entre companhias. Eles mencionam sensores como *Radio Frequency Identification* (RFID), que são etiquetas posicionadas em produtos e transmitem informações sobre o local onde estão armazenados ou outras características que desejar, câmeras e/ou *scanners* 3D capazes de transmitir a condição do que está sendo observado.

Legault *et al.* (2019) mencionam que com a internet das coisas é possível criar valor entre empresas e clientes, porém existe a necessidade de uma mudança estrutural profunda nos mais diversos setores da indústria. Eles complementam mencionando a possibilidade de mudança do modelo de negócio para prestações de serviços, pois permite um esforço orientado às necessidades dos clientes ou, mesmo, envolvendo o cliente no processo de criação. Chui, Löffler e Roberts (2010) entendem que esse novo ambiente de relacionamento com os diferentes dados proporcionará a possibilidade da criação de novos modelos de negócios, melhoria de processos com redução de custos e dos riscos envolvidos.

Liao, Loures e Deschamps (2018) descrevem a rede de informação criada por diferentes dispositivos IoT dentro de uma companhia com o objetivo de acompanhar o ciclo de produtos ou processos e que também pode ser chamado de IIoT. Civerchia *et al.* (2017) citam que o IIoT pode ser utilizado para criar fábricas inteligentes eficazes, em que cada sensor será considerado um dispositivo para detecção de dados reais. Nessa condição, pode-se definir padrões de operação do sistema e, quando houver variações, identifica-se um novo patamar de análise.

José Álvares, Oliveira e Ferreira (2018), por sua vez, definem internet das coisas como sendo uma rede de conexão de sensores e atuadores inteligentes com o intuito de permitir a comunicação entre os protocolos conhecidos. Assim, podem exibir *status* como identificação do item, rastreamento, localização e monitoramento. Eles completam mencionando a IoS, que representa esses serviços prestados tanto dentro das organizações como para clientes, e aduzem apontando que a indústria 4.0 é compreendida pela junção do IoT, IoS e dos sistemas ciberfísicos. Bi *et al.*

(2018) indicam que a quantidade e os tipos de coisas inteligentes em um sistema assinalam o quanto ele é inteligente no ambiente de manufatura.

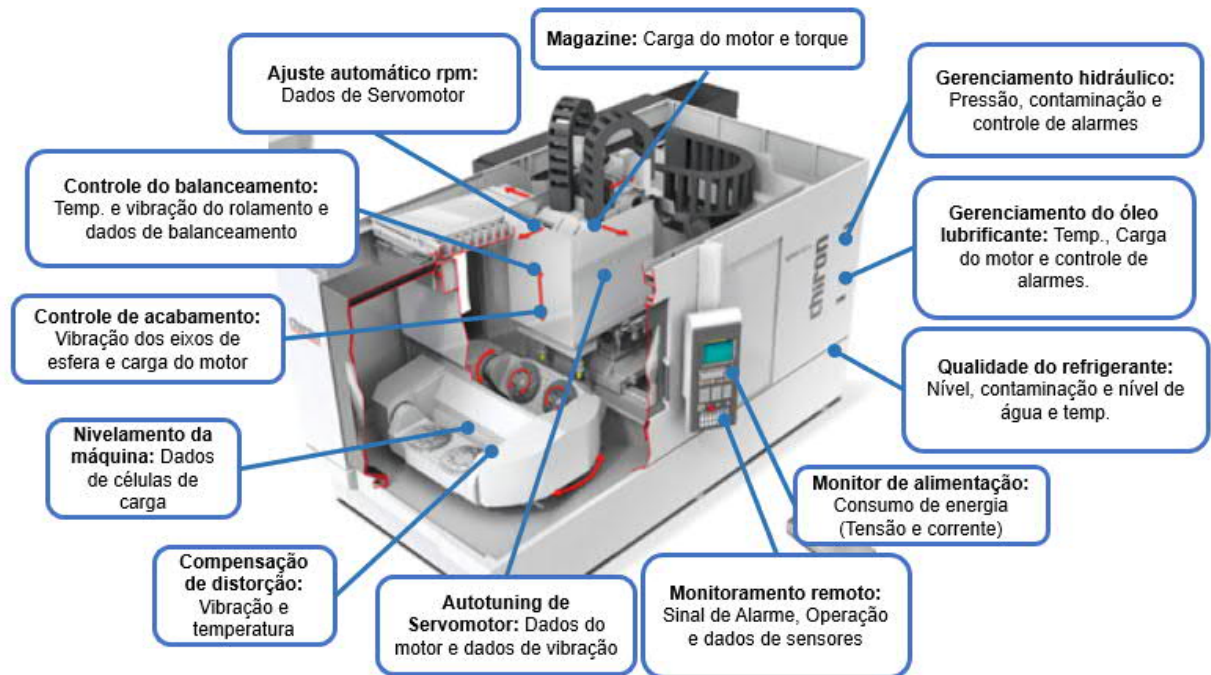
De acordo com Nagy *et al.* (2018), Big Data é um conceito que envolve diversas ferramentas que vão além do armazenamento dos dados coletados de sensores para tomada de decisões, processo que ocorre em três etapas: a primeira etapa é iniciar a coleta de dados por meio da instalação de ferramentas IoT como sensores e a utilização de *softwares* para captação dos dados desejados; na segunda etapa, transformar os dados coletados em suporte à tomada de decisão, que permitirá também a melhoria dos processos existentes; e, na terceira etapa, utilizar os dados para obtenção de resultados e criação de algoritmos para tornar os processos cada vez mais inteligentes.

3.1.2 Aplicação de sensores em máquinas-ferramentas

Entender como são aplicados os sensores em máquinas-ferramentas é de suma importância para, assim, verificar as possibilidades de instalações de sensores em locais adequados, em um ambiente de produção contínua que permita a obtenção de dados para criação de um modelo de análise de falhas. Ben-Daya, Hassini e Bahroun (2017) ponderam exatamente essa questão para estudo futuro: qual é o melhor local para posicionamento do sensor e como identificar possíveis níveis de alarme para que se crie uma lógica de comunicação? Este é um dos pontos que é almejado na abordagem ao longo do estudo focalizado na manutenção dos spindles.

Fujishima *et al.* (2017) apresentam um modelo de sensoriamento em máquinas-ferramentas que inclui sensores para detectar anomalias nos eixos XYZ, controle de balanceamento do spindle, gerenciamento de componentes hidráulicos, gerenciamento do óleo de refrigeração, compensação de distorções, nivelamento de máquina, sincronismo do servo motor, monitor de energia, entre outros elencados na figura 3.

Figura 3 - Sensores em Máquinas-Ferramentas



Fonte: Adaptado de Fujishima *et al.* (2017) e Chiron (2019)

Janak *et al.* (2016) utilizam uma abordagem diferente para definição dos sensores em máquinas-ferramentas e indicam que pode ser dividido em dois grupos basicamente: a) Sensores para monitoramento do processo e b) Sensores para medição indireta. Sobre os sensores de monitoramento do processo, eles ressaltam os seguintes requisitos: i) estar o mais próximo do ponto de usinagem; ii) não reduzir a rigidez da máquina-ferramenta; iii) não restringir espaço de trabalho e parâmetros de corte; iv) livre de desgastes; v) resistentes à sujeira, a cavacos e a influências externas; vi) função independente da peça ou ferramenta; vii) adequada às condições metrológicas; e, viii) transmissão de sinal confiável.

Janak *et al.* (2016) aduzem que é recomendada a utilização de comprovada eficácia na obtenção de dados no setor industrial e sugerem: a) microfones de/com intensidade sonora; b) acelerômetros para vibrações; c) dinamômetros para força de corte; d) sensores de corrente para monitoramento dos barramentos dos acionamentos; e) sensores de emissão acústica; e, f) sensores de temperatura.

Lee *et al.* (2014), com uma visão de toda a indústria, mencionam sobre os sensores de vibração, análise de óleo, temperatura, emissão acústica e ultrassom,

apontando que a integração dessas análises ajuda na interpretação de diferentes falhas. Fujishima *et al.* (2016) indicam os sensores de vibração como os principais para identificação de falhas em rolamentos e temperatura a fim de permitir a compensação devido à dilatação térmica.

3.1.3 Computação em Nuvem

Para que os dados coletados pelos sensores sejam entregues em um *software* de análise ou em um *dashboard* é necessária a aplicação de computação em nuvem devido ao grande volume de dados disponibilizados pelos sensores, conforme relatado por Turner *et al.* (2019). Caggiano (2018) menciona que este é o aspecto mais comum nas estruturas de manufatura em nuvem, nas quais há sensores para coleta de dados no ambiente físico e, assim, utilizam-no para criação de algoritmos visando ao fornecimento de serviços inteligentes. Monostori *et al.* (2016) apontam justamente para esse modelo com uma oportunidade de realização de monitoramentos inovadores a partir da aquisição, distribuição e utilização dos dados remotamente.

Byrne *et al.* (2016) referem que, com os novos conceitos da indústria 4.0, a internet das coisas e a computação em nuvem poderão superar barreiras existentes nos sistemas tradicionais das máquinas-ferramentas, tornando possível o aumento do uso de sensores, análise em nuvem e maior aceitação pela indústria. Giraldo-Castrillon, Paramo-Bermudez e Munoz-Betancur (2019) indicam que é fundamental a utilização de tecnologias baseadas em nuvem para que haja mais eficiência no diagnóstico em processos produtivos, bem como se apresente uma tomada de decisão para auxiliar os usuários.

Conforme Mohindru, Mondal e Banka (2019), a computação em nuvem é o local centralizado onde os dados são armazenados e processados. Ela é escalável e flexível, dessa forma, permitindo a oferta de serviços como *softwares*, plataformas e base para aplicação de inteligência artificial.

Caggiano (2018), por sua vez, indica que as tecnologias em nuvem disponibilizam um ambiente para conectar e compartilhar recursos físicos instalados em uma fábrica e integrá-los a uma infraestrutura de internet. Essa tecnologia pode agregar informações desde o planejamento ao monitoramento de processos e o monitoramento de máquinas-ferramentas. Wang, Törngren e Onori (2015) definem

que a computação da manufatura é a integração dos sistemas ciberfísicos que podem fornecer serviços sob demanda, com isso, permitindo uma melhor utilização dos recursos.

Caggiano (2018) sugere que o serviço de nuvem pode utilizar tanto uma nuvem da própria empresa como uma nuvem externa com a segurança apropriada. O autor aponta, ainda, a possibilidade de agregar diferentes métodos para conectar as máquinas levando em consideração a estabilidade, velocidade, cobertura de distância e segurança, além de sugerir que a rede interna seja *Wi-Fi* ou *Bluetooth*.

3.2 Spindles e sua manutenção

Nesse cenário, é importante analisar quais componentes de uma máquina-ferramenta podem ser monitorados para a coleta de dados e, conseqüentemente, a disponibilização para tomada de decisões assertivas. Thoppil, Vasu e Rao (2019) relatam uma análise crítica dos subsistemas de uma máquina-ferramenta para implementação de manutenção preditiva e identificam o spindle como o componente mais crítico. O spindle é um componente extremamente complexo e responsável pelas seguintes funções, segundo Abele, Altintas e Brecher (2010): a) girar as ferramentas (fresadoras, brocas, rebolos entre outras) ou as peças de trabalho com precisão; e, b) transmitir a energia necessária para a área de corte do metal.

Para Sadasivam, Archenti e Sandberget (2018), o spindle é um sistema de alta precisão composto por diversos componentes que desempenham suas funções dentro dos limites preestabelecidos para sua capacidade de trabalho. Mosyurchak *et al.* (2017) mencionam que o spindle é um dos itens críticos de qualquer máquina-ferramenta; e os custos envolvidos na sua manutenção não podem ser negligenciados. Ziada, Yang e DeGroat-Ives (2017) explanam que a obtenção de dados do interior de um spindle é extremamente complexa e dá-se apenas com a sua desmontagem do conjunto ou com o apoio dos fabricantes.

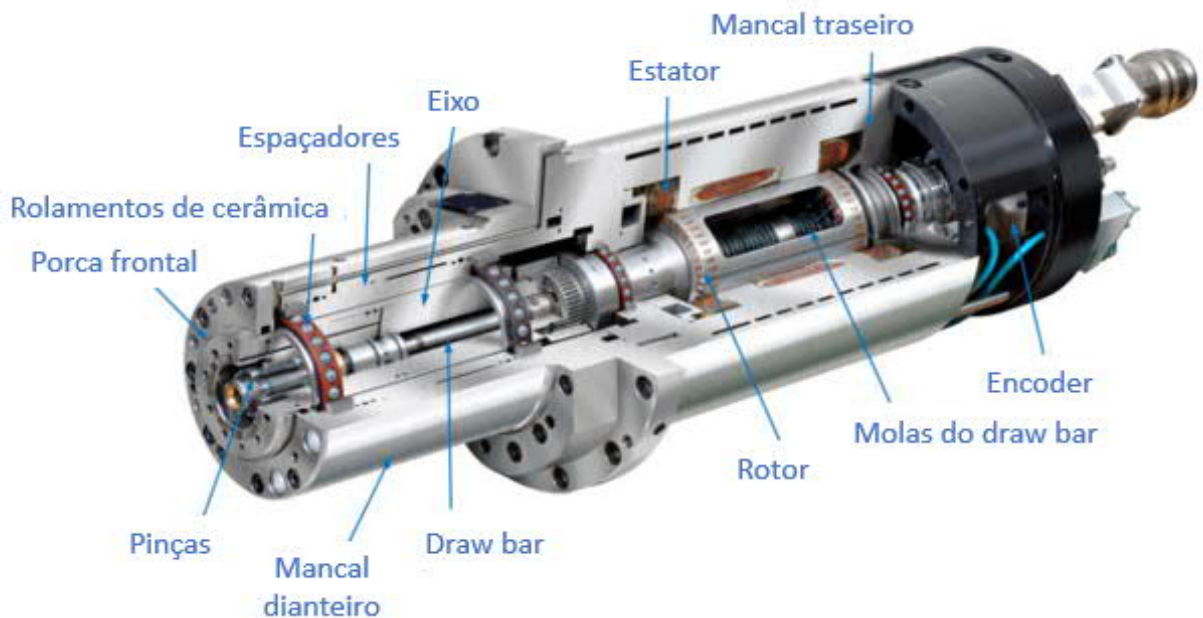
Janak *et al.* (2016) entendem que o spindle é o subcomponente de uma máquina-ferramenta e que suas colisões e sobrecargas precisam ser monitoradas e reportadas pelas próprias máquinas. Cao, Kang e Chen (2019) comentam que o spindle de uma máquina-ferramenta é um sistema típico composto por rolamento e rotor, sendo que o rolamento é o componente com maiores indícios de falhas. Nesse cenário, diferentes falhas em rolamentos podem ocorrer, como uma colisão, um

desgaste abrasivo, entre outros, que podem interferir diretamente no *run-out* da ferramenta, conforme mencionado por Attanasio (2017), que advêm da soma dos deslocamentos geométricos a partir do eixo de rotação teórica. Essa soma produz um desvio entre a trajetória teórica da aresta de corte e a trajetória real, por conseguinte, interferindo diretamente na qualidade do produto a ser usinado.

Żabiński *et al.* (2019) apontam outro problema constante nos spindles, que é o desbalanceamento da ferramenta, pois interfere diretamente na vida útil tanto da ferramenta de corte como do spindle. Para sua identificação são realizados testes periódicos para detecção e correção dos desvios. Hill *et al.* (2019) reforçam as possibilidades de falhas indicando, em seu trabalho, as seguintes hipóteses de falhas em spindles: falhas de rolamentos, nas pinças de fixação, concentricidade, balanceamento, colisão, velocidade e aceleração.

A figura 4 ilustra um spindle com motor integrado em corte para uma visualização dos componentes principais, sendo eles: eixo, rolamentos, espaçadores, mancais, rotor e estator elétrico, encoder, molas e eixo do draw bar, porca frontal e pinças.

Figura 4 - Principais Componentes do Spindle



Fonte: Adaptado de Wilson (2019)

O spindle precisará se enquadrar às necessidades da I 4.0 ou *Machine Tools* 4.0, conforme proposto por Xu (2017). Com esse objetivo, Cao, Zhang e Chen

(2017) desenvolvem o conceito de spindle inteligente, que pode ser descrito como um spindle com capacidades sensitivas, tomadas de decisão e controle, desse modo, garantindo a melhor condição no processo de usinagem e operações confiáveis.

A proposta apresentada por Cao, Zhang e Chen (2017) é fundamental para a evolução dos spindles e máquinas-ferramentas, entretanto é algo esperado para o desenvolvimento futuro, pois será necessário um novo projeto prevendo todo o sensoriamento, atuadores inteligentes, processamento de dados em tempo real com tomada de decisão através de algoritmos.

Todavia deve-se analisar o momento atual, sendo essa uma realidade distante no parque industrial instalado, pois as empresas que possuem máquinas-ferramentas, no Brasil, investem pouco no monitoramento da condição do spindle por considerarem um equipamento com durabilidade relativamente alta, utilizando predominantemente os pilares de manutenção preventiva e corretiva. E essa condição é observada por Adu-Amankwa *et al.* (2019), que, em sua *survey* com pequenas empresas do Reino Unido que possuem máquinas-ferramentas, relatam que identificaram a utilização da manutenção corretiva e/ou manutenção preventiva predominantemente. As manutenções corretivas tendem a ser minimizadas com a implantação da quarta revolução industrial com sistemas prevenindo falhas não previstas.

Do ponto de vista de Gopalakrishnan *et al.* (2019), as manutenções preventivas devem ser planejadas pela criticidade do equipamento, enquanto a manutenção corretiva sucede exatamente quando um evento não aguardado ocorre. Em consequência desses modelos adotados atualmente, uma vez apresentado um defeito no spindle, não há tempo hábil para uma tomada de decisão de parada da máquina ou correção, pois qualquer falha no spindle gera consideráveis prejuízos, tanto durante o reparo quanto com a parada da linha de produção.

Com relação à parada de máquina, outro ponto relevante, assinalado por Gopalakrishnan *et al.* (2019), é que, atualmente, a forma como as decisões sobre qual manutenção aplicar resulta em diversas atividades que não agregam valor ao processo, reduzindo, assim, a disponibilidade de máquina. Sobre a necessidade de reparo, essa situação é examinada por Chiang *et al.* (2018); e eles indicam que spindles com alta rotação possuem custo alto por unidade e os danos ocorrem

facilmente. Essa mesma situação é compartilhada por Janak *et al.* (2016), citando que, apesar dos anos, ainda se aplicam manutenções preventivas e corretivas em máquinas-ferramentas. Entretanto os autores apontam que novas tecnologias serão empregadas para o desenvolvimento da manutenção baseada na condição e, além disso, que as máquinas-ferramentas poderão ser equipadas com os mais variados sensores.

Nesse sentido, o trabalho de Cao, Zhang e Chen (2017) é extremamente relevante para o futuro desenvolvimento de projetos de spindle. E eles mencionam também sobre o interesse em manutenção por prognóstico ou baseada na condição. A manutenção por prognóstico em spindles ou em qualquer outro equipamento é baseada no conceito de manutenção preditiva, que ocorre mediante um histórico de diagnósticos. Por isso, entender o que é um diagnóstico é imprescindível para a sequência do trabalho. Lee *et al.* (2014) mencionam que o diagnóstico é o processo de identificação entre causa e efeito com o objetivo de identificar as causas raízes das falhas.

Mosyurchak *et al.* (2017) defendem o diagnóstico técnico como um processo que pode reduzir em até 30% os custos de manutenção após sua implantação. Sadasivam, Archenti e Sandberget (2018) reforçam o descrito sobre manutenção baseada na condição e acrescentam que a avaliação da integridade da máquina é realizada continuamente e de diferentes modos com a intenção de identificar variações de desgaste e, conseqüentemente, impedir as falhas. Já Roy *et al.* (2016) mencionam que a manutenção contínua é um serviço de engenharia que busca maior desempenho e o menor custo durante a vida útil da máquina. Para isso, ele lista as seis áreas fundamentais para atingir este nível: mecanismos de degradação e serviço, reparo, monitoramento, diagnóstico e prognóstico, manutenção autônoma e obsolescência.

Lee *et al.* (2014) mencionam que a manutenção baseada em condição trata da aquisição e análise dos dados para realização do monitoramento de máquinas. Essas informações servirão como base para o time de manutenção realizar apenas as intervenções realmente necessárias e, dessa forma, reduzir os desperdícios oriundos das paradas desnecessárias. Engeler *et al.* (2017) apontam que abordagens como manutenção preditiva podem reduzir o tempo de manutenção da máquina, pois permitem melhor planejamento da ação de manutenção baseada na

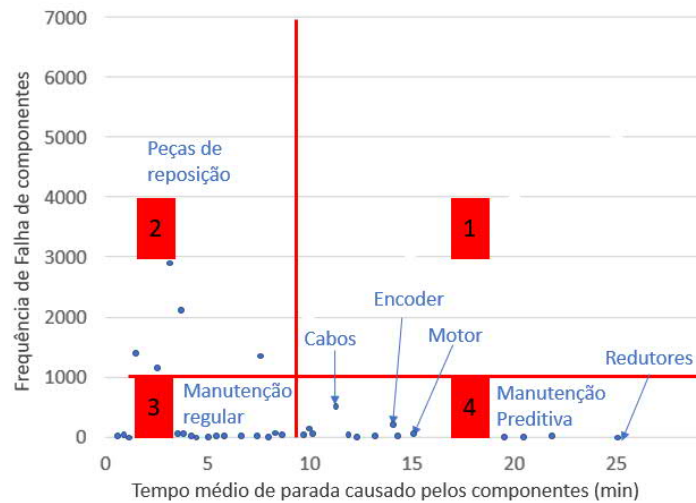
condição real do equipamento que, por conseguinte, também reduz os estoques de peças necessárias para essa manutenção.

Liu *et al.* (2017) ressaltam que o objeto de qualquer manutenção preditiva tem como objetivo principal reduzir o tempo inativo de máquina e o custo relacionado à manutenção do ativo, bem como prever qualquer falha que possa ocorrer. Lee *et al.* (2014), por sua vez, lecionam que o diagnóstico é um processo reativo e é possível realizá-lo apenas após a ocorrência de uma falha, indo ao encontro do proposto pela quarta revolução industrial.

Sob tal perspectiva, a sugestão de realizar manutenções proativas indica a necessidade da mudança da estratégia de manutenção adotada até hoje para a manutenção de spindles, pela qual se obtém diagnósticos de falhas já ocorridas e migrando para a realização de prognósticos. Porém é fundamental a obtenção de dados para a construção de um modelo, pois, segundo Engeler *et al.* (2017), o monitoramento da condição utiliza os dados das máquinas para conseguir calcular uma situação quantificável confiável para determinado componente. E o valor obtido é tratado como o valor que determina o quanto aquele componente está saudável e é utilizado para modelagem de algoritmos.

A figura 5 é um gráfico apresentado por Lee *et al.* (2014) informando quais são as máquinas ou os equipamentos recomendados para identificação via prognósticos. Essas máquinas ou esses equipamentos estão descritos no quadrante 4, que indica os componentes com um período entre falhas relativamente elevado, entretanto, quando ocorre a falha, será preciso um elevado tempo de parada para substituição ou manutenção. A base de análise por Lee *et al.* (2014) foi uma máquina denominada 890 SW.

Figura 5 - Frequência de Falhas de Componentes



Fonte: Adaptado de Lee *et al.* (2014)

Com o intuito de melhorar a vida útil dos spindles, entende-se que, como citado por Lee *et al.* (2006), quando houver máquinas inteligentes monitoradas e conectadas entre si, com seus dados sendo modelados e analisados remotamente, conseguir-se-á avançar na obtenção de um prognóstico inteligente, além da boa manutenção preditiva.

Lee *et al.* (2018) apresentam que o prognóstico é utilizado para calcular e prever a condição futura do componente com uma ideia de vida útil remanescente que auxiliará na tomada de decisão. Diez-Olivan *et al.* (2019), a partir de uma revisão da literatura, definiram diferentes modelos de prognósticos sendo que: a) o prognóstico descritivo engloba o gerenciamento da saúde do ativo (Health management) e o reconhecimento e classificação de padrões; b) o prognóstico preditivo possui a manutenção baseada por condição e a manutenção preditiva; e, c) o prognóstico prescritivo inclui o planejamento da produção, otimização do ciclo de vida e o gerenciamento da cadeia de suprimentos e logística.

Outros modelos também foram desenvolvidos, como o de Nunez e Borsato (2018), que produziram o OntoProg para realização de prognósticos em equipamentos mecânicos por meio de um modelo baseado em ontologia. Nesse modelo, é preciso conhecer o componente mecânico a ser fabricado e, assim, conhecer os possíveis diagnósticos para identificação das falhas, sem deixar de lado o monitoramento da condição através de análise de vibração com os parâmetros adequados para aplicar as técnicas preditivas. Luo *et al.* (2019) desenvolveram o

CNC machine tool (CNCMT), que é uma *digital twin* com possibilidade de realizar autoprevisão monitorando e prevenindo possíveis falhas graves.

Pode-se avaliar outros conceitos similares, como o *Prognostic and Health Management* (PHM), encontrado em Liu e Xu (2017), *Machine Healthy Management*, discutido por Lee *et al.* (2018), *Machine Healthy*, apresentado por Lee *et al.* (2014) e *Smart Machine Tool System* (SMTS), indicado por Jeon *et al.* (2020), como uma arquitetura com objetivo de atingir zero máquina parada e zero defeito, dessa forma, gerando uma contribuição para operação. Jimenez-Cortadi *et al.* (2020) utilizaram dados armazenados do próprio CNC para desenvolver um modelo baseado na produção de peças vinculadas a um algoritmo e, assim, utilizá-lo como mecanismo para realização de prognóstico.

Além das diversas formas de manutenção mencionadas, Gopalakrishnan *et al.* (2019) indicam os seguintes itens para uma tomada de decisão do time de manutenção: a) monitoramento contínuo do estado da máquina para determinar a criticidade; b) análise dos dados da máquina para decisão em tempo real; c) definição do tipo de criticidade de cada máquina; e, d) definição do padrão de falha da máquina para alocação da frequência de manutenção. Lee *et al.* (2019) mencionam que, quando há máquinas inteligentes conectadas em rede sendo monitoradas remotamente e os dados sendo modelados com sistemas sofisticados, é possível migrar da manutenção preditiva para os prognósticos inteligentes.

Adu-Amankwa *et al.* (2019) empregam uma arquitetura em seu estudo denominada *Distributed Numerically Controlled - Predictive Maintenance* (DNC PdM), sendo uma integração de máquinas-ferramentas, sensores, técnicos de manutenção e um time de serviços de manutenção que apoia o acompanhamento e a execução das manutenções nas máquinas.

Somada a essa necessidade, Gopalakrishnan *et al.* (2019) alertam sobre a necessidade de serem preparadas manutenções tradicionais a transformarem-se em uma manutenção mais inteligente, no sentido de obter dados e atuar baseado na condição. E apontam as perspectivas da transformação das práticas tradicionais em times mais dinâmicos que atuem com as ferramentas provenientes da quarta revolução industrial. Para ser possível analisar probabilidades de falhas com base em informações em tempo real, é imprescindível que os dados coletados por dispositivos com a tecnologia da internet das coisas estejam aliados ao processo de

digitalização dos dados. De acordo com Gopalakrishnan *et al.* (2019), uma fábrica digitalizada cria oportunidades em termos de qualidade da informação, que é obtida através da internet das coisas e/ou ferramentas digitais. E aduzem que:

A análise de dados em tempo real de conjuntos de dados de máquinas pode permitir uma abordagem mais precisa e dinâmica para identificar máquinas críticas. Além disso, essa abordagem também pode fornecer informações não apenas sobre quais máquinas são críticas, mas também sobre porque elas são críticas. Esse tipo de suporte à decisão pode ajudar os planejadores/engenheiros de manutenção a planejar a manutenção com maior precisão, com base nas necessidades das máquinas. Portanto, é necessária uma abordagem orientada a dados para avaliar a criticidade da máquina, a fim de tomar decisões baseadas em fatos. (Gopalakrishnan *et al.*, 2019, p. 17)

Sadasivam, Archenti e Sandberget (2018) apontam que a fabricação baseada em dados e a manutenção baseada na condição são caminhos para a criação de uma fabricação inteligente. Gopalakrishnan *et al.* (2019) e Ylipää *et al.* (2017) sugerem que as manutenções precisem de novas tecnologias, como IoT, para um processo mais dinâmico de tomada de decisão que facilitará a abordagem para resolução de problemas.

3.3 Modelos de aplicação de IoT em spindles na indústria

Ao considerar que as empresas pouco utilizam sistemas de manutenção preditiva em spindles, a utilização da manutenção por prognóstico ou da manutenção baseada em condição é hoje um desafio, porque se faz necessário conhecer a condição normal do spindle durante um teste em vazio para coleta de dados de vibração *off-line* e também em operação com monitoramento *on-line*, como referenciado por Mosyurchak *et al.* (2017). Esses autores acreditam ser importante a diferenciação entre os tipos de coletas realizadas para posterior determinação das falhas.

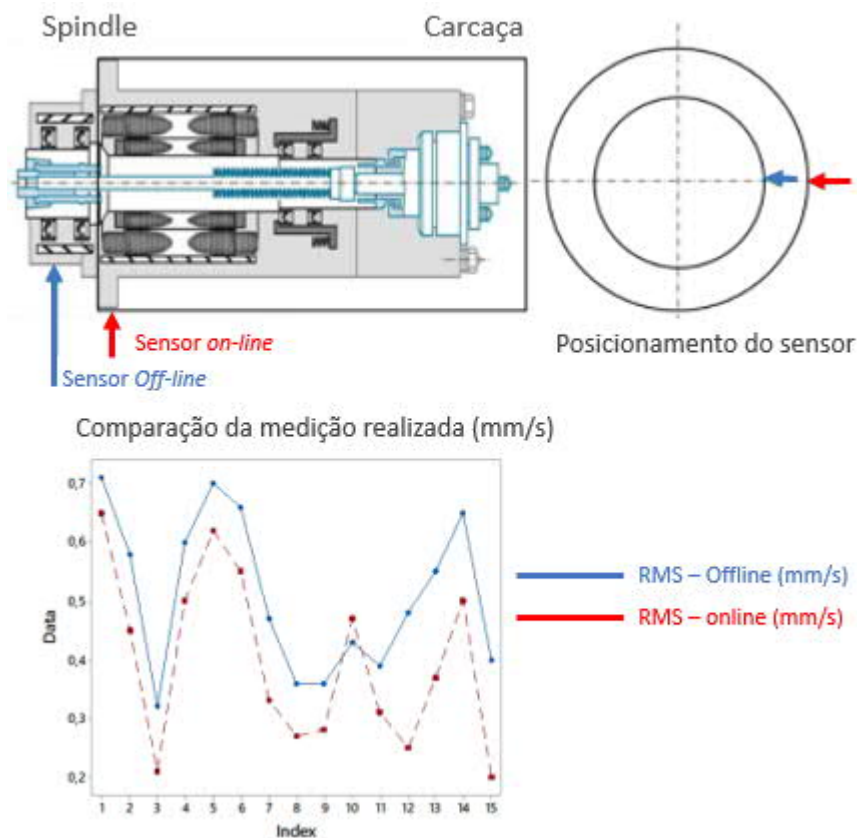
Nesse sentido, Holub e Hammer (2017) propuseram um sistema de monitoramento *on-line* pelo qual a coleta dos dados de vibração deve ocorrer em

uma operação em vazio para o registro de dados mais confiáveis. A dificuldade dessa análise é demonstrada por Rastegari, Archenti e Mobinet (2017), deixando evidente que são indispensáveis mais estudos devido à elevada variação de velocidade durante o processo de usinagem.

O modelo de Holub e Hammer (2017) realizou a comparação entre a medição *on-line* e *off-line* para identificação das possíveis variações entre os dois sistemas. Nessa medição é possível observar, conforme a figura 6, onde estavam posicionados o sensor *on-line* e o sensor *off-line*. Importante ressaltar que a comparação da medição, conquanto realizada em um mesmo spindle, tem sensores em diferentes posições, por isso, podendo afetar o resultado.

Entretanto os valores obtidos na comparação da medição realizada em mm/s, representados no gráfico da figura 6, indicam uma pequena variação entre os métodos de medição, o que fortalece a prática de medição por tecnologias *on-line*.

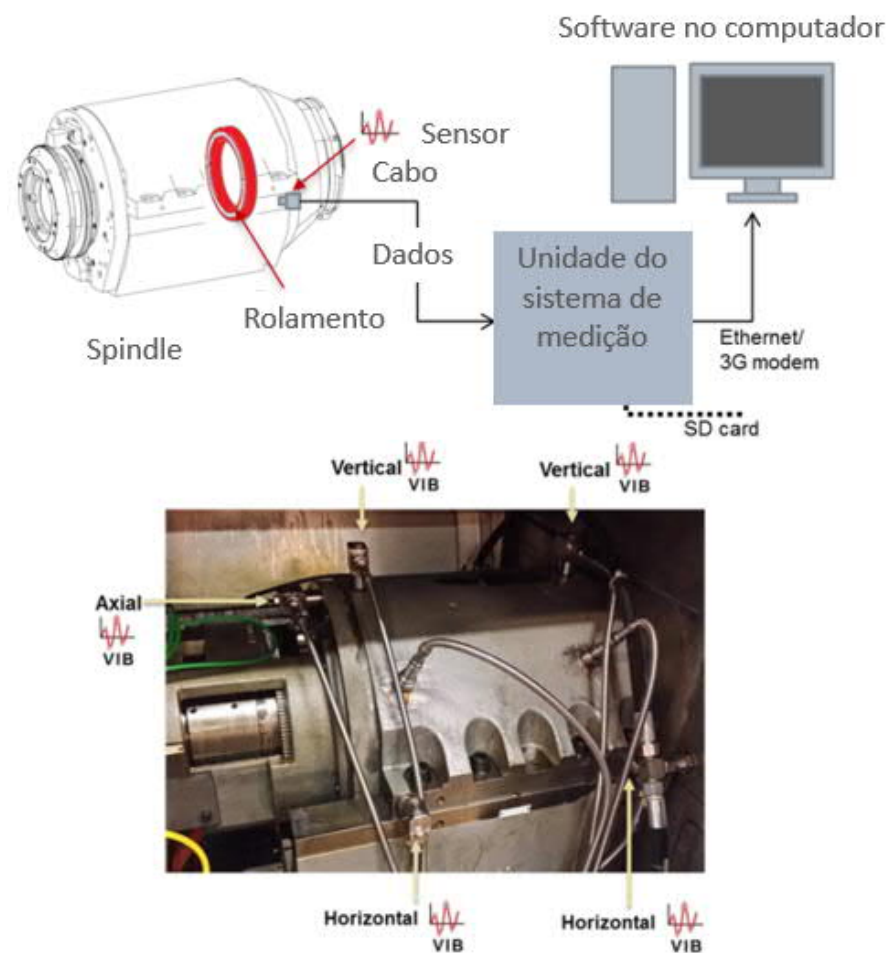
Figura 6 - Componentes do teste monitoramento de Holub e Hammer



Fonte: Adaptado de Holub e Hammer (2017, p. 2-4)

Na pesquisa de Rastegari, Archenti e Mobinet (2017), os autores desenvolveram um sistema de coleta de dados de vibração *on-line* em spindles (Figura 7) pelo qual puderam identificar o início de uma falha em um spindle de centro de usinagem. Eles utilizaram, para tanto, um sensor de vibração, com uma unidade de medição e entrega em um *software* no computador. Neste modelo, apresentado na figura 7, eles compararam as medições realizadas com as medições de quando a máquina era nova para verificar a possibilidade de identificação de falha. Dessa forma, assinalam que obter dados quando a máquina estava em operação é complexo devido às diferentes velocidades de operação, bem como ruídos oriundos da ferramenta de corte.

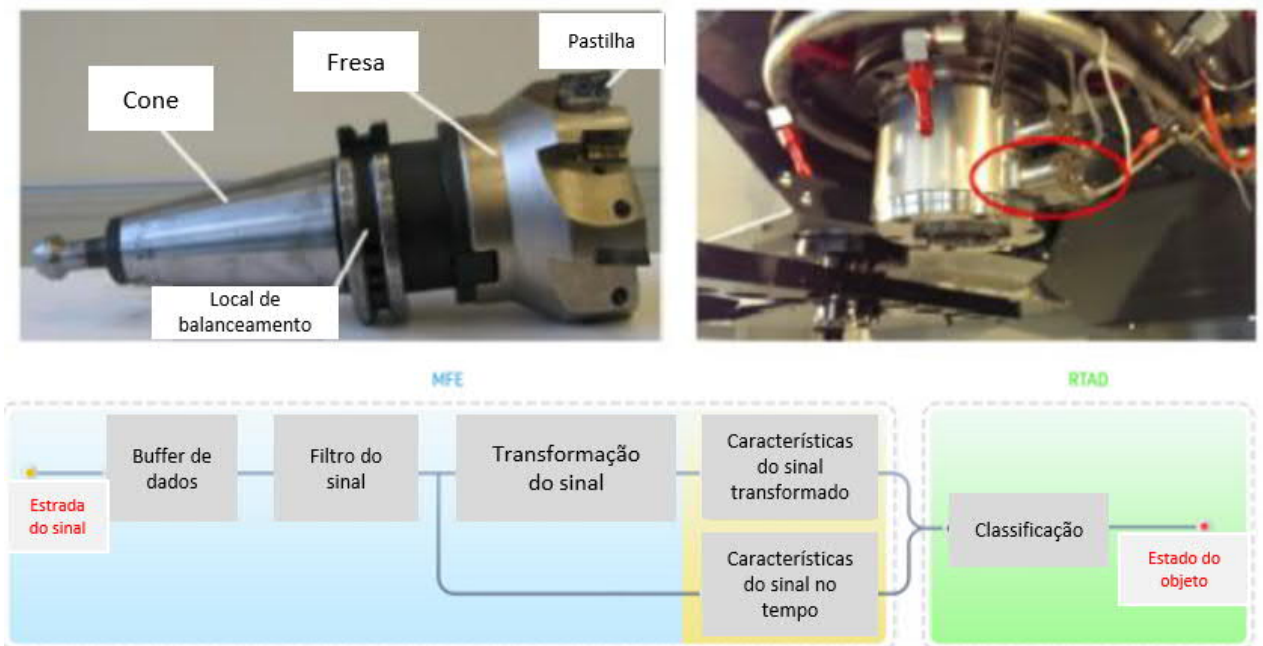
Figura 7 - Modelo de Rastegari, Archenti e Mobinet



Fonte: Adaptado de Rastegari, Archenti e Mobinet (2017, p. 3-4)

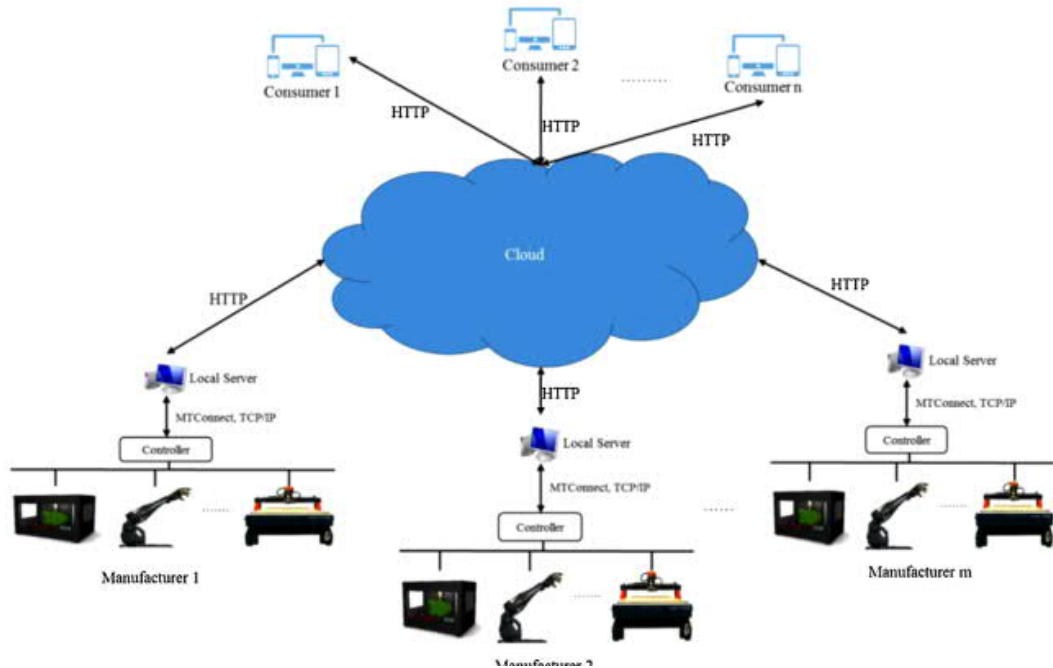
Žabiński *et al.* (2018) desenvolveram um sistema de diagnóstico em tempo real para identificar o desbalanceamento da ferramenta de uma máquina-ferramenta, adicionando sensores nos spindles e utilizando dados desta coleta para desenvolvimento de algoritmos. A figura 8 ilustra onde foram posicionados os sensores e o processo de tratamento dos sinais que obtiveram como resultado um algoritmo de aprendizagem profunda para detectar desbalanceamento em tempo real.

Figura 8 - Modelo de Žabiński *et al.*



Fonte: Adaptado de Žabiński *et al.* (2018, p. 3-4)

Outros modelos conceituais de como tornar máquinas-ferramentas em componentes de um sistema ciberfísico podem ser mencionados para o utilizo na busca de similaridades entre os modelos. Liu *et al.* (2017) desenvolveram um modelo chamado de *Cyber Physical Manufacturing Clouds* (CMPC) com o objetivo de monitorar e operar máquinas-ferramentas por meio da internet, através da computação em nuvem. A partir dos testes foi possível verificar que a solução desenvolvida possui escalabilidade para o monitoramento e operação de máquinas-ferramentas remotamente, assim, permitindo uma fabricação em nuvem dirigida pela internet. A figura 9 apresenta a arquitetura deste modelo.

Figura 9 - Modelo de Liu *et al.*

Fonte: Liu *et al.* (2017, p. 4)

Diaz-Rozo, Bielza e Larranaga (2017) propõem a coleta de dados diretamente do Siemens Sinumerik 840D e realizaram a análise de parâmetros como torque, temperatura, consumo de energia e velocidade, além de parâmetros de processo, como presença de peça, ferramenta e outros. Esses dados foram utilizados para análise através de três algoritmos para identificação de possíveis falhas e realização de aprendizagem de máquina: *K-means clustering*, *Agglomerative hierarchical clustering* e *Gaussian mixture model clustering*. Com os testes, foi identificado que o *Gaussian mixture model clustering* possui um melhor desempenho para identificação da condição operacional, apesar de sua implementação ser extremamente complexa. As outras duas técnicas utilizadas tiveram desempenho similar com foco em análise de detalhes, entretanto o *K-means clustering* possui uma velocidade maior na interpretação, sendo algo relevante para respostas em uma *smart factory*. Não foi mencionada se a integração do modelo deu-se com análise remota ou se foi realizada em ambiente na *web*. Detalhes da instalação são individuados na figura 10.

Figura 10 - Componentes utilizados por Diaz-Rozo, Bielza e Larrañaga

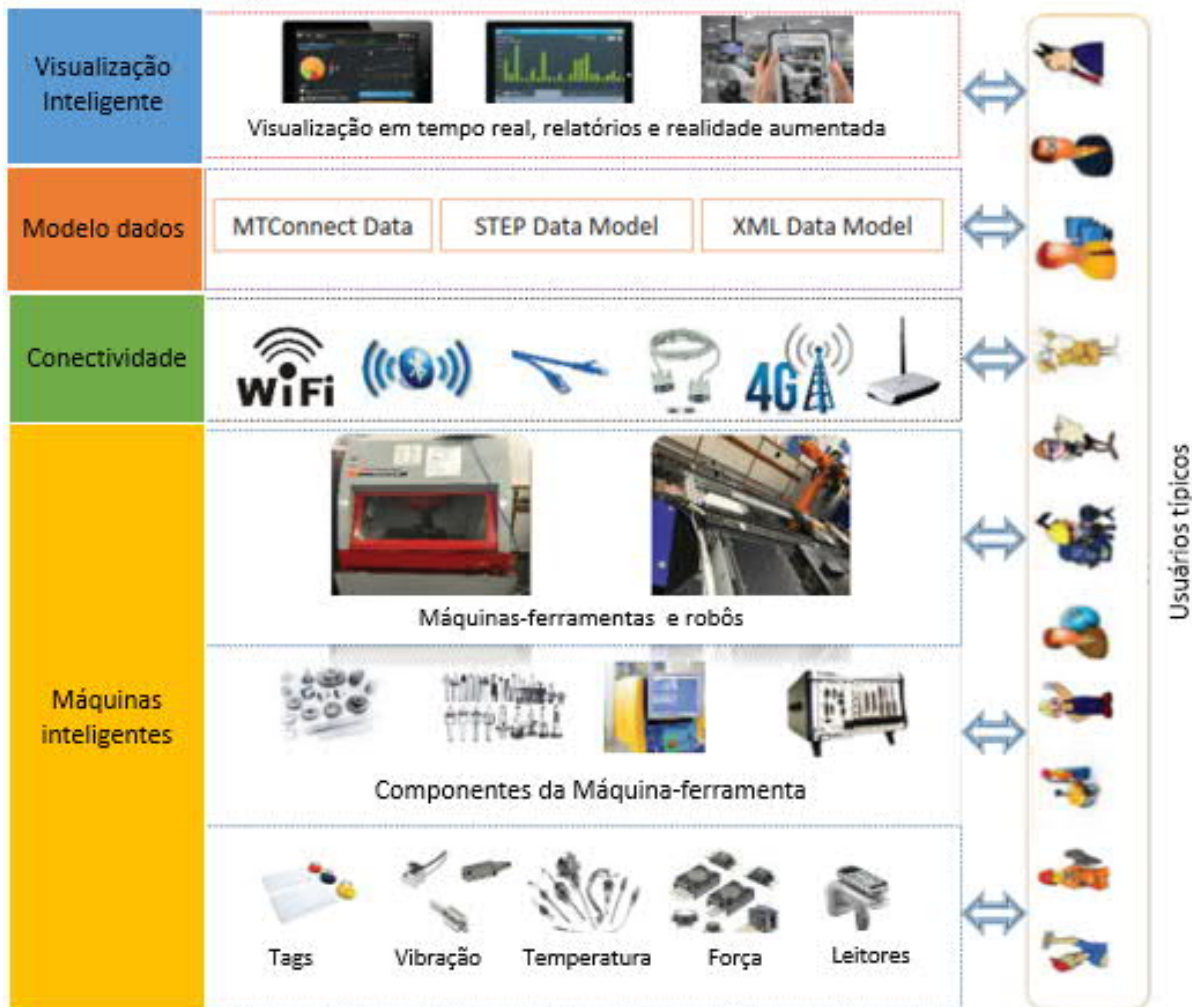


Fonte: Diaz-Rozo, Bielza e Larranaga (2017, p. 3)

Uma arquitetura geral para a solução de monitoramento em tempo real de uma máquina utilizando tecnologias de IoT, através de algumas camadas, é proposta por Zhong, Wang e Xu (2017). Esta arquitetura (Figura 11) é orientada a serviço, à qual os autores denominaram *Service-oriented architecture* (SOA), sendo utilizada para desenvolver serviços que poderiam ser implantados em nuvem, com acesso facilitado ao usuário. Ela é composta por quatro camadas, sendo a primeira delas chamada de máquina inteligente e formada por diversos tipos de sensores, como vibração, força e temperatura. Nessa camada também são tratadas as formas de envio dos dados como controle de máquinas e equipamentos capazes de adquirir dados

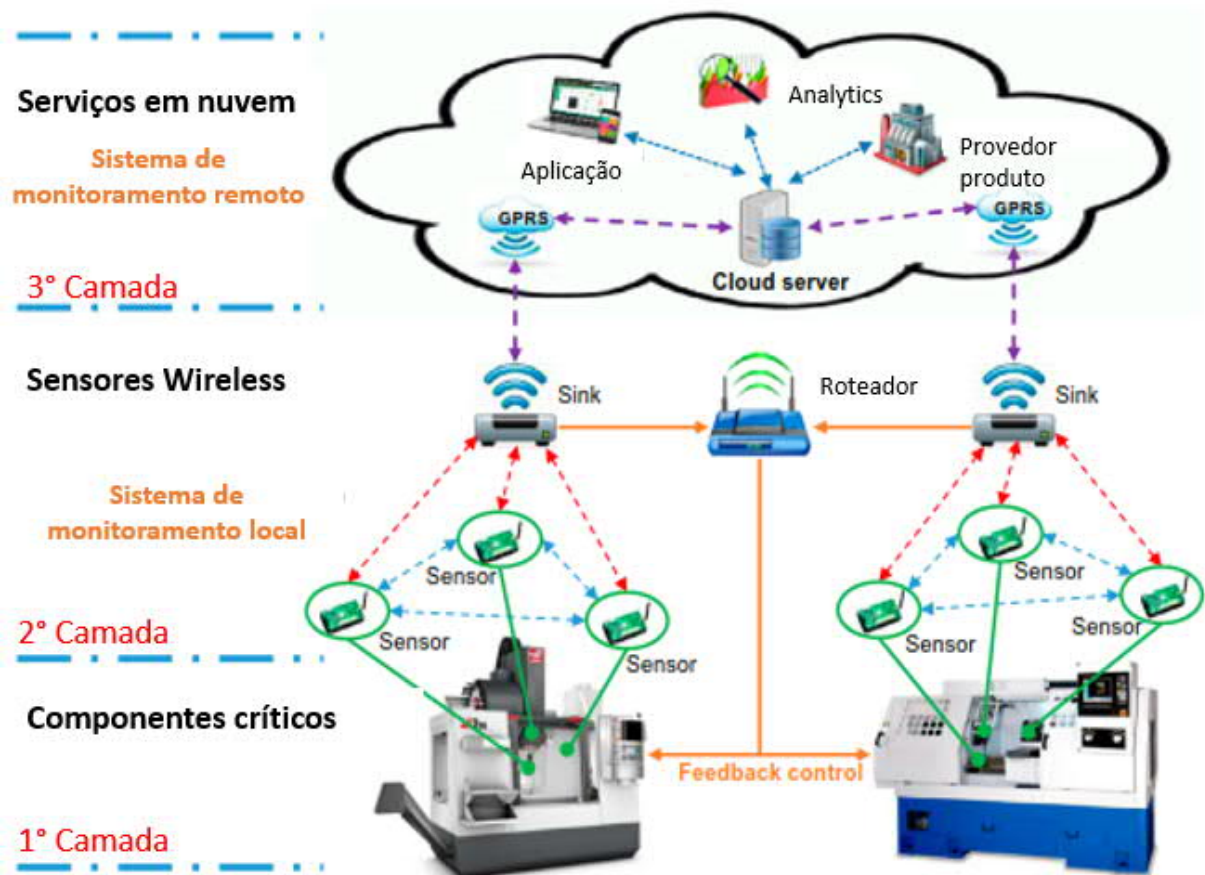
A segunda camada pode ser mencionada como a conectividade inteligente que usa meios para a comunicação dos dados, como *Wi-Fi*, 4G e *bluetooth*, por exemplo. A terceira camada trata dos modelos de dados para comunicação e focaliza meios para transmissão desses dados em estruturas padrões como o MTconnect e XML. Por fim, a quarta camada apresenta a visualização inteligente da estrutura, sendo possível compilar os dados e entregar em forma de *dashboards*. Todas as quatro camadas possuem interação com os usuários da plataforma, conforme a figura 11.

Figura 11 - Arquitetura SOA desenvolvida por Zhong, Wang e Xu



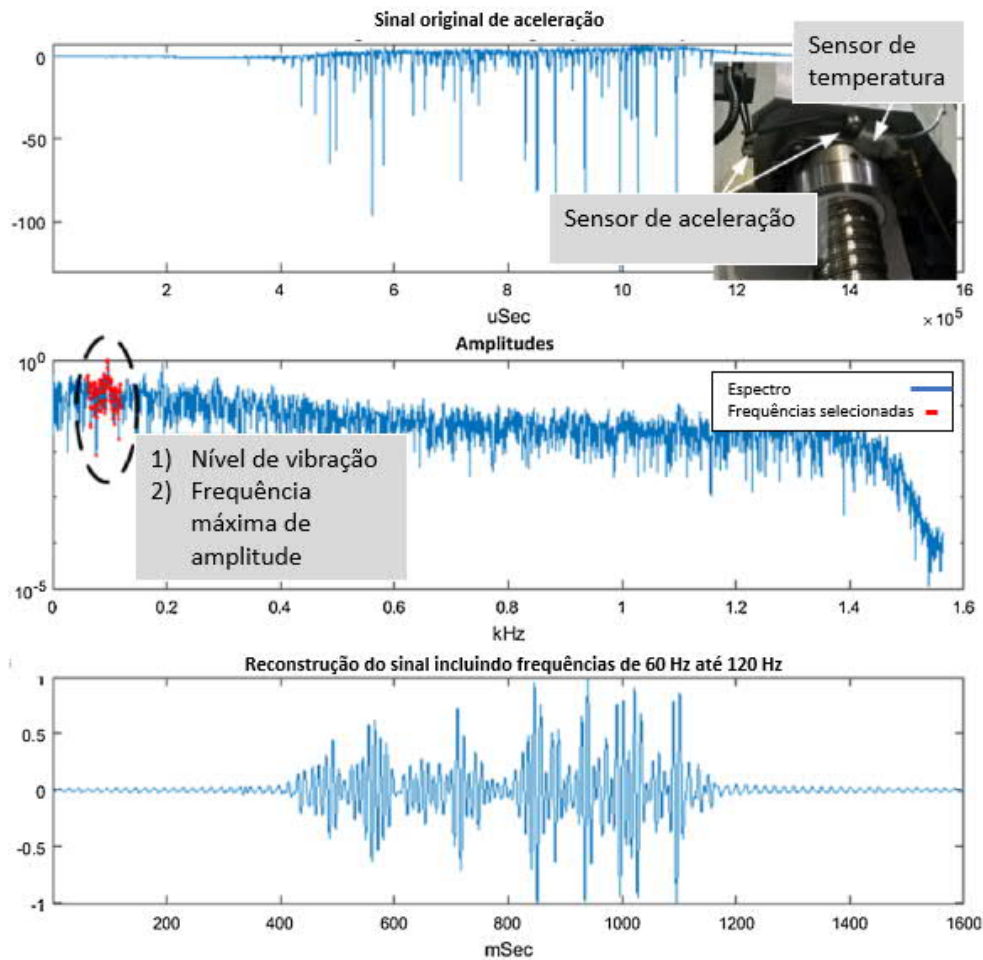
Fonte: Zhong, Wang e Xu (2017, p. 2)

Outra arquitetura é apresentada por Deng *et al.* (2018), que desenvolveram a estrutura *Health Monitoring System for Cyber-Physical Machine Tools* (HSM-CMPT), como na figura 12. Esta arquitetura é dividida em camadas, cuja primeira está relacionada aos sensores adicionados ou utilizados em componentes críticos de uma máquina-ferramenta. A segunda camada consiste em como os dados serão interligados entre os componentes críticos, via rede *wireless* ou outra forma de transmissão de dados para a terceira camada, que emprega a utilização de computação em nuvem para o desenvolvimento de um monitoramento remoto da saúde da máquina a partir do uso dos dados capturados diretamente dos componentes críticos.

Figura 12 - Estrutura HSM-CMPT de Deng *et al.*

Fonte: Deng *et al.* (2018, p.5)

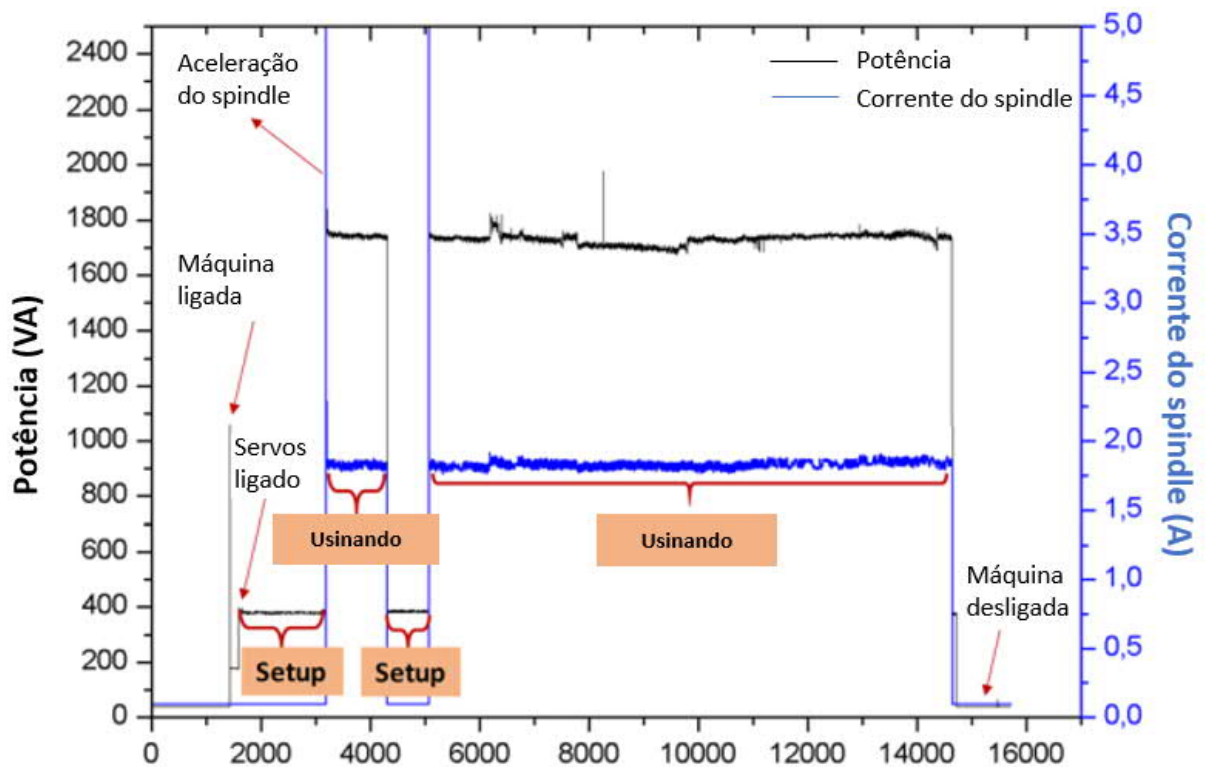
Frieß *et al.* (2018) desenvolveram um modelo para identificação de falha em fusos de esferas de máquinas-ferramentas através de *fuzzy-clustering*, utilizando dados de vibração coletados através de sensores posicionados nas castanhas. Apesar de não ser aplicado diretamente no spindle, pode-se utilizar conceitos similares caso se deseje avançar para construção de algoritmos. A figura 13 retrata o processo de transformação dos dados. Inicialmente, é apresentado o sinal de aceleração em sua condição original e, na sequência, quando avaliado o seu espectro, é determinada uma faixa de frequência que foi selecionada para reconstrução do sinal. Dessa forma, o sinal é reconstruído incluindo as frequências entre 60Hz até 120Hz. O modelo de transformação do sinal, neste momento, não é o foco principal, e sim a forma como os dados foram coletados com os sensores para que fosse possível o desenvolvimento do trabalho de Frieß *et al.* (2018).

Figura 13 - Extração de dados de Frieß *et al.*

Fonte: Frieß *et al.* (2018, p. 5)

Mourtzis, Milas e Vlachou (2018) utilizaram dados de potência elétrica e corrente elétrica visando desenhar um modelo para correlacionar qual etapa do processo de usinagem a máquina estava executando com os níveis de potência e corrente. Com base nesta análise, descrevem, conforme a figura 14, qual é o nível de potência e corrente existente quando a máquina é ligada, ou seja, como se comporta o servo motor ao ser ligado. Posteriormente, o servo motor se encontra na etapa de *setup*, e os dados são apresentados em determinado nível. Avançando para a fase de aceleração do spindle, existe um pico de potencial (Figura 14). O servo motor realiza a usinagem em outro parâmetro de potência, retorna para *setup* e, ulteriormente, faz uma nova usinagem chegando ao fim do processo, quando a máquina é desligada.

Figura 14 - Modelo de medição com a máquina em operação



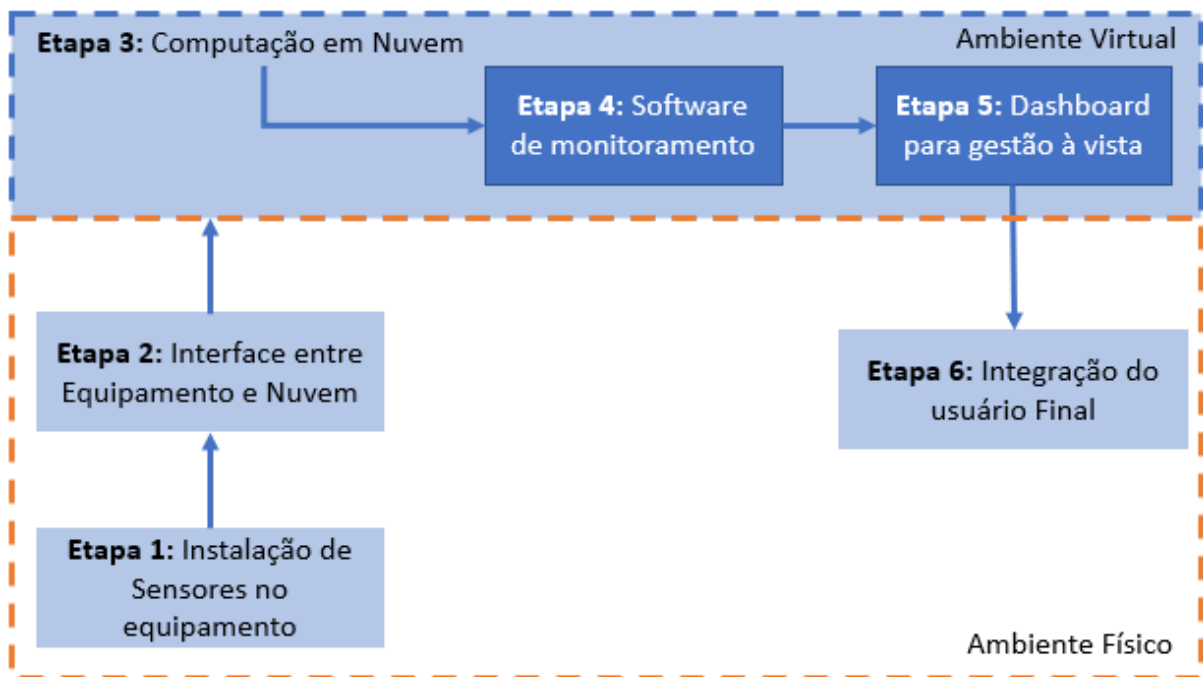
Fonte: Mourtzis, Milas e Vlachou (2018)

De acordo com a análise dos modelos e para visualização completa dos demais modelos encontrados na pesquisa, é apresentado, no **Apêndice B - Modelos de Indústria 4.0 em Máquinas-ferramentas Identificados na Revisão da Literatura** que indica, em ordem de publicação, as respectivas descrições para esta visualização. O desenvolvimento dessa tabela foi de extrema importância para entender quais contextos estavam conectados na revisão sistemática da literatura, com isso, permitindo a utilização para desenvolvimento do artefato que é demonstrado no Capítulo 4 - Proposta Teórica de sistema IoT para gerenciamento de spindles em operação – SIGSO, porém, no próximo capítulo, é descrito o método de pesquisa utilizado.

4. PROPOSTA TEÓRICA DE SISTEMA IOT PARA GERENCIAMENTO DE SPINDLES EM OPERAÇÃO - SIGSO

Neste capítulo é apresentado o artefato do tipo método desta dissertação. Para isso, foi elaborado um fluxograma com as seis etapas a serem seguidas na demonstração do artefato proposto para o sistema IoT quanto ao gerenciamento de spindles em operação. Na figura 15, elenca-se essas etapas para aplicação do sistema IoT.

Figura 15 – Proposta teórica do Sistema IoT para gerenciamento de spindles em operação (SIGSO)



Fonte: Elaborado pelo Autor

Como observado (Figura 15), o artefato do tipo método proposto para o sistema IoT quanto ao gerenciamento de spindles em operação (SIGSO) é dividido em seis etapas para realização dos testes do sistema de monitoramento *on-line* em spindles. A Etapa 1 é chamada de Instalação de Sensores no equipamento e a Etapa 2 está relacionada com a interface entre o sistema IoT e a nuvem. Na Etapa 3 é mencionada a Computação na Nuvem, seguida pela Etapa 4, que está vinculada à utilização de um *software* para monitoramento dos dados. A Etapa 5 trata do *dashboard* para gestão à vista e, por fim, a Etapa 6 fica responsável diretamente

pela integração com o usuário final, ou seja, o meio pelo qual serão acessados os dados pelo time de manutenção.

4.1. Detalhamento das etapas

Nesta seção é apresentado o detalhamento das etapas (Figura 15), nesse sentido, especifica-se o que foi realizado durante a demonstração do artefato do tipo método proposto. Na tabela 3 foram relacionados os autores destacados em cada etapa do processo, durante a revisão da literatura, bem como demais tópicos, detalhando-os com o objetivo de tornar de fácil interpretação o artefato do tipo método desenvolvido. Dessa forma, esta tabela é composta por cinco colunas contendo o número da etapa, a etapa, objetivo, tecnologia e autores.

4.1.1 Etapa 1: Instalação de Sensores no equipamento

Nesta etapa, deverá ser verificado qual o tipo de spindle a ser monitorado, para tanto, definindo o tipo de sensor de vibração e/ou a temperatura para realização da seleção do acelerômetro. Importante verificar o tipo de fixação a ser utilizado, pois, comumente, não é possível realizar furações nos spindles. Dessa forma, leva-se em consideração a fabricação de um adaptador com rosca que poderá ser colado próximo aos rolamentos.

A identificação do comprimento dos cabos do ponto de montagem do sensor até o dispositivo de interface da etapa 2 deverá ser definida previamente à montagem e, se possível, sugerir ao responsável da manutenção onde será realizado o teste para acomodar os cabos, em uma parada previamente programada. Assim, o tempo de montagem dos sensores, quando agendado o teste, poderá ser reduzido. Nesse momento, caberá ao responsável pela montagem a perfeita fixação do adaptador através de cola, a fixação correta do sensor no adaptador através de parafuso disponibilizado com o acelerômetro, a correta ligação do cabo no sensor e a disponibilização deste cabo no local de instalação do dispositivo de interface, provavelmente, no painel da máquina, como se relata na Etapa 2.

Tabela 3 – Descrição das Etapas do sistema IoT para gerenciamento de spindles em operação

Etapa n°	Etapa	Objetivo	Tecnologia	Autores
1	Instalação de Sensores no equipamento	Definir e instalar os sensores no spindle para correta captação dos dados	Sensores aplicados para manutenção preditiva	Abele, Altintas e Brecher (2010); Ayad, Terrissa e Zerhouni (2017); Ben-Daya, Hassini e Bahroun (2017); Bi et al. (2018); Caggiano (2016); Cao, Zhang e Chen (2017); Civerchia et al. (2017); Chang, Lee e Liu (2018); Chiang et al. (2018); Deng et al. (2018); Deng et al. (2018); Demilia et al. (2018); Frieß et al. (2018); Fujishima et al. (2016); Fujishima et al. (2017); Lee et al. (2006); Lee et al. (2014); Lee et al. (2018); Lee et al. (2019); Liu e Xu (2017); Luo et al. (2019); Janak e Hadas (2015); Janak et al. (2016); Mourtzis, Milas e Athinaios (2018); Mourtzis, Milas e Vlachou (2018); Mutilba et al. (2017); Nunez e Borsato (2018); Rastegari, Archenti e Mobinet (2017); Roy et al. (2016); Teti, Jemielniak e O'Donnell (2010); Thoppil, Vasu e Rao (2019); Tzimas, Vosniakos e Matsas (2019); Villalonga et al. (2018); Xu (2017); Wang et al. (2019); Wegener et al. (2017); Wu et al. (2017); Zabiński et al. (2019); Zhong, Wang e Zhou et al. (2019); Zhu e Zhang (2018);
2	Interface entre Equipamento e Nuvem	Identificar dispositivo de comunicação entre o sensor e nuvem	Processadores, gateways, dispositivos de comunicação que podem ser empregados	Ayad, Terrissa e Zerhouni (2017); Caggiano (2016); Chiang et al. (2018)*; Deng et al. (2018); Deng et al. (2018); Diaz-Rozo, Bielza e Larrañaga (2017)*; ElMoaqet et al. (2018); Fujishima et al. (2016)*; Fujishima et al. (2017)*; José Álvares, Oliveira e Ferreira (2018); Lee et al. (2019)*; Li et al. (2017); Liao, Loures and Deschamps (2018); Lin, Lin e Chiu (2015); Liu et al. (2017); Liu et al. (2018); Liu et al. (2020)*; Liu e Xu (2017); Luo et al. (2019); Mori e Fujishima (2013)*; Mourtzis, Milas e Athinaios (2018); Mourtzis, Milas e Vlachou (2018); Rastegari, Archenti e Mobinet (2017)*; Roy et al. (2016); Shivajee, Singh e Rastogi (2019)*; Tzimas, Vosniakos e Matsas (2019); Villalonga et al. (2018); Wang et al. (2019); Wu et al. (2017); Zhu e Zhang (2018); Zhou et al. (2019). *não possui interface com a nuvem e sim integração com software local

Tabela 3 – Descrição das Etapas do sistema IoT para gerenciamento de spindles em operação (Continuação)

Etapa n°	Etapa	Objetivo	Tecnologia	Autores
3	Computação em Nuvem	Definir o ambiente na nuvem para transferência e armazenamento dos dados	Ambientes em nuvem similares ao relatados pelos autores	Ayad, Terrissa e Zerhouni (2017); Belli et al. (2019); Caggiano (2016); Cao, Zhang e Chen (2017); Deng et al. (2018); Deng et al. (2018); Diez-Olivan et al. (2019); ElMoaqet et al. (2018); Esmaelian, Behdad e Wang (2016); LaCasse, Otieno e Maturana (2019); José Álvares, Oliveira e Ferreira (2018); Lee et al. (2014); Li et al. (2017); Liu et al. (2017); Liu et al. (2018); Liu et al. (2020); Liu e Xu (2017); Lins et al. (2017); Mourtzis, Milas e Athinaios (2018); Mourtzis, Milas e Vlachou (2018); Roy et al. (2016); Villalonga et al. (2018); Xu (2017); Wang et al. (2019); Wu et al. (2017); Zheng et al. (2018); Zhong, Wang e Xu (2017); Zhu e Zhang (2018); Zhou et al. (2019).
4	Software de monitoramento	Definir o software de monitoramento dos dados coletados pelos sensores	Software de análise de vibração compatíveis	Demilia et al. (2018); ElMoaqet et al. (2018); Frieß et al. (2018); Fujishima et al. (2017); Hassan et al. (2018); Janak e Hadas (2015); José Álvares, Oliveira e Ferreira (2018); Lee et al. (2014); Liu et al. (2018); Lu e Xu (2018); Mourtzis, Milas e Vlachou (2018); Rastegari, Archenti e Mobinet (2017); Roy et al. (2016); Teti, Jemielniak e O'Donnell (2010); Zhu e Zhang (2018).
5	Dashboard para gestão à vista	Definir modelo de apresentação dos resultados do processo de medição	Ambiente web com acesso remoto ao dashboard dos resultados	Ayad, Terrissa e Zerhouni (2017); Belli et al. (2019); Civerchia et al. (2017); José Álvares, Oliveira e Ferreira (2018); Liu et al. (2018); Liu et al. (2020); Zheng et al. (2018); Zhu e Zhang (2018);

Tabela 3 – Descrição das Etapas do sistema IoT para gerenciamento de spindles em operação (Continuação)

Etapa n°	Etapa	Objetivo	Tecnologia	Autores
6	Integração do usuário Final	Definir como o usuário final acessará os dados	Acesso remoto dos diagnósticos pela web	Ayad, Terrissa e Zerhouni (2017); Belli et al. (2019); Civerchia et al. (2017); Deng et al. (2018); Deng et al. (2018); Fujishima et al. (2017); José Álvares, Oliveira e Ferreira (2018); Lee et al. (2014); Li et al. (2017); Liu et al. (2018); Liu e Xu (2017); Longo, Nicoletti e Padovano (2017); Lu e Xu (2018); Mori e Fujishima (2013); Roy et al. (2016); Shamsuzzoha et al. (2019); Xu (2017); Wang et al. (2019); Zheng et al. (2018); Zhou et al. (2019).

Fonte: Elaborado pelo Autor

4.1.2 Etapa 2: Interface entre Equipamento e Nuvem

Será necessário avaliar qual dispositivo apresenta capacidade de armazenar os dados coletados pelos sensores e se possui conexão para ligação de equipamentos com conexão com a internet. Tal dispositivo precisará ser de fácil acomodação em painel da máquina-ferramenta, pois estruturas adicionais podem prejudicar o desenvolvimento da implementação. A alimentação elétrica também precisa estar disponível no painel elétrico da máquina, assim, sendo necessário pequenos arranjos com disjuntores.

4.1.3 Etapa 3: Computação em Nuvem

A plataforma na nuvem será responsável por coletar os dados armazenados no dispositivo definido na Etapa 2 e entregar ao *software* de monitoramento da Etapa 4. Aqui, será necessário verificar como se realizará essa comunicação, como, por exemplo, via cabo de rede ethernet utilizando a rede privada da companhia ou com a utilização de *modem* com *card* 3G/4G. Com isso, cria-se um mecanismo de comunicação individual por rede de celular e é preciso entender a necessidade de liberação de portas de acesso que permitam o tráfego de dados entre as etapas.

4.1.4 Etapa 4: Software de monitoramento

O *software* de monitoramento dos dados será uma etapa fundamental para definição das demais estruturas. Ele será responsável por manter o histórico dos dados coletados pelas etapas anteriores, bem como será a base para realização de diagnósticos com indicação de falhas, eventos, entre outras condições dos spindles. Nesta etapa, estarão evidentes quais tipos de coletas serão realizados para criação da estrutura do banco de dados, como pontos de vibração, então, sendo possível analisar velocidade, aceleração e envelope e/ou outros fatores, tais como temperatura.

4.1.5 Etapa 5: Dashboard para gestão à vista

Para facilitar a apresentação dos resultados ao usuário final, que pode não ser especialista em análise de vibração, a utilização de *dashboard* para gestão à vista será uma alternativa estudada. Nesse caso, será necessário definir quais serão os dados a serem divulgados no *dashboard* para posterior visualização. O ambiente

deverá ser na *web* para permitir acesso remoto sem precisar estar em computadores específicos. Além disso, buscar uma interface simples, entre *software* e *dashboard*, será uma ação analisada a fim de facilitar os testes a serem realizados com o artefato desenvolvido em campo.

4.1.6 Etapa 6: Integração do usuário Final

Nesta etapa, será definido como o usuário final acessará os dados desde a coleta pelos sensores até a disponibilização das informações no *dashboard*, e quais níveis de acesso poderão ter, ou seja, serão apenas visualizadores ou poderão realizar análises, e se haverá integração de dados coletados localmente pelo cliente para amplificar as possibilidades de diagnósticos.

5. APLICAÇÃO DO SISTEMA IOT PARA GERENCIAMENTO DE SPINDLES EM OPERAÇÃO - SIGSO

Este capítulo tem como objetivo descrever detalhadamente a aplicação do artefato desenvolvido. Para isso, inicia-se a descrição da empresa na qual foi realizada a demonstração, logo, seguindo para a apresentação da execução das etapas descritas no capítulo 4.

5.1. Demonstração do artefato - Estudo de caso – Aplicação do Sistema IoT na prática

Nesta seção é apresentado o estudo de caso como meio para a demonstração do artefato desenvolvido em um ambiente real. Dessa forma, é retratado o local onde a aplicação do sistema IoT com detalhes da máquina e spindle. Posteriormente, são descritas as etapas de aplicação do artefato, conforme modelo teórico estabelecido.

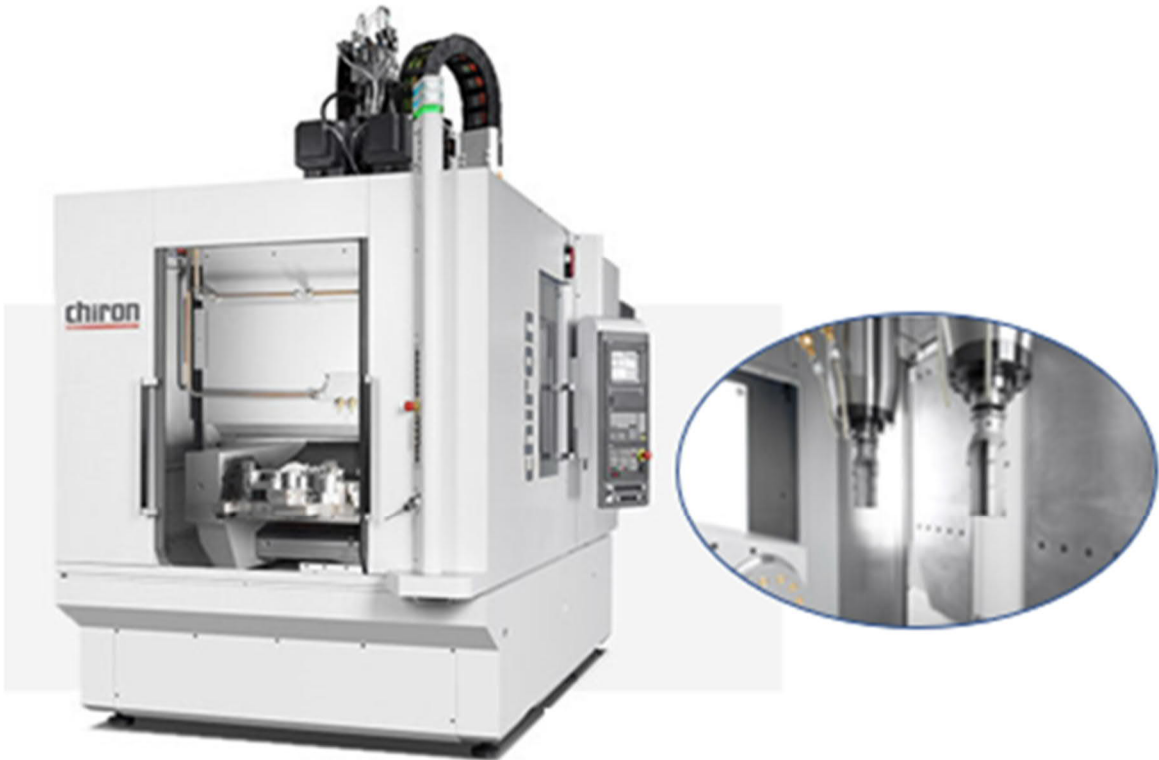
5.1.1 Descrição da Empresa-alvo do estudo de caso

A empresa-alvo, situada em Curitiba – PR, possui, além da usinagem, a fundição e forjaria na mesma unidade. O parque de máquinas é extremamente relevante, pois possui um número superior a 600 centros de usinagens dos mais variados fabricantes de máquinas. Tem como produtos principais a usinagem de blocos de motores, componentes automotivos, como bielas e virabrequins, além de outros componentes para segmentos diversos.

A máquina foco deste estudo foi uma Chiron DZ18, do fabricante CHIRON Werke GmbH & Co. KG, com sede na Alemanha e atuação no mercado há mais de cem anos. A máquina Chiron DZ 18 é um centro de usinagem acionado por comando numérico computadorizado (CNC), que possui dois spindles que trabalham, simultaneamente, visando ao aumento da produtividade em peças seriadas, além de a máquina possuir um dispositivo para carregamento e descarregamento de peças, assim, permitindo esta atividade durante o processo de usinagem. (CHIRON, 2019)

A figura 16 apresenta uma visão geral da máquina Chiron DZ18 e a disposição dos spindles.

Figura 16 - Máquina Chiron DZ 18



Fonte: Adaptado de Chiron (2019)

A série 18 da Chiron é descrita em seu *site* e confirmada durante a realização da pesquisa como uma máquina de alta produtividade e confiável, máxima precisão e qualidade de processamento, redução da necessidade de espaço, configuração rápida, operação simples, alta estabilidade, alta dinâmica e fácil manutenção.

Na máquina na qual foi realizado o estudo, durante os testes, estavam sendo produzidas bielas para os sistemas de motores a combustão que possuem a função de transmitir a força gerada na câmara de combustão para o virabrequim (componente responsável pelo movimento linear dos pistões do motor). Na figura 27, consta uma biela para fins de visualização. A função dos spindles da máquina era realizar a usinagem dos furos internos.

Figura 17 - Biela e região de usinagem



Fonte: Adaptado de Chiron (2019)

Cada spindle é responsável pela usinagem de duas bielas completas por ciclo e, assim, ao fim de cada ciclo, tem-se quatro peças. Sendo que o tempo de ciclo é de cerca de 50 segundos, podendo-se inferir que, em 24 horas, são fabricadas aproximadamente 6.900 bielas. Outros fatores devem ser levados em consideração, tais como paradas para descanso, trocas de turnos, entre outros, que interferem nessa produção, contudo o objetivo da análise foi demonstrar o volume aproximado de produção, e não avaliar exatamente os fatores envolvidos na produtividade.

Os spindles das máquinas Chiron são acionados por Servo motores por meio de uma conexão por acoplamento. Dessa forma, as carcaças são fixas nas máquinas para garantir a concentricidade entre Servo motor e spindle; e apenas o cartucho do spindle é retirado quando há necessidade de manutenção (Figura 18), que indica o posicionamento do spindle e do Servo motor na máquina.

Figura 18 - Posicionamento do spindle e Servo motor



Fonte: Adaptado Chiron (2019)

Os spindles possuem uma rotação máxima de 8.000rpm (rotações por minuto), porém o rpm máximo utilizado para usinagem das bielas é 3.000rpm. Ele é composto por quatro rolamentos de contato angular com esferas de aço, lubrificados com graxa e com placas de vedação para prevenir contaminação. Além disso, este spindle possui um sistema de fixação de ferramenta para um cone HSK A63 com troca monitorada por sensores internos. Ele é acionado por um Servo motor (Figura 25).

O objetivo desta pesquisa foi avaliar o monitoramento *on-line* em spindles em usinagem de ligas metálicas. Apesar da tecnologia embarcada nas máquinas CNC, a análise se deu pelo processo de monitoramento *on-line* de vibração para validação do modelo desenvolvido. A seguir, são descritas as fases do modelo teórico desta dissertação aplicadas por meio de pesquisa ação.

5.1.2 Demonstração da aplicação do artefato

5.1.2.1 Etapa 1: Instalação de Sensores no equipamento

Para a realização da Etapa 1, primeiramente, fez-se uma solicitação à empresa na qual seria realizado o teste, dessa forma, estabelecendo um primeiro contato, que ocorreu em 5 de setembro de 2019. Nessa data, foi evidenciada a possibilidade de teste e delimitado quando ele poderia ocorrer, de acordo com a análise da disponibilidade do sistema de monitoramento *on-line*. Foi sinalizado, nessa data, que os testes ocorreriam na máquina Chiron DZ 18 e que esta se encontrava no parque, na cidade de Curitiba-PR.

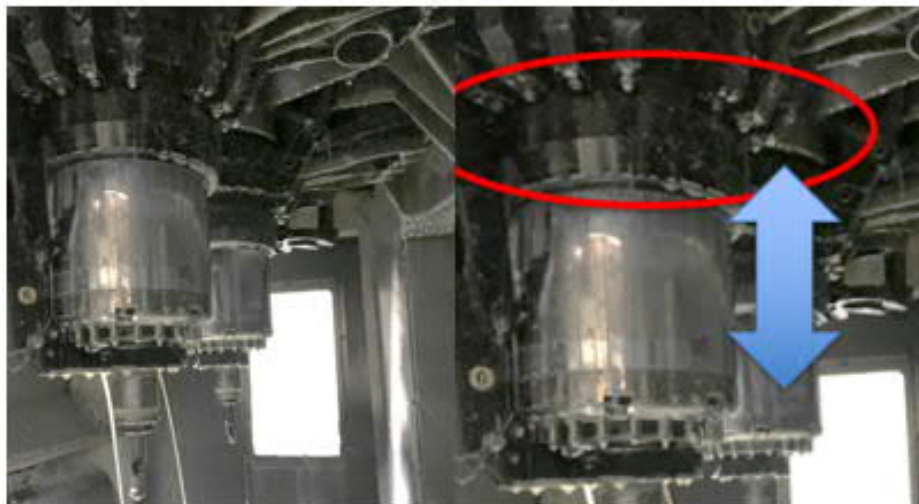
Em 13 de setembro de 2019 foi definido que os testes ocorreriam no mês de outubro de 2019, quando houve confirmação do local dos testes. Nessa data, ficou estabelecido, também, que um dos planejadores da manutenção seria responsável por auxiliar na implantação do sistema e providenciaria os recursos necessários no local de teste.

No dia 17 de setembro de 2019, iniciou-se o levantamento técnico para verificar qual seria o posicionamento do sensor de vibração, quais cabos poderiam ser utilizados, entre outras necessidades pertinentes ao processo. Foi enviado ao planejador da manutenção as seguintes informações:

- Distância do posicionamento do sensor até o local onde será armazenado o IMx-8 (Módulo de coleta e transmissão de dados para nuvem) no painel da máquina.
- Realizar a passagem de cabos nas canaletas da máquina e/ou implantar novas passagens caso não haja nenhuma disponível.
- Disponibilizar alimentação elétrica para o IMx-8 (24 VDC).
- Disponibilizar ponto de internet para transmissão dos dados para o *software* na nuvem SKF.
- Programar parada de um a dois dias para implantação do sistema.

A partir dessas informações, o planejador de manutenção buscou informações adicionais da aplicação, assim, retornando a mensagem em 19 de setembro de 2019, quando foi mencionado que a máquina Chiron DZ 18 possuía dois spindles e traria um ponto relevante sobre o processo de troca de ferramentas com garras que correm no corpo do spindle. Na figura 19, evidenciam-se ambas as condições relatadas.

Figura 19 - Imagem Interna dos Spindles Chiron DZ 18



Fonte: Dados da Pesquisa

Como pode ser observado na figura 19, existia uma preocupação sobre a possibilidade de montagem dos sensores no corpo do spindle, visto que o trocador de ferramenta poderia atingir o sensor, caso posicionado em local inadequado.

A partir desse momento, houve uma lacuna de tempo, em que estavam sendo avaliados os próximos passos porque os testes seriam realizados apenas em outubro/2019. Dessa forma, o próximo contato ocorreu entre os dias 9 de outubro de 2019 e 15 de outubro de 2019. Nesse período, foi definido o planejamento para a execução das atividades, contendo os seguintes marcos:

- a) Emissão de nota fiscal e expedição dos cabos até 10/10.
- b) Informar RPM máximo e designação dos rolamentos instalados até 18/10.
- c) Passagem dos cabos na máquina pelo planejador da manutenção até 24/10.
- d) Fabricação de suporte para sensor – desenho anexado pelo planejador de manutenção até 24/10.
- e) Comissionamento na empresa em 25/10.

Com isso, planejou-se o estabelecimento de datas para a realização da atividade em campo, bem como dados importantes para a preparação do banco de dados de vibração, como descrito em detalhes na Etapa 4. Foi também definido o cabo que ligaria o sensor ao módulo IMx-8. Esse cabo é o CMSS 932, com o comprimento de 15 metros. A figura 20 apresenta mais detalhes deste modelo de cabo.

Figura 20 - Cabos dos Sensores com 15 metros

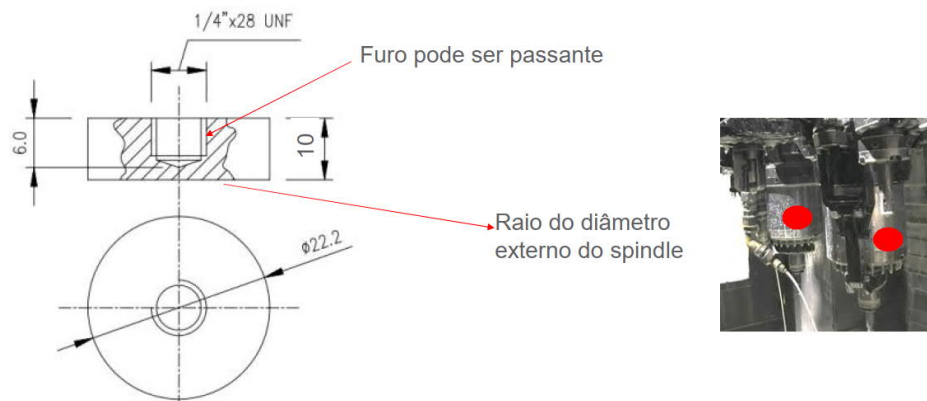


Fonte: SKF (2018)

Além disso, foi analisada a questão de fixação do sensor, pois não seria possível realizar uma furação na carcaça do spindle para essa fixação. Nesse sentido foi disponibilizado um croqui com detalhes para a fabricação deste

componente. Na figura 21, está detalhado esse dispositivo para fixação do sensor de vibração.

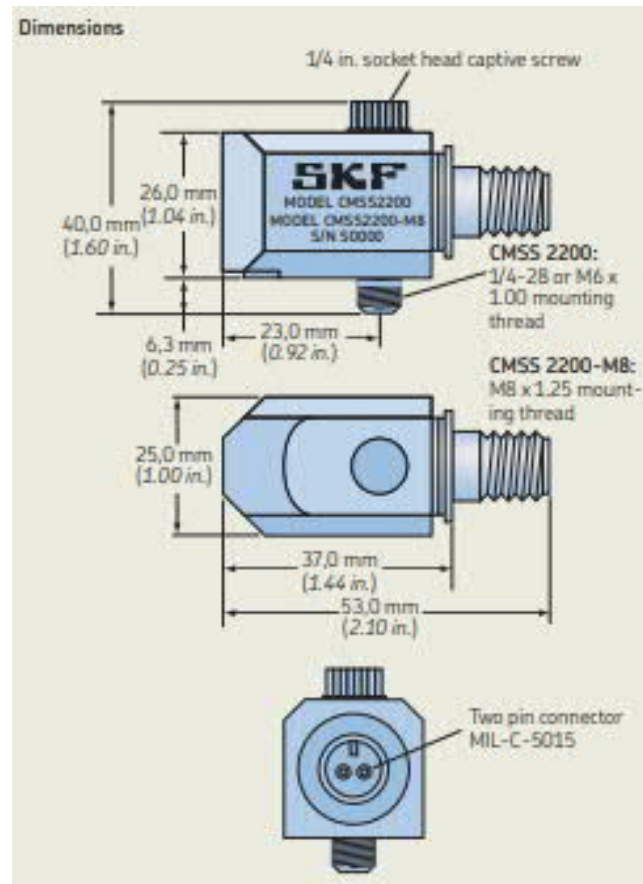
Figura 21 - Dispositivo de Fixação do Sensor



Fonte: Adaptado de SKF (2018)

O sensor, nessa ocasião, também, foi definido como sendo o CMSS 2200 da SKF e está representado na figura 22, além do dia da instalação, que ficou combinado para 25 de outubro de 2019.

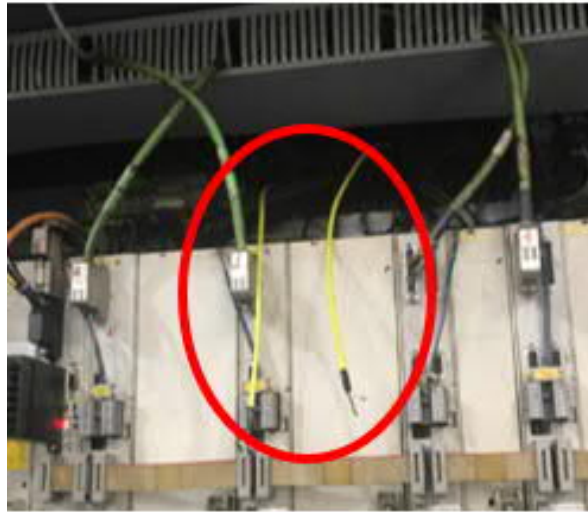
Figura 22 - Sensor de Vibração SKF CMSS 2200



Fonte: SKF (2018)

Na data mencionada, foi iniciada a instalação na empresa, conforme previamente definido, focalizando-se na atividade de instalação dos sensores. Para isso, foi importante, primeiramente, identificar se os cabos haviam sido alocados corretamente para posicionamento do sensor e conexão com o IMx-8 no painel da máquina. Foi observado que os cabos tinham sido acomodados corretamente, porém o comprimento não era o ideal (Figura 23).

Figura 23 - Comprimento do cabo inadequado



Fonte: Dados da pesquisa

Dessa forma, decidiu-se por posicionar o módulo do lado externo da máquina, que é descrito na Etapa 2, o que não prejudicou o andamento dos testes. A questão do cabo foi algo que poderia ser minimizado previamente, desde que conhecidas as distâncias de todas as calhas de passagem de cabos que são diferentes de máquina para máquina em virtude do fabricante.

O segundo ponto importante era a fixação do dispositivo de fixação do sensor de vibração, como exposto na figura 21. Apesar do desenho, o planejador de manutenção optou por realizar a fabricação durante o processo de instalação. Utilizou-se um processo de soldagem sem a necessidade de uma usinagem precisa, desse modo, chegando ao resultado que é ilustrado na figura 24.

Figura 24 - Dispositivo de Fixação do Sensor



Fonte: Dados da pesquisa

Um terceiro ponto extremamente importante foi verificar se os cabos poderiam ser rompidos com a movimentação dos braços durante a troca automática da ferramenta. Observaram-se algumas trocas realizadas e foi definido o ponto de fixação dos sensores. Na sequência, foi colado o dispositivo de fixação na carcaça do spindle. Após o tempo de cura da cola, foi fixado o sensor no dispositivo e, conseqüentemente, o cabo no sensor. A figura 25 representa o posicionamento do sensor fixado na extremidade da carcaça do spindle e é possível verificar o pequeno espaço existente para passagem do cabo.

Figura 25 - Indicação do Cabo, Dispositivo e sensor



Fonte: Dados da pesquisa

O processo foi repetido para o segundo spindle para fixação do dispositivo, sensor e cabo, o que pode ser verificado na figura 26. É possível visualizar os dois sensores fixados para o início da realização da Etapa 2.

Figura 26 - Spindles com Sensores Posicionados



Fonte: Autor (2019)

5.1.2.2 Etapa 2: Interface entre Equipamento e Nuvem

Para a realização da Etapa 2, denominada como interface entre equipamento e nuvem, em 17 de setembro de 2019, foi estabelecido que o equipamento que seria utilizado para essa interface seria o SKF Multilog IMx-8 (Figura 27).

Figura 27 - SKF Multilog IMx-8



Fonte: SKF (2019)

Com o equipamento definido, enviou-se os dados técnicos do IMx-8 disponíveis para a empresa, conforme apontado a seguir:

- Sistema *on-line* de manutenção condicional em todos os canais com possibilidade de aquisição síncrona (Tempo Real).
- Permite a inserção de sinais de processo como: acelerômetros, sensores de velocidade, deslocamento, entradas de +/- 10Vdc, +/-10Vac, +/- 24Vdc, +/-

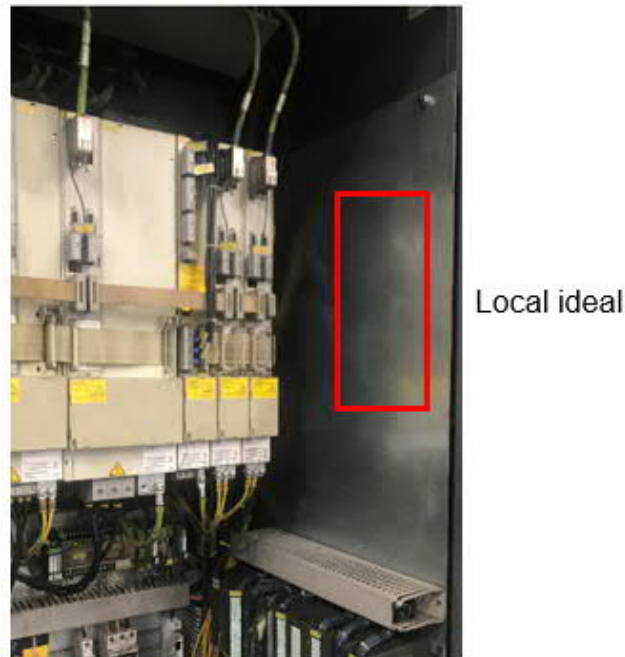
24Vac, processo de 4 a 20mA (pressão, vazão, etc.) e temperatura de 2 a 4mA.

- IMx e *software* SKF @ptitude Analyst possui comunicação via protocolo ModBus RS-485 para troca de informações com sistemas de automação do cliente.
- O IMx permite a vigilância contínua dos parâmetros configurados 24 horas por dia, em todos os canais simultaneamente em tempo real.
- O IMx possui memória interna não volátil para cada um dos canais, utilizado para armazenamento de informações mesmo quando perde a comunicação com o *software*. Continua realizando o monitoramento autônomo e envio dos dados monitorados para um sistema digital de controle distribuído - SCDC (ModBus), durante esta falha na comunicação.
- O IMx permite aquisição periódica com configuração mensal, semanal, diária, por hora ou minutos, incluindo estratégia se for diagnosticado alarme, que faz com que o sistema automaticamente armazene o dado monitorado ou espectro da grandeza monitorada (no caso de vibração).

Para sua instalação, foi solicitada a disponibilização de um trilho DIN que ficaria fixo no interior do painel elétrico da Chiron e foi mencionada a necessidade de uma alimentação elétrica de 24Vdc. Esta tensão é comumente encontrada nos painéis das máquinas-ferramentas. Além disso, necessitou-se da preparação do cabo de rede ethernet para comunicação com a internet, pelo qual seria possível a transferência de dados para o *software* na nuvem.

No dia 25 de outubro de 2019, quando iniciada a instalação, em virtude do comprimento menor do cabo, foi necessário verificar um novo posicionamento para o IMx-8. O local ideal identificado é representado na figura 28, que fica internamente no painel da máquina e possui espaço para sua acomodação.

Figura 28 - Local ideal de posicionamento IMx-8



Fonte: Dados da Pesquisa

Com essa condição, foi definida uma alternativa ao lado externo da máquina e próxima ao painel de acionamento do CNC, o que permitiu prosseguir perfeitamente com os testes. Foi fixado o trilho DIN nesta posição, ajustados os cabos de alimentação, cabo ethernet e cabos de ligação dos sensores no IMx-8. A figura 29 ilustra o posicionamento final do módulo na máquina Chiron.

Figura 29 - IMx-8 no painel da máquina



Fonte: Dados da Pesquisa

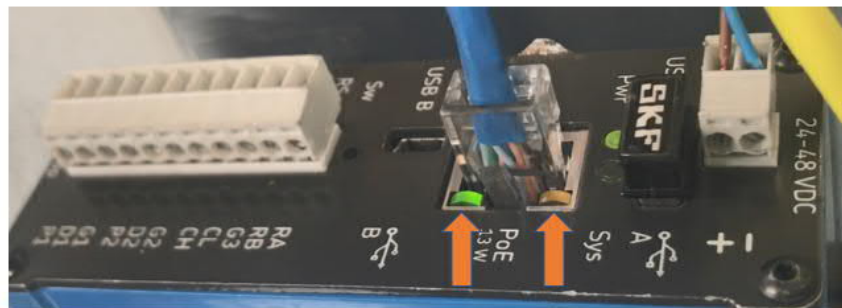
5.1.2.3 Etapa 3: Computação em Nuvem

A Etapa 3, intitulada computação em nuvem, trata principalmente dos protocolos de liberação de comunicação entre o IMx-8 e o *software* @ptitude

analyst, descrito na etapa 4, que são baseados em nuvem. Para que sejam sincronizados os pontos de medição localizados no IMx-8 com os pontos criados no @ptitude analyst, é necessária uma configuração prévia do programa chamado “OnlineConfigurator.exe”. Este programa permite limpar configurações previamente existentes como também adicionar dados específicos de comunicação como o IP (*Internet Protocol*) através de um cabo serial conectado em *notebook*. Essa configuração foi realizada antes do início do processo de instalação.

Foi solicitada, previamente, para empresa, a liberação de um IP para que, durante a instalação, fosse adicionado o número e, assim, realizada a comunicação entre *hardware* e *software*. Durante a instalação, o procedimento foi realizado com sucesso, portanto, permitindo a comunicação entre o dado coletado e o *software*. Em campo, isso é facilmente detectado através do *led* laranja piscando que indica que há um sinal de rede de internet no ponto. A figura 30 indica o local, no módulo, onde deve ser observado, em campo, para identificação do sinal da rede de internet.

Figura 30 - Comunicação com a rede internet



Fonte: Dados da Pesquisa

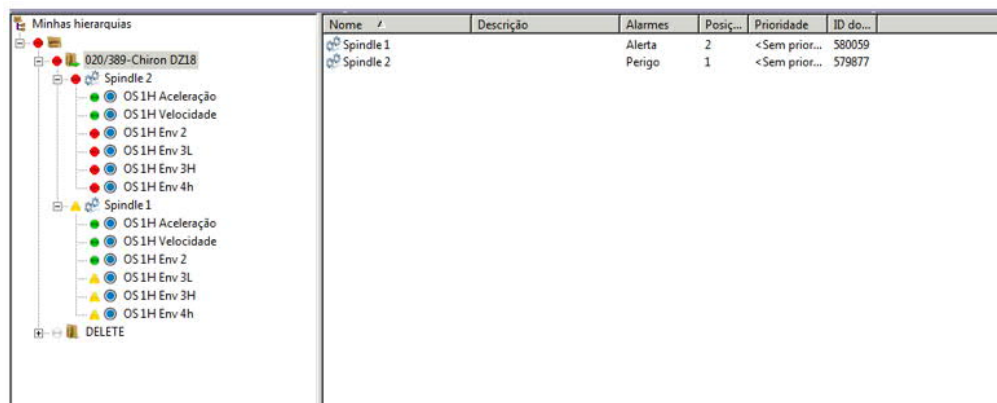
Os dados coletados são descarregados no ambiente de nuvem, provido pela Amazon S3, onde está localizado o *software* de monitoramento que será descrito na etapa seguinte. O volume de dados é de cerca 200Kb por sensor, sendo que para este processo definiu-se que cada medição seria realizada a cada 6 horas. Com a rede conectada, as próximas ações foram realizadas na Etapa 4. Nenhum ponto de melhoria foi identificado durante o processo de execução da Etapa 3.

5.1.2.4 Etapa 4: **Software de monitoramento**

A Etapa 4 iniciou-se em 19 de outubro de 2019, quando houve envio dos dados dos rolamentos e rotação do spindle para a configuração do *software* de monitoramento. Os spindles em que foram realizados os testes trabalham em média de 3.000RPM, porém a máquina pode atingir até 8.000RPM, caso o processo seja modificado.

Ademais, para os spindles desta máquina Chiron DZ 18, utiliza-se quatro rolamentos com esferas de aço, sendo dois instalados na região frontal e dois na região traseira. Com base nessas informações, foram criadas as hierarquias para o Spindle 1 e Spindle 2, de acordo com a figura 31, antes do início da instalação. Conseqüentemente, foram atribuídos os pontos de medição das técnicas de Aceleração, Velocidade e Envelope.

Figura 31 - Pontos de Coleta de dados de monitoramento



Nome	Descrição	Alarmes	Posiç...	Prioridade	ID do...
Spindle 1		Alerta	2	<Sem prior...	580059
Spindle 2		Perigo	1	<Sem prior...	579877

Fonte: Dados da Pesquisa

Com a conexão realizada na Etapa 3, os dados de vibração previamente configurados são disponibilizados no *software* @plitude Analyst, assim, permitindo o início efetivo da coleta de dados *on-line*. Para evidenciar esse momento, na figura 32, apresenta-se o espectro de Velocidade do Spindle 1, que é costumeiramente utilizado para identificação de desbalanceamento e alinhamento; e o espectro de Envelope 3L do Spindle 2, que é utilizado para identificação de falhas nos componentes dos rolamentos, seguido com a data no eixo x. Observa-se um pequeno período de medição entre 25/10/19 e 28/10/19 em que as primeiras informações efetivamente chegaram ao *software* em 25/10/19 e que a imagem do *software* foi extraída em 28/10/19.

Figura 32 - Indicação do início do monitoramento Spindle 1 e Spindle 2



Fonte: Dados da Pesquisa

Com todo o sistema funcionando, foi definido que o período de coleta seria a cada 6 horas para registro dos dados e, assim, seguiu-se a coleta de dados entre 25/10/2019 até 09/12/2019, quando chegou ao fim o período de testes. Os resultados obtidos no período de testes estão descritos no **Capítulo 6 – Resultados e Avaliação do Artefato**.

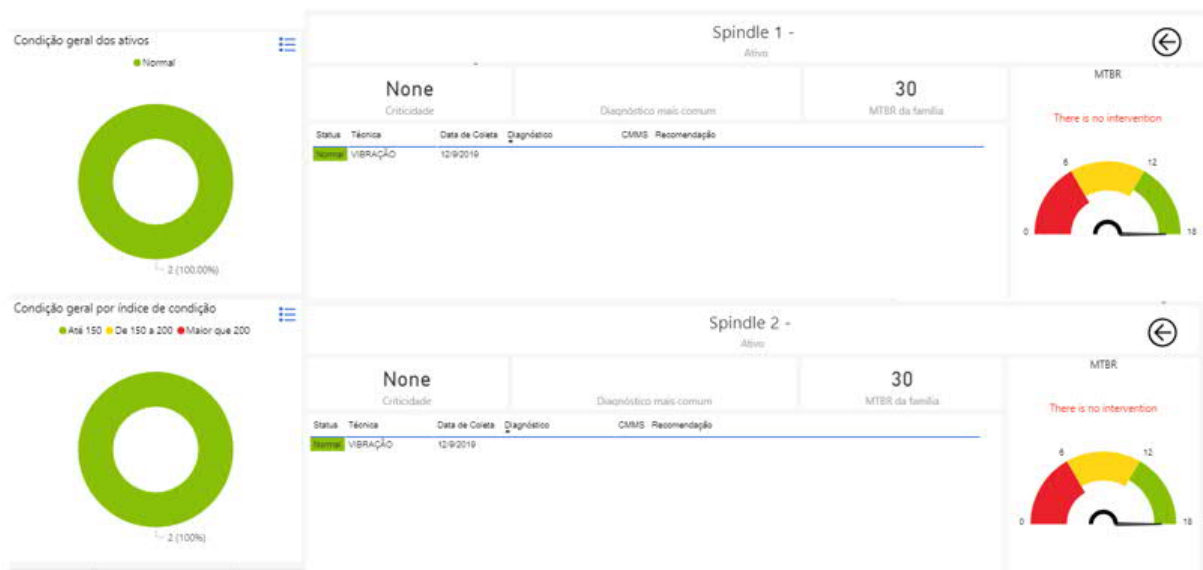
Para finalizar as observações da Etapa 4, é necessário disponibilizar os dados coletados na plataforma de gestão à vista, que são tratados na Etapa 5. Não foi evidenciado nenhum imprevisto para realização da Etapa 4 e, assim, não há relatados de possíveis pontos de melhoria.

5.1.2.5 Etapa 5: *Dashboard* para gestão à vista

A Etapa 5 é consequência da Etapa 4, pois o @ptitude analyst da SKF é integrado ao SKF *Machine Health View*. Dessa forma, para a implementação, foi necessária a criação do *link* pela *web*, que é realizado pelo time de suporte da SKF, e as atualizações são feitas diariamente para que os dados sejam visualizados na plataforma.

A figura 33 indica os detalhes do que ficaram disponíveis para visualização na empresa, sendo possível verificar a porcentagem de spindles bons e ruins, ordens de trabalho aberta para correção, bem como o defeito mais comum relatado pelos analistas durante o monitoramento. Por ser uma fase de implantação, a tendência deste *dashboard* é apresentar poucas informações até que, após um período de análise maior, sejam indicadas novas variáveis para análise em virtude do seu histórico.

Figura 33 - *Dashboard* de gestão à vista



Fonte: Dados da Pesquisa

A figura 35 representa a condição no final do processo de análise a fim de que seja possível ter uma ideia da visão do gestor responsável pelo acompanhamento dos testes. A comunicação entre as plataformas não evidenciou nenhum problema para que se possa indicar pontos de melhoria.

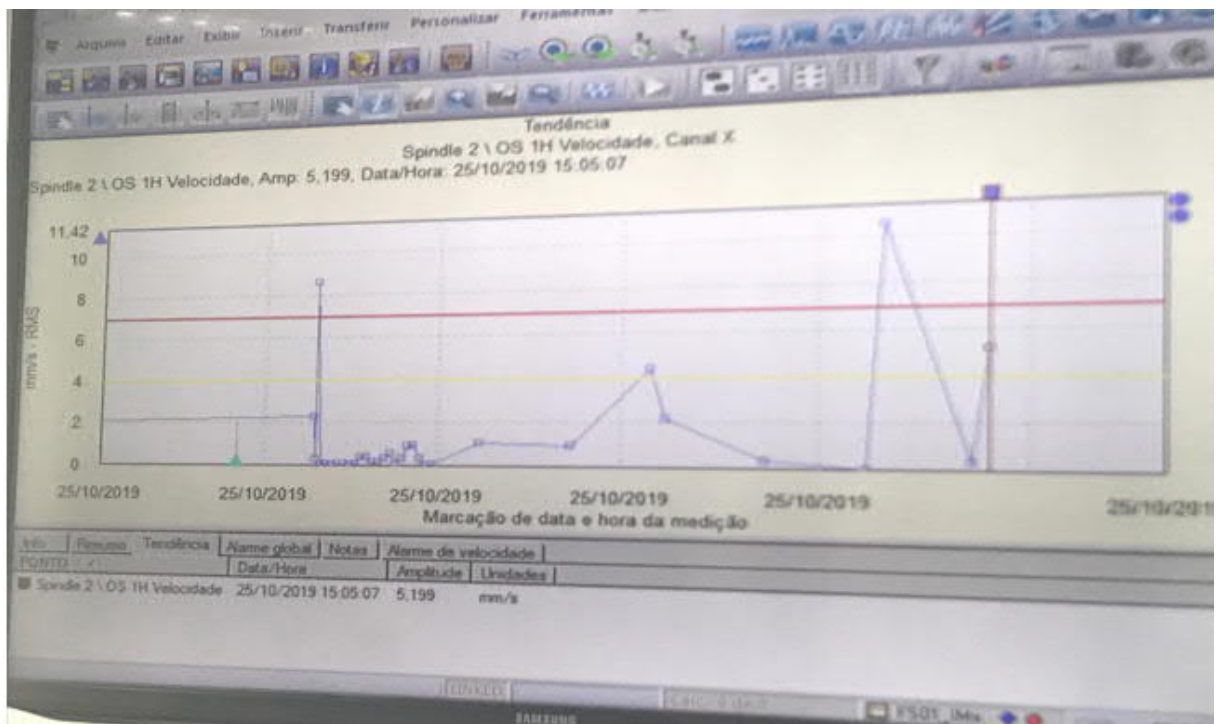
5.1.2.6 Etapa 6: Integração do usuário final

A Etapa 6, conhecida como integração do usuário, tem como objetivo estabelecer acesso às plataformas da SKF a fim de estabelecer integração do usuário final com as coletas de dados *on-line*. Para isso, foram criados um usuário e uma senha para acessar o @ptitude Analyst, que é a mesma senha para acesso ao SKF *Machine Health View*.

No dia da instalação foram realizados os *downloads* de aplicações necessárias para acesso à plataforma do @ptitude analyst na nuvem e disponibilizado o *link* de acesso pela web (<https://www.cdr-skf.com.br/Citrix/XenApp/auth/login.aspx>). Através deste *link*, fez-se o acesso com a senha e o usuário disponibilizados e, assim, estabelecida a conexão com a nuvem.

Na figura 34, indica-se as primeiras medições no dia 25/10/2019, após estabelecida a conexão do usuário com a plataforma.

Figura 34 - Conexão do usuário com a plataforma



Fonte: Dados da Pesquisa

Com relação aos pontos de melhoria, pôde-se verificar que seria possível ganhar tempo na execução caso todas as aplicações tivessem sido instaladas previamente, assim, ficando apenas a condição de acesso para a data do teste.

6. RESULTADOS E AVALIAÇÃO DO ARTEFATO

Neste capítulo são apresentados uma análise dos resultados obtidos durante a pesquisa e os aprendizados adquiridos durante todo o processo. Observa-se que o assunto possui extrema relevância de acordo com a análise bibliométrica apresentada no Apêndice A, mediante a qual foram selecionados 125 artigos com aumento significativo de novos trabalhos a partir de 2016.

Ainda na análise bibliométrica, pôde-se verificar a ramificação de trabalhos com diferentes propósitos que foram agrupados em *clusters*. Da seleção dos artigos, restou evidente trabalhos relacionados à operação tradicional de máquinas-ferramentas, passando por artigos pertinentes à captação de dados das máquinas, seguindo para estudos de desenvolvimento de *machine learning*. Por fim, artigos quanto à efetiva construção de uma fábrica inteligente nos ambientes industriais nos quais há máquinas-ferramentas e, conseqüentemente, os spindles.

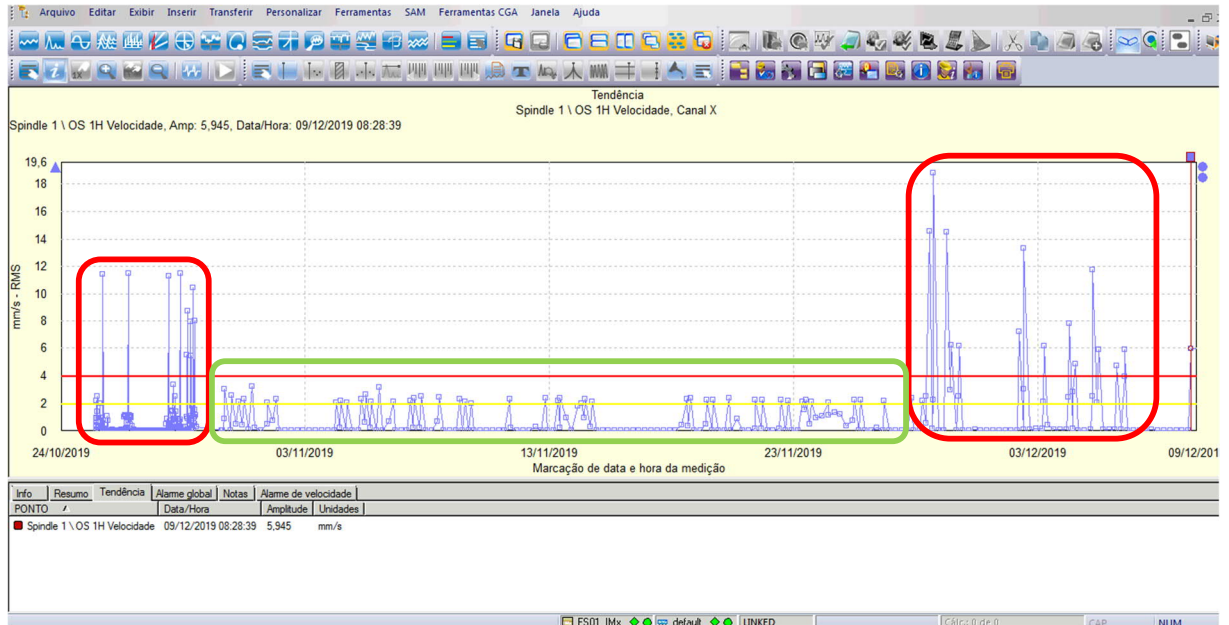
Foi possível observar na pesquisa que o desenvolvimento de sistemas para obtenção de prognósticos de falhas, mediante o estudo de *machine learning*, é um tema em ascensão e deve ser utilizado para criação de novos modelos de coleta de informação preliminar a fim de evitar as falhas em máquinas, como relatado por Diez-Olivan *et al.* (2019), Frieß *et al.* (2018) e Chang, Lee e Liu (2018).

Com a aplicação do *Design Science Research* e avaliação via estudo de caso como meio para demonstração do artefato do tipo método, foi possível executar todas as etapas determinadas na proposta teórica de sistema IoT para gerenciamento de spindles em operação - SIGSO e, assim, obteve-se o cumprimento das etapas estabelecidas, conforme estudo de caso descrito no **Capítulo 5 - Aplicação do sistema IoT para gerenciamento de spindles em operação - SIGSO.**

Sobre o resultado da coleta de dados, na Etapa 4 – *Software* de Monitoramento, presente na seção 5.1.2.4, foi evidenciado o início do período de aplicação. Esse período ocorreu de 25/10/2019 até 9/12/2019 e foi extremamente importante ao acompanhamento do sistema IoT para gerenciamento de spindles em operação – SIGSO, pois se evidenciou, por meio do monitoramento *on-line*, que o Spindle 1, quando iniciado o processo, apresentava evidência de falha através do espectro de velocidade. O Spindle 1 foi substituído por volta do dia 30 de outubro de

2019, quando os valores que estavam próximos de 12mm/s foram reduzidos para menos de 4mm/s (Figura 35).

Figura 35 - Evidência de Alteração do Comportamento do Spindle 1

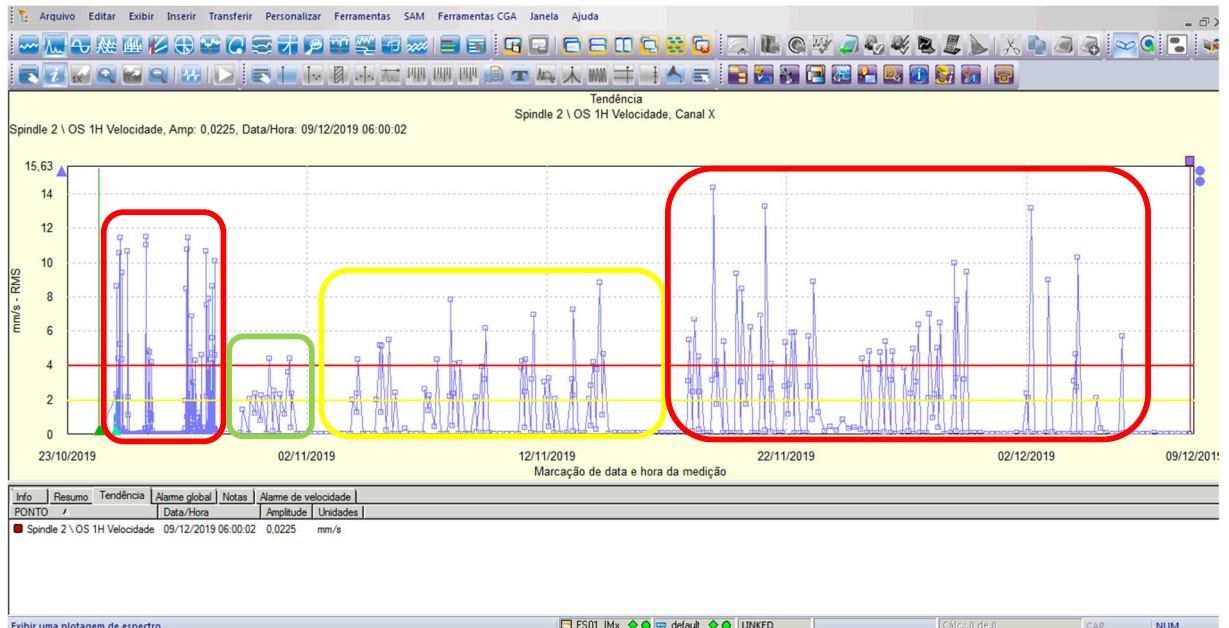


Fonte: Dados da Pesquisa

Por se tratar de uma máquina com eventos de manutenção recorrentes em poucos períodos, foi possível, novamente, observar, em 28 de novembro de 2019, que o novo spindle inicia o processo de elevação dos níveis de vibração (evidenciado no final da faixa verde), assim, tornando de fácil visualização no *software* quando ocorre o início de uma falha (evidenciado em vermelho).

Para o Spindle 2, observa-se que o spindle foi substituído na mesma data, ou seja, os efeitos da manutenção do spindle, realizada internamente pela empresa, não geraram o retorno semelhante ao do Spindle 1. Entretanto houve uma redução significativa dos níveis de vibração de 12mm/s para, aproximadamente, 5mm/s. Na sequência, observou-se uma evolução rápida nos níveis vibracionais atingido aproximadamente 8mm/s, cerca de 10 dias após a sua instalação. A figura 36 valida o relato, na qual a faixa vermelha é o spindle com defeito; a faixa verde, o spindle reparado; e a faixa amarela, o momento em que há avanço para a elevação dos níveis vibracionais.

Figura 36 - Evidência de Alteração do Comportamento do Spindle 2



Fonte: Dados da Pesquisa

As figuras 35 e 36 representam os dados de vibração *on-line* em spindles coletados durante o processo de usinagem, que indica a mudança da condição normal do spindle nos gráficos de tendências. É relevante mencionar que o comportamento foi observado em dois spindles em uma mesma estrutura de máquina-ferramenta e, mesmo com as incidências das forças oriundas do processo de usinagem, é visível a mudança da condição normal do spindle modificando os níveis vibracionais.

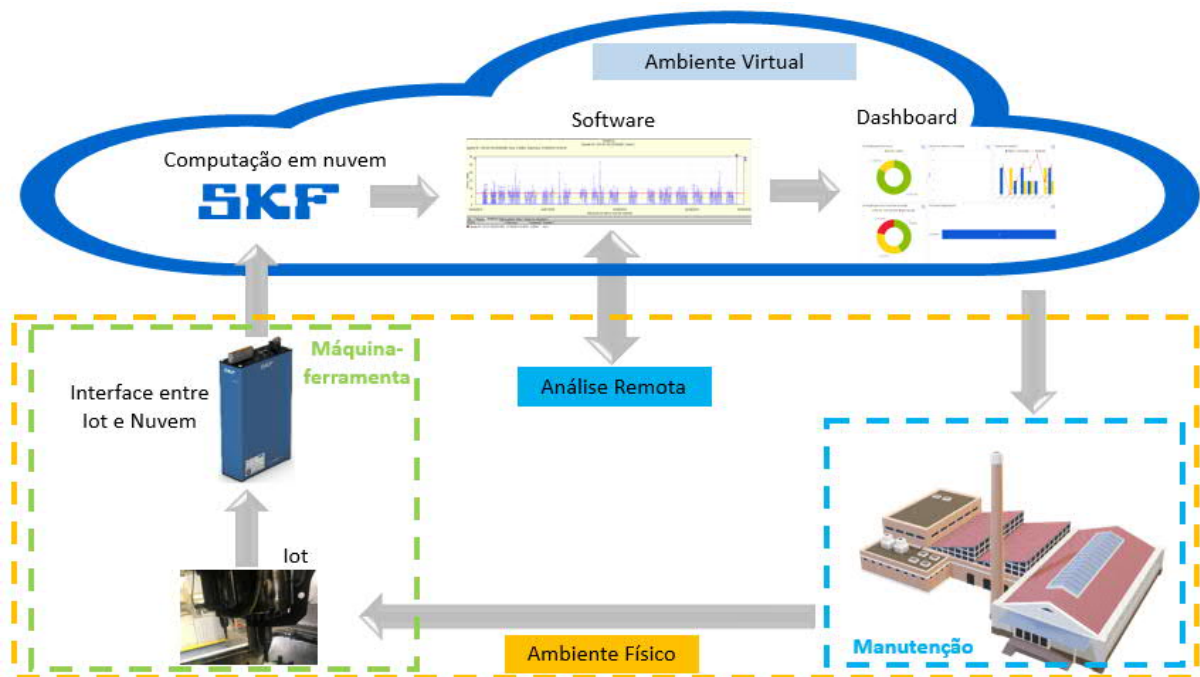
Dessa forma, é possível apresentar um complemento ao trabalho de Holub e Hammer (2017) e Rastegari, Archenti e Mobinet (2017), que apontam a dificuldade em evidenciar o processo de falha em operação. Ademais, pode-se direcionar o time da manutenção para realização da manutenção do spindle a fim de evitar as falhas catastróficas, pois, por meio da obtenção dos dados *on-line* e utilizando o artefato desenvolvido e aplicado aos spindles em operação, foi evidenciada esta variação e indicação do início de falha. Tal forma de atuação da manutenção indica a possibilidade de redução de custos de manutenção com falhas catastróficas não previstas e aumento da vida útil dos spindles, visto que se evitarão danos mais graves.

Com o desenvolvimento do trabalho, o artefato do tipo método foi validado e aperfeiçoado (Figura 37), sendo confirmada a existência de um ambiente físico que

contempla a estrutura na máquina-ferramenta e o time da manutenção, responsável por obter e analisar os dados. Já no ambiente virtual está presente o *software* e os *dashboards* desenvolvidos para serviços em nuvem, ao qual foi aplicado o sistema desenvolvido pela empresa SKF, já aplicados para outros fins.

No modelo do sistema validado, representado na figura 37, foi adicionada uma interação que pode ser realizada pelo time de manutenção que atua na análise remota diretamente no *software* de análise de vibração, assim, podendo visualizar, em tempo real, o que ocorre através do *software* @plitude analyst. Este ponto do trabalho é relevante tendo em vista a necessidade de dados em tempo real para a construção de uma *smart factory*, segundo o relato por Liu e Xu (2017).

Figura 37 - Sistema IoT para gerenciamento de spindles em operação validado (SIGSO)



Fonte: Elaborado pelo Autor

Sobre o sistema IoT para gerenciamento de spindles em operação validado, pode-se considerar como uma arquitetura para a construção de sistemas ciberfísicos, uma vez que são demonstradas as interações no ambiente físico e as interações no ambiente virtual, como relatado por Sacomano *et al.* (2018). Ademais, a necessidade de sensores e atuadores para o desenvolvimento dos sistemas ciberfísicos, segundo Sacomano *et al.* (2018), reforça a importância da pesquisa

desenvolvida com o intuito de integrar máquinas-ferramentas do parque atual nos conceitos da indústria 4.0.

Para a construção do *dashboard* que demonstre as principais falhas, é necessária a inserção manual de um diagnóstico no *software* na nuvem. Dessa forma, é reforçada a possibilidade de desenvolvimento de aplicação de inteligência artificial para identificação desse diagnóstico e automaticamente a ser inserido no *dashboard*. Ainda a esse modelo foram adicionadas possíveis interações com a máquina-ferramenta, porque, quando identificado o início de falhas, a manutenção pode agir para evitar as falhas catastróficas.

Durante o processo de demonstração do artefato foi possível perceber a importância do estabelecimento de um planejamento prévio para a realização das atividades e, durante a aplicação, foram observadas algumas lições aprendidas com relação ao comprimento de cabos, posicionamento do módulo IMx na máquina, bem como a fabricação dos dispositivos de fixação do sensor no spindle. Dessa forma, como contribuição, foi desenvolvido um fluxo para planejamento e aplicação do sistema de monitoramento *on-line* que é representado na figura 38.

Além desse planejamento, outras contribuições práticas foram identificadas, sendo, aqui, o objetivo demonstrar para a indústria como é possível, a partir do meio acadêmico, encontrar soluções reais e aplicáveis com o intuito de reduzir custos, melhorar a eficiência dos ativos, bem como apoiar o desenvolvimento das práticas entre academia e indústria. A necessidade desta aproximação é relatada por Dresch, Lacerda e Júnior (2015), os quais ressaltam a importância de avançar no conhecimento tecnológico e científico de forma equilibrada.

Posto isso, a tabela 4 condiz com uma elucidação objetiva das contribuições práticas obtidas com esta pesquisa mediante a aplicação da DSR.

Tabela 4 – Contribuições práticas

Tópicos	Contribuições Práticas
Comportamento normal do spindle	Com o artefato do tipo método aplicado foi possível verificar que existe uma variação durante a usinagem, e a condição do spindle é alterada quando muda a condição normal que pode indicar o início de uma falha. Pôde-se comprovar a evidência de uma falha, quando houve a troca do spindle e os níveis de vibração foram reduzidos.
Sistema IoT para gerenciamento de spindles em operação (SIGSO)	Aplicação e validação de um modelo para captação de dados em máquinas-ferramentas e transmissão para um software em nuvem para análise remoto sem necessidade de alteração do projeto original da máquina.
Análise Remota em tempo real	Visualização em tempo real da vibração dos spindles.
Modelo de negócio	Com a possibilidade de identificação prévia de falhas, pode-se utilizar esta tecnologia para um novo modelo de negócio integrando manutenção do spindle com monitoramento <i>on-line</i> .
Planejamento detalhado para implantação	Necessidade de execução de um planejamento detalhado pois existem diferentes tipos de máquinas-ferramentas, sendo necessário validar os comprimentos de cabos bem como local de instalação e conectividade.

Fonte: Elaborado pelo Autor

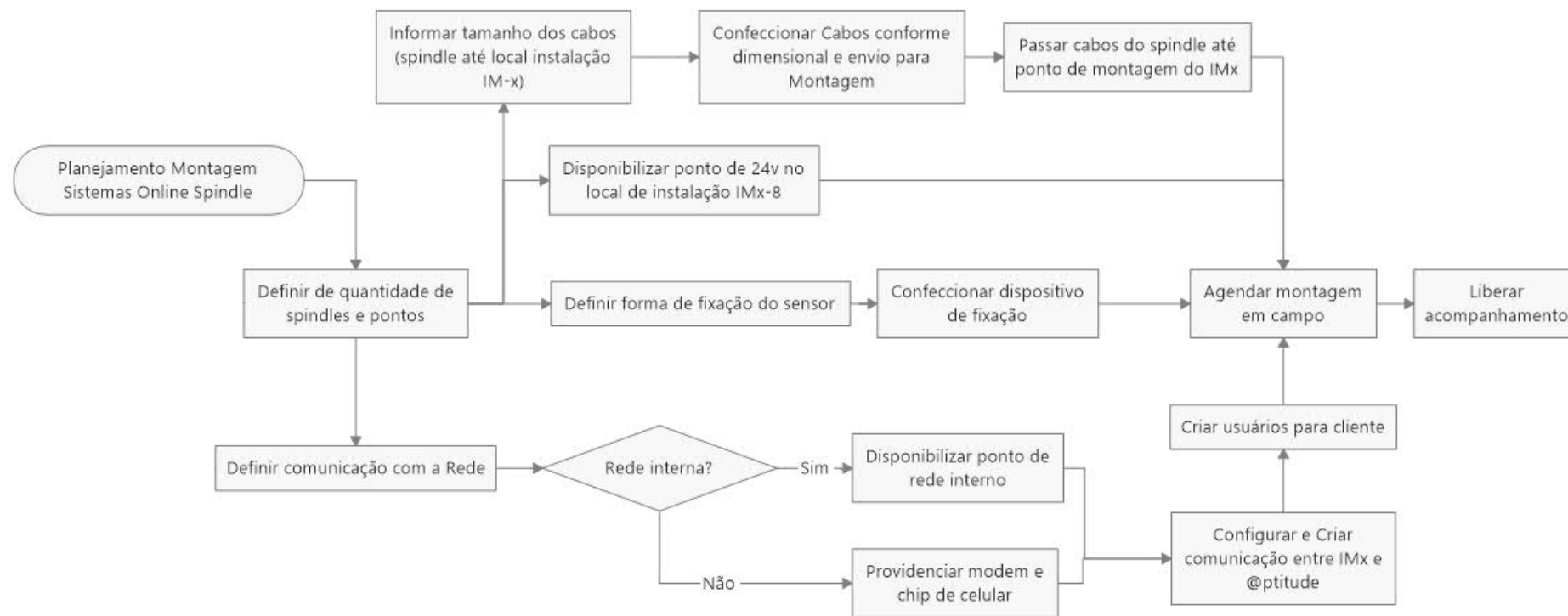
Por fim, destaca-se, na discussão dos resultados, que o objetivo principal e os objetivos específicos foram cumpridos. A validação do modelo no que tange ao monitoramento de spindles em operação, como um dos principais resultados deste trabalho, corrobora os trabalhos de Holub e Hammer (2017) e Rastegari, Archenti e Mobinet (2017), os quais indicavam necessidade de desenvolvimento. Além disso, este trabalho apresenta uma série de possibilidades de trabalhos futuros, a exemplo do tratamento dos dados com inteligência artificial, bem como os demais tópicos indicados na tabela 5.

Tabela 5 - Possibilidades de trabalhos de pesquisas futuras

Tópicos	Descrição
Identificação do tipo de falha	Com os dados coletados durante a aplicação do artefato foi possível determinar os tipos de falhas dos spindles e assim estabelecer modelos padrões para o sistema?
Aplicação do artefato em outros tipos de máquinas-ferramentas e spindles	Quais resultados podem ser obtidos com aplicação do artefato em outros tipos de máquinas-ferramentas e spindles? Existiria a possibilidade de correlacionar o comportamento normal de diferentes máquinas e assim estabelecer um padrão?
Inteligência artificial	Pode-se aplicar inteligência artificial com base nos dados coletados oriundos da pesquisa e assim identificar de forma autônoma possíveis falhas, sem a necessidade da análise humana?
Inteligência Artificial	Quais as possibilidades de integração de outras variáveis, como Mourtzis, Milas e Vlachou (2018) e Żabiński et al. (2018), com o objetivo de estabelecer um sistema capaz de prescrever falhas?

Fonte: Elaborador pelo Autor

Figura 38 - Fluxo para planejamento e aplicação do sistema de monitoramento *on-line* (SIGSO)



Fonte: Elaborado pelo Autor

7. CONCLUSÕES

Este capítulo apresenta as conclusões obtidas, elas estão compostas pelo cumprimento dos objetivos propostos, apresentar as contribuições teóricas, as contribuições práticas e os trabalhos futuros, bem como as limitações do presente estudo.

Nesse sentido, este trabalho teve como objetivo principal propor e testar um sistema IoT para gerenciamento *on-line* de spindles em operação, sendo isso possível de execução a partir da pesquisa apresentada com o seu desenvolvimento e avaliação por meio do *design science research*, respondendo à questão de pesquisa: Como um sistema de monitoramento *on-line* de spindle pode identificar a variação no comportamento normal durante o processo de usinagem?

Como mencionado no **Capítulo 6 – Resultados e Avaliação do Artefato**, foi possível a aplicação das etapas do artefato tipo método, nomeado de Sistema IoT, para gerenciamento de spindles em operação (SIGSO), em ambiente real na indústria automotiva. Essa demonstração ocorreu conforme proposto e obteve-se a resposta à pergunta de pesquisa, assim, tornando possível a identificação da variação do comportamento normal do spindle durante o processo de usinagem. Além disso, o modelo foi aperfeiçoado com a inserção do monitoramento remoto e com a interação do time da manutenção e o spindle.

Como contribuição teórica, cita-se a extensa revisão da literatura realizada com descrição dos modelos de indústria 4.0 aplicados em máquinas-ferramentas, bem como a bibliometria desenvolvida, dessa forma, revelando o estado da arte de indústria 4.0 aplicado em máquinas-ferramentas e spindles. Por meio do estado da arte, o artefato do tipo método foi desenvolvido e, posteriormente, validado em ambiente industrial.

Esse artefato pode ser utilizado para desenvolvimento de trabalhos futuros nos quais será possível explorar outras máquinas-ferramentas e spindles. Com isso, poder-se-á reforçar a principal contribuição teórica desta pesquisa, que é a possibilidade de identificação da variação do comportamento normal do spindle em operação. Essa contribuição viabiliza a academia avançar em outros estudos relacionados às máquinas-ferramenta e, principalmente, aos spindles, durante a

operação de usinagem, bem como na prática operacional e para otimização de manutenção preditiva.

Como contribuição prática, a aplicação e validação do Sistema IoT para gerenciamento de spindles em operação (SIGSO) é um passo importante para os times de manutenção, pois por meio deste sistema implantado é possível a identificação do comportamento normal do spindle. Tal condição proporciona à manutenção visualizar o início de variações no spindle, logo, permitindo a minimização de falhas de catastróficas com a retirada do spindle para reparo previamente. Outro ponto importante da pesquisa é a visualização em tempo real da condição dos spindles, o que indica um novo cenário de análise de vibração nos spindles, desse modo, auxiliando os gestores de manutenção na tomada de decisão e contribuindo, assim, para a rotina na indústria.

Um ponto importante é sobre a possibilidade de um novo modelo de negócio, assim, integrando manutenção dos spindles com a reforma, visto que é possível identificar o estágio atual de falha. E, por fim, o planejamento detalhado para implementação do sistema é de suma importância para as companhias que desejam, porém não conhecem o caminho, a implementação.

As possibilidades de trabalhos futuros oriundos desta pesquisa tem como principal foco o desenvolvimento de inteligência artificial para entender se os dados coletados são suficientes para criação de um sistema inteligente e também quais as possibilidades de integração de dados, como mencionado ao longo da pesquisa. Outros trabalhos futuros podem ser desenvolvidos no âmbito da aplicação do Sistema IoT para gerenciamento de spindles em operação (SIGSO), em outros tipos de máquinas-ferramentas e spindle, bem como a utilização dos dados coletados para identificar o tipo de falha no spindle.

Como limitação desta pesquisa, destaca-se a dificuldade de acessar as unidades fabris do setor automobilístico durante a pandemia mundial da Covid-19, nas quais se poderia ter executado mais aplicações do artefato do tipo método e, por conseguinte, obter um estudo de casos múltiplos.

REFERÊNCIAS

ABELE, E.; ALTINTAS, Y.; BRECHER, C. Machine tool spindle units. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, 59, n. 2, p. 781-802, 2010.

ADU-AMANKWA, K.; ATTIA, A. K. A.; JANARDHANAN, M. N.; PATEL, I. A predictive maintenance cost model for CNC SMEs in the era of industry 4.0. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 104, n. 9-12, p. 3567-3587, 2019.

ALCANTARA, D. P.; MARTENS, M. L. Technology Roadmapping (TRM): a systematic review of the literature focusing on models. **Technological Forecasting and Social Change**, 138, p. 127-138, 2019

ANSARI, F.; GLAWAR, R.; NEMETH, T. PriMa: a prescriptive maintenance model for cyber-physical production systems. **International Journal of Computer Integrated Manufacturing**, 32, n. 4-5, p. 482-503, 2019.

ARANSYAH, D.; ROSA, F.; COLOMBO, G. Smart maintenance: A wearable augmented reality application integrated with CMMS to minimize unscheduled downtime. **Computer-Aided Design and Applications**, 17, n. 4, p. 740-751, 2020.

ATTANASIO, A. Tool Run-Out Measurement in Micro Milling. **Micromachines**, 8, n. 7, Jul 2017. Article.

AYAD, S.; TERRISSA, L. S.; ZERHOUNI, N., 2018, English, **An IoT approach for a smart maintenance C3 - 2018 International Conference on Advanced Systems and Electric Technologies, IC_ASET 2018**. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. 210-214. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85050008776&doi=10.1109%2fASET.2018.8379861&partnerID=40&md5=91690fa2c3007dc4d719e11b1018d255>.

B A, P.; P N, S.; P M, S. Shop floor to cloud connect for live monitoring the production data of CNC machines. **International Journal of Computer Integrated Manufacturing**, 33, n. 2, p. 142-158, 2020.

BAI, Y. Industrial Internet of things over tactile Internet in the context of intelligent manufacturing. **Cluster Computing**, 21, n. 1, p. 869-877, 2018.

BALOGH, Z.; GATIAL, E.; BARBOSA, J.; LEITÃO, P. *et al.*, 2018, **Reference Architecture for a Collaborative Predictive Platform for Smart Maintenance in Manufacturing**. IEEE. 000299-000304.

BELLI, L.; DAVOLI, L.; MEDIOLI, A.; MARCHINI, P. L. *et al.* Toward Industry 4.0 With IoT: Optimizing Business Processes in an Evolving Manufacturing Factory. **Frontiers in ICT**, 6, 2019.

BEN-DAYA, M.; HASSINI, E.; BAHROUN, Z. Internet of things and supply chain management: a literature review. **International Journal of Production Research**, 57, n. 15-16, p. 4719-4742, 2019.

BENGTSSON, M.; LUNDSTRÖM, G., 2018, English, **On the importance of combining "the new" with "the old" - One important prerequisite for maintenance in Industry 4.0 C3 - Procedia Manufacturing**. Elsevier B.V. 118-125. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85065657071&doi=10.1016%2fj.promfg.2018.06.065&partnerID=40&md5=84c7bed8ed57dba34733dac4a8187fe6>.

BERTASSO, B. F.; RELATÓRIO DE ACOMPANHAMENTO SETORIAL Máquinas-ferramentas. **Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial – ABDI**. 2012. Acesso em: 22/07/2020 - https://www.eco.unicamp.br/neit/images/stories/arquivos/Relatorios_NEIT/Maquinas-e-Ferramentas-Marco-de-2012.pdf

BI, Z.; LIU, Y.; KRIDER, J.; BUCKLAND, J. *et al.* Real-time force monitoring of smart grippers for Internet of Things (IoT) applications. **Journal of Industrial Information Integration**, 11, p. 19-28, 2018.

BYRNE, G.; AHEARNE, E.; COTTERELL, M.; MULLANY, B. *et al.* High performance cutting (HPC) in the new era of digital manufacturing—a roadmap. **Procedia Cirp**, 46, p. 1-6, 2016.

CAGGIANO, A. Cloud-based manufacturing process monitoring for smart diagnosis services. **International Journal of Computer Integrated Manufacturing**, 31, n. 7, p. 612-623, 2018.

CANIZARES, E.; VALERO, F. A. Analyzing the Effects of Applying IoT to a Metal-Mechanical Company. **Journal of Industrial Engineering and Management-Jiem**, 11, n. 2, p. 308-317, 2018. Article.

CAO, H.; KANG, T.; CHEN, X. Noise analysis and sources identification in machine tool spindles. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, 25, p. 26-35, 2019.

CAO, H.; ZHANG, X.; CHEN, X. The concept and progress of intelligent spindles: A review. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, 112, p. 21-52, 2017.

CAO, Q.; ZANNI-MERK, C.; SAMET, A.; DE BEUVRON, F. D. B. *et al.* Using Rule Quality Measures for Rule Base Refinement in Knowledge-Based Predictive Maintenance Systems. **Cybernetics and Systems**, 51, n. 2, p. 161-176, 2020.

CARVALHO, T. P.; SOARES, F. A. A. M. N.; VITA, R.; FRANCISCO, R. D. P. *et al.* A systematic literature review of machine learning methods applied to predictive maintenance. **Computers and Industrial Engineering**, 137, 2019.

CHANG, C. W.; LEE, H. W.; LIU, C. H. A review of artificial intelligence algorithms used for smart machine tools. **Inventions**, 3, n. 3, 2018.

CHEN, B.; WAN, J.; SHU, L.; LI, P. *et al.* Smart factory of industry 4.0: Key technologies, application case, and challenges. **IEEE Access**, 6, p. 6505-6519, 2017.

CHIANG, H. F.; CHANG, P.; CHEN, J. S.; PAN, C. Y. *et al.*, 2018, English, **Study of Motorized Spindle Reliability Monitoring C3 - International Conference on Applied Electronics**. IEEE Computer Society. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85056870577&doi=10.23919%2fAE.2018.8501459&partnerID=40&md5=bbfce4c1be3da1fe4c995aa62c89c76e>.

CIVERCHIA, F.; BOCCHINO, S.; SALVADORI, C.; ROSSI, E. *et al.* Industrial Internet of Things monitoring solution for advanced predictive maintenance applications. **Journal of Industrial Information Integration**, 7, p. 4-12, 2017.

CURCIO, MARIO – Cresce a oferta dos três-cilindros. **Revista Automotive Business**. Ano 9. Número 42. Dezembro 2016. Disponível em: <http://www.automotivebusiness.com.br/revistadigital.html>. Acesso em: 23 set. 2017

DEMILIA, G.; GASPARI, A.; HOHWIELER, E.; LAGHMOUCHI, A. *et al.*, 2018, English, **Improvement of Defect Detectability in Machine Tools Using Sensor-based Condition Monitoring Applications C3 - Procedia CIRP**. Elsevier B.V. 325-331. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85044665062&doi=10.1016%2fj.procir.2017.12.221&partnerID=40&md5=c95e1f713185368ccd82b555d810d9eb>.

DENG, C.; GUO, R.; ZHENG, P.; LIU, C. *et al.*, 2018, English, **From Open CNC Systems to Cyber-Physical Machine Tools: A Case Study C3 - Procedia CIRP**. Elsevier B.V. 1270-1276. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85049552022&doi=10.1016%2fj.procir.2018.03.110&partnerID=40&md5=1db3abd3e9d1963476e5fa1b572b1ea5>.

DENG, C. Y.; GUO, R. F.; LIU, C.; ZHONG, R. Y. *et al.* Data cleansing for energy-saving: a case of Cyber-Physical Machine Tools health monitoring system. **International Journal of Production Research**, 56, n. 1-2, p. 1000-1015, 2018. Article.

DIAZ-ROZO, J.; BIELZA, C.; LARRAÑAGA, P. Machine Learning-based CPS for Clustering High throughput Machining Cycle Conditions. **Procedia Manufacturing**, 10, p. 997-1008, 2017.

DIEZ-OLIVAN, A.; DEL SER, J.; GALAR, D.; SIERRA, B. Data fusion and machine learning for industrial prognosis: Trends and perspectives towards Industry 4.0. **Information Fusion**, 50, p. 92-111, 2019.

DRESCH, A.; LACERDA, D. P.; JÚNIOR, J. A. V. A. **Design science research: método de pesquisa para avanço da ciência e tecnologia**. Bookman Editora, 2015. 8582605536.

ELMOAQET, H.; ISMAEL, I.; PATZOLT, F.; RYALAT, M., 2018, English, **Design and integration of an IoT device for training purposes of industry 4.0 C3 - ACM International Conference Proceeding Series**. Association for Computing Machinery. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85059940368&doi=10.1145%2f3284557.3284740&partnerID=40&md5=f1152822a1931d162e3d2dbcfee4c83c>.

ENGELER, M.; ELMIGER, A.; KUNZ, A.; ZOGG, D. *et al.*, 2017, English, **Online Condition Monitoring Tool for Automated Machinery C3 - Procedia CIRP**. Elsevier B.V. 323-328. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85029738532&doi=10.1016%2fj.procir.2017.04.003&partnerID=40&md5=122f8b4c4ab1c4111336ce1325e29233>.

ESMAEILIAN, B.; BEHDAD, S.; WANG, B. The evolution and future of manufacturing: A review. **Journal of Manufacturing Systems**, 39, p. 79-100, 2016.

FRIEß, U.; KOLOUCH, M.; FRIEDRICH, A.; ZANDER, A. Fuzzy-clustering of machine states for condition monitoring. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, 23, p. 64-77, 2018.

FUJISHIMA, M.; MORI, M.; NISHIMURA, K.; TAKAYAMA, M. *et al.*, 2017, English, **Development of Sensing Interface for Preventive Maintenance of Machine Tools C3 - Procedia CIRP**. Elsevier B.V. 796-799. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85020018778&doi=10.1016%2fj.procir.2016.11.206&partnerID=40&md5=5ff6574138091699e502c55afb7e84d2>.

FUJISHIMA, M.; OHNO, K.; NISHIKAWA, S.; NISHIMURA, K. *et al.* Study of sensing technologies for machine tools. **Cirp Journal of Manufacturing Science and Technology**, 14, p. 71-75, Aug 2016. Article.

FUSKO, M.; RAKYTA, M.; KRAJCOVIC, M.; DULINA, L. *et al.* Basics of designing maintenance processes in industry 4.0. **MM science journal**, 2018, n. 3, p. 2252-2259, 2018.

GADALLA, M.; XUE, D. Recent advances in research on reconfigurable machine tools: a literature review. **International Journal of Production Research**, 55, n. 5, p. 1440-1454, 2017.

GAVILANES-TRAPOTE, J.; RIO-BELVER, R. M.; CARRASCO, E. C.; ANDARA, A. R. Visualization of the Digital Transformation of the Machine Tool Sector. Towards an Industry 4.0. **Dyna**, 93, n. 6, Nov-Dec 2018. Article.

GIRALDO-CASTRILLON, F. A.; PARAMO-BERMUDEZ, G. J.; MUNOZ-BETANCUR, J. M. Monitoring of Machining in the Cloud as a Cost Management Service and Follow of Cutting Parameters: Environment Developed With IoT Tools. **International Journal of Manufacturing Materials and Mechanical Engineering**, 9, n. 3, p. 26-41, Jul-Sep 2019. Article.

GOPALAKRISHNAN, M.; SKOOGH, A.; SALONEN, A.; ASP, M. Machine criticality assessment for productivity improvement. **International Journal of Productivity and Performance Management**, 2019.

GOPALAKRISHNAN, M.; SKOOGH, A.; SALONEN, A.; ASP, M. Machine criticality assessment for productivity improvement: Smart maintenance decision support. **International Journal of Productivity and Performance Management**, 68, n. 5, p. 858-878, 2019.

GUERREIRO, B. V.; LINS, R. G.; SUN, J.; SCHMITT, R. Definition of Smart Retrofitting: First steps for a company to deploy aspects of Industry 4.0. *In: Advances in Manufacturing*: Springer, 2018. p. 161-170.

HASSAN, M.; SADEK, A.; ATTIA, M. H.; THOMSON, V. Intelligent machining: Real-time tool condition monitoring and intelligent adaptive control systems. **Journal of Machine Engineering**, 18, n. 1, p. 5-17, 2018.

HERWAN, J.; KANO, S.; RYABOV, O.; SAWADA, H. *et al.* Retrofitting old CNC turning with an accelerometer at a remote location towards industry 4.0. **Manufacturing Letters**, 21, p. 56-59, 2019.

HEVNER, A. R.; MARCH, S. T.; PARK, J.; RAM, S. Design science in information systems research. **MIS quarterly**, p. 75-105, 2004.

HILL, J. L.; PRICKETT, P. W.; GROSVENOR, R. I.; HANKINS, G. The practical exploitation of tacit machine tool intelligence. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 104, n. 5-8, p. 1693-1707, 2019.

HOLUB, O.; HAMMER, M. Diagnostics and maintenance of machine tool spindles-new views. **MM Science Journal**, 2017, n. December, p. 2094-2099, 2017.

HOPF, H.; JENTSCH, D.; LÖFFLER, T.; HORBACH, S. *et al.*, 2014, **Improving maintenance processes with socio-Cyber-Physical systems**. 1163-1170.

HOPPENSTEDT, B.; REICHERT, M.; KAMMERER, K.; PROBST, T. *et al.* Dimensionality reduction and subspace clustering in mixed reality for condition monitoring of high-dimensional production data. **Sensors (Switzerland)**, 19, n. 18, 2019.

JANAK, L.; HADAS, Z. Machine tool health and usage monitoring system: An initial analyses. **MM Science Journal**, 2015, n. DECEMBER, p. 794-798, 2015.

JANAK, L.; STETINA, J.; FIALA, Z.; HADAS, Z. Quantities and sensors for machine tool spindle condition monitoring. **MM Science Journal**, 2016, n. DECEMBER, p. 1648-1653, 2016.

JEON, B.; YOON, J. S.; UM, J.; SUH, S. H. The architecture development of Industry 4.0 compliant smart machine tool system (SMTS). **Journal of Intelligent Manufacturing**, 2020.

JIMENEZ-CORTADI, A.; IRIGOIEN, I.; BOTO, F.; SIERRA, B. *et al.* Predictive maintenance on the machining process and machine tool. **Applied Sciences (Switzerland)**, 10, n. 1, 2020.

JOSÉ ÁLVARES, A.; OLIVEIRA, L. E. S. D.; FERREIRA, J. C. E. Development of a Cyber-Physical framework for monitoring and teleoperation of a CNC lathe based on MTconnect and OPC protocols. **International Journal of Computer Integrated Manufacturing**, 31, n. 11, p. 1049-1066, 2018.

KAMP, B.; OCHOA, A.; DIAZ, J. Smart servitization within the context of industrial user-supplier relationships: contingencies according to a machine tool manufacturer. **International Journal of Interactive Design and Manufacturing - Ijidem**, 11, n. 3, p. 651-663, Aug 2017. Article.

KIM, H.; JUNG, W. K.; CHOI, I. G.; AHN, S. H. A low-cost vision-based monitoring of computer numerical control (CNC) machine tools for small and medium-sized enterprises (SMES). **Sensors (Switzerland)**, 19, n. 20, 2019.

KOWALSKI, M.; ZAWADZKI, P. Decomposition of Knowledge for Automatic Programming of Cnc Machines. **Management and Production Engineering Review**, 10, n. 1, p. 98-104, Mar 2019. Article.

LACASSE, P. M.; OTIENO, W.; MATURANA, F. P. A survey of feature set reduction approaches for predictive analytics models in the connected manufacturing enterprise. **Applied Sciences (Switzerland)**, 9, n. 5, 2019.

LACERDA, D. P.; DRESCH, A.; PROENÇA, A.; ANTUNES JÚNIOR, J. A. V. Design Science Research: método de pesquisa para a engenharia de produção. **Gestão & produção**, 20, n. 4, p. 741-761, 2013.

LEE, G. Y.; KIM, M.; QUAN, Y. J.; KIM, M. S. *et al.* Machine health management in smart factory: A review. **Journal of Mechanical Science and Technology**, 32, n. 3, p. 987-1009, 2018.

LEE, J.; JIN, C.; BAGHERI, B. Cyber physical systems for predictive production systems. **Production Engineering**, 11, n. 2, p. 155-165, 2017.

LEE, J.; KAO, H. A.; YANG, S., 2014, English, Windsor, ON. **Service innovation and smart analytics for Industry 4.0 and big data environment C3 - Procedia CIRP**. Elsevier. 3-8. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84905408361&doi=10.1016%2fj.procir.2014.02.001&partnerID=40&md5=0843fd1f4a451db2c0975802ac8bc258>.

LEE, J.; NI, J.; DJURDJANOVIC, D.; QIU, H. *et al.* Intelligent prognostics tools and e-maintenance. **Computers in Industry**, 57, n. 6, p. 476-489, 2006.

LEE, J.; WU, F.; ZHAO, W.; GHAFARI, M. *et al.* Prognostics and health management design for rotary machinery systems - Reviews, methodology and applications. **Mechanical Systems and Signal Processing**, 42, n. 1-2, p. 314-334, 2014.

LEE, W. J.; WU, H.; YUN, H.; KIM, H. *et al.*, 2019, English, **Predictive maintenance of machine tool systems using artificial intelligence techniques applied to machine condition data C3 - Procedia CIRP**. Elsevier B.V. 506-511. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85067187080&doi=10.1016%2fj.procir.2018.12.019&partnerID=40&md5=2595bb6a8ded5ed7f9efd8edd59dd5fe>.

LEGAULT, P.; DE SANTA-EULALIA, L. A.; MOSCONI, E.; BORDELEAU, F. E. *et al.*, 2019, English, **Servitization trend in the machine-tools market: Comparing value from turnkey and specialized IoT-based analytics solutions using TOPSIS C3 - Procedia Manufacturing**. Elsevier B.V. 390-397. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85065649376&doi=10.1016%2fj.promfg.2019.03.061&partnerID=40&md5=99bd856f375102668e68e5044559decb>.

LEMENEN, S.; RAJAHONKA, M.; WESTERLUND, M.; WENDELIN, R. The future of the Internet of Things: toward heterarchical ecosystems and service business models. **Journal of Business & Industrial Marketing**, 2018.

LENZ, J.; WUEST, T.; WESTKÄMPER, E. Holistic approach to machine tool data analytics. **Journal of Manufacturing Systems**, 48, p. 180-191, 2018.

LI, B. R.; WANG, Y.; DAI, G. H.; WANG, K. S. Framework and case study of cognitive maintenance in Industry 4.0. **Frontiers of Information Technology and Electronic Engineering**, 20, n. 11, p. 1493-1504, 2019.

LI, Z.; WANG, Y.; WANG, K. S. Intelligent predictive maintenance for fault diagnosis and prognosis in machine centers: Industry 4.0 scenario. **Advances in Manufacturing**, 5, n. 4, p. 377-387, 2017.

LIAO, Y.; LOURES, E. D. F. R.; DESCHAMPS, F. Industrial Internet of Things: A Systematic Literature Review and Insights. **IEEE Internet of Things Journal**, 5, n. 6, p. 4515-4525, 2018.

LIN, Y. L.; LIN, C. C.; CHIU, H. S., 2015, English, **The development of intelligent service system for machine tool industry C3 - Proceedings of the 2015 1st International Conference on Industrial Networks and Intelligent Systems, INISCom 2015**. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. 100-106. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84943246765&doi=10.4108%2ficst.iniscom.2015.258992&partnerID=40&md5=3fda5e8d12b7d4f7ecd79b5ccbf195c8>.

LINS, R. G.; DE ARAUJO, P. R. M.; CORAZZIM, M. In-process machine vision monitoring of tool wear for Cyber-Physical Production Systems. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, 61, Feb 2020. Article.

LINS, R. G.; GUERREIRO, B.; SCHMITT, R.; SUN, J. *et al.*, 2017, English, **A novel methodology for retrofitting CNC machines based on the context of industry 4.0 C3 - 2017 IEEE International Symposium on Systems Engineering, ISSE 2017 - Proceedings**. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85040118032&doi=10.1109%2fSysEng.2017.8088293&partnerID=40&md5=66b9b8ca840803f4da1a96a3917bd632>.

LIU, C.; VENGAYIL, H.; LU, Y.; XU, X. A cyber-physical machine tools platform using OPC UA and MTConnect. **Journal of Manufacturing Systems**, 51, p. 61-74, 2019.

LIU, C.; VENGAYIL, H.; ZHONG, R. Y.; XU, X. A systematic development method for cyber-physical machine tools. **Journal of Manufacturing Systems**, 48, p. 13-24, 2018.

LIU, C.; XU, X., 2017, English, **Cyber-physical Machine Tool - The Era of Machine Tool 4.0 C3 - Procedia CIRP**. Elsevier B.V. 70-75. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85028665818&doi=10.1016%2fj.procir.2017.03.078&partnerID=40&md5=ceedec617435f521b2497626614e5ce7>.

LIU, C.; XU, X.; PENG, Q.; ZHOU, Z. Mtconnect-based cyber-physical machine tool: a case study. **Procedia Cirp**, 72, p. 492-497, 2018.

LIU, W.; KONG, C.; NIU, Q.; JIANG, J. *et al.* A method of NC machine tools intelligent monitoring system in smart factories. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, 61, 2020.

LIU, X. F.; SHAHRIAR, M. R.; AL SUNNY, S. M. N.; LEU, M. C. *et al.* Cyber-physical manufacturing cloud: Architecture, virtualization, communication, and testbed. **Journal of Manufacturing Systems**, 43, p. 352-364, 2017.

LONGO, F.; NICOLETTI, L.; PADOVANO, A. Smart operators in industry 4.0: A human-centered approach to enhance operators' capabilities and competencies within the new smart factory context. **Computers and Industrial Engineering**, 113, p. 144-159, 2017.

LU, Y. Q.; XU, X. Resource virtualization: A core technology for developing cyber-physical production systems. **Journal of Manufacturing Systems**, 47, p. 128-140, Apr 2018. Article.

LUO, W.; HU, T.; ZHANG, C.; WEI, Y. Digital twin for CNC machine tool: modeling and using strategy. **Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing**, 10, n. 3, p. 1129-1140, 2019.

MARCH, S. T.; SMITH, G. F. Design and natural science research on information technology. **Decision support systems**, 15, n. 4, p. 251-266, 1995.

MARTIN, K. A review by discussion of condition monitoring and fault diagnosis in machine tools. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, 34, n. 4, p. 527-551, 1994.

MITTAL, S.; KHAN, M. A.; PUROHIT, J. K.; MENON, K. *et al.* A smart manufacturing adoption framework for SMEs. **International Journal of Production Research**, 58, n. 5, p. 1555-1573, Mar 2020. Article.

MOHINDRU, G.; MONDAL, K.; BANKA, H. Internet of Things and data analytics: A current review. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery**, 2019.

MONOSTORI, L.; KÁDÁR, B.; BAUERNHANSL, T.; KONDOH, S. *et al.* Cyber-physical systems in manufacturing. **Cirp Annals**, 65, n. 2, p. 621-641, 2016.

MORI, M.; FUJISHIMA, M., 2013, English, Ischia. **Remote monitoring and maintenance system for CNC machine tools C3 - Procedia CIRP**. Elsevier B.V. 7-12. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84886804587&doi=10.1016%2fj.procir.2013.09.003&partnerID=40&md5=6b01ed2353982647fa799b7bce448a69>.

MOSYURCHAK, A.; VESELKOV, V.; TURYGIN, A.; HAMMER, M. Prognosis of behaviour of machine tool spindles, their diagnostics and maintenance. **MM Science Journal**, 2017, n. December, p. 2100-2104, 2017.

MOURTZIS, D.; MILAS, N.; ATHINAIOS, N., 2018, English, **Towards Machine Shop 4.0: A General Machine Model for CNC machine-tools through OPC-UA C3 - Procedia CIRP**. Elsevier B.V. 301-306. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85059906664&doi=10.1016%2fj.procir.2018.09.045&partnerID=40&md5=e6574727e6ea35aaea7947c679ea6a19>.

MOURTZIS, D.; MILAS, N.; VLACHOU, A. An internet of things-based monitoring system for shop-floor control. **Journal of Computing and Information Science in Engineering**, 18, n. 2, 2018.

MOURTZIS, D.; VLACHOU, E.; ZOGOPOULOS, V.; FOTINI, X., 2017, **Integrated production and maintenance scheduling through machine monitoring and augmented reality: An Industry 4.0 approach**. Springer. 354-362.

MUTILBA, U.; GOMEZ-ACEDO, E.; KORTABERRIA, G.; OLARRA, A. *et al.* Traceability of on-machine tool measurement: A review. **Sensors (Switzerland)**, 17, n. 7, 2017.

NAGY, J.; OLAH, J.; ERDEI, E.; MATE, D. *et al.* The Role and Impact of Industry 4.0 and the Internet of Things on the Business Strategy of the Value Chain-The Case of Hungary. **Sustainability**, 10, n. 10, Oct 2018. Article.

NANDI, S.; TOLIYAT, H. A.; LI, X. Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors—A review. **IEEE transactions on energy conversion**, 20, n. 4, p. 719-729, 2005.

NUNAMAKER JR, J. F.; CHEN, M.; PURDIN, T. D. Systems development in information systems research. **Journal of management information systems**, 7, n. 3, p. 89-106, 1990.

NUÑEZ, D. L.; BORSATO, M. OntoProg: An ontology-based model for implementing Prognostics Health Management in mechanical machines. **Advanced Engineering Informatics**, 38, p. 746-759, 2018.

PEFFERS, K.; TUUNANEN, T.; ROTHENBERGER, M. A.; CHATTERJEE, S. A design science research methodology for information systems research. **Journal of management information systems**, 24, n. 3, p. 45-77, 2007.

PROTO, S.; DI CORSO, E.; APILETTI, D.; CAGLIERO, L. *et al.* REDTag: a Predictive Maintenance Framework for Parcel Delivery Services. **IEEE Access**, 8, p. 14953-14964, 2020.

RASTEGARI, A.; ARCHENTI, A.; MOBIN, M., 2017, English, **Condition based maintenance of machine tools: Vibration monitoring of spindle units C3 - Proceedings - Annual Reliability and Maintainability Symposium**. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0->

85018572925&doi=10.1109%2fRAM.2017.7889683&partnerID=40&md5=b9d53a769f56f23705c28b2b97f2ed37.

ROMEO, L.; LONCARSKI, J.; PAOLANTI, M.; BOCCHINI, G. *et al.* Machine learning-based design support system for the prediction of heterogeneous machine parameters in industry 4.0. **Expert Systems with Applications**, 140, 2020.

ROY, R.; STARK, R.; TRACHT, K.; TAKATA, S. *et al.* Continuous maintenance and the future – Foundations and technological challenges. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, 65, n. 2, p. 667-688, 2016.

RUBIO, E. M.; DIONÍSIO, R. P.; TORRES, P. M. B. PREDICTIVE MAINTENANCE OF INDUCTION MOTORS IN THE CONTEXT OF INDUSTRY 4.0. **International Journal of Mechatronics and Applied Mechanics**, n. 4, p. 238, 2018.

RUIZ-SARMIENTO, J. R.; MONROY, J.; MORENO, F. A.; GALINDO, C. *et al.* A predictive model for the maintenance of industrial machinery in the context of industry 4.0. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, 87, 2020.

SACOMANO, J. B.; GOLCALVES, R. F.; DA SILVA, M. T.; BONILLA, S. H.; SÁTYRO, W. C.; Indústria 4.0: conceitos e fundamentos. **Blücher**. 2018.

SADASIVAM, L.; ARCHENTI, A.; SANDBERG, U. Machine tool ability representation: A review. **Journal of Machine Engineering**, 18, n. 2, p. 5-16, 2018.

SADIKI, S.; RAMADANY, M.; FACCIO, M.; AMEGOUZ, D. *et al.*, 2019, **Running Smart Monitoring Maintenance Application Using Cooja Simulator**. Trans Tech Publ. 149-159.

SANGHAVI, D.; PARIKH, S.; RAJ, S. A. Industry 4.0: Tools and implementation. **Management and Production Engineering Review**, 10, n. 3, p. 3-13, 2019.

SHAMSUZZOHA, A.; TOSHEV, R.; VU TUAN, V.; KANKAANPAA, T. *et al.* Digital factory–virtual reality environments for industrial training and maintenance. **Interactive Learning Environments**, 2019.

SHIVAJEE, V.; SINGH, R. K.; RASTOGI, S. Manufacturing conversion cost reduction using quality control tools and digitization of real-time data. **Journal of Cleaner Production**, 237, 2019.

SIMON, ALEXANDRE TADEU - XIII Inventário MM – as máquinas-ferramentas de usinagem instaladas no parque industrial brasileiro. **Revista Máquinas & Metais** – Aranda Editora – Ano 51. Número 599. Dezembro de 2015. Disponível em: <http://www.arandanet.com.br/assets/revistas/mm/2015/dezembro/index.php>.

Acesso em 05.06.2019

SIMON, H. A. The sciences of the artificial. 3. ed. Cambridge: **MIT Press**, 1996.

SKF. **SKF Vibration Sensors Catalog**. Mai. 2018. Disponível em: <https://www.skf.com/binaries/pub12/Images/0901d196804926fe-11604_16-EN-Vibration-Sensor-Catalogue---OK_tcm_12-267858.pdf#cid-267858> Acesso em 15 Jun. 2019.

SKF. **Multilog On-line Systems IMx 8**. 2019. Disponível em: <<https://www.skf.com/br/products/condition-monitoring-systems/surveillance-systems/on-line-monitoring/imx#cid-469888>> Acesso em 15 Jun. 2019.

SPENDLA, L.; KEBISEK, M.; TANUSKA, P.; HRCKA, L., 2017, **Concept of predictive maintenance of production systems in accordance with industry 4.0**. IEEE. 000405-000410.

TETI, R.; JEMIELNIAK, K.; O'DONNELL, G.; DORNFELD, D. Advanced monitoring of machining operations. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, 59, n. 2, p. 717-739, 2010.

THOPPIL, N. M.; VASU, V.; RAO, C. S. P. Failure Mode Identification and Prioritization Using FMECA: A Study on Computer Numerical Control Lathe for Predictive Maintenance. **Journal of Failure Analysis and Prevention**, 19, n. 4, p. 1153-1157, 2019.

TUGENGOL'D, A. K.; DIMITROV, V. P.; BORISOVA, L. V.; GRANKOV, M. V. *et al.* Autonomous Maintenance of Digital Equipment. **Russian Engineering Research**, 39, n. 6, p. 510-515, 2019.

TURNER, C. J.; EMMANOUILIDIS, C.; TOMIYAMA, T.; TIWARI, A. *et al.* Intelligent decision support for maintenance: an overview and future trends. **International Journal of Computer Integrated Manufacturing**, 32, n. 10, p. 936-959, 2019.

TZIMAS, E.; VOSNIAKOS, G. C.; MATSAS, E. Machine tool setup instructions in the smart factory using augmented reality: a system construction perspective. **International Journal on Interactive Design and Manufacturing**, 13, n. 1, p. 121-136, 2019.

VAN ECK, N.; WALTMAN, L. Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. **scientometrics**, 84, n. 2, p. 523-538, 2010.

VENANZI, D.; DA SILVA, O. R.; HASEGAWA, H. L. Industria 4.0: Study of Multiple Cases in the Industrial Sector of Sorocaba-Sp. **Revista Científica Hermes**, 26, p. 137-156, Jan-Apr 2020. Article.

VILLALONGA, A.; BERUVIDES, G.; CASTANO, F.; HABER, R., 2018, English, **Industrial cyber-physical system for condition-based monitoring in manufacturing processes C3 - Proceedings - 2018 IEEE Industrial Cyber-Physical Systems, ICPS 2018**. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. 637-642. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85050075924&doi=10.1109%2fICPHYS.2018.8390780&partnerID=40&md5=1cdc806a2ee7adb7d7c3b20f66eec540>.

VOISIN, A.; LALOIX, T.; IUNG, B.; ROMAGNE, E. Predictive maintenance and part quality control from joint product-process-machine requirements: application to a machine tool. **Procedia Manufacturing**, 16, p. 147-154, 2018.

WALLS, J. G.; WIDMEYER, G. R.; EL SAWY, O. A. Building an information system design theory for vigilant EIS. **Information systems research**, 3, n. 1, p. 36-59, 1992.

WANG, G.; SHANG, X.; YAN, Y.; ALLEN, J. K. *et al.* A tree-based decision method for the configuration design of reconfigurable machine tools. **Journal of Manufacturing Systems**, 49, p. 143-162, 2018.

WANG, J.; YE, L.; GAO, R. X.; LI, C. *et al.* Digital Twin for rotating machinery fault diagnosis in smart manufacturing. **International Journal of Production Research**, 57, n. 12, p. 3920-3934, 2019.

WANG, L.; TÖRNGREN, M.; ONORI, M. Current status and advancement of cyber-physical systems in manufacturing. **Journal of Manufacturing Systems**, 37, p. 517-527, 2015.

WEGENER, K.; BLEICHER, F.; KRAJNIK, P.; HOFFMEISTER, H. W. *et al.* Recent developments in grinding machines. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, 66, n. 2, p. 779-802, 2017.

WEGENER, K.; GITTLER, T.; WEISS, L. Dawn of new machining concepts:: Compensated, intelligent, bioinspired. Elsevier 2018.

WILSON, P. Prescription for Machine Tool Heart Failure. **Fabricating & Metalworking**. Ohio, Estados Unidos. jan. 2019. Disponível em <<https://www.fabricatingandmetalworking.com/2019/01/prescription-for-machine-tool-heart-failure>> Acesso em: 11 Nov. 2019.

WU, D.; LIU, S.; ZHANG, L.; TERPENNY, J. *et al.* A fog computing-based framework for process monitoring and prognosis in cyber-manufacturing. **Journal of Manufacturing Systems**, 43, p. 25-34, 2017.

XU, H.; YU, W.; GRIFFITH, D.; GOLMIE, N. A survey on industrial Internet of Things: A cyber-physical systems perspective. **IEEE Access**, 6, p. 78238-78259, 2018.

XU, X. Machine Tool 4.0 for the new era of manufacturing. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 92, n. 5-8, p. 1893-1900, 2017.

XU, X.; HUA, Q. Industrial big data analysis in smart factory: Current status and research strategies. **IEEE Access**, 5, p. 17543-17551, 2017.

YANG, C.-Y.; CHANG, Y.-F.; CHENG, C.-W.; SUNG, C.-K., 2018, **Design of an Intelligent Module for Hydrostatic Bearing**. IEEE. 1-4.

YANG, H.; KUMARA, S.; BUKKAPATNAM, S. T.; TSUNG, F. The internet of things for smart manufacturing: A review. **IISE Transactions**, 51, n. 11, p. 1190-1216, 2019.

YIN, R. K. **Estudo de Caso-: Planejamento e métodos**. Bookman editora, 2015. 8582602324.

ZABIŃSKI, T.; MAOCZKA, T.; KLUSKA, J.; MADERA, M. *et al.*, 2019, English, **Condition monitoring in Industry 4.0 production systems - The idea of computational intelligence methods application C3 - Procedia CIRP**. Elsevier B.V. 63-67. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85065396378&doi=10.1016%2fj.procir.2019.02.012&partnerID=40&md5=8bb85919e695f6cd0122639d73c7ab36>.

ZHENG, P.; LIN, T. J.; CHEN, C. H.; XU, X. A systematic design approach for service innovation of smart product-service systems. **Journal of Cleaner Production**, 201, p. 657-667, 2018.

ZHONG, R. Y.; WANG, L.; XU, X. An IoT-enabled real-time machine status monitoring approach for cloud manufacturing. **Procedia CIRP**, 63, p. 709-714, 2017.

ZHONG, R. Y.; XU, X.; KLOTZ, E.; NEWMAN, S. T. Intelligent Manufacturing in the Context of Industry 4.0: A Review. **Engineering**, 3, n. 5, p. 616-630, 2017.

ZHOU, Z. D.; HU, J. M.; LIU, Q.; LOU, P. *et al.* Fog Computing-Based Cyber-Physical Machine Tool System. **Ieee Access**, 6, p. 44580-44590, 2018. Article.

ZHU, K.; ZHANG, Y. A Cyber-Physical Production System Framework of Smart CNC Machining Monitoring System. **IEEE/ASME Transactions on Mechatronics**, 23, n. 6, p. 2579-2586, 2018.

ZIADA, Y.; YANG, J.; DEGROAT-IVES, D. Predicted Machining Dynamics for Powertrain Machining. **Sae International Journal of Passenger Cars-Mechanical Systems**, 10, n. 2, p. 534-540, Jul 2017. Article.

ZUPERL, U.; CUS, F. A CYBER-PHYSICAL SYSTEM FOR SMART FIXTURE MONITORING VIA CLAMPING SIMULATION. **International Journal of Simulation Modelling (IJSIMM)**, 18, n. 1, 2019.

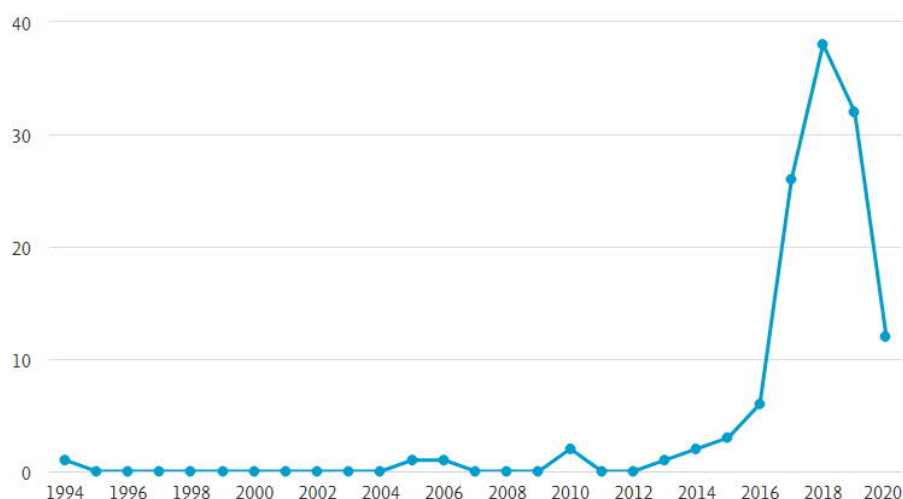
APÊNDICE A – DADOS ADICIONAIS DE REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

Conforme apresentado no capítulo 2, foram encontrados 125 artigos relacionados ao tema proposto. Neste capítulo, será apresentado a medição da literatura bem como uma base da análise de cluster realizado para auxiliar na definição do modelo teórico proposto.

Medição da literatura

Pode-se observar na Figura 39 que na amostra coletada existe um aumento significativo do número de publicações de artigos ao longo dos anos. Considerando o período entre 1994 e 2016 é evidente a baixa publicação relacionada ao tema, tendo 18 artigos publicados em 22 anos. A partir de 2017 existe um crescimento exponencial de artigos publicados, chegando a 26 documentos e no ano seguinte, em 2018 um pequeno crescimento para 38 artigos publicados. Observa-se uma ligeira queda em 2019 chegando em 32 artigos. Em contrapartida, em 2020, até a realização desta revisão, já havia 12 artigos publicados.

Figura 39 - Artigos publicados por ano

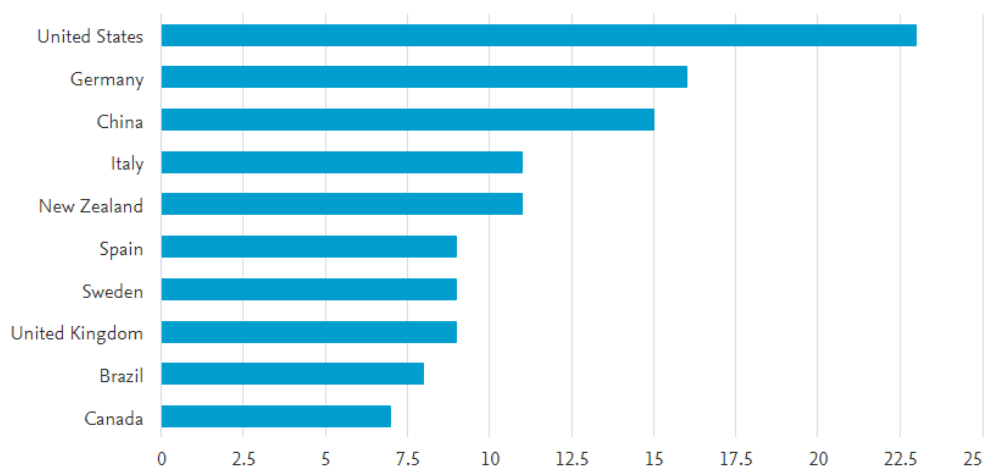


Fonte: Elaborado pelo Autor no Scopus

A análise referente aos autores que publicaram artigos dentro da amostra coletada é apresentada na Figura 40, onde observa-se os Estados Unidos com 23 artigos, enquanto a Alemanha possui 16 e a China possui 15 publicações cada.

Além disso, percebe-se uma internacionalização elevada do tema, uma vez que os outros autores são de 39 países diferentes. O Brasil possui uma representatividade importante com 8 autores nos artigos selecionados.

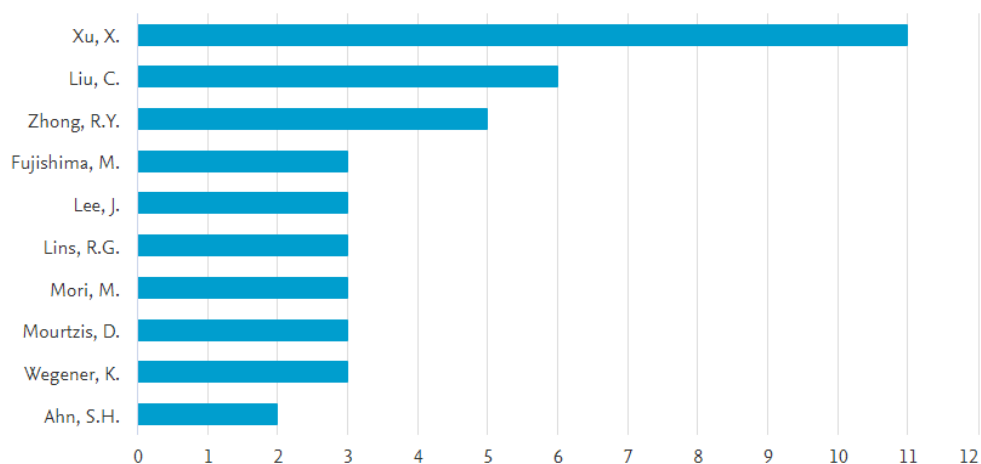
Figura 40 - Países dos autores presentes nas publicações dos artigos



Fonte: Elaborado pelo Autor no Scopus

Os autores que mais aparecem nos artigos selecionados estão listados na Figura 41, com destaque para o Xu, X, Zhong, R.Y. e Liu, C. O Xu, X. apresenta um destaque maior por estarem presentes em outros 12 artigos. Outro destaque é para a dupla Mori, M. e Fujishima, M. que trabalham em conjunto na publicação dos artigos. Os 10 primeiros autores são apresentados na Figura 41.

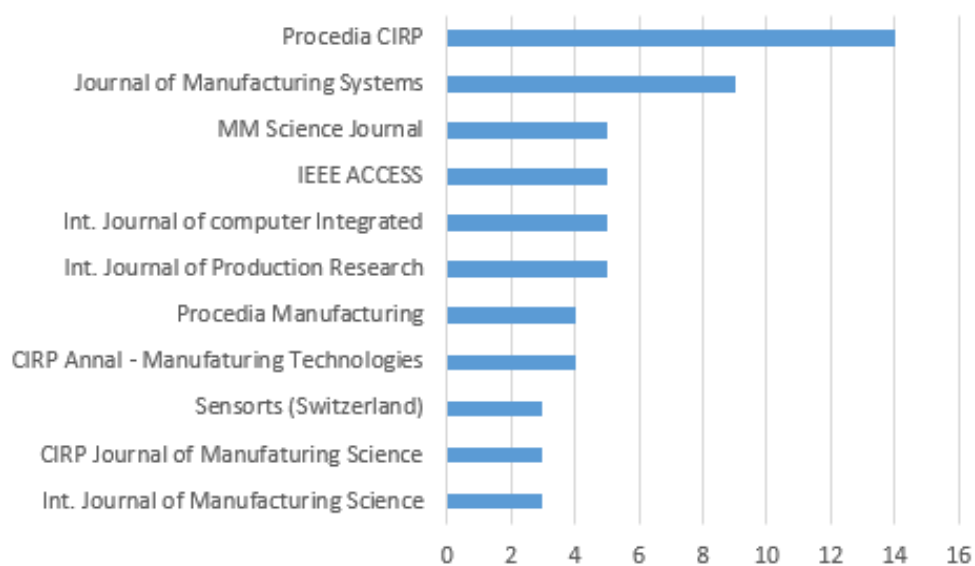
Figura 41 - Autores com mais publicações



Fonte: Elaborado pelo Autor no Scopus

Existem 67 Journals diferentes que publicaram artigos relacionados dentro da amostra. Desta seleção, o Procedia CIRP possui 14 artigos seguido do Journal of Manufacturing System com 9 publicações conforme apresentado na Figura 42. Com 5 artigos estão o International Journal of Computer Integrated Manufacturing, International Journal of Production Research e o IEEE Access. Os 11 primeiros Journals com maior representatividade são apresentados na Figura 42.

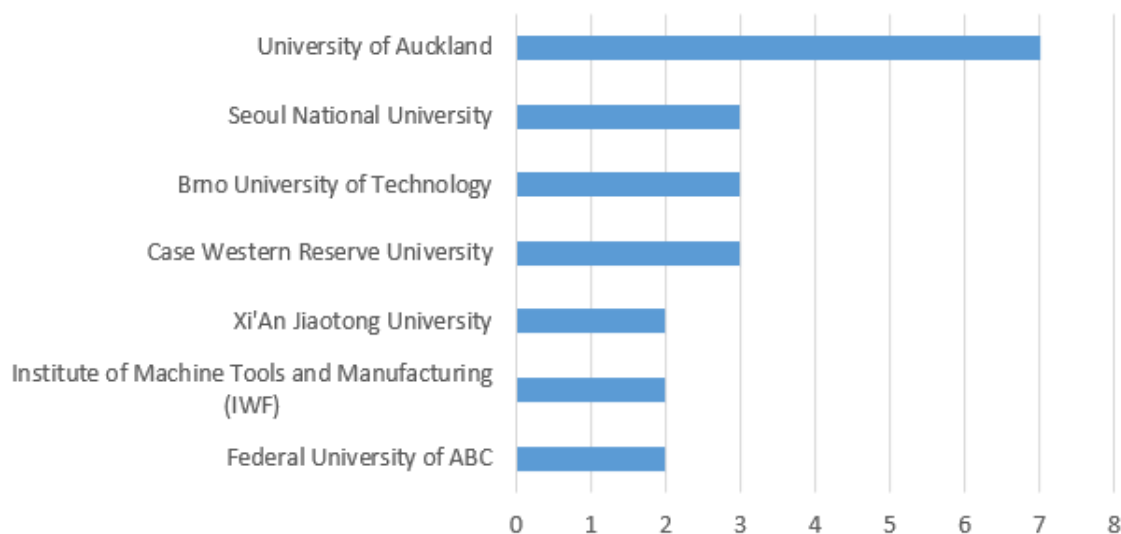
Figura 42 - Journals dos artigos



Fonte: Elaborado pelo Autor

Com relação as afiliações, observa-se a University of Auckland com destaque, onde há 7 documentos publicados sobre o tema seguido pela Seoul National University e Brno University of Technology com 3 documentos cada. Demais afiliações são apresentadas na Figura 43.

Figura 43 - Afiliações dos artigos



Fonte: Elaborado pelo Autor

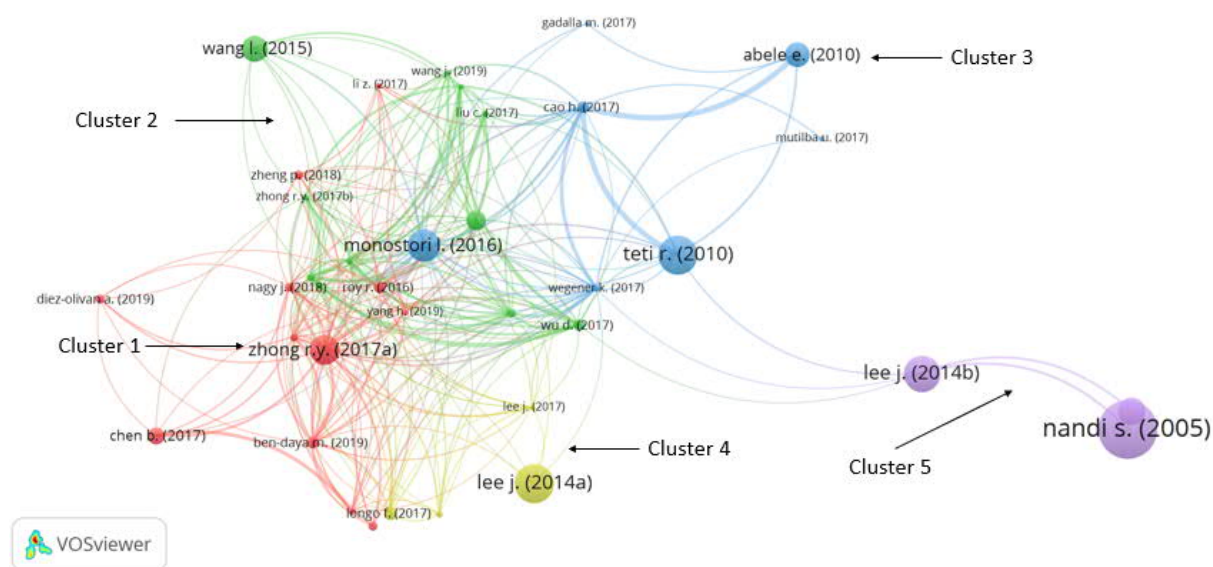
Análise de Redes e clusters

Para realização da análise de redes e clusters foi utilizado o software VOSviewer versão 1.6.15. Os artigos das diferentes bases foram agrupados na base Scopus, onde foi criado um *saved list*. A partir desta lista, foi retirado um arquivo com extensão .csv e assim submetidos para análise no software.

Para criação da Figura 44, foi selecionado no VOSviewer a criação do mapa baseado em dados de bibliografia, seguido da leitura das informações retiradas dos bancos de dados. Neste momento, foi selecionado a opção Scopus seguindo para a seleção do item *Bibliographic Coupling* sendo a unidade de análise *Documents*.

Como há 125 artigos selecionados, foi modificado o número mínimo de citações para 25 sendo que foram disponibilizados 37 documentos para criação da rede apresentada na Figura 44. Nesta figura, observa-se a formação de 5 clusters.

Figura 44 - Análise de Cluster dos Artigos por Citação



Fonte: Extraído VOSViewer (2020)

O cluster 1 possui 12 artigos, o cluster 2 é composto por 11 artigos, já o cluster 3 por 7 documentos, cluster 4 possui 4 documentos e o cluster 5 possui 3 documentos. De forma sintetizada, pode-se mencionar que o Cluster 1 possui artigos com o objetivo de apresentar os conceitos e desafios na implementação da indústria 4.0 em diversos ambientes. O Cluster 2 busca um meio de viabilizar a conexão de dispositivos IoT com os serviços na nuvem, tornando assim viável a integração entre o meio físico e virtual. No Cluster 3 os autores estão relacionados aos conceitos de spindles e máquinas-ferramentas sugerindo possibilidades para torná-los inteligentes. O Cluster 4 apresenta tecnologias para realização de prognósticos e alternativas de como tornar as máquinas autônomas. E por fim, o Cluster 5 foca na identificação da falha, trazendo detalhes dos meios para realização do prognóstico em máquinas-ferramentas.

No cluster 1, o documento mais citado é o de Zhong et. al. (2017a) que tratam de uma revisão da literatura sobre manufatura inteligente e propõem um conceito de indústria 4.0. Chen et. al. (2017) apresentam uma arquitetura para hierarquia da indústria 4.0 considerando cada camada de comunicação entre a internet das coisas industrial e a internet de serviços para a realização de um estudo de caso em um protótipo em laboratório.

Roy et. al. (2016) têm o terceiro mais citado presente no Cluster 1 e desenvolveram uma pesquisa para apresentar os conceitos tradicionais de manutenção com foco na transição e seus desafios para os conceitos da indústria 4.0. Ben-Daya, Hassini e Bahroun (2017) apresentam uma revisão da literatura definindo como utilizar internet das coisas nos processos da cadeia de suprimentos e traz questões de pesquisas relevantes para o desenvolvimento futuro dos métodos de obtenção de dados para o time de manutenção. Zheng *et al.* (2018) desenvolveram uma plataforma de prestação de serviço em nuvem chamada de Smart PSS que trata produtos a serem entregues através de modelo.

Nagy *et al.* (2018) realizaram uma pesquisa em empresas para entender a utilização de internet das coisas nos diferentes conceitos oriundos pela indústria 4.0 bem como sua aplicação em diferentes indústrias/serviços. Deste trabalho, surgem questões importantes de como são vistas as novas tecnologias na visão empresarial. Civerchia *et al.* (2017) desenvolveram um ambiente de IIoT com conjunto de sensores (IoT) para captação de dados via wi-fi e com transmissão para dashboards na nuvem.

Diez-Olivan *et al.* (2019) realizam uma revisão da literatura sobre aprendizagem de máquina para realização de prognósticos em diferentes tipos de máquinas classificando-as pelo tipo de manutenção e algoritmo. Xu et. al. (2018) apresentam uma pesquisa sobre a internet das coisas industrial com foco no desenvolvimento de sistemas ciberfísicos. Com isso indicam possibilidades de arquitetura para a conectividade de dispositivos IoT. Xu e Hua (2017) apresentam uma revisão e estudos recentes sobre a big data industrial com o objetivo de desenvolver as tecnologias chaves para aplicação da análise de dados em uma smart factory.

Li *et al.* (2017) desenvolveram uma arquitetura para mineração dos dados extraídos de máquinas-ferramentas para decisões de manutenção preditiva. Yang *et al.* (2019) relatam sobre internet das coisas para uma fábrica inteligente onde tratam de uma revisão da literatura indicando as principais plataformas existentes bem como aplicações e arquiteturas existentes.

No cluster 2, o artigo mais citado é do Wang, Törngren, and Onori (2015) apresentam um estudo relacionado ao futuro dos sistemas ciberfísicos em fábricas

baseados no conceito de manufatura na nuvem. Esmaelian, Behdad e Wang (2016) vinculam os principais avanços nos sistemas de manufatura como tecnologias no processo produtivo, aspectos de planejamento, design de manufatura, remanufatura, manufatura sustentável, novos paradigmas na produção oriundas da Indústria 4.0 e manufatura avançada.

Wu *et al.* (2017) desenvolveram um protótipo para criação de uma arquitetura de sistema ciberfísico utilizando fog computing com objetivo de transmitir dados via Arduino e ZigBee. Xu (2017) desenvolve um conceito de máquina-ferramenta na indústria 4.0 sugerindo uma arquitetura para integração a um sistema ciberfísico além de apresentar uma evolução das máquinas ao longo da evolução. Liu *et al.* (2017) trabalharam no desenvolvimento de um sistema chamado *Cyber Physical Manufacturing Clouds* (CPMC) para controle remoto de máquinas-ferramentas.

Liu e Xu (2017) estendem o conceito apresentado por Xu (2017) buscando um sistema ciberfísico para integração de máquina-ferramenta 4.0. Lu e Xu (2018) criam uma estrutura simples para integração do ambiente físico para o ambiente virtual obtendo uma *digital twin* para arquitetura de uma *smart factory*. Liu *et al.* (2018) desenvolvem uma metodologia para um sistema ciberfísico utilizando MTConnect como meio de comunicação entre máquina e ambiente virtual. Zhong, Wang e Xu (2017) apresentam uma arquitetura para comunicação em tempo real de dispositivos IoT.

Wang *et al.* (2019) indicam um modelo preliminar de *digital twin* com foco na identificação de falhas como um desbalanceamento em um rotor de motor remotamente. Caggiano (2018) apresenta um modelo de monitoramento remoto da condição da ferramenta de corte em um torno CNC identificando possíveis falhas deste componente.

No cluster 3 o documento mais citado é o Teti, Jemielniak e O'Donnell (2010) apontam uma revisão sobre as principais tecnologias de sensoriamento, processamento de sinal e análise de dados. Monostori *et al.* (2016) indicam a aplicação dos sistemas ciberfísicos na produção, também chamado de CPPS e quais as tendências no desenvolvimento da indústria 4.0.

Abele, Altintas e Brecher (2010) apresentam o estado da arte de spindles, relatando cada componente e as possibilidades na construção de um spindle. Cao,

Zhang e Chen (2017) relatam sobre o conceito de spindle inteligente para a captação do maior número possível de dados através de sensores dispostos internamente durante sua fabricação.

Wegener *et al.* (2017) trazem tendências do processo de retificação através de revisão da literatura. Mutilba *et al.* (2017) realizam uma avaliação de fontes de incertezas em máquinas-ferramentas com foco em erros geométricos para minimizar possíveis falhas. Gadalla e Xue (2017) desenvolveram uma revisão da literatura referente reconfiguração de máquinas-ferramentas pensando em alteração do tipo de usinagem em uma mesma máquina.

No cluster 4, o artigo com maior número de citações é o Lee *et al.* (2014) que desenvolveram uma concepção de máquinas autoconsciente e com automanutenção com utilização de prognósticos. Longo, Nicoletti e Padovano (2017) apontam o Sophos-MS como um software para integração entre o ambiente físico e o ambiente virtual através de realidade aumentada para auxílio em treinamentos e manutenção.

Luo *et al.* (2019) desenvolveram o *CNC machine tool (CNCMT) com Digital Twin machine tool (DTMT)* para integração das máquinas nas *smart factories*. Lee, Jin e Bagheri (2017) desenvolveram um sistema para prognóstico de falhas por meio de um sistema ciberfísico e aplicaram em guias lineares para validação do modelo.

No cluster 5, o documento mais citado é do Nandi, Toliyat e Li (2005) que apresentam um trabalho focado na identificação de falhas por análise de vibração com os gráficos típicos de cada falha. Lee *et al.* (2014) realizaram uma revisão da literatura sobre prognósticos com utilização de diferentes algoritmos. Já Lee *et al.* (2006) desenvolveram o software Watchdog AgentTM para realização de prognóstico de máquinas-ferramentas.

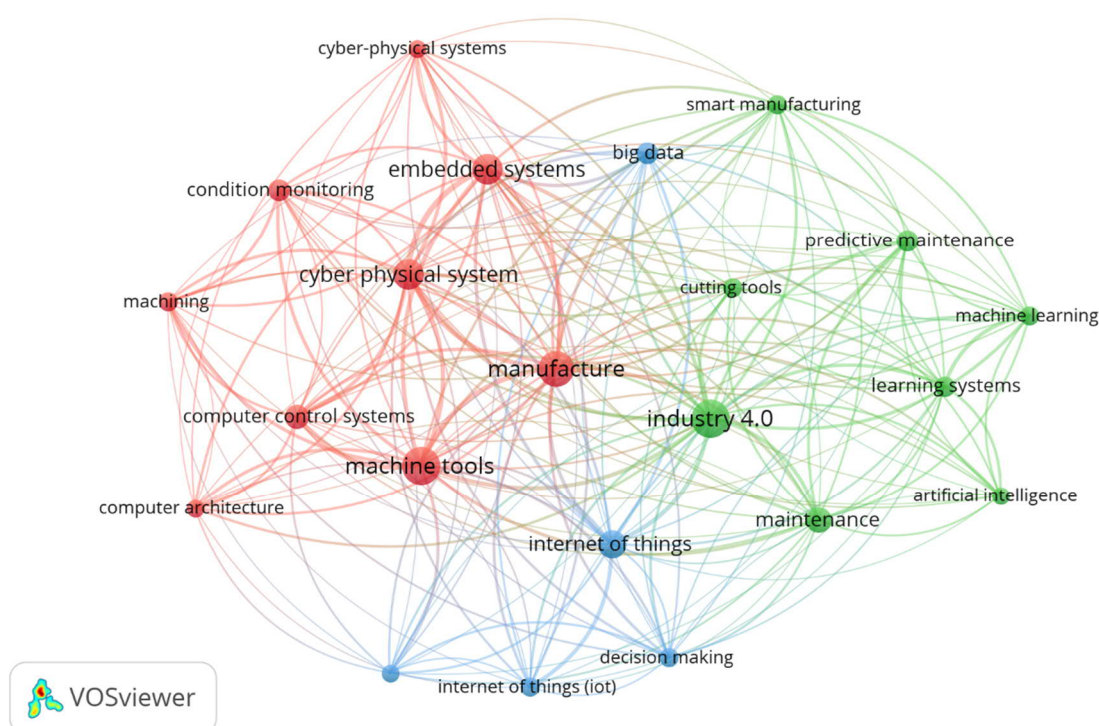
Ocorrência de Palavras-Chave

Para realização da análise de ocorrência de palavras-chave, foi utilizado o software VOSviewer versão 1.6.15. Os artigos das diferentes bases foram agrupados na base Scopus, onde foi criado um *saved list*. A partir desta lista, foi retirado um arquivo com extensão .csv e assim submetidos para análise no software.

Para criação da Figura 45, foi selecionado no VOSviewer a criação do mapa baseado em dados de bibliografia, posteriormente a leitura de dados retirados dos bancos de dados, selecionado a opção Scopus, conforme realizado para análise de documentos e autores. Posteriormente foi selecionado a opção *Co-occurrence* e *All Keyowrds*.

Automaticamente o software apresenta um total de 1070 palavras indicando que 58 possui no mínimo 5 ocorrências das palavras-chaves. Para conseguir ter uma visão melhor da análise, foi alterado para 10 o número mínimo de ocorrências. Desta forma, foi obtido o número de 22 palavras-chaves que é apresentada na Figura 45.

Figura 45 - Rede de Ocorrência de Palavras



Fonte: Extraído VOSViewer (2020)

Observa-se a formação de 3 cluster sendo que *Machine Tools* e *Industry 4.0* possuem 47 ocorrências cada e a *Internet of Things* possui 25 ocorrências. Analisando as palavras-chaves oriundas do grupo *Machine Tools*, entende-se que a amostra utilizada busca meios de integração da máquina-ferramenta com demais

tecnologias sendo desenvolvidas. Nesta questão, é possível visualizar as palavras *cyber physical systems*, *embedded systems* e *computer control systems* com destaque nesta rede.

No grupo de palavras guiadas por *Industry 4.0*, verifica-se uma ligação direta da palavra *maintenance* e *predictive maintenance* com as novas tecnologias ligadas a aprendizagem de máquina. Desta forma, visualiza-se as palavras *learning systems*, *artificial intelligence* e *machine learning* como destaque para análise.

Já no grupo de *Internet of things* é possível notar que existe também a utilização de sua sigla IoT como meio para representar essa palavra. Além disso, a ligação direta com *decision making* e *big data* demonstra a necessidade de não só coletar dados, mas desenvolver uma inteligência para que não se tenha apenas uma infinidade de dados e sim os utilize para facilitar as decisões dos times de manutenção.

APÊNDICE B – MODELOS DE INDÚSTRIA 4.0 EM MÁQUINAS-FERRAMENTAS IDENTIFICADOS NA REVISÃO DA LITERATURA

Tabela 6 - Modelos de Indústria 4.0 em máquinas-ferramentas identificadas na revisão da literatura

Autor	Contexto	Comentários do Modelo
Lee et al. (2006)	Prognósticos	Watchdog Agent™ para realização de prognóstico de máquinas
Abele, Altintas e Brecher (2010)	Spindle	Estado da Arte de spindles
Teti, Jemielniak e O'Donnell (2010)	Sensores	Revisão sobre as principais tecnologias de sensoriamento, processamento de sinal e análise de dados
Mori e Fujishima (2013)	Monitoramento da Condição	Sistema de monitoramento remoto MAPPS de máquinas-ferramentas Mori Seiki
Lee et al. (2014)	Manutenção Autônoma	Concepção de máquinas autoconsciente e com automanutenção com utilização de prognósticos
Lee et al. (2014)	Prognósticos	Revisão da literatura sobre Prognósticos com utilização de diferentes algoritmos
Janak e Hadas (2015)	Identificação de falhas	Análise de vibração para identificação de falhas em rolamentos
Lin, Lin e Chiu (2015)	Aquisição de dados	Serviço de monitoramento remoto com utilização de computação na nuvem (ServBox)

Tabela 6 - Modelos de Indústria 4.0 em máquinas-ferramentas identificadas na revisão da literatura (Continuação)

Autor	Contexto	Comentários do Modelo
Esmaelian, Behdad e Wang (2016)	Sistemas de Manufatura	Vinculado os principais avanços nos sistemas de manufatura como Tecnologias no processo produtivo, Aspectos de Planejamento, Design de manufatura, Remanufatura, Manufatura Sustentável, Novos paradigmas na produção oriundas da Indústria 4.0 e Manufatura avançada
Fujishima et al. (2016)	Monitoramento da Condição	Detalhamento de como extrair os dados das máquinas-ferramentas Mori Seiki com utilização de protocolos desenvolvidos
Janak et al. (2016)	Identificação de falhas	Método para identificação de falhas em máquinas-ferramentas com foco na ferramenta de corte
Roy et al. (2016)	Manutenção	Conceitos de tradicionais manutenções e futuros desafios na área com propostas para indústria 4.0
Attanasio (2017)	Métodos de medição	Medição indireta de run-out de ferramentas que podem ser integradas em <i>smart factories</i>
Ayad, Terrissa e Zerhouni (2017)	Integração de dados	Arquitetura para implantação de coleta de dados utilizando computação na nuvem e dashboards
Cao, Zhang e Chen (2017)	Sensores	Conceito de spindle inteligente para a captação do maior número possíveis de dados através de sensores dispostos internamente.
Diaz-Rozo, Bielza e Larranaga (2017)	Análise de dados	Extração de dados de driver da máquina-ferramenta e utilização dos dados nos algoritmos <i>K-means clustering</i> , <i>Agglomerative hierarchical clustering</i> e <i>Gaussian mixture model clustering</i> para verificar possibilidade de utilizá-los para identificar falhas

Tabela 6 - Modelos de Indústria 4.0 em máquinas-ferramentas identificadas na revisão da literatura (Continuação)

Autor	Contexto	Comentários do Modelo
Civerchia et al. (2017)	Sensores	Criação de ambiente IIoT com conjunto de sensores (IoT) wi-fi para captação de dados e transmissão para dashboard na nuvem
Gadalla e Xue (2017)	Sistemas de Manufatura	Revisão da literatura referente reconfiguração de máquinas-ferramentas
Holub e Hammer (2017)	Sensores	Comparação entre a medição offline e online de vibração
Kamp, Ochoa e Diaz (2017)	Modelos de Negócios	Modelo de negócio baseado na entrega de performance no ambiente produtivo com a aplicação de conceitos de <i>smart factory</i> provida por um prestador de serviço
Li et al. (2017)	Integração de dados	Arquitetura para mineração dos dados extraídos de máquinas-ferramentas para decisões de manutenção preditiva
Lins et al. (2017)	Integração de dados	Arquitetura para <i>retrofitting</i> de máquinas-ferramentas incorporando conceitos da indústria 4.0
Liu e Xu (2017)	Sistemas Cyber Físicos	Conceito de sistema cyber físico com integração de máquina-ferramenta 4.0

Tabela 6 - Modelos de Indústria 4.0 em máquinas-ferramentas identificadas na revisão da literatura (Continuação)

Autor	Contexto	Comentários do Modelo
Liu et al. (2017)	Sistemas Cyber Físicos	Desenvolvimento de um sistema chamado <i>Cyber Physical Manufacturing Clouds</i> (CPMC) para controle remoto de máquinas-ferramentas
Longo, Nicoletti e Padovano (2017)	Realidade Aumentada	Sophos-MS desenvolvido para integração entre o físico e o virtual através de realidade aumentada para auxílio em treinamentos e manutenção
Fujishima et al. (2017)	Monitoramento da Condição	Integram os dados dentro da própria máquina ferramenta provendo uma visualização mais amigável no próprio IHM da máquina dos mesmos sensores aplicados em Fujishima et al (2016)
Engeler et al. (2017)	Monitoramento da Condição	Desenvolvimento de uma metodologia para utilização de dados do PLC da máquina para monitoramento da condição
Ben-Daya, Hassini e Bahroun (2017)	Internet da Coisas	Revisão da literatura definindo como utilizar internet das coisas nos processos da cadeia de suprimentos
Mosyurchak et al. (2017)	Prognósticos	Desenvolvimento de modelo de prognóstico para detecção de falha em spindles
Mutilba et al. (2017)	Sistemas de Manufatura	Avaliação de fontes de incertezas em máquinas-ferramentas com foco em erros geométricos
Rastegari, Archenti e Mobinet (2017)	Monitoramento da Condição	Monitoramento da condição de spindle
Zhong, Wang e Xu (2017)	Sistemas Cyber Físicos	Revisão sobre manufatura inteligente propondo o conceito de indústria 4.0
Wegener et al. (2017)	Sistemas de Manufatura	Tendências do processo de retificação através de revisão da literatura
Wu et al. (2017)	Sistemas Cyber Físicos	Protótipo para criação de uma arquitetura de sistema cyber físico utilizando Fog Computing com objetivo de transmitir dados via Arduino e ZigBee

Tabela 6 - Modelos de Indústria 4.0 em máquinas-ferramentas identificadas na revisão da literatura (Continuação)

Autor	Contexto	Comentários do Modelo
Xu (2017)	Sistemas Cyber Físicos	Conceito de máquina-ferramenta na indústria 4.0 sugerindo uma arquitetura para integração a um sistema cyber físico
Ziada, Yang e DeGroat-Ives (2017)	Monitoramento da Condição	Identificação de esforços na ferramenta durante a usinagem de um novo componente de powertrain
Bi et al (2018)	Sensores	Sensores de baixo custo para medição da força de fixação de braços de robôs
Caggiano (2016)	Sensores	Monitoramento remoto da condição da ferramenta de corte em um torno CNC
Canizares e Valero (2018)	Internet da Coisas	Análise das vantagens de aplicação da internet das coisas em uma indústria metalmeccânica
Chang, Lee e Liu (2018)	Inteligência Artificial	Revisão da literatura em modelos aplicados em máquinas-ferramentas utilizando inteligência artificial
Deng et al. (2018)	Análise de dados	Redução do consumo de energia de sensores wireless através da utilização de algoritmos para otimização na coleta de dados
Deng et al. (2018)	Integração de dados	Utilização de protocolos de CNC aberto (Open CNC) para integração em sistemas cyber físicos
Mourtzis, Milas e Athinaios (2018)	Integração de dados	Modelo utilizando OPC-UA para comunicação entre diferentes máquinas
EIMoaqet et al. (2018)	Aquisição de dados	Modelo de Transmissão de dados para ambiente na nuvem

Tabela 6 - Modelos de Indústria 4.0 em máquinas-ferramentas identificadas na revisão da literatura (Continuação)

Autor	Contexto	Comentários do Modelo
Frieß et al. (2018)	Aprendizagem de máquina	Utilização de Fuzzy-Clustering para identificar falhas em máquinas-ferramentas para utilização no monitoramento da condição
Gavilanes-Trapote et al. (2018)	Patentes I 4.0	Análise de patentes relacionadas a máquinas-ferramentas e indústria 4.0
Demilia et al. (2018)	Monitoramento da Condição	Deteção de falha utilizando sensores de vibração e emissão acústicas em retíficas
Hassan et al. (2018)	Monitoramento da Condição	Monitoramento da condição para deteção de falha em ferramentas de corte com emissão acústica
José Álvares, Oliveira e Ferreira (2018)	Sistemas Cyber Físicos	CyberDNC web system para integração de um torno CNC convencional em um ambiente virtual através do MTConnect e OPC-UA onde poderá ser monitorado remotamente
Lee et al. (2018)	Manutenção	Avalia as diferentes técnicas de captação de dados com o objetivo de definir o PHM (<i>Prognostics and Health Management</i>) como estratégia de manutenção para indústria 4.0
Lenz, Wuest e Westkämper (2018)	Análise de dados	Indica um modelo com visão holística da máquinas-ferramentas para a análise dos dados extraídos
Liao, Loures and Deschamps (2018)	Internet da Coisas	Revisão da Literatura sobre Industrial Internet das Coisas (IIoT)
Liu et al. (2018)	Sistemas Cyber Físicos	Metodologia para desenvolvimento de um sistema cyber físico utilizando MTConnect

Tabela 6 - Modelos de Indústria 4.0 em máquinas-ferramentas identificadas na revisão da literatura (Continuação)

Autor	Contexto	Comentários do Modelo
Lu e Xu (2018)	Digital Twin	Criação de um <i>Framework</i> simples para integração do ambiente físico para o ambiente virtual obtendo uma <i>Digital Twin</i> para arquitetura de uma <i>Smart Factory</i>
Bengtsson e Lundström (2018)	Manutenção	Combinação de métodos tradicionais de manutenção com tecnologias da indústria 4.0
Mourtzis, Milas e Vlachou (2018)	Sensores	Sistema para captação de dados de potência elétrica do spindle especificando suas fases durante o processo de usinagem
Nagy et al (2018)	Internet da Coisas	Verifica a utilização de internet das coisas nos diferentes conceitos trazidos pela indústria 4.0 bem como sua aplicação em diferentes indústrias/serviços
Nunez e Borsato (2018)	Prognósticos	OntoProg para realização de prognósticos em equipamentos mecânicos através de uma modelo baseado em ontologia
Zheng et al. (2018)	Modelos de Negócios	Smart PSS - Produto entregues como uma prestação de serviço através de plataforma na nuvem
Sadasivam, Archenti e Sandberg (2018)	Monitoramento da Condição	Modelo de servitização para aumento da vida útil de componentes de máquinas-ferramentas
Villalonga et al. (2018)	Aprendizagem de máquina	Utilização de combinação de algoritmos para aprendizagem de máquina para prevenção em falha de rolamentos
Wang et al. (2019)	Sistemas de Manufatura	Metodologia para reconfiguração de uma mesma máquina-ferramenta (RMT) para diferentes operações
Chiang et al. (2018)	Sensores	Sensor Piezoelétrico para detecção de falhas em spindles

Tabela 6 - Modelos de Indústria 4.0 em máquinas-ferramentas identificadas na revisão da literatura (Continuação)

Autor	Contexto	Comentários do Modelo
Zhou et al. (2019)	Sistemas Cyber Físicos	Desenvolvimento do FC-CPMTS que é uma nova arquitetura para integração do físico com o virtual
Zhu e Zhang (2018)	Sistemas Cyber Físicos	<i>Framework</i> de um sistema cyber físico (CPPS) para Monitoramento de máquinas inteligentes
Adu-Amankwa et al. (2019)	Manutenção	DNC PdM - Modelo para monitoramento e manutenção de máquinas-ferramentas em pequenas empresas
Belli et al. (2019)	Smart Factory	SmartFactory e SmartPlanner: migração do modelo convencional de produção para utilização de ferramentas na Web, com informação em tempo real.
Carvalho et al. (2019)	Aprendizagem de máquina	Revisão da literatura apresentando as principais técnicas de <i>Machine Learning</i> para manutenção preditiva
Diez-Olivan et al. (2019)	Aprendizagem de máquina	Revisão da literatura sobre aprendizagem de máquina para realização de prognósticos em diferentes tipos de máquinas classificando-as pelo tipo de manutenção e algoritmo
Giraldo-Castrillon, Paramo-Bermudez e Munoz-Betancur (2019)	Internet das coisas	Utilização de sensores (IoT) e computação na nuvem para definição de custo de processos

Tabela 6 - Modelos de Indústria 4.0 em máquinas-ferramentas identificadas na revisão da literatura (Continuação)

Autor	Contexto	Comentários do Modelo
Gopalakrishnan et al. (2019)	Manutenção	Identifica os fatores para tomada de decisão da manutenção que podem contribuir para melhor desempenho de máquinas críticas
Hill et al. (2019)	Monitoramento da Condição	Detecção de falha em máquinas através de modelos de desgaste da ferramenta e dados do sistema como consumo de energia
Cao, Kang e Chen (2019)	Monitoramento da Condição	Teste de análise de spindle baseado em ruído
Hoppenstedt et al. (2019)	Realidade Mista	Utilização de algoritmos para realização de realidade mista em sistemas de manufatura aditiva
Kim et al. (2019)	Monitoramento da Condição	KEM - Captação de dados do HMI através de uma <i>web cam</i> e disponibilização em dashboards
Kowalski e Zawadzki (2019)	Sistemas de Manufatura	Utilização do conhecimento de CNC para aplicação no desenvolvimento de programas diretamente no CAM
LaCasse, Otieno e Maturana (2019)	Big data	Revisão da literatura relacionadas ao modelo de coleta de dados em diferentes indústria e aplicações
Li et al. (2019)	Inteligência Artificial	<i>Green Monitor Project</i> desenvolvido para coleta de dados de máquinas-ferramentas, utilização de algoritmos para desenvolvimento manutenção cognitiva

Tabela 6 - Modelos de Indústria 4.0 em máquinas-ferramentas identificadas na revisão da literatura (Continuação)

Autor	Contexto	Comentários do Modelo
Luo et al. (2019)	Digital Twin	<i>CNC machine tool</i> (CNCMT) com <i>Digital Twin machine tool</i> (DTMT) para integração das máquinas nas <i>smart factories</i>
Mohindru, Mondal e Banka (2019)	Internet das coisas	Revisão da literatura sobre aplicação de internet das coisas e análise de dados
Legault et al. (2019)	Modelos de Negócios	Avaliação de mercado através de utilização de análise multicritério (TOPSYS) para determinação de aplicação de projetos <i>turnkey</i> ou soluções especializadas em pequenas empresas
Sanghavi, Parikh e Raj (2019)	Implantação I 4.0	Arquitetura para implantação da indústria 4.0
Shamsuzzoha et al. (2019)	Realidade Aumentada	Desenvolvimento de <i>framework</i> para Realidade Aumentada para utilização de treinamentos e manutenção
Shivajee, Singh e Rastogi (2019)	Qualidade ou Digitalização	Redução de custo através de aplicação de ferramentas da qualidade e digitalização dos dados
Thoppil, Vasu e Rao (2019)	Análise de falha	Definição do componente crítico da máquina-ferramenta com objetivo de direcionar a instalação de sensores para manutenção preditiva
Zabiński et al. (2019)	Prognósticos	Método utilizando CNN para detecção de desbalanceamento de ferramentas
Tugengol'd et al. (2019)	Digital Twin	Modelo de <i>digital twin</i> para digitalização da máquina-ferramenta e manutenção autônoma
Turner et al. (2019)	Prognósticos	Modelo de identificação de falhas para trilhos de trem
Tzimas, Vosniakos e Matsas (2019)	Realidade Aumentada	Realidade aumentada com auxílio da plataforma Unit 3D tm para setup de máquinas

Tabela 6 - Modelos de Indústria 4.0 em máquinas-ferramentas identificadas na revisão da literatura (Continuação)

Autor	Contexto	Comentários do Modelo
Wang et al. (2019)	Digital Twin	Preliminar modelo de <i>digital twin</i> com foco na identificação de falhas como um desbalanceamento em um rotor de motor
Lee et al. (2019)	Inteligência Artificial	Manutenção preditiva baseado em inteligência artificial utilizando dados da ferramenta de corte e motor do spindle
Aransyah, Rosa e Colombo (2020)	Realidade Aumentada	AR-CMMS - Realidade aumentada para atividades de manutenção
Prathima, Sudha e Suresh (2020)	Sistemas Cyber Físicos	Sistema de monitoramento de dados de produção de máquinas CNC com foco em OEE (<i>Overall equipment effectiveness</i>)
Cao et al. (2020)	Prognósticos	Algoritmo para integração de dados com regras pré-estabelecidas para refinamento da base de conhecimento
Jeon et al. (2020)	Digital Twin	SMTS - <i>Smart Machine Tool System</i> para criação de uma <i>digital twin</i> com o objetivo do zero defeito e zero parada de máquina
Jimenez-Cortadi et al. (2020)	Monitoramento da Condição	Aplicação de algoritmos para realização de manutenção preditiva baseada na produção de peças
Lins, de Araujo e Corazzim (2020)	Monitoramento da Condição	Desenvolvimento de arquitetura descentralizada de sistema cyber físico para determinação do desgaste de ferramentas de corte
Liu et al. (2020)	Integração de dados	Aquisição de dados em diferentes NC, porém com foco em Siemens para utilização em único software de gerenciamento com dados em tempo real

Tabela 6 - Modelos de Indústria 4.0 em máquinas-ferramentas identificadas na revisão da literatura (Continuação)

Autor	Contexto	Comentários do Modelo
Mittal et al. (2020)	Modelos de Negócios	Aplicação de tecnologias da indústria 4.0 em pequenas empresas
Romeo et al. (2020)	Aprendizagem de máquina	Desenvolvimento do DeSS que utiliza inteligência artificial para identificação de falhas
Ruiz-Sarmiento et al. (2020)	Aprendizagem de máquina	Projeto SiMoDiM para realização de prognósticos em laminação à quente
Venanzi, Silva e Hasegawa (2020)	Indústria 4.0	Pesquisa exploratória sobre implantação da indústria 4.0 em empresas na região de Sorocaba-SP

Fonte: Elaborado pelo Autor

ANEXO 1 – DECLARAÇÃO DA EMPRESA

DocuSign Envelope ID: 328B06C1-6821-4200-9D87-971B7B194944



DECLARAÇÃO

O colaborador Thyago Bachim, CPF 348.177.808-27 sobre o registro 201955-0 realizou a sua pesquisa de dissertação de mestrado na Universidade Nove de Julho - UNINOVE com o conhecimento da SKF do Brasil Ltda. o qual utilizou a estrutura tecnológica da empresa, para demonstrar através da pesquisa os resultados alcançados baseados nos objetivos propostos. Neste sentido, o colaborador poderá publicar a dissertação mencionando os sistemas da SKF para realização da pesquisa.

Atenciosamente,

DocuSigned by:
Alex Rodrigo Pereira

272D4BDDACD41C...

Alex R. Pereira
Gerente de Vendas de Tecnologias